



www.viserdata.com

工程施工技术

ENGINEERING CONSTRUCTION TECHNOLOGY

月刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 2972-4058(online) 2972-404X(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

2025 12

第3卷 总第29期

COMPANY INTRODUCTION

公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd.)成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



工程施工技术

Engineering Construction Technology

2025年·第3卷·第12期(总第29期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 2972-4058 (online)

2972-404X (print)

发行周期: 月刊

出版时间: 12月

数据库收录: 中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

期刊网址: www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱: viser-tech@outlook.com

地址: 195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,

Singapore 168976

学术主编: 朱 强

学术副主编: 魏 忠 高 江

责任编辑: 戚 滕

学术编委: 倪勤盛 陈 鹏 王子红 张耕野

侯明卫 刘 刚 赵 欢 王海军

王永华 洪秋生 刘汉涛 钱 冰

吉咸伟 杨熠卿 宋世超 张 聪

美工编辑: 李 亚 Anson Chee

定 价: SGD 20.00

本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点; 作者文图责任自负, 如有侵犯他人版权或者其他权利的行为, 本刊概不负连带责任。

版权所有, 未经许可, 不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人: 稿件凡经本刊使用, 如无电子版或书面的特殊声明, 即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

目 录

CONTENTS

建筑工程

房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点分析.....

..... 李思锐 1

装配式混凝土结构连接设计优化与抗震性能研究.....

..... 李月肖 5

数字孪生技术赋能建筑设计全过程创新..... 赵 静 8

谈建筑结构抗连续倒塌设计方法与数值模拟研究.....

..... 王 江 11

市政工程

城镇燃气老旧设备设施更新改造技术方案与实践研究.....

..... 张军锋 14

市政工程施工概预算与竣工结算的差异分析及管控措施.....

..... 吴领领 17

工程管理

现代信息技术与建筑工程项目管理的深度融合实践.....

..... 温 萌 莫莹洁 20

BIM 技术在暖通工程施工全过程管理中的应用与实效分析.....

..... 刘 贺 23

长输管道维抢修作业安全管理路径研究.....

..... 金天保 孙 超 王 贺 26

施工技术

软土路基原位固化施工工艺与工程性能研究——以无锡

钱胡快速路项目为例.....

..... 陈 磊 於 亮 夏 涛 刘文化 29

岩溶地层新型双模盾构选型及掘进适应性评价研究.....

..... 石红伟 34

新时期建筑施工技术及施工现场管理对策浅析.....

..... 陈海彬 40

水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术应用分析.....

..... 邝旺旺 44

超早强流态固化土力学性能与施工工艺研究——以无锡

通江大道快速化改造项目为例.....

..... 过 彬 陆朝新 夏 涛 48

石油化工

- 化工管道的阻力计算与管径优化设计..... 魏华兵 52
深层页岩气储层压裂裂缝导流能力模拟研究现状.....
.....黎文昊 严树资 胡颂贤 王佳兴 56
化工管道系统的防腐蚀设计与应用..... 王海城 61
化工过程自动化控制系统的本质安全设计与容错能力提
升..... 黄云飞 64

节能环保

- 工业园区“废水-废气-固废”循环利用技术模式及低碳转
型..... 王 斌 67

机电机械

- 智能自动化在化工仪表中的应用研究..... 卓 迪 72
压力表检定中常见问题及改进措施研究..... 杨 露 75
化工装置主控侧仪表系统运行可靠性研究..... 先 杰 78
阀门内流场压力损失分析及结构优化设计..... 王晓峰 81

- 调节阀定位器基本工作原理与输出非线性误差分析.....
..... 何健华 84
压力表计量检定方法与精度控制研究..... 叶小芳 87

能源矿业

- 高硫高砷有色金属矿的生物选矿技术探讨..... 侯君一 90

建筑设计

- 城市公园景观设计的人性化优化策略..... 李 毅 94
老旧建筑改造中的设计创新研究..... 李心田 程 浩 97
建筑设计中自然采光与节能策略研究.....
..... 侯皞冉 郭瑞刚 100
基于“三生融合”的乡村聚落建筑空间重构设计研究.....
..... 李玉鹏 104
传统营造技艺与现代建筑技术的融合..... 贾 娟 108
谈智能化技术在建筑设计中的应用与展望..... 康少存 112

房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点分析

李思锐

邯郸市城投房地产开发有限公司, 河北 邯郸 056000

[摘要] 渗漏问题在房屋建筑工程施工里一直是个棘手难题, 地下室地板、屋顶、外墙还有卫生间这些地方老出状况。要想把渗漏控制住, 施工单位得持续琢磨创新, 把以前的经验好好总结总结, 在防水设计开始的时候就做好规划, 从施工到材料管理再到质量检验, 各个环节都得严格把控。只有建立起科学规范的操作流程, 才能真正防止渗漏出现, 保证房屋工程施工的质量和后续使用的可靠性。

[关键词] 房屋建筑工程; 防渗漏施工技术; 技术关键点; 技术分析

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18634 中图分类号: TU761 文献标识码: A

Analysis of Key Points in Anti-leakage Construction Technology for Building Construction Projects

LI Sirui

Handan Urban Investment Real Estate Development Co., Ltd., Handan, Hebei, 056000, China

Abstract: The problem of leakage has always been a thorny issue in the construction of housing projects, with problems occurring in areas such as basement floors, roofs, exterior walls, and bathrooms. To control leakage, the construction unit needs to continue to innovate and summarize previous experience. From the beginning of waterproof design, planning should be done, and every link from construction to material management to quality inspection must be strictly controlled. Only by establishing scientific and standardized operating procedures can leakage be truly prevented, ensuring the quality of building construction and the reliability of subsequent use.

Keywords: building construction engineering; anti-leakage construction technology; technical key points; technical analysis

引言

房屋建筑工程的防渗漏施工技术在保障建筑物结构安全、延长其使用寿命以及提高居住与使用的舒适性方面起着极为重要的作用。就现代建筑而言, 其功能正变得日益多样化且趋向于高标准化, 在此背景下, 建筑物在长时间使用期间所面临的水害风险也在不断增大。渗漏问题一旦出现, 不但会造成结构受到损伤、材料发生老化、墙体以及屋面出现潮湿等情况, 而且还有可能致使霉菌滋生、电气设备遭到损坏以及室内环境变差, 最终对建筑的整体质量以及使用性能产生影响。所以, 全面且细致地去分析并掌握防渗漏施工技术的关键点, 对于保证建筑的质量、减少维护方面的成本以及提高建筑的耐久性来说, 有着不容忽视的重要意义。防渗漏施工涵盖了外墙、屋顶、地下室、管道以及局部节点等诸多部位, 其中每一个环节在设计、材料选取以及施工工艺等方面的情况, 都会直接影响到防水效果的可靠性与持续性。与此结构裂缝的控制、节点的密封处理、材料的搭接情况以及施工细部的具体处理等技术方面的诸多细节, 同样是决定防渗漏施工能否成功的关键因素。通过针对防渗漏施工技术关键点展开系统的分析, 能够为建筑工程给予科学且规范的施工方面的指导, 从而达成建筑在使用期限内实现长期的防水安全以及结构稳定的良好状态, 最终促使整体工程的质量以及经济

效益得以提升。

1 房屋建筑工程防渗漏施工技术的重要性

房屋建筑工程的防渗漏施工技术, 对保障建筑物的安全性、耐久性以及使用功能起着极为关键的作用。它会直接对建筑结构的稳定性以及使用寿命产生影响, 还会对居住和使用环境的舒适性与健康性造成影响。若渗漏问题得不到有效控制, 墙体、屋面、地下室以及管道等部位便易出现裂缝、渗水、霉变以及钢筋腐蚀等结构和环境方面的一系列问题, 这会使维护和修复的成本增加, 建筑的整体价值也会降低。在设计环节、材料选择环节、施工工艺环节以及质量管理环节等诸多环节中, 科学且合理地运用防渗漏技术显得格外重要。通过确保防水层的连续性、密封性以及耐久性, 可有效防止水分入侵, 提升建筑的抗渗能力, 还可提升施工质量以及工程效益, 实现建筑长期安全可靠地运行, 进而为使用者营造出安全、舒适且健康的生活以及工作环境。

2 房屋建筑工程渗漏问题产生的主要原因

2.1 外墙渗漏的成因

外墙出现渗漏的情况, 在房屋建筑工程里面属于常见且颇为复杂的一个问题, 而且其产生的原因多种多样, 并且这些原因之间还存在着相互影响的关系。就福建省漳州市漳浦县绥安镇鹿溪北路北侧以及得仙路东侧所开展的

建设项目而言,外墙渗漏很可能是由以下几个方面的因素引发的:其一,墙体材料的选择不太妥当,要是选用的是质量比较低的砖石、混凝土又或者是涂料,那么它们所具备的防水性能以及耐候性往往都达不到应有的标准,如此一来便很容易致使墙体出现渗水的状况。其二,基础施工的质量没有能够达到规定的标准,这无疑也是一个十分关键的因素。具体来讲,外墙和地基相连接的部位,倘若存在着裂缝,或者密封处理做得不够严密,那么雨水就很有可能会渗入到墙体的内部。其三,防水层一旦出现破损,又或者根本就没有设置防水层,那么这将会极为显著地削弱外墙原本所具有的防水能力。不论是处在施工阶段的时候,防水层的施工质量本身就不是很高,还是到了后期因为维护工作做得不到位,最终都会使得雨水得以侵入到建筑的内部,进而造成一系列麻烦。最后一点,设计方面存在的缺陷同样是不容小觑的。要是外墙结构在设计之初就不够合理,构造方式也比较复杂,又或者缺少了必要的防水相关措施,那么这无疑会进一步增加外墙出现渗漏的风险。

2.2 屋顶漏水成因

屋顶漏水属于房屋建筑工程里常见的一种渗漏问题,其产生原因和设计、材料、施工以及环境等诸多方面因素紧密相关。屋顶设计存在不合理之处,比如坡度不够、排水系统布置欠妥或者落水口数量不足,这便容易致使雨水积聚且排水不顺畅,进而让渗水风险有所增加^[1]。屋面防水材料的选择情况以及施工质量会直接对防水性能产生影响,要是材料出现老化现象、性能未能达标,又或者在施工进程中存在接缝不够严密、搭接不规范等情况,那么就极有可能造成防水层破损或者发生渗漏。除此之外,屋顶结构自身存在着裂缝、沉降或者振动的情况,这也容易形成水渗通道,使得雨水能够渗入到建筑内部。而且,屋顶长时间受到风吹、雨淋、紫外线照射以及温差变化等自然环境因素的影响,这就容易致使防水层出现老化、龟裂乃至脱落的现象,从而进一步加剧漏水风险。

2.3 局部渗漏问题

局部渗漏属于房屋建筑工程里常见的一种渗漏情况,而且这种渗漏还带有很强的隐蔽性,其产生的原因与施工细节、材料使用、结构接缝以及使用环境等诸多方面的因素有关。一般来讲,局部渗漏常常会出现于管道接口、门窗框、阳台、雨棚、外墙节点以及屋面细部构造这些地方,而这些部位结构相对复杂,施工操作起来也有一定难度,只要稍有不规范的地方,就有可能形成渗水通道。如果防水材料选用得不合适,或者材料质量不过关,又或者施工工艺做得不到位,比如涂膜厚度不够、接缝处理得不严密、搭接长度不足等情况出现,那么也很容易造成局部防水功能失效。还有,建筑结构自身要是存在细微裂缝、沉降或

者是振动等情况,特别是在楼板、墙体、阳台伸出的部分以及穿墙管道周边,就容易形成水渗通道,进而引发局部渗漏问题^[2]。与此在使用的过程中,要是维护工作没有做到位,再加上外部环境的影响,像风雨侵蚀、温差变化以及紫外线的作用等,这些都会加速材料的老化和结构的破损,使得局部渗漏的问题变得更加突出,进而对建筑的防水性能以及使用安全都产生不利影响。

3 房屋建筑工程防渗漏技术的关键点

3.1 外墙防渗漏技术

外墙防渗漏技术在房屋建筑工程里属于极为重要的一环,它关乎到建筑物的整体耐久性以及使用功能能否得到切实保障。其关键点就在于借助科学的设计方式、合理的材料选取以及精细的施工操作,以此来有效地阻止雨水、地下水还有空气湿气对建筑内部展开侵入行为。就外墙结构设计方面而言,务必要充分考量防水、防潮以及排水方面的各项功能。这其中包括墙体厚度要合理、外保温层的布置需妥当、立面排水系统要完善,还有像伸缩缝、阴阳角等这些细部构造的处理工作也得细致到位,唯有如此才能保证水分不会凭借毛细作用或者依靠重力渗入到建筑内部。接着讲,在防水材料的选择以及施工质量把控上同样占据着极为重要的地位。得依据建筑的高度情况、所处的气候条件以及具体的功能需求来挑选那些有着优良耐久性能且具备良好弹性的防水涂料、卷材或者是密封材料。并且在实际施工的过程中,还得严格把控涂覆的厚度、接缝的搭接情况,同时还要妥善处理好与门窗洞口、管道接口等细部位置的衔接事宜,从而确保防水层能够做到连续不断、完整无缺并且不存在任何薄弱之处。除此之外,外墙防渗漏技术还应当着重关注节点的处理工作。这涵盖了对窗台、檐口、阳台、空调洞口以及外露管道周围展开的密封处理,通过这样的方式来防止出现局部渗漏的情况,进而避免导致整体防水功能出现失效的状况。

3.2 屋顶防渗漏技术

屋顶防渗漏技术属于房屋建筑工程防水系统里极为关键的部分,其重点是要借助科学合理的设计方案、优质的施工材料以及规范有序的施工流程,达成对雨水、雪水还有环境当中的湿气予以有效阻隔的目的,进而切实保障建筑结构的安全状况以及各项使用功能得以正常发挥。起初在开展屋顶防渗漏设计工作的时候,务必要全面且细致地去考量屋顶的坡度情况、排水系统的具体布局方式、落水口所处的位置以及天沟的相关设置事宜,唯有如此才能够保证雨水可以快速地排出去,防止出现因积水而引发的渗漏问题以及对建筑结构造成的损伤情况。与此在挑选屋面防水材料这件事上,得依据建筑的实际功能用途、所在地区的气候条件以及屋面结构的具体类型来做出相应的

确定决策,一般而言会选用像高弹性卷材、防水涂膜又或者是自粘防水材料这类选项,以此来确保防水层具备出色的延展性能、耐候性能以及较长的耐久年限^[3]。在整个施工的进程当中,针对屋顶防渗漏技术方面,应当着重把关注点放在防水层的连续性情况以及各个节点的处理事宜之上,这其中包括女儿墙、屋檐、天窗、烟道口以及管道穿越等这些关键部位的密封处理工作,要是存在任何接缝处不够严密或者在细部处理环节做得不到位的情况,那么就很有可能会致使出现渗水方面的风险隐患。

3.3 局部防渗技术

局部防渗技术于房屋建筑工程而言,有着不容忽视的重要作用。它主要是针对建筑当中那些容易出现渗漏情况的细部节点以及特殊构造部位来展开相关工作的,像门窗洞口、阳台伸出的部分、管道穿墙的开口、屋檐、天窗还有外墙与屋面相互交接的地方等等,这些区域往往结构比较复杂,受力状况也并不均匀,并且施工起来难度颇高,要是稍有不慎,就极有可能会变成渗水的源头所在。局部防渗技术最为关键之处就在于凭借科学合理的节点设计、恰当的材料选取以及精湛的施工工艺,以此来达成防水层具备连续性与密封性的良好状态,进而确保水分没办法通过缝隙、接头或者裂缝渗透进入到建筑的内部之中。在所选用的材料方面,应当采用那种具有高弹性的、能够防老化的并且耐候性较强的密封材料或者是防水附加层,从而能够很好地适应建筑结构可能出现的微小变形情况以及环境温度差异的变化情况。在整个施工的过程当中,务必要严格把控好材料的厚度、搭接的长度,还要注重与主体结构以及其他防水层之间的衔接事宜,特别是在那些结构复杂的节点之处,更要额外增加一些附加的防水处理措施,以此来避免因局部存在薄弱环节而致使整体的防水功能出现失效的情况。与此局部防渗技术还应当充分考虑到在长期使用的期间里,材料可能会出现的老化现象、建筑自身的沉降情况或者受到的振动等因素,这些都可能对防水性能产生影响。所以要通过科学严谨的设计以及细致周到的施工操作,进一步提升局部节点在耐久性以及可靠性方面的表现,最终切实保障建筑整体的防渗效果得以实现,同时也确保建筑结构的安全无虞,进而有效提升建筑的使用舒适度以及工程质量水平。

3.4 地下室防渗漏技术

地下室防渗漏技术于房屋建筑工程而言,占据着相当关键的地位。其关键之处就在于凭借科学合理的设计方案、优质上乘的材料以及极为严格的施工管理举措,切实有效地阻止地下水以及土壤水分对地下结构加以侵入,进而充分保障建筑物整体的安全状况以及各项使用功能得以正常发挥。地下室处于地表之下,长时间会受到地下水水位不停地波动以及土壤湿度不断发生变化等诸多因素的影

响,所以其防水方面存在的难度是比较大的,要是存在任何防水方面的缺陷,那极有可能会引发渗水、潮湿等状况,甚至还会致使结构出现损伤情况。防渗漏技术应当从结构设计这个环节着手去开展相关工作,要合理地去布置防水层以及排水系统,采用像双重防水或者将外防外排与内防内排相互结合这样的策略,以此来促使抗渗能力得以提升。与此防水材料的选择事项同样是极为重要的,得选用那种强度高、耐久性能好、能够抵抗水压以及土壤腐蚀的卷材、涂膜或者复合防水材料,并且在施工过程里要格外注重节点的处理事宜,特别是像底板、墙角、管道穿墙口、沉降缝以及构造缝这些容易出现渗水的部位,务必要确保防水层是连续的状态,搭接之处要严密无间,并且要和结构紧密地贴合在一起。

3.5 管道防渗漏技术

管道防渗漏技术于房屋建筑工程而言意义重大,其关键点在于借助合理的规划设计、优质的材料选取以及规范的施工操作,保证给排水、燃气、电气管道等贯穿建筑结构的管道系统在长时间使用期间不会出现渗漏情况,进而确保建筑的安全性以及使用功能得以实现。管道防渗漏方面的问题往往聚焦在管道穿墙、穿楼板以及接口节点之处,这些部位结构相对复杂且应力较为集中,倘若防水处理工作做得不够到位,便很容易形成渗水的通道,致使墙体、楼板出现受潮状况甚至造成结构方面的损伤。有效的管道防渗漏技术需要在设计阶段就充分考量管道的布置方式、接口的具体类型以及管道和结构之间所产生的相互作用,要挑选那些能够耐水压、耐腐蚀并且柔性良好的密封材料或者防水套管,并且在施工过程中要严格把控管道安装的精度、孔洞周边的密封处理情况以及防水层与管道接口的连续性,以此来确保管道穿越的各个点与主体防水层能够实现整体的衔接,不留任何断点。

3.6 裂缝控制的技术

裂缝控制技术于房屋建筑工程防渗漏方面有着极为关键的作用,其关键之处就在于凭借合理的设计、科学的施工以及材料方面的优化,来对结构裂缝的产生与发展加以预防与控制,进而保证建筑的防水性能以及整体的耐久性。建筑裂缝的形成往往与结构应力出现集中情况、材料存在收缩现象、温差发生变化、出现沉降状况以及施工工艺不恰当等因素紧密相关,特别在混凝土结构、墙体连接的位置、梁柱节点以及屋面和地下室这些关键部位,一旦产生裂缝,便极易变成水分入侵的途径^[4]。有效的裂缝控制技术包含在设计阶段合理安排伸缩缝与构造缝,优化结构受力的分布状况,挑选抗裂性能良好的材料以及混凝土配比,并且在施工过程里严格把控浇筑的质量、养护的条件以及施工缝的处理事宜,以此确保混凝土收缩与沉降能够获得合理的调节。

4 结语

房屋建筑工程防渗漏施工技术的应用,对于保障建筑结构的安全性、延长其使用寿命以及提高居住的舒适性有着极为重要的意义。仔细分析外墙、屋顶、地下室、管道以及局部节点等这些关键部位,能够察觉到防水设计是否合理、材料选择是不是科学、施工工艺有没有规范,还有裂缝控制以及节点处理是否精细,这些都是保证防渗漏效果的关键因素。要在设计环节、材料选用方面、施工过程以及验收阶段都建立起完善的防渗漏技术体系,并且严格依照标准化流程来执行,如此才能切实有效地降低渗漏的风险,提高工程的质量以及经济效益,确保建筑在长时间的使用进程中能够维持稳定、安全且可靠的状态。

[参考文献]

- [1]张乐.房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点分析[J].中国住宅设施,2021(4):99-100.
- [2]安立全.浅析房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点[J].城市建设,2025(13):57-59.
- [3]徐国书.房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点分析[J].大众标准化,2024(4):58-60.
- [4]刘词刚.房屋建筑工程防渗漏施工技术关键点分析[J].中国建筑装饰装修,2025(11):163-165.

作者简介:李思锐(1992.4—),毕业院校:武昌理工学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:邯郸市城投房地产开发有限公司,职务:投资部长,职称级别:工程师。

装配式混凝土结构连接设计优化与抗震性能研究

李月肖

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]装配式混凝土结构因其工业化程度高、施工周期短和资源利用效率高等优势,在我国建筑现代化进程中获得广泛关注。然而,连接部位作为装配式结构的关键受力环节,其力学行为复杂、破坏模式多样,易成为结构薄弱点,从而影响整体受力性能与抗震能力。研究表明,装配式混凝土连接节点性能的优化是提升结构整体性和抗震可靠性的核心。文中从连接类型与力学机制入手,系统分析影响节点性能的材料特性、几何构造和受力路径因素,并对连接设计优化与抗震性能提升策略进行深入探讨。在此基础上,进一步研究施工质量对连接可靠性的影响机制,提出全过程质量控制措施。研究结果表明,通过构造优化、材料改进、性能化设计以及施工质量提升,可以显著提高装配式混凝土结构的整体表现与抗震韧性。文中旨在为装配式混凝土结构的工程应用与规范完善提供技术参考和理论支撑。

[关键词]装配式混凝土结构; 连接设计; 节点抗震性能; 延性; 构造优化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18628

中图分类号: TU323.5

文献标识码: A

Optimization of Connection Design and Seismic Performance Research for Prefabricated Concrete Structures

LI Yue Xiao

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Prefabricated concrete structures have gained widespread attention in China's modernization process due to their high degree of industrialization, short construction period, and high resource utilization efficiency. However, as a key load-bearing link in prefabricated structures, the connecting parts have complex mechanical behavior and diverse failure modes, which can easily become weak points in the structure, thereby affecting the overall load-bearing performance and seismic resistance. Research has shown that optimizing the performance of prefabricated concrete connection nodes is the core of improving structural integrity and seismic reliability. Starting from the types of connections and mechanical mechanisms, this article systematically analyzes the material properties, geometric structures, and force path factors that affect node performance, and explores in depth the optimization of connection design and strategies for improving seismic performance. On this basis, further research is conducted on the impact mechanism of construction quality on connection reliability, and measures for quality control throughout the entire process are proposed. The research results indicate that the overall performance and seismic toughness of prefabricated concrete structures can be significantly improved through structural optimization, material improvement, performance-based design, and construction quality enhancement. The purpose of this article is to provide technical reference and theoretical support for the engineering application and specification improvement of prefabricated concrete structures.

Keywords: prefabricated concrete structure; connection design; seismic performance of nodes; ductility; structural optimization

引言

作为推动建筑工业化和绿色建造的重要技术路径,装配式混凝土结构在我国建筑领域的应用规模持续扩大。与传统现浇结构相比,装配式结构在施工工序组织、建造效率、环保节能等方面具有显著优势。然而,装配式构件之间依靠连接节点形成整体受力体系,而节点的性质决定结构整体的延性与可靠性。由于节点往往处于多种内力与地震作用共同影响下,且构件拼装使其力学性质与现浇节点存在显著差异,因此节点设计优化与抗震性能提升成为结构工程研究的重点问题之一。近年来,我国建筑抗震设计规范不断更新,对装配式结构在地震区的应用提出更高要求,这进一步推动了连接设计理论与抗震性能机制研究的

发展。在此背景下,本文将从材料特性、连接构造、受力模式、施工质量控制等方面对装配式混凝土结构中连接节点的设计优化与抗震性能提升进行系统研究,以期为装配式混凝土结构的安全应用提供支持。

1 装配式混凝土结构连接的基本特性分析

1.1 装配式结构连接的主要类型与性能特点

装配式混凝土结构的连接形式多样,依据传力方式与构造手段可分为湿式连接、干式连接与混合式连接三大类。湿式连接通过灌浆、现浇层等方式使连接区域形成类似现浇混凝土的整体性,其延性和刚度较高,是目前应用最为广泛的方式。干式连接以螺栓、钢板、焊接等金属构件完成力传递,施工便捷、装配速度快,但节点延性较低,往

往用于可拆卸或轻型装配式结构中。混合式连接兼具两种方式的优势,通过钢构件提供初期刚度,通过灌浆提高最终强度与整体性,是现代装配式结构发展趋势之一。不同连接形式在抗震性能、受力稳定性以及适用工程类型上差异明显,需根据设计需求合理选择。

1.2 连接部位力学性能的主要影响因素

连接性能受钢筋布置、灌浆材料强度、节点混凝土标号、构造尺寸和预应力状态等多种因素影响。节点区的钢筋锚固长度显著影响其抗拉承载力;灌浆层的密实程度和强度决定连接整体性能;节点核心区混凝土若强度不足,容易出现压碎破坏。此外,构件安装误差、节点几何偏差、钢筋对位不准等施工因素也可能导致节点受力不均。外荷载作用下,节点需承受剪力、弯矩及拉压作用,其内部应力路径复杂,因此构造设计的合理性对于节点安全性至关重要。

1.3 连接性能对结构整体性的影响机制

装配式结构连接性能直接关系到结构整体受力协调性。在多层框架或剪力墙结构中,节点刚度水平会影响整体侧移、振动周期和受力分布。若节点过于柔弱,则会导致构件间变形不协调,形成应力集中;若节点延性不足,在地震中可能出现脆性破坏,从而失去能量消耗能力,造成结构整体性能下降。研究表明,连接性能越接近传统现浇节点,装配式结构整体性越强,抗震能力越高。因此,连接设计应充分考虑结构整体性,确保节点性能满足抗震需求。

2 装配式混凝土结构连接设计优化策略

2.1 基于传力机制的连接设计原则

连接设计的核心是保证内力传递路径清晰、构造可靠、承载性能稳定。设计需遵循强节点弱构件原则,使节点区强度高于构件本体,以避免节点先行破坏。此外,设计需考虑节点受弯、受剪及受拉等不同作用,合理配置钢筋结构,确保节点变形能力满足地震作用需求。对于承受反复荷载的节点设计,应重点关注延性指标,使节点能够在地震中保持足够塑性发展空间,从而有效耗散能量。

2.2 节点构造设计优化方法

节点构造需通过钢筋锚固改善、附加钢筋配置、节点过渡区域加强和几何形状优化等方式提高性能。例如,通过延长锚固长度或采用机械锚固方式提高钢筋连接可靠性;在节点核心区配置附加箍筋以提高开裂后的约束能力;优化节点混凝土浇筑区域形状以避免应力集中。此外,采用高强度钢筋、超高性能混凝土(UHPC)等新材料也可显著改善节点构造性能,使节点在承载极限状态下具备更好的延性与韧性。

2.3 连接延性与耗能能力的提升途径

延性是节点抵抗地震力的关键性能。提升节点延性的方法包括:采用带有塑性铰的构造形式,使节点在地震中

具有足够塑性发展空间;配置耗能构件如伸臂钢板或替代性耗能芯材;采用具有高延性特征的钢筋或纤维材料;通过节点几何调整增强局部塑性区分布能力。同时,为提升节点耗能能力,可在节点设计阶段引入耗能机制分析,通过非线性模拟预测节点滞回曲线特性,为设计提供优化依据。

3 装配式混凝土结构的抗震性能研究

3.1 地震作用下装配式结构的动力响应特征

装配式结构在地震作用下表现出与现浇结构不同的动力特性。节点刚度不均可能引起结构周期变化,使结构受到的地震作用发生差异。此外,装配式构件之间的相对位移需通过节点传递,节点的耗能能力直接影响结构整体的抗震表现。研究显示,若节点性能良好,装配式结构在地震中能保持较高的整体协调性;反之,节点若发生提前破坏,结构可能出现局部失效甚至倒塌风险。

3.2 节点破坏模式分析与薄弱环节识别

节点破坏模式主要包括剪切破坏、拉拔破坏、压碎破坏、灌浆层破坏和金属构件失效。剪切破坏多发生于核心区抗剪能力不足时;拉拔破坏与钢筋锚固不足有关;压碎破坏常见于混凝土强度与约束不足的区域;灌浆不密实会导致节点松动;金属构件失效可能因焊缝或螺栓承载不足造成。识别节点薄弱环节有助于精准优化设计,提高结构抗震性能。

3.3 提升结构抗震能力的设计方法

提高装配式结构抗震性能的策略包括:合理布置结构体系,使受力路径明确;加强节点区构造约束,提高其抗剪强度;采用强柱弱梁设计,使结构形成可控的塑性铰机制;配置具有延性优势的材料提高耗能能力;通过模拟分析预测地震下节点性能并优化设计参数。综合采用这些策略可显著提升装配式结构在强震下的安全性。

4 装配式混凝土结构连接施工质量保障措施

4.1 施工质量对连接性能的影响机制

装配式结构施工控制应围绕连接节点这一关键部位展开,通过多环节协同管理保障结构受力性能与施工质量。钢筋套筒连接作为节点受力传递的重要方式,其施工质量直接关系到结构安全,需要对套筒位置、钢筋插入深度与连接状态进行逐一检查,确保连接可靠。灌浆材料的性能对节点整体性具有重要影响,通过优化配合比并严格控制施工工艺,可提升灌浆体的流动性与密实性。灌浆过程中应保持压力稳定、材料分布均匀,以减少空鼓与气泡等缺陷。构件吊装环节对定位精度要求较高,采用精确定位装置可保证构件就位准确,避免安装偏差累积。

4.2 节点施工关键工艺控制措施

装配式结构施工控制应围绕连接节点这一关键部位展开,通过多环节协同管理保障结构受力性能与施工质量。钢筋套筒连接作为节点受力传递的重要方式,其施工质量

直接关系到结构安全,需要对套筒位置、钢筋插入深度与连接状态进行逐一检查,确保连接可靠。灌浆材料的性能对节点整体性具有重要影响,通过优化配合比并严格控制施工工艺,可提升灌浆体的流动性与密实性。灌浆过程中应保持压力稳定、材料分布均匀,以减少空鼓与气泡等缺陷。构件吊装环节对定位精度要求较高,采用精确定位装置可保证构件就位准确,避免安装偏差累积。节点混凝土浇筑需采用分层方式并配合充分振捣,以确保混凝土密实并避免形成弱界面。

4.3 全过程施工质量管理体系构建

施工质量保障需要构建覆盖施工前、施工中与施工后的全过程管理体系,使各环节形成连续衔接的质量控制链条。施工准备阶段,通过系统化技术交底与施工方案审查,可统一施工标准并明确关键控制要点,为后续作业奠定基础。施工实施过程中,对材料性能、节点施工工艺与构件安装精度进行持续监测,有助于及时发现偏差并加以纠正。灌浆饱满度与密实性直接关系到节点受力性能,应通过专项记录与监控手段加以严格控制。构件安装偏差的实时检测,可保障结构整体受力协调性。借助数字化施工管理技术,对施工参数、过程数据与检测结果进行实时采集与存储,可提升质量管理的透明度与可追溯性。通过制度化管理与信息化技术的协同应用,连接节点质量能够得到系统保障,从而提升装配式结构的整体性能与安全水平。

5 装配式混凝土结构连接与抗震性能的工程应用方向

5.1 性能化连接设计的发展趋势

随着性能化设计理念在工程领域中的不断深化,装配式结构节点设计正逐步由依赖经验与规范限值的传统模式,转向以明确性能目标为导向的科学设计方法。该理念以结构在不同地震作用水平下的实际表现作为评价依据,将节点延性、耗能能力与变形协调性作为关键控制指标。通过对受力路径的合理组织与关键部位破坏模式的预先设定,节点能够在强震条件下形成稳定、可预测的受力与破坏过程,避免突发性失效对整体结构造成不利影响。性能化设计为节点构造优化提供了更加灵活的技术空间,使设计方案能够在满足安全要求的基础上兼顾经济性与施工可行性。这种以性能为核心的设计思路,有助于提升装配式结构在极端荷载作用下的安全储备与可靠性,推动结构设计水平向更高层次发展。

5.2 新材料、新技术在节点中的应用前景

高性能材料在装配式结构节点中的应用,为提升节点承载能力与延性水平提供了重要技术支撑。超高性能混凝土、高延性钢筋及纤维复合材料具备优异的力学性能与耐久特性,将其应用于节点关键受力区域,可有效改善应力分布,增强耗能能力,并降低脆性破坏风险。数字建造技术的发展,为节点设计与实施提供了更加精准的技术手段。

依托建筑信息模型与数字孪生技术,可对节点构造形式与受力行为进行可视化模拟与分析,提高设计方案的合理性与可靠性。在施工管理过程中,数字模型能够辅助工序安排与质量控制,提升装配精度与施工可控性。智能传感技术的引入,使节点在服役期间的应力、变形与损伤状态得以持续监测,为结构安全评估与维护决策提供实时数据支持。这种材料创新与数字技术协同应用的模式,为装配式结构性能提升与长期安全运行奠定了坚实基础。

5.3 装配式结构抗震体系的发展方向

未来装配式结构的发展将更加关注抗震韧性的提升与综合性能的协调,以适应复杂多变的工程需求与环境条件。结构设计理念将从单一承载能力控制转向对延性、耗能能力及震后可恢复性的综合考量,使建筑在地震作用下具备更高的安全储备。节点构造在这一过程中扮演着关键角色,其设计形式将逐步向模块化与标准化方向演进,有利于提升构件装配精度,缩短施工周期并降低质量波动风险。结构体系层面,将更加重视多样化与适应性,通过不同体系组合满足功能、抗震与使用需求的平衡。面向可持续发展目标,装配式结构在材料选择与构造方式上将更加注重资源节约与环境友好,实现经济效益、安全性能与生态价值的协调统一,为建筑工业化与高质量发展提供有力支撑。

6 结论

连接设计与抗震性能是装配式混凝土结构安全与可靠性的关键所在,其合理性直接影响结构整体受力传递与变形能力。通过对连接构造形式进行系统优化,并结合高性能材料的应用,可有效增强节点承载力与耗能能力,使结构在地震作用下保持良好的整体性与稳定性。节点延性水平的提升,有助于结构在强震条件下形成合理的破坏机制,避免脆性失效。施工阶段对连接节点加工精度与安装质量的严格控制,是设计目标得以实现的重要保障。研究表明,节点性能与结构整体抗震表现密切相关,需要在设计、施工及后期管理各阶段协同推进。随着性能化设计理念、新型材料技术及智能化管理手段的不断发展,装配式混凝土结构的抗震性能将得到进一步提升。本文提出的连接优化与抗震性能提升思路,可为相关工程实践提供有价值的技术参考。

[参考文献]

- [1]李国强,马志强.装配式混凝土结构连接性能与设计方法研究[J].土木工程学报,2021,54(4):92-101.
- [2]张晓东,王海军.装配式结构节点抗震性能分析与优化设计[J].建筑结构,2020,50(8):33-40.
- [3]陈伟,刘亮.装配式混凝土结构连接施工技术及其质量控制研究[J].建筑施工,2019,41(6):57-63.

作者简介:李月肖(1983.5—),女,汉族,毕业院校:河北工业大学,现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。

数字孪生技术赋能建筑设计全过程创新

赵 静

河北惠宁建筑标准设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着建筑行业数字化转型的持续推进,数字孪生技术作为融合物理实体、数字模型、传感数据与智能分析的前沿技术体系,逐渐在建筑全生命周期管理中发挥关键作用。传统建筑设计流程在数据集成、信息反馈、成果可视化与协同效率等方面仍存在局限,而数字孪生技术借助实时数据驱动、多源信息融合与动态仿真能力,为建筑设计全过程创新提供了新路径。文中从数字孪生技术的内涵与特征出发,分析其在建筑设计阶段、施工阶段与运营阶段的赋能机制,系统梳理建筑设计全过程中数据模型构建、信息交互机制、性能模拟分析与协同设计优化等关键应用方式。文章进一步探讨数字孪生技术在风险预测、能耗分析、环境模拟、结构优化等方面的创新价值,并结合建筑行业发展趋势,提出未来建筑设计数字化创新的方向。研究表明,数字孪生技术不仅提升了建筑设计的科学性与精准性,还推动了建筑全生命周期的精细化管理,为建筑行业质量提升和可持续发展提供重要支撑。本研究为建筑设计的数字化转型提供理论依据与方法参考。

[关键词]数字孪生; 建筑设计; 全过程管理; 智能分析; 建筑数字化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18626

中图分类号: TU17

文献标识码: A

Digital Twin Technology Empowers Innovation Throughout the Entire Architectural Design Process

ZHAO Jing

Hebei Huining Standard Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the continuous advancement of digital transformation in the construction industry, digital twin technology, as a cutting-edge technical system integrating physical entities, digital models, sensor data, and intelligent analysis, has gradually played a pivotal role in the lifecycle management of buildings. Traditional architectural design processes still face limitations in data integration, information feedback, outcome visualization, and collaborative efficiency. Digital twin technology, leveraging real-time data-driven approaches, multi-source information fusion, and dynamic simulation capabilities, offers new pathways for innovation throughout the entire architectural design process. This paper begins with the connotation and characteristics of digital twin technology, analyzing its empowerment mechanisms in the design, construction, and operation phases. It systematically reviews key application methods such as data model construction, information interaction mechanisms, performance simulation analysis, and collaborative design optimization across the entire architectural design process. The study further explores the innovative value of digital twin technology in risk prediction, energy consumption analysis, environmental simulation, and structural optimization, while proposing future directions for digital innovation in architectural design based on industry trends. Research findings indicate that digital twin technology not only enhances the scientific rigor and precision of architectural design but also promotes refined lifecycle management, providing critical support for quality improvement and sustainable development in the construction industry. This study offers theoretical foundations and methodological references for the digital transformation of architectural design.

Keywords: digital twin; architectural design; whole-process management; intelligent analysis; building digitization

引言

随着数字化、智能化进程在建筑行业的不断推进,建筑设计体系正在经历深度变革。传统建筑设计模式通常依赖静态图纸、人工经验判断以及有限的模拟工具,信息流动不充分、反馈不及时,导致设计优化空间不足,难以满足复杂建筑需求与高质量建造要求。在此背景下,数字孪生技术的引入为建筑设计提供了创新机遇。数字孪生技术通过构建与物理建筑同步运行的数字化模型,实现数据驱动的实时模拟、预测分析与动态优化,使设计者能够在虚拟空间中预演建筑全生命周期的运行状态,从而发现潜在问题、优化设计决策并提升工程实施效率。作为一种融合

信息技术、人工智能与工程管理的新型技术体系,数字孪生推动建筑行业从静态设计向动态设计转型,实现设计、施工与运营的全过程数据联动。为了适应建筑行业的发展需求,有必要从理论、技术与实践等多方面系统分析数字孪生技术赋能建筑设计全过程创新的作用机制,以推动建筑领域数字化升级。

1 数字孪生技术的理论基础与应用价值

1.1 数字孪生技术的内涵与构成体系

数字孪生技术最初源于制造业,其核心理念是通过建立一个与真实物理系统同步运行的数字实体,实现物理世界与数字世界的实时映射。在建筑领域,数字孪生模型通

常由物理建筑对象、虚拟建筑模型、双向数据接口、实时监测系统与智能分析模块组成。数字孪生系统以高精度数字模型为基础,以传感器实时数据为驱动,结合人工智能算法实现对建筑状态的预测与分析。其关键特征包括实时性、动态性、可视化与智能分析能力,使建筑能够在虚拟环境中进行全方位展示、性能评估与风险预测。

1.2 数字孪生在建筑设计中的关键优势

数字孪生技术在建筑设计阶段可实现透明化、实时化与精细化的设计管理。其一,数字孪生具有高效的信息集成能力,能够整合结构、机电、能耗、环境等多源信息,提高设计的整体性与协调性;其二,通过动态模拟功能,设计者可在模型中预演建筑运行状态,对能耗、光环境、气流组织等进行深度分析;其三,数字孪生支持多专业协同设计,使各参与方实现同步数据共享,有效减少设计冲突与返工。与传统设计模式相比,数字孪生显著提升了设计可靠性与决策科学性。

1.3 建筑行业数字化转型背景下的应用需求

建筑行业正处于从信息化向智能化发展的关键阶段,传统设计流程已难以满足复杂建筑项目的精细化要求。绿色建筑、智慧建筑与可持续城市建设对设计科学性、能耗计算与运行预测提出更高要求。数字孪生技术不仅能够实现设计过程透明化,还可为建筑运营提供实时数据支持,使设计成果与未来运营需求形成闭环关系。因此,在行业数字化背景下,引入数字孪生技术已成为建筑行业提升竞争力的重要途径。

2 数字孪生技术在建筑设计阶段的创新应用

2.1 基于数字孪生的建筑信息整合与数据驱动设计

建筑设计需要大量信息支持,包括功能分析、结构计算、设备布置、能耗预测等。数字孪生技术通过构建统一的数据平台,使各类信息在模型中形成完整链条,减少专业之间的信息断层,同时实现数据驱动的设计决策。设计者可根据实时数据对建筑性能进行评估,如当风环境模拟结果不理想时,可调整建筑体形与开窗方式并立即获得反馈。此外,数字孪生模型能够持续更新,在设计优化过程中形成动态演进体系,使设计从静态绘制转向动态优化。

2.2 数字孪生辅助建筑性能模拟与方案优化

数字孪生技术提供的动态模拟平台能够进行能耗分析、热环境模拟、光环境分析、空气流动模拟等,为建筑性能评估提供科学依据。模型可根据建筑使用条件、区域气候、设备参数等进行实时计算,使设计者提前发现潜在问题。例如,通过空气流动模拟可优化通风系统设计,通过太阳辐射分析可调整遮阳策略。性能模拟不仅能提升建筑设计的准确性,还能用于对不同方案进行量化比较,从而选择最优设计方案。

2.3 多专业协同设计机制的构建与优化

建筑设计涉及结构、机电、建筑、景观等多个专业,

传统的协同方式多依赖文件传递,效率较低且易发生信息冲突。数字孪生技术能够构建多专业统一协作平台,各专业团队在同一模型中工作,通过可视化系统即时看到不同专业的设计影响。例如,结构构件位置调整、设备管线布置优化等均可在模型中实时查看,避免了传统设计阶段的冲突与返工。协同机制的构建大幅提升了设计效率,可有效缩短整体设计周期。

3 数字孪生技术在建筑施工阶段的价值体现

3.1 施工过程模拟与风险预判技术

在施工阶段,数字孪生技术可用于模拟施工流程与工程进度,使施工组织更加科学合理。模型可模拟材料运输路径、机械设备布置与施工顺序,提前识别潜在冲突与安全风险。例如,当模型显示某施工阶段存在高风险作业区域时,管理人员可及时调整方案并制定预防措施。此外,通过实时数据监测系统可捕捉施工现场信息,并与模型对比,及时发现偏差,实现工序控制与进度管理的动态化。

3.2 施工资源管理与现场调度优化

建筑施工涉及大量资源管理,包括劳动力、机械设备、材料等。数字孪生技术能够实时分析施工现场的数据,为管理决策提供科学依据。例如,可预测材料消耗趋势,从而优化材料供应计划;可根据施工进度调整机械设备使用方案;可通过能耗监测降低施工阶段能源浪费。该技术帮助施工管理人员以更高的效率和更低的资源消耗推进工程建设,为施工阶段的精细化管理提供支撑。

3.3 施工质量监督与动态反馈机制

传统施工质量管理多依赖人工检查,数据获取效率低且易出现偏差。数字孪生技术可通过传感设备实现对结构变形、混凝土强度、温度湿度等参数的实时监测,使质量管理更加精细可靠。监测数据可直接反馈到数字模型中,并与设计参数对比,若出现偏差则可及时调整施工措施。动态反馈机制有效提升了施工质量,减少返工概率,保障建筑安全性。

4 数字孪生技术在建筑运营阶段的深度应用

4.1 建筑运行状态的实时监测与智慧管理

建筑投入使用后,其运行状态包括温度湿度、能耗、空气质量、设备运行情况等。数字孪生技术可构建实时监控系統,通过传感器收集各类数据并在数字模型中呈现,使建筑管理人员能够清晰了解运行状况。系统可自动识别异常情况,如空调能耗过高、室内空气不达标等,并提示维护策略。数字孪生的智慧管理方式可提高能源使用效率,延长设备寿命,提升用户舒适度。

4.2 能耗分析与节能策略动态优化

建筑运行过程中,空调、电力与照明等系统相互关联,能耗结构复杂,传统管理方式往往难以实现系统层面的综合分析协同调控。借助数字孪生技术,可对各类能耗数据进行实时采集与解析,在虚拟环境中重构建筑能源运行

状态,为精细化管理提供直观依据。通过对室外气候变化、人员活动规律与设备运行特征的综合分析,系统能够动态调整空调运行模式,避免能源使用与实际需求不匹配。对照明系统的用能行为进行识别与评估,有助于发现潜在浪费环节,并据此优化控制策略。能耗分析模型在持续运行过程中不断积累数据并进行自我学习,使节能方案能够随环境条件与使用需求变化而调整。

4.3 设备预测性维护与全生命周期管理

设备维护在建筑运营支出中占据较大比重,其管理水平直接影响建筑运行的稳定性与经济性。引入数字孪生技术后,建筑设备可通过持续采集运行数据,形成与实体系统高度一致的数字模型,为状态分析与维护决策提供支持。通过对振动参数、能耗变化与运行频率等信息进行综合分析,系统能够识别潜在异常特征,对可能发生的故障进行提前预判,从而安排针对性的维护措施,降低突发停机风险。基于数字孪生模型开展设备全生命周期模拟,有助于评估不同运行工况下的性能衰减规律,预测设备使用年限与维护需求变化。

5 数字孪生技术推动建筑设计全过程创新的未来方向

5.1 数字孪生与人工智能的深度融合趋势

在未来建筑设计实践中,数字孪生技术将与人工智能形成更加紧密的融合关系,推动设计方式由经验主导向数据驱动转变。依托智能算法对大量设计与运行数据进行分析,数字孪生模型能够实现方案的自动推演与优化,为设计决策提供科学依据。人工智能参与建筑布局组织、立面形态生成与结构体系优化,可在满足功能与规范要求的前提下,提高设计效率与整体合理性。通过深度学习方法对历史项目数据进行挖掘,可识别不同类型建筑在能耗、结构性能与空间使用方面的规律,为新项目提供具有参考价值的判断依据。数字孪生在这一过程中不仅承担信息载体的角色,也逐步演变为具备分析与反馈能力的智能系统。随着算法能力与数据基础的不断完善,数字孪生将成为建筑智能设计体系中的关键工具,推动建筑设计向高效、精准与可持续方向发展。

5.2 数字孪生平台的标准化与开放化建设

数字孪生技术在建筑领域的广泛应用,离不开统一而完善的标准体系作为基础支撑。围绕数字模型构建、数据表达方式与信息更新规则建立清晰规范,有助于保证不同阶段、不同主体之间的数据一致性与可靠性。数据接口与交换标准的完善,可降低系统之间的对接成本,提升信息流转效率,为多平台协同运行创造条件。面向未来,数字孪生平台需要构建开放、可扩展的数据接口体系,与建筑信息模型、地理信息系统及物联网感知系统实现顺畅衔接,

使设计、施工与运营阶段的数据得以连续传递与整合。通过统一的协同机制标准,项目参与方能够在同一数字环境中开展工作,减少信息割裂与重复建设。标准化建设不仅提升了数字孪生系统的可复制性与稳定性,也为技术规模化推广奠定基础,推动建筑行业数字化转型向更高水平发展。

5.3 全过程数字化管理的行业发展方向

数字孪生技术的深化应用,将促使建筑行业逐步摆脱传统碎片化管理模式,迈向以数据为核心的全过程数字化管理体系。通过将建筑信息模型、物联网感知系统与大数据分析手段有机结合,设计、施工与运营各阶段的信息得以持续传递与共享,形成动态联动的闭环管理结构。在这一体系下,设计成果能够更准确地指导施工实施,施工过程中的数据又可反向反馈至模型之中,为后续调整与优化提供依据。建筑投入使用后,运行数据的持续积累有助于评估建筑性能变化,支持精细化运维与功能适配。全过程数字化管理不仅提升了项目组织与资源配置效率,也增强了建筑对使用需求变化与环境条件变化的适应能力。以数字孪生为支撑的管理模式,将推动建筑行业在效率、质量与可持续发展水平上的整体提升,为实现高质量发展提供坚实基础。

6 结论

数字孪生技术为建筑设计与实施全过程带来了新的发展路径,通过构建高精度数字模型并与现实建筑形成持续联动,可实现数据实时更新、状态反馈与动态分析,从而提升决策的科学性与可靠性。在设计阶段,数字孪生有助于整合多源信息,开展建筑性能预测与方案比选,促进建筑、结构与机电等多专业之间的高效协同,减少设计冲突与反复修改。在施工阶段,依托数字模型进行过程模拟与进度管理,可提前识别潜在风险,优化施工组织方式,并对工程质量进行全过程监测。在建筑投入使用后,数字孪生通过对能耗、设备运行与环境参数的持续分析,为精细化管理与智慧运营提供支持,提升建筑整体运行效率。随着人工智能、云计算与物联网技术的不断成熟,数字孪生将在建筑行业中发挥更加重要的支撑作用,推动建筑设计与管理模式向智能化、精准化与可持续方向不断演进。

[参考文献]

- [1]刘杰,王宁.数字孪生技术在建筑设计与管理中的应用研究[J].建筑科学,2021,37(4):42-47.
- [2]陈伟,张焱.数字化转型背景下数字孪生技术的建筑实践价值[J].建筑技术开发,2022,49(6):15-20.
- [3]李娜,赵蕾.数字孪生在建筑全生命周期管理中的应用研究[J].施工技术,2020,49(10):98-102.

作者简介:赵静(1984.12—),女,汉族,毕业院校:河北建筑工程学院,现就职单位:河北惠宁建筑标准设计有限公司。

谈建筑结构抗连续倒塌设计方法与数值模拟研究

王江

中土大地国际建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]连续倒塌作为建筑结构在局部构件破坏后可能引发的大范围链式失效现象, 已成为现代结构工程领域的重要研究方向。随着建筑高度与复杂程度不断增加, 传统设计方法已难以满足极端灾害作用下的安全需求, 抗连续倒塌设计理念逐步成为结构规范体系的重要组成部分。文中基于建筑结构受力体系的复杂性, 从连续倒塌的形成机理出发, 系统梳理间接设计法、直接设计法与基于性能的设计理论框架, 探讨关键构件韧性提升、多路径传力体系构建与节点延性强化等抗倒塌策略。在数值模拟方面, 文章分析有限元方法在构件移除、动力响应分析、全寿命周期倒塌风险预测中的应用特点, 并指出非线性材料模型、失效准则与多尺度模拟技术对预测精度的影响。研究表明, 构建具有冗余性与延性的结构体系、提高关键构件耗能能力、完善节点连接细部构造是提升抗倒塌能力的核心路径; 数值模拟技术可为设计优化提供量化依据, 是未来抗倒塌工程的重要研究方向。研究成果对提升我国建筑结构安全可靠具有积极意义。

[关键词]连续倒塌; 关键构件; 数值模拟; 结构韧性; 构件移除法

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18627

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

Discussion on Research on the Design Method and Numerical Simulation of Building Structure Resistance to Continuous Collapse

WANG Jiang

Zhongtu Dadi International Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Continuous collapse, as a large-scale chain failure phenomenon that may be caused by the failure of local components in building structures, has become an important research direction in the field of modern structural engineering. With the increasing height and complexity of buildings, traditional design methods are no longer able to meet the safety requirements under extreme disasters. The concept of anti continuous collapse design has gradually become an important component of the structural specification system. Based on the complexity of the stress system of building structures, starting from the formation mechanism of continuous collapse, this article systematically sorts out the theoretical frameworks of indirect design method, direct design method, and performance-based design, and explores anti collapse strategies such as improving the toughness of key components, constructing multi-path force transmission systems, and strengthening node ductility. In terms of numerical simulation, the article analyzes the application characteristics of finite element method in component removal, dynamic response analysis, and full life cycle collapse risk prediction, and points out the influence of nonlinear material models, failure criteria, and multi-scale simulation techniques on prediction accuracy. Research has shown that constructing a structural system with redundancy and ductility, improving the energy dissipation capacity of key components, and perfecting the detailed structure of node connections are the core paths to enhance the ability to resist collapse; Numerical simulation technology can provide quantitative basis for design optimization and is an important research direction for future anti collapse engineering. The research results have positive significance for improving the safety and reliability of building structures in China.

Keywords: continuous collapse; key components; numerical simulation; structural toughness; component removal method

引言

随着我国城市化和建筑工业化的持续发展, 高层建筑、大跨空间结构、大型公共建筑不断涌现, 建筑结构受力体系呈现出更高的复杂性与敏感性。在自然灾害、爆炸冲击、构件老化、材料劣化等极端情形下, 局部构件可能因承载能力不足而发生破坏。若破坏后的荷载不能被周边构件或体系有效重新分配, 则极有可能形成连锁反应, 引发局部区域进一步扩展至整体结构的连续倒塌。连续倒塌事件具有突发性强、危害范围广、不可逆性明显等特点, 已成为

结构安全事故中损失最严重的破坏模式之一。因此, 在结构设计阶段引入抗连续倒塌理念, 对保障建筑安全、降低灾害损失具有重要意义。近年来, 国内外规范逐步将抗连续倒塌要求纳入结构设计体系。美国国防部 UFC、英国结构规范、欧盟规范与我国《建筑结构可靠度设计统一标准》中均明确提出相关要求, 使得研究从理论探讨逐步走向实际工程。然而, 由于建筑体系不断创新, 材料性能多样化, 传统经验式设计方法难以对结构整体破坏模式进行准确判断。与此同时, 随着有限元模拟技术、大数据分析

与性能化设计理念的发展,对连续倒塌过程进行定量模拟与机理预测成为可能,为抗倒塌设计提供了更科学的依据。本文从连续倒塌的形成机理、设计方法、关键技术路径与数值模拟策略四个方面展开研究,旨在为工程抗灾设计与结构安全优化提供理论基础与工程参考。

1 建筑结构连续倒塌的形成机理

1.1 局部破坏引发的荷载再分配与动力放大效应

建筑结构在正常工况下具有明确且稳定的受力路径,但当某一主要承重构件由于爆炸、老化或超载等因素失效后,其承担的竖向与水平荷载将迅速转移至相邻构件。此时,周边构件需要在极短时间内承担超出设计预期的荷载,并承受显著的动力放大效应。一旦相邻构件缺乏足够韧性与延性,无法吸收冲击能量,便会进入非线性破坏程序。此类破坏进一步扩散,导致结构内部传力路径连续断裂,从而形成链式倒塌过程。动力效应在倒塌过程中发挥关键作用,其瞬态峰值荷载可能达到静载的数倍,是结构破坏加速的重要诱因。

1.2 体系冗余性不足导致的破坏路径单一化

结构冗余性是指体系在部分构件损伤后仍能依靠其他路径传递荷载的能力。一旦结构体系过度依赖单一传力路径,例如由少量柱或梁承担主要荷载,则局部破坏引发的影响将迅速放大,使结构难以形成新的稳定传力体系,最终导致整体失稳。冗余性不足的根本原因在于体系布置不合理、节点构造形式单一或抗侧体系欠缺。当突发破坏发生后,结构不能通过替代路径重新分配荷载,从而形成脆性、快速的连锁倒塌模式。提高冗余性是抗连续倒塌设计的核心理念之一。

1.3 节点延性不足引发的脆性断裂失效

节点是结构最关键的连接部位,也是连续倒塌过程中最易出现脆性失效的位置。若节点设计不合理,如核心区约束不足、焊缝质量低、连接构件抗剪能力弱等,破坏往往呈现突发性断裂。节点脆性破坏通常伴随高能释放、低变形能力,难以提供过渡阶段使周边构件调整受力状态,因此极易触发连锁倒塌。此外,在地震、火灾等极端条件下,节点材料性能退化更加严重,破坏风险进一步提升。因此,提高节点延性是阻断倒塌传播的关键技术方向。

2 建筑结构抗连续倒塌的主要设计方法

2.1 间接设计法的系统强化思路

间接设计法不针对特定倒塌场景进行模拟,而是通过提高结构整体承载能力、改善延性、增强抗震与抗冲击性能等途径,提高结构应对突发破坏的能力。具体措施包括提高构件强度、增大截面尺寸、优化配筋布置、设置抗侧体系、加强节点构造等。该方法适用性广、实施难度低,是我国工程中最常用的抗倒塌策略。然而,间接法无法精确评估结构在局部破坏后的动力响应,也难以量化其抗倒塌能力,因此需与其他方法结合。

2.2 直接设计法在抗倒塌中的应用逻辑

直接设计法包括构件移除法和替代荷载法,是评估结

构局部破坏后的整体稳定性的重要手段。构件移除法通过模拟关键柱、梁或墙突然失效,观察结构的动力响应与替代传力路径;替代荷载法则通过施加等效于构件破坏的集中荷载,简化分析过程。直接法能够较为真实地反映结构在极端事件下的受力模式,是目前国际规范重点推荐的倒塌分析方法。其不足之处在于分析复杂、计算量大,但随着数值模拟能力增强,该方法越来越成为工程可行方案。

2.3 基于性能化的抗连续倒塌设计理念

性能化设计强调结构在不同倒塌场景下的量化性能目标,包括变形能力、能量耗散能力、塑性铰形成模式与节点失效概率等指标。性能化方法突破传统规范的经验式限制,通过模拟不同破坏情景实现设计优化。其核心是构建结构全生命周期安全指标体系,使设计目标更加清晰可控。性能化设计要求大量数值模拟与材料参数输入,因此需要更高的技术能力,但未来在建筑工程中将具有更广泛的应用前景。

3 抗连续倒塌的关键技术路径

3.1 构件延性与韧性增强技术

构件延性对于抵抗连续倒塌至关重要。混凝土结构可通过提高箍筋约束、使用高延性钢筋、优化纵筋锚固等方式增强塑性变形能力;钢结构可通过加劲肋设置、提高焊缝质量、采用高强螺栓实现韧性提升。构件延性越高,越能在局部破坏后提供塑性储备,使结构有机会形成稳定的新传力路径,避免脆性破坏的发生。

3.2 多路径传力体系构建与替代路径形成

连续倒塌传播的本质是结构内部传力路径的连续断裂,因此构建多路径体系对提高安全性至关重要。通过设置框架-剪力墙协同体系、附加支撑体系、钢-混凝土组合结构、悬链式吊挂体系等,可显著增强结构冗余性。多路径体系的目标是使结构在局部失效后具有自适应受力能力,使荷载重新分配更加平稳,从而减少连锁破坏概率。

3.3 关键构件与节点的抗倒塌强化策略

关键构件包括承重柱、转换层构件、大跨主梁、核心筒墙体等,其破坏风险直接影响整体结构安全。关键构件通常采用强柱弱梁设计原则、提高承载储备系数、增加抗剪承载力与延性。对于节点,可通过提高约束、优化钢筋搭接方式、采用韧性连接构造等方式显著提升抗倒塌能力。节点设计是结构抗倒塌的薄弱环节,强化节点细部构造往往能大幅改善整体稳定性。

4 数值模拟技术在连续倒塌研究中的应用

4.1 有限元模拟的技术优势

数值模拟技术能够较为真实地再现结构在局部构件失效后的动力响应过程,为连续倒塌机理研究提供重要支撑。在模拟过程中,塑性铰的发展、构件断裂演化以及连接部位失效等复杂非线性行为均可得到细致刻画,使结构受力与变形过程更加清晰。ABAQUS、ETABS、ANSYS、OpenSees 等有限元软件已被广泛应用于相关研究,不同

软件在材料模型、单元类型和求解策略上的优势,使其能够适应多种结构形式与分析需求。通过建立合理的数值模型,结构从初始局部破坏到整体坍塌的发展过程可以被完整呈现,实现全过程响应的可视化分析。

4.2 构件移除法与替代荷载法的数值实现机理

在连续倒塌研究中,有限元分析为结构失效机理模拟提供了重要技术手段。构件移除法通过在计算过程中瞬间删除关键构件单元,模拟突发破坏情形,以评估结构在局部失效后的整体响应。该方法能够较真实地反映内力重分布和结构变形过程,但模型需充分考虑几何非线性、材料非线性以及构件接触等复杂因素,对计算精度和建模水平要求较高。替代荷载法通过在失效构件位置施加等效荷载,间接反映构件缺失后的受力状态,建模过程相对简化,适用于方案比选和初步安全评估。

4.3 全寿命周期数值预测模型构建

随着材料老化模型、环境作用模型与损伤累积理论的不完善,结构安全评估正逐步由静态分析转向全寿命动态预测。通过构建连续倒塌预测框架,可在时间维度上模拟结构性能的演化过程,更真实地反映服役期内的安全状态。模型可综合考虑材料强度随时间退化、节点反复受力导致的性能衰减以及钢筋在腐蚀环境中的截面损失,对结构整体承载与传力能力进行系统评估。长期环境作用与荷载效应叠加后,局部薄弱环节可能逐步放大,对抗倒塌能力产生不利影响。基于这一预测结果,可提前识别高风险部位,为维护加固方案制定提供科学依据。全寿命连续倒塌预测使结构安全管理更加前瞻和精准,有助于实现由事后修复向主动防控的转变。

5 建筑结构抗连续倒塌的未来发展方向

5.1 韧性导向结构体系的提升策略

韧性设计将关注点从单纯防止破坏转向灾害后的恢复能力,强调结构在遭遇极端事件后的可修复性、功能保持水平与恢复速度。结构不再以“是否损坏”作为唯一评价标准,而是更加重视损伤是否可控、修复是否便捷以及整体功能是否能够快速恢复。围绕这一目标,建筑结构逐步引入韧性化构造理念,通过设置可更换节点,使受损部位在灾后能够快速拆换,减少对主体结构的影响。耗能构件在灾害中优先承担能量消耗任务,将损伤集中在可控区域,自修复材料则通过材料自身机制延缓裂缝发展。多种措施协同作用,有助于降低倒塌扩展风险,提高结构在极端条件下的安全性和持续使用能力,为城市安全运行提供更具韧性的工程支撑。

5.2 智能监测与大数据分析在倒塌预警中的应用

通过在结构关键部位布设传感器网络,可对构件应力、整体位移、裂缝变化及节点性能进行连续监测,使结构运行状态得到实时掌握。监测数据在长期积累后,能够形成完整的结构行为数据库,为安全分析提供可靠基础。借助

大数据分析模型,对多源信息进行综合研判,可识别结构性能退化趋势和潜在失稳特征,提前发现传统人工检查难以察觉的风险信号。智能预警系统在此基础上建立风险判别规则,当监测指标接近或超过安全阈值时,系统能够自动发出预警信息,为管理人员争取处置时间。通过提前干预和针对性维护,可有效避免风险进一步扩大,减少突发性结构事故的发生。智能监测与预警技术的应用,使结构安全管理由被动响应转向主动防控,为工程长期安全运行提供有力保障。

5.3 新材料与智能构造体系的发展趋势

高性能混凝土和超高强钢材的应用,为结构提供了更高的承载能力和更优的变形性能,使其在极端荷载作用下表现出更强的安全储备。自修复混凝土通过材料内部的修复机制,在裂缝初期阶段即可实现性能恢复,延缓结构劣化进程。高延性纤维增强材料在受力过程中能够持续耗散能量,改善传统材料脆性破坏特征,为结构提供稳定的延性支撑。材料性能的提升为结构整体韧性奠定了坚实基础。智能构造技术的引入,使结构具备一定的自适应能力,可控连接能够在荷载变化时调节受力路径,可调刚度支撑通过改变结构响应特性减轻局部损伤影响。这类构造方式在局部破坏发生后仍能维持整体功能,为结构安全提供多重保障。

6 结论

连续倒塌作为最严重的结构破坏模式之一,是现代建筑设计中不可忽视的重要问题。本文从连续倒塌机理、设计方法、关键技术路径与数值模拟等方面展开系统研究,指出提高结构冗余性、强化关键节点与构件延性、构建多路径传力体系等措施对于提升结构抗倒塌能力具有关键作用。数值模拟技术为连续倒塌研究提供了精准的预测与优化手段,有助于建立性能化与韧性化的结构体系。未来,结合智能监测、先进材料与全寿命周期评估,建筑结构抗连续倒塌能力将得到进一步提升。研究成果对于工程安全保障与结构灾害防控具有重要理论与实践意义。

[参考文献]

- [1]蒋友宝,王艺琨,吴春成,等.管内穿索下弦与交叉撑杆的张弦梁结构连续倒塌抗力计算模型[J].建筑结构学报,2025,46(11):237-249.
- [2]程琳阳,蒋明持,朱云力,等.浙江警用无人机项目航空主题馆单层 ETFE 膜结构施工关键技术研究[J].建筑施工,2025,47(9):1448-1451.
- [3]黄秉文,许成龙,周强,等.爆炸荷载下高层框剪结构破坏数值分析[J].武汉理工大学学报,2025,47(8):27-34.
- [4]李治,喻贺云,褚怡璇,等.锈蚀空间网架结构力学性能分析和失效概率评估[J].振动与冲击,2025,44(15):1-10.

作者简介:王江(1987.6—),男,汉族,毕业院校:河北建筑工程学院;现就职单位:中土大地国际建筑设计有限公司。

城镇燃气老旧设备设施更新改造技术方案与实践研究

张军锋

中海石油福建新能源有限公司, 福建 厦门 361008

[摘要]近年来,城镇化建设进程在深入推进的同时,燃气老旧设备设施暴露出的问题也逐渐增多,经常存在“带病运行”的问题,需要加强设备的更新改造,注重新技术、新设备以及新材料的运用,从源头将安全隐患消除,保证燃气行业管理以及安全水平能整体提高。鉴于此,本篇文章主要以城镇燃气老旧设备安全改造为切入点,围绕安全和绿色发展方向,从多个角度出发,深入研究城镇燃气老旧设备安全改造技术方案与实践,以实现燃气行业的可持续、健康发展。

[关键词]燃气老旧设备;更新改造;技术方案

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18632

中图分类号: F426.22

文献标识码: A

Research on the Technical Scheme and Practice of Updating and Renovation of Old Urban Gas Equipment and Facilities

ZHANG Junfeng

CNOOC Fujian New Energy Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 361008, China

Abstract: In recent years, while the process of urbanization has been deepening, the problems exposed by old gas equipment and facilities have gradually increased, often resulting in the problem of "operating with problems". It is necessary to strengthen the updating and transformation of equipment, pay attention to the use of new technologies, equipment, and materials, eliminate safety hazards from the source, and ensure the overall improvement of gas industry management and safety level. In view of this, this article mainly takes the safety renovation of old urban gas equipment as the starting point, focuses on the direction of safety and green development, and conducts in-depth research on the technical solutions and practices of safety renovation of old urban gas equipment from multiple perspectives, in order to achieve sustainable and healthy development of the gas industry.

Keywords: old gas equipment; renewal and renovation; technical solution

引言

我国城镇燃气设备的应用时间大部分已趋近 20 年,虽然其可以为人们的生活提供诸多便利,但随着时间的推移,加之城镇燃气管线的延伸、下游用户增量,导致原有设备设施超负荷运行,如城燃 LNG 中心气化站罐容、气化量、调压撬、管输量等,已经无法与市场需求相适应,需要扩容改造。因此,应该结合实际情况,科学合理制定改造技术方案并实践,降低燃气事故发生概率。

1 城镇燃气老旧设备安全改造的必要性

在城镇的快速发展下,加强燃气老旧设备安全改造,合理制定技术方案并实践,对燃气供应稳定性、可靠性的提升有促进作用,也能保障人们的生命财产安全。

1.1 有助于燃气供应稳定性和可靠性的提升

近年来,随着城镇燃气管线延伸、下游用户增量,致使原有设备设施超负荷运行,包括城燃 LNG 中心气化站罐容、气化量、调压撬、管输量等,已经很难满足市场需求,因此需要进行扩容改造,以保证燃气稳定供应。同时,城燃管线以及配套的设备设施等使用年限较长,已接近或达到使用寿命年限,为保证设备安全运行,同样要对其进行适当改造^[1]。此外,通过安全改造,及时更新 LNG 中心气化站出站调压设备和用户端调压设备,合理优化管网

布局,有助于燃气压力的安全稳定供应。

1.2 有助于保障人民生命财产安全

城燃管线以及配套的设备设施等随着使用时间的延长,管道、阀门等部件可能出现老化、腐蚀、内漏等情况。城镇燃气埋地钢管长期受地下水、土壤等因素影响,出现锈蚀等现象,在燃气泄漏情况下,一旦遇到明火或者静电,可能引发爆炸事故。通过安全改造,积极应用新材料、新设备以及新技术,可以对老化的燃气管道和部件进行更换、修复等,将燃气泄漏、爆炸等风险降低,为人们的生命财产安全提供保障。此外,制定合理的燃气老旧设备安全改造技术方案,可以在阀井处安装泄漏与水位监测设备,精准识别管网运行信息,随时了解异常现象。通过新设备的使用,对燃气的输送、利用精准把控,让燃气始终在安全的环境中流通,提升居住环境的安全性^[2]。

1.3 有助于节能高效环保目标的实现

城燃管线以及配套的设备设施因为技术滞后,可能存在燃气燃烧不充分的问题,致使污染物产生,包括颗粒物等,若在大气中排放,不可避免会对环境造成污染。通过对燃气老旧设备安全改造,上述问题能有效解决,借助先进技术和设备,促进燃气燃烧效率的提升,从源头将污染物的排放减少。同时,在用户端燃具、热水器、集成灶、

锅炉等使用上,通过加强安全改造,同样能实现节能高效环保。诸如,随着国家对燃气具标准不断提高,当前应用的灶具、集成灶等需要安装熄火保护装置;燃气锅炉安装泄漏切断连锁装置等,不仅节约用户燃气使用成本,还能真正做到节能高效与使用安全的双重提升。

2 城镇燃气老旧设备安全问题分析

在城镇建设过程中,燃气设备是不可缺少的重要设施,在城镇燃气管线延伸、下游用户增量下,原有设备设施出现了超负荷运行,并且城燃管线及配套的设备设施等长期应用,基本已经达到使用年限,潜在的安全风险和隐患较大,城镇燃气老旧设备安全改造势在必行。

2.1 LNG 中心气化站气化装置

对于福建地区而言,具有山地多的特点,因此管输气无法到达的地方城镇,燃气基本以 LNG 中心气化站对外供气。但是,在城市建设和下游用户用量的不断增大下,原有的站内气化装置已经很难满足用户需求,需要增容改造,附带有基础设施的加固、管道改造等。但在此期间,可能存在安全问题。在实际运营阶段,由于采用的设备和技术特殊,对人员要求高。诸如,在 LNG 存储和气化方面,要对温度和压力严格控制,以提升气化过程的安全性。如果对此方面考虑不到位,安全风险将会加剧^[3]。

2.2 燃气调压设备

福建多山地,管输气到不了的地方城镇燃气多以 LNG 中心气化站对外供气,而在城市建设和下游用户用量的不断增大下,旧有的出站调压量小、低效,外供管输气压力不能满足用户需求。并且,在设备的长期运行下,泄漏、老化等问题会加剧,维护需要花费大量时间和精力,且工作任务繁重。因此,在燃气调压装置的改造中,应该对站内调压装置的改造和用户端调压箱的改造深入分析,做到一并推进。

2.3 燃气管网

早期部分小区燃气立管设置在厨房内,用户在装修期间,一般会采用瓷砖、亚克力板等材料对立管进行暗封。虽然此方法看起来美观,但会使立管处在密闭的空间,在管道的长时间运行中,出现腐蚀的概率较大,加之维护难度大,在出现漏气问题时,很难被及时发现。针对地下管网,排布上错综复杂,并且在施工破坏等因素影响下,管道无法做到安全运行。此外,随着城市发展、用户用量增加,也导致管输超负荷运行,为管网的安全运行埋下不小隐患。

2.4 用户端设备设施

在应用燃气表时,用户多会安装在橱柜内,在不良环境的长期影响下,外观会有锈蚀、表体密封填料老化等问题出现,一旦表体泄漏,不可避免会引发安全事故。对于表后设备设施,用户不能及时更换,潜在的安全隐患大,尤其是燃气灶等,使用年限已超出,部分零部件老化,最终导致火灾、爆炸等事故发生概率增大。

3 城镇燃气老旧设备安全改造技术方案与实践

3.1 城镇燃气老旧设备安全改造技术方案设计思路

在城镇燃气老旧设备安全改造过程中,应从长远的角度思考,系统对现有燃气设备的老化程度、安全隐患、运行效率等全方位评估,利用专业检测仪器对问题精准定位,包括管道腐蚀、阀门老化等。对于管道,加强新型耐腐蚀、高强度材料的利用,对铺设路径合理优化,减少弯折、受力点,使其抗压和抗变形能力增强。针对阀井、调压箱等重要部件,加强智能化控制技术的应用,实现远程监控和故障预警,提升控制精准性、维护及时性。在改造期间,注重和周边基础设施的协调,以免与其他施工产生干扰,让改造后的设备设施满足安全生产需要,实现安全稳定供气。

3.2 城镇燃气老旧设备安全改造技术方案设计原则

(1)安全性。城镇燃气老旧设备在更新改造过程中,安全和规范至关重要,作为燃气行业技术人员要充分考虑改造的安全性和合规性,同时也要组织改造前的风险评估和鉴定辨识工作,确保改造后的燃气设备设施正常运行并满足改造预期,将安全风险和隐患遏制在根源。

(2)适应性。针对制定的安全改造技术方案,应该对城镇环境变化、需求综合考量,保证技术方案能与不同区域的特点、发展趋势相适应,尤其是在城镇规划调整等多方面因素的干扰下,需要让燃气设备始终保持稳定、持续运行。

(3)高效性。技术方案的设计应将燃气设备运行效率、稳定性提升作为目标,通过设备设施更新改造、优化燃气管道布局。

3.3 城镇燃气老旧设备安全改造技术方案实践

3.3.1 LNG 中心气化站气化装置增容改造

在长输管线无法到达的山地,如福建闽北地区,城镇燃气气源多是以 LNG 中心气化站的形式存在, LNG 经站内气化-调压-计量-加臭后通过城镇管网输送至千家万户,随着城市用户用量的不断增加,原有的气化能力不能满足用户端用气需求,必然造成外输至城镇管网的天然气压力不足、气体温度偏低,燃气保供和安全运行方面得不到保障。鉴于现状,对站内老旧低效的气化装置非常有必要进行增容改造,改造常见措施及范围主要有:

小改大。站内场地不允许情况下,拆除原有小的气化器,替换为大的气化器,改造前还应重点评估原有气化器基础荷载及运行状态下的风载,确保改造后气化器基础荷载和安全间距等符合技术要求,实现改造,满足用户需求。

数量增加。场地若有预留,直接添加新气化器与旧有的并联,以增大小时气化量。

加强气化器增容改造,包括对原有管道法兰接口、低温管道保冷层、防冻地面、排水沟渠、基础加固等改造施工作业。

3.3.2 调压设施的安全改造

在城镇小区天然气供应系统中,调压设施作为不可缺

少的关键部分,其可靠性和安全性关系到居民的安全。因此,在对城镇燃气老旧设备安全改造过程中,应该加强区域调压设施的运用,对楼栋调压箱加以替代。针对区域调压设施,呈现出的优点较多,具体体现在以下几个方面:

(1) 维护成本低。整个小区采取集中调压的方式,可以让天然气的供应保持稳定、持续,有效对设备的使用成本加以节约,同时为维护工作的开展提供便利。

(2) 安全稳定性高。通过双路运行方式的应用,一路通过定期维护和维修,另一路则向下游供气,不会对用户的用气造成影响。并且,利用现场数据采集系统,与公司数据采集监测控制系统等联合,能形成健全的城市中低压燃气管网泄漏监测系统,在先进技术的辅助下,实现对燃气泄漏等情况的动态监测,有效对燃气进行调度和预警,保证异常情况出现时能立即响应和应对。

3.3.3 燃气管网的安全改造

在城镇燃气老旧设备安全改造期间,燃气管网的更新改造至关重要。在开展此项工作过程中,需要侧重室内外燃气管道的改造和更新。对于使用时间较长的楼前埋地管道,可以将其改造成架空管道,对于居民家中的燃气立管,则可以改造成户外立管。在材料的选用上,应注重新型材料的运用。具体而言,升级小区红线内中压燃气管道,利用 3PE 防腐钢管、聚乙烯 PE 管等,同步设置直埋球阀,保证管道的耐腐蚀性、耐久性能提升。入户端利用不锈钢管敷设至灶具热水器,配套不锈钢灶具专用连接软管,同时加装灶前燃气自闭阀、民用燃气切断报警器等,通过多重防护,有效对泄漏等风险进行控制。对于立管和用户引入管,应该增设防雷击措施,确保在极端天气的影响下,用气安全能得到保障。在管道改造过程中,应用的方式需要本着因地制宜的原则,根据实际情况加以处理^[4]。

(1) 直接开挖法。旧管道在更换过程中,可以采取直接开挖的方式。针对道路整体改造,老旧管网改造可以采用重新建设管道的方式,或者在新管道验收投产后,如果与旧管道的支管出现碰接现象,可以对废除的旧管道进行氮气置换,封堵管道两端位置,利用注水等方法处理。

(2) 直接报废法。针对城镇主要城区的地下管线,具有空间狭小的特点,很难找到合适的地下管线走向。在此基础上,可以通过直接打碎原有改造管线的方式,利用扩孔的办法对原有旧管进行报废处理,在原有管道位置铺设钢管或 PE 管。

3.3.4 燃气表的安全改造

在对燃气表进行技术改造过程中,主要加强物联网燃气表的利用,通过与燃气公司物联网平台的联合,将相关数据上传到平台上,平台对数据进行汇总、分析、整理,保证燃气表平稳运行的同时,管理能实现远程化、智能化。用户在使用期间,可以运用微信、支付宝等软件进行在线

燃气费充值,能够简化以往人工抄表、现金缴费的繁琐流程,提升缴费的便利性,节约用户的时间。在进行技术改造过程中,也要加强用户端相应传感器的利用,包括燃气、烟感等传感器,保证室内环境参数能得到密切监测,包括燃气浓度、烟雾浓度等。在与智能网络的有效联合下,异常情况出现时能做到及时预警,确保燃气设备始终维持在安全状态。通过线上线下的监控、跟踪以及评估,可以实现平台感知与分析能力的增强,确保城镇燃气管网系统在紧急情况出现时,灵活调度和处理,提高管理水平。

3.3.5 用气设备的安全改造

在进行老旧燃气设备技术改造过程中,企业应该加强对用户的引导,让其及时更换有安全隐患、达到使用年限的燃气设备。尤其是对于老年群体,需要引导其更新燃气具,确保在异常情况出现时,系统能第一时间报警并处理,让厨具得到保护,同时确保用户的安全^[5]。

3.4 周边用户用气情况的持续监测

在对城镇燃气老旧设备安全改造结束后,可能存在少量用户无气的现象。对此,应该及时将改造技术、改造进度告知服务热线,了解情况后为新建燃气管道供气。同时,为保证用户可以安全用气,应该对周边管网末端压力、调压设施等数据定期采集和分析,一旦在监测期间发现异常现象,第一时间处理,保证供气稳定和安全。

4 结束语

综合而言,城镇燃气老旧设备安全改造对燃气安全管理水平的提升、保障人民生命财产安全有促进作用,可谓惠及千家万户。因此,在实际改造期间,应该从实际出发,加强新材料、新设备、新工艺等的利用,注重设备的更新,并强化智能化物联网等先进技术的运用,实现对燃气老旧设备的全方位升级,确保燃气供应安全性、可靠性在提高的同时,用户能够获得更为便捷的服务。未来,还应该继续探索新的改造路径,积极应用智能化技术,搭建智慧燃气安全网,为燃气行业的可持续发展打下坚实基础。

[参考文献]

- [1]张刚,钟炎鑫,孙启超,等.浅谈城镇燃气老旧管网智能化改造[J].石化技术,2025,32(4):300-301.
 - [2]徐国平,冯如意,朱峰.城市老城区主干道老旧燃气管网改造方法探讨[J].城市燃气,2024(8):35-38.
 - [3]张大杰,刘苗.城市道路老旧燃气管网改造工程施工问题难点及对策[J].城市管理与科技,2024,25(4):31-32.
 - [4].山东港华燃气集团老旧燃气管网改造目前已过半[J].城市燃气,2023(10):47.
 - [5]何剑雄.城镇燃气老旧管网改造中的安全隐患与防范措施[J].工程建设与设计,2023(15):83-85.
- 作者简介:张军锋(1986.5—),男,毕业于长江大学油气储运工程专业,目前就职于中海石油福建新能源有限公司,生产作业主管。

市政工程施工概预算与竣工结算的差异分析及管控措施

吴领领

中交四航局第一工程有限公司, 广东 广州 510080

[摘要]投资控制贯穿于市政工程项目管理的全过程,是成本管控的重点。在不同阶段项目总投资的表现形式不同,但其基本逻辑体现为“估算控制概算、概算控制预算、结算形成决算”。造价控制的两个节点为施工概预算与竣工结算,前者是项目成本控制的事前预测,后者为成本控制的事后核算。二者之间的差异体现在项目从图纸设计到投入建设过程,成本会在设计深化、市场波动等因素下发生变动。因此需对市政工程施工概预算与竣工结算的差异进行深入分析,并能形成可靠的管控体系,为市政工程项目成本控制提供可靠支持。

[关键词]市政工程;概预算;竣工结算;差异分析;管控措施

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18622

中图分类号: TU723

文献标识码: A

Analysis of Differences and Control Measures between Construction Budget and Final Settlement of Municipal Engineering Projects

WU Lingling

The First Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510080, China

Abstract: Investment control runs through the entire process of municipal engineering project management and is a key focus of cost control. The manifestation of total project investment varies at different stages, but its basic logic is reflected in "estimating and controlling the budget, controlling the budget through the budget, and forming a final settlement through settlement". The two nodes of cost control are construction preliminary budget and completion settlement. The former is the pre forecasting of project cost control, while the latter is the post accounting of cost control. The difference between the two is reflected in the process of project design from blueprint to construction, and the cost will change due to factors such as design deepening and market fluctuations. Therefore, it is necessary to conduct a thorough analysis of the differences between the construction budget and completion settlement of municipal engineering projects, and to form a reliable control system to provide reliable support for cost control of municipal engineering projects.

Keywords: municipal engineering; preliminary budget; completion settlement; differential analysis; control measures

在城市发展中,市政基础设施发挥着重要作用,对城市发展效能与公共福祉产生极大影响。在市政工程建设中,其建设规模不断扩大,且技术的复杂性日益增加,对项目投资管控提出更高要求。在项目全生命周期的管控中工程造价管理是要点所在,施工阶段的概预算与竣工结算是关键环节,对项目成败与资金使用效率产生极大影响。市政工程的建造周期长,材料价格波动较大,受政策调整等因素影响,竣工结算金额与初始施工图预算存在偏差,当偏差较大时不仅会出现资金的损失,还会出现合同纠纷、工期延误等问题,影响建筑市场秩序。所以本文对市政工程施工概预算与竣工结算的差异进行深度分析,并能提出管控措施,有效控制市政工程施工投入成本,确保市政工程施工质量。

1 施工概预算与竣工结算的概念及核心差异对比

1.1 阶段定位与核心目的

施工概预算:施工概预算发生在项目施工前的设计与招投标阶段。施工概预算上承投标报价和中标合同价,下启项目成本控制和过程结算。是施工单位内部管控的起点

和基准。施工单位按照施工图预算,精确计算出工程量,确定目标成本与计划利润,开展施工方案经济必选,为竣工计算奠定基础^[1]。

竣工结算:工程竣工验收后会发生竣工结算。竣工结算是施工合同履行情况的经济性总结,属于结论性与结算性文件。施工单位以竣工结算为依据,确定最终工程价格,对经营成果与利润进行回收,处理合同争议的成果固化。总体而言,竣工结算的主要目的是对收入展开汇总,锁定利润,回收款项,最终可以完成清账。

1.2 编制依据与精度

施工概预算与竣工结算在概念上存在差异,因此在编制依据方面存在根本性区别,精度和覆盖范围方面存在差异。施工概预算与竣工结算核心差异对比如表1所示。

设计图纸和计划中的施工方案的依据是概预算,可以对社会平均水平的概算定额或预算定额进行反映,编制期的信息价或市场询价是材料价格的基础^[2]。工程实体的竣工图纸和记录施工过程原始凭证的变更签证单等以竣工结算为依据,实体计量工程量,按照合同约定调整材料价格。

表 1 施工概预算与竣工结算核心差异对比

对比维度	施工概预算（设计概算/施工图预算）	竣工结算
编制阶段	设计阶段/招投标阶段	竣工验收阶段
核心目的	投资控制上限、合同价基础	确定最终实际造价、支付依据
主要依据	初步设计/施工图纸、概算定额/预算定额、计划价格	竣工图、合同、实际完成工程量、变更签证、市场调价文件
涵盖范围	设计范围内的建安费用，概算还包括前期工程其他费用	合同内价款+合同外所有已确认的调整费用
精度特性	前瞻性、概括性或精细化，但均为预计值	基于实际发生数据，是项目造价的最终确定
编制主体	设计单位或建设单位	施工单位编制，建设单位审核

2 核心职能差异

2.1 施工概预算：项目经营的“导航图”

施工概预算对施工单位而言核心职能是项目经营的“导航图”，在事前可以锁定成本目标，绘制盈利蓝图，其基本职能是转化图纸上的内容，让其形成可以量化的成本数字，对项目的目标成本与计划利润进行确立。在事中的管控表现为全过程成本控制欲动态纠偏的基准尺，其智能本质是在施工过程中，可以为成本控制提供参照。在资源配置方面，可精准配置资源，为采购计划提供指导。在决策支持阶段，可以为施工单位的技术决策提供经济性判断，当施工方案较多时，可以选择技术可行与经济最优的方案^[3]。施工概预算，可以从之前的被动核算成本，转变为主动创造利润，为施工单位的精益化管理、盈利保障提供支持。

2.2 竣工结算：造价的“事实确认器”

在经济上项目建设活的全面终结是竣工结算，竣工结算的核心职能是为所有造价预测的“事实确认器”。竣工结算的依据是工程实体的竣工图、记录施工过程原始状况的影像资料等，可以实现计量与计价的精确性。合同履行清算要对合同约定范围内的工作进行处理，要对合同履行过程中产生的大量“变量”进行处理。变量主要有工程变更、现场签证等，结算与预算产生偏差的主要来源是这些变量^[4]。竣工结算是支付与决算的基础，竣工结算书需双方共同确认，建设单位支付工程尾款、施工单位确认营业收入等过程中可以将其作为法律凭证。竣工结算的职能核心为“确”，对实际工程量、最终价格等进行确认。

3 市政工程施工概预算与竣工结算的差异原因

3.1 工程偏差

结算与预算产生差异的直接因素是工程量偏差，设计阶段的预测工程量与竣工后实测工程量之间的差异是其主要来源。工程偏差的核心原因体现在设计深度与错漏碰缺、地质与客观条件变化与方案优化与工程变更等方面。无效成本和负面偏差产生的主要原因是初期设计对地下

管线探查不足造成的，难以保证施工图与实际保持一致^[5]。基础处理、土方工程量的增加，其主要原因是不可预见情况，比如市政工程常遇软土地基、地下障碍物等。工程量的增减会受到原设计方案的调整影响。工程量计算基数的不同，会受到承发包双方对清单计算规则的理解不同造成。以某市的市政道路与管廊项目为例，通过对数据的跟踪与分析，发现土方及地基处理工程对偏差较大。某城市综合管廊项目工程量偏差如表 2 所示。

表 2 某城市综合管廊项目工程量偏差

分部工程	预算工程量	结算工程量	偏差率	主要偏差原因
土方开挖	150,000 ³	182,500 ³	+21.7%	地下水位高于勘测报告，需加大开挖面及排水
混凝土管廊主体	45,000m ³	43,800m ³	-2.7%	部分路段优化壁厚设计
防水卷材	120,000m ²	135,000m ²	+12.5%	设计节点详图不明确，施工中增加附加层
回填砂砾石	110,000m ³	95,000m ³	-13.6%	实际开挖料部分符合回填要求，就地利用

从表 2 可以看出在该项目中，预算工程量与结算工程量之间的偏差较高，偏差量最大的是土方开挖，造成这种现象的主要原因是地下水位高于勘测报告，需加大开挖面及排水。当工程量出现偏差后，就会造成最终的成本增加。

3.2 单价与费用偏差

单价与费用出现偏差，可以对价格时点到整个施工期间的各项影响因素对成本造成的影响予以反映。长期项目在施工过程中，面临的主要因素较多，对于超出部分的调价可使用下面的公式进行确定：

$$\Delta P = P_0 \left[A + \left(B_1 \times \frac{F_{t1}}{F_{01}} + B_2 \times \frac{F_{t2}}{F_{02}} + B_3 \times \frac{F_{t3}}{F_{03}} + \dots + B_n \times \frac{F_{tn}}{F_{0n}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

上式中： ΔP —需调整的价格差额；

P_0 —付款证书中承包人应得到的已完成工作量的金额；

A —定值权重（即不调部分的权重）；

$B_1、B_2、B_3、\dots、B_n$ —各可调因子的变值权重为各可调因子在投标函投标总报价中所占的比例，且 $A+B_1+B_2+B_3+\dots+B_n=1$ 、 $F_{t1}、F_{t2}、F_{t3}、\dots、F_{tn}$ —各可调因子的当期价格指数，指付款证书相关周期最后一天的前 42d 的各可调因子的价格指数；

$F_{O1}、F_{O2}、F_{O3}、\dots、F_{On}$ —各可调因子的基本价格指数，指基准日期的各可调因子的价格指数。

3.3 不可预见费与争议费用

不可预见费与争议费用主要体现在下面两个方面：

第一，从“预备费”到“具体费用”的转化。为应对工程量偏差与价格波动等不可预见事件，专门设立设计概算中的基本预备费，基本预备费=（工程费用+其他费用）*5-10%。在结算阶段会分解预备费，形成具体的费用，对项目风险管控水平进行衡量时，预备费是最为直接的指标^[6]。

第二，结算争议。发承包双方常对部分费用的计取存

在分歧,受到合同条款模糊、变更签证程序不规范等因素的影响出现争议^[7]。建设工程合同纠纷中,涉及竣工结算争议的大约有 45%,而且对于争议的解决周期较长,达到了 9 个月。在争议的存在下,出现了长期拖欠工程尾款的情况,不仅对企业的现金流产生影响,也会在社会上对企业形象造成损害。市政工程结算争议主要成因、影响及发生频率如表 3 所示。

表 3 市政工程结算争议主要成因、影响及发生频率

争议主要成因	典型表现形式	对结算的影响	样本案例中发生频率
合同范围界定不清	对“工作内容”包含与否的理解分歧	导致工程量重复计算或遗漏	30%
变更签证程序瑕疵	签证仅有口头指示无书面文件,或签字不全	费用不被认可,引发双方扯皮	40%
材料价格调整分歧	对调价公式中基数、指数的适用争议	单价无法达成一致,影响总额	20%
措施费计取争议	施工方案调整后,措施费是否调整、如何调整	措施项目结算价远超预算	25%
工程质量与计价挂钩	因质量缺陷扣减工程款的比例与金额争议	结算尾款支付受阻	15%

4 市政工程施工概预算与竣工结算的管控措施

4.1 强化事前控制

市政工程施工概预算与竣工结算的管控,事前控制属于先将问题扼杀在萌芽状态,其成本远低于事后补救。

第一,施工组织设计的经济必选。对于重大技术方案,需组织开展施工技术方案的与经济必选,在考虑技术可行性的同时,要对不同方案的成本差异、对施工工期的影响进行综合判断。

第二,合同与风险的精细化研判。通过合同交底与风险清单,可以在开工前,确定承包范围边界、变更签证流程等内容。

第三,预算与成本的精准化编制。以施工图为依据,编制实施性成本预算。分解目标成本与责任,明确各项成本的控制责任部门和责任人。

4.2 强化事中控制

事中控制是管控的要点所在,要求能通过事中控制,推动施工单位从“静态计划”向“动态管理”转变。

第一,动态成本核算与实时反馈。建立统一的动态成本台账,按月进行“三同步”核算。推行“两算对比”制度化,逐项对比实际成本与计划成本,计算节超额与节超率。

第二,关键过程管控与精准纠偏。在管控过程中,采取“限额领料”制度,对材料进行管控。通过专项成本分析会,会诊施工中的各类问题,并找到原因开展纠偏。进度与成本的联动控制,为管理决策提供了更科学的依据。

第三,过程资料与签证索赔的即时化管理。坚持变更签证“不过夜”原则,避免事后补签、扯皮导致无效,索赔证据的持续收集。

4.3 强化事后控制

事后控制也同样重要,要求能通过严格结算时限、推行“无争议价款先行支付”与建立多元化争议解决机制,对施工概预算与竣工结算进行有效控制。

第一,严格结算时限。在市政工程中“久拖不结”比较常见,为了避免出现该问题,要采取刚性约束手段规定结算审核时间。

第二,推行“无争议价款先行支付”。审核超期或存在部分争议的项目,在结算过程中,要求能出具并支付无争议部分的结算价款,不能将没有争议的部分以存在争议拖延整体支付。

第三,建立多元化争议解决机制。鼓励双方在争议解决过程中,开展协商手段,同时,也可以采取行政调解,调解前要向工程造价管理机构申请。在调解后无法达成和解的,要在合同基础上,开展仲裁或诉讼解决。

5 结束语

市政工程施工概预算与竣工结算存在显著差异,前者属于项目施工前的设计与招标阶段,后者属于工程竣工验收后的阶段。施工概预算是投资的“计划控制器”,竣工结算属于造价的“事实确认器”,二者在核心职能上存在显著差异。工程量偏差、单价与费用偏差等是造成二者差异的主要原因,因此在市政工程施工概预算与竣工结算的管控中,要通过事前、事中与事后三个方面的控制,实现控制的系统化与全面化,全面提升管控的整体水平。未来随着现代科学技术的快速发展,在市政工程施工概预算与竣工结算的管控中,要加强数字化技术的应用,实现成本的数字化管理,确保管理的精细化,降低市政工程施工的成本损耗,提升资金的利用率。

[参考文献]

- [1]江静怡.基于建筑工程结算审核内容及审核方法的研究[J].低碳世界,2021,11(9):2.
 - [2]张盖,盛博,魏静.基于 BIM 技术的建筑群施工造价偏差预警[J].北方建筑,2024,9(2):122-126.
 - [3]赵家宝.市政工程造价超概预算原因分析与控制策略[J].中国科技期刊数据库工业 A,2023(1):3.
 - [4]王永.EPC 模式下市政工程概预算的编制与管理——以沈阳汽车城智慧路网项目为例[J].工程技术研究,2022,7(24):110-112.
 - [5]李淑华.市政工程施工及竣工结算阶段造价管理与造价控制研究[J].租售情报,2021(32):31-33.
 - [6]覃志明.市政工程施工阶段及竣工结算阶段造价管理与造价控制研究[J].明日,2021(17):440.
 - [7]田一婷.甲方视角下房地产项目工程造价全生命周期动态管控策略[J].中国房地产业,2025(31):2.
- 作者简介:吴领领(1991.1—),男,安徽理工大学,工程管理专业,中交四航局第一工程有限公司。

现代信息技术与建筑工程项目管理的深度融合实践

温萌¹ 莫莹洁²

1. 祥浩工程造价咨询有限责任公司, 广西 南宁 530000

2. 广西远潮管理咨询股份有限公司, 广西 南宁 530000

[摘要]随着建筑行业持续发展, 工程项目规模逐渐扩大, 传统管理模式在效率、精确度以及协同能力等方面遭遇不少挑战, 现代信息技术的应用给建筑工程项目管理带来了全新解决办法, 借助数据驱动决策、智能化施工管理以及全生命周期监控, 达成了工程管理的科学化、精细化以及透明化。文中依据建筑工程管理实践, 深入剖析现代信息技术在项目管理里的作用与优势, 研究数字化融合策略, 归纳深度融合的实践成果与效益, 为工程管理模式的优化与创新给予参考。

[关键词]现代信息技术; 建筑工程; 项目管理

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18633

中图分类号: TU71

文献标识码: A

Deep Integration Practice of Modern Information Technology and Construction Project Management

WEN Meng¹, MO Yingjie²

1. Xianghao Engineering Cost Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

2. Guangxi Yuanchao Management Consulting Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract: With the continuous development of the construction industry, the scale of engineering projects is gradually expanding. Traditional management models are facing many challenges in terms of efficiency, accuracy, and collaboration. The application of modern information technology has brought new solutions to construction project management. With data-driven decision-making, intelligent construction management, and full lifecycle monitoring, scientific, refined, and transparent engineering management have been achieved. Based on the practice of construction project management, this article deeply analyzes the role and advantages of modern information technology in project management, studies digital integration strategies, summarizes the practical achievements and benefits of deep integration, and provides reference for the optimization and innovation of engineering management models.

Keywords: modern information technology; architectural engineering; project management

引言

建筑工程项目管理是保障工程质量、进度以及成本控制的关键手段, 传统上一直依靠经验以及人工判断来开展相关工作。不过, 随着建筑项目复杂性的不断增加, 传统的管理模式在信息传递的速度、数据分析的精度以及多方协同等方面慢慢呈现出一定的局限性。现代信息技术发展极为迅速, 其中 BIM (建筑信息模型)、物联网、大数据以及数字孪生等技术的应用, 给建筑工程项目管理带来了全新的途径。这些技术不但可实现项目数据的数字化与信息化管理, 而且能借助智能化的方式去优化施工组织, 提升管理效率, 降低成本风险, 同时推动项目全生命周期的透明化管理。本文把现代信息技术与建筑工程项目管理的深度融合当作研究对象, 综合实践案例与管理理论, 全面深入分析其在实际应用当中所起到的作用、采取的策略以及产生的效益, 期望能为建筑工程管理的数字化转型给予理论方面的支持以及实践层面的指引。

1 现代信息技术在建筑工程项目管理中的作用与优势

1.1 指导工程项目建设

现代信息技术能够加强对工程建设情况的监控, 可以

帮助管理人员及时发现目前工程建设问题, 指导工程建设活动的科学开展。运用 BIM 技术对工程数据量进行统计分析, 快速核算出工程成本实际支出, 和施工预算进行对比可以发现潜在的工程成本管理问题。如管理人员通过 BIM 平台发现工程施工期间钢筋材料采购超出原本需求, 及时联系供应商对尚未供应的钢筋材料进行缩减, 减少了钢筋工程施工成本投入。现代信息技术促进了数据传输和沟通交流, 有效解决了以往施工期间存在的固有施工问题, 同时也提高了工程各环节的透明度和可追踪性, 使管理者能够更精准地制定施工计划并及时调整资源配置。

1.2 构建工程全过程透明化与溯源机制

现代信息技术借助对全流程数据加以采集与存储的方式, 达成了建筑工程项目在整个过程里的透明化管理。在施工进程当中所产生的设计变更情况、材料采购事宜、施工操作状况以及验收数据等, 均能够被实时地予以记录并且可以追溯到源头。这给管理者带来了完备且可信的数据方面的支撑, 还在工程决策环节、质量评估方面以及风险控制领域起到极为重要的作用。就 BIM 技术来讲, 它可以将设计阶段、施工阶段以及运维阶段的数据进行整合, 达成各个环节信息的可视化呈现以及可追踪的状态, 进而

确保项目管理的每一个步骤都能够实现量化以及可以接受检查。物联网设备在施工现场得以应用之后,使得工程的进展状况、材料的使用情形以及设备的状态都可以实时地进行监控,管理者能够及时察觉到出现的偏差以及潜在存在的问题,并且能够开展数据化的分析以及采取相应的整改措施。透明化与溯源机制一方面提升了项目管理的科学程度,另一方面也为工程质量责任的落实给予了强有力的依据,由此降低了因为信息不对称而引发的管理冲突以及工程风险。

1.3 强化项目协同与信息共享

建筑工程项目一般会有设计单位、施工单位、监理单位还有供应商等诸多方面共同参与其中,在传统管理模式下,信息孤岛以及沟通滞后的状况是比较普遍且棘手的难题。现代信息技术加以运用之后,凭借统一的数据平台以及信息系统,达成了各个参与方之间高效的协同作业以及信息的充分共享。借助云计算以及 BIM 平台,各方可以于同一系统里去获取最新的项目数据,进而实现设计方案、施工计划以及进度信息的实时同步更新。这样的协同模式一方面优化了工作流程,另一方面减少了重复的劳动,同时还提升了多方决策的准确性以及及时性。智能化的沟通工具更是进一步缩减了信息传递所花费的时间,让项目管理变得更为高效且顺畅,强化了各方的协作意识以及责任感,由此在很大程度上降低了工程管理当中存在的协调成本以及潜在的风险。

1.4 提高进度、质量、成本等核心管理能力

现代信息技术在建筑工程管理当中所体现出的核心价值之一,便是针对项目进度、质量以及成本展开的全方位优化操作。借助数字化工具,施工进度得以实现可视化的管理模式,如此一来,管理者便能够实时且细致地去监控各个工序的具体执行状况,进而可以及时察觉到可能出现的延误风险,并且迅速采取相应的调整举措。在质量管理这个层面上,智能化的监测系统可对施工材料、施工工艺以及结构性能加以持续不断的监控,而且还能自动生成有关的质量报告,以此方式来削减因人为检查而可能出现的遗漏情况。就成本管理而言,信息技术凭借对数据的分析以及与预算进行对比,能够在项目的初始阶段便识别出潜在的超支风险,并且能够对材料采购、施工方案以及人工投入等方面做出优化处理,最终有效地对项目成本予以把控。从整体的角度来讲,信息技术的应用让项目管理拥有了由数据来驱动的能力,具备了更为科学的决策手段,还能够做到动态的调整,这无疑大幅度提升了工程管理的整体水准以及其可控的程度。

1.5 推动工程管理模式创新

传统的建筑工程管理模式主要依靠经验以及人工来进行判断,存在着管理效率比较低、信息会有滞后情况以及风险难以被预测等诸多问题。现代信息技术被引入之后,

管理模式发生了极为关键的变革。以 BIM 以及数字孪生技术当作基础,项目管理从原本静态的计划控制转变成了动态的全生命周期管理,能够达成设计、施工、运营各个环节的智能联动效果。智能分析以及预测工具会进一步助力管理者在做决策的时候依据数据来展开科学判断,推动施工方案得以优化、资源调配变得合理以及风险预防措施实现前置化。与此信息化管理模式强化了管理责任追溯机制,促使企业从以往的经验型管理朝着数字化、协同化、智能化管理去转变,给行业持续不断的创新给予了技术方面的有力支撑。

2 建筑工程项目管理的数字化融合策略

2.1 施工组织与协同管理的智能优化

施工组织属于建筑工程管理里极为关键的一个环节,其运转的效率会对工程周期以及成本控制产生直接的影响。现代信息技术得到应用之后,施工组织便能够朝着智能化的方向去优化。借助 BIM 建模这种方式,施工图纸还有工序节点都能够展开三维可视化层面的分析,如此一来便能够实现对施工流程的模拟以及优化,进而提前察觉到施工过程中可能出现的冲突,并且制定出更为科学合理的施工计划。与此云平台以及协同办公系统能够确保施工现场、设计单位以及管理人员之间信息的实时共享,使得施工任务以及资源分配都可以依据实际情况动态地做出调整。智能优化一方面提升了施工现场的组织效率,另一方面也降低了施工延误的情况发生,减少了资源的浪费,让施工管理变得更加细致、更加科学合理。

2.2 质量管理的信息化与智能化

工程质量于建筑项目而言,乃是其核心指标所在,同时也是用来衡量项目管理水平以及施工成效的一项关键标准。现代信息技术凭借传感器、物联网设备以及数据分析平台等手段,把传统那种依靠人工去检查并且依靠经验来判断的质量管理模式转变成了信息化且智能化的控制模式。在施工进程当中,该系统可以实时地去采集像材料规格、施工工艺参数、结构性能还有施工环境等诸多维度方面的数据,并且借助智能算法实现自动化的分析,进而针对潜在的质量问题做到及时发出预警并予以纠正。在 BIM 模型当中所集成的质量标准以及检查规则,使得质量管理不但有了可视化、可追踪的特点,而且还能够构建起完整的数据记录以及溯源体系,这既为工程验收给予了科学方面的依据,同时也给后期运维提供了可靠的数据方面的支撑。这样一种信息化且智能化的管理模式,明显地降低了施工缺陷的发生率,提高了工程整体的可靠性以及安全性,与此还对管理流程进行了优化,提升了各个参与方对于质量控制的响应速度以及协同工作的效率,从而为建筑工程项目的高质量交付筑牢了坚实的保障基础。

2.3 成本管理的精细化与动态控制

成本控制属于建筑工程管理方面的关键目标所在,现

代信息技术促使成本管理从以往的事后核算逐步朝着动态且精细的控制方向去转变。凭借 BIM 以及成本管理系统这两者,项目的管理者能够实时对材料采购的情况、施工进度的推进状况以及人工投入的详情予以跟踪,进而形成和预算之间的对比分析结果。由数据所驱动的成本控制,一方面可在施工刚开始的时候就察觉到潜在可能出现的超支风险,另一方面还能够对资源调配以及采购计划加以优化,以此来削减那些并非必要的开支^[1]。经过系统化处理的数据管理再加上智能分析手段,使得成本控制拥有了预测方面的特性以及可操作性的特点,最终达成让整个项目能够在预算范围之内高效地完成这样的目标。

2.4 工程进度的可视化与实时监控

现代信息技术在进度管理方面的运用,让工程项目整个推进过程变得更为透明、清晰且易于把控。借助 BIM 以及项目管理软件,施工各个环节的计划安排和实际完成状况能够实现实时比对,对于关键工序出现的进度偏差也能及时察觉并予以纠正。把移动终端和现场传感器结合起来,能够让管理者随时知晓施工动态,进而开展数据分析以及预测工作,以此来保证工程依照计划顺利推进^[2]。进度管理的数字化转变,一方面提升了施工效率,另一方面还降低了工期延误的风险,使得项目按时交付的可靠性得以提高。

2.5 安全管理的智能监测与风险预警

建筑施工有着高风险的特点,这使得安全管理成了极为关键的环节。现代信息技术借助传感器、视频监控以及数据分析等方式,达成对施工现场开展实时安全监测以及风险预警的目的。该系统可针对危险作业、环境异常还有设备故障加以自动识别,并且会及时告知管理人员要采取预防举措。信息化安全管理模式一方面提升了事故防范的能力,另一方面也削减了安全隐患给工程进度以及成本所带来的影响,进而为施工现场给予了科学且高效的安全保障。

2.6 项目全生命周期的数字化管理体系构建

项目全生命周期管理包含从设计环节一直到施工环节,再到后续的运维环节的整个过程^[3]。现代信息技术借助像 BIM 这样的技术手段,还有物联网以及数字孪生等途径,把设计方面的数据、施工期间的数据以及运维环节的数据都整合到同一个平台上,进而达成全生命周期的管理目标,并且能够实现智能决策。管理者能够在设计阶段对施工风险加以预测,在施工阶段对资源调配予以优化,在运维阶段给予数据方面的有力支持,以此来达成项目精细

化管理的效果,并且实现持续不断的优化。数字化管理体系得以构建起来之后,使得项目管理变得更加科学合理,也更为高效,这为建筑企业今后的长远发展筑牢了稳固的基础。

3 深度融合实践与效益分析

现代信息技术和建筑工程项目管理相互融合,管理效率、经济效益以及安全水平都得到了提高,在管理方面,信息技术让各个参与方能共享实时数据,达成协同决策和科学监督,减少沟通成本和管理盲区,提高工程整体执行效率,在经济效益方面,数字化管理让资源配置得到优化,降低材料浪费与人工成本,使项目在预算范围内高效完成,还可通过预测分析避免潜在的额外支出,在安全效益方面,智能监测和风险预警系统可及时发现施工隐患并采取防控措施,降低安全事故发生率,保障施工人员与工程的安全。现代信息技术的应用改善了项目管理模式,推动建筑行业朝着数字化、智能化、精细化的方向发展,实现了管理、经济和安全效益的多重提升。

4 结语

现代信息技术与建筑工程项目管理相融合的程度不断加深,这已然成为推动行业转型升级的关键助力。借助数字化的相关手段来达成信息的共享目的,同时实现精细化的管理以及对整个生命周期展开监控,如此一来,工程项目管理便呈现出更为科学、更加高效且更具可控性的状态。在实际的操作过程中,像 BIM、物联网、大数据以及数字孪生这类技术得到应用之后,不但使得施工组织以及资源配置得以优化,而且还促使工程的质量以及安全水平均有所提升,进而为相关企业以及整个行业带来了颇为可观的经济效益与社会效益。在未来,伴随着信息技术不断地发展以及创新应用的推进,建筑工程项目管理将会进一步迈向智能化、协同化以及精细化的发展方向,从而给建筑行业的高质量发展筑牢稳固的保障。

[参考文献]

- [1]林圭鑫.现代信息技术与建筑工程项目管理的深度融合实践[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):130-132.
- [2]陈俊任.现代信息技术在建筑工程质量管理体系中的应用重点分析[J].城市建设理论研究(电子版),2023(4):25-27.
- [3]向辉,孙何军.信息技术下建筑工程项目进度控制管理分析[J].工程建设与设计,2021(17):200-202.

作者简介:温萌(1984.9—),毕业院校:广西科技大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:祥浩工程造价咨询有限公司,职务:经理,职称级别:中级职称。

BIM 技术在暖通工程施工全过程管理中的应用与实效分析

刘贺

河北杜邦石化工程设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着建筑行业的信息化与智能化进程不断加快,暖通工程作为建筑机电系统的重要组成部分,其施工质量直接关系到建筑物使用的舒适性、安全性和节能性。传统暖通施工在协调性、精确性及多专业协同管理方面存在一定不足,导致施工冲突频发、返工率较高、资源浪费明显。近年来,建筑信息模型(Building Information Modeling,简称 BIM)技术在暖通工程中的应用逐渐深入,能够通过三维可视化、参数化设计、信息集成和多专业协同等优势,实现施工全过程的管理优化。文中在分析 BIM 技术特征的基础上,从施工准备、施工实施到竣工运维等全过程角度系统阐述其在暖通工程中的具体应用场景与管理价值,并对实际应用效果进行综合分析。研究表明, BIM 能够显著提升暖通工程的碰撞检查效率、设备布置合理性及工期管理水平,有效降低施工成本,提高工程质量,为暖通工程建立更科学的全过程管理体系提供了技术支持。最后,文中从技术深化、团队能力建设与行业标准完善等方面提出未来发展建议,以期促进 BIM 技术在暖通工程中的深度应用。

[关键词] BIM 技术; 暖通工程; 全过程管理; 施工协同; 可视化设计

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18629

中图分类号: TU83

文献标识码: A

Application and Effectiveness Analysis of BIM Technology in the Whole Process Management of HVAC Engineering Construction

LIU He

Hebei Dubang Petrochemical Engineering Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the accelerating process of informatization and intelligence in the construction industry, HVAC engineering, as an important component of building electromechanical systems, directly affects the comfort, safety, and energy efficiency of building use in terms of construction quality. Traditional HVAC construction has certain shortcomings in coordination, accuracy, and multi-disciplinary collaborative management, resulting in frequent construction conflicts, high rework rates, and significant resource waste. In recent years, the application of Building Information Modeling (BIM) technology in HVAC engineering has gradually deepened, which can achieve management optimization of the entire construction process through advantages such as 3D visualization, parametric design, information integration, and multi-disciplinary collaboration. Based on the analysis of the characteristics of BIM technology, this article systematically elaborates on its specific application scenarios and management value in HVAC engineering from the perspective of construction preparation, construction implementation, and completion operation and maintenance, and comprehensively analyzes the actual application effects. Research has shown that BIM can significantly improve the collision detection efficiency, equipment layout rationality, and schedule management level of HVAC engineering, effectively reduce construction costs, improve project quality, and provide technical support for establishing a more scientific full process management system for HVAC engineering. Finally, the article proposes future development suggestions from the aspects of technological deepening, team capacity building, and industry standard improvement, in order to promote the deep application of BIM technology in HVAC engineering.

Keywords: BIM technology; HVAC engineering; whole process management; construction collaboration; visual design

引言

暖通工程在现代建筑工程中承担着空气调节、通风换气、冷热源输送及室内空气品质控制的重要功能,其施工过程涉及设备安装、管线布置、多工种交叉及系统调试等复杂环节。传统模式下,暖通施工常面临图纸信息不完善、专业交叉冲突频繁、施工计划难以实现动态管理等问题,导致施工风险增大,工程质量不稳定,工期延误现象突出。在建筑工业化、数字化转型背景下, BIM 技术因其可视化、参数化和信息集成的优势,为暖

通工程施工全过程管理提供了新的解决路径。BIM 能够在三维模型环境中实现设备与管线布置优化、施工顺序模拟、多专业协同及信息共享,大幅减少设计与施工偏差,提高施工效率和资源利用率。因此,探讨 BIM 在暖通工程全过程中的应用及其实际效果,对于提升工程管理水平、推动暖通工程行业升级具有重要意义。本文从暖通工程施工特点出发,分析 BIM 技术在各环节的具体应用方式,以期构建系统的 BIM 全过程管理框架,为实践提供理论支持。

1 BIM技术在暖通工程中的核心功能与应用价值

1.1 BIM的可视化功能提升设计直观性

在暖通工程中,系统设备种类多、管线密集且走向复杂,二维图纸难以准确呈现空间布局。BIM的三维可视化可将设备、管道与构件以真实比例呈现,使设计人员、施工单位与监理方在施工前即可对工程整体结构进行预判,显著减少理解偏差,提高图纸交底质量。此外,可视化模型能够模拟施工环境,帮助发现空间不足、管线拥挤等潜在问题,为设计优化提供依据。

1.2 参数化信息模型增强工程数据管理

BIM的核心在于“信息”,其参数化模型可绑定设备规格、材料属性、制造厂家、维护周期等数据,实现暖通系统设备全生命周期管理。参数化信息的快速更新能力,使工程变更响应速度更快,减少重复绘制工作,实现施工过程中的数据一致性管理。同时,参数化信息还能对竣工后的运维阶段提供数据基础,提升设施管理效率。

1.3 多专业协同促进施工冲突减少

暖通工程施工常与给排水、电气及结构工程交叉繁多,传统协作方式难以有效避免碰撞。BIM可通过构建多专业融合模型,实现不同专业间的实时协同检查。在三维环境中进行碰撞检测,可提前发现管线冲突、净高不足、设备检修空间受限等问题,并在施工前完成优化调整,有助于减少返工情况,降低工期风险。

2 BIM技术在暖通工程施工准备阶段的应用

2.1 基于BIM的深化设计支持施工可行性分析

施工准备阶段需对设计图纸进行深化,以确保现场施工具备可执行性。BIM深化设计可根据建筑结构限制,优化风管、冷媒管、给排水管线与电缆桥架的布置,提高空间利用率。在深化过程中,BIM的参数化模型可快速调整管线尺寸、节点高度及设备位置,减少与建筑结构的冲突,提高设计合理性。

2.2 BIM支撑预制加工与材料计划优化

随着装配式施工理念的发展,暖通管线与部分构件可以通过工厂预制来提高施工效率。BIM模型可根据实际测算尺寸生成加工图,为预制厂生产提供数据依据。通过BIM生成材料用量表和加工单,可提高材料计划准确性,减少因现场测量误差导致的返工。此外,预制构件在BIM模型中的组装模拟可指导现场吊装与定位。

2.3 BIM用于施工进度模拟与资源配置

施工准备阶段的进度计划对后续管理起关键作用。BIM与4D进度管理技术结合,可将时间维度引入模型,实现施工顺序模拟。通过动态查看施工进度,可以识别资源冲突节点,提前制定劳动力与机械设备的配置方案,提升整体施工组织效率。

3 BIM技术在暖通工程施工实施阶段的管理应用

3.1 BIM支撑现场施工过程的质量控制

BIM模型能够为现场施工提供精准定位,通过模型

测算实际安装位置,提高安装精度。施工人员可通过移动端直接查看模型,实现可视化指导施工。此外,BIM模型可对关键节点与隐蔽工程进行信息记录,使质量过程可追溯。施工监管人员可利用BIM检查是否按照模型进行安装,确保施工质量稳定。

3.2 BIM与施工安全管控结合

暖通施工过程中涉及高空作业、设备吊装和多工种交叉作业,安全风险较为集中,管理难度较大。借助BIM技术构建施工场景安全模拟模型,可对施工环境进行直观展示,提前识别潜在危险源并评估风险程度。模型通过还原施工过程中的关键环节,清晰呈现高风险区域,为安全防护措施的制定提供可靠依据。临时支撑布置和作业路径在模型中得到优化,有助于减少设备运行与人员活动之间的冲突。施工前的安全模拟还能为管理人员提供决策支持,使防护方案更具针对性。BIM模型在培训中的应用,使施工人员能够直观理解安全要求和操作规范,增强风险防范意识。通过将安全管理融入施工全过程,BIM技术有效提升了暖通工程施工的安全水平和管理可靠性。

3.3 BIM支撑施工动态协调与问题解决

施工实施阶段常伴随设计调整、材料供应变化以及现场实体与图纸不符等复杂情况,若信息传递不及时,容易引发返工和进度延误。BIM模型在此过程中发挥了动态更新和统一管理优势,变更内容能够及时反映在模型中,确保各参与方基于同一数据开展工作。依托BIM协同平台,施工单位、设计团队与监理人员可以共享问题清单和处理进展,对冲突部位和偏差情况进行直观定位和快速分析。模型所呈现的空间关系和构造信息,有助于相关人员高效制定调整方案,减少反复沟通带来的时间损耗。问题处理流程在平台上形成闭环管理,使责任划分和决策过程更加清晰透明。通过协同机制的持续运作,施工组织效率得到提升,沟通障碍明显减少,工程实施的稳定性和可控性显著增强。

4 BIM技术在暖通工程施工后期与调试阶段的应用

4.1 BIM在系统调试阶段的辅助作用

暖通系统安装完成后,需通过风量、水量、压力和温度等多项参数的综合调试,验证系统运行状态是否满足设计与使用要求。借助BIM模型,调试人员能够直观了解系统的整体拓扑结构,清晰掌握管网流向、设备布置及相互关系,从而更快定位调试重点。模型中集成的设备参数和控制逻辑信息,有助于准确判断运行偏差产生的原因,减少反复排查带来的时间消耗。调试过程中形成的各类数据可同步记录并关联至模型,构建完整的调试档案,为后续运行管理和故障分析提供可靠依据。通过模型与调试工作的结合,暖通系统由经验调试转向数据支撑下的精准调试,整体效率和调试质量均得到明显提升。

4.2 竣工模型构建与工程验收支持

在工程竣工阶段,形成准确、完整的模型记录是实现高质量交付的重要基础。BIM技术能够在施工过程中持

展更新数据信息,将设计变更、现场调整 and 实际安装情况逐步整合,最终形成真实反映工程现状的竣工模型。该模型详细记录了设备规格参数、安装位置、管线走向以及检修与维护空间等关键信息,为工程验收提供直观、可靠的数据依据。验收人员通过模型即可全面了解工程实施情况,减少信息核对和现场复查的工作量。数字化模型的应用有效替代了大量纸质图纸整理和归档工作,提高资料管理的规范性和可追溯性。工程交付由传统的文件交接转变为数据化移交,使项目成果更加清晰完整,也为后续运维管理提供了高质量的基础数据支撑。

4.3 BIM 在运维管理中的价值衔接

暖通系统运维在建筑全生命周期管理中占据重要位置,其管理水平直接影响建筑运行效率与能耗水平。基于 BIM 构建的运维模型与楼宇自控系统联动后,可将设备运行状态以直观方式呈现,使运行参数、报警信息和能耗情况清晰可见。运维人员借助模型能够快速定位故障设备,获取对应的检修流程、备品备件信息和维护记录,减少排查时间,提高维修响应效率。模型所集成的设备属性和历史运行数据,为设备状态评估提供了可靠依据,有助于识别潜在故障风险并开展预防性维护。通过对运行数据的持续分析,可逐步实现设备健康监测与寿命预测,为合理安排检修计划和优化运行策略提供支持。BIM 技术在运维阶段的深入应用,使暖通系统管理由被动处理向主动管控转变,为建筑节能和稳定运行奠定坚实基础。

5 BIM 技术在暖通工程应用中的效益分析与优化策略

5.1 BIM 对施工成本与工期的优化提升

在暖通工程中引入 BIM 技术后,工程实施过程中的返工现象明显减少。通过在施工前完成管线碰撞检查和深化设计,各专业之间的冲突问题能够被提前识别并妥善解决,避免在现场施工阶段频繁修改方案,从而有效控制材料浪费。施工进度模拟为施工组织提供了直观依据,使工序衔接更加合理,资源配置更加精准,有助于降低工期延误风险。基于模型的数据支撑,预制加工比例不断提高,部分构件在工厂内完成生产,减少了现场安装工作量,提高了施工效率和质量稳定性。施工过程由经验驱动转向数据驱动,使成本控制更加可预期和可管理。通过设计、生产与施工环节的协同优化, BIM 技术在提升暖通工程管理水平的时候,实现了整体成本的有效降低。

5.2 BIM 提升工程协同与管理效率

多专业协同平台的建设显著提升了工程项目信息的透明度,使各参与方能够在统一环境中获取准确、完整的数据资源。信息共享机制的完善,有效减少了因信息不对称带来的沟通障碍,降低了协调成本,提升了决策效率。BIM 技术通过统一的数据模型,优化了施工信息的传递路径,使设计变更、施工进度和质量控制等关键信息能够在设计、施工与监理等主体之间实时更新。工程参与方基于同一数据源开

展工作,有助于避免理解偏差和重复沟通,提高协同作业的准确性。信息传递效率的提升,使问题能够在早期阶段被发现并解决,减少后期调整带来的时间和成本损失。多专业协同平台在增强管理可控性的同时,也推动工程管理方式由分散走向集成,为项目高质量实施提供坚实支撑。

5.3 未来 BIM 在暖通工程中的优化发展方向

尽管 BIM 技术在暖通工程中已展现出良好的应用成效,但在实际推广过程中仍面临标准不统一、团队能力参差不齐和数据协同不足等问题。缺乏完善的行业规范容易导致模型质量不一致,影响信息共享和应用深度。从业人员对信息化工具的理解和运用水平,直接关系到 BIM 技术价值的发挥。提升专业人员的数字化素养,有助于推动 BIM 在设计、施工和运维环节的深度应用。技术融合将成为未来发展的重要方向, BIM 与物联网、人工智能等技术结合,可实现设备运行状态的实时感知和智能分析,推动暖通系统管理向更加智能化转变。全过程成本管理的引入,使工程投资、变更和运维费用能够在模型中得到动态反映,为决策提供更加精准的数据支持。通过体系建设与能力提升的协同推进, BIM 技术在暖通工程中的应用将更加成熟和高效。

6 结论

BIM 技术凭借可视化建模、信息集成与协同管理等特征,为暖通工程施工全过程提供了系统化、精细化的管理手段。在工程设计阶段, BIM 模型能够直观呈现管线布置和设备关系,辅助设计人员发现冲突问题并进行优化调整,提升方案的合理性与可实施性。施工过程中,基于模型的施工组织与进度管理有助于提高现场协调效率,减少返工和资源浪费,保障施工质量稳定可控。运维阶段通过模型整合设备参数和运行数据,为后期维护和能效管理提供可靠支撑。实践研究表明, BIM 的应用在提升工程管理效率的同时,有效降低了综合成本并缩短建设周期。在智能建造与数字化转型持续推进的背景下, BIM 在暖通工程领域的价值将进一步凸显。通过加强技术融合应用、提升团队数字化能力并完善行业标准体系,暖通工程建设与管理模式将朝着更加智能、高效和可持续的方向发展。

[参考文献]

- [1]陈建华,赵立军.BIM 技术在机电工程中的应用研究[J].建筑技术开发,2019,46(7):112-115.
- [2]李晓峰,郑海翔.基于 BIM 的建筑机电深化设计方法分析[J].建筑科学,2020,36(4):88-93.
- [3]王志强,刘朋飞.BIM 技术在暖通施工管理中的应用优势探析[J].建筑机电,2018,32(6):54-59.
- [4]何涛,李鹏.BIM 与机电安装工程协同管理研究[J].施工技术,2021,50(10):37-42.
- [5]张文娟,孙浩.BIM 技术对建筑工程管理模式的影响研究[J].工程管理学报,2020,34(3):44-51.

作者简介:刘贺(1985.9—),男,汉族,毕业院校:华北电力大学;现就职单位:河北杜邦石化工程设计有限公司。

长输管道维抢修作业安全管理路径研究

金天保 孙超 王贺

国家管网集团湖南公司, 湖南 长沙 410000

[摘要]我国长输管道处于快速发展时期, 部分服役管道出现严重老化的情况, 故而增加管道事故的发生率。管道事故发生后, 可引起油气泄漏、火灾、爆炸等危害性极强的事故, 并对人们的生命财产造成严重威胁。基于此, 针对长输管道事故, 会快速响应维抢修作业工作。但实际开展维抢修作业过程中, 存在维抢修作业安全管理方面的不足, 导致应急预案可操作性差, 导致抢修作业中出现安全事故, 加重抢修作业实施难度。本篇文章主要针对当下维抢修作业安全管理方面的不足进行系统化完善, 并强化安全作业保障。

[关键词]长输管道; 维抢修作业; 安全管理; 路径

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18607

中图分类号: TE973.6

文献标识码: A

Research on Safety Management Path for Maintenance and Repair Operations of Long-distance Pipeline

JIN Tianbao, SUN Chao, WANG He

Hunan Company PipeChina Group, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: Chinese long-distance pipelines are in a period of rapid development, and some of the pipelines in service are experiencing severe aging, which increases the incidence of pipeline accidents. After a pipeline accident occurs, it can cause highly hazardous accidents such as oil and gas leaks, fires, explosions, and pose a serious threat to people's lives and property. Based on this, we will quickly respond to maintenance and repair work for long-distance pipeline accidents. However, in the actual process of carrying out maintenance and repair operations, there are deficiencies in the safety management of maintenance and repair operations, resulting in poor operability of emergency plans, leading to safety accidents during repair operations and increasing the difficulty of implementing repair operations. This article mainly focuses on the systematic improvement of safety management in current maintenance and repair operations, and strengthens the guarantee of safe operations.

Keywords: long-distance pipelines; maintenance and repair operations; safety management; path

引言

长输管道具有线长、点多的特点, 且覆盖范围广。但由于管道分布比较分散, 导致管道故障无法快速响应; 同时在多种外部因素的影响下, 我国也易引发各类安全事故。为强化长输管道的维抢修效率, 积极完善安全管理风险评估体系、加强维抢修安全作业方案设计、设置设备安全运维管理计划等, 促使维抢修施工作业得到全面安全监管, 充分保证运维操作行为的规范性, 降低相关安全问题的发生概率, 从而提升长输管道运行的稳定性。

1 长输管道维抢修作业安全管理要点

1.1 施工前风险评估

长输管道多运输油气能源, 上述能源具有易燃易爆的特点, 故而当发生长输管道故障后, 需要对管道实施作业安全风险评估, 第一, 评估长输管道运输能源成分; 通过分析成分了解能源的作业风险; 第二, 评估作业周围环境; 确定故障周围存在的作业操作风险, 逐一排查后通过实施作业安全管理, 提供安全保障措施, 保障维抢修作业稳定进行。第三, 评估抢修设备; 不同故障需要采用不同的维抢修技术及设备予以支持, 但使用各种相关技术及设备时

具有一定的安全作业要求, 故而可通过评估设备与维抢修环境的适配性, 保障管道故障得到快速控制。第三, 评估作业人员; 针对故障所处风险级别, 需对应设置适宜水平及适宜数量的维抢修作业人员, 以便各项维抢修工作可以顺利进行。

1.2 施工中人员管理

施工作业过程中, 作为安全管理核心, 安全管理要点主要分为两个方面内容, 一方面: 作业安全意识; 通过安全管理指导反复向施工人员强调作业安全要求, 同时采用危险事故宣教的方式, 持续强化施工人员的危险意识, 保证其在施工作业中可以加强自我保护。另一方面: 作业执行标准管理; 施工人员作业中, 要求每个施工人员佩戴通讯设备, 这样不仅可以强化施工作业沟通, 还可保证施工人员在安全监管下进行规范化作业。

1.3 施工中机械作业管理

维抢修作业中涉及各种机械, 而机械操作也属于一项重点的安全管理内容。机械作业安全管理主要包括: 其一, 作业标准安全管理; 对地下管道铺设复杂, 故而在作业中需要对机械作业的操作范围、操作执行精度进行安全管理,

促使机械在可控的范围内进行作业,避免对地下管道造成损害。第二,机械运行作业安全管理。机械运行方可按照施工方案进行安全作业,故需着重加强机械设备保养、维修、养护等安全管理,确保机械设备在使用过程中能正常运行。

1.4 施工现场布置管理

作业现场安全管理,主要集中在环境安全隐患管理。施工前上报当地派出所等相关单位,并协同对施工环境进行安全监管。首先,需使用警戒线将维抢修区域围起来;其次,需树立醒目的警告标识,避免闲杂人等进入危险区域,通过上述安全监管强化外部环境的安全管理。施工现场作业安全管理,还需重点考虑设备的摆放、消防器材或消防车的配备数量等,以保障施工安全^[1]。

2 长输管道维抢修作业安全管理中存在的不足

2.1 安全管理风险评估不足

对长输管道进行维抢修作业过程中,首先需对管道故障进行安全作业风险评估。但长输管道故障区域受地形、自然环境等因素影响,实施各种作业时均会产生诸多安全管理难题,且随着地表及地下情况的变化,管道维抢修难度持续提升。近些年,我国长输管道抢修施工中,出现施工伤亡事故;经分析,多数施工伤亡事故均与施工作业风险识别不全有直接联系。安全管理中涉及的风险,不仅集中在施工作业方面,若对架空电力线路等环境相关的安全风险问题评估不足,也会引发安全管理事故。

2.2 维抢修设备准备不足

因长输管道故障维抢修作业多在紧急情况下进行,且施工前准备工作时间较短,若施工设备需要大量调度,则无法快速准备齐全,因此施工过程中常会出现维抢修设备准备不足的情况。同时,受施工现场作业条件限制,部分机械设备无法参与作业,显著降低长输管道故障处理效率。施工环境存在诸多不确定因素,且施工作业期间,常会出现多条线路同时维修、抢修的情况,因设备整体支持不足,导致实际抢修作业无法支持故障的修复,故而也会造成人力及物力资源的过度消耗。

2.3 设备安全管理不足

开展维抢修作业过程中,设备安全管理不足主要表现在下述几方面内容之中:第一,设备养护安全管理不足;因设备在使用时常会出现老化及磨损情况,若对机械设备维护养护不到位或长期缺乏定期的检查及维护工作,可显著增加机械设备的故障发生率,对维抢修作业造成诸多安全管理威胁。第二,机械设备运行安全防护管理不足;多数机械设备运行过程中涉及诸多器械化部件,在高速及高重量等因素的影响下,可对维抢修作业环境、人员形成安全作业隐患;又因维抢修作业安全管理中,施工环境复杂及机械位置移动频繁等因素影响,故障周围的安全警示标识配置效率未同步;应用一些特殊设备的过程中,因缺乏

该设备的安全管理经验,使特殊设备的安全管理规范设计不足,并增加作业安全隐患。

2.4 应急管理机制不完善

应急管理机制关系到设备故障、能源泄漏、火灾、爆炸等突发性事件的控制质量。但在应急管理中,随着各种设备及先进技术的融入,应急管理机制未同步更新,促使应急管理机制没有达到预期管理效果。而管理机制的不完善,主要表现在安全管理制度缺陷、应急准备不足、人员培训不到位等方面;以安全管理制度缺陷为例,目前,缺乏针对长输管线维抢修设备的专门规定及操作流程;虽然针对安全事故进行频繁的安全演练,但应急演练流于形式,未真正提升相关工作人员的安全意识。

3 长输管道维抢修作业安全管理的优化路径

3.1 完善安全管理风险评估体系,强化安全作业保障

长输管道维抢修作业中发生的诸多施工事故多与安全管理风险评估不足有关,基于此,可通过完善安全管理风险评估体系,全面排查施工前风险问题,强化后续安全作业保障。安全管理风险评估体系可以通过下述几个角度进行完善,第一,为保证安全管理评估体系合法合规,需要根据新发布的法律法规对安全管理风险评估指标进行更新,促使安全管理风险可以得到宏观调控。第二,制定安全管理风险评估规范,对每项安全风险相关工作均制定一套完善的评估流程及标准,促使在每项维抢修作业中存在的风险可得到精准识别;同时针对风险评估流程及操作制定反馈机制,由从业人员提供反馈结果,对安全管理风险评估工作进行细致化优化与调整,以便更适用于实际作业风险评估。第三,采集可追踪的安全性指标,通过连续性的数据指标,可对设备、技术等风险问题形成更加精准地分析,进一步提升风险评估的准确性。为获取更多的风险评估指标,要求在维抢修作业前,对设备、技术及周围环境中设置各种类型传感器及监控设备,以便获取实时施工风险评估数据;还可搭配预测模型,对风险问题进行推演,由此可为风险问题的防护措施提供完善方向。第四,设置风险自审环节,定期对风险评估体系内部及外部的合理性及先进性进行审核,自查风险管理评估体系中存在的不足,以便持续优化风险评估细节,促使更多潜在的安全隐患被识别出来^[2]。

3.2 加强维抢修安全作业方案设计,降低作业阻碍发生率

因施工前准备工作不足,以及维抢修作业遗留更多的安全管理问题,基于此,需将施工前重点工作集中在维抢修安全作业方案设计中。首先,结合施工现场的安全风险评估结果,分别设置向上及向下的作业方案。其中,向上主要涉及地面作业施工准备工作。关于该方面工作内容,在设计期间可充分利用 BIM 模型构建,并绘制故障维抢修作业清单。在该清单的基础上,准备相关的施工材料及

施工设备。针对设备及材料准备不足的情况,需要与邻近区域构建协同互助模式,以突发应急事件为例,设置应急协助预案,以便在短时间内快速调动更多的可用资源,实现快速维抢修长输管道故障。向下作业方案以实际作业进行设计,分别总结施工作业中可能出现的安全风险问题,加强作业操作过程细节设计。针对安全风险出现概率高的问题,成立专项处理小组,由小组成员设计安全作业方案,以规避作业中的高风险事故。其次,在维抢修安全作业设计中,还要注重引入更多先进的施工技术。同时,要加强技术参数管理,利用先进监测方式,收集先进技术实际运行参数,针对技术运行参数设置预警机制,以便快速响应参数偏离情况,进一步加强安全隐患的排查与预防^[3]。

3.3 设置设备安全运维管理计划,提高设备安全运行效率

长输管道运行情况复杂,故而在故障维抢修过程中,设备安全运维管理也有较大难度。为保障作业安全,需要持续完善设备安全运维管理计划,从而提高施工设备的安全运行效率。在设备安全运维管理计划中,第一,进行维修分类。使用施工设备过程中,可设置一般性维护、例行维护及计划性检修三个环节。针对施工设备的运行强度,对上述三个检修养护频率进行调整。此外,为强化设备的安全运行监督,需要在设备上设置监控设备或传感器,以便实时掌握设备运行情况。在一般性维护中,主要检查设备周围操作安全性,针对安全危险提供保护措施,保证设备正常运行。例行维护主要对设备的各个部件磨损情况进行核查,定期添加养护物料,以降低设备磨损情况。计划性检修是对设备开展系统化检修,对磨损严重部件进行修复与更换,保障设备正常运行。第二,完善先进设备养护计划。部分先进设备较为缺乏养护相关经验,应积极借鉴其他单位设备养护计划,加强设备养护细节方面的优化。针对该先进设备的运维养护计划,也可通过 BIM 技术设置运行预演模型,通过附加实际施工作业条件,发现该设备出现故障,并以此为完善方向^[4]。

3.4 健全应急安全管理机制,加强安全施工的预防

应急安全管理机制需要从队伍、管理制度、安全风险等方面予以健全;关于队伍方面,可于故障上报后,立即成立专项维抢修安全应急管理小组,小组成员针对长输管道故障施工前、施工中及施工后可能出现的安全风险问题进行总结与分析,确定每个施工阶段潜在的安全威胁因素,对各种潜在及当下存在的安全风险设置预防及控制策略。为保证应急安全管理小组在施工中持续稳定发挥其作用,需要加强人才队伍构建,例如积极纳入或引进相关技术人

员,促使安全管理细节得到正向反馈及完善。还需重点加强小组成员进行定期考核工作,考核内容需注重融入实际施工安全问题,以此考察小组成员的安全事故的处理能力。在队伍之中设置严格的考核制度,针对安全意识差,管理素质低的人员进行惩罚,同时对存在原则性错误的小组成员上报相关组织,并进行依法处置。管理制度需要及时跟进我国当下更新的法律法规,保证管理制度依法依规;管理制度还要向操作规范、安全意识等方面进行持续完善。安全风险管理工作,主要集中在施工作业现场管理工作中,可能出现机械故障、环境破坏、触电、起重伤害、塌方等风险事故,以触电为例,要求电力线路电压 $<1\text{kV}$ 时,施工设备与架空电力线路需保持大于 1.5m 的安全距离,电力线路电压为 330kV 时,施工设备与架空电力线路需保持 $>7.8\text{m}$ 的安全距离。在实际施工作业中,需要持续加强应急安全管理工作的完善,将可能出现的安全风险问题,进行逐一预防,从而降低安全事故的发生率^[5]。

4 结束语

综上所述,开展长输管道维抢修施工作业期间,需要全面加强安全管理工作,深度分析作业过程中相关的安全管理风险问题,明确在各个施工作业环节中潜在的安全问题,针对主动安全风险问题,采取科学有效的预防措施,同时还对应优化各种管理不足,促使安全问题的发生概率得到降低,提升长输管道的安全管理水平,保证管道运行的安全性。与此同时,针对施工作业安全管理方面,仍持续加强制度及技术完善,促使安全管理水平得到进一步提升。

[参考文献]

- [1]马寅洲,熊伟,陈胜,等.天然气长输管道 SCADA 系统与第三方设备通信中断故障对策[J].石油工程建设,2025,51(6):74-79.
 - [2]王翔.基于阴极保护技术的天然气长输管道防腐方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(21):33-35.
 - [3]李彬,李峰宜,张贝贝,等.长输管道线路工程设计施工关键问题探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(10):122-124.
 - [4]崔京辉,董国宇,张亮,等.油气长输管道企业 QHSE 管理体系审核模式比较与应用[J].中国安全科学学报,2025,35(10):17-23.
 - [5]王晓峰,许春艳,陈超.油气长输管道泄漏监测与定位技术的智能化升级[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(18):190-192.
- 作者简介:金天保(1984—),男,汉族,籍贯山西夏县,大学本科,中级工程师职称,主要从事仪表自动化和安全管理工

软土路基原位固化施工工艺与工程性能研究——以无锡钱胡快速路项目为例

陈磊¹ 於亮¹ 夏涛² 刘文化^{3*}

1. 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000
2. 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000
3. 江南大学 纤维工程与装备技术学院, 江苏 无锡 214000

[摘要]针对长江三角洲地区城市道路建设中广泛分布的软弱地基问题,传统地基处理方法普遍存在施工周期长、成本高及环境扰动大的不足,原位固化技术因其施工效率高、经济环保等优势,逐渐成为软土路基处理的重要手段。以无锡市钱胡快速路西延工程为依托,系统研究了软土路基原位固化处理的材料配合比、施工工艺及工程性能。通过室内配合比试验确定合理的固化剂掺量,并在现场采用强力搅拌设备实施原位固化施工,对固化效果进行强度、弯沉及承载力等多指标检测评价。结果表明,在含水率约60%的工况下,固化剂掺量为湿土质量的8%时,原位固化土7d无侧限抗压强度即可满足设计28d强度要求,表现出显著的快硬早强特性;现场检测结果显示,处理后地基弯沉小、承载力高、变形均匀,整体工程性能良好。研究成果验证了原位固化技术在软土路基处理中的适用性与可靠性,可为类似地区城市道路软土地基工程提供参考。

[关键词]软土路基; 原位固化; 施工工艺; 工程性能; 道路工程

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18611

中图分类号: TU472

文献标识码: A

Study on In-situ Stabilization Construction Technology and Engineering Performance of Soft Subgrade — A Case Study of Qianhu Expressway Project in Wuxi

CHEN Lei¹, YU Liang¹, XIA Tao², LIU Wenhua^{3*}

1. Wuxi City Urban Key Construction Projects Management Center, Wuxi, Jiangsu, 214000, China
2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China
3. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: Soft soil foundations are widely distributed in the Yangtze River Delta region, posing significant challenges to urban road construction due to their high water content, low bearing capacity and large compressibility. Conventional ground improvement methods often suffer from long construction periods, high costs and considerable environmental disturbance. In-situ stabilization technology, which improves soil properties by mechanically mixing stabilizing agents with in-place soil, has attracted increasing attention owing to its efficiency and environmental benefits. Based on the western extension project of Qianhu Expressway in Wuxi, this study systematically investigates the mix proportion design, construction process and engineering performance of in-situ stabilized soft subgrade. Laboratory tests were conducted to determine the optimal dosage of the stabilizing agent, followed by full-scale field application using powerful mixing equipment. The performance of the treated subgrade was evaluated through unconfined compressive strength tests, deflection measurements and plate load tests. The results indicate that when the water content is approximately 60% and the stabilizer dosage is 8% by mass of wet soil, the 7-day unconfined compressive strength of the stabilized soil meets the design requirement specified for 28 days, demonstrating excellent early strength development. Field test results further confirm that the treated subgrade exhibits low deflection, high bearing capacity and uniform deformation. The study demonstrates that in-situ stabilization is an effective and reliable technique for soft subgrade treatment in urban road engineering, providing valuable reference for similar projects.

Keywords: soft subgrade; in-situ stabilization; construction technology; engineering performance; road engineering

引言

随着我国城市化进程加快,城市道路建设面临越来越多的软土地基处理难题^[1-3]。无锡钱胡快速路作为无锡市“两环十四射三联”快速路网体系的重要组成部分,其西延工程处长江三角洲太湖冲湖积平原,场地广泛分布杂填土、淤泥质填土等软弱土层,具有含水量高、压缩性大、承载力低等特点,传统地基处理方法存在成本高、工期长、环境影响大

等弊端。原位固化技术通过将固化剂与原地基土就地搅拌混合,利用固化剂的物理化学反应改善土体工程性质,具有施工简便、经济环保等优势,特别适用于城市软土地基处理^[4-6]。

本文以江苏省无锡市钱胡路西延工程为背景,系统研究原位固化技术的材料配比、施工工艺与质量控制方法,通过系统的现场试验与检测,验证该技术在软土路基处理中的适用性与可靠性,为类似工程提供技术参考。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

钱胡路西延工程位于江苏省无锡市滨湖区，总体呈东西走向，西起陆马公路，东至大河绛路，全长约 400m。作为钱胡路快速路先导段，设计结合钱胡路远期快速化确定，道路宽度为 40m，双向 6 车道，道路等级为钱胡路快速路先导段，技术指标按城市次干路兼二级公路标准设计，设计速度为 50 公里/h。

1.2 地质条件

地貌单元为长江三角洲太湖冲湖积平原。场地地势整体较平坦、局部存在堆土略有起伏，地面标高在 3.99~7.51m 之间。本项目勘察区域主要土层包括：①1 层杂填土：杂色松散，软塑，厚度约 1.3~4.3m，性能极差；②3 层淤泥质填土：灰黑色，流塑状，厚度约 1.57m，性能极差；③1 层粉质黏土：灰黄色硬塑，压缩性中偏低，性能较好；④2 层粉质黏土夹粉土：灰黄至黄灰色可塑，压缩性中偏高，性能一般；⑤1 层粉质黏土：灰色软塑至流塑，压缩性高，性能较差；⑥1 层粉质黏土：灰黄色硬塑，含铁锰质，压缩性中偏低，性能较好。

整体来看，场地土层表现为“上差中一般下较好”的特征，上部杂填土与淤泥质填土地质性能极差，施工难度大、风险高。根据道路功能区划，对 K0+180~设计终点段范围内软土路基进行原位固化处理，处理深度 2.2m，固化软土 28d 设计无侧限抗压强度 $\geq 0.8\text{MPa}$ 。

2 原状土工程特性研究

2.1 基本物理性质

对钱胡路项目原状土进行系统测试，结果表明：原状土最大干密度 1.872g/cm^3 ，最优含水率 14.9%；液限 44.77，塑限 24.77，塑性指数 20，属低液限黏土（CL）；pH 值 8.52，呈弱碱性；有机质含量 0.672%，含量较低。

2.2 颗粒组成与矿物成分

激光粒度分析显示，黏粒含量达 37.90%，粉粒与黏粒含量总和达 99.99%，土颗粒极细。XRF 分析表明，土体中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主要氧化物，同时含有较高的 Na_2O 和 K_2O 。XRD 分析确认主要矿物成分为石英，含云母、长石等矿物。

2.3 化学特性

阳离子交换量（CEC）测定值 $25.6\text{cmol}^+/\text{kg}$ ，与黏粒含量高相符；硫酸盐含量 0.42g/kg ，处于较低水平；重金属等污染物含量远低于规范限值，可不经额外稳定化处理直接应用。

3 原位固化配合比试验

采用纳思同（江苏）高科技发展有限公司提供的 LST-FR 型软土固化剂，根据强度设计指标，设计了 4 组配合比，如表 1 所示。强度试样尺寸为 $70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}\times 70.7\text{mm}$ ，试样成型后经标准养护 7d 和 28d 后测定其对应龄期时的无侧

限抗压强度以评估固化性能。

表 1 地基原位固化配合比

组号	钱胡路干土	LST-FR	含水率
钱胡路土+6FR	1	6%	60%
钱胡路土+7FR	1	7%	60%
钱胡路土+8FR	1	8%	60%
钱胡路土+10FR	1	10%	60%

注：含水率是水与干土的质量比，原位固化剂 LST-FR 的掺量是与干土和水总质量的质量比。

原位固化试验结果如图 1 所示。由图 1 可知，在 60% 含水率下，当固化剂掺量为湿土重的 7% 时即可满足设计要求（28d 强度大于 800kPa ）。考虑到施工引起的材料浪费及性能损失，经室内试验验证，推荐实际施工时的固化剂 LST-FR 掺量为 8%。

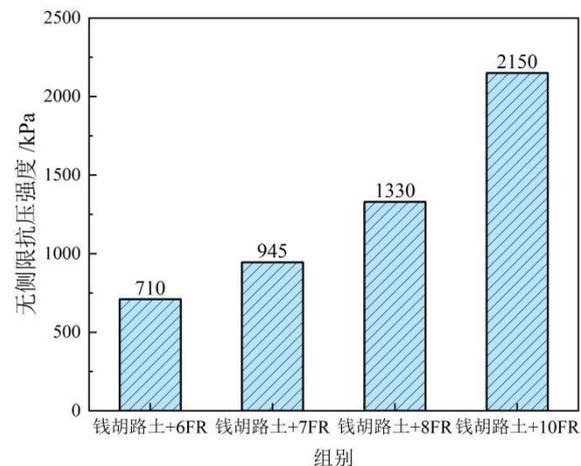


图 1 原位固化强度试验结果

4 原位固化施工工艺

4.1 原位固化场地概况

经现场踏勘发现，试验段内原状土中存在部分场地的地表层为中低含水率的杂填土，如图 2 所示。经综合考虑工期、固化成本、场地面积、环保等因素，采用强力搅拌设备对原状的软弱地基土进行原位固化处治。基于初步踏勘与计算，需原位固化处治的软弱土层平均厚度约 2.2m，总工程量约 8500 方。



图 2 钱胡路原位固化场地情况

4.2 原位固化技术路线

在进行前期室内试验进行合理的方案论证后,采用如下工艺过程对钱胡路软弱地基进行就地固化:场地预翻松处理、材料与设备就位、固化剂调浆与供给、强力搅拌设备原位拌合作业、平板振动整平表层、制备伴随试件、覆膜洒水养护、平地机场地标高调整等工序。

4.3 场地土预翻松处理

如图3所示,原位固化作业前,需使用挖掘机将待固化原状软弱土翻松,同时剔除超粒径的大石块,以便后续强力搅拌设备进行固化作业。



图3 场地土预翻松处理

4.4 固化材料与设备就位

依据原位固化作业的现场情况开展作业面布置及固化剂存储及造浆系统组装,如图4所示。设备就绪后,安排固化剂进场并泵送至粉料存储罐中。



图4 钱胡路项目原位固化施工系统

4.5 固化剂调浆与供给

正式施工时,经专业搅拌设备将固化剂按设计比例(固化剂:水=1:1.5)调配成固化剂浆液,再经由专门的高压泵送系统供应至原位强力搅拌头中,以在强力搅拌设备开展旋切搅拌作业时实现固化剂与原状软弱土的良好混合。

4.6 强力搅拌设备原位拌合施工

调配并顺利供应固化剂浆液后,即可采用原位强力搅拌设备(阿鲁头)开展原位固化作业,如图5所示。通过阿鲁头的强力旋切以及上下往复式搅拌,在固化剂连续供应的情况下,可以实现固化剂与原状软弱土的良好混合,继而实现原状软弱土的固化改性。实际施工前进行了工艺验证试验,最终确定以下施工参数:强力搅拌头的轴横转

速为80~100r/min,挖掘机的液压驱动力32~36MPa,固化剂浆液供料压力3.5MPa;强力搅拌头垂直上下搅拌并喷射固化剂浆液,对现场2.2m深度区域垂直划分3段,每个搅拌区块的每个垂直段范围内软土上下搅拌次数3次,强力搅拌头的升降速率0.1m/s。



图5 强力搅拌设备原位拌合施工作业

4.7 平板振动器收面

如图6所示,在原位强力搅拌作业结束后,立即采用平板振动夯实设备收紧、整平表层固化作业面。



图6 平板振动器收面施工作业

4.8 强度伴随试件制备

为同步评估场地固化效果,现场固化作业时由专业技术人员进场制备边长为70.7mm的立方体试件。伴随试件同现场条件养护,并在指定龄期内由第三方检测单位进行测试,以作为现场固化质量的初步评判依据。

4.9 覆盖土工布并洒水养护

考虑到现场作业期间温度较高(基本在35℃以上),原位固化作业结束达到可上人状态时(约4~5h)对作业场地进行土工布覆盖并洒水养护,如图7所示,固化区域养护3d后可开放设备通行。



图7 土工布覆盖与洒水养护

4.10 场地标高修整

由于原状土被扰动,原位固化后场地实际标高较设计标高 20~30cm,场地交付前采用铣刨机对原位固化场地进行标高修整,如图 8 所示。



图 8 铣刨机对场地标高进行修整

5 工程质量检测与评估

原位固化作业结束后经实地踏勘表明,原位固化处治 4~6h 后的固化作业区已满足可上人条件。经铣刨机进行场地标高修整后,硬化场地平整、质地坚硬有光泽,固化效果理想。

无锡公建工程质量检测有限公司现场取土和固化剂,按施工配合比通知单中推荐的配比开展了原位固化土配合比验证试验。试验结果表明,本次钱胡路原位固化土在含水率 60% 时其 7d 无侧限抗压强度为 0.92MPa,已达到设计文件中所规定的 28d 龄期时 0.8MPa 的设计要求,表现出了明显的快硬早强特性。原位固化土的强度随龄期持续发展,其 28d 强度约为 7d 强度的 1.3 倍。

无锡公建工程质量检测有限公司采用贝克曼梁法对原位固化场地进行了弯沉检测,如图 9 所示。检测结果表明,原位固化场地的弯沉代表值为 55.39 (0.01mm),远低于设计值 180 (0.01mm),说明本项目所实施的原位固化结构刚度大、强度高,承载能力强,在车轮荷载下变形小,不易损坏。



图 9 原位固化场地弯沉检测(贝克曼梁法)

无锡公建工程质量检测有限公司采用浅层平板载荷试验法对原位固化场地进行了承载力检测,选取了三处具有代表性的区域,逐级施加荷载直至 600kPa (约为设计承载特征值 250kPa 的 2.4 倍),以充分评估地基的安全储

备和变形特性,检测过程如图 10 所示。检测结果表明,在最大试验荷载下,三块检测区域的最大沉降量仅为 8.41mm~10.82mm,变形量小且均匀,表明原位固化后的地基整体刚度高、压缩性低。卸载后,地基表现出良好的回弹特性,回弹量介于 1.22mm~3.69mm 之间,回弹率达 11.28%~39.38%。该数据表明,地基土体不仅强度高,还具有一定的弹性恢复能力,塑性变形得到了有效控制。试验荷载-沉降曲线呈缓变型,未出现陡降段,地基承载力特征值远高于设计要求的设计值 250kPa。检测结果充分证明,该原位固化地基处理效果显著,承载力与变形指标完全满足项目设计及安全要求。



图 10 原位固化场地承载力检测(浅层平板载荷试验法)

4 结语

(1) 针对无锡钱胡快速路西延工程中软弱地基分布广、含水量高、工程性能差的问题,采用原位固化技术对软土路基进行处理,通过室内试验与现场应用相结合的方式,系统验证了该技术在工程中的可行性与有效性。

(2) 室内配合比试验结果表明,在含水率约 60% 的条件下,当固化剂掺量为湿土质量的 8% 时,原位固化土可在 7d 龄期内达到并超过设计要求的 28d 无侧限抗压强度,表现出显著的快硬早强特性,为缩短工期提供了有力支撑。

(3) 现场施工与检测结果显示,原位固化处理后的地基具有较高的整体刚度和承载能力,弯沉值和沉降量均显著低于设计控制指标,变形均匀,工程性能稳定,能够满足城市快速路路基结构的使用要求。

(4) 研究成果表明,原位固化技术在软土路基处理中具有施工简便、质量可控、经济环保等综合优势,适用于类似软土地区的城市道路工程,对推广原位固化技术在市政及相关工程领域的应用具有一定的工程参考价值。

[参考文献]

[1]王君.软土地基原位固化技术试验与应用研究[J].工程技术研究,2025,10(15):12-15.

[2]郭猛,周世宗,魏洁,等.原位固化技术处理滨海浅层软土应用研究[J].建筑技术,2025,56(8):1015-1018.

[3] Yonghui Chen, Shihu Gao, Long Chen. Laboratory and field test study on the improvement of marine clay slurry by in-situ solidification [J]. Marine Georesources & Geotechnology,2018,37(6):1-9.

[4]喻海波.软土路基加固施工中工业废渣基固化剂的应用[J].交通世界,2024(19):39-41.

[5]胡志明,王子帅,张艳林,等.粉煤灰联合水泥原位固化软土现场试验研究[J].中国港湾建设,2024,44(5):40-47.

[6]徐亮,唐彤芝,白兰兰,等.就地固化技术处理浅层软土的应用及机理研究[J].水利水运工程学报,2021(2):109-116.

作者简介:陈磊(1980—),男,汉族,江苏无锡人,本科,研究方向:工程施工技术与项目管理;*通讯作者:刘文化(1987—),男,汉族,江西吉安人,博士,副教授,研究方向:固废资源化利用。

岩溶地层新型双模盾构选型及掘进适应性评价研究

石红伟

中交一公局集团有限公司, 北京 100024

[摘要]文章以富水岩溶地层隧道工程为研究对象, 针对灰岩地层溶洞、土洞发育、地质条件复杂多变、施工风险高的特点, 开展新型双模盾构选型及掘进适应性评价研究。基于掘进施工数据, 分析了 II-VI 级不同围岩等级下盾构土仓压力、推力、扭矩等关键掘进参数的变化规律; 研究了小半径曲线段通过调整推进油缸压力与行程分布、铰接角度实现盾构姿态控制的方法; 从掘进参数匹配、姿态控制、地表沉降控制及刀具磨损控制等方面进行适应性评价。结果表明, 该新型双模盾构能够适应高富水灰岩岩溶地层的复杂地质条件, 有效解决了传统单一模式盾构的喷涌、堵管、沉降难控制等问题, 为同类富水岩溶地层隧道施工提供了参考。

[关键词]富水岩溶地层; 新型双模盾构; 围岩分级; 掘进参数; 盾构姿态控制; 适应性分析

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18624

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

Research on Selection and Adaptability Evaluation of New Dual Mode Shield Tunneling in Karst Strata

SHI Hongwei

CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing, 100024, China

Abstract: This article takes the tunnel engineering in rich water karst strata as the research object, and focuses on the characteristics of limestone strata with karst caves, soil caves, complex and variable geological conditions, and high construction risks. It conducts research on the selection and adaptability evaluation of a new dual-mode shield tunneling machine. Based on excavation construction data, the variation patterns of key excavation parameters such as pressure, thrust, and torque in shield soil chambers under different rock mass grades of II-VI were analyzed; Studied the method of controlling the attitude of shield tunneling by adjusting the pressure and stroke distribution of the propulsion cylinder, as well as the hinge angle, for small radius curved sections; Conduct adaptability evaluation from the aspects of excavation parameter matching, attitude control, surface subsidence control, and tool wear control. The results show that the new dual mode shield can adapt to the complex geological conditions of high water rich limestone karst strata, effectively solve the problems of gushing, pipe plugging, and settlement control of the traditional single mode shield, and provide a reference for the construction of tunnels in similar water rich karst strata.

Keywords: rich water karst strata; new dual-mode shield tunneling machine; rock classification; excavation parameters; shield tunnel attitude control; adaptability analysis

引言

近年来, 随着城市轨道交通向复杂地质区域延伸, 富水岩溶地层中盾构施工面临喷涌、塌陷、刀具异常磨损及地表沉降等多重风险, 成为工程界研究热点。针对此类问题, 学者们从盾构选型、施工参数控制、地层预处理及沉降预测等方面展开系统研究。李忠伟等^[1]在深惠城际铁路项目中论证了 EPB/TBM 双模盾构在岩溶发育、软硬不均复合地层中的适应性, 凸显设备选型对施工安全的关键作用。齐明山^[2]通过有限元模拟贵阳地铁区间, 揭示溶洞位置与形状对地表横向 V 形沉降影响显著, 且进出洞阶段为高风险期, 需强化地层加固与动态监测。张玉龙等^[3]基于济南泉域岩溶地层, 优化刀盘配置, 并通过掘进参数耦合分析建立刀具状态评估模型。徐树军^[4]则聚焦岩溶与破碎带叠合地层, 提出 MJS 地面加固、刀具优化与参数调整等综合措施应对大直径泥水盾构施工困境。郑中刚^[5]

进一步引入 PCA-GA-BP 智能模型, 提升富水岩溶区地表沉降预测精度。综上, 鲜有关于岩溶地层串联螺旋输送机的泥水盾构选型及掘进适应性评价方面的研究, 因此基于广州轨道交通 12 号线棠溪-南航新村区间项目设备选型和适应性评价的相关研究非常必要。

1 工程概况及设备选型

棠溪-南航新村区间(棠南区)线路出棠溪站后, 下穿棠乐路北侧厂房, 左线 360m 半径(右线 350m 半径)右偏曲线向北偏东方向下穿嘉悦物业厂房, 南航新村停车楼, 大埔南一街, 污水顶管、棠溪十二经济合作社厂房及大埔南一街北侧厂房等进入南航新村站。其中左线全长 728.45m, 隧顶埋深 12.06m~26.61m, 隧道纵断面采用单向坡(最大纵坡 24.655%)。隧道结构内径 5.8m、外径 6.4m、宽度 1.5m, 单环管片数为 6 块, 楔形环为 48mm 双面榫量管片。

隧道主要穿越灰岩地层, 根据地质详勘资料见图 1

本区间灰岩地层，溶、土洞发育强烈，见洞率超过 75%，存在一处断裂带。且溶洞涌水量巨大。盾构在岩溶区域施工时，姿态易失控，同时土压难保持，容易诱发岩溶失稳、地面沉降和塌陷等，施工风险较大。在地质差异较大的富水岩溶发育符合地层中施工时，传统单一模式的盾构机难以适应复杂多变的地质环境。如土压盾构的喷涌、沉降难控制问题，泥水平衡盾构堵管问题等。

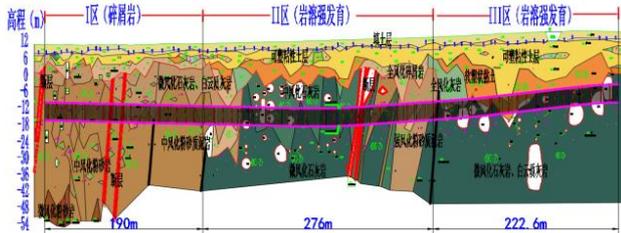


图 1 棠南区间地勘剖面图

因此，盾构机设计时和施工时应考虑完善的溶/土洞处理方案。最终选择开挖直径为 6.70m 土压/高密度泥水双模式盾构机。创新性采用了串联破碎机的泥水模式施工见图 2，来保持开挖面的稳定。并配备辊筒式破碎机于螺旋输送机出口，用于将大颗粒块石破碎，防止泥浆箱与排浆泵堵塞，提升出渣能力并降低了滞排的发生。如图 3 刀盘开口率 35%（中心 35%），辐条+面板形式，初装刀配镶齿型滚刀。

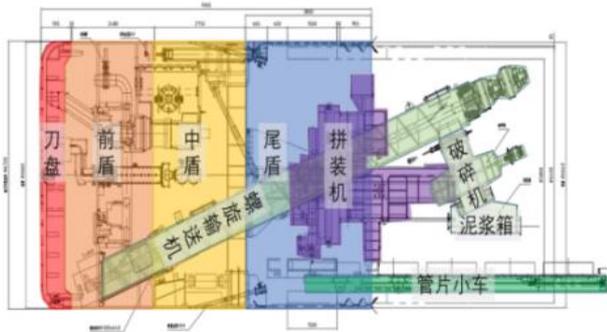


图 2 串联螺旋输送机的泥水盾构机



图 3 刀盘配置及中心冲洗情况

2 不同围岩等级掘进参数分析

本次分析基于广州地铁 12 号线棠南区间左线隧道施工数据，掘进 506 环，共包含 502 条记录，涵盖 5 个围岩等级（II、III、IV、V、VI），统计出不同围岩等级对应的

盾构土仓压力、推力、扭矩和贯入度、推进速度和刀盘转速的均值，分析单一掘进参数随围岩等级的变化规律。沿线地质情况如表 1 所示：

所有围岩等级中，土仓土压（右下）均高于土仓土压（右上），差值稳定在 0.32~0.43bar 如图 4，说明土仓内压力呈现梯度分布，土压力传感器运行稳定。随着围岩级别的升高从 II 到 VI 级，岩性变差，土仓土压（右上）由 1.40bar 升高至 2.47bar，需要泥水仓更高的压力支撑掌子面稳定。

总体来看，从 II 到 VI 级随着围岩变差，盾构总推力和刀盘扭矩逐渐降低如图 5 图 6。从 II 到 III 级围岩，盾构推力从 18961.52 略升高至 19132.74kN，增幅为 0.9%，因 III 级围岩局部存在硬岩夹层，饱和抗压强度 104.1MPa，但 III 级 QRD 数值 12.7%~30.5%明显低于 II 级的 42.2%，因此需略增盾构推力。从 II 到 III 级围岩，从 II 到 IV 级围岩，刀盘扭矩缓慢下降；从 IV 到 V 级围岩降幅加大，由 1280kNm 降到 1020kNm，降比-20.3%，反映低级围岩切削阻力降低，盾构刀盘负载减小。

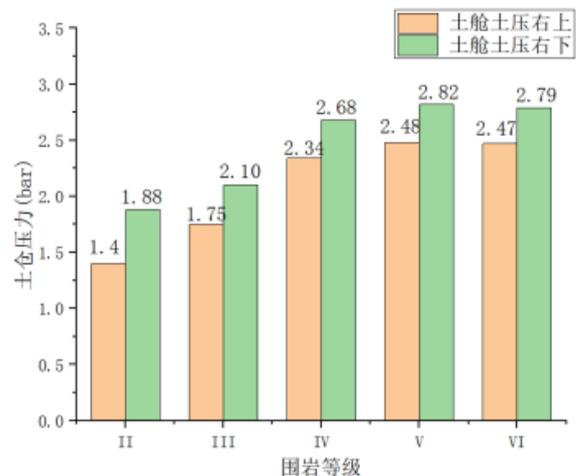


图 4 不同围岩泥水仓压力

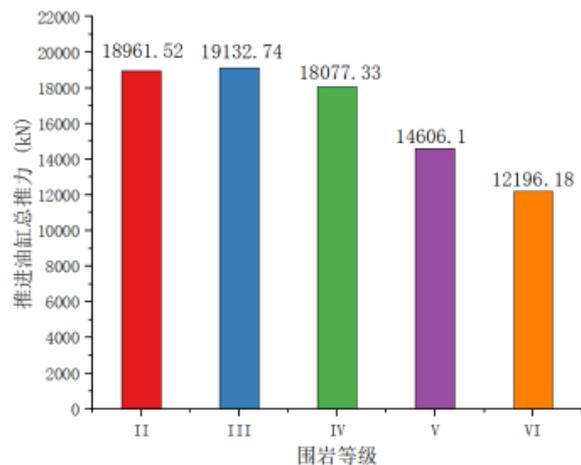


图 5 不同围岩盾构推力图

表1 棠南区间各环对应围岩等级及地质情况

环号	围岩等级	围岩描述
0-78	VI级	拱顶:分布溶槽及<3-2> <3-3> <4-2B>;洞身:主要为<8C-2>,局部遇溶槽,端头段为<3-3A>、<5N-1>、<7-3>等不均匀地层;洞底:主要为<8C-2>端头为<6>层、<7-3>层,端头存在硬岩与软岩的突变分界面。硬质岩天然抗压强度 61.7MPa~70.3MPa,RQD 值为 41.7%~75.8%。上软下硬问题突出。
79-104	V级	拱顶:主要为<8C-2>,但厚度较小(<4m),且上覆有砂层;洞身及底板:主要为<9C-2>,局部<8C-2>天然抗压强度 66.3MPa~149.7MPa,RQD 值为 44.4%~58.6%。受岩溶地下水影响,围岩分级下降一级至 V 级。
105-143	VI级	拱顶:主要为<5C-1B>、<6C>,局部遇溶槽;洞身:主要为<8C-2>,局部<9C-2>、遇 8.7mm 深溶槽,底板:主要为<9C-2>,局部为<8C-2>、遇 8.7m 深溶槽底。天然抗压强度 43.9MPa~132.5MPa。RQD 值为 44.4%~58.6%。存在上硬下软的问题。
144-229	V级	拱顶:主要为<8C-2>,串珠状溶洞发育,局部遇溶槽,且上覆可塑黏性土<5C-1B>及砾砂<3-3>;洞身:主要为<8C-2>局部遇 3m 溶洞,见洞率达到 80%;底板:主要为中闪化石灰岩<8C-2>,最那为<9C2>,最互.Bm 潘澜,厚高比小小于 1,易不稳定溶洞。天然抗压强度 65.7MPa~149.7MPa, RQD 值为 21.0%~56.7%
230-339	IV级	拱顶:主是为<8C-2>。局部遇 5.7m 高溶洞;洞身:主是为<8C-2>,局部遇小溶洞,底板:主要为中风北石灰岩<8C-2>,局部 9C-2>。局部遇小溶洞;灰岩岩溶发育、溶洞和溶蚀沟槽分有不均匀,盾构掘进时掌子面涌水风险高,宜采用注浆法对溶洞提前进行人理。局部可能夹<8C-1>相对软弱岩层、可能导致掌子面身塌。天然抗压强度 37.2MPa~92.9MPa, RQD 值 17.8%~57.1%。
240-372	III级	拱顶:主要为<8C-2>;洞身及底板:主要为微风化石灰岩<9C-2>。天然抗压强度 56.3MPa~85.1MPa,RQD 值为 34.7%~39.1%。
373-447	IV级	拱顶:主要为<8C-2>,局部遇断层及 6.5m 高串珠状溶洞;洞身:主要为<8C-2>,局部为<9C-2>,局部遇 5.8m 溶洞;底板:主要为中风化石灰岩<8C-2>,局部为<9C-2>。天然抗压强度 56.3MPa~79.9MPa, RQD 值为 8.9%~28.1%。
448-482	III级	拱顶及洞身:主要为<8C-2>;底板:主要为微风化石灰岩<9C-2>。饱和抗压强度 50.9MPa~104.1MPa, RQD 值为 12.7%~30.5%。
483-506	II级	拱顶、洞身及底板:主要为微风化石灰岩<9C-2>。饱和抗压强度 57.9MPa~63.1MPa, RQD 值约为 42.2%。

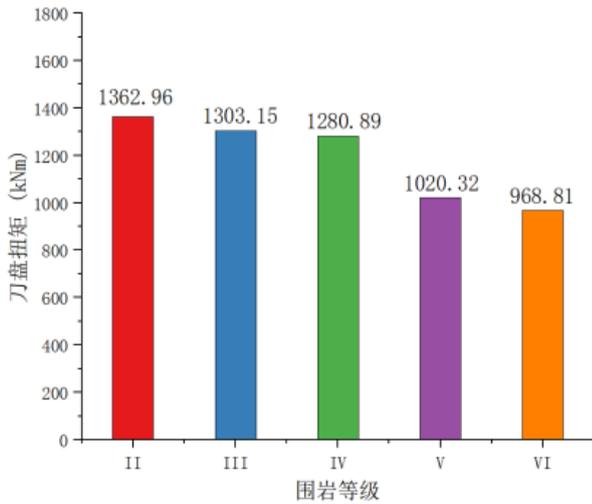


图6 不同围岩刀盘扭矩

从 II 到 IV 级围岩,刀盘转速在 1.11rpm~1.34rpm 之间如图 7。总体来看,从 II 到 IV 级围岩,围岩越差越松散,刀具贯入度越高见图 8 图 9,其中 IV 级围岩贯入度为 5.44mm/rev。然而, V 级围岩贯入度 4.44mm/rev,为所有围岩中最低。V 级围岩区段串珠状溶洞发育,局部遇溶槽,且上覆可塑黏性土及砾砂或拱顶岩层薄上覆有砂层。在可塑黏性土中掘进,贯入度高容易引起泥水仓的滞排,土仓压力波动大,击穿地表风险增高。在拱顶岩层薄上覆有砂层区段掘进时,超挖极易发生沉降,需降低贯入度,使泥浆有充足的时间在掌子面形成泥膜,维持掌子面的稳定和地表的微变形。

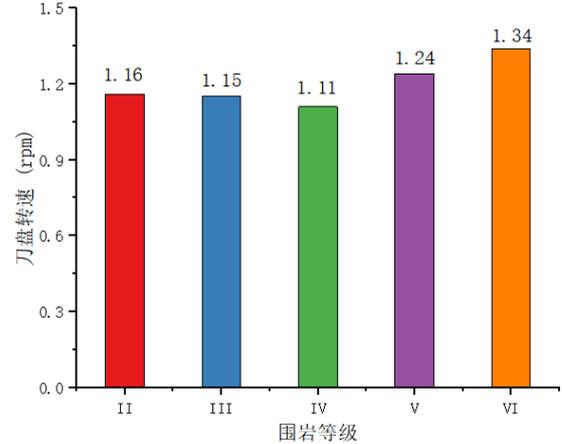


图7 不同围岩盾构的刀盘转速

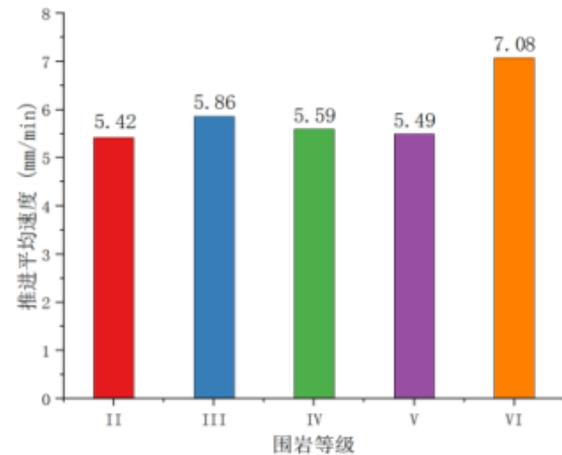


图8 不同围岩盾构推进速度

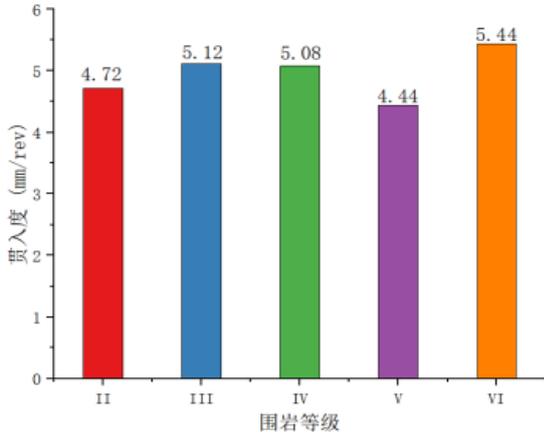


图 9 不同围岩盾构的贯入度

3 小半径曲线段盾构姿态调整

棠南区区间左线线路特征如表 2 所示，0-84 环为直线段，85-128 环和 495-506 环为缓和曲线段，129-494 环为圆曲线段。

表 2 棠南区区间左线线路特征

序号	环号	线路特征
1	0-46	ZDK18+164.400 (18+194.503)~ZDK18+096.017 (18+126.12) 直线段，此段为半径 3000m 的竖曲线段，ZDK18+095.000=ZDK18+064.897，长链 30.103m
2	47-84	ZDK18+096.017 (18+126.12)~ZDK18+039.092 (18+069.195) 直线段；DK18+095.000=ZDK18+064.897，长链 30.103m
3	85-128	ZDK18+069.195~ZDK18+004.195 缓和曲线段，长度 65m
4	129-231	ZDK18+004.195~ZDK17+849.138 圆曲线段，曲线半径 360m
5	232-263	ZDK17+849.138~ZDK17+800.862 圆曲线段，曲线半径 360m，竖曲线 5000m
6	264-494	ZDK17+800.862~ZDK17+447.5 曲线段，曲线半径 360m
7	495-506	ZDK17+453.119~ZDK17+435.941 曲线段，缓和曲线段，竖曲线 3000m

通过改变盾构各工作区千斤顶推力、油缸伸长量及铰接角度三个方式，在施工过程中控制盾构机姿态和成型隧道的线型最终效果如图 10。

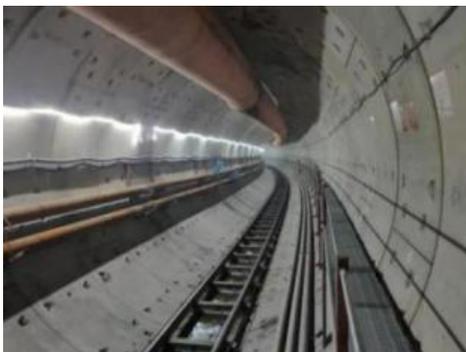


图 10 区间缓和曲线+圆曲线段施工效果图

3.1 调整盾构推进油缸压力分布

以盾构右区推进油缸压力与左区压力差为指标如图 11，分析压力差在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况。直线段压力差在[-5MPa, 7MPa]，数值呈正负对称分布；缓和曲线段右-左压力差总体上逐渐增大，在[0, 15MPa]范围；小半径圆曲线段线路一直左转，压力差在[0, 23MPa]，因地层存在软硬不均，压力差偶尔呈现出一定的波动。

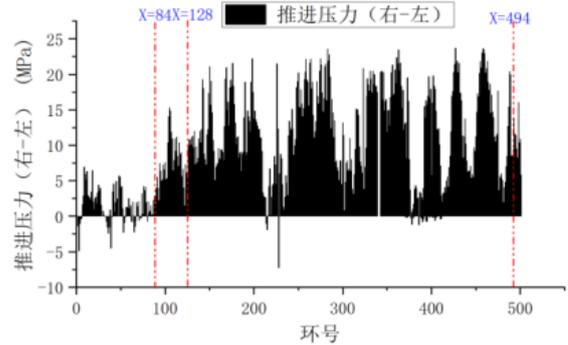


图 11 掘进油缸压力差（右区-左区）

3.2 调整盾构推进油缸行程分布

当隧道的转弯半径为 $R=360m$ 时，管片宽度 $1.5m$ 、外径 $6.4m$ ，平均单环楔形量为： $\Delta h=HD/R=1.5 \times 6.4/360=0.026m=26mm$ 。以盾构右区推进油缸行程与左区油缸行程差为指标如图 12，分析行程差在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况。直线段行程差在[-40mm, 40mm]，数值呈正负对称分布；缓和曲线段行程差总体上逐渐增大，在[-20mm, 86mm]范围；小半径圆曲线段线路一直左转，行程差主要在[0, 90mm]，为调整设计轴线、盾构机和管片三线合一，部分推进油缸行程差呈现出一定的波动。

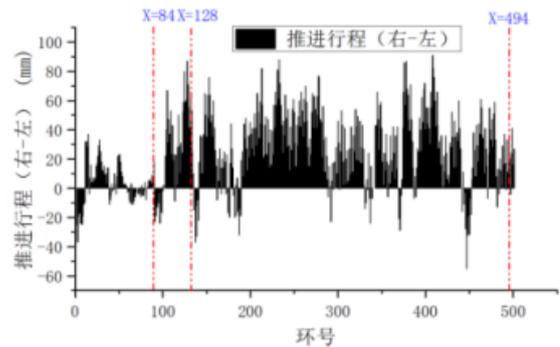


图 12 掘进油缸行程差（右-左）

3.3 调整盾构铰接的角度

以盾构水平和垂直方向的铰接油缸的角度为指标，统计分析铰接角度在直线段、缓和曲线段和圆曲线段的数据分布情况如图 13。直线段水平铰接基本控制在 $0.3deg$ 左右，垂直铰接在[$0.1deg$, $0.2deg$]；缓和曲线段水平铰接[- $0.5deg$, $0.1deg$]，垂直铰接在[- $0.5deg$, $0.1deg$]；小半径曲线段水平铰接[- $0.8deg$, $-0.25deg$]，垂直铰接在[- $0.05deg$, $0.4deg$]。

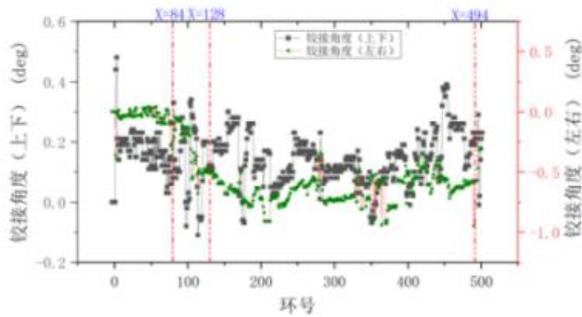


图 13 盾构机铰接使用情况

4 盾构掘进适应性评价

从区间盾构掘进参数与设备设计参数比较、软硬不均地层盾构姿态控制、地表沉降控制和刀具模式等方面，依次分析盾构掘进的适应性。

4.1 盾构掘进参数与设备设计参数的比较

区间施工中，盾构最大推力为 27379.43kN，扭矩 2580.19kNm，刀盘转速 1.79rpm，推进速度 29mm/min。盾构设计参数为额定推力 44000kN，扭矩 7162kNm，刀盘转速 3.73rpm，推进速度泥水模式 40mm/min。施工中盾构最大参数占设计阈值参数比例分别为 62.23%、36.03%、47.99%、72.50%。其中扭矩占比仅为 36.03%，主要原因是通过串联了螺旋输送机、仓外破碎机和泥浆箱，控制了土仓压力的波动，保持开挖面的稳定。减少了盾构渣土在土仓中的滞排，大幅降低了盾构刀盘的扭矩。

4.2 盾构姿态控制效果分析

如图 14 图 15 盾构在直线段水平偏差基本控制在 $[-50\text{mm}, 30\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 30\text{mm}]$ ；缓和曲线段水平偏差 $[-50\text{mm}, 5\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 25\text{mm}]$ ；小半径曲线段水平偏差 $[-50\text{mm}, 50\text{mm}]$ ，垂直偏差在 $[-50\text{mm}, 50\text{mm}]$ 。盾构机姿态基本控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内，满足现场施工控制要求，最终管片错台控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。

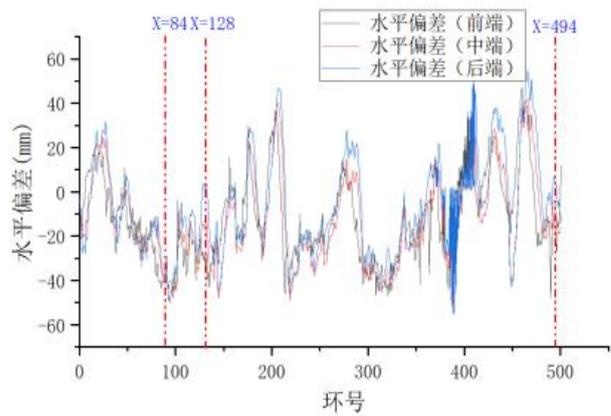


图 14 盾构机切口、铰接、尾盾水平偏差

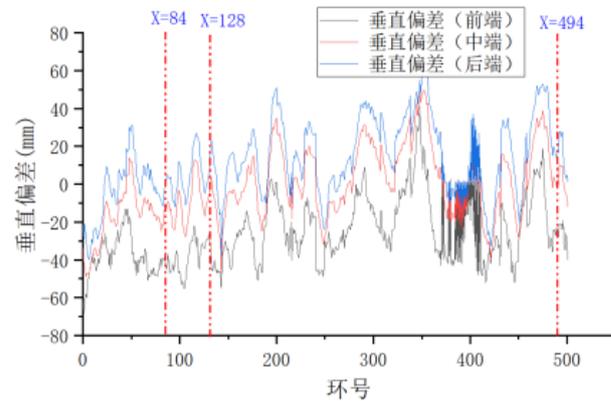


图 15 盾构机切口、铰接、尾盾垂直偏差

4.3 地表沉降控制方面

岩溶发育区盾构掘进过程难免会遇到未填满的溶洞、溶隙等空洞。双模盾构机在泥水掘进模式下，当土仓压力短时间内下降超标时，盾构机控制系统打开容器底部的阀门向土仓快速输送泥浆，缓解压力下降（如图 16 所示），避免引起地面沉降超限。

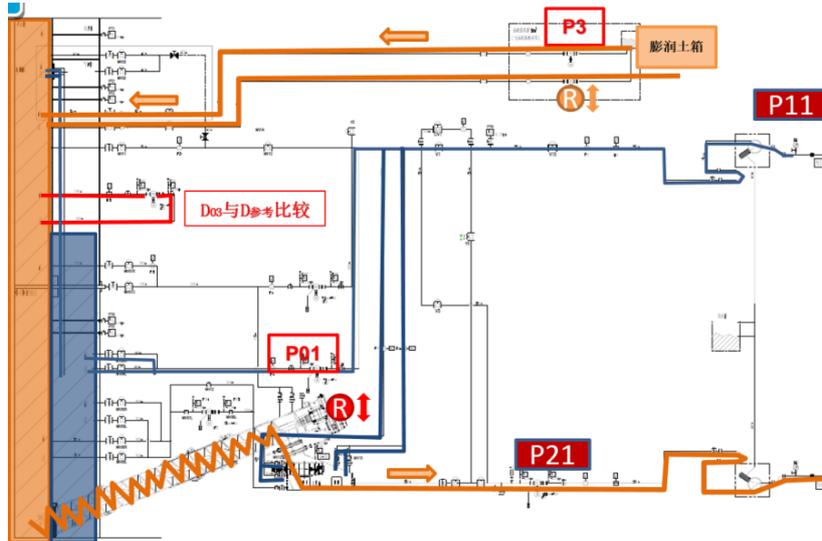


图 16 泥水循环及补浆示意图

双模盾构机在泥水掘进模式下,能通过螺旋输送机排出更大粒径的岩块,减少滞排风险,稳定掌子面压力,降低了泥水击穿地表的危险,保障了地表沉降变形有序可控。统计了不同围岩等级处隧道轴线上地表沉降累计值见图 17,地表沉降累计值控制在-7mm~-18mm,控制效果良好,满足区间地表沉降控制要求。

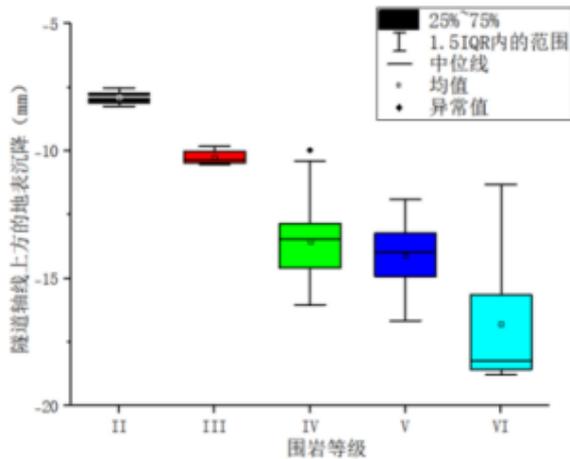


图 17 不同围岩等级区间地表沉降累计值

4.4 刀具磨损控制方面

区间隧道地段主要穿越灰岩地层,部分地段为上软下硬地层,同时岩溶溶槽、溶隙发育密集,掘进开挖面通常凹凸不平,滚刀在凹凸不平的岩面上掘进时无法形成完整的轨迹曲线。刀具受冲击力大,易发生偏磨,导致刀具硬质合金崩裂,对刀具承载性要求较高。在灰岩地层采用 17 英寸镶齿滚刀,滚刀高 175mm,刮刀高 135mm,刀高差 40mm。主刀设计考虑低刃口、大合金块设计,提高主刀在硬岩地层掘进时的使用寿命。同时主刀背面增加防撞块,提高抗冲击性如图 18。



图 18 进仓后 17 英寸镶齿滚刀情况

4.5 富水岩溶地层不同类型盾构机选择

基于广州地铁 12 号线多个区间及本地区岩溶地层盾

构掘进情况,从设备制造、工程技术经济性方面对比了不同类型盾构机在富水岩溶地层中的应用情况。在岩溶和土洞发育、隧道区域无上覆岩层或过薄、地表建筑物林立的场景下,优先选用串联式泥水/土压双模盾构机。

5 结语

选用的 6.70m 土压/高密度泥水双模盾构,有效解决了大颗粒岩块堵管、滞排问题;刀盘刀具采用 35% 开口率及镶齿型滚刀配置,适配中微风化灰岩及软硬不均地层的切削需求,刀具抗冲击性与使用寿命得到提升,保证了现场稳步施工。

掘进参数规律清晰:随着围岩等级从 II 级降至 VI 级(岩性变差),土仓土压从 1.40bar 升至 2.47bar,总推力与刀盘扭矩总体呈下降趋势;贯入度在 IV 级围岩达最大值 5.44mm/rev,刀盘转速维持在 1.11rpm~1.34rpm 之间,参数调整符合不同围岩的力学特性与施工需求,且均在设备性能参数的 65% 以内。

姿态控制效果优异:通过优化推进油缸压力差在 0~23MPa,行程差在 0~90mm 及铰接角度,实现了 R=360m 小半径曲线段的盾构姿态的精准控制和隧道成型质量,偏差均控制在±50mm 以内,管片错台≤±3mm,满足施工规范要求。

双模盾构在泥水模式下通过快速补浆系统缓解土仓压力波动,结合高效出渣能力,将地表沉降累计值控制在 -7mm~-18mm,即使围岩溶洞发育区段也满足控制要求。该双模盾构在富水岩溶地层的适应性更强,隧道清洁度高,综合施工功效良好。

[参考文献]

- [1]李忠伟,鲁伟,井向阳.复杂岩溶地质条件下城际铁路 9m 级盾构机选型研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(11):53-57.
- [2]齐明山,王祥,王春凯.复杂岩溶地层盾构隧道施工变形分析[J].施工技术(中英文),2025,54(21):123-130.
- [3]张玉龙,李毅,李少华,等.盾构穿越泉域岩溶地层掘进参数分析评价[J].工业建筑,2026,1(4):1-6.
- [4]徐树军.大直径泥水盾构穿越岩溶区与破碎带叠合地层施工技术研究[J].公路,2025,70(3):381-385.
- [5]郑中刚.基于 PCA-GA-BP 模型的富水岩溶盾构施工地表沉降预测研究[J].铁道建筑技术,2026,1(4):1-6.

作者简介:石红伟(1989.2—),男,工程师,本科,主要从事地下工程与盾构施工技术研究。

新时期建筑施工技术及施工现场管理对策浅析

陈海彬

广东铭创建设工程有限公司, 广东 茂名 525000

[摘要]在我国建筑工程行业飞速发展的背景下,对建筑工程施工技术和施工现场管理工作也提出了更高要求,需要施工企业结合工程建设要求,采用先进的施工技术手段,并做好现场管理工作,消除质量和安全隐患,提高建筑工程施工质量和效率。在实际开展建筑工程项目时,应合理运用新时期下建筑施工技术,包括 BIM 技术、装配式建筑、智能化施工以及绿色节能施工等,并要优化现场管理,及时创新管理理念,建立起精细化管理体系,为工程施工筑牢安全防线,加大质量管理力度,加快信息化建设步伐,提高施工现场管理水平,实现建筑工程项目的建设目标,保障我国建筑工程行业的长期稳定发展。

[关键词]建筑工程; 施工技术; 施工现场; 管理对策

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18623

中图分类号: U41

文献标识码: A

Analysis of Construction Technology and Construction Site Management Strategies in the New Era

CHEN Haibin

Guangdong Mingchuang Construction Engineering Co., Ltd., Maoming, Guangdong, 525000, China

Abstract: With the rapid development of Chinese construction industry, higher requirements have been put forward for construction technology and construction site management. Construction enterprises need to combine engineering construction requirements, adopt advanced construction techniques, and do a good job in site management to eliminate quality and safety hazards, improve construction quality and efficiency. In the actual implementation of construction projects, it is necessary to make reasonable use of new era construction technologies, including BIM technology, prefabricated buildings, intelligent construction, and green energy-saving construction. It is also necessary to optimize on-site management, innovate management concepts in a timely manner, establish a refined management system, build a solid safety line for construction, increase quality management efforts, accelerate the pace of information construction, improve the level of construction site management, achieve the construction goals of construction projects, and ensure the long-term stable development of Chinese construction industry.

Keywords: construction engineering; construction technology; construction site; management strategies

引言

在新时期,为了保证建筑工程施工质量,施工企业应加强施工技术管控,并强化现场管理工作,深入分析施工现场的各项影响因素,在此基础上采取管理对策,提升建筑工程施工管理水平。因此,现场管理人员应掌握先进的施工技术,并全面优化施工现场管理,提高建筑工程建设水平。

1 新时期建筑施工技术管理对策

1.1 革新管理理念,树立技术引领与创新思维

施工企业的管理人员需要及时转变管理认知,并将施工技术管理提高到战略管理层面,在企业年度发展规划中纳入新技术的研发和应用,实现技术创新目标,增强企业的核心竞争力。例如,可以采用装配式施工技术,如下图所示,其作为我国建筑工程行业工业化发展的一项核心表现,可以在工厂完成建筑构件的标准化预制,包括楼梯、墙体、梁板等,并在运输到现场后借助锚固、拼接、吊装等不同工艺有效组装。与传统现浇施工模式

相比,通过运用此类技术可以使现场施工周期得到缩短,并使现场建筑垃圾污染、噪声污染以及扬尘污染等问题得到减少,与绿色施工要求相符合。在工厂预制构件时,可以统一控制构件精度,使工程结构质量得到提高,并使现场人力成本消耗得到减少,使建筑领域的用工短缺问题得到解决。装配式技术可以用于多类工程项目中,包括保障房、写字楼以及住宅等,并能够持续提升装配率和预制率,是新时期建筑工程的一类主流施工技术。为了提升建筑施工技术管理成效,应主动适配全新的政策要求,包括装配式施工、智能建造以及绿色建筑等,并将以往的短视思维加以摒弃,树立起高效、绿色、优质、智能的技术管理理念,实现建筑工程项目的提质增效目标。同时,在技术管理期间应培养全员参与意识,具体可以采取宣传、培训等方式,使工程管理、技术以及施工等人员,对技术管理工作的重要性产生深刻认识,构建起全员参与的技术管理局面,提升建筑施工技术管理水平^[1]。



图1 装配式建筑施工示意图

1.2 加强人才队伍建设, 打造复合型、专业化技术管理团队

从技术管理角度来看, 归根结底为人员的管理, 因此施工企业应加强人才队伍建设, 打造一支专业化的复合型技术管理团队。为了实现此目标, 施工企业应做好人才引进工作, 针对性引进不同领域的专业管理和技术人才, 包括智能监测、绿色施工、BIM 技术应用以及装配式施工等方面, 使队伍短板得到弥补, 确保团队可以精准把控与充分应用行业前沿技术手段。同时, 企业应为员工建立起分层培训体系, 按照差异化原则制定培训计划, 确保可以覆盖所有员工。对于建筑施工技术管理人员, 应确保其充分掌握最新的管理理论知识, 并合理运用信息化技术, 加强人员的政策法规培训, 增强人员的管理与技术能力。对于工程施工人员, 应结合新工艺与设备的应用开展实操培训活动, 使施工人员的技术应用能力得到提高。在培训工作开展的同时, 应建立技术交流平台, 采取案例分享以及技术研讨等方式, 使企业内部能够和科研院所、高校之间加强合作交流, 促进产学研合作, 帮助企业员工掌握先进技术和管理经验, 使团队专业水平得到提高。除此之外, 企业应为员工建立激励和考核机制, 评选建筑工程施工中的优秀技术人员, 并提供技术创新奖励, 当员工在工程隐患排查、工艺优化以及技术创新等方面存在突出贡献时, 应分别从精神和物质两个层面为其提供奖励, 并在人员绩效考核体系中纳入技术管理成效以及创新成果等指标, 使技术管理与员工薪酬形成紧密联系, 调动人员的积极性, 使其充分参与到技术管理工作当中^[2]。

1.3 深化信息化应用, 构建数字化、智能化技术管理体系

在建筑工程施工中, 应做好 BIM 技术的推广和应用, 并要实现技术全流程应用, 使以往局限于图纸建模的情况

得到改善, 使 BIM 技术可以在图纸会审、施工模拟、方案优化以及质量验收等环节中得到充分应用。在建立 BIM 模型后, 可以协同各项专业设计, 使图纸的错漏问题得到减少, 如下图所示。与此同时, 还可以模拟工程施工工艺, 使专项施工方案得到优化, 确保可视化地管控施工过程, 做好各项技术参数的实时跟踪, 使施工技术的管理精准度得到提高。施工企业应加强智慧工地建设, 合理搭建一体化管理平台, 将视频监控、人工智能、大数据、物联网等技术充分整合, 为建筑施工技术构建智慧工地平台, 确保可以一体化的管理与控制施工现场各项要素, 如安全、技术、材料、设备、人员以及质量等。在此期间, 可以借助智能传感器对施工数据充分采集, 并智能监测起重机械、深基坑、模板支撑等关键部位, 确保可以提前预警技术风险问题。通过运用平台可以优化技术交底, 加快资料传递效率, 线上化开展审批流程, 使信息孤岛问题得到解决, 提高施工技术管理效率。除此之外, 应实现施工设备的智能化升级目标, 在建筑工程施工中引进智能化设备, 如智能测量仪器、无人机巡检、自动浇筑设备、智能张拉设备等, 可以进一步提高施工技术的精准度。在设备联网后, 可以实时监控设备运行状态, 保证设备运行的高效性与安全性^[3]。

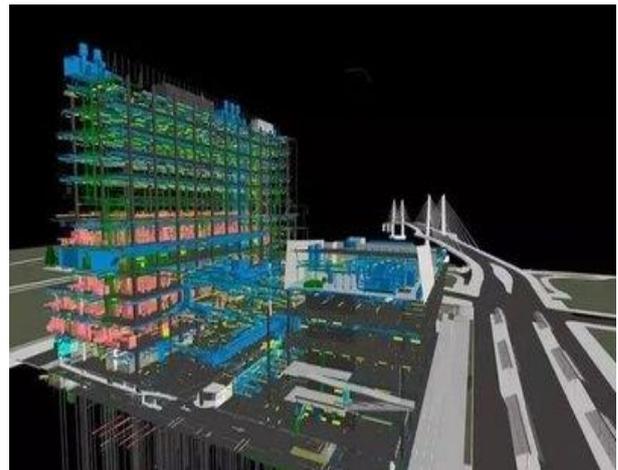


图2 BIM 模型示意图

2 新时期建筑施工现场管理对策

2.1 筑牢安全管理防线, 构建全周期安全管控体系

在建筑工程施工现场管理过程中, 安全生产是其首要前提, 应将传统管控模式中的“重形式、轻落实”有效打破, 确保建立起完善的安全管理体系, 保证安全管理工作的全方位覆盖, 并实现全员参与目标, 确保全过程的开展管理和控制工作。施工企业应加强员工的安全教育和培训工作, 使全员安全责任得到充分落实, 为特种作业、施工班组以及管理人员合理实施分层分类培训, 掌握新工艺和新设备的实际操作规范, 严格防控高危环节, 通过案例警

示教育,提升员工的安全意识。与此同时,施工企业应充分落实安全生产责任制,对人员安全职责加以明确,使安全考核和员工绩效建立联系,建立起完善的责任链条。现场管理人员还应做好安全管控工作,使各类风险隐患得到严格防控。在建筑工程施工现场,应分级管控安全风险,并要做好安全隐患的排查和治理工作,确保可以防控重大风险点,包括高空作业、起重吊装、高支模以及深基坑等,使专项施工方案得到落实,建立专人监护制度。在施工现场的安全防护工作中,应加强标准化建设,使消防设施、临时用电以及临边防护配置得到规范,定期做好专项检查和安巡工作,并要进行突击抽查,使隐患排查可以形成闭环管理。除此之外,施工企业应采取先进的安全管理手段,使现场管控效率得到提升。通过运用智能安全管控设备,包括气体检测仪、智能安全帽、AI视频监控以及人脸识别门禁等,做好现场人员的考勤工作,严格监控作业行为,自动化的预警风险问题,对违章操作进行实时捕捉,确保及时发现和整改隐患问题^[4]。

2.2 深耕质量管理内核,打造精品工程管控模式

在建筑工程施工项目实施过程中,工程质量是保障企业健康发展的重要基础,在现场管理过程中应严格按照精细化和标准化原则,并强化技术管控,做好过程监督,减少工程质量缺陷问题。管理人员应严格把控施工源头,加强质量控制,为工程设备、构配件、原材料合理构建进场验收制度,严格核查进场物资,做好抽样检测工作,一旦材料质量不合格禁止进场。与此同时,管理人员应做好施工图纸的会审工作,并加强技术交底工作,结合工程关键工序和复杂工艺,科学合理的编制施工方案,确定各项质量标准,掌握施工现场管控要点,使施工人员能够充分掌握各项技术要求。管理人员应严格管控工程施工质量,为现场各道工序合理构建质量报验制度,做好互检、自检、交接检工作,一旦前道工序不合格禁止开展后续工序。对于建筑工程的隐蔽工程、关键工序,应采取旁站监督机制,将影像资料充分留存,全面收集验收记录,确保可以追溯工程施工质量。在应用新技术和材料时,应安排专业人员开展现场指导工作,使施工工艺能够与各项规范相符合。除此之外,施工企业应健全质量考核和整改机制,为工程施工现场管理建立质量考核评价体系,在各班组绩效考核中纳入质量指标,当班组质量达标时应为其给予奖励,并要追责问题频发的班组。在建筑施工中一旦发现质量问题,应科学合理的制定整改方案,对整改时限加以明确,找准责任人,在完成整改工作后及时复核与验收。

2.3 推进智慧化管理转型,赋能现场管理提质增效

在新时期建筑施工现场管理过程中,应向着信息化和智能化方向转变,合理运用数字化技术,使传统管理壁垒

得到打破,使工程施工现场实现协同化、可视化以及数据化管理目标,使建筑工程施工现场管理水平得到提高。施工企业应建立智慧管理平台,将各项管理模块充分整合,包括人员、物资、成本、安全、质量以及进度等,并在此基础上建立管理平台,确保可以实时录入项目信息,并针对数据信息展开自动化分析。企业总部应和项目现场有效建立信息通道,确保对工程施工进展实现远程化监控目标,使各类管控风险得到降低,实现建筑工程项目的统筹管理,并对项目进行动态调度。与此同时,在施工现场管理工作中应做好智能技术和设备的推广与应用,尤其要加强BIM技术的应用,为施工图纸合理构建三维模型,充分模拟施工方案,并做好碰撞检测,使建筑工程施工流程得到优化,避免出现返工问题。施工企业应合理运用各类智能化系统,包括混凝土浇筑智能监测系统、施工电梯智能监控系统等,使施工设备的运行安全性得到提高,进一步保证施工精度。施工人员应合理运用无人机巡检技术,确保对现场展开全域巡查,将现场安全隐患充分排查,严格把控工程施工进度。除此之外,现场管理人员应高效管控现场数据,合理运用物联网技术,实时采集现场材料、机械、人员以及环境等数据,并运用大数据分析技术有效预警物资库存与施工进度,严格监测与分析能耗情况。对于移动终端的应用,可以线上化地完成各项工作,包括隐患上报、质量验收以及现场巡检等,使人工台账录入质量和效率得到减少,提高施工现场管理效率。

2.4 践行绿色施工理念,推动现场管理低碳转型

为了充分响应我国的“双碳”战略,并符合绿色发展要求,应在建筑工程施工现场管理中充分贯穿绿色施工理念,实现工程施工的绿色管控目标,包括环保、节材、节水、节地以及节能等,促进建筑工程行业的低碳化发展。在工程施工现场应做好污染排放控制,加强扬尘治理工作,并在现场设置扬尘监测仪、雾炮机以及喷淋系统等,确保可以全面覆盖裸土,并做好车辆冲洗工作。管理人员应做好建筑施工工艺的优化,对低噪音设备加以使用,并对隔音围挡加以设置,使噪音污染问题得到有效控制。与此同时,对于现场污水排放,应做好化粪池与沉淀池的设置,确保污水达标后排放。施工人员应做好建筑固废的分类收集工作,使建筑垃圾得到回收与利用,使资源浪费现象得到减少。在现场施工期间应节约利用施工资源,并做好节能型施工工艺和设备的推广工作,使工程施工方案得到优化,使建筑工程施工的能耗水平得到降低。在施工现场规划期间,应做好临时设施的布局工作,使土地资源利用率得到提升。施工企业应实施节水施工,对循环用水系统、节水器具加以使用,使工程施工的用水量得到降低。除此之外,应打造绿色文明施工现场,合理设置标识标牌,并在现场规范围挡,确保有效硬化场地,保证道路畅通,并

然有序的堆放物料。在现场应做好绿植种植工作，合理设置绿化区域，使工程施工环境得到改善^[5]。

3 结束语

综上所述，在建筑工程施工中应做好施工技术与管理现场管理工作，合理应用先进的施工技术手段，并优化现场管理措施，使工程施工效率得到加快，提高工程施工质量。与此同时，在建筑工程施工技术和现场管理中，应向着智能化和绿色化方向转变，充分采用智能化技术手段，并要践行绿色施工理念，促进我国建筑工程行业的可持续发展。

[参考文献]

[1]杜彦杰.建筑工程施工现场技术管理标准化建设研究[J].

产品可靠性报告,2025(9):179-181.

[2]郭栋.建筑给排水工程现场施工技术及管理分析[J].石化技术,2025,32(3):443-444.

[3]马俊文.加强建筑工程施工现场及技术管理的有效策略[J].建材与装饰,2025,21(16):124-126.

[4]张丽亚.建筑工程施工技术及其现场施工管理探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(8):271-273.

[5]官国斌,张伟伟,张聪.建筑工程施工技术及现场施工精细化管理研究[J].智能建筑与工程机械,2025,7(3):77-79.

作者简介：陈海彬（1987.7—），男，毕业院校：广东石油化工学院，所学专业：土木工程，当前就职单位职务：广东铭创建设工程有限公司，现有职称级别：中级工程师。

水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术应用分析

邱旺旺

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000

[摘要]混凝土防渗墙具有施工工艺便捷、墙体防渗性能较高的优势,推动其在水利水电工程中的全方位应用,对于提升工程质量和防渗性能有着突出优势。明确水利水电工程的技术特点,持续优化混凝土防渗墙施工技术组成,推动技术的深入应用,强化工程抗渗性能。文章以某大型综合性水利工程为例,结合工程特点和混凝土防渗墙施工技术种类,明确了水利水电工程中混凝土防渗墙施工技术的具体应用,旨在为水利水电工程的高质量发展提供参考。

[关键词]水利水电工程;混凝土;防渗墙;技术应用

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18617

中图分类号: TV543

文献标识码: A

Application Analysis of Concrete Anti-seepage Wall Construction Technology in Water Conservancy and Hydropower Engineering

KUANG Wangwang

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: Concrete anti-seepage walls have the advantages of convenient construction technology and high anti-seepage performance, which promotes their all-round application in water conservancy and hydropower projects and has outstanding advantages in improving engineering quality and anti-seepage performance. Clarify the technical characteristics of water conservancy and hydropower engineering, continuously optimize the construction technology composition of concrete anti-seepage walls, promote the in-depth application of technology, and strengthen the anti-seepage performance of the project. The article takes a large-scale comprehensive water conservancy project as an example, combines the characteristics of the project and the types of concrete anti-seepage wall construction technology, and clarifies the specific application of concrete anti-seepage wall construction technology in water conservancy and hydropower engineering, aiming to provide reference for the high-quality development of water conservancy and hydropower engineering.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; concrete; anti-seepage wall; technology application

引言

水利水电工程需要在有水环境下运行,对工程整体的防渗性能要求较高,如果发生渗漏问题不仅会降低工程质量,也会破坏工程结构的稳定性,存在质量隐患。混凝土防渗墙施工技术通过在松散透水性地基中连续钻孔形成槽道,在槽道内灌注混凝土形成连续的防渗墙,有效增强工程的防渗能力和结构稳定性。加强混凝土防渗墙施工技术在水利水电工程中的应用,构建出连续的防渗屏障,解决渗漏问题增强地基稳定性,对于保障工程结构安全稳定,强化工程整体防渗性能有着重要作用。

1 工程概况

某大型综合性水利工程位于长江中下游位置,兼具防水、灌溉、防洪、供电等多重作用,工程坝体最高位 120m、总库容为 10 亿 m^3 ,坝顶长度约为 1.35km。工程所处地区地形环境相对复杂、地质条件水文条件变化多样,对工程防渗能力要求较高。地质勘察发现,30m 层厚土层以中砂、细砂、卵石为主,透水性强,结构松散,地下岩层虽具备一定厚度,但局部岩层碎裂效果相对明显,透水性较

差,存在多条断裂、褶曲,这对工程的运行安全产生了一定威胁,工程地基土情况见表 1。现场钻探定位了岩石裂隙发育情况和地下水位变化情况,传统防水措施难以满足工程防渗需求,采用混凝土防渗墙的方式用于抵抗渗漏,确保工程安全建设、稳定运行。

表 1 基土各层物理力学指标

土层	沙壤土	粉砂	壤土
含水量	27.4%	17.5%	26.7%
比重	2.70%	2.69%	2.72%
干密度	1.52%	1.65%	2.72%

2 混凝土防渗墙施工技术种类

2.1 板桩灌注墙

板桩灌注墙以钢板桩为主要固定材料,通过击打固定的方式将钢板与地基部分紧密结合,然后浇筑混凝土形成防渗墙,能显著增强基础部分的防渗效果。与其他类型的混凝土防渗墙施工技术相比,板桩灌注墙的施工重点在于连续建设,为满足连续建设实际需求,就需要加大材料质量管理力度,采用多种填塞方式加强混凝土材料处理效果,

在施工前使用液压设备重新拔除钢板柱,优化板桩灌注墙的力学性能。板桩灌注墙施工工艺组成相对完善,根据灌注墙灵活性特点,结合不同施工要求灵活调整活门组成部分,稳定提升工程施工质量。

2.2 桩柱式防渗墙

桩柱式防渗墙除了需要混凝土材料外,也需要搭配使用冲击钻的方式进行钻孔作业,这种类型的防渗墙具有抗冲击效果稳定、使用寿命长等优势。泥浆护壁施工工艺以桩孔为载体,利用套管的方式进行混凝土回填,要求采用多元化施工措施完成防渗墙布置,尤其是桩柱质量和施工工艺必须满足预期防渗要求,提升整体施工质量。板桩灌注墙防渗施工灵活性强,能按照局部水文地质情况调整施工工艺,结合现场实际施工情况或技术变更优化连锁模式。

2.3 槽板式防渗墙

槽板式防渗墙同样需要搭配使用冲击钻工艺,实现对槽孔的深度开挖,定位槽孔位置制定开挖方案。施工人员应根据现场实际环境持续优化施工策略,完善施工方案做好泥浆调配,避免出现材料质量问题。在没有特殊施工要求时,施工人员应确保槽孔长度保持在 5m~9m 区间,部分地质条件特殊的区段可适当增加长度,避免墙体结构失衡影响整体施工质量^[1]。槽板式防渗墙在工程中的应用局部变化较为明显,强化单元槽连接之间的个体差异,重点考虑单元槽形式,结合实际情况落实搭建模式,为后续施工开展提供充分条件。

3 混凝土防渗墙施工技术应用

3.1 施工准备

(1) 场地布置与地基处理。混凝土防渗墙施工前需要明确区域实际的地质水文条件,做好细致的地质补充勘察,施工团队通过钻探取样的方式明确断层破碎带分布范围,定位岩性特征,为后续的施工方案制定提供参考。工程区域内破碎带主要分布于坝基中部和两岸,经过测试后定位破碎带宽度,明确破碎带岩体主要组成。经由地质勘探可以明确岩体主要类型为强风化黄岗岩,破碎带岩石呈碎块化状态,局部区域蕴含石英脉碎块。经过综合勘查可以明确本工程地质条件,选用混凝土防渗墙施工技术满足工程防渗要求。确定施工方案后,施工团队精准定位防渗墙轴线并完成测量放样,按照施工标准做好场地清理,要求施工现场无明显杂物、垃圾,场地平整度保持在 95% 以上。本工程涉及范围较广,因此将混凝土防渗墙施工划分为上游区、下游区两大作业区域,确保施工机械运行半径可以在不同区域内灵活调整。上游区是混凝土防渗墙施工的供给区,主要用于存放设备和施工材料;下游区是施工区,主要用于泥浆制备和混凝土成品运输。

(2) 施工配套设施建设。工程位于长江中下游位置,该区域的地下水位变化明显,年均降水量大,对混凝土防渗墙施工质量要求较高。施工前重点关注可能存在的雨水

浸泡软化问题和泥浆外溢情况,提高地基巩固处理效果,强化防渗性能^[2]。防渗墙轴线两侧预留一定面积的施工作业面,为了方便工程排水、设备运行,使用混凝土材料设置排水坡度,沿场地周边开挖混凝土截水沟,收集场地内的多余积水杂物,使用排水管网连接的方式优化排水布局,营造良好的场地环境。

3.2 导墙施工

(1) 导墙结构设计与基础施工。混凝土防渗墙施工技术需要根据工程区域内地质条件灵活设计,按照破碎带的分布情况、地下水位标高变化以及区域内的水文地质情况确定导墙施工工艺,优化方案组成。根据施工要求,采用双排导墙结构作为施工的主要形式,导墙深度控制在 3m 左右,使用水平仪定位跟踪检测导墙施工的水平位置偏差,避免出现施工错误。正式施工期进行基坑开挖,采用高强度混凝土加固的方式对基坑进行放坡,严格控制放坡厚度和坡度变化,厚度应与施工方案保持一致。基坑开挖前明确混凝土垫层的平整度,进行多次找平工作,避免出现力度分布不均等情况,保障导墙基础垫层质量稳定。为提升混凝土防渗墙施工技术的防渗性能,工程选用高强防渗混凝土用于浇筑材料,内侧设置钢筋网片,主筋和分布筋强度满足混凝土施工要求,充分考虑施工过程中泥浆护壁和地下水位的变化情况,避免导墙施工出现质量问题。

(2) 单元槽段划分与施工。依据混凝土防渗墙施工的方案设计,依据项目标准刚度要求和防渗止水标准,按照局部单元槽段划分标准组织施工,工程单元槽段长度计算见下式:

$$L = nL_{\max} - L_c - M \quad (1)$$

式中: L 表示为单元槽段长度; n 表示为抓斗最大抓取长度; L_{\max} 表示为槽段实际抓取长度; L_c 表示为重复挖掘长度; M 表示为超挖槽段长度。

经计算后工程确定区域内槽段长度为 6m, 防渗墙单段长度确定为 133m, 单个防渗墙可布置 22 个槽段和 21 个接头。

(3) 混凝土浇筑与质量控制。明确单元槽段长度后组织分段混凝土施工作业,每个槽段长度要求以 6m 作为标准长度,每个槽段间布设接头和施工缝,要求施工缝垂直于导墙轴线,避免出现浇筑偏差。针对施工区降水变化和水位变化,使用振动振捣的方式控制槽段间距,强化混凝土密实度。工程施工区地下水位变化幅度较为明显,根据导墙四周的变化情况设置多道止水钢板,按照施工缝布置情况预埋遇水膨胀的止水条,避免出现地下水渗漏问题。明确导墙混凝土设计强度后,对导墙轴线重复测量,控制混凝土浇筑偏差,将其保持在 20mm 以内^[3]。此过程严格控制导墙施工质量避免影响防渗墙成槽垂直度和后续施工安全,严格控制导墙混凝土强度,优化断面尺寸定位轴线偏差,精准关键指标,具体见表 2。

表 2 成槽工艺指标

项目	参数标准
导墙顶面高程	±5mm
钻孔的尺寸误差	±3cm
导墙轴线允许偏差	±5mm
孔深允许偏差	±5cm
钻孔倾斜度的容许误差	±0.4%
导墙内墙垂直度允许误差	±10mm

3.3 槽段开挖

(1) 钻孔成槽。采用液压抓斗机作为成槽主要设备, 根据槽孔宽度确定抓斗设备的展开幅度, 槽段抓取时应按照先抓取两侧、后深挖中间的顺序组织开展。墙体连接采用接头管法和平切法的方式依次固定, 要求槽段开挖的过程中能按照施工标准连续作业, 满足施工标准要求。施工前应对基岩表面实际情况组织验收工作, 抓斗机与土层表面产生直接接触后的土层渗透情况作为后续施工方案的优化参数, 记录每次土层抓取的现场情况, 实时检测孔底高程避免出现钻孔渗漏问题。成槽施工阶段搭配使用冲击钻配合钻孔, 要求严格控制钻孔的偏斜度和稳定性, 孔道偏斜度应满足施工方案的标准要求, 通过测量不同深度的钻孔成槽深度变化, 定位钻头钢丝绳的中心线位置, 计算孔斜率, 将其作为成槽作业的基础数据:

$$k = \frac{h+q}{hq} \eta \times 100\% \quad (2)$$

式中: k 表示为实际施工槽段长度; h 表示为槽孔深度; q 表示为桅杆高度; η 表示为具体的偏移量。施工期间要求槽段钻孔偏移量控制在 3cm 以内, 特殊地质条件下钻孔偏移量控制可适当放宽, 但也不宜超出 5cm 以上。槽孔连接部分的中心位置作为偏差控制的重点位置, 位置偏差不得超出墙体厚度的 1/3, 灌浆孔布设情况见图 1。

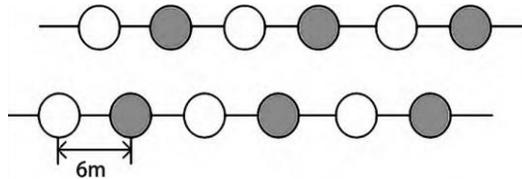


图 1 工程成槽灌浆孔布设 (白色为主孔, 灰色为副孔)

在浆液换置之前, 需要做好接头刷壁工作, 使用专用钢丝刷紧贴接头面反复摩擦移动, 确保接头部分表面的清洁度与完整性, 直至表面不再出现泥屑时可前往下道工序。

(2) 成槽。为了最大限度保障成槽施工质量, 加强成槽时的稳定性, 工程使用快速加浆的策略。在槽体开挖前, 施工人员向槽沟内部快速注浆, 保持槽沟内部浆液面始终位于地面以下 0.5m 左右。此过程中需要注重成槽机的使用和水平位置, 关注成槽机的参数设计, 确保成槽机能够有三名以上的专业施工人员操作^[4]。成槽机挖斗垂直

度在 1/300 以下, 严格控制抓斗下槽的稳定性和精准性。施工人员在结合不同土层的实际情况的基础上采取了不同的施工工序和开挖措施, 通过注浆管向孔底注入泥浆, 将杂物和渣土冲出孔外, 如果施工现场地下土层含砂率较大, 则可以尝试使用空气吸泥法做好清底作业。槽段开挖完成后采用无损检测方式明确槽壁的垂直度、稳定性等具体情况, 强化泥浆护壁效果。

3.4 混凝土浇筑控制

(1) 混凝土配合比确定。严格按照施工要求确定混凝土配合比, 加强各类材料的配比工作, 要求混凝土配合比性能满足施工标准。配比和检测严格依照工程标准需求严格控制, 制备阶段采用膨润土及纯碱配置, 具体配合比见表 3。工程选择的混凝土初凝时间控制在 6h 左右, 终凝时间控制在 24h 左右。

表 3 混凝土配合比 (单位: kg/m³)

参数	数值
细骨料	893
水泥	189
高效减水剂	5.012
粗骨料	827
膨润土	103
水	271

(2) 混凝土拌制与浇筑工艺。本项目地下岩体渗透性较强, 合理调整混凝土配合比保障混凝土凝固后的抗压强度、抗渗性能以及弹性模量。本工程施工面积大、施工周期长, 具有大规模防渗的需求, 考虑工期和质量控制方面的要求, 选择大型强制搅拌机进行混凝土拌制作业, 混凝土拌制速率控制在 200m³/h 左右。为了避免出现混凝土水化热衍生的混凝土病害问题, 严格控制混凝土的初凝时间和泌水率, 如果未达到设计标准则需要重新优化控制。出于大规模浇筑需求, 项目采用导管法作为浇筑方法, 严格控制导管在混凝土内的埋深, 避免出现浇筑死角、浇筑缺口等问题。使用膨润土浆液作为初次浇筑材料, 浇筑量与导管容积成正比, 避免材料浇筑溢出。混凝土浇筑速度控制在 50m³/h 左右, 避免出现浇筑中断问题, 确保混凝土浇筑的均匀性和持续性^[5]。搭配使用超声波检测仪实时监测防渗墙高程变化, 浇筑面倾斜度控制在 5° 以内。当混凝土浇筑面距槽顶 2m 左右时应降低浇筑速度, 避免出现浇筑速度过快混凝土盖过顶面高程的情况。

4 结束语

综上所述, 水利水电工程靠近水源, 施工环境对工程防渗性能提出了更高要求, 混凝土防渗墙的工艺便捷、防渗性能较强, 可有效提高水利水电工程的稳定性和抗渗性能。技术应用的过程中应全面掌握区域内的水文地质情况,

在固有施工技术体系基础上做好技术的优化创新,调整施工细节做好质量控制,打造出精益化的施工模式。按照施工准备、导墙施工、槽段开挖、混凝土浇筑控制几个重要节点控制施工效果,确保防渗墙施工质量和施工效率。做好施工的动态跟踪和过程优化,紧密贴合工程实际情况优化技术处理,为水利水电工程的高质量可持续发展提供充分条件。

[参考文献]

[1]胡书森.混凝土防渗墙在堤防加固工程中的施工工艺优化与质量控制[J].建筑工人,2025,46(12):41-43.

[2]潘凤珍.单薄分水岭和堆渣副坝地基塑性混凝土防渗墙施工技术[J].水泥,2025(12):95-97.

[3]王鑫颖,范震.基于混凝土防渗填筑技术的水利大坝工程施工设计研究[J].科技与创新,2025(14):95-97.

[4]王涛,尹永锋,左志鹏,等.坝基河谷形状对混凝土防渗墙力学性状影响量化研究[J].水力发电,2025,51(9):29-39.

[5]李晶,庞永波.澄县长宁河水库工程中塑性混凝土防渗墙施工技术的应用[J].地下水,2024,46(5):296-298.

作者简介: 邝旺旺(1998.4—),男,郑州科技学院,工程造价,中国水利水电第十一工程局有限公司。

超早强流态固化土力学性能与施工工艺研究

——以无锡通江大道快速化改造项目为例

过彬¹ 陆朝新¹ 夏涛^{2*}

1. 无锡大诚建设有限公司, 江苏 无锡 214000

2. 纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000

[摘要]针对市政快速路箱涵及桥台背回填工程中对材料自流平、自密实及超早期承载能力的综合要求,依托无锡市通江大道快速化一期工程,开展超早强流态固化土的力学性能与施工工艺研究。以工程渣土和灌注桩泥浆为主要原料,系统研究不同固化剂掺量条件下流态固化土的流动性能及早期与后期无侧限抗压强度发展规律。结果表明,在泥浆含水率约140%的条件下,固化剂掺量对流动度影响较小,材料均能满足自流平与自密实施工要求;当固化剂掺量达到约12%时,流态固化土早期强度发展出现明显跃升,12h内即可形成稳定结构,1d无侧限抗压强度超过150kPa,7d强度可达1.3MPa以上。结合工程实际,提出引入强度富裕系数的配合比设计思路,并确定固化剂合理掺量区间。通过近10000m³的大体积连续浇筑工程应用验证,结果表明该超早强流态固化土具有硬化快、强度稳定、施工效率高等优点,可为类似市政工程回填材料的选型与设计提供工程参考。

[关键词]流态固化土;超早强;无侧限抗压强度;配合比设计;市政工程回填

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18610

中图分类号: U414

文献标识码: A

Study on the Mechanical Properties and Construction Techniques of Ultra-Early-Strength Flowable Solidified Soil — A Case Study of the Tongjiang Avenue Rapid Upgrade Project in Wuxi

GUO Bin¹, LU Chaixin¹, XIA Tao^{2*}

1. Wuxi Dacheng Construction Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

Abstract: In order to meet the increasing demands for self-leveling performance, self-compaction ability, and ultra-early bearing capacity in backfilling works of box culverts and bridge abutments in urban expressway projects, an experimental and engineering study on ultra-early-strength flowable solidified soil was conducted based on the Tongjiang Avenue Rapid Upgrade Project in Wuxi. Engineering spoil soil and bored pile slurry were used as raw materials, and the effects of curing agent dosage on flowability and unconfined compressive strength at early and later ages were systematically investigated. The results indicate that under a slurry water content of approximately 140%, the curing agent dosage has a limited influence on flowability, and all mixtures satisfy the requirements of self-leveling and self-compacting construction. When the curing agent dosage reaches about 12%, a significant improvement in early strength development is observed: a stable structural skeleton forms within 12 h, the 1-day unconfined compressive strength exceeds 150 kPa, and the 7-day strength reaches more than 1.3 MPa. Based on engineering practice, a mix design approach incorporating a strength safety factor is proposed, and an optimal dosage range of the curing agent is determined. Large-scale field application involving nearly 10,000 m³ of continuous casting demonstrates that the proposed ultra-early-strength flowable solidified soil exhibits rapid hardening, stable strength development, and high construction efficiency, providing practical reference for similar municipal backfilling projects.

Keywords: flowable solidified soil; ultra-early-strength; unconfined compressive strength; mix design; municipal engineering

引言

随着城市快速路、立交及地下空间工程的快速发展,箱涵、桥台及管廊等结构物基坑回填对材料性能提出了更高要求。一方面,回填材料需具备良好的自流平与自密实性能,以适应狭窄空间和复杂结构;另一方面,工程普遍工期紧张,对回填材料的早期甚至超早期强度提出了明确要求。

传统回填材料如级配砂石、灰土及轻质泡沫混凝土在施工效率、质量稳定性及环境友好性方面均存在一定局限。近年来,流态固化土因其可泵送、自密实和可利用固废资源等优势,逐渐在市政工程中得到应用^[1,2]。然而,现有研究和工程实践多集中于常温条件下的早期强度发展,对超早强流态固化土在大体积、连续浇筑条件下的力学性能

与施工工艺研究仍相对不足。

基于此,本文依托无锡市通江大道快速化一期工程,针对箱涵肥槽与桥台台背回填的工程需求,研究超早强流态固化土的配合比设计、力学性能及施工工艺,并通过现场大规模应用验证其工程适用性。

1 工程概况与技术要求

1.1 工程概况

通江大道快速化一期工程 TJ12 标项目位于江苏省无锡市锡山区,南起规划天池路,向北上跨 G312 地面道路后落地,止于沪宁高速无锡出入口。项目起讫里程为 K2+252~K3+644.217,地面道路设计长度约 1392m,宽度为 49m~62.25m,采用双向六车道设计,设计时速 80km/h。作为无锡市重点市政工程,且地处城市门户位置,本项目意义重大、关注度高,对文明施工与标准化建设要求极为严格。为确保项目高质量顺利推进,桥台台背及箱涵回填首次采用超早强流态固化土,替代传统轻质泡沫混凝土。这也是该新型材料首次应用于无锡市重点市政主干线工程。本次超早强流态固化土填筑量近 1 万 m^3 ,应用于主线桥台落地挡墙回填及双通道、四通道箱涵基坑回填。项目面临设计强度高、快硬早强要求严、连续浇筑体量大、施工跨度大、工期紧、综合要求高等挑战。

1.2 技术要求

由于回填区域场地狭小、交叉作业频繁且工期紧,材料除满足强度指标外,还需具备“超早强转序”能力(尽快上人、尽快通行设备、尽快覆土进入上部结构施工)。具体技术要求如下:

- (1) 具备良好的自流平、自密实性能,流态固化土初始流动度不低于 180mm。
- (2) 设计 7d 无侧限抗压强度不低于 0.8MPa。
- (3) 浇筑后 6~12h 具备上人及设备通行能力,1d 无侧限抗压强度不低于 150kPa。
- (4) 连续泵送、大体积施工条件下不开裂、少泌水,满足城市核心区绿色施工标准。

2 材料与力学性能测试

2.1 原材料与试验方法

本次项目采用现场工程渣土及灌注桩泥浆作为土源,如图 1 所示。根据设计要求,设定泥浆比重 1.35~1.4,泥浆初始含水率为 140%,固化剂掺量为泥浆湿重的 8%、10%、12%、15%,开展流态固化土配合比试验。参照 T/CECS 1175—2022《自密实固化填筑技术规程》,采用内径和高度均为 80mm 的空心亚克力玻璃圆筒测试流态固化土的流动度,如图 2 所示。参照 T/CECS 1175—2022《自密实固化填筑技术规程》,将搅拌均匀后的流态固化土浇筑至模具中,模具尺寸为 70.7mm×70.7mm×70.7mm,覆膜后移至标准养护箱中养护至指定龄期开展无侧限抗压强度试验,如图 3 所示。



图 1 项目所用渣土与泥浆



图 2 流态固化土流动性测试与强度试件制备

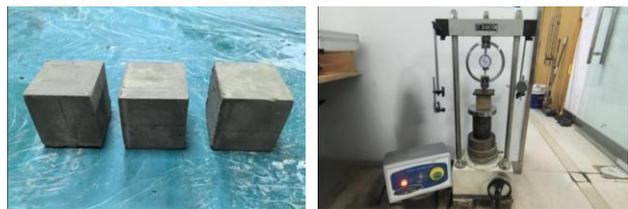


图 3 流态固化土强度测试试件与测试装置

2.2 性能测试结果

本次项目的流态固化土初始流动度测试结果如图 4 所示。可以看到,在泥浆含水率 140%的条件下,流态固化土初始流动度随固化剂掺量增加呈现缓慢下降趋势。当固化剂掺量由 8%提高至 15%时,流动度由 220mm 降低至 195mm,整体下降幅度小于 12%。这一现象表明,在高含水水泥浆体系中,浆体自由水含量充足,固化剂的引入并未显著破坏颗粒间润滑结构;固化剂水化初期以离子溶解与晶核生成过程为主,对宏观流动性能影响有限^[3];当流动度稳定在 200mm 左右时,材料仍可依靠自重实现自流平与自密实,满足复杂箱涵肥槽与台背空间的无振捣施工要求。

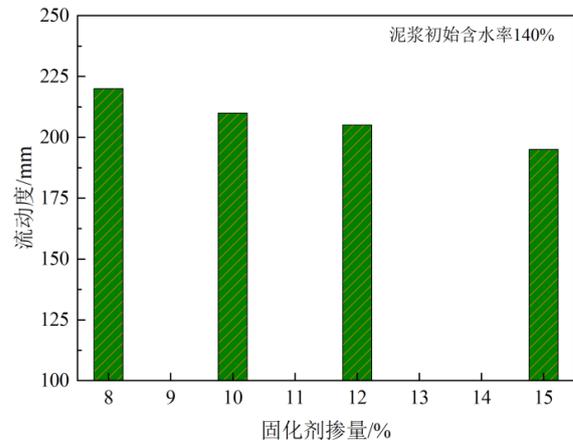


图 4 固化剂掺量对流态固化土流动性的影响

固化剂掺量对流态固化土 1d 和 7d 龄期无侧限强度的影响如图 5 所示。由 1d 无侧限抗压强度测试结果可以看到,所设计的流态固化土早期强度发展具有明显的临界掺量效应。固化剂掺量 $\leq 10\%$ 时,1d 内强度增长缓慢,部分试件出现未完全硬化现象;当固化剂掺量 $\geq 12\%$ 时,材料在 12h 内即可形成连续骨架结构,1d 无侧限抗压强度达到 150kPa 以上;固化剂掺量由 12% 提高至 15%,1d 强度由 150kPa 提升至 310kPa,增长幅度显著。这表明在该体系中,12% 为实现超早强转折点的关键掺量区间。当固化剂掺量超过该阈值后,水化反应速率明显加快,早期强度进入快速增长阶段^[4]。

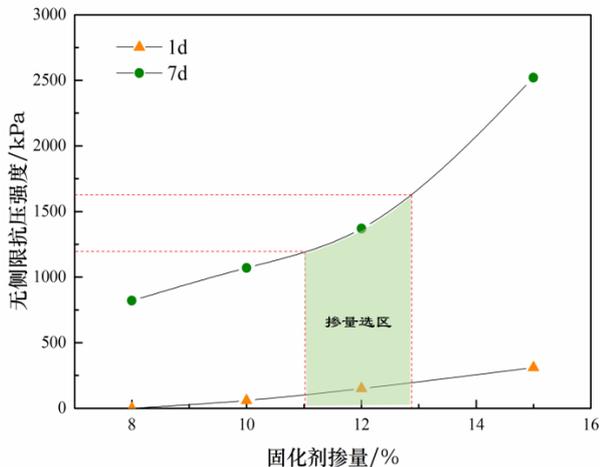


图 5 流态固化土 1d 和 7d 无侧限抗压强度与固化剂掺量的关系

由图 5 同时可以看到,7d 龄期强度随固化剂掺量呈现近似线性增长关系,但增长斜率在高掺量区有所增大。当固化剂掺量由 10% 提高为 12% 时,强度由 1.07MPa 增至 1.37MPa;而当固化剂掺量由 12% 提升至 15% 时,强度由 1.37MPa 显著增至 2.52MPa。该结果说明,在高含水泥浆体系中,固化剂掺量不仅影响水化产物数量,还显著影响结构致密程度与孔隙演化路径^[5]。

针对箱涵与台背回填工程对早期通行与长期稳定的双重要求,本文引入强度富裕系数 $\gamma = \text{实测强度} / \text{设计强度}$ 的设计理念。本工程中取 $\gamma = 2.0$,其合理性体现在:(1) 抵消现场不确定性(泥浆来源复杂、含水率波动、养护条件变化);(2) 保障超早期施工节点,满足 6h 上人、12h 通设备的实际需求;(3) 提高结构安全储备,避免后期沉降与返工风险。该思路可为类似市政工程流态固化土设计提供可复制的工程经验。基于上述分析,本项目流态固化土固化剂掺量选区定为 11%~13%,最终工程实施固化剂掺量定为 12% $\pm 0.5\%$ 。

3 流态固化土施工工艺

3.1 现场准备

通过现场踏勘,对施工现场的运输路线和卸料方式进行规划,并完成场地整理等工作,设置明确的运输通道与作业区域,避免交叉作业干扰如图 6 所示。



图 6 浇筑场地现场准备

3.2 设备搭建

本项目所采用的流态固化土设备由固化剂料仓、造浆-搅拌一体机、存储池、泵送设备等组成,设备系统具备自动化计量与实时监控功能,确保配合比准确性与搅拌均匀性,设备模块化设计便于转场与重复利用,如图 7 所示。



图 7 流态固化土设备现场组装

3.3 流态土制备

由挖机将渣土转运至造浆-搅拌一体机,边加水边搅拌至泥浆比重 1.35,随后设定固化剂添加量由螺旋输送机完成固化剂投放,避免扬尘与浪费,待浆体搅拌均匀后放料,如图 8 所示。



图 8 流态固化土现场制备

3.4 流态土暂存

由于渣土中含有石子等颗粒,为防止损坏泵送设备,在出料口设置浆池暂存流态土浆体,通过滤网对浆体进行过滤,将过滤后的流态土浆体进行泵送浇筑,如图 9 所示。暂存池过滤网孔径 $\leq 10\text{mm}$,有效隔离石块与杂物;池体底部略倾斜便于浆体汇集与泵送。

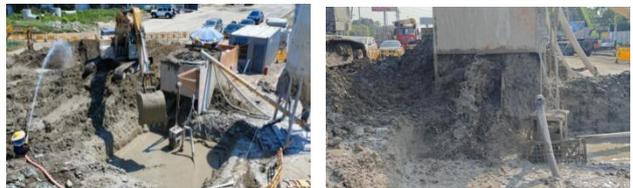


图 9 流态固化土浆体暂存

3.5 泵送浇筑

采用泥浆泵将流态固化土泵送至施工部位,进行流态固化土浇筑,浇筑时采用分层方式,浇筑过程及浇筑后的自流平效果如图 10 所示。



图 10 流态固化土泵送浇筑与浇筑后的自流平效果

3.6 养护

浇筑完成后采用 PE 膜整体覆盖,洒水养护早晚各一次,如图 11 所示。



图 11 流态固化土覆膜与洒水养护

3.7 质量检测

流态固化土浇筑完成 10h 后对表层流态土硬化情况进行了观测,如图 12 所示。可以看到,所浇筑流态固化土表面坚硬、平整、无开裂,表观密实均匀、无泌水、无分层现象,整体表观质量良好。浇筑完成 1d 后,通行渣土车覆土准备上层结构施工,如图 13 所示。



图 12 浇筑 10h 后硬化效果(上人无印记)



图 13 浇筑 24h 后通行设备覆土准备上层结构施工

依据现场施工情况,由业主单位委托江苏中设集团工程检测有限公司对流态固化土的 7d 无侧限抗压强度进行了抽样检测。由抽样检测结果可知,所浇筑的流态固化土

强度数据离散性小,7d 强度达到 1.35MPa,已明显优于设计指标,其强度满足设计要求。

4 结语

(1) 在高含水工程泥浆体系中,超早强流态固化土具有良好的流动性能,固化剂掺量在 8%~15% 范围内对初始流动度影响较小,材料均可依靠自重实现自流平与自密实,满足复杂箱涵及桥台台背空间的无振捣施工要求。

(2) 固化剂掺量对流态固化土早期强度发展具有显著影响,约 12% 为实现超早强性能的关键阈值。当掺量不低于该值时,材料可在 12 h 内形成稳定结构,1 d 无侧限抗压强度达到 150kPa 以上,能够满足快速转序和早期通行的工程需求。

(3) 通过引入强度富裕系数的配合比设计理念,可有效应对现场泥浆来源复杂、含水率波动及养护条件不确定等因素,提高超早期施工安全性与后期结构稳定性。本工程中确定的固化剂合理掺量区间为 11%~13%,具有良好的工程适用性。

(4) 无锡通江大道快速化工程的大体积连续浇筑应用表明,超早强流态固化土在施工效率、质量稳定性及现场适应性方面均表现良好,可作为传统回填材料的有效替代方案,为市政快速路及类似工程提供可推广的技术路径。

[参考文献]

- [1]苏悦,闫楠,白晓宇,等.预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J].材料导报,2024,38(9):66-72.
- [2]周永祥,霍孟浩,侯莉,等.低强度流态填筑材料的研究现状及展望[J].材料导报,2024,38(15):130-138.
- [3]代恒军,吴光雄,李海峰,等.水泥协同工业固废固化流态土工作性能研究[J].硅酸盐通报,2025,44(12):4492-4502.
- [4]王明,刘振忠,薛泽,等.流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(4):941-948.
- [5]杨易之,林远志,葛天歌,等.路基用流态固化土的流动性与强度试验研究[J].建材技术与应用,2025(3):38-42.

作者简介:过彬(1981—),男,汉族,江苏无锡人,本科,研究方向:新型建筑材料与施工技术;*通讯作者:夏涛(1986—),男,汉族,江苏苏州人,本科,副高级工程师,研究方向:固废资源化利用。

化工管道的阻力计算与管径优化设计

魏华兵

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]在化工生产系统中, 化工管道的运行效率与经济性的整体能耗以及成本有直接影响。其中, 管道阻力作为决定流体输送能耗的核心因素, 其优化控制尤为重要。而管径设计是优化期间的重要环节之一。文章以基本理论为基础, 对管道阻力产生的内在机制以及计算方法进行了系统的分析, 并探讨各因素的作用规律, 同时提出针对性的干预策略, 构建以总费用最小化为目标的管径优化模型, 为化工管道设计提供相关参考指导。

[关键词]化工管道; 阻力计算; 沿程阻力; 局部阻力; 管径优化; 总费用最小化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18621

中图分类号: U173.9

文献标识码: A

Resistance Calculation and Diameter Optimization Design of Chemical Pipeline

WEI Huabing

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In the chemical production system, the operational efficiency and economy of chemical pipelines have a direct impact on the overall energy consumption and cost of production. Among them, pipeline resistance is the core factor determining the energy consumption of fluid transportation, and its optimization control is particularly important, and pipe diameter design is one of the important links during the optimization period. Based on basic theories, this article systematically analyzes the internal mechanisms and calculation methods of pipeline resistance, explores the effects of various factors, proposes targeted intervention strategies, and constructs a pipe diameter optimization model with the goal of minimizing total costs, providing reference guidance for chemical pipeline design.

Keywords: chemical pipeline; resistance calculation; along the way resistance; local resistance; pipe diameter optimization; minimize the total cost

引言

在化工生产领域, 流体输送至关重要, 管道作为液体输送主要载体, 其设计影响生产的连续、安全与经济性^[1]。化工企业流体输送系统能耗占比高, 其中, 管道阻力是能量损失主因, 如果管道的阻力相对过大, 会增加输送设备的能耗, 对企业的生产效益与能源利用率造成影响。同时, 管径尺寸影响管道投资成本, 大管径降阻节能但成本高, 小管径相反^[2]。尤为关键的是, 在组成化工试验系统过程中, 流体在管内流动、输送必须克服管道的阻力做功, 由此会引起流体压力沿流动方向的下降。在组成化工试验系统过程中, 管道长度和直径要设计合理才能满足不同气体混合和流动的需要, 完成性能和各项参数测定试验。管道布置方式不同管道阻力损失也不同, 会造成管道内压力不同, 从而影响试验运行状态。较长的管线, 特别是当管线布置中含有弯头、管径突变时, 会产生比较大的压力损失^[3]。如果管道阻力损失过大可能会引起管道内压力偏大, 对试验运行产生影响。因此必须针对管道阻力损失及由此引起的压力变化进行研究, 流体输送压力变化是沿程阻力损失和局部阻力损失总和, 计算过程中需要分别计算这两种阻力损失, 由此得到压力的变化。故精准计算阻力、优化管

径, 平衡成本与运行能耗成本, 对化工企业降本增效、推动绿色发展意义重大。

2 化工管道阻力的产生机制与构成

2.1 阻力产生的核心机理

在化工的管道系统中液体流动时所遇到的阻力主要源于以下三个方面, 一是流体流动状态发生紊乱时而所产生的附加能量损失, 二是流体分子之间的内摩擦作用, 三是流体与管道内壁之间的外摩擦效应^[4]。液体的黏性特性是导致摩擦力的主因, 液体的惯性作用会造成流动状态的不稳定, 从而导致附加损失。在实际的化工生产液体输送过程中阻力损失主要表现为因流动状态紊乱而引发的局部能量损耗以及粘性摩擦作用而产生的沿程能量损耗。

2.2 阻力的分类与构成比例

化工管道的总阻力损失为沿程阻力损失与局部阻力损失之和, 即:

$$h_f = h_f^{\lambda} + h_f^{\zeta} \quad (1)$$

其中, h_f 代表化工管道的总阻力损失, h_f^{λ} 沿程表示沿程阻力损失, h_f^{ζ} 局部表示局部阻力损失。

沿程阻力损失是流体在等截面直管流动时, 因与管壁及内部粘性摩擦产生的能量损耗, 与管长、管径、流速和

粘性相关,是长距离输送的主要阻力,占总损 60%~80%。局部阻力损失是流体流经管件、阀门等时,因截面突变、方向改变或涡流等产生的能量损耗,在管件密集的短距离管道中占比可超 40%。

3 化工管道阻力计算方法

3.1 基础参数与流态判断

管道阻力计算前,要明确基础参数,涵盖流体物性(密度 ρ 、黏度 μ)、管道结构(管径 d 、管长 l 、管壁粗糙度 ε)及流动参数(流量 qV 、流速 u)。流态影响阻力计算方法,需用雷诺数 Re 判断。

雷诺数的计算公式为:

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{4qv\rho}{\pi d\mu} \quad (2)$$

式中, u 为流体平均流速(m/s), qV 为体积流量(m³/s)。圆管单相流体流动时, $Re \leq 2000$ 为层流, $Re \geq 4000$ 为湍流, $2000 < Re < 4000$ 为过渡流,工程常按湍流算。

3.2 沿程阻力损失计算

沿程阻力损失计算关键在于确定沿程阻力系数 λ ,不同流态下 λ 算法差异大,工程常用达西-魏斯巴赫公式计算沿程阻力损失:

$$h_f^\lambda = \lambda \frac{l u^2}{d 2g} \quad (3)$$

式中, λ 为无因次沿程阻力系数; l 为直管段长度(m); d 为管道内径(m); u 为流体平均流速(m/s); g 为重力加速度,取 9.81m/s²。

3.2.1 层流工况下的沿程阻力系数

层流($Re \leq 2000$)时,流体质点有序平行流动,黏性力主导,理论推导可得沿程阻力系数精确表达式(泊肃叶公式推导结果):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

此式对任意黏性流体的层流流动均适用,其特性是与管壁粗糙度无关联,仅取决于雷诺数。把 $\lambda=64/Re$ 代入达西-魏斯巴赫公式,便能得出层流工况下沿程阻力损失的计算式:

$$h_f^\lambda = \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} = \frac{32\mu l u}{\rho g d^2} \quad (5)$$

由上式可得,层流时沿程阻力损失与流速一次方成正比。

3.2.2 湍流工况下的沿程阻力系数

湍流($Re \geq 4000$)中,流体质点呈现出高度无序的杂乱运动特征、布满多尺度涡旋结构,此时主要以流体运动的惯性力为主导^[5]。沿程阻力系数 λ 与 Re 和管壁粗糙度 ε 相关,无精确理论式,需实验关联式或图表计算,工程常用经验公式法。

常用公式如下:

(1) 光滑管区(如新无缝钢管、塑料管, $\varepsilon/d \approx 0$):
 $5 \times 10^4 \leq Re \leq 1 \times 10^5$ 时,用布拉修斯公式:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (6)$$

当 $Re > 1 \times 10^5$ 时,选用尼古拉兹(Nikuradse)公式计算:

$$\lambda = \frac{1}{(2.1gRe - 0.8)^2} \quad (7)$$

(2) 粗糙管区(完全湍流,阻力系数与 Re 无关),用希弗林松(Shifrin)公式计算:

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^{0.25} \quad (8)$$

(3) 过渡粗糙区(λ 与 Re 、 ε/d 均相关):用科尔布鲁克-怀特(Colebrook-White)公式,其适用 Re 范围广,是工程通用公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (9)$$

该公式为隐式,需迭代求解,初始值取光滑管公式算出的 λ ,迭代至两次结果相对误差 $< 1\%$ 。

3.3 局部阻力损失计算

局部阻力损失计算主要有阻力系数法与当量长度法两种,工程常用阻力系数法。

3.3.1 阻力系数法

阻力系数法是将局部阻力损失表示为流体动能的倍数,其计算公式为:

$$h_f^\zeta = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (10)$$

式中, ζ 为无因次局部阻力系数,其值取决于产生局部阻力的管件、阀门类型及流动条件,由实验测定,常见管件局部阻力系数参考值见表 1。

表 1 常见管件局部阻力系数

管件/阀门类型	局部阻力系数 ζ
突然扩大管(大→小, $A_2/A_1=0$)	1.0
突然缩小管(小→大, $A_1/A_2 \rightarrow 0$)	0.5
90° 标准弯头	0.75
45° 弯头	0.35
三通(分流)	1.5
截止阀(全开)	6.0~10.0
闸阀(全开)	0.17
止回阀(旋启式)	2.0

注意,局部阻力系数 ζ 对应的流速 u 应取管件下游或上游特征流速(一般是小管径截面流速),具体依实验定义,计算时要明确流速对应管径。

3.3.2 当量长度法

当量长度法是局部阻力损失等效为长度为 l_d 直管段沿程损失,计算公式为:

$$h_f^\zeta = \lambda \frac{l_e u^2}{d 2g} \quad (11)$$

式中, l_e 为局部管件当量长度(m),由实验测定,常见管件 l_e/d 参考值见表 2。此法优势是可合并局部与沿程

阻力损失计算, 简化复杂管道阻力计算。

表2 常见管件 l_e/d 参考值

管件/阀门类型	当量长度比 l_e/d
90° 标准弯头	30
45° 弯头	15
三通(分流)	60
截止阀(全开)	300~500
闸阀(全开)	10
止回阀(旋启式)	50

3.3.3 总局部阻力损失计算

当管道系统中存在多个局部管件时, 总局部阻力损失为各管件局部阻力损失相加, 即:

$$h_f^{\zeta} = \sum_{i=1}^n \zeta_i \frac{u_i^2}{2g} \quad (12)$$

式中, ζ_i 为第 i 个管件局部阻力系数, u_i 为其特征流速。用当量长度法时, 将各管件当量长度相加, 再与直管段长度合并计算总沿程阻力损失:

$$h_f = \lambda \frac{l + \sum_{i=1}^n l_{e,i}}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (13)$$

式中, $l_{e,i}$ 表示第 i 个管件的当量长度。

3.4 阻力计算方法的验证与误差分析

为验证阻力计算方法, 选某光滑管 ($\varepsilon=0.05\text{mm}$) 数值验证。已知管内径 $d=0.1\text{m}$ 、长 $l=100\text{m}$, 输水 ($\rho=1000\text{kg/m}^3$, $\mu=1.002 \times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$), 流量 $qV=0.01\text{m}^3/\text{s}$, 含 2 个 90° 弯头、1 个全开闸阀。

基础参数: 流速 $u=4qV/(\pi d^2) \approx 1.273\text{m/s}$, 雷诺数 $Re \approx 1.27 \times 10^5$, 属湍流光滑管区。

沿程阻力系数: 用尼古拉兹公式, $\lambda \approx 0.016$ 。

沿程阻力损失: $hf\lambda \approx 0.132\text{m}$ 。

局部阻力损失: 查表得 90° 弯头 $\zeta=0.75$, 闸阀 $\zeta=0.17$, $\zeta_{\text{总}}=1.67$, $hf\zeta \approx 0.138\text{m}$ 。

总阻力损失: $hf=0.27\text{m}$ 。

FLUENT 模拟得总局部阻力损失 0.265m, 与计算值相对误差 1.89%, 表明阻力计算方法准确, 能满足工程需求。误差源于局部阻力系数实验误差及流动参数简化, 工程中可选精准系数或数值模拟降低误差。

4 化工管道管径优化设计

4.1 管径优化的目标与约束条件

4.1.1 目标函数

管径优化核心是使管道总费用最小, 总费用含投资与运行能耗费用。总费用 $C_{\text{总}}=C_{\text{投}}+C_{\text{运}}$, 采用年费用法(考虑管道寿命)构建目标函数, 即:

$$C_{\text{总}}(d) = C_{\text{投}}(d) \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + C_{\text{运}}(d) \quad (14)$$

式中, d 为管道内径(优化变量); i 为年利率; n 为管道使用寿命(年); $(1+i)^n - 1i(1+i)^n$ 是资金回收系数。

(1) 投资费用 $C_{\text{投}}(d)$ 含管材采购、安装等费用, 与管长、管径、材质相关, 确定管长和材质时, 可近似表示

为管径函数:

$$C_{\text{投}}(d) = k \cdot l \cdot d^m \quad (15)$$

式中, k 为投资系数(取决于材质、施工条件); m 为管径影响指数(圆管通常取 1.5~2.0); l 为管道总长(含直管段与管件当量长度)。

(2) 年运行能耗费用 $C_{\text{运}}(d)$ 指流体输送设备(如泵、压缩机)年能耗支出, 与阻力损失正相关, 其计算公式如下:

$$C_{\text{运}}(d) = \frac{\rho g q_v h_f(d) P}{3600 \eta_1 \eta_2} \cdot t \quad (16)$$

式中, $h_f(d)$ 是总阻力损失(随管径 d 变化); P 为单位电价(元/kWh); η_1 为输送设备效率; η_2 为电机效率; t 为年运行时间(h)。

4.1.2 约束条件

(1) 流量约束: 管径须满足工艺流量要求, 即 $qV \geq qV_{\text{min}}$, 可转化为流速约束 $u \geq u_{\text{min}}$ (防沉积, 通常取 0.5~1.0m/s)。

(2) 压力降约束: 总压力降 $\Delta P = \rho g h_f(d) \leq \Delta P_{\text{max}}$ (ΔP_{max} 为设备最大输出压力)。

(3) 管径规格约束: 管径需符合国家标准(如 GB/T10297), 为离散值, 优化结果需修正。

(4) 流速上限约束: 限制最大流速 $u \leq u_{\text{max}}$ (液体 $u_{\text{max}}=23\text{m/s}$, 气体 $u_{\text{max}}=15\text{m/s}$), 防磨损、噪音及能耗问题。

4.2 管径优化模型的构建

结合目标函数与约束条件, 构建管径优化模型如下:

目标函数:

$$\min C_{\text{总}}(d) = k \cdot l \cdot d^m \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + \frac{\rho g q_v h_f(d) P t}{3600 \eta_1 \eta_2} \quad (17)$$

约束条件:

$$\begin{cases} u_{\text{min}} \leq \frac{4qV}{\pi d^2} \leq u_{\text{max}} \\ \rho g h_f(d) \leq \Delta P_{\text{max}} \\ d \in D_{\text{标准}} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $D_{\text{标准}}$ 为标准管径集合。总局部阻力损失 $h_f(d)$ 按 3.2、3.3 节方法计算, 通过流速 $u=4qV/(\pi d^2)$ 与管径 d 关联, $h_f(d)$ 可表示为 d 的函数:

$$h_f(d) = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{(4qV/\pi d^2)^2}{2g}$$

4.3 优化模型的求解方法

4.3.1 解析法

管径优化模型的目标函数为 d 的非线性函数且受离散标准管径约束, 解析法仅适用于简化模型(通过求导得最优解)。若忽略局部阻力损失(长距离管道近似)且 λ 为常数(完全湍流区), 目标函数可简化:

$$C_{\text{总}}(d) = k l d^m \cdot CRF + \frac{\rho g q_v \lambda (4qV/\pi d^2)^2}{3600 \eta_1 \eta_2 g} \cdot P t \quad (19)$$

式中, 资金回收系数 $CRF=(1+i)^n - 1i(1+i)^n$ 。对总费用 $C_{\text{总}}$ 关于管径 d 求导, 令 $\frac{dC_{\text{总}}}{dd}=0$, 可解得最优管径 d_{opt} :

$$d_{\text{opt}} = \left(\frac{8 \rho g q_v^3 \lambda P t}{3600 \eta_1 \eta_2 \pi^2 g k l m CRF} \right)^{\frac{1}{m+5}} \quad (20)$$

解析法计算简便,能快速得出最优管径理论值,但因忽略局部阻力损失、未考虑 λ 随 d 变化等情况,精度欠佳,仅适用于初步的设计阶段。

4.3.2 数值迭代法

数值迭代法适用于复杂非线性优化模型,通过迭代逼近最优解,常用黄金分割法等。以黄金分割法为例:先依流速约束确定管径搜索区间 $[d_{min}, d_{max}]$,按黄金分割比例取两试探点 d_1 、 d_2 ,计算对应总费用 C_1 、 C_2 ,比较后缩小搜索区间,重复操作至区间长度小于允许误差(常取 $0.01m$),取中点为最优管径近似值。该方法精度高于解析法,适合精确计算,但计算较繁琐,需借助工具完成。

4.3.3 智能优化算法

针对多约束、复杂目标函数的管径优化问题,可用遗传算法等智能优化算法,其全局搜索强、能处理离散变量,适用于大规模复杂管道系统。以遗传算法为例:先编码管径变量为二进制字符串代表个体;随机生成个体构成初始种群;以总费用倒数作适应度函数,值越大管径越优;用轮盘赌选择法选优个体交叉变异生成新种群;重复适应度评估与遗传操作至收敛或达最大迭代次数,适应度最大个体即为最优管径。该算法精度高,但计算复杂,适合大型化工管道网络优化设计。

5 结论与展望

5.1 结论

化工管道总阻力损失包含沿程与局部两部分。沿程阻

力损失用达西-魏斯巴赫公式计算,不同流态下沿程阻力系数计算方法有别,层流区为 $\lambda=64/Re$,湍流区需结合经验公式;局部阻力损失可用阻力系数法或当量长度法计算,关键在于准确选取局部阻力系数或当量长度,计算的准确性高,能满足工程设计需求。管径优化设计核心是构建以年总费用最小化为目标的优化模型,需综合考量投资与运行能耗费用,同时满足流量、压力降、流速及标准管径等约束。采用黄金分割法等数值迭代法求解最优管径效率高,经济效益显著。

[参考文献]

- [1]赵润辰,胡娅雯,焦艳梅,等.新型装配式流体力学综合实验装置的设计[J].黑龙江科学,2024(4):102-105.
- [2]江超.复杂流体力学在化工装置设计中的应用[J].化工管理,2024(2):124-126.
- [3]甘淑清,彭立敏,雷明锋,等.考虑管-土/泥浆接触状态的浅埋大断面矩形顶管隧道摩阻力计算方法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(3):1178-1186.
- [4]石守稳,孙兴悦,刘争,等.化工管道运输技术发展现状与展望[J].前瞻科技,2024,3(2):94-101.
- [5]侯贵军.化工装置管道布置优化研究[J].化工设计通讯,2021,47(6):56-57.

作者简介:魏华兵(1992.1—),毕业院校:河北科技大学,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:工艺安全设计,职称级别:工程师。

深层页岩气储层压裂裂缝导流能力模拟研究现状

黎文昊 严树资 胡颂贤 王佳兴

重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331

[摘要]深层页岩气储层(埋深>3500m)普遍存在高地应力、高闭合压力和强应力敏感等特征,压裂形成的水力裂缝导流能力是决定产能的关键因素。本文系统综述了深层页岩气压裂裂缝导流能力的研究现状,重点总结了实验测试、解析模型与数值模拟三方面的进展。实验研究表明,支撑剂在高应力下的压实、嵌入与破碎是导流能力衰减的主控因素,其中压实贡献最大(约72%),嵌入次之(约14%)。优化支撑剂类型、铺砂浓度、压裂液体系及生产制度可有效延缓导流能力下降。解析模型方面,赫兹接触理论、等效裂缝及多因素耦合模型为导流能力快速计算提供了理论工具,但仍依赖实验标定,对复杂缝网描述不足。数值模拟中,嵌入式离散裂缝模型(EDFM)、扩展有限元法(XFEM)、CFD-DEM耦合方法及格子玻尔兹曼方法(LBM)等各具优势,分别适用于宏观缝网流动、裂缝扩展模拟、支撑剂微观行为及孔隙流动分析,但在多场全耦合、支撑剂非均匀分布动态演化及现场验证方面仍存在局限。未来研究应致力于多尺度多场耦合模型构建、人工智能代理模型开发,以及真实三维地质力学-流动一体化模拟,以推动深层页岩气压裂裂缝导流能力的精准预测与优化调控。

[关键词]深层页岩气;水力压裂;裂缝导流能力;数值模拟;多场耦合;支撑剂;应力敏感

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18625

中图分类号: TE3

文献标识码: A

Current Status of Simulation Research on Fracture Conductivity of Deep Shale Gas Reservoirs

LI Wenhao, YAN Shuzi, HU Songxian, WANG Jiaying

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401331, China

Abstract: Deep shale gas reservoirs (burial depth>3,500 m) commonly exhibit characteristics such as high ground stress, high closure pressure, and strong stress sensitivity. The hydraulic fracture conductivity formed by fracturing is a key factor determining productivity. This article provides a systematic overview of the current research status on the flow conductivity of deep shale gas fractures, with a focus on summarizing the progress in experimental testing, analytical models, and numerical simulations. Experimental studies have shown that the compaction, embedding, and fragmentation of proppants under high stress are the main controlling factors for the attenuation of flow capacity, with compaction contributing the most (about 72%), followed by embedding (about 14%). Optimizing the type of proppant, sand concentration, fracturing fluid system, and production system can effectively delay the decline in diversion capacity. In terms of analytical models, Hertz contact theory, equivalent cracks, and multi factor coupling models provide theoretical tools for rapid calculation of flow capacity, but still rely on experimental calibration and lack sufficient description of complex fracture networks. In numerical simulation, embedded discrete fracture model (EDFM), extended finite element method (XFEM), CFD-DEM coupling method, and lattice Boltzmann method (LBM) have their own advantages and are suitable for macroscopic fracture network flow, crack propagation simulation, micro behavior of proppants, and pore flow analysis, respectively. However, there are still limitations in multi field full coupling, dynamic evolution of non-uniform distribution of proppants, and field verification. Future research should focus on the construction of multi-scale and multi field coupling models, the development of artificial intelligence agent models, and the integration of real 3D geomechanics and flow simulation, in order to promote accurate prediction and optimization of the flow capacity of deep shale gas fractures.

Keywords: deep shale gas; hydraulic fracturing; crack conductivity; numerical simulation; multi field coupling; proppant; stress sensitivity

页岩气是富有机质泥页岩中的一种重要非常规天然气资源,其高效开发对保障国家能源安全具有战略意义。我国页岩气资源潜力巨大,但储层普遍具有低孔、低渗、非均质性强等特点,且地质力学条件与应力状态差异显著,导致压裂改造效果难以预测,开采难度极大。压裂的核心目标是形成具有高导流能力的大规模复杂裂缝网络,扩大储层改造体积。然而,实际压裂过程中裂缝形态复杂多变,尤其在普遍采用低黏度滑溜水进行大排量

压裂的背景下,支撑剂能否有效进入并均匀铺置于复杂裂缝分支中,如何提升裂缝网络的整体导流能力,仍是尚未完全解决的关键问题。为此,本文围绕页岩气压裂中支撑剂运移与裂缝导流能力这一核心难题展开研究,旨在建立三维支撑剂运移模型、发展导流能力实验与计算模型、构建考虑支撑剂非均匀分布的产能预测模型,以期为我国页岩气高效压裂设计与产能评价提供理论依据与技术支持。

1 实验模拟研究现状

页岩气井通常采用含有支撑剂的压裂液进行压裂，通过支撑剂支撑裂缝以延缓其闭合。然而，支撑剂在长期高闭合压力作用下会发生压实、嵌入、破碎及运移，尤其在深层页岩高地应力条件下，裂缝表现出强应力敏感性，导致导流能力持续衰减，影响长期产能。目前，大量学者针对支撑剂损伤机制与导流能力控制开展了系统的实验研究，重点围绕应力敏感性、支撑剂行为、压裂液伤害等方面展开，为压裂设计与生产制度优化提供了重要依据。

1.1 基于实验的裂缝导流能力衰减机理与控制方法

支撑剂在高闭合应力下的动态损伤是导流能力下降的核心。吴建发^[1]等人采用“定围压变流压测试方法”，模拟了生产过程中流压变化对支撑剂运移的影响。研究发现，无支撑剂时裂缝渗透率损失率可达 65%，而支撑剂的加入能显著降低应力敏感性。提高铺砂浓度可进一步减弱敏感性，但效果随浓度增加而趋缓。

研究还强调了生产制度的重要性。采用“小压差逐级降压”方式相比大幅降压，能有效减缓支撑剂的嵌入与破碎，保护裂缝导流能力。实验识别出一个关键临界有效应力值(约 19MPa)：低于此值，渗透率恢复率高(约 95%)；超过此值，导流能力将发生不可逆的显著下降。这一发现为深层页岩气井的合理配产提供了关键阈值。

1.2 裂缝导流能力影响因素的实验研究

大量学者针对页岩储层水力压裂支撑剂导流能力的衰减机理与控制方法开展了系统研究。刘学伟^[2]等人采用 20~40、40~60、70~100 目的陶粒、石英砂及覆膜砂支撑剂开展裂缝导流能力研究，重点分析了支撑剂类型、颗粒大小、铺砂浓度、应力循环加卸载和滑溜水作用对支撑剂导流能力影响研究。研究表明，在支撑剂类型方面，陶粒的导流能力显著高于石英砂和覆膜砂，在闭合压力达 70MPa 时仍可保持 $45\mu\text{m}^2\text{cm}$ 以上的导流性能；不同支撑剂类型的导流能力对比如图 1 所示，在高闭合压力下陶粒的优势更为明显。在支撑剂粒度与组合方面，低闭合压力下 20~40 目陶粒导流能力最大，而高闭合压力下组合支撑剂(20~40 目与 40~60 目陶粒以 1:2 混合)表现出更优的导流能力与抗破碎性；在铺砂浓度方面，导流能力随浓度增加而提升，综合考虑经济性与施工效果，推荐铺砂浓度为 $7.5\text{kg}/\text{m}^2$ 。此外，研究还发现循环应力加载会使导流能力较稳载模式下降 31.7%，主要由于支撑剂嵌入加剧及破碎颗粒堵塞孔隙所致。在压裂返排液污染方面，胍胶压裂液导致导流能力下降 76.5%，显著高于滑溜水体系的 33.9%，因此建议选用低伤害滑溜水压裂液体系以减轻污染。研究成果揭示了多因素对导流能力的影响机制。

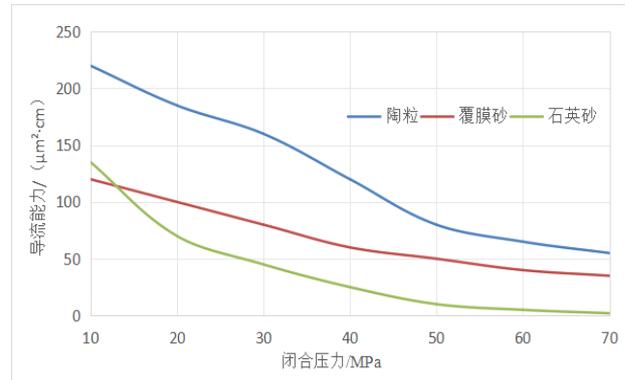


图 1 支撑剂类型对导流能力的影响(刘学伟等人^[1])

1.3 支撑剂压实、嵌入与破碎对导流能力的量化影响

为厘清各损伤机制的贡献，王欣桐等人^[3]设计了钢板与岩板组合实验(图 1.3)，系统对比了“仅压实”“压实+破碎”“压实+嵌入”及三者叠加四种情景。实验表明，导流能力下降可分为三个阶段：低压阶段($<20\text{MPa}$)以压实为主；中压阶段($20\sim60\text{MPa}$)嵌入加剧；高压阶段($>30\text{MPa}$)破碎率增大。通过对比不同组合的导流能力变化，四组导流能力从高到低依次为：A 钢板+钢砂(仅压实) $>$ B 钢板+陶粒(压实+破碎) $>$ C 岩板+钢砂(压实+嵌入) $>$ D 岩板+陶粒(三者叠加)，直观体现了“仅压实”“压实+破碎”“压实+嵌入”“三者叠加”四种情境下导流能力的衰减程度差异。量化分析显示，压实贡献最大(约 72%)，嵌入次之(约 14%)，破碎最小(约 9%)。该结果明确了各机制的影响程度，为支撑剂优选提供了直接依据。支撑剂在裂缝中的受力与嵌入行为是其导致导流能力下降的物理基础，其简化力学分析模型如图 2 所示。

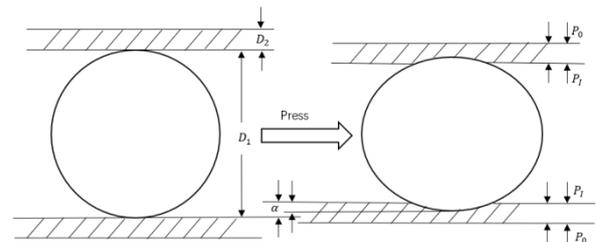


图 2 单个支撑剂在裂缝中的应力分析图(吴国涛等人^[6])

1.4 支撑剂回流与应力加载方式对导流能力的影响研究

陈浩等人^[4]通过自主研发的回流模拟系统，研究了不同应力路径下导流能力的变化。对比变围压与变流压两种测试方法发现，变流压条件下导流能力前期下降更快，且支撑剂回流率显著更高(可达 20.53%)，更贴近实际生产情况。研究指出，对于高铺砂浓度裂缝，应采用变流压测试以更真实反映支撑剂运移的影响，避免低估导流能力伤害。

1.5 压裂液侵入对页岩储层导流能力的伤害机制研究

压裂液侵入会严重劣化支撑剂和岩石的力学性能。袁旭等人^[5]的研究表明，液体浸泡会加剧支撑剂破碎，尤以

大粒径石英砂为甚(破碎率上升 65.1%),并显著加重支撑剂嵌入。在不同液体类型中,清水造成的伤害最大(导流能力下降 81.7%),而 2%KCl 溶液因具防膨性伤害相对较小。该研究强调,在压裂液体系选择、支撑剂粒径设计及铺砂浓度优化时,必须综合考虑压裂液侵入带来的化学-力学耦合伤害。

2 解析模型研究现状

深层页岩气压裂裂缝导流能力的准确预测,是优化压裂设计、评估长期产能的核心理论问题。解析模型因其形式简洁、物理意义明确、计算高效等特点,成为理解裂缝导流能力变化机理的重要工具。本节对现有解析模型的研究进展进行系统梳理,主要围绕支撑剂嵌入、缝网等效及多因素耦合等关键过程。

吴国涛等人^[6]与 Li 等人^[7]基于赫兹接触理论,建立了计算支撑剂嵌入和裂缝导流能力的解析模型,适用于支撑剂单层或多层铺置的理想及实验情况。张晗等人^[8]根据水电相似原理,提出了“等效裂缝”概念,建立了复杂缝网导流能力优化模型。为同时刻画支撑剂层压实与颗粒嵌入的双重伤害(图 3),陈冬等人^[9]耦合孔隙压缩与固体接触理论,建立了考虑压实与嵌入双重作用的导流能力模型。

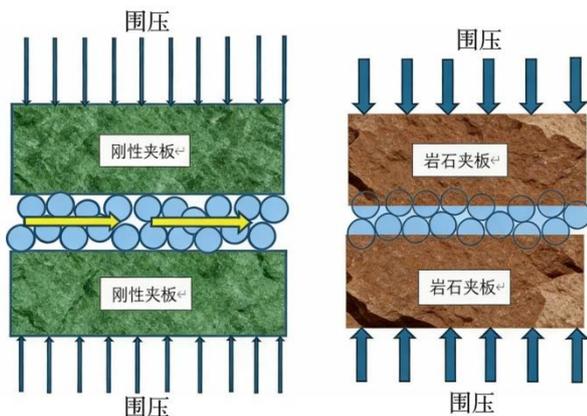


图 3 支撑剂充填裂缝导流能力实验原理(陈冬等人^[9])

侯腾飞等人^[10]进一步综合考虑支撑剂嵌入、变形及压裂液伤害,建立了多因素影响的计算模型。针对高地应力条件,陈铭等人^[11]建立了考虑弹塑性变形的支撑剂嵌入预测模型。上述解析方法多为半经验公式,需经实验数据校准。

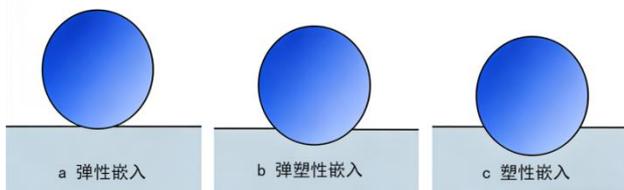


图 4 支撑剂嵌入阶段示意图(侯腾飞等人^[11])

3 数值模拟研究现状

在室内实验与解析模型之外,计算流体力学(CFD)

与离散元(DEM)等数值模拟方法已成为研究人工裂缝变形与导流能力的重要手段。朱海燕、刘英君、王向阳等^[12]学者通过 CFD-DEM 耦合模型,综合考虑支撑剂破碎及渗流-应力相互作用,系统分析了铺砂浓度、支撑剂组合、水岩作用、裂缝形态及闭合应力等因素对支撑剂嵌入、破碎及导流能力的影响机制,揭示了相关力学与流动规律。另一方面,徐加祥、丁云宏、杨立峰等人^[13]采用 DEM 与格子玻尔兹曼方法(LBM)进行模拟,利用 LBM 在介观尺度及复杂边界处理方面的优势,更精细地刻画了支撑剂孔隙内的流动行为。

作为连接实验与工程应用的关键桥梁,数值模拟能够高效复现压裂缝网形成、支撑剂运移及导流能力演化全过程,为深层页岩气压裂优化提供量化依据。针对深层储层高地应力、强应力敏感及复杂缝网等特点,当前主流方法聚焦于宏观流动、细观力学及多场耦合模拟,主要包括嵌入式离散裂缝模型(EDFM)、扩展有限元法(XFEM)、CFD-DEM 耦合方法及 LBM 等。这些方法各具理论基础与适用范围,在精度、场景适应性与计算效率上相互补充,共同推动该领域研究进展。

3.1 嵌入式离散裂缝模型(EDFM)

嵌入式离散裂缝模型(EDFM)通过将裂缝作为独立流动单元嵌入储层基质网格,无需对裂缝区域进行精细网格剖分,仅通过引入裂缝渗透率张量即可实现基质与裂缝、裂缝与裂缝间的流动耦合,有效解决了传统有限元法在复杂缝网模拟中网格划分难度大、计算效率低的瓶颈。EDFM 方法的网格处理,裂缝网格与基质网格独立,通过非相邻连接(NNC)实现流动交换,从而避免了复杂的局部网格剖分。该方法已被广泛应用于页岩气藏复杂缝网的流动表征与开发参数优化,尤其适用于大规模缝网的高效模拟。

在深层页岩气领域,EDFM 的核心应用集中于缝网导流能力评价与产能联动预测。徐加祥等人^[13]研究表明,EDFM 能够精准刻画“主缝-分支缝”的流量分配特征,分支缝因开度较小、支撑剂铺置不足,其导流贡献仅为主缝的 30%~40%。此外,EDFM 与缝网扩展模拟方法的耦合,实现了“裂缝形态演化-导流能力分布-产量预测”的一体化模拟,为施工参数优化提供了直接技术支撑。但该方法的局限性在于对支撑剂嵌入、破碎等细观力学行为的描述不足。

3.2 扩展有限元法(XFEM)

扩展有限元法(XFEM)通过在位移场中引入裂缝尖端与裂缝面的富集函数,实现了裂缝扩展过程的无网格重构模拟。该方法擅长捕捉裂缝尖端应力集中效应,能够精准描述高地应力条件下水力裂缝动态扩展、分支形成及缝宽演化过程,为分析裂缝形态对导流能力的影响提供细观力学基础。

彭越等人^[14]在裂缝导流能力模拟中, XFEM 的优势体现在“裂缝扩展-支撑剂运移-导流能力”的全流程耦合表征。通过 XFEM 可量化分析裂缝分支角度、缝宽分布等形态参数对支撑剂铺置均匀性的影响。例如, 分支缝与主缝夹角小于 45° 时, 支撑剂更易进入分支缝形成有效支撑; 而夹角大于 60° 时易出现“空支撑”现象, 导致局部导流能力骤降。但 XFEM 计算成本较高, 更适用于微观尺度的机理研究。

3.3 计算流体力学-离散元耦合方法 (CFD-DEM)

CFD-DEM 耦合方法是研究支撑剂运移、铺置及裂缝导流能力微观机理的核心工具。其原理为: 通过 DEM 模拟支撑剂颗粒的碰撞、嵌入、破碎等微观行为, 通过 CFD 模拟压裂液/天然气在裂缝中的宏观流动, 利用相间耦合模型实现流体与固体颗粒的相互作用, 最终复现支撑剂在复杂裂缝中的运移规律及导流能力演化过程。

高庆庆等人^[15]研究通过 CFD-DEM 模拟揭示了支撑剂与岩石弹性模量对裂缝导流能力的影响: 支撑剂弹性模量越高, 裂缝缝宽越大, 导流能力越高; 岩石弹性模量越大, 支撑剂嵌入越浅, 导流能力亦越高。该方法还可模拟“主缝+支缝+次微缝”结构中支撑剂的分流规律, 优化压裂液黏度与排量以改善支撑剂分布。

3.4 数值模拟方法的对比与现存不足

当前主流数值模拟方法在深层页岩气压裂裂缝导流能力研究中各有侧重, 其核心特征对比见表 1:

表 1 主流数值模拟方法对比

模拟方法	核心优势	适用场景	主要局限性
EDFM	计算效率高, 适配复杂缝网	宏观缝网导流能力评价、压后产能预测	微观机理表征不足
XFEM	精准模拟裂缝扩展与应力演化	微观裂缝形态-导流能力耦合研究	大规模缝网模拟效率低
CFD-DEM	复现支撑剂运移、嵌入、破碎微观机理	支撑剂参数优化、微观机理研究	计算成本高, 尺度有限
LBM	擅长复杂孔隙通道流动, 边界处理简单	支撑剂孔隙流动、流固耦合研究	宏观缝网模拟适用性差

尽管各类方法已取得显著进展, 但当前数值模拟研究仍存在三大核心不足: ①多场耦合描述不全面, 对“化学-力学-流动”全耦合表征不足; ②支撑剂非均匀铺置与动态损伤的耦合模拟缺失; ③实验校准与现场验证不足, 导致模拟结果与现场产能存在偏差。

未来, 数值模拟的发展趋势将向“多方法融合、多场全耦合、数据驱动优化”演进: 推动 CFD-DEM 与 EDFM/XFEM 的多尺度耦合; 引入人工智能代理模型提升计算效率; 构建真实三维地质力学-流动耦合模型, 提升模拟结果的现场适用性。

4 结论

深层页岩气储层具有高地应力、高闭合压力与强应力敏感等特征, 其压裂裂缝导流能力是决定压裂效果与长期

产能的关键因素。本文系统梳理了深层页岩气压裂裂缝导流能力的实验测试、解析模型与数值模拟三方面的研究进展, 主要结论如下:

(1) 实验研究表明, 支撑剂在长期高闭合应力作用下的压实、嵌入、破碎及运移是导致裂缝导流能力衰减的核心机制。其中, 压实贡献最大(约 72%), 嵌入次之(约 14%), 破碎相对较小(约 8%)。优化铺砂浓度、采用陶粒支撑剂、实施“小压差逐级降压”生产制度, 可显著延缓导流能力下降。压裂液侵入会加剧支撑剂嵌入与破碎, 尤其是清水和胍胶压裂液伤害较大, 推荐采用低伤害滑溜水体系。

(2) 解析模型方面, 基于赫兹接触理论、等效裂缝原理及多因素耦合框架的模型, 为导流能力的快速计算与机理分析提供了有效工具。现有模型能够量化支撑剂嵌入、裂缝压实及化学伤害的影响, 但多属于半经验公式, 依赖实验标定, 对复杂缝网与非均匀支撑的描述仍显不足。

(3) 数值模拟方法, 在揭示复杂缝网流动与微观机理方面具有独特优势。嵌入式离散裂缝模型(EDFM)适用于宏观缝网流动与产能预测; 扩展有限元法(XFEM)擅长模拟裂缝扩展与应力演化; CFD-DEM 耦合方法可精细刻画支撑剂运移、嵌入与破碎过程; 格子玻尔兹曼方法(LBM)则适于模拟支撑剂孔隙内的流动。然而, 现有模拟在“化学-力学-流动”全耦合、支撑剂非均匀铺置动态演化, 以及模型现场验证方面仍存在明显不足。

(4) 未来发展趋势, 应聚焦于多尺度、多场耦合的模型构建, 推动 EDFM/XFEM 与 CFD-DEM/LBM 等方法融合, 发展人工智能代理模型以提升计算效率, 并融合地质、测井与监测数据构建真实三维地质力学-流动耦合模型, 从而实现深层页岩气压裂裂缝导流能力的精准预测与优化控制。

基金项目: 重庆市大学生科技创新训练项目《深层页岩气压裂裂缝变形机理及模型研究》, 项目编号: S202511551061。

[参考文献]

[1]吴建发,樊怀才,张鉴,等.页岩人工裂缝应力敏感性实验研究——以川南地区龙马溪组页岩为例[J].天然气工业,2022,42(2):71-81.
[2]刘学伟.页岩储层水力压裂支撑剂裂缝导流能力影响因素[J].断块油气田,2020,27(3):394-398.
[3]王欣桐,吕照,施雷庭,等.吉木萨尔页岩油藏人工裂缝导流能力动态变化规律[J].科学技术工程,2022,22(1):136-141.
[4]陈浩,高帅强,吴天鹏,等.支撑剂回流对页岩人工裂缝导流能力影响试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2024,48(1):142-149.
[5]袁旭,许冬进,陈世海,等.压裂液侵入对页岩储层导流能

- 力伤害[J].科学技术与工程,2020,20(9):3591-3597.
- [6]吴国涛,胥云,杨振周,等.考虑支撑剂及其嵌入程度对支撑裂缝导流能力影响的数值模拟[J].天然气工业,2013,33(5):65-68.
- [7]Li,Kewen, Gao, et al. New Mathematical Models for Calculating Proppant Embedment and Fracture Conductivity[J].SPE Journal,2015,20(3):496-507.
- [8]张晗.四川盆地龙马溪组页岩储层缝网导流能力优化[J].天然气地球科学,2019,30(7):955-962.
- [9]侯腾飞.页岩储层复杂裂缝支撑剂非均匀分布规律及导流能力研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- [10]陈冬,王楠哲,叶智慧,等.压实与嵌入作用下压裂裂缝导流能力模型建立与影响因素分析[J].石油钻探技术,2018,46(6):82-89.
- [11]陈铭,张士诚,柳明,等.水力压裂支撑剂嵌入深度计算方法[J].石油勘探与开发,2018,45(1):149-156.
- [12]朱海燕,刘英君,王向阳,等.考虑支撑剂颗粒破碎的页岩分支裂缝导流能力[J].中国石油大学学报(自然科学版),2022,46(1):72-79.
- [13]徐加祥,丁云宏,杨立峰,等.基于格子—玻尔兹曼方法的裂缝导流能力流固耦合[J].大庆石油地质与开发,2020,39(4):94-100.
- [14]彭越.页岩气藏裂缝扩展及产能预测数值模拟研究[D].北京:中国地质大学(北京),2024.
- [15]高庆庆.页岩支撑裂缝导流能力的离散元流固耦合数值模拟研究[D].四川:西南石油大学,2019.
- 作者简介:黎文昊(2004—),男,汉族,重庆大足人,本科在读,重庆科技大学,研究方向:采油工程。

化工管道系统的防腐蚀设计与应用

王海城

河北英科石化工程有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]化工管道作为化工生产流程的核心载体, 输送介质多具有强腐蚀性、高温高压等特性, 腐蚀问题直接影响系统运行安全性、稳定性与经济性。文章基于化工管道腐蚀的机理与影响因素, 从设计源头出发, 系统阐述防腐蚀设计的核心原则, 详细介绍材料选择、结构优化、涂层防护、电化学保护等关键设计技术, 结合工程应用中的质量控制要求, 构建全方位的防腐蚀设计体系, 为化工管道系统的长周期安全运行提供技术支持。

[关键词]化工管道; 防腐蚀设计; 材料选择; 涂层防护; 电化学保护

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18619

中图分类号: TQ630.79

文献标识码: A

Anti-corrosion Design and Application of Chemical Pipeline System

WANG Haicheng

Hebei Enco Petrochemical Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As the core carrier of chemical production processes, chemical pipelines transport media with strong corrosiveness, high temperature and high pressure characteristics. Corrosion problems directly affect the safety, stability and economy of system operation. Based on the mechanism and influencing factors of corrosion in chemical pipelines, this article systematically elaborates on the core principles of anti-corrosion design from the design source, and details key design technologies such as material selection, structural optimization, coating protection, and electrochemical protection. Combined with quality control requirements in engineering applications, a comprehensive anti-corrosion design system is constructed to provide technical support for the long-term safe operation of chemical pipeline systems.

Keywords: chemical pipeline; anti-corrosion design; material selection; coating protection; electrochemical protection

引言

化工业在国家经济中占有举足轻重的地位, 而化工管道是石油、天然气、化工原料等的运输保障, 其运行状态直接关系到整个生产装置的连续性和安全性^[1]。但该类管线长期处于高温、高压、高湿、化学介质等苛刻条件下, 极易发生损伤, 严重影响其服役寿命与安全。且化工行业输送介质多样, 含盐溶液、强酸等, 且多在高温高压高流速下输送, 易致化工管道腐蚀失效, 使管壁减薄、强度下降, 甚至会引发安全事故的发生概率, 对企业的安全生产及经济效益造成了极大的挑战^[2]。因此, 本文研究首先阐述化工管道腐蚀发生原因, 并逐步深入到技术方案及质量控制, 形成完整的防腐蚀设计应用体系。

1 化工管道腐蚀发生原因

管道腐蚀的原因很多, 除了石油天然气的腐蚀外, 还包括外部环境中的 H_2S 、 CO_2 以及土壤中的 H_2S 和 CO_2 , 以及焊缝开裂、残余应力等^[3]。首先, 油管的作用就是输送石油和天然气, 这种化学品含有硫化氢和二氧化碳, 在输送过程中, 还会对管道的内壁造成一定程度的侵蚀。长时间运行后, 管壁会变得越来越薄, 进而导致泄漏, 最终导致爆炸。由于原油为液体, 具有较高的粘度, 可以采用在管内壁上涂敷电沉积层来提高输送效率, 但是随着时间

的流逝, 涂层表面会出现剥落现象, 在油气流过程中会形成静电, 加之外界环境因素的影响, 会导致管线的腐蚀^[4]。其次, 在建设过程中, 管道多采用焊接方式, 法兰连接部位因人为因素和外部影响而出现缝隙, 造成焊缝中出现大量气泡。这样, 在焊接过程中, 土壤中的水分和化学物质会和裂纹发生化学反应, 从而导致裂纹的出现。此外, 油气管道内的残余应力、外加应力等因素, 极易发生应力腐蚀, 造成管道的变形与失效。管道内金属物质的体积变化或管道内金属材料冷却不均匀, 管道在施工时受力不均, 也会产生残余应力, 从而使材料损坏而无法使用。

2 化工管道系统防腐蚀关键设计技术

2.1 材料选择设计

(1) 金属材料选择

金属材料因性能良好, 在化工管道应用广泛, 常用有碳钢、低合金钢、不锈钢、铜合金、钛合金等。碳钢和低合金钢成本低、强度高、加工性好, 但耐蚀性差, 适用于低风险管道。不锈钢耐蚀性好, 分奥氏体不锈钢(如 304、316L, 适于中高风险管道)、双相不锈钢(如 2205、2507, 适于高风险管道)、铁素体不锈钢(如 430, 适于中低风险管道)。铜合金和钛合金耐蚀优异但成本高, 适于高风险特殊介质管道, 如黄铜输海水等, 钛合金强度高腐蚀性介

质, 高温高压工况优势明显。铜合金和钛合金具有优异的耐腐蚀性, 但成本较高, 适用于特殊腐蚀性介质的高风险管道。例如, 黄铜管道适用于输送海水、弱酸等介质; 钛合金管道则适用于输送强酸、强碱、含氯介质等强腐蚀性介质, 尤其在高温高压工况下具有不可替代的优势。

表 1 为常用金属管道材料的耐腐蚀性及适用范围对比

材料类型	代表牌号	耐腐蚀性	适用范围
碳钢	Q235	差, 易发生电化学腐蚀和化学腐蚀	常温常压、惰性介质或弱腐蚀性介质 (如水、氮气)
低合金钢	16Mn	较差, 耐蚀性略优于碳钢	中低压、常温或中温的水蒸气、天然气等介质
奥氏体不锈钢	316L	良好, 耐弱酸、弱碱、含氯介质腐蚀	中高温、中高压的弱酸、弱碱、含氯介质
双相不锈钢	2205	优异, 耐点蚀、应力腐蚀开裂能力强	高温高压、高浓度氯离子介质
钛合金	TA2	极佳, 耐强酸、强碱、含氯介质等强腐蚀	高温高压、强腐蚀性介质 (如盐酸、硫酸、烧碱)

(2) 非金属材料选择

非金属材料具有诸多优点, 如耐腐蚀、重量轻、成本低, 适于输送强腐蚀性介质的管道, 但是其耐高温性能与力学性能不高, 使用过程中主要应用于中低压、常温管道, 常用有塑料、玻璃钢、陶瓷等。塑料管道中, 聚氯乙烯(PVC)耐酸碱、成本低, 于输送常温强酸、有机溶剂等介质; 聚丙烯(PP)耐化学腐蚀和高温(最高 100°C), 适输中温弱碱、有机溶剂等介质; 聚四氟乙烯(PTFE)耐腐蚀极佳、耐高温(最高 260°C), 适输高温、强腐蚀介质, 但成本高、加工难。玻璃钢管道由玻璃纤维和树脂复合, 耐腐蚀等性能良好, 重量轻、安装方便, 广泛应用于多行业, 按树脂分有环氧(适常温)、酚醛(适高温)等。陶瓷管道耐腐蚀和耐磨性极高, 适输强腐蚀高磨损介质, 但脆性大、抗冲击差, 易破损, 适用于固定工况下的高风险管道。

2.2 结构优化设计

(1) 管道布置优化

管道布置要避免形成滞留区、涡流区和死腿, 确保介质顺畅流动。尽量少用弯头、三通等局部阻力部件, 使用直管进行布置; 必须用弯头时, 优先选大曲率半径弯头(如长半径弯头); 合理设管道坡度(一般 ≥ 0.002), 确保介质可以排尽, 防在管道底部形成积液滞留区。同时, 避免管道盲端等部位形成死腿, 无法避免时设冲洗或排污口, 定期冲洗, 防止腐蚀性介质积聚, 降低局部腐蚀风险。

(2) 连接方式优化

管道连接方式影响连接部位腐蚀风险, 优先选焊接, 其密封性好, 可减少介质泄漏与腐蚀; 避免用螺纹和法兰连接, 密封面易泄漏且存在缝隙, 易引发缝隙腐蚀。必须用法兰连接时, 要选耐腐蚀的法兰材质和密封垫片, 确保密封性。不同金属管道连接应用绝缘或过渡接头, 防止形

成电偶腐蚀。

(3) 几何形状优化

管道几何形状宜平滑, 避免尖锐棱角与截面突变, 以减少介质流速突变和压力集中。如管道的变径处用渐缩或渐扩管; 内壁尽量光滑, 降低表面粗糙度, 减少腐蚀性介质吸附滞留。对于输送含固体颗粒介质的管道, 应适当增大内径、降低流速, 减少冲刷腐蚀, 还可在内壁设耐磨衬里(如橡胶、陶瓷衬里)以提升抗冲刷腐蚀能力。

2.3 涂层防护设计

(1) 涂层材料选择

涂层防护是在管道表面涂耐腐蚀涂层, 隔开金属基体与腐蚀介质来防腐, 具有施工方便、成本低、适用广等优点, 是化工管道常用防腐措施。涂层材料选型需依介质特性、工况及腐蚀风险等级, 确保其耐腐蚀、附着力、耐磨、耐高温性能良好。

目前, 国内已有的钢管内壁防腐涂料分为焙烧型和常温两种, 其中, 在焙烧型防腐涂料中, 双酚 A 型环氧树脂具有更高的高温抗酸性能^[5]。且环氧树脂具有良好的黏结性, 具有较高的强度、温度。对于常温固化的耐酸防腐涂料来说, 酚醛型树脂通过氧化形成多官能环氧树脂, 而酚醛基改性的氨基作为固化剂, 其结构规整致密, 腐蚀性物质难以渗入, 从而使其耐腐蚀性得到最大程度的发挥。

(2) 涂层厚度设计

涂层厚度是影响涂层防护效果的关键, 过薄易现针孔等缺陷致腐蚀, 过厚增加成本且易产生裂纹等问题。其设计需依介质腐蚀性、工况及涂层材料性能确定, 室内管道涂层厚 150~200 μm , 户外 200~300 μm , 埋地 300~500 μm 。高腐蚀风险管道可用“底漆+中间漆+面漆”多涂层体系, 底漆增强附着力, 厚 30~50 μm ; 中间漆增厚厚度、提耐蚀性, 厚 100~200 μm ; 面漆装饰抗老化, 厚 20~50 μm , 总厚度高风险管道不小于 300 μm 。

(3) 施工工艺设计

涂层施工工艺影响质量和防护效果, 施工须严格按规范分表面处理、涂覆施工、固化养护三环节进行。表面处理是基础, 旨在去除管道表面油污等杂质, 提升涂层与基体附着力, 常用方法有喷砂、抛丸、酸洗等, 喷砂效果最佳, 可形成 40~80 μm 均匀粗糙度, 显著提升附着力, 处理后表面应达 Sa2.5 级或更高等级。涂覆施工要依涂层材料特性选方法, 常用刷涂、滚涂、喷涂。刷涂和滚涂适合小型管道或局部修补, 方便但涂层厚度不均; 喷涂适合大型管道或批量施工, 厚度均匀、效率高。涂覆时要控速度和厚度, 防针孔等缺陷。固化养护是关键, 不同材料固化条件不同, 按要求控温、控时, 固化中防管道受损, 完全固化后再投入使用。

2.4 电化学保护设计

电化学保护是基于电化学反应原理对化工管道进行保护的重要方法, 其核心思路是将管道设定为负极, 以此

来阻止管道发生腐蚀的电化学反应^[6]。在实际应用中,阴极保护主要有强制电流和牺牲阳极两种方式。

强制电流法的工作原理基于外加电场的作用,通过外部电源向管道施加稳定的直流电流,使管道始终处于阴极状态,确保整个电极系统处于常压之下,形成一个完整的电流回路。在这个回路中,电子持续流向管道,避免了管道金属因失去电子而发生电化学腐蚀。这种方法就像是为管道提供了源源不断的电子补给,使其在面对腐蚀环境时始终保持稳定的化学状态。强制电流法适用于长距离、大口径的管道,以及土壤电阻率较高的区域,能够提供强大且稳定的保护电流,有效延长管道的使用寿命。牺牲阳极技术则是利用一种具有高还原性的物质,通常是金属,与被保护的管道连接,形成一个完整的电化学结构。在这个结构中,高还原性金属作为阳极,优先发生氧化反应,不断失去电子,而管道作为阴极得到保护。例如,常用的镁合金、锌合金等作为牺牲阳极材料,具有较高的电位差,能够提供足够的驱动力,使电子从阳极流向阴极,从而实现管道的有效保护。牺牲阳极技术具有安装简单、无需外部电源、对周边环境干扰小等优点,适用于小型管道、复杂地形或对电流干扰敏感的区域。

3 化工管道防腐蚀设计的质量控制

3.1 材料质量控制

防腐蚀设计的效果不仅取决于设计方案的合理性,还取决于施工过程和运行维护过程的质量控制。因此,建立完善的质量控制体系,对防腐蚀设计的全生命周期进行管控,是确保防腐蚀效果的关键。施工是防腐蚀设计落地的关键,施工质量直接影响防腐蚀效果。防腐蚀相关材料(如管道、涂层、牺牲阳极、辅助阳极等)进场前须严格质检,确保性能符合设计要求,检验涵盖外观、理化性能、耐腐蚀性试验等。如管道材料查化学成分与力学性能,涂层材料查固含量、粘度等,牺牲阳极查化学成分与电化学性能。不合格材料严禁进场使用。

3.2 施工质量检测

施工需全程质量检测,及时整改缺陷。常用检测方法有:涂层厚度用测厚仪测,确保达标;附着力用划格或拉开试验,保证与基体结合良好;针孔用电火花检测仪查有无破损;焊缝用射线或超声波无损检测,确保质量合规;电化学保护系统用参比电极监测电极电位,保证保护电位合理。

3.3 腐蚀状态监测

需建立完善腐蚀状态监测体系,定期监测管道腐蚀情况。常用方法有:外观检查,定期查看管道表面涂层有无脱落等缺陷及管道有无泄漏、结垢;壁厚测量,用超声波测厚仪定期测壁厚、算腐蚀速率、判剩余寿命;腐蚀速率监测,用腐蚀挂片、电阻探针等设备实时监测;电化学电位监测,通过参比电极实时监测电极电位,确保电化学保

护系统正常运行。

3.4 定期维护保养

依据腐蚀监测结果制定合理定期维保计划,及时保养管道。涂层破损脱落应及时修补,保证完整;电化学保护系统要定期检查牺牲阳极消耗、辅助阳极性能及外部电源运行状态,及时换件、调保护电流或电位;结垢堵塞管道需定期清洗;运行工况参数波动频繁的管道,应优化控制,减少影响。

3.5 应急处理

建立完善应急处理机制,针对腐蚀引发的管道泄漏、破裂等突发事故制定应急预案,涵盖应急组织、响应流程、处置措施及物资储备等,确保能及时采取有效措施减少损失。同时,定期组织应急演练以提升应急处置能力。

4 结论与展望

金属腐蚀具有普遍、自发、隐蔽等特点,其种类繁多,且随着腐蚀介质的不断更新,金属材料的种类越来越多,其种类也越来越多。然而,任何一种锈蚀分级方法,其目的在于从多个层面对锈蚀现象的表现形态、特征、规律及机理等进行刻画,从而对锈蚀现象与规律进行阐释、分析与研究,从而找到预防锈蚀的措施与方法。化工管道系统腐蚀影响生产安全、稳定与经济运行,防腐蚀设计是抑制腐蚀失效的根本。本文基于腐蚀影响因素分析,阐述材料选择、结构优化等关键设计技术,强调施工与运维质量控制,形成全方位防腐蚀体系,提升管道防腐蚀能力、减少局部腐蚀风险。随着化工行业向“三高一大”发展,腐蚀环境更苛刻,对防腐蚀技术要求更高。未来,可结合物联网等先进技术开发智能化电化学保护系统,实现保护参数自动调节,并建立管道腐蚀在线监测预警系统,实现智能化防腐蚀管控。

[参考文献]

- [1]易顶珍.化工管道防腐蚀技术的应用和改进研究[J].中国设备工程,2023,11(15):174-177.
- [2]杨冰.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(16):159-160.
- [3]刘彦丽,李莉,孙爱军,等.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].化工管理,2019,11(7):158.
- [4]李崇娟.油气集输管线防腐蚀技术研究与应用[J].设备管理与维修,2023,11(18):187-188.
- [5]吕良辰.油气储运中的管道腐蚀成因与防治探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(18):37-39.
- [6]马波.化工设备防腐蚀技术研究[J].设备管理与维修,2023,11(20):155-157.

作者简介:王海城(1994.11—),毕业院校:河北工业大学城市学院,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:河北英科石化工程有限公司,职务:工艺设计,职称级别:中级工程师。

化工过程自动化控制系统的本质安全设计与容错能力提升

黄云飞

泛华保险公估股份有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 化学工业作为国民经济重要支柱产业,与经济社会发展和人民生活息息相关。化工生产原辅料种类繁多、生产工艺复杂,涉及高温高压、易燃易爆、有毒有害等诸多危险因素,一旦失控发生安全事故,往往造成重大人员伤亡和财产损失,引发严重环境污染和社会影响。本质安全设计通过从源头消除或降低风险,容错能力提升则实现系统在故障工况下的风险可控,二者共同构成化工过程自动化控制系统安全保障体系的核心。文章基于本质安全理论与容错控制原理,对化工过程自动化控制系统的本质安全设计内涵与核心原则进行阐述,从故障检测与诊断、冗余配置优化、容错控制策略构建三个维度搭建容错能力提升的技术路径,以供参考。

[关键词] 化工过程; 自动化控制系统; 本质安全设计; 容错能力; 风险管控

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18604

中图分类号: TQ086

文献标识码: A

Inherent Safety Design and Fault Tolerance Enhancement of Chemical Process Automation Control System

HUANG Yunfei

Hebei Branch of Fanhua Inc., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: As an important pillar industry of the national economy, the chemical industry is closely related to economic and social development and people's lives. There are various types of raw materials and complex production processes in chemical production, involving many dangerous factors such as high temperature and high pressure, flammability and explosiveness, toxicity and harm. Once out of control, safety accidents often occur, causing significant casualties and property losses, leading to serious environmental pollution and social impact. Intrinsic safety design eliminates or reduces risks from the source, while improving fault tolerance enables the system to control risks under fault conditions. The two together form the core of the safety assurance system for chemical process automation control systems. Based on the theory of intrinsic safety and the principle of fault-tolerant control, this article elaborates on the connotation and core principles of intrinsic safety design for chemical process automation control systems. It constructs a technical path for improving fault-tolerant capabilities from three dimensions: fault detection and diagnosis, redundant configuration optimization, and fault-tolerant control strategy construction, for reference.

Keywords: chemical process; automated control system; inherent safety design; fault tolerance capability; risk control

引言

化工行业是国民经济的支柱产业,但其生产过程涉及大量危险化学品和极端工艺条件,具有事故发生率高、后果严重等特点。据统计,全球化工行业重大安全事故中,约45%与自动化控制系统故障或设计缺陷相关。化工生产本质在于通过一系列化学反应和物理过程,将原料转化为具有特定性质的目标产品,同一产品往往存在多种工艺路线可供选择,不同工艺路线在原料组成、反应条件、生产流程等方面存在较大差异,从而影响化工装置固有安全水平。随着工业4.0技术的深度融合,化工过程自动化控制系统朝着集成化、智能化、复杂化方向发展,其安全设计的核心已从“被动防护”转向“主动预防”,本质安全设计与容错能力提升成为解决化工过程安全问题的关键突破口。本质安全理念起源于20世纪60年代的工业安全领域,核心思想是通过设计消除或减少危险源,使系统在本质上具备安全属性,即使发生人

为失误或设备故障,也不会导致事故发生。将该理念应用于化工过程自动化控制系统,需在系统设计阶段充分考量化工过程的风险特性,通过硬件选型、软件架构设计、控制逻辑优化等手段,从源头降低系统故障概率与故障后果严重程度。容错能力作为本质安全设计的延伸与补充,聚焦于系统发生故障后的风险管控,通过一系列技术措施使系统在局部故障工况下仍能维持核心功能正常运行,避免故障扩大化。

目前,关于化工过程自动化控制系统安全的研究多集中于故障诊断算法优化、单一设备的安全设计等局部领域,缺乏对本质安全设计与容错能力提升的系统性整合分析。本文立足化工过程的全流程风险特性,构建本质安全设计与容错能力提升的一体化分析框架,先明确本质安全设计的核心要素与实现路径,再针对性提出容错能力提升的技术方案,旨在为提升化工过程自动化控制系统的全生命周期安全性能提供理论指导。

1 化工过程自动化控制系统的本质安全设计内涵与核心原则

化工过程自动化控制系统本质安全设计,是在系统规划至研发阶段,识别化工危险源(如物料状态、生产工艺参数偏差等),结合系统特性(传感器等组件),用技术从源头消除危险源或降低风险。其核心是“源头规避、过程抑制、风险可控可防”。通过精准的选型以及系统架构优化,从源头上消除潜在的设计缺陷,采用冗余控制逻辑,增强系统运行的稳定性与容错能力,合理选用传感器,从硬件层面确保系统的安全。在系统运行的过程中,通过借助自适应算法动态调整各个参数以满足不同工况下的运行实际需求。在风险可控层面,当系统出现异常时可以自动切换至安全模式,同时具备故障隔离功能,保障人员与设备安全。化工过程自动化控制系统的本质安全设计应该严格遵循最小风险、简化性、兼容性、可追溯性的核心原则。

3 化工过程自动化控制系统关键组成部分的本质安全设计

3.1 传感器的本质安全设计

在化工控制系统中,传感器主要负责采集化工过程中的压力、温度等各个参数。其可靠性与精确度与安全性能与控制效果有着直接的影响。以化工过程的危险等级为依据,合理选择传感器,从源头上保障监测的安全性与可靠性,与此同时选择本质安全型信号电缆进行电信号传输。对于远距离的信号传输建议采用数字化传输方式,确保在长距离传输过程中信号不衰减,并且配置过压、过流保护装置为整个传输系统的稳定运行提出保障。值得注意的是,传感器的安装位置要严格避开高压高温强腐蚀等危险区域,以防影响传感器的性能,缩短其使用寿命。

3.2 执行器的本质安全设计

执行器主要是根据控制器的指令对工艺参数进行调整,其可靠性与精确性对化工过程的稳定性有着直接的影响。实际运行过程中,执行器面临着诸多的潜在风险,会造成严重的化工生产事故。基于此,应该充分考虑本质安全型驱动装置,建立采用气动执行器,从源头上降低事故的发生风险。为了确保执行器的动作精准性,运用定位器进行优化,采用模块化设计理念对执行器进行设计,以便在出现故障时能够第一时间进行更换或维修。同时要关注执行器的密封性能,应该根据实际工况情况合理选择密封材料。

3.3 控制器的本质安全设计

控制器负责接收传感器的测量信号、执行控制算法、向执行器发出控制指令,为了确保控制器能够适应各种复杂工况采用冗余设计理念选用工业级高可靠性硬件组件进行构建设置多重保护装置。在控制算法方面选用经过大量实践验证的可算方法,以此确保系统的精准控制。在软件层面融入先进的故障检测报警逻辑实时捕捉系统运行过程中的异常情况发出警报,软件编程采用模块化设计方

法。人机界面简洁直观,操作权限实施分级管理,实时显示关键参数与运行状态。

3.4 通信链路的本质安全设计

通信链路是自动化控制系统信息传输的桥梁,优先选本质安全型通信介质(如光纤、本质安全型电缆),远距离通信采用光纤替代电缆;合理选规格型号以适应化工极端环境。选择符合工业安全标准的通信协议(如 IEC 61158、IEC 61784),用加密技术(如 AES 加密)处理数据,协议中加强数据校验机制。采用分布式网络架构,设通信冗余链路,主链路故障自动切换,设置防火墙与入侵检测系统,防止出现通信故障。

4 化工过程自动化控制系统容错能力提升路径

4.1 故障检测与诊断技术优化

在化工过程自动化控制领域过程中,通过对系统故障类型故障的程度进行精准识别对于实现高效的容错控制具有重要意义。鉴于化工生产过程的复杂与多变性,或采用单一参数进行检测,容易出现漏判或误判的情况,对故障处理的有效性与及时性有严重影响。尽于此,引入智能算法构建故障诊断模型,基于强大的数据处理能力,精准定位故障发生的具体位置并对故障的严重程度进行评估。

4.2 冗余配置优化

冗余配置作为提升系统容错能力的重要手段,通过部署备用组件或冗余链路,构建起多层次的故障防御体系,在运行过程中出现故障时系统能够通过备用组件维持核心功能的正常稳定运行。在关键工艺参数监测环节采用多传感器冗余配置方式对关键工艺参数进行多点测量,借助先进的数据融合算法综合处理多元测量的数据,提高测量数据的精准性与可靠性。在控制层架构设计中采用多机冗余配置或双机热备份的方式,主控制器与备用控制器通过高速数据总线实时同步运行数据构建起镜像化的控制体系,当主控制器突发故障时备用控制器能够依托预先同步的运行数据能够在毫秒级时间内无缝切换,以此确保控制过程的连续性,确保工艺过程的平稳进行。

4.3 容错控制策略构建

容错控制策略作为提高系统容错性能的主要核心手段,通过设计的控制算法以及逻辑结构可以确保系统在故障工作下自动调整控制策略的能力,从而确保系统的稳定运行。当系统检测到传感器发生故障时,主动容错控制策略以故障诊断模块输出的精准结果为依据对故障传感器的具体类型以及故障严重程度进行精准的判定。随后,该策略可以充分利用其他正常传感器的实时测量数据以及系统预先构建的精准模型生成全新的控制指令,维持核心功能正常运行。主动容错控制策略的实施主要依赖于精确的系统模型,对故障诊断的精准性提出了较为严格的要求。混合容错控制策略融合了被动容错控制与主动容错控制的优势形成了一套更为完备的故障应对机制,基于故障的

类型,合理选择容错控制方式。对于在工况中较为常见的故障,为了提高响应速度,建议采用被动容错控制策略。反之,对于发生率较低、成因复杂的罕见故障,建议采用主动容错控制方式,提高容错能力,线路故障的有效隔离,快速恢复系统的性能。

5 本质安全设计与容错能力提升的协同优化

在化工过程自动化控制系统的安全保障体系中,本质安全设计与容错能力的提升尤为关键,两者相互补充,能够从源头上预防故障的发生风险,从而提高化工过程自动化控制系统的安全性能,确保化工生产稳定安全进行。

该系统的设计阶段应该充分考量本质安全设计与容错能力提升的需求进行统筹考量与综合规划,在本质安全设计方案中融入容错能力使两者形成一个有机的整体。另外采用风险矩阵法、事件树分析法(ETA)、故障树分析法(FTA)等风险评估方法准确识别潜在的风险点,并找出故障的根本原因与关键点,为后续的优化改进方案提供有力支持。在系统的运行过程中,应该借助先进的监测设备与传感器实时监测与采集系统运行过程中的各项参数,对本质安全设计的实际有效性进行评估,同时深入分析系统的运行状况。采取针对性的措施,不断完善设计方案,例如增加冗余配置、更换性能更优的设备原器件等,全方位提高系统的安全性能。在系统的维护阶段制定科学合理的检查计划方案,检查电器的性能,通信的连接,加强完善维护记录与故障档案,全面记录冗余组件的维护历史和故障情况,以便为后续的故障排障以及维护决策方案的制定提供有力的参考。全生命周期的协同优化贯穿于整个流程阶段形成一个闭环的管理体系,可以确保系统的安全性能适应化工过程的工况变化,能够有效应对各种故障和风险。

6 化工过程自动化控制系统的保障措施

化工过程自动化控制系统要以工艺危害分析和风险评估为基础,科学确定安全功能和安全完整性等级,选用高可靠性、故障安全的仪表设备,合理设计安全功能逻辑和动作时序,确保安全功能的可靠执行。一要与基础控制系统和紧急停车系统实现功能协调、逻辑清晰的联动,避免逻辑错误和功能遗漏。二要建立完善的安全状态监测和故障诊断机制,实时掌控化工过程自动化控制系统的健康状况,及时发现和排除潜在隐患。三要加强化工过程自动化控制系统的功能测试和性能评估,定期开展安全完整性等级复核,持续提升系统的安全性和可靠性。四要完善化工过程自动化控制系统的管理制度和操作规程,加强人员培训和应急演练,确保化工过程自动化控制系统优化成果落地见效。

7 结论与展望

7.1 结论

化工过程自动化控制系统在化工生产领域中可以确保生产的连续性、产品的质量、人员安全。本质安全设计

作为一种预防性前瞻性的安全利益,在设计过程中应该严格遵循一系列科学的原则,充分考量深度融合系统设计过程中的每一环节,将故障风险控制在最小化。容错能力提升是在本质安全设计的基础上增强系统应对事故的能力,通过实施冗余配置优化、容错控制策略构建等能够实现故障过程中的风险可控以及系统安全稳定运行。本质安全设计与容错能力提升的协同优化源头上降低故障的发生风险,能够最大化提升系统的安全性能,推动化工行业向高效、安全的方向发展。

7.2 展望

但随着智能化技术的持续发展与深度扩展,在化工过程自动化控制体系的设计过程中融入智能化技术,充分利用大数据、人工智能等智能技术推进本质安全设计的智能化与自动化。借助先进的机器学习算法,深度挖掘化工过程中的海量数据,并进行分析,对潜在的风险点精准识别,同时可优化安全设计策略,可实现化工过程自动化控制系统的本质安全水平,而且可以提高设计的效率。同时在后续研究中开发具备自适应能力强的容错控制算法,以实际工况变化为依据合理调整。三是数字化孪生方向,构建化工过程自动化控制系统的数字化孪生模型,通过虚拟仿真验证本质安全设计的有效性,降低实际系统的测试成本与风险。在研究工作中应该紧密围绕上述方向进行开展,持续探索创新,进一步增强化工过程自动化控制系统的安全性,推动化工行业的安全、绿色、高效发展。

[参考文献]

- [1]赵学刚,唐世慧.优化化工安全设计在预防事故中的作用与建议[J].劳动保护,2024(7):98-100.
- [2]陈红.化工安全设计在预防化工事故发生中的作用[J].当代化工研究,2024(10):185-187.
- [3]付新星,程森.化工安全设计在预防事故中的作用探讨[J].化工安全与环境,2023(6):31-33.
- [4]张刚.关于化工安全设计在预防化工事故中的重要作用[J].轻工科技,2023(2):85-87.
- [5]沈雷雷,曾伟.化工安全设计在预防化工事故发生中的作用及实施策略[J].化工管理,2022,11(32):87-89.
- [6]刘晋,任晋楠,蒋晋晋,等.化工工艺安全评价指标体系的灰色关联度分析模型优化[J].安全与环境工程,2024,31(2):44-50.
- [7]赵新梅,冯金,潘婷娟.化工工艺的风险识别与安全评价研究[J].石油石化物资采购,2024(9):46-48.

作者简介:黄云飞(1982.6—),毕业院校:河北科技大学,所学专业:药学,当前就职单位:泛华保险公估股份有限公司河北分公司,职务:安全工程师,职称级别:中级注册安全工程师。

工业园区“废水-废气-固废”循环利用技术模式及低碳转型

王斌

河北嘉环环保科技有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]在工业园区迈向低碳转型的进程中,其“废水-废气-固废”(以下简称“三废”)的高效处置以及循环利用占据着重要的地位,是实现低碳转型的核心关键。文章研究基于相关前沿理论,构建了工业园区“三废”循环利用技术体系的完整框架。在此基础上,提出基于全生命周期理念的具有针对性和可操作性的低碳转型优化策略,旨在为工业园区的低碳发展提供坚实参考。

[关键词]工业园区;三废循环利用;技术模式;低碳转型;物质流耦合

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18618

中图分类号: X327

文献标识码: A

Industrial Park's "Wastewater Waste Gas Solid Waste" Recycling Technology Model and Low-carbon Transformation

WANG Bin

Hebei Jiahuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: In the process of industrial parks moving towards low-carbon transformation, the efficient disposal and recycling of "wastewater - waste gas - solid waste" (hereinafter referred to as "three wastes") play an important role and are the core key to achieving low-carbon transformation. The article studies the construction of a complete framework for the recycling technology system of "three wastes" in industrial parks based on relevant cutting-edge theories. On this basis, a targeted and operable low-carbon transformation optimization strategy based on the full lifecycle concept is proposed, aiming to provide solid reference for the low-carbon development of industrial parks.

Keywords: industrial park; three waste recycling; technical mode; low-carbon transformation; material flow coupling

引言

改革开放以后,我国环境保护和经济增长之间的矛盾在工业发展中表现得尤为突出,“高消耗、高排放、低循环、低效率”的粗放型工业发展模式严重阻碍了我国工业在新时期的发展^[1]。工业园区是我国企业集聚发展的核心区域,也是我国实施制造业强国战略、产业转型升级的重要空间载体,其碳排放量占工业总排放量的很大比例^[2]。党的二十大报告中强调:“推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节,要加强推动能源清洁低碳高效利用,推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型”。我国工业园区在“三废”(废水、废气、固废)处置方面面临着诸多亟待解决的问题,废水循环的利用率较低,缺乏完善的再生水回用体系,导致水资源的有效循环利用受到阻碍^[3],未能实现资源的高效使用。固废综合利用率较低,资源潜力远未得到充分挖掘。目前“三废”处理过程普遍存在高能耗、高碳排放的问题,严重影响工业园区的低碳转型。鉴于此,构建一套科学、高效、可持续的“三废”循环利用技术体系尤为关键。本文研究紧密围绕“三废”处置过程中的问题与循环利用技术体系构建之间的内在关联展开深入研究,致力于构建具有创新性和可操作性的技术模式,

深入揭示其背后的运行机制,并针对性地提出切实可行的策略建议,从而为工业园区的高质量发展提供坚实有力的支撑^[4]。

1 低碳工业理论框架

低碳工业园区是以工业活动为核心,以低能耗、低污染、低排放为目标,通过系统性规划、技术创新和资源整合,在园区全生命周期(规划、建设、运营、更新)中实现“产业低碳化、能源清洁化、资源循环化、设施绿色化和智能化管理”的新型工业空间载体^[5]。其本质是通过产业结构优化、能源结构调整、技术创新应用等手段,推动工业发展与生态环境的协同共生^[6]。低碳工业园区核心特征包括:①目标导向性:以碳减排为核心目标,通过全流程(生产、运输、废弃物处理等)的低碳化设计,减少温室气体排放。②系统集成性:涵盖能源系统、产业体系、基础设施、管理机制等多维度协同优化,而非单一技术或环节的改进^[7]。③动态适应性:需根据技术进步、政策调整及市场需求持续升级低碳发展路径。

2 工业园区“三废”循环利用技术体系框架构建

基于系统性、低碳高效、适配性的原则构建“源头减量-过程控制-末端循环-协同优化”四级工业园区“三废”循环利用技术体系框架,具体结构如图1所示。

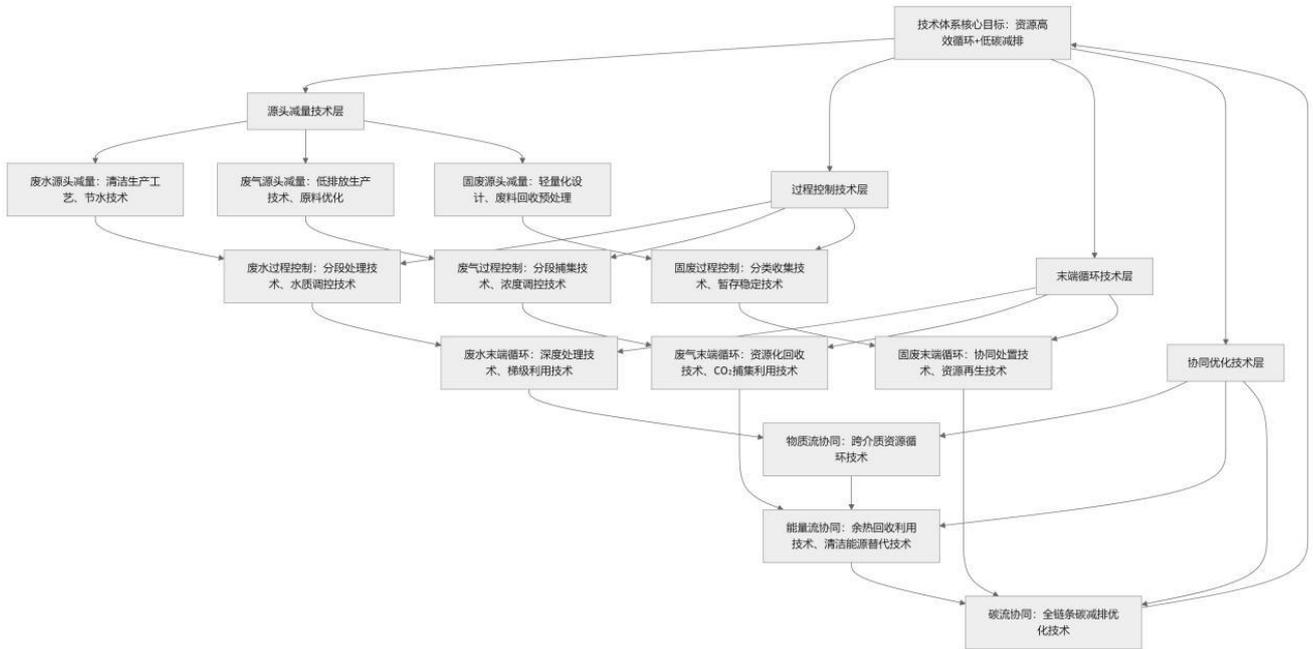


图1 工业园区“三废”循环利用技术体系框架

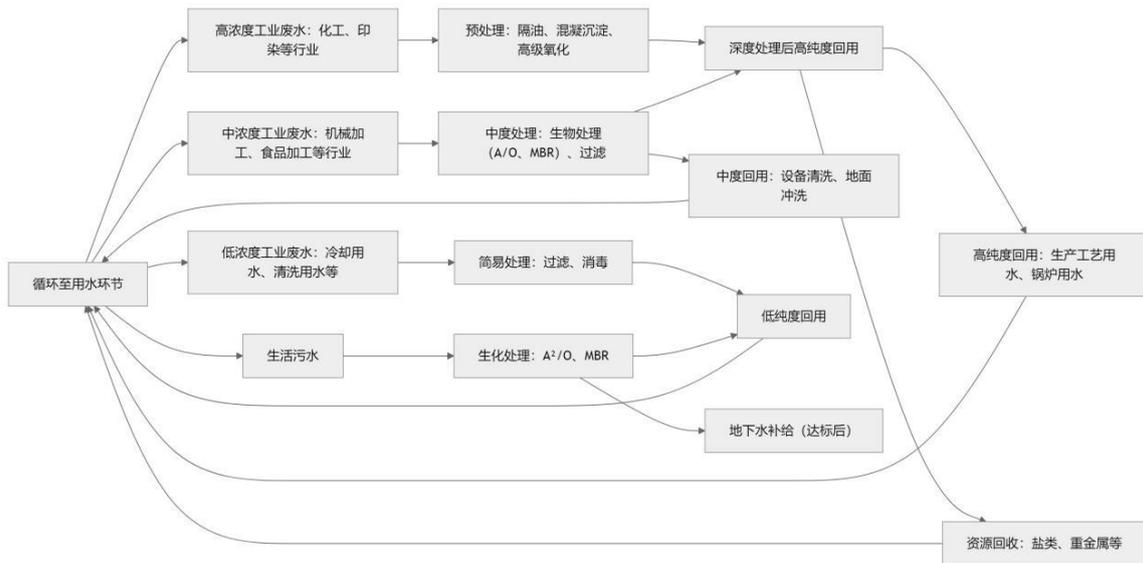


图2 废水梯级循环利用技术模式图

源头减量技术层作为整个技术体系的基石，借助节水节能技术、清洁生产工艺等先进手段从源头减少“三废”产生量，如废水治理领域，推行高效节能技术以及清洁工艺，减少废水产生量，降低污染。对于废气排放的问题，采用挥发性有机物（VOCs）含量的原料替代传统高污染原料，从而有效抑制废气中有害物质的产生。对于固体的废弃物，采用产品轻量化的设计理念，尽可能的减少原材料的使用量，降低固废产生量。降低后续处理环节所面临的压力，同时减少碳排放；过程控制技术层聚焦“三废”产生过程，运用分类收集、精准捕捉等针对性的干预措施，实施分段的精准调控，提升后续循环利用效率；末端循环

技术层依托深度处理、资源化回收等前沿技术实现“三废”中资源的高效循环再生，确保资源的最大化利用。协同优化技术层通过流量流、物质流、碳流在跨介质层面的协同优化，为整个技术体系提供了有力的保障，实现“三废”循环利用，推动工业园区低碳转型^[8]。

3 工业园区“三废”循环利用核心技术模式解析

3.1 废水梯级循环利用技术模式

废水梯级循环利用技术模式围绕“分类处理-梯级回用-资源回收”这一核心思路展开，以废水的水质差异及用水需求为依据，合理构建针对性的处理与回用路径，提升水资源利用效率并降低环境污染风险，模式如图2所示。

针对高浓度工业废水的处理,可采用“预处理-深度处理”的集成化组合工艺,在工艺体系过程中运用高级氧化技术,通过其强大的氧化能力,高效降解废水中的有机物,将其转化为易于后续处理的简单小分子物质,再用膜分离净化水质,满足工艺用水要求,实现废水中盐类、重金属等有价值资源的回收再利用。生物处理技术应用于中浓度的工业废水处理中,随后辅以精密过滤工艺进一步优化水质。针对低浓度工业废水与生活污水,采用简易过滤、消毒处理以及生化处理等综合技术手段实现循环冷却用水、绿化用水的标准要求,实现水资源的回用。该模式所展现出的低碳效益比较显著,通过减少对新鲜水资源的开采量,可以有效降低水资源开采与输送过程中的碳排放。同时,大幅削减了废水的排放总量,降低污水处理厂末端处理的能耗,减少了相应的碳排放。此外,资源回收减少了原生资源开采与加工过程中的碳排放,如,对废水中的盐类进行回收利用,可替代原生盐矿开采,降低采矿与加工过程的能源消耗及碳排放。

3.2 废气资源化循环利用技术模式

废气资源化循环利用技术以“分类捕集-精准处理-资源化回收-能源利用”为核心,依废气成分及浓度差异,用差异化技术实现污染物资源或能源回收,减少温室气体与污染物排放,模式如图3所示。

该模式所依托的核心技术涵盖 CO₂捕集利用技术、挥

发性有机化合物(VOCs)资源回收技术等,其中,对于高浓度二氧化碳废气,采用吸附、吸收或膜分离等先进方法进行高效捕集,捕集后的二氧化碳可应用于合成各类产品、食品加工等领域;若无法实现有效利用,则采取地质封存措施以确保环境安全。VOCs资源回收技术主要运用专业的捕集装置与工艺高效收集含VOCs的废气,回收后根据其成分与性质作溶剂或燃料,低浓度的VOCs废气,通过降解处理,回收降解过程中产生的热能,进而提高能源的利用效率。烟气脱硫脱硝及余热回收技术聚焦于电力、钢铁等重污染行业所排放的烟气,通过采用催化还原、化学吸收等工艺手段去除烟气中的二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x),作为优质的化肥原料^[9],同时借助高效的热交换设备,深度回收烟气中蕴含的热能,提高能源的整体利用效率。针对工业生产过程中产生的低热值废气实施低热值废气利用技术,通过精密的净化处理装置,去除其中的杂质、有害物质和颗粒物,经过净化后的低热值废气可引入专门的发电设备、也可输送至供热系统。在工业废气综合治理领域中可以减少温室气体排放,降低原生资源开采加工碳排放,减少化石能源消耗及生产碳排放^[10]。

3.3 固废协同循环利用技术模式

固废协同循环利用技术模式以“分类收集-协同处置-资源再生-能源回收”为核心,具体整合工业园区内固废的协同处置流程如下如图4所示。

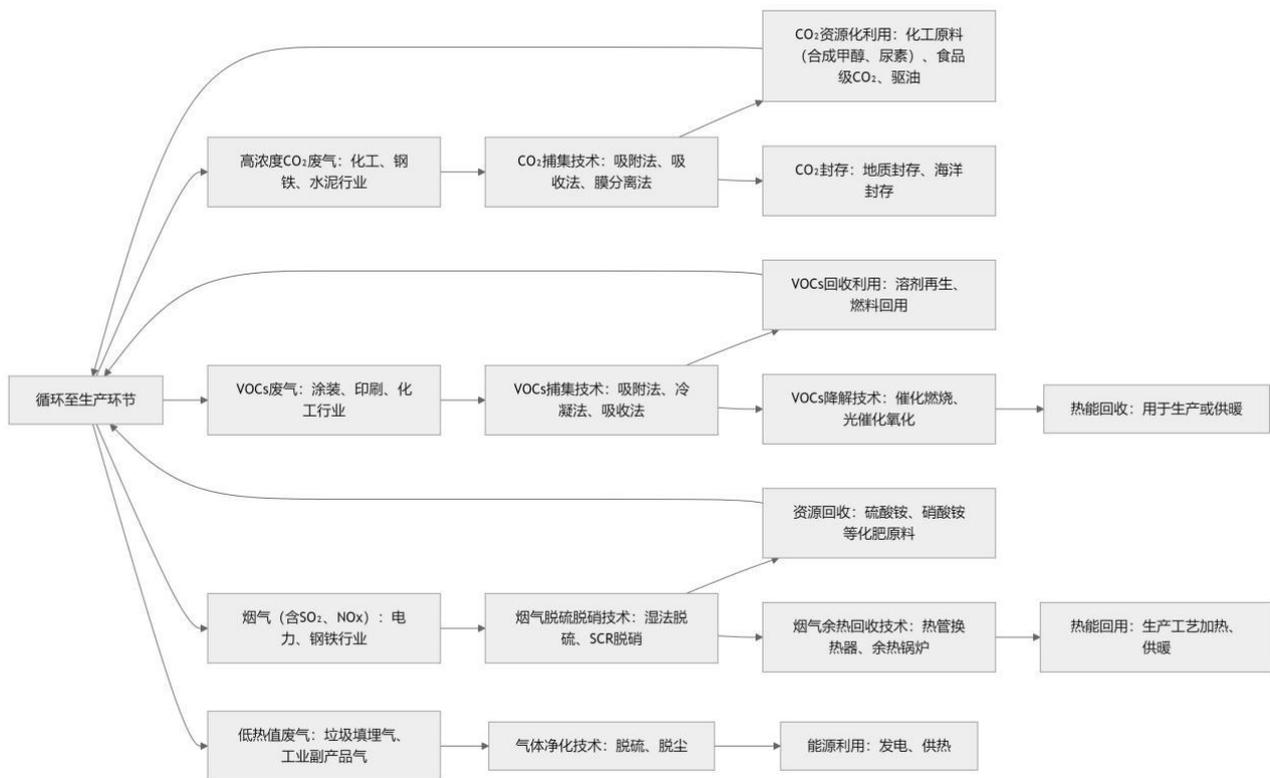


图3 废气资源化循环利用技术模式图

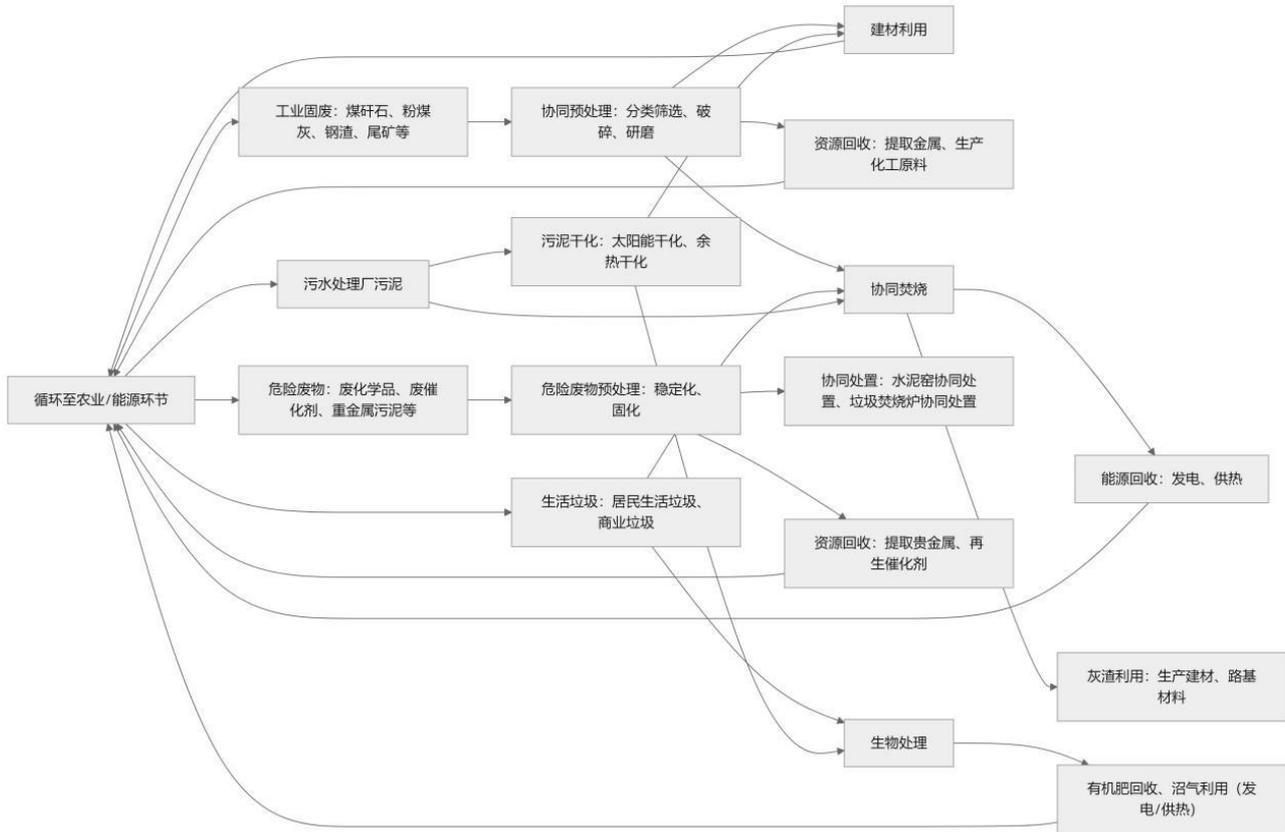


图4 固废协同循环利用技术模式图

该模式所依托的核心技术涵盖工业固废的资源化的高效利用，即对工业固废进行预处理后，将其用于建材生产或从中提取金属及化工原料。对危险废物开展预处理操作后，实施无害化处理流程，并同步实现资源的有效回收。通过协同焚烧的方式回收生活垃圾中的热能，运用生物处理技术，将其中有机成分转化为有机肥与沼气加以回收；针对污泥进行干化处理后再开展后续处置工作。该模式在低碳领域效果较为明显，削减固体废弃物的填埋量，降低填埋过程中甲烷等温室气体的排放，从源头上遏制此类气体的产生与释放。通过协同焚烧与沼气利用的有机结合实现能源回收，将固废中的可燃成分转化为热能，降低碳排放；工业固废的再利用中采用工业固废替代原生建材原料，减少了原生资源的消耗，降低了建材生产过程中的能源需求与碳排放。危险废物的协同处置模式有助于提高处理效率，降低单独处理危险废物时的能耗。

4 工业园区“三废”循环利用低碳转型优化策略

4.1 基于全生命周期的技术模式优化

以全生命周期理论为战略指引，优化“三废”循环利用技术模式，达成“源头-过程-末端”全链条低碳化运行模式。在源头环节，应用先进的低碳工艺与清洁生产技术，从源头上减少“三废”产生量及碳排放强度。于过程阶段，精准优化各类处理参数，通过精细化管理与技术创新，显著提升能源利用效率，同步降低碳排放水平；在末端处置

时，优先选用资源化回收率高、碳排放低的先进技术，强化副产品的深度循环利用，实现物质的高效闭环流动与价值最大化。构建覆盖全生命周期的碳核算体系，量化“三废”循环利用模式下的碳足迹全貌，通过系统性的分析，明确碳排放中的关键控制节点，有针对性地开展工艺优化或技术创新。如对于废水处理过程中曝气环节的高碳排放特性，可以采用清洁能源或是引入低能耗曝气技术进行电力供应，以此实现节能与减排。针对固废处理中的运输环节，通过推行就近协同处置策略，优化物流路线规划等措施，可以有效降低运输过程中的碳排放。

4.2 推动能源结构与产业结构协同优化

能源结构优化作为工业园区实现低碳转型的核心驱动力，要与“三废”循环利用协同^[11]，运用光伏发电等可再生能源技术将其作为“三废”处理设施的主要能源供给，降低对化石能源的依赖。构建多能互补的能源梯级利用系统，优先利用“三废”处理过程中回收的热能、生物质能等二次能源，并将剩余能量有序接入园区能源管网，实现能源的高效配置。在“三废”处理设施周边建分布式能源站，通过能源的就地转化与供给减少损耗。产业结构优化是提升“三废”循环利用效能、提升低碳发展效益的关键支撑，规划产业空间布局，引导关联企业集聚形成循环链，实现“三废”资源在企业间的就近利用与高效配置。同时加快淘汰高排放、高能耗的落后产能，削减污染物的产生，

推进园区绿色低碳发展。

4.3 构建数字化智慧管理平台

依托数字化与智能化技术的深度融合,构建工业园区“三废”循环利用与低碳转型的智慧化综合管理平台。构建覆盖园区全生产流程的立体化监测网络,运用物联网技术实时精准的采集“三废”排放、能源消耗、碳排放强度等关键信息。基于人工智能算法,大数据分析等智能技术开发效率评估模型、碳排放趋势预测模型及异常预警系统,依托平台智能算法,优化资源配置策略,降低园区整体碳排放水平^[12],提升废弃物循环利用率与能源使用效率。建立多维度、多层次的信息公开体系,通过平台向政府监管部门、园区企业及社会公众实时披露环境管理数据、低碳转型进展及成效,主动接受外部监督,提升园区绿色低碳发展透明度。

5 结论与展望

本文基于循环与低碳经济理论,构建“源头减量-过程控制-末端循环-协同优化”四级“三废”循环利用技术体系框架,涵盖废水、废气、固废子系统,实现资源循环与碳排放削减。解析三大核心技术模式,均有显著低碳效益。提出技术模式、能源与产业结构、数字化管理等优化策略,为工业园区提供转型路径参考。未来需加强新型技术研发应用,借鉴国际经验开展跨区域协同研究,探索适合我国国情的绿色低碳发展路径。

[参考文献]

[1]胡鞍钢.中国式绿色现代化:回顾与展望[J].北京工业大学学报:社会科学版,2023,23(6):1-18.

[2]冯钦忠,杨世童,刘俐媛,等.“双碳”目标下工业园区减污降碳协同增效路径分析与技术要求[J].环境保护科学,2023,49(3):1-7.

[3]许幸荣,刘琪,梁鹏,等.工业“零碳”园区建设路径探讨[J].信息技术,2023,17(4):63-68.

[4]王雪萌,安燕,唐昊,等.“双碳”战略目标下工业领域实施路径的研究[J].应用化工,2023,52(10):2875-2879.

[5]裴元杰,樊金龙,欧阳东,等.双碳智慧园区高效节能新型设备应用探讨[J].建筑节能(中英文),2024,52(10):122-129.

[6]贺飞燕.中国低碳工业经济的可持续性评估[J].现代工业经济和信息化,2023,13(12):200-201.

[7]陈波,石磊,邓文靖.工业园区绿色低碳发展国际经验及其对中国的启示[J].中国环境管理,2021,13(6):40-49.

[8]杜汇良.鄂尔多斯推进能源产业绿色创新发展的实践探索[J].新经济导刊,2022,11(4):50-54.

[9]马永健.零碳产业园区面临的现实挑战与空间规划应对策略[J].工程技术研究,2023,8(19):223-225.

[10]梁志蓉,杨鑫超,王姝,等.产业园区温室气体排放环评试点工作进展及建议[J].环境工程,2023,41(12):310-312.

[11]尹志芳,胡家磊,熊方,等.既有建筑零碳改造路径探索与评价[J].建筑节能(中英文),2023,51(10):32-39.

[12]张高锋.“双碳”目标下零碳园区综合能源利用潜力的研究与应用[J].建筑科技,2023,7(3):153-155.

作者简介:王斌(1993.11—),毕业院校:河北环境工程学院,所学专业:环境工程技术,当前就职单位:河北嘉环环保科技有限公司,职务:员工。

智能化在化工仪表中的应用研究

卓迪

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]伴随着化工行业的高效率、自动化的发展趋势,传统的仪表对于测量、控制、故障的应对显得有些力不从心。智能化仪表的引入给予了化工仪表强大的数据分析功能、在线监测功能和系统的升级扩展功能,提高了生产的可靠性和安全系数。文章从智能化化工仪表的概念入手,阐述了其在数据获取、故障检测、远程操控和编程灵活性的优势,并介绍了其在过程控制、集成化管理和系统性能上的应用情况。进而梳理总结了智能化技术应用于化工仪表领域的未来发展方向:提高系统可靠性、加强人工智能化程度、进一步与物联网技术和云计算技术相结合等。通过梳理现有的技术水平和未来发展方向,给化工企业的智能化仪表推广提供理论支撑和现实指导意义。

[关键词]智能化; 化工仪表; 数据处理

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18616

中图分类号: TQ056

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Automation in Chemical Instruments

ZHUO Di

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: With the development trend of high efficiency and automation in the chemical industry, traditional instruments are somewhat inadequate for measuring, controlling, and responding to faults. The introduction of intelligent automation has given chemical instruments powerful data analysis functions, online monitoring functions, and system upgrade and expansion functions, improving the reliability and safety factor of production. The article starts with the concept of intelligent chemical instruments, elaborates on their advantages in data acquisition, fault detection, remote control, and programming flexibility, and introduces their applications in process control, integrated management, and system performance. Furthermore, the future development directions of intelligent automation technology applied in the field of chemical instrumentation were summarized, including improving system reliability, enhancing the degree of artificial intelligence, and further combining with Internet of Things technology and cloud computing technology. By sorting out the existing technological level and future development direction, it provides theoretical support and practical guidance for the promotion of intelligent instruments in chemical enterprises.

Keywords: intelligent automation; chemical instrumentation; data processing

引言

在当前现代化的化学工业生产中,仪器控制系统充当着主要的检测、控制、运算单元的角色,它的准确性和稳定性关系着整个生产过程的产量、质量还有安全问题,但传统的仪器控制系统运算速率较慢,远程操控能力弱且系统的整合性不高,它不能很好的服务于复杂的化学工程所要求的智能化管控需求。而智能化的出现,给化工仪表控制系统的革新带来了新思路,它结合高精度传感器、智能控制算法和网络化数据处理平台为一体,在线监测并对生产过程进行最优化的调节控制。而且智能化系统具有自诊断和预估故障的能力可以减少突发性停车事故的发生概率提高设备的可用度。鉴于上述情况,本文旨在系统地阐述智能化在化学工业仪器控制领域的应用状况及它所带来的好处,并对其发展前景做一个展望,从而能够对化学产业仪器控制系统的智能化发展有所助益。

1 智能化化工仪表概述

智能化化工仪表就是传统的仪表系统的升级版,

向着信息化以及智能化的方向发展,主要的特点就是加入了先进的传感器以及数据计算、控制程序来达到对整个化工产品的生产过程进行准确检测和有效控制的目的。其中温度仪表是最简单的检测仪器之一,在经过智能化的设计以后可以在实时记录温度的同时自行修正检测过程中的差值并且具有报警、自检功能,让生产的过程当中温度控制这一部分变得更加可靠。而像流量仪表就是在原来的检测方式上增加了数据采集和分析单元可以随时监控流体或者气体的流量大小并进行智能判断能自动调节控制参数使得系统工作效率得到提高。对于压力仪表来说则是安装了高精密度的压力感应器加智能控制器除了可以实时报告压力情况以外还能在出现巨大波动的时候自行启动保护或者调控措施进而提高了生产的可靠程度和系统的安全性能。再有就是液位、浓度、PH等一系列的化工仪表的智能化也都在不断地扩大适用领域,让这个产品生产的监控体系变得更加完整和先进。智能化化工仪表的应用也为生产的数字化、网络化和智能化提供了强大的技

技术支持是现代化化工厂实现高度自动化的强有力的技术保证。

2 智能自动化在化工仪表中的优势

2.1 高效的数据采集与处理能力

智能自动控制技术应用于化工仪表的最大优点就是强大的数据采集及运算功能。传统的仪表在数据采集方面大多依靠人为记录或是单个传感器,采集时间长并且准确率较低,不能适用于当前化工企业复杂的工艺流程;而智能化仪表采用先进的传感器以及数据运算装置,可以同时化工企业的温度、压力、流量、液位及其它一些工艺指标实时地进行记录,并可对海量数据迅速整理并计算出来,这不但确保了数据的真实有效及时而且还能把这些数据转化为对生产有用的信息供控制系统参考决策。智能数据分析还包括对数据的趋势统计、监测异常情况、预测分析等作用,可以让生产过程在不稳定的状态下依然平稳运行,为日后进一步调整优化各项工艺指标打下基础。通过这样高效的采集与计算分析数据,智能仪表的应用不仅加快了生产力而且还大大提升了整个生产过程的可控程度和准确度,为化工企业的自动化进程保驾护航。

2.2 自我诊断与故障预测能力

智能型自动化仪表的第二大优点是具备自诊断及预估故障的功能,在常规的仪表装置当中出现故障大多依靠人力巡查或者事后检查,这样不仅反馈延迟而且会导致生产停滞或者机器损害。而智能仪表内部安装有自检模块可以随时对传感器状况、信号传输情况以及执行元件的工作情况进行监测,一旦检测到疑似故障,就利用程序进行计算推测出可能发生故障的时间段及其可能的原因,这样的特性可以使控制系统在事故发生前提前做出应对比如自行调节工作参数或者启动警报防护等以此来避免突发性的停工停产,降低了故障出现的概率,同时预估故障的发生也提升了整个系统的可靠程度,使公司能在不影响正常生产的条件下对机器设备进行检修保养减少了机器闲置时间进而提高了整个生产线的生产力水平。自诊断及预估故障能力的出现,代表化工仪表由以前的被动监视变为了如今积极主动的智慧化管控,为化工产品的安全生产和持续生产提供保障。

2.3 远程监控与操作能力

智能型自动化仪表应用于化工生产的第三大亮点是远程监视及操控功能。常规仪表要求工作人员必须前往现场对数据读取、调整以及控制,但具有了智能化特性的仪表借助网络化接口,把所获取的信息即时发送到控制室或者便携设备上,使得工作人员无需亲临现场即可了解生产环节中的各种参数指标。远程操控既包括可以对阀、泵、控制器等执行机构进行远程调整;又能够在出现紧急情况的时候迅速作出反应,大大增强了生产的灵活性及反应速度。基于网络化的监视方式,生产负责人可做到跨地域、

跨厂区的一体化管控,同时也能把一线数据同企业的信息管理系统相融合,为工艺改进、节能降耗、安全报警等提供可靠的数据支撑。由此可见远程监视与控制功能不但节约时间成本而且减少了现场危险系数,在复杂条件下仍然让化工产品的制造保持着高度的安全性、可控性。

2.4 程序可塑性与系统扩展能力

智能型自动化仪表的最后一项也是最重要的一项核心技术就是程序柔性以及系统扩展性。化工企业的生产过程种类繁多并且总是在发生变化,常规仪表固定的性能以及有限的程序设定无法满足复杂的工艺流程要求,而智能型仪表则能基于其灵活的控制系统以及模块化结构,在不同的生产场景下对自身功能、参数进行增减调节以适用于新的工艺以及新的生产设备。这样的柔性让企业在面对生产调整或者工艺升级的时候不需要大范围更新机器,只需要软件上的更新或者是程序上的改动就可以达到新的控制目的。此外,智能仪表系统的可扩展性还允许与其他自动化装置、信息系统乃至工业互联网互联互通,从而构建统一协调的整体化生产控制系统。在程序柔性和系统扩展性的帮助之下,化工企业可以达成稳定性基础上的柔性生产,为其进一步向智能化、绿色化的方向发展提供技术支持。

3 智能自动化在化工仪表中的应用分析

3.1 数据处理与智能控制

智能化自动仪器仪表的数据运算直接影响着化工生产的进程控制准确性和时效性,智能仪表内置大算力处理器与运算程序模块,可以即时获取温湿度、压强、流速、水位等各类型传感器所监测的数据并在内部或云端服务器平台上及时运算处理,不仅仅是单一的数据存储,更重要的是基于历史数据进行变化趋势走势、反常震荡分析及趋势预测,给控制环节提供可靠的数据参考,而在智能化控制层面中,则是仪表设备接收数据处理的结果自行对各个阀门、水泵及其他动力装置作出调控指令,形成闭环反馈控制系统,通过这样的数据化智能控制使得整个化工制造流程能在复杂的多重变量及工况条件下平稳有序的工作,并能大幅加快系统的反应速率并提升了设备的操控灵活性,在生产安全及企业收益两方面给予有力支撑。

3.2 网络化与信息集成

智能自动化仪表借助互联网及信息技术,完成了对整个化工生产过程的统一监控和管理,仪表系统不仅可以把测得的信息发送到控制室而且能与 ERP 系统、MES 系统以及远程监测系统相互衔接,构建了一个互联互通的数据环境。网络化特性使得工作人员可以在不同的位置同时对生产状况进行观察并对控制系统加以调节,并就可能发生的风险提前报警。这样的信息整合不但提升了生产的可视化程度还为工艺的改进以及管理层做出抉择提供有效的参考^[1]。此外网络化的系统便于对数据的统一保存、处理和检索,这样以往的数据就可以用来做走势分析、机器保

养时间规划以及能源消耗管控等,为化工企业的精细管理以及智能制造提供强大的技术支持。

3.3 系统性能优化与过程稳定性

智能自动化应用于化工仪表领域有利于大幅提高整个系统的性能及过程的稳定性,基于准确的传感检测以及及时的数据分析与自动调节作用下控制系统可以及时地对工艺变量所发生的扰动作出反应并将生产流程维持在最佳水平上,在仪表控制系统一体化的基础上,反馈与前馈调节可相互配合以减少波动给生产力以及最终产品品质带来的不利影响^[2]。与此同时,智能计算还可以针对不同的运行状况加以超前控制从而使装置面对突如其来的变动时具有更好的可靠性和抗干扰能力,经过对控制方案及设定值的优化,智能仪表提升了机器利用率的同时也扩大主要机器的运转周期,并为化工厂家低成本、高产出的制造奠定了技术支持。

3.4 安全性与可靠性提升

安全性及可靠性是对化工生产的最基本需求,智能化自动化仪表在这方面起到了决定性的作用。仪表控制系统具有自检能力,可以随时检查传感器的状态,信号的状态还有控制算法的有效性,当有异常发生的时候会报警或者启动保护机制,这减少了人为的误操作和机器本身的故障的风险^[3]。而且智能仪表可以进行冗余配置和错误处理,使得重要的测量和控制环节即使在单个元件失效的情况下也能继续工作。可靠性的提高不仅仅表现在硬件软件上的冗余和升级,也包括整个系统的预防式的维护管理。通过收集以往的工作状况的数据,公司可以预见性地开展维修保养,避免突然停车给生产带来的损失。这样的智能化的安全及可靠管理模式让一个化工厂在复杂工艺条件下可以更快捷,安全地运作,取得经济和安全的双赢。

4 化工仪表智能化的发展趋势

4.1 提高系统稳定性与可靠性

在未来智能化的仪表发展中依然会围绕着提高整个系统的可靠性和稳定性方面进行研究。由于化工生产的工艺变得越来越复杂,仪表控制系统的要求也越来越苛刻,需要仪表具有更高的响应速度、计算精度和抗干扰性能。新型智能化仪表将会进一步完善传感器,改进算法和控制器,使得整个系统可以在更大的工作范围内都拥有很好的稳定性。并且利用多重化、容错机制以及自动调整等方法让智能仪表即使发生突发状况或者自身出现故障的情况下也能始终如一地稳定工作,进而减少生产过程中存在的危险性,保证工艺的安全。

4.2 智能化水平提升与自主决策能力增强

智能化程度的提高代表化工仪表不再仅限于测量和基础控制,其内部程序还具有自己做出决策的能力。基于人工智能和机器学习的仪表系统能从过去的数据中挖掘出模式并预测未来的走向,在需要的时候对工艺条件自动

作出最佳调控。这样的自主决策减少了人为干预的需求使生产过程更快更准确,也能处理复杂且有多变量的过程环境,为化工公司建立一个更聪明、生产力更高的生产体系。

4.3 与工业互联网及大数据技术融合

伴随着工业互联网及大数据的应用发展,智能化自动化的化工仪器仪表将会逐渐走向与公司整体信息系统集成化道路,仪表上的采集数据不再局限于就地控制系统,也可以传输到云端统一处理分析、检索历史数据、研究变化走势等,在不同系统之间可以进行智能化调节与整合。借助大数据平台,化工生产企业可以获得更加完整的工艺情况、准确的产品测算和有效的能源利用,进而促成智慧工厂和工业4.0的到来。

4.4 新型智能仪表技术与探索

未来的发展方向还包含新的智能化仪器仪表的研发,例如多功能一体化传感装置、自学习控制器、物联网式的分散式检测控制系统等,它们不但可以一起测量多项工艺指标而且还可以利用自身优化程序达到更为准确地操控目的;另外仪器的小型化、微量化与模块化也会给生产线带来更加灵活便捷的选择,从而使智慧型仪表可以在不同的化学反应流程与制造场合下得到应用并具备更好的兼容性能与延展空间。新技术的不断追求,会使整个化工生产的自动化程度迈向一个新的台阶,成为化工企业高效率、安全性、绿色环保的强大技术支持。

5 结语

智能自动化技术应用于化工仪表领域,不但极大地提高了数据获取、过程控制以及系统的管理水平,而且还为化工企业实现安全、稳定、高效的生产目标奠定了强有力的技术支持。而通过数据处理能力、网络化管理模式、系统性能、安全性与可靠性的提高等研究可发现,智能化已然成为当今化工仪表发展方向的主流。今后伴随着智能化程度不断提高、结合工业互联网以及大数据技术、开发新的智能仪表技术等的发展,化工企业的仪表系统将会变得更加自主、灵活、聪明,在复杂的生产环境下获得更大的生产力、更好的产品质量和更强的安全保障。总之,智能自动化技术在化工仪表领域的应用既符合当前生产的需要又为化工行业未来的进步指明了道路并给予了技术支持。

[参考文献]

- [1]张麒麟.浅谈化工智能化仪表技术与应用[J].智慧中国,2022(12):82-83.
 - [2]罗清瑞.智能化在化工仪表中应用的重要性分析[J].石化技术,2020,27(2):20-29.
 - [3]黄永祥.智能化在化工仪表中的应用研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):99-101.
- 作者简介:卓迪(1999—),毕业于成都工业学院测控技术与仪器专业,主要研究化工仪表及自动化、软件自动化控制等方面。

压力表检定中常见问题及改进措施研究

杨露

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]压力表作为工业生产与实验系统中的重要测量仪表之一,它的准确与否直接影响着机器设备的安全以及生产的正常进行。然而在对压力表的实际检测过程中经常会出现由于仪器精度不够高、检定环境因素、人为因素、检定方式以及记录方式不当等原因造成的误差较大、重复性差的问题。文章针对压力表检定时存在的这些问题进行探讨并提出了相应的解决办法。文章指出,可以通过提高仪器精度、优化检定环境、强化人员能力训练、严格检定步骤规范以及实施信息化管理等方式来予以改善。文章研究发现,采取上述措施能够有效地保证检定的精确性和准确性,从而能更好地确保压力表的安全应用和检定工作顺利开展。

[关键词]压力表检定; 常见问题; 改进措施

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18615

中图分类号: TH812

文献标识码: A

Research on Common Problems and Improvement Measures in Pressure Gauge Calibration

YANG Lu

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: As one of the important measuring instruments in industrial production and experimental systems, the accuracy of pressure gauges directly affects the safety of machinery and equipment as well as the normal operation of production. However, in the actual testing process of pressure gauges, problems such as large errors and poor repeatability often occur due to insufficient instrument accuracy, calibration environmental factors, human factors, improper calibration methods, and recording methods. The article discusses the problems that exist during the calibration of pressure gauges and proposes corresponding solutions. The article points out that improvements can be made by improving instrument accuracy, optimizing the calibration environment, strengthening personnel training, strictly standardizing calibration procedures, and implementing information management. The study found that taking the above measures can effectively ensure the accuracy and precision of calibration, thereby better ensuring the safe application of pressure gauges and the smooth progress of calibration work.

Keywords: pressure gauge calibration; common problems; improvement measures

引言

压力表是工业生产、科研试验和各种流体系统的常用计量器具,它的量值准确与否与设备的安全运行、生产的正常开展密切相关。在高压、化工、电力、石油等领域中,压力表除了日常的过程监测外还起着重大的安全保障作用,可见压力表量值的准确性、稳定性的意义深远。但是,在现实检定工作中,受检仪器精度、检定环境因素、人为因素、检定方式以及检定记录保存等的影响,压力表常常会出现种种偏差和不稳定的现象,不仅使得检定的结果缺乏必要的科学严谨性和真实性,甚至可能造成安全隐患。近年来,伴随着工业化自动控制和智能控制的发展,对于压力表检定准确度的要求越来越高,传统的检定手段和管理模式越来越不能适应当前工程应用的需要。因此有针对性地分析压力表检定时常出现的问题并找出有效的解决办法有着非常重大的研究意义。本文基于此目的,通过探究压力表检定时误差来源,从仪器精度、环境影响、人员培训、规范化操作、检测信息存档等方面入手,提出了系统完善的优化方案,以期可以提高压力表检定工作的精确

程度、真实可信度及可查询性,进而保证压力表能够安全可靠的应用于工业生产中去,也为检定工作的正规化、科学化和现代化进程做出了贡献。

1 压力表检定的基本原则

压力表检定基本原则是保证计量结果真实可信的重要条件,明确了判定压力表合格与否的最底线,必须严格执行。检定主要由三个方面组成并且紧密相连:基本误差,回程误差,外观及功能检查。其中基本误差是检定重点,即压力表承受标准压力时的示值误差不能超过该仪表精度所允许的最大限度并且要在各个不同的压力值上进行试验以使各不同点上的误差都达标。回程误差是为了检查压力表机芯稳定性以及有无磨损,也就是同一个压力点升压测得值与降压测得值之间的差距大小,在设备工作中防止对压力误判,此误差值也不能超出基本误差允许值。外观及功能检查主要是指指针的动作是否灵活,密封性能,各类配件是否齐全,其中指针不允许出现停滞或者跳针的现象并且松手后可以自动归零;加量程百分之八十的压力情况下静置一段时间内的压力下降量要小于规定的数值;表

壳、封印、连接螺纹等各类附件不允许有任何缺损，这些都是关乎使用者的安全问题。

2 压力表检定中存在的常见问题

2.1 仪器设备精度不足导致的检定误差

在压力表检定工作中，仪器设备的准确度也决定了所出具检定结果的可靠性和真实性，一些已经使用较长时间、未定期送检或者本身生产时就存在一定缺陷的压力表检定仪器常常会出现零位偏移、满量程有误以及显示数值波动等情况。这些不够精准的机器在对受检测的压力表进行测试的时候可能会使得受测压力表显示出来的误差并不能代表它真正的测量误差，有时候甚至会造成系统性的测量失误，进而使得最终的检定结果失去应有的公信力和说服力^[1]。此外，即使是同一品牌型号的不同台次之间的检定装置也会存在着细微的区别，这也可能导致同样的压力表在接受重复检定时产生不同的测量偏差，进而影响到最后的检定结果的一致性及可比性。

2.2 检定环境因素影响

在进行压力表检定时，环境条件对压力表检定结果的一致性和可靠性有着很大影响。检定间的温度、湿度、大气压强及振动等外界情况都会造成被检压力表与压力表检定装置显示数值的不稳定。比如温度升降会引起压力表的弹簧管、膜片或其它弹性敏感元件的材料特性略微发生变化，导致压力传递受到影响，指示不准；空气中水蒸气含量增加会令机件表面发潮，容易诱发摩擦阻力或者阻尼效应发生改变，进而造成示值漂移不定；周围环境的震动或者空气流也会使得指针颤动或者电子感应器件短暂失灵。此外实验室内的电磁干扰以及其他不稳定来源，都有可能干扰到仪表本身的电路测量系统并致使压力表读数不准确。

2.3 操作人员技术水平不均

压力表检定时工作人员的操作技能直接影响到检定结果的准确性与真实性，不同的工作人员对于仪器的操作、示值判定、数据记录与检定步骤的理解程度各不相同，易引起人为误差的发生。部分工作人员对压力表检定的相关知识原理、方式方法及注意事项了解不到位，可能会在增压、降压、校零的过程中不标准，致使压力表指针抖动、滞留或示值跳动；同时在数据读取与结果计算时也会因个人经验不足或者习惯上的差异造成数据抄录遗漏、误差判定失误或者偏离值分析欠缺的现象。

2.4 检定方法和流程不规范

压力表检定时检定方法及过程的不规范也是造成检定结果不确定的一个重要原因。有些检定过程中检定步骤并未严格按照规程要求进行，如打压、泄压过程断续、忽快忽慢，检定次序任意颠倒，重要检定点未进行充分的预热和稳定等待等都会引起压力表的示值误差；另一方面不同的检定机构之间或是不同的检定人员之间对方法的选择以及对步骤的把控也各不相同缺少一个统一的操作规

范导致同种型号甚至是同一生产批次的压力表因检定条件的不同而产生很大的差别。而且有些检定中没能完整记录重要参数或没能按规定的间隔进行多个检定点测量致使了压力表示性的系统性考察不够全面。

2.5 数据记录与管理存在漏洞

压力表检定时，数据的登记和保存不到位是影响检定结果有效性和可溯源性的重要原因。一些检定项目下，工作人员对压力表示值的读取，标准器示值和误差计算等过程出现漏记或者滞后记载的现象，使原始数据残缺或者信息不符；再有就是检定数据保存手段落后陈旧、零散存放，缺少集中的信息化存储系统，造成数据难以存储、检索、核验，数据丢失或者被误用的可能性大。经过重复检定或者长时间使用后，这些管理漏洞造成的历史计量性能档案不能完整体现压力表的状态，进而影响到其准确度和安全性的判断^[2]。还有就是因为数据管理制度落实不到位，在数据填报、核验、归档等方面的不同人员间存在着随意性和偏差，也很可能带来人为失误和疏忽。

3 压力表检定改进措施研究

3.1 提高仪器设备精度与维护水平

压力表检定过程中，提升仪器设备精度及做好维护保养工作是保证检定结果准确性、有效性的重中之重。仪器设备作为压力表检定工作的基础工具，其生产时的精度等级、自身调试状态以及在长期使用过程中的维护情况都关系着检定数据的真实性。精度不准的仪器会导致出现系统偏差，导致压力表指针偏离理论真值，从而影响了检定结果的有效性。所以首先要从检定仪器自身的精度着手，对其进行严格的检验并制定定期校正机制，以确保仪器在其使用寿命范围内具有符合标准规定的测量精度。其次仪器在长期使用当中机械部分的磨损、内部元器件老化和电路板老化漂移等问题都会引起仪器测量精度下降，这就要求我们要有一套合理的仪器保养维护措施来应对，主要包括经常性的清理打扫、上油润滑和及时更换易损件以及软件硬件的功能检测等等。最后对于检定仪器的精度检查还需要配合相关实验测试分析，通过对比多台仪器的测量数值，考察各仪器间的测量差异程度及重复测量能力以此来验证仪器对同一压力表不同条件下的检定结果是否可靠、稳定。

3.2 优化检定环境条件

压力表检定中环境条件下的检定环境对检测结果准确性及稳定度有着至关重要的作用。温度、湿度、气压、震动、电磁干扰等因素都会给压力表和压力表检测设备带来直接或者间接的影响。如温度的变化会引起压力表本身弹簧、膜片、传感器等出现细微变动，进而导致压力传输上的差异或者显示数值上的偏移；湿度的变化会导致机械部分摩擦力发生变化或者电路部分电阻发生改变而引起读数上的不稳定与延迟；检定现场的振动以及空气流动都会给压力表的指针或电子芯片输出带来或多或少的影响，在

高精度量程的检定时,一些细小变化会被成倍放大的情况下,这些影响是致命的。电磁干扰会给电子式压力表信号接收模块带来波动,从而使测量值偏离真实值。为确保检定结果可靠,必须对检定环境进行严格管控,包括温湿度控制、空气流动和隔振、电磁屏蔽、空气净化等等一系列措施使得压力表以及检测设备在一个恒定可控环境下工作。

3.3 强化操作人员培训与技术考核

压力表检测工作当中工作人员的业务水准和技术水平关乎着检测结果的真实可靠度,所以提高工作人员培训及技术水平考核也是提高整个检定质量的重要步骤之一。压力表检测需要经过精密仪器、加压卸压过程、数据读取和记录、误差计算等步骤,每个步骤都马虎不得,任何一个步骤上的失误或者不当都会造成人为误差从而影响整个压力表性能测试的真实性、科学性。系统的培训能使工作人员熟悉了解有关压力表的工作机制、检定规则、操作流程及相关事项,加深工作人员对检定时出现的问题的认识及应对技巧^[3]。同时要使工作人员通过学习理论知识结合实践掌握各类型的压力表的检定方式,仪器设备的应用方法,以及一些常见的异常状况辨识。要想确保工作人员学到真正有用的知识就必须制定严格的工作人员技术考核机制,定期对工作人员进行技术和能力测验,不仅要检测出他们是否懂得了相关理论知识还要着重检查他们的实际操作能力和解决问题的能力,以此保障每位工作人员都具备依照标准化的操作流程来进行检定工作的能力,降低操作失误和人为因素带来的偏差。

3.4 完善检定方法与流程规范

对于压力表检定而言,检定方法及流程规范直接影响着检定结果的科学可靠程度和可重复再现程度,制定完善的检定方法及流程规范是对检定质量的一种有效管控措施。压力表检定涵盖了从器具准备、加压、等待稳定、读数记录再到结果判断等一系列的过程,每个过程中的操作都需要严格遵循相应的工作程序,稍有不慎就会导致产生系统或偶然偏差。一个完善的检定方法应该规定出具体的检定步骤以及相应的检定步骤所需要做的工作,同时还应对不同种类的压力表检定提出不同的要求,以适应其在整个量程范围内及不同准确度等级下的可靠检定需求;而流程规范则应在时间节点控制、加压和降压速度、数据采样时间间隔、重复测试时间等方面加以规定,从而保障检定工作的科学合理与可比性。再者,为了减少验员个人经验或偏好等带来的偏差,在流程规范的同时还需要附带具体的操作指南和格式化的表格以便能够每次按规操作并进行复现。

3.5 建立信息化管理与数据追踪系统

现代压力表检定中,信息化管理系统和数据追踪系统

的构建是对检定过程提质增效、确保数据精确可靠并实现全流程可溯源的有效方法,在过去的人工录入及纸质文件归档过程中极易造成数据丢失、记录失实或档案杂乱无章的情况,无法应对高精密度高强度压力表检定任务的要求,而信息化系统则能够达到压力表检定全程的数据化记录存储计算传输的目的,为检定质量保驾护航。借助于信息化手段,每一台压力表检定时的原始数据、所用仪器设备状态、校准结果、检测者身份和环境条件等都能被即时登记汇总并加以综合利用,使数据全面、连贯并且具有可追溯性^[4]。另外数据跟踪功能还能对检定过程中的异常和偏差走势自动报警提示以便日后优化并供管理者监督审核。再者信息化系统也可与实验室管理系统、校准管理系统和公司数据库互联互通,从而完成检定环节、人员配置、器械保养和统计分析的高度融合,降低手工干预程度,加快工作节奏,增强数据可信度。

4 结语

压力表检定是工业生产及试验系统中的重要组成部分,在其中起到安全及准确的作用,其合理化及规范化程度直接关系到机器设备工作的可靠程度及生产安全与否,因此通过对于压力表检定过程中出现的一些普遍问题的研究发现仪器误差大、检定环境不稳定、人员操作水平层次不齐、检定方式和过程不规范、数据保存及登记有漏洞等原因都会导致检定最终结果产生较大误差进而影响之后对压力表的应用使用情况。针对上述问题本文给出了一系列具体的解决方案:提升仪器设备精度等级及其保养质量、改善检定时周围环境状况、加强检定工作人员训练和技术评估、统一检定方法和步骤流程、实现数据存储信息化并完善追踪机制等举措不仅有助于提升压力表检定精确度、可靠性和可追溯程度而且有利于整个检定工作的标准化、合理化和先进性,为以后的压力表在工业上安全使用保驾护航,同时也对类似检定技术和检定管理工作有所助益可供相关人员参考学习。

[参考文献]

- [1]向维.压力表计量检定中常见问题及控制措施[J].科技资讯,2024,22(19):133-135.
 - [2]李海军.工程技术与新能源经济学术研讨会论文集[C].江西:江西省汽车工程学会,2025.
 - [3]邢雪楠.压力表计量检定中的常见问题和控制措施分析[J].科技资讯,2025,23(11):81-83.
 - [4]左勇,杨勇,姜素真.压力表计量检定中常见问题及解决措施[J].设备管理与维修,2020(23):12-13.
- 作者简介:杨露(1996—),毕业于四川化工职业技术学院生产过程自动化专业。

化工装置主控侧仪表系统运行可靠性研究

先 杰

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]伴随着化工生产装置大型化、连续化、高度自动化的持续发展,主控侧的仪表控制系统成为了装置安全可靠运行的重要技术保证。主控侧不仅是整个生产过程信息的汇集与展示中心,更是控制决策及操作命令下达的中枢,在线运行可靠性对装置的安全性、经济性及连续性有着至关重要的作用。但长时间满负荷工作和恶劣复杂的现场条件使主控侧的仪表控制系统不得不面对硬件磨损老化、软件故障漏洞、通讯噪声干扰、人为误操作等各种问题所带来的威胁挑战,进而造成系统可用性降低、不稳定乃至生产异常波动甚至安全事故的发生。文章针对化工装置主控侧仪表控制系统在线运行可靠性的课题,阐述了主控侧系统的组成及特性,归纳总结出目前主控系统在运行过程中存在的主要隐患问题,结合设备选型、组网方式、运行环境、运维管理等多个方面探究造成系统可靠性低下的原因因素并给出相应建议措施,为主控侧仪表控制系统稳定可靠运行提供支持帮助。

[关键词]化工装置; 主控侧仪表系统; 运行可靠性

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18614

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Research on the Operational Reliability of the Instrument System on the Main Control Side of Chemical Plants

XIAN Jie

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: With the continuous development of large-scale, continuous, and highly automated chemical production equipment, the instrument control system on the main control side has become an important technical guarantee for the safe and reliable operation of the equipment. The main control side is not only the gathering and display center of the entire production process information, but also the center for control decision-making and operation command issuance. The reliability of online operation plays a crucial role in the safety, economy, and continuity of the device. However, prolonged full load operation and harsh and complex on-site conditions have forced the instrument control system on the main control side to face various threats and challenges such as hardware wear and aging, software failures and vulnerabilities, communication noise interference, and human error, resulting in reduced system availability, instability, abnormal production fluctuations, and even safety accidents. The article focuses on the reliability of online operation of the instrument control system on the main control side of chemical plants. It elaborates on the composition and characteristics of the main control side system, summarizes the main hidden dangers in the current operation of the main control system, and explores the factors that cause low system reliability from multiple aspects such as equipment selection, networking methods, operating environment, and operation and maintenance management. Corresponding suggestions and measures are provided to support the stable and reliable operation of the main control side instrument control system.

Keywords: chemical equipment; main control side instrument system; operational reliability

引言

在当前的现代化化工生产体系当中,伴随着过程自动化的逐步提高,生产运行也越来越依赖于仪表控制系统,而其中主控侧仪表系统正是联系现场仪表设备与运行人员之间的桥梁,负责信息汇总、过程监视、报警响应及过程操控等一系列重要工作。如果主控侧系统出现问题或者运行不够稳定,则一方面会干扰到操作人员对装置运行工况的认识了解,另一方面会导致各种控制命令无法下达或者错误执行,进而危及装置的安全性和生产的稳定性。面对大型化、复杂化的装置趋势,主控侧系统要面对越来越多的信号点连接数量、越来越大的控制逻辑规模以及越来越

越频繁的数据收发需求,而且运行环境也越来越复杂,这就导致了主控侧系统的可靠性面临着更大的挑战,因此针对当前的化工装置,对其主控侧仪表系统运行可靠性进行系统的研究,找出存在的不足并寻求解决途径,这对于提高整个装置乃至企业的自动化水平和固有安全性都有着非常重要的现实意义。

1 主控侧仪表系统及其运行可靠性基础

化工装置主控侧仪表系统是以操作站、工程师站、服务器及相应通信设备为主体建立起来的一个集中的监视及操作平台,主控侧系统通过连接现场仪表、控制器及执行器来对整个生产工艺过程进行集成式的管控。从业务功

能来看,主控侧系统既是工艺参数的显示器和记录仪,也是报警汇总处理中心、趋势查看工具、控制命令下达者、操作员权限管理者等一系列角色,可以说是化工装置的“大脑”。主控侧仪表系统运行可靠性是指系统在其规定运行时间、环境下可以无故障地持续、稳定、精确地完成所设计任务的概率,它既包括了硬件层面的物理可靠性也包含了软件层面、通信方面、人机交互方面的整体可靠性水平。对于连续化生产的化工行业来说,主控侧仪表系统往往需要长期处于高度可用的状态,如果经常发生频繁死机、反应迟钝、数据失灵等问题都会降低操控员对装置状况的感知度进而加剧安全隐患和生产事故发生的可能性,所以主控侧仪表系统运行可靠性的研究具有很强的系统性和工程性。

2 主控侧仪表系统中存在的主要问题

2.1 硬件设备故障与老化问题

对于化工装置长期连续运转工况来说,主控侧仪表系统的服务器、操作员站、网络交换机和输入输出模块等硬件设备一直处于满负荷运行中,并且还面临着温度变化、电磁干扰、湿度变化、供电品质波动等诸多恶劣条件的影响,导致了机器的老化加速,硬件故障的发生率变大。一些企业的硬件升级及更新不到位,还在使用老旧的计算机硬件、网络交换机、通讯接口,经常会发生接口松动、硬盘读写错误、电压不稳定引起的重启、散热不良导致的各种机器故障,从而导致系统宕机或者丢包,进而影响生产的连续性及安全性。而且一些重要设备缺乏备份,在单点失效的时候会引发一系列的连锁反应,进而导致整个主控侧系统受限,降低了系统的可用度和可靠性,严重时会对生产安全及操控决策带来巨大危害。所以硬件设备的及时保养、日常巡检和适当的冗余设置是提高主控侧仪表系统长时间工作的可靠性的必要保证。

2.2 软件系统不稳定与程序缺陷

监控端仪表系统十分依赖操作系统、组态软件及控制应用软件之间的协调工作,软件方面的任何一个漏洞都有可能引发主控端系统稳定性的雪崩效应。而在实际使用过程中,某些系统因版本更新不严谨、补丁更新滞后以及旧程序一层层累加等原因,经常会出现程序冲突、内存泄露、反应迟钝等情况的发生,最终导致操作员站卡慢死机乃至整个系统崩溃。还有一些控制系统在编制或者调整时未经严格测试,潜藏其中的编程错误会在特殊情况下被激活,引发界面乱码或者是失去控制的现象发生,极大程度上影响着操纵员的观察和操控,降低了监控端系统的可用性。

2.3 通信与数据传输异常

主控室仪表系统经由工业以太网、现场总线等不同的通讯手段连接到现场设备及控制器上进行数据读写,通讯通道的好坏直接影响着信息传递的速度和精确度。而化工厂内网络拓扑结构复杂,节点众多,一旦网络设计不到位

或者交换机能力不够,在高负荷时就会发生堵车以及丢帧、延时现象,进而引发监控画面上迟滞响应或者是控制系统指令下达延迟等情况的发生;再者就是电磁环境以及接地问题,会引起通信不稳定,使得数据发送时有时无,增大了系统的风险性。

2.4 操作失误与管理薄弱环节

虽然说主控制器一侧的仪表系统自动化程度很高,但是它最后的表现还是要依赖于使用者和维护制度的影响。有些企业的工作人员并不真正清楚系统的各项作用,对待警报及屏幕切换等行为也过于随意,在危机时刻可能会发生误动作或者延迟动作,进而扩大了系统自身存在的不足之处。此外,运维管理制度不完善、账号权限管理不到位、变更管理不到位均有可能使未经充分测试的程序更新、系统配置变更上线到生产环境中,提升了控制系统发生故障及不稳定的可能性。

3 影响主控侧仪表系统运行可靠性的关键因素

3.1 控制系统与仪表设备配置因素

主控侧仪表系统的可靠程度主要由该系统的控制结构及所采用设备是否合理决定。若系统设计初期忽视了冗余度及容错机制,则一旦核心服务器、工作站、网络组件失效,则会导致全系统崩溃而失去监控界面并丧失控制功能。同时控制器与现场仪表能否兼容,I/O卡件好坏,信号隔离效果等都会影响到数据获取、控制命令下达的正确性,如接口大小不够、速率不同步、抗扰度较低等问题均会造成信号不稳定、传输滞后甚至出现误操作等情况的发生严重影响主控侧运行可靠性。

3.2 网络结构与通信可靠性因素

主控单元系统赖以生存的通信平台,也是系统消息传输的基础,网络物理结构、带宽设置、交换机组都对系统有重要影响,若网络结构设置太集中或者缺少备份路由,某一点或者某一线段出现故障就会导致大面积通讯瘫痪,使得上位机与控制器之间无法进行正常的更新及报警提示。另外若缺少完善的网络监控、性能统计、故障排查,则一些隐藏在网络内部的通讯问题比如堵塞,丢包,延时增长甚至信号干扰等都不能被及时的检测到,在后期的关键工况中就更容易酿成系统级的故障,大大降低了主控端仪表系统的可靠度,给生产和控制埋下了不稳定因素。

3.3 运行环境与电源保障因素

主机侧仪表系统一般较为集中的安装在控制室或者计算机房内,所在环境的温湿度条件,洁净程度及供电情况均会对主机设备使用寿命、稳定运行有所影响,如果空调系统控制不佳,计算机房灰尘、腐蚀性气体过多,会加快主机内元器件的老化速度,增加主机设备故障的发生概率,从而降低了主机设备长时间可靠工作的可能性。另外供电过程中电压不稳定、短暂失电或UPS系统可靠性差会导致服务器以及操作员站非计划性的自动重启甚至

丢失数据,严重情况下会造成系统数据库与系统配置的破坏使得系统重新启动变得复杂困难,进而降低了主机侧仪表系统的稳定运行能力。

3.4 运维管理与人员技术水平因素

主控侧仪表系统的可靠运行除了受技术方面因素的影响外,很大程度上取决于运维管理水平以及人员技能水平。缺少了有效的巡检、维护和测试制度,很多设备存在的问题和程序上的漏洞就得不到及时发现并且解决,在日常工作中不断积累而在特殊工况下诱发控制系统故障。此外,使用人员和维护人员对于系统原理、控制策略和系统性能的认识理解水平决定了出现故障时的反应时间和解决问题的能力。使用者技术水平欠缺、规章制度落实不到位、培训学习跟不上都会产生误操作、失误维护或者忽略报警信息等现象,这些都会使得系统可靠性下降、装置安全性降低。所以加强运维管理措施、提升人员技术水平、制定合理的考核标准是保证主控侧仪表系统长期可靠工作的必要手段。

4 提升主控侧仪表系统运行可靠性的对策与措施

4.1 硬件冗余与系统结构优化

增加关键服务器、工作站、网络交换装置及电源部分的冗余设置能大幅地提升了主控端仪表控制系统容错性能,避免单一节点的异常扩散至整个系统的当机状况发生进而保证生产的稳定可靠运行。系统的冗余除了有主从服务器、双网卡外,还包括了 UPS 电源模块、交换机链路以及重要 I/O 模块的热备等,以便于机器故障时迅速切换而不中断工作^[1]。另外对体系架构进行调整,科学分配网络域、控制器与功能块,不仅可以减少故障蔓延程度而且方便日后的维修扩容,提高了系统的可控制度与便捷性,进而全面提升主控端仪表控制系统稳定性。

4.2 软件平台与控制逻辑优化

强化针对操作系统、组态软件及应用程序的版本管控与测试验证工作,规范化的软件更新步骤能够显著降低程序 Bug 对控制系统正常工作的干扰,防止未经严格测试的新版或修订版软件导致系统宕机、控制器故障等情况的发生^[2];应开展控制系统程序的系统性精简,其中包含压缩复杂的计算公式、删除重复累赘的判断语句、调整报警方案等内容使得程序具备面对所有可能工况时均能迅速准确作出反馈的能力;在显示画面上增加必要的信息层级展示、强化操作提示程度、规范统一化操作面板样式等措施都可以减轻运维人员的理解难度进而降低误操作、迟缓反应的概率;而引进仿真实验和虚拟调试环境,则可以在正式上线之前检验控制逻辑及人机交互的操作是否合理,从而进一步提升主控端仪表系统稳定安全运转的程度。

4.3 通信网络与数据安全保障

对网络的拓扑结构进行优化,提高带宽设置,增加网络冗余及隔离措施,能够有效的提升主控侧系统通讯的可

靠性及抗干扰性能,保证了操作员站、控制器与现场仪表间的通讯在重载及复杂工况条件下依然具有实时性与精确度。网络冗余配置包含主备线路互切、核心交换机冗余、重要节点双网卡等设置,在出现单个节点失效的情况下能自动切换而不造成系统通讯失败^[3]。网络隔离及防火墙措施可防止外来干扰与恶意攻击,确保通讯安全。对于系统中重要的生产信息、报警信息、历史趋势等数据加强定期备份和分级保存,并制定相应的数据恢复方案,则能在控制系统出现异常或故障后快速重启并恢复正常,减少了因生产停滞造成的巨大损失,进而提高了主控侧仪表系统的整体可靠性和安全性水平。

4.4 运行维护与应急管理机制完善

构建以防预性维护与状态检测为主的运维框架,对主控侧仪表系统的定期巡检,功能测试,系统评估以及重要设备使用寿命分析,能够在早期阶段暴露存在的风险点并及时采取相应措施予以防范,进而降低突发故障出现的几率。其中巡检工作需包括服务器、工程师站、网络交换机、I/O 模块等设备运行状况的查看,配合系统日志检查以及实时监控信息浏览等构成闭环管控模式。另外,编制应急预案,规定故障应对流程以及开展模拟训练等可以让操维人员在紧急时刻快速、准确地做出判断、解决问题、恢复正常,确保生产的持续开展。除此之外,实施培训考核制度,提升相关人员对于系统功能、控制策略以及各类报警的熟悉程度也可以有效的避免人员误操作给系统可靠性带来的负面影响。进而最大可能的使主控侧仪表系统可靠性的长期稳定发挥。

5 结语

DCS (Distributed Control System) 控制系统作为化工装置生产过程管控的核心平台,其可靠运行关系着整个装置的安全和效益。从系统组成到运行异常及影响因素的全方位剖析能够发现,软硬件、通讯以及管理和其它各方面综合因素交织在一起,共同制约着主控端系统的可靠水准。唯有在技术进步和管理水平同步发展的前提下,不断优化系统结构、完善设备选型、强化运维手段,才能达成主控端仪表系统长周期可靠的目标,为主控端仪表系统乃至整个化工装置的安全、经济和有效生产保驾护航。

[参考文献]

- [1]宋一歌.化工装置仪表与控制系统失效的原因与改进措施[J].中国仪器仪表,2025(2):74-77.
- [2]谢丽玲.化工装置安全仪表系统可靠性提升策略及案例分析[J].化工管理,2025(32):105-108.
- [3]彭晓阳.大型化工装置仪表自控系统的故障应对措施[J].化工管理,2022(36):139-141.

作者简介:先杰(1997—),毕业于成都信息工程大学,网络工程专业,主要研究方向为化工仪表及自动化。

阀门内流场压力损失分析及结构优化设计

王晓峰

石特阀门股份有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 阀门是流体输送系统过程中一个重要的控制部件, 其工作的性能对整个系统的运行效率与稳定性有着直接性的影响。在衡量其核心性能中, 压力损失是一项重要的指标, 压力损失不仅会造成能量的损耗, 而且会增加运行成本, 甚至会导致一系列问题的产生, 例如噪音、流程紊乱等。鉴于此, 文章研究基于流体力学基本原理深入剖析了阀门内流场压力损失的产生机制以及主要的影响因素, 基于实际情况提出了一系列优化方面结构的方法, 进一步降低阀门压力损失, 提高系统的运行效率。

[关键词] 阀门; 内流场; 压力损失; 结构优化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18609

中图分类号: TK263.72

文献标识码: A

Analysis of Pressure Loss in Valve Flow Field and Structural Optimization Design

WANG Xiaofeng

Shite Valve Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Valve is an important control component in the process of fluid transportation system, and its working performance has a direct impact on the operating efficiency and stability of the entire system. In measuring its core performance, pressure loss is an important indicator. Pressure loss not only causes energy loss, but also increases operating costs, and may even lead to a series of problems such as noise and process disruptions. In view of this, the article deeply analyzes the mechanism of pressure loss in the flow field inside the valve based on the basic principles of fluid mechanics, as well as the main influencing factors. Based on the actual situation, a series of structural optimization methods are proposed to further reduce valve pressure loss and improve the operating efficiency of the system.

Keywords: valve; internal flow field; pressure loss; structural optimization

引言

在石油化工、水利水电、城市供热等多种工业及民用行业中的流体运输系统均是必不可少的重要组成环节, 在此系统之中阀门起着调节流量、截断流体、控制压力的作用, 而阀门的质量好坏对于整个系统的运行品质有着决定性的意义^[1]。在阀门的工作过程当中, 由于流体经过阀门内壁时, 流道形状变化、流体自身黏性及流动态发生变化等原因不可避免地存在压力损失, 压力损失将造成流体运输过程中不必要的能量损耗, 增加系统工作成本^[2], 并且过大的压力损失会诱发流场分离、旋涡等不规则流动, 带来振动噪音, 导致阀门内件磨损加快, 缩短阀门寿命^[3]。

近几年, 在节能减排理念的影响下, 如何降低流体运输中的能耗是发展的主要趋势之一, 其中减小阀门的压力损失是关键所在。现有的研究工作主要是对特定条件下阀门压力损失进行仿真计算或者试验测量, 较少开展有关压力损失的基本机理以及具有普适性的阀门结构改进方法等方面的研究。因此, 本文从基础理论层面出发, 分析阀门内流场压力损失的产生原因与影响因素, 提出具有通用性的结构优化设计方向, 旨在为阀门的设计与改进提供简洁、实用的理论指导, 降低阀门压力损失, 提升其工作性能。

1 阀门内流场压力损失的基本理论

1.1 压力损失的定义与分类

阀体内流动的压力损失是流体在阀门内部从进口到出口处, 因受到的各种阻力而造成的静压头减少量。依据引起阻力原因的不同, 可分为沿程阻力损失和局部阻力损失两部分, 这是流体力学上将管路系统的压力损失所作的基本划分方法, 同样适合于阀内流场计算。

沿程阻力损失是流体在阀门内部均匀通道内流动时, 因流体分子之间产生的内摩擦力及流体与通道壁面间产生的外摩擦力而产生的阻力损失。该阻力损失主要取决于流道长度、壁面粗糙程度、流体黏性等因素, 它主要发生在阀门的直管段部位。局部压力损失是指介质流过阀内流道形状发生突然变化的地方(例如阀座、阀芯、流道转弯处等等)的时候, 因为流场分离、产生漩涡、流速重新分布等原因产生的压力损失。在阀门内部, 由于其结构的复杂性, 局部压力损失往往远大于沿程压力损失, 是阀门总压力损失的主要组成部分。

1.2 压力损失的产生机制

根据流体力学理论可知, 在阀门中由于流场压力产生的压力损失实质上就是流体的机械能消耗的过程, 它主要

由流体黏性和流态的变化引起。在流体不运动的情况下，流体内部分子间只有作用力而没有能量耗损现象出现，一旦流体发生运动，由于流体黏性的存在就会导致流体内部产生切向应力，引起相邻流层间的相对运动，剪切应力作用将部分机械能转变为热能而形成沿程压头损失。

而局部压降产生的机理则更为复杂，在经过阀门的阀芯、阀座等部位时，流道截面突变收缩或者扩张增大，流体的流动速度会发生骤增或骤减的变化；在流速较高的区域中，由于流体具有较大的惯性力占优势，会克服黏性力作用从流道壁上脱离出来，从而形成回流旋涡区域。在旋涡区域内，流体会产生强烈的乱流现象，一方面由于流体质点之间的碰撞、摩擦而造成很大的能量耗散；另一方面因速度重分布而导致流体内部压力梯度的变化也增大了压损。此外，流体的流动状态（层流或湍流）也会影响压力损失的大小，湍流状态下流体的紊流程度更高，压力损失通常远大于层流状态。

2 阀门内流场压力损失的主要影响因素

2.1 阀门结构因素

阀门结构是影响内流场压力损失的最核心因素，其流道设计、阀芯结构、阀座形式等均会直接改变流场的分布状态，进而影响压力损失的大小。

流道结构上，流道的截面形状、尺寸变化情况及粗糙度是否直角转弯、突变等会对压力损失产生很大的影响。采用圆形、椭圆形等流线型截面形状的流道，可减小流体流动过程中产生的摩擦阻力和局部扰动造成的压力损失；而方形、三角形等非流线型截面形状的流道，易发生流动死区及漩涡，增加压损。另外，流道截面尺寸的变化应该尽可能平滑，不应存在突然扩张或者收缩的结构，这样会导致流场的分离加剧，使得局部的压力损失急剧上升。

流道壁面的光滑程度也会影响沿程压力损失，壁面越粗糙，流体与壁面之间的摩擦力越大，压力损失也就越大。阀芯结构是影响阀门流量特性和压力损失的重要因素之一，不同的阀芯形状（球型阀芯、锥型阀芯、平板型阀芯等）形成不同的阀芯流道。球型阀芯流道比较平滑，介质流过阀芯时受到干扰较少，产生的压损也小；平板型阀芯开启时其阀芯流道面积变化较大，会产生比较大的局部压损。另外，阀芯的开度大小也会对压损造成影响，在开度较小时，由于流通面积较小，速度较大，压损明显增大；在开度增大过程中，流通面积变大，速度减小，压损随之减小。阀座的形式及与阀芯的配合精度也会对压力损失产生影响。阀座与阀芯间的密封间隙、接触方式等都会改变流体的泄漏量与流动路径，当密封间隙较大时会产生泄漏流而造成能量损耗，而配合精度不够则可能出现局部流道狭窄、涡流等情况，增大了压力损失。

2.2 流体性质因素

流体黏性是流体产生内摩擦阻力的原因所在，也是沿程

压降产生的主要原因。流体黏性愈大，则流体内部摩擦阻力及流体同流道间壁的外摩擦阻力也愈大，流体在流动过程中消耗的能量也就愈多，其压力损失也就愈大。如重油等黏度大的流体流过阀门时，它的压损比水、空气等黏度小的流体大得多。

密度主要影响的是流体的惯性力，从而对局部压降产生影响；密度较大的流体在流动过程中由于流道形状发生变化所受到的惯性力较大，流场出现分离的情况更加显著，产生的漩涡更大，因此局部压降更大。另外对于可压缩流体（比如气体），其密度会随着压力以及温度的不同而发生改变，此外，在流动过程中还可能伴随有膨胀、压缩等情况的发生，使得压力损失更为复杂；对于不可压缩流体（例如液体），其密度变化较小，压力损失较易计算及分析。

2.3 流动工况因素

速度是决定压力损失的一个重要指标。依据流体动力学原理可知：沿程压力损失与速度的平方成正比（湍流状态），局部压力损失也与速度的平方成正比，所以速度越大，压力损失就越大；流量又与速度紧密相关，在流道截面一定的条件下，流量越大，速度越高，压力损失就越大。

流态（层流或者湍流）是由雷诺数决定的，当 Re 小于临界值的时候是层流状态，而大于临界值则为湍流状态。处于层流状态下的流体流动性比较稳定，各流层之间产生的干扰较少，此时的压力损失主要是由于黏性力导致的，并且其增长比较缓慢；而在湍流状态下的流体流动性不稳定性较高，在流体质点之间会产生激烈的碰撞以及混合过程，快速的压力损失增长。在绝大多数工业应用中，经过阀门的流体都处在湍流状态，因此湍流状态下压力损失的设计及分析是阀门设计的关键点。

3 阀门结构优化设计的核心思路与方法

阀门结构优化设计的核心目标是通过改进阀门的流道形态、阀芯结构、阀座形式等关键部件^[4]，减少流场分离、漩涡等不稳定流动现象，降低沿程压力损失与局部压力损失，同时保证阀门的调节性能、密封性能等基本功能不受影响。基于前文对压力损失影响因素的分析，本文提出以下结构优化设计的核心思路与常用方法，见表1。

表1 结构优化设计的核心思路与常用方法

优化方法	核心优化方向	针对的压力损失类型	预期优化效果
流线型流道设计	平滑流道过渡，减少形态突变	局部压力损失	减少流场分离，降低漩涡损耗
提高流道壁面光滑度	降低壁面摩擦系数	沿程压力损失	减少流体与壁面摩擦力
流线型阀芯设计	优化阀芯外形，引导平稳绕流	局部压力损失	降低阀芯周围流场扰动
弹性阀座设计	提升阀座阀芯配合精度	局部压力损失	减少泄漏流，优化流道顺畅性

4.1 优化流道设计，减少流动阻力

阀门流道的设计优化是减小阀门压力损失的重要手

段,其基本思想就是让流道尽可能地按照流体自身的运动方向来走,以减小流动阻力及能量损耗。常见的阀门流道设计优化方法主要有以下几种:

一是采用流线型流道设计。将阀门内部的流道截面设计为圆形、椭圆形等流线型形状,避免采用方形、三角形等非流线型截面,减少流道壁面对流体的扰动;同时,保证流道的平滑过渡,避免出现突然扩大、缩小或急剧转弯的结构。对于流道的转弯处,采用大曲率半径的圆弧过渡,减少流场分离现象的产生,降低局部压力损失^[5]。

二是加大阀内流通通道面积,在不破坏整个阀门的紧密性和强度的情况下,对阀门的内流通通道进行适当的扩大,减小流体经过阀门的流动速度。由于压力损失大小与流体流速的平方呈正相关关系,因此流体流速降低后可有效减小其压力损失。但与此同时也要注意的,流道截面积不可过分放大,否则会导致阀门体积太大,影响阀门的安装及使用。

三是增加流道壁面光滑度。通过采取高精度加工工艺、壁面抛光处理等措施来增加阀门内部流道的壁面光滑程度,以减小流体与壁面间的摩擦阻力,降低沿程压力损失,并且光滑的壁面也可以减小流体在壁面附近产生的旋涡从而减小局部压损。

4.2 改进阀芯结构,优化流量特性

阀芯作为阀门中的核心控制机构,其结构形式对阀门的流场及压损有着直接的影响作用。而阀芯结构优化的主要思想就是改善阀芯的外形以及开阀的形式,使得流体经过阀芯的过程中流道的变化更加平滑,从而降低流场的分离和旋涡形成情况。具体的优化措施为:

一是采用流线型阀芯。把阀芯形状设计成流线型(如球型、纺锤型等),代替原来常见的平板型、锥形阀芯等非流线型结构。流线型阀芯可引导流动的流体平滑地流过阀门,减小流体在阀芯周围绕流的情况,从而降低局部压力损失;此外,流线型阀芯还对阀门流量特性有改善作用,让流量调节更加平缓。

二是改善阀芯的开启形式及开启度区间。对截止阀、闸阀类的阀门可以改进阀芯的开启形式,使阀芯在开启过程中流道截面逐渐变大,并避免出现流道突然开启的现象;合理设置阀芯的开启度区间,在常用的工况下,阀芯处于大的开启度的状态,减小速度,减少压损。另外还可以通过在阀芯上开导流孔、导流槽等形式来引导流体的方向,减少流场混乱。

4.3 优化阀座结构,提升配合精度

阀座与阀芯的配合质量直接影响流体的泄漏量与流动路径,进而影响压力损失。弹性阀座具有一定变形量,

在阀芯关闭时能起到良好的密封作用,减小泄露;当阀芯打开时,能随着阀芯动作而适当形变,使流道更加通畅,减小局部阻力。同时,弹性阀座还可减小阀芯与阀座间的磨损,提高阀门寿命。利用高精尖加工设备及加工技术,减小阀座和阀芯的尺寸公差以及形位公差,保证二者间的配合间隙合理;合理的配合间隙可避免产生局部狭窄流道的现象,减少流体在流动过程中产生的扰动,从而降低压力损失,减少泄漏流,避免浪费能量。

4.4 整体结构集成优化

阀门结构优化设计并不是单独对其中某一个零部件进行优化,而应从整体入手,进行集成化优化,在对流道、阀芯、阀座等关键零件进行优化的同时,还要考虑到阀门的进出口连接方式、阀体外形结构等等,并通过建立阀门内流场数值模型,仿真分析不同结构参数下流场的分布以及压力损失的情况。可以找出结构设计中的问题,为优化设计提供科学依据。数值模拟技术成本低、效率高、可重复性好等特点能有效缩短优化设计周期,提高优化效果。

5 结论

本文基于流体力学基本原理,其中影响压力损失的主要因素与阀门的结构,流体性质以及流动工况存在紧密联系,其中阀门结构(流道设计、阀芯结构、阀座形式等)是最关键的影响因素。通过对影响因素的分析提出了一系列的优化对策,其中阀门结构优化设计的基本思路为减少流动扰动及流场分离,降低摩擦阻力和局部阻力,主要手段有优化流道、优化阀芯、优化阀座以及结构整体集成化等,通过结构优化可实现阀门压力损失的有效降低,提高阀门的工作性能。

[参考文献]

- [1]张威.阀门密封技术研究现状及发展趋势分析[J].阀门,2020(5):21-24.
- [2]葛永松.石化行业阀门泄漏原因分析及对策[J].化学工程与装备,2022(3):156-157.
- [3]李东安,何同均,王柳,等.阀门泄漏检测方法探析[J].检验检测,2022(6):60-62.
- [4]蔡定硕,陶正良,严春雷.高压蒸汽阀中气流流动特性的定性分析[J].汽轮机技术,2003,45(01):36-38.
- [5]相晓伟,毛靖儒,孙弼,等.汽轮机调节阀通流及损失特性研究[J].西安交通大学学报,2006,40(7):762-766.

作者简介:王晓峰(1985.3—),毕业院校:河北科技大学,所学专业:机械设计制造及其自动化,当前就职单位:石特阀门股份有限公司,职务:技术部长,职称级别:工程师。

调节阀定位器基本工作原理与输出非线性误差分析

何健华

四川天华化工集团有限公司, 四川 泸州 646207

[摘要] 电动调节阀执行机构在工业自动控制领域有着重要的地位, 它所起的作用是对调节阀的行程进行精准控制。文章首先阐述了调节阀定位器的工作原理, 其中包括结构及功能介绍、工作的具体过程剖析等内容。其次着重分析了产生输出非线性误差的因素, 分别从机械结构原因、摩擦力原因、传感器自身非线性原因以及气动原因四方面入手展开论述。再次探讨了非线性误差的危害, 主要有精度降低、波形失真、稳定性差及可靠性不足四个方面。最后指出误差抑制与性能提升的思路, 即机械结构调整、增设补偿措施、传感器线性化改进及智能化控制策略。

[关键词] 调节阀定位器; 非线性误差; 工作原理; 控制性能; 误差抑制

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18613

中图分类号: TP273.5

文献标识码: A

Basic Working Principle and Output Nonlinear Error Analysis of Regulating Valve Positioner

HE Jianhua

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646207, China

Abstract: The electric control valve actuator plays an important role in the field of industrial automatic control, and its function is to precisely control the stroke of the control valve. The article first elaborates on the working principle of the regulating valve positioner, including an introduction to its structure and function, as well as an analysis of the specific process of operation. Secondly, the factors that cause output nonlinear errors were analyzed in detail, starting from four aspects: mechanical structure reasons, friction reasons, sensor nonlinearity reasons, and aerodynamic reasons. The hazards of nonlinear errors were discussed again, mainly including reduced accuracy, waveform distortion, poor stability, and insufficient reliability. Finally, the ideas for error suppression and performance improvement are pointed out, including mechanical structure adjustment, addition of compensation measures, improvement of sensor linearization, and intelligent control strategies.

Keywords: regulating valve locator; nonlinear error; working principle; control performance; error suppression

引言

调节阀是工业自动控制系统的重要组成部分, 而调节阀所配置的阀门定位器也是至关重要的一环, 阀门定位器的主要任务就是接受控制器发出的控制信号并准确无误的将其传达给控制阀进而对阀门的开启程度进行精确控制, 所以研究调节阀定位器的工作原理及输出非线性误差对控制系统的完善有着深远的影响。

1 调节阀定位器基本工作原理

调节阀定位器是进行阀门位置控制的一种设备, 通过接受控制信号带动阀门运作。调节阀定位器的工作原理主要是基于多个部分相互协作, 使阀门可以准确地移动到指定位置。

1.1 定位器结构与功能概述

电控调节阀定位器结构由输入单元、控制单元、执行单元以及反馈单元四部分构成, 其中输入单元负责从控制器处获取信号, 控制器对信号进行解析计算得到驱动命令, 执行单元依据命令驱动阀门动作, 反馈单元监测阀位并将结果送入控制单元; 电控调节阀定位器的作用是对阀门位置进行闭环控制, 提升调节准确性和快速性, 在工业场合下往往应用于要求严格流体控制的地方如化学反应装置与火力发电机等。电控调节阀定位器的构造对其功能有着

重要影响, 所以认识它的组成是探究其工作机理的前提, 电控调节阀定位器就是通过这几部分结构协同运作来保障阀门可以精确地响应控制信号。

1.2 工作原理详细分析

调节阀定位器的工作原理是从接受输入信号开始。当控制器给出一个电信号或者气信号传输给定位器的时候, 输入单元会把信号转换成适合内部使用的信号。接着控制部分将接收到的信号跟反馈回来的信号进行对比, 得出偏差量并制定相应的补偿方案。执行器一般由气动或电动驱动, 其作用是依据方案输出出力或者位移变化, 进而带动阀杆动作。反馈装置由传感器构成, 用于检测阀体的位置并将位置信号传送给控制组件。此闭环流程一直重复直至阀位达到目标值为止。简单来说, 调节阀定位器的工作方式就是在不断地修正以抵消偏差, 从而达到精准操控的目的^[1]。结合有关论述, 调节阀定位器的工作原理是建立在负反馈的基础之上, 有利于提升整个系统的稳定性及准确性。从具体解析来看, 每一部分都很重要, 一旦其中一个元件发生损坏就会导致整个控制流程失灵。

2 输出非线性误差来源分析

输出非线性误差是说调节阀定位器在工作过程中, 其

输出相对于输入产生的偏离直线特性的差值,它产生的原因很复杂并对控制系统影响极大。

2.1 机械结构因素

机械结构本身存在的缺点是非线性误差产生的基础物理原因,调节阀定位器及其所带的阀门内部具有大量机械零件包括但不限于:连杆、凸轮、齿轮、轴承、阀杆等等,在制造与安装中不可能避免地存在尺寸偏差、位置偏差、形状偏差以及各部分间的装配间隙,机构运动时,这些间隙会引起“空程”或“回差”,即正向行程与反向行程的不重合;其次,机械零件在其受到外力作用下会发生弹性形变,在大多数情况下形变量与作用力不成严格的线性关系,特别是在材料快要达到其屈服点的时候尤为突出,如阀杆在较大的介质推力下会发生细小的弯曲进而使得执行机构位移同阀芯位移两者间的关系发生失真;再者就是长时间的工作下带来的机械磨损使得接触表面发生形貌变化,间隙变大或者出现偏磨现象从而引起可变的乃至时间相关的非线性。

2.2 摩擦力影响

摩擦力,尤其是静摩擦力和库仑摩擦力,是最具破坏性的非线性成分之一,在定位器和阀门中广泛存在,它们分布在阀杆和填料函之间,执行结构活塞和缸体之间,各导向轴承上。典型的摩擦非线性特性为:当作用力小于等于最大静摩擦力时机构处于静止状态;而一旦超过最大静摩擦力机构运动起来后,阻力又突然减小至动摩擦力水平。这种粘-滑效应使得小信号情况下系统毫无反应,在起始时刻又会带来突跃。对于低速或者微小位移调整而言,摩擦的影响就显得更加严重了,会使阀门动作呈现所谓的“爬行”或“跳动”,严重影响控制过程的连续性和准确性。更糟糕的是,摩擦力的值并不是固定的,它受接触表面状况、润滑程度、预压力、运行时间等的影响,是一个随着时间变化的非线性干扰项。传统的经典控制理论所使用的线性化模型很难刻画它的动态过程,所以在高精度运动控制系统中如何进行有效的摩擦力补偿就成为了长期以来的一个难点问题。

2.3 传感器非线性

作为反馈单元的重要组成部分,位置传感器的非线性会导致控制系统的直接和“诚实”的错觉。只要传感器输出信号呈现非线性,即使阀芯真实位移是线性的,控制系统也误以为有偏差并作出补偿,在系统层面人为创造出非线性。电位器式传感器有可能出现电阻分布不均或滑触点接触电阻不稳定的情况;LVDT传感器在零点附近可能有非线性的区域并且它的输出容易受到温度漂移的影响;磁致伸缩传感器尽管精度很高但是它的输出特性与波导材料,温度等多种环境条件相关。传感器非线性一般表现为零点漂移、灵敏度漂移,还有就是饱和非线性等等。并且传感器非线性的程度随着传感器的老化、环境温度的变化、

以及电磁干扰等情况的变化而不断变化,使得我们之前所做的标定结果慢慢失效。所以传感器本身的精度和可靠性也是制约着定位器整体线性性能的主要短板之一。

2.4 气动系统特性

而对于常用的气动调节阀定位器来说,气动回路本身固有的动态特性就是较大的一个非线性因素来源。首先是气动执行部分即膜片式或是活塞式的气压变力的关系并不是理想的线性关系,气膜的有效面积或者活塞所受摩擦力都会随着位置发生变化;其次是供气压力的变化会导致输出力的改变,虽然说定位器内部会有稳压措施但是在实际使用过程中不可能完全稳定;再次就是气体的可压缩性质决定了气腔的充气排气是一个非线性的动态过程,其对应的气室时间常数也随压力容积等的不同而不同,在整个行程上定位器的反应速度也就不会相同;还有就是气流经过狭缝通道例如喷嘴挡板、放大器时气流大小与压差之间并非线性关系,在低信号情况下尤为明显;以及气路上的细微漏气造成的不确定稳态误差。以上各点均会造成气动定位器输入输出之间的复杂的非线性动态特性,不利于快速准确的定位。

3 非线性误差对控制性能的影响

调节阀定位器输出的非线性误差也不是单独存在的,它会在控制系统中通过闭环不断传递并放大,给整个系统的控制品质带来了严重的连贯性的危害。

3.1 静态精度下降

静态精度用来评价定位器处于稳定状态时跟踪给定值的能力,而非线性误差也就意味着阀门处于不同的开启程度时其定位精确度各不一样。比如说在整个行程中的某一区间内的位置十分精准但是到了另外一段,特别是行程接近极限位置时会产生很大的偏差。这就造成了工艺变量比如流体的流量或者压强的给定值和测量值在整个变化范围内不能够很好的一一对应起来^[2]。对于那些对比例或者量有严格要求的一些化工工艺来说,在进行化学反应加料以及精馏等单元时一旦发生静态精度的这种不均匀下降的现象那么产品的质量将会不过关,产率也会受到影响,严重情况下还会造成爆炸着火之类的危险事故的发生。而静态误差的存在又使运行人员不得不用加宽控制环路的零位差或者是允许更大的偏差来应对,进而导致了整条生产线的自动控制水平下降。

3.2 动态响应畸变

理想的线性系统的不同大小或者不同的工作点下的阶跃响应应该是相似的形状,而非线性的误差会导致定位器的动态响应严重失真,在较小的设定值变动时系统会出现由于死区的存在而不反应的情况,在较大的设定值变化的情况下又会出现由于饱和或者增益的变化导致过大超调量或者震荡的现象,其响应时间、上升时间这样的动态指标不再是固定的值而是在各工作点上剧烈波动。这样不确定的动

态过程会使已经调节好的控制器参数例如 PID 参数只能适用于特定的工作条件,在工作状况发生变化后控制性能就会大幅下降。对于那些要求迅速响应的过程来讲像压力或者液位的紧急调整,动态过程的失真会导致系统调节时间增长从而不能有效的尽快消除扰动影响生产的稳定性。

3.3 控制系统稳定性风险

依照自动控制原理可知,加入非线性因素会导致控制系统的频率特性发生变化,有可能削减系统的相角和幅值裕量。一些特定形式的非线性如间隙、饱和及滞环可能会导致产生自激振荡即所谓极限环震荡,在系统处于稳态下,表现为一种长期存在、恒定幅度的周期性震荡。该种自激振荡不但降低了控制性能而且会造成机器设备的疲劳损坏。再者,对于一个非线性的系统而言可能存在多个平衡位置或者复杂的动力学特性,当满足一定条件时,即使是很小的一个干扰也可能使系统偏离稳定的平衡点乃至不稳定。而在复杂多重回路互联控制或者串级控制系统当中,一个阀门的非线性会影响到与其关联的所有其它环节,使得整个机组的稳定研究及设计变得更加困难和危险。

3.4 长期可靠性问题

非线性误差又常常伴随着零部件磨损老化等因素互相叠加,产生恶性循环的正向反馈。比如,间隙产生的非线性冲击加剧磨损,间隙变大,非线性更严重;摩擦力的不稳定变化也加重了“黏滑”的程度,造成阀杆和填料磨损乃至损坏不均。传感器的非线性随着时间推移发生漂移得不到修正,定位误差就会越来越大^[3]。种种原因叠加在一起的结果就是:调节阀定位器产品的性能随着时间推移逐步而且加快恶化,平均无故障间隔时间变短,不得不提前进行维修保养,设备全寿命周期费用上升。可靠性降低对需要连续长时间运转的现代化工厂、电厂等企业来说,也就代表着更大的意外停车检修几率以及更高的维护支出。

4 误差抑制与性能优化方向

针对调节阀定位器输出非线性误差的问题应从硬件设计改进及软件算法补偿两方面入手,寻找可行有效的方案来改善性能指标。

4.1 机械结构优化

机械结构优化是对调节阀定位器机械部分的设计进行优化从而减小误差。如使用精密机械加工件、降低运动副间隙及应用耐磨材质可提升线性度;机械结构优化还包含减轻质量与增加强度以减弱形变因素的影响等。从研究来看机械结构优化最为直观,不过代价也最大。调节阀定位器的机械结构优化必须在性能与价格之间找到合适的折衷点才能具有性价比。因而机械优化是误差控制的前提。

4.2 摩擦补偿技术

摩擦补偿的方法指的是利用算法或者硬件的方式来消除摩擦力影响。如在控制器内增加一个摩擦模型,依据

不同的运行状况来对驱动力进行调节等都属于摩擦补偿的方法。使用摩擦补偿的方式能够优化低速性能并且降低迟滞性。有关资料证明,自适应式的摩擦补偿适用于变速情况。调节阀定位器的摩擦补偿方法必须进行在线运算,这就提升了控制难度。因此,摩擦补偿是一种有效的精确定位方法。

4.3 传感器线性化处理

传感器线性化是指采用软件或者硬件手段对传感器非线性的输出进行补偿的过程。如采用查找表法或者多项式拟合法将传感器信号与实际位移进行对应等。传感器线性化的应用能大大提升反馈准确性,但仍需定时校正。据一些文献报道,数字线性化也是现代定位器常用的措施^[4]。而调节阀定位器传感器的线性化还需要配合传感器本身的性能,量身定做。因此,线性化也是一种错误消除的重要举措。

4.4 智能控制算法应用

智能控制算法的应用则是采用先进的控制方式例如模糊控制器或者神经网络等对非线性误差进行控制。这类算法能够自动修正自身参数以适应系统的变动。智能控制算法应用于复杂的场合下具有良好的效果,但是较难得到实施。一些研究表明智能控制可以提升调节阀定位器的稳定性能与准确性。然而调节阀定位器中智能控制算法的应用需要有庞大的数据量以及计算量的支持,这也制约着它的推广使用。因此,智能控制是以后的发展趋势。

5 结束语

这篇文章系统地介绍了调节阀定位器的工作原理,并着重剖析了输出非线性误差产生的原因及所造成的影响并指出了误差抑制以及性能改善的研究方向。由本文研究可以发现非线性误差是由多种原因造成的并且严重影响着系统的控制品质。要想提高调节阀定位器的准确性和稳定性就要在机械机构、摩擦校正、传感元件以及智能控制等各个方面进行改进。今后随着科学技术的进步一体化、智能化将是发展方向。

[参考文献]

- [1]戴林,王德民,马榕.基于 VALVELINK 软件开展 DVC6200 定位器在线更换的应用实践研究[J].中国设备工程,2025(23):81-83.
- [2]姜天枢.控制阀智能定位器的应用与维护[J].中国仪器仪表,2025(8):88-91.
- [3]张剑虎.智能定位器用单边式电气转换器研制[D].浙江:杭州电子科技大学,2025.
- [4]曹锡超.气动调节阀故障原因分析及常见故障处理对策[J].石油化工技术与经济,2024,40(6):38-42.

作者简介:何健华(1998—),毕业于四川化工职业技术学院,工业过程自动化专业,主要研究调节阀、变送器方向。

压力表计量检定方法与精度控制研究

叶小芳

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]文章研究了压力表的计量检定与精度控制的问题。压力表属于工业测量行业中的重要仪表仪器,它的量值准确性直接关系着生产和产品品质的优劣。文章先分析了有关压力表的计量检定的方法,包含它的检定的工作原理、用到的标准器具、具体实施过程以及怎么计算检定的数据等等内容;然后介绍了哪些原因会导致压力表出现示值偏差的情况,有制造上的设计缺陷的原因、使用过程中的人为因素、受到周围环境条件的影响和其他老化损耗的因素等几个方面;接着给出了对压力表采取的一些精度控制手段,主要是合理的结构设计,按时开展检定校验,改善安装的工作环境,及时做好相应的保养维护等工作;最后是对检定技术以及精度调控未来的发展趋势作出展望,主要体现在自动化的检定模式和引入新型的传感材料等方面。

[关键词]压力表; 计量检定; 精度控制; 不确定度

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18612

中图分类号: F203

文献标识码: A

Research on the Calibration Method and Accuracy Control of Pressure Gauge Measurement

YE Xiaofang

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: This article studies the issues of metrological calibration and accuracy control of pressure gauges. Pressure gauges are important instruments in the industrial measurement industry, and their accuracy is directly related to the quality of production and products. The article first analyzes the methods of metrological calibration for pressure gauges, including the working principle of calibration, the standard instruments used, the specific implementation process, and how to calculate the calibration data; Then, the reasons for the deviation of pressure gauge readings were introduced, including design defects in manufacturing, human factors during use, the influence of surrounding environmental conditions, and other aging and wear factors; Subsequently, some precision control measures were proposed for the pressure gauge, mainly including reasonable structural design, timely calibration and verification, improvement of the installation working environment, and timely maintenance and upkeep; Finally, prospects are made for the future development trends of calibration technology and precision control, mainly reflected in automated calibration modes and the introduction of new sensing materials.

Keywords: pressure gauge; metrological verification; precision control; uncertainty

引言

当前,我国国民经济正在朝健康良好的方向发展着,我国工业制造行业的覆盖面及影响力越来越大,因而压力表被应用于各行各业当中,但由于压力表出厂时存在的工艺上的偏差,制作材料上的差异以及日常使用中的磨损等原因都会造成压力表最后所呈现出的结果在准确性和稳定性上存在一定的偏差、失误,从而给工业生产带来严重的安全隐患。

1 压力表计量检定方法

1.1 检定原理与标准器

压力表检定,大多数情况下都是用的比较测量法,即简单地说就是把被检测的压力表跟一个比较精确的标准器放在同样试验压强之下比对读数,所用的标准器主要是指活塞式压力计、数字压力计以及压力校验仪等等这些仪器仪表,都比一般压力表精确稳定可靠很多,据中国计量院在某些文章中有提及到,选用标准器具的时候一定要谨慎核实它的量程范围适不适合,不确定度等级符不符合要

求等等问题才能保证整个检定过程的良好溯源性。实际操作时检验人员必须了解清楚自己所使用的标准器的使用规范,才能避免因不当的操作手法造成的附加误差。

1.2 检定步骤与操作规程

检定的具体流程,绝大多数是由准备步骤、加压步骤、读数步骤及判定步骤这几部分组成的。首先是检查压力表的外表有无严重损伤现象,它的标识是否清晰完整等方面来确认它是否符合参加检定的基础条件。其次是通过用某一类的压力发生装置,按规范逐级地对各个检测点进行加载;同时还要各自记录下被检测压力表和标准仪器在每个压力位置上的读数。而且文件中还明文指出增压降压都应当循序渐进,严禁急升急降避免给仪表内部精细零件造成巨大的冲击导致损坏。检定人员必须依照文件的规定一步一步来检定,最好不要跳过任何一个环节。比如检定时在一个确定好的压力点上必须待示值稳定后再观察记录,为减少随机误差通常还会在这个压力点重复测两三次求平均值之类。像这样都按规定做到的话确实可以提高检定结

果的再现性水平。但实际上工作中有些时候检定员因为赶时间或其他原因会偷懒省略重复测量这个步骤从而导致测量结果出现本不应该出现的波动。

1.3 检定数据处理与不确定度评估

数据处理这个模块主要是误差的运算以及最后是否合格的评判。误差大多是通过被检测压力表读数减去标准器读数,然后再把得到的误差数值与它规定出来的最大的允许误差作对比;不确定度评估这部分就需要分析很多的因素诸如:标准仪器本身的不确定度、外界条件改变带来的不确定度还包括观测者自身读数过程中产生的差异等等。根据那个广泛使用的ISO/IEC指南98-3的看法来说,不确定度应该用A类和B类两种评估方法进行估计,例如对同一个压力检测点重复测量得到的一系列数据可通过计算得到它的标准差这就属于A类不确定度来源的一部分。这一环节的开展是为了让校准结果从理论上说是事实基础的,而且是可靠的。但在数据的分析过程中有时不免会出现一些运算错误或者忽视了一些量之间的联系等因素而造成最后判断的失准。所以一家有责任心的检测机构有必要设立相关的数据复核政策以这种方式强化对品质监管程度。

2 压力表精度影响因素分析

2.1 设计与制造因素

制造上的问题即是指具体的加工工艺以及装配过程中的品质管理。比如,内部最核心的那个弹簧管所采用的材料品质若是不过硬,在受压时就容易出现弹性的迟滞现象;再如表盘上刻度线如果印制得不够精细,则会导致读数时刻度偏差很大。制造商在加工过程中必须要对每一个公差进行严格把关并且注重每一环节的测试检验。然而实际上很多厂商为了节约成本,会选择使用一些比较廉价的原料,这无疑会使仪器在未来长久的使用中变得不可靠。

2.2 使用条件与操作因素

使用环境这个概念就比较广泛了,包括压力表所处的实际工作的压力范围,它接触到的工作介质类型,以及它是怎么被人们装上去的;而使用因素就得看使用者的技术水平,还有就是在日常中有没有对它加以维护。当压力表处于超出其测量范围的工作状态的时候很容易发生塑性的变形;当被测量的介质非常有腐蚀性的时刻渐渐腐蚀压力表内部零件。^[1]如果工人师傅们在安装时不按要求胡乱安装,如,把仪器斜放,这就又增加了一项附加误差量。又或者有一些企业的压力表就设置在一个振动幅度较大的地方,因此导致压力表的示数不停地摆动使人难以观察读数。像这样的使用情况的变动都会对其精度产生较大影响,我们必须要高度重视起来。

2.3 环境因素

环境因素如温度、湿度和振动都对压力表的工作性能有着影响。温度变化会引起物体的热胀冷缩,从而影响到

弹簧管的弹力性能;在潮湿环境中容易引起生锈。至于振动那就更明显了,这会让指针变松或者加速机器内部零件磨损。一些论文中指出温度每变化10°C,某些类型的压力表会出现大于0.5%的附加误差。可见,环境控制对于精度管理来说是多么的重要。但是在实际工作过程中,环境却经常被人们忽视,在压力表放置在户外的时候这一点尤其突出。

2.4 老化与磨损因素

老化与磨损,这是在压力表长期使用中的一个正常的、无可避免的现象。弹簧管会因无时无刻都在承受着外力而疲劳;轴尖会在反复摩擦中磨损;垫圈等等会在岁月流逝中老化等等,都是一点一滴地在侵蚀着精度。比如一块压力表经过几千甚至上万次的加压降压过程之后它的弹簧管可能就会有了一定的塑性变形,再也回不到从前的样子了。磨损的情况又与使用频率的高低以及平时是否细心维护有着密不可分的关系,一块从来没有接受过定期检测的压力表它的准确率下降的速度一定是很快的。对这个影响因素的分析其实也凸显了准确性管理工作中的仪表全寿命管理的重要性。

3 压力表精度控制策略

基于对压力表精度影响因素及对应控制对策的深入剖析,还应进一步研究各因素综合作用对企业实际使用的压力表精度的影响以及对精度控制工作的启示。企业的工业生产环境复杂多样,一台压力表通常会遭受多个影响因素的同时作用,如在一个化学工艺过程中,一块压力表可能会受到过程流体腐蚀性、温度变化还有机械震动的联合作用,这块压力表发生精度下降可能是由几个影响因素共同造成的,而不是单独某个原因引起,所以针对这几个因素进行精度控制就不能够只对其中的一个单独采取行动,而应当树立一套系统的管理观念。在具体管理过程中要结合所涉及压力表的实际使用场合,明确主要影响因素并据此拟定具体的控制办法,比如对于震动严重场合下的压力表来说不仅要在安装时做好加固措施,同时也要选择抗震结构或者加装减震部件并且适当加密检定频次。这样的系统化精度管理思路有利于从根本上提高企业所用压力表示值的可信度及稳定性进而延长其使用寿命,同时也为公司开展分类管控、区别对待提供了参考,使公司能够在保障安全和质量的同时合理安排人力物力财力降低维修成本。

3.1 设计优化与材料选择

针对设计上的改进问题应该把目光放在具体的一些构造上的优化、精度上的提升等方面,比如可以采用一些数字式的感应器来替代一部分机械部件减少因为机械摩擦而产生的误差,在选材上可以多选择用一些不锈钢或者是一些特殊的合金之类的材质以增强其耐腐蚀性等等。厂家应该多参考一些先进的标准,比如我们中国的国家标准GB/T1226就很不错,就可以将其作为自己设计上的标准。当然设计上的升级也应该考虑到成本和性能的问题,不能

一味地追求设计冗余的问题。这个方案如果真的实施起来是可以在根源上解决压力表出厂时的基本精度度问题的。

3.2 定期检定与校准管理

定期进行检定,这在精度管理全流程里面是最重要的步骤,它通过定期对压力表进行对比来检测压力表的各项参数是否还在允许范围之内。校准管理指的是编制合理的检定计划并且选取具有相应能力的合法检定单位并保存所有检定结果档案。根据检定规则的基本要求,压力表检定周期最长原则上不超过六个月。实验室或者企业的计量管理部门应当设立计量数据库便于检索每一台仪器的历史检定记录。举例来说,目前部分企业已经使用信息平台管理所有仪器的检定日期以此避免出现漏检的情况。如此显然提升了计量管理水平^[2]。但在部分情况下受限于条件制约,定期检定这项任务时有延误导致精度长期不能达标。

3.3 使用环境控制与操作规范

使用环境的控制,这就需要我们对其进行控温,隔振,防尘等一系列措施,而操作方法就需要使用者经过一定培训并严格按照规定步骤执行。例如在一个精密度要求高的测试中我们要把压力表放在恒温实验室里;我们在对它进行操控的过程中应尽可能缓慢地升降压。环境控制如果能做到位确实是在很大程度减少环境的影响的,但是环境控制这一点大多数时候它是取决于现场情况的,不大可能达到理想状态。

3.4 维护保养与故障预防

例行保养包括对压力表经常性的清扫,给该加油的地方加注油、更换陈旧零部件等等。而预防故障是通过设备定期检查及报警来实现的。如我们可每隔三个月就对一下压力表密封性能还好吗?指针还可自由转动吗?等问题进行一次询问,建立一个故障小册子,每次发生问题的时候都把它记下来,从而知道哪些是经常出现问题的地方^[3]。日常保养工作做好了是对仪表使用寿命的延长以及仪表准确度的保持有帮助的,这个政策需要表类使用人员跟负责维修的技术员相互协作才能完成。

4 检定与精度控制技术发展前景

4.1 自动化与智能化检定趋势

所谓的自动检定是指主要是通过机器人和特有的控制程序软件等来实现检定全过程的高度自动化,甚至完全无人化的操作;而智能化是指运用人工智能技术使机器能够自己分析检定数据,还能自己检查某些普通故障。比如一套自动的压力校验装置它可以同时检测大量待测的压力仪表,这就大大提升了检定的工作效率。有部分科技杂志指出自动检定大概降低了近百分之三十的人力成本,还能够提升检定结果的重复性。这个趋势如果延续下来是非常有可能从根源上解决目前检定方式中存在的人为因素

导致的各种失误问题的。

4.2 新型传感器与精度提升技术

新的传感器诸如 MEMS 传感器, 光纤传感器等都有着相当高的精度及较好的抗干扰性能。精度提升的方式更多的借助于对电子信息进行计算以及采用软件补偿算法来完成。比如增加温度补偿电路模块用来消除因外界环境温度改变造成的测试偏差,这些新兴的技术的应用都会让压力计逐渐向全数字、高度集成的方向进化^[4]。但新技术的应用同样要考虑是否能适用于已有的设备上,相关的规定是否能够同步更新。

4.3 标准体系与国际协调进展

标准体系其实一直在更新着,努力囊括进这些新出现的技术与方法。而在国际上,则是在积极寻求全球的度量衡系统可以得到统一,像那个国际法制计量组织实际上指的是 OIML, 常常发布一些意见,希望各个成员国都可以参照执行。而我们国家也是其中较为重要的一员,也在积极参与国际标准文件的制定以期提升国内仪表产品的国际市场竞争能力。这样的发展趋势有助于减少乃至扫清在国际贸易上的技术壁垒,规范技术差异。

5 结束语

本文较系统的探究了压力表的计量检定的方法及其精度控制的问题。而在经过一系列检定步骤的梳理、影响要素的探讨以及措施分析之后我们也认识到,实际上这个精度管理的工作并不是一项简单任务。未来对技术的发展展望也告诉我们,自动化的发展与各类新技术的引入都会促使本领域迎来巨大变革。值得注意的是我们认为精度管控事实上不仅仅是简单的技术性问题更是管理和协调各路标准的问题。作为一个对此进行研究的人来说,我一直认为,夯实计量等这些基本工作环节对制造行业乃至整个产业安全可靠、持续健康的发展而言都是非常重要的。今后我们需要更加注重的是这些技术手段和方法的具体应用状况和彼此之间的融合情况才能更好地适应不断发展扩大的市场需求和技术条件。

[参考文献]

- [1]贾雪扬.一般压力表日常检定注意事项探析[J].品牌与标准化,2025(6):261-263.
- [2]邓爱华,马巧玲,谷道贺.压力表计量检定与校准方法[J].中国质量监管,2025(9):79-80.
- [3]陈振伟,叶大海,杜学慧,等.压力表使用、检定及安全监管中存在的问题及对策[J].中国计量,2025(6):96-100.
- [4]黄秋彬.压力表计量检定中常见的问题分析[J].产品可靠性报告,2024(12):101-102.

作者简介:叶小芳(1997—),毕业于四川化工职业技术学院,生产过程自动化技术专业。

高硫高砷有色金属矿的生物选矿技术探讨

侯君一

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 新疆 哈密 839000

[摘要]随着优质矿产资源日益减少,高硫高砷复杂矿的高效利用成为选矿领域的挑战。传统选矿方法成本高、污染大且回收率低,而生物选矿技术,尤其是生物浸出,凭借成本低、环境友好和操作简便等优势展现出良好前景。文章分析了浸矿微生物(如嗜酸氧化亚铁硫杆菌)、关键工艺参数(温度、pH、矿浆浓度等)及工业化进展(某铜矿工业试验铜浸出率超85%)。研究表明,通过多菌种协同、过程强化及与传统工艺联合,可实现有价金属高效回收与砷的稳定化,是绿色矿山发展的重要方向。

[关键词]高砷高硫矿;生物选矿;生物浸出;浸矿微生物;工艺参数;环境治理

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18635

中图分类号: TD953

文献标识码: A

Exploration on Biological Mineral Processing Technology for High Sulfur and High Arsenic Nonferrous Metal Ore

HOU Junyi

Hami Geological Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract: With the decreasing availability of high-quality mineral resources, the efficient utilization of high sulfur and high arsenic complex ores has become a challenge in the field of mineral processing. Traditional mineral processing methods have high costs, high pollution, and low recovery rates, while biological mineral processing technology, especially biological leaching, has shown promising prospects due to its advantages of low cost, environmental friendliness, and easy operation. The article analyzes the leaching microorganisms (such as acidophilic ferrous sulfide bacteria), key process parameters (temperature, pH, slurry concentration, etc.), and industrial progress (a copper mine industrial test showed a copper leaching rate of over 85%). Research has shown that efficient recovery of valuable metals and stabilization of arsenic can be achieved through multi strain collaboration, process enhancement, and integration with traditional processes, which is an important direction for the development of green mines.

Keywords: high arsenic and high sulfur ore; biological beneficiation; biological leaching; mineral leaching microorganisms; process parameters; environmental governance

引言

有色金属作为国民经济发展以及国防建设过程中极为重要基础材料,随着易于选矿高品位资源逐步走向枯竭态势,复杂且难以处理高硫高砷型有色金属矿已然成为了主要开采对象,这类矿石成分呈现出复杂特性,其中有价金属与硫砷等元素紧密共生在一起,传统选冶工艺存在着流程冗长成本高昂污染严重等一系列问题,特别是在焙烧过程当中所产生含有二氧化硫以及砷尘废气,会对环境造成极为严重危害,而砷处置更是成为了国际上一大难题,因此,具备环境友好特性且成本相对较低生物选矿技术受到了广泛关注。本文着重对生物选矿技术作用机理关键影响因素以及工业化应用展开探讨,并且对其未来发展予以展望,以此推动该技术在难处理资源综合利用这一领域取进一步发展。

1 生物选矿技术的作用机理

生物选矿技术核心要点在于借助微生物催化作用来达成相关目标,其作用机理主要涵盖直接作用和间接作用这两种途径,这两种途径共同对目标矿物分解以及金属离

子溶出起到了促进作用。

1.1 直接作用机理

吸附于矿物表面浸矿微生物,通过自身代谢活动直接对矿物展开氧化分解操作,以此来获取能量,氧化亚硫硫杆菌(即 *Acidithiobacillus thiooxidans*)能够直接对黄铁矿(也就是 FeS_2)或者毒砂(即 FeAsS)进行氧化,将其中硫(S)或者砷(As)氧化成为硫酸根(SO_4^{2-})或者砷酸根(AsO_4^{3-}),与此同时释放出包裹于其中有价金属离子(尤其是 Cu^{2+} 、 Au 等),该过程需要微生物与矿物表面保持紧密接触,其反应速率会受到接触面积以及微生物活性直接影响^[1]。

1.2 间接作用机理

这是生物浸出过程中最为主要作用方式,微生物把溶液中亚铁离子(Fe^{2+})氧化为高铁离子(Fe^{3+}),而后高铁离子作为一种强氧化剂,再对矿物中金属硫化物进行化学氧化,自身被还原为 Fe^{2+} ,从而完成一个氧化还原循环,嗜酸氧化亚铁硫杆菌(即 *Acidithiobacillus ferrooxidans*)在这个过程中充当了“催化剂再生”关键角色。以黄铜矿(也就是 CuFeS_2)为例,其间接反应机理如下:

微生物作用： $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$ （微生物催化）
化学浸出： $\text{CuFeS}_2 + 4\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 5\text{Fe}^{2+} + 2\text{S}^0$ （化学氧化）
对于含砷矿物毒砂（即 FeAsS ）， Fe^{3+} 能够将其氧化，使砷以砷酸铁（ FeAsO_4 ）等稳定形式沉淀下来，进而实现砷固定化。

2 影响生物选矿效果的关键工艺参数

生物浸出过程是一个复杂的多相体系，其效率受到多种物理、化学和生物因素的共同制约。

2.1 微生物种类与群落结构

在生物浸矿过程里，不同微生物呈现出多样化功能特性，其中其最适生长温度是决定它们应用效能关键因素之一。嗜中温菌，氧化亚铁硫杆菌（*At.ferrooxidans*）以及氧化硫硫杆菌（*At.thiooxidans*），通常是在 $30\sim 35^\circ\text{C}$ 中温环境中展现出最佳活性，可被当作适用于多数次生硫化矿浸出菌种来使用，虽然面对像黄铜矿这类难分解原生矿物时，中温菌往往活性有限，浸出速率较低，相比之下，嗜热菌（比如说硫化叶菌 *Sulfolobus* 和酸 ianus *Acidianus*）最适生长温度能够高达 $50\sim 80^\circ\text{C}$ ，这类微生物在高温条件下不但代谢旺盛，其所产生胞外多聚物以及酶类对矿物晶格破坏能力也更强，进而能够更高效分解传统上被认为难以处理惰性矿物，极大程度提高金属溶出效率^[2]。

运用多菌种复合体系是增强生物浸出效果重要策略，其核心在于借助不同菌种之间协同效应，特别是，铁氧化菌能够把 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ，从而提供强氧化剂；硫氧化菌则可以代谢还原态硫化物，降低硫产物抑制并且产生酸性环境，同时维持浸出体系化学活性，这种协作不但加速矿物溶解，还改善了体系氧化还原电位以及酸度稳定性，进而显著提高浸出速率与最终金属回收率，研究表明，引入嗜热菌群尤其有效，在某些难处理金矿物预氧化过程中，嗜热菌加入会使浸出周期缩短 30% 以上，这主要原因囊括其在高温下更快生长和代谢动力学，以及对包裹金有害矿物（如砷黄铁矿）更强烈氧化分解能力。

2.2 环境与操作参数

在生物浸出过程当中，温度、pH 值以及矿浆浓度这三个方面是至关重要操作参数，它们共同决定了微生物活性以及浸出体系稳定性，温度直接影响微生物细胞内酶催化效率以及代谢速率，不同菌种对其要求差异显著，如嗜中温菌最适范围是 $30\sim 35^\circ\text{C}$ ，而嗜热菌需要 $50\sim 80^\circ\text{C}$ 高温环境，温度偏离会显著抑制菌体生长以及浸矿功能，pH 值则关系到菌体膜稳定性以及胞外酶活性，浸矿菌大多是嗜酸菌，其最适 pH 通常处于 $1.5\sim 2.5$ 强酸性区间；pH 过低可能导致金属离子毒性增强，而过高 pH 则容易引起细胞钝化和矿物表面钝化，这两种情况都会严重影响浸出效率，矿浆浓度不但影响微生物与矿物物理接触几率，还牵涉到系统中氧传质以及剪切力大小，浓度过高会导致磨

蚀加剧溶氧不足以及有害离子积累，所以堆浸系统通常把矿浆浓度控制在 25% 以下，而搅拌浸出也大多在 10%~20% 之间，有工业实践表明，在搅拌浸出中，如果把矿浆浓度从 25% 下调至百分之 15%，铜浸出率会提高约 12%，这体现出参数优化对技术经济指标重要影响^[3]。

通气搅拌以及矿石性质也是影响生物浸出成败关键因素，微生物生长以及氧化功能高度依靠氧气和二氧化碳（作为无机碳源）稳定供应；良好搅拌不但能够提高气-液-固三相间传质效率，还能避免矿粒沉降促进矿物与菌体有效接触，不过需要注意过度搅拌引起剪切损伤问题，另一方面矿石本身特性如矿物组成嵌布粒度以及元素赋存状态，构成了浸出难易内在决定因素，粗粒矿石需要通过细磨来增加比表面积，从而暴露目标矿物促进微生物作用，但是磨矿细度提高也意味着能耗与成本大幅上升，所以必须在浸出率与经济性之间寻求平衡，在实际应用中需要结合矿石工艺矿物学特性，协同调控环境与操作参数，这样才能实现生物浸出高效稳定运行。

3 技术挑战与未来发展方向

3.1 强化浸出过程并提高效率

针对黄铜矿等难处理硫化矿物存在浸出速率缓慢（在常规浸出条件下，黄铜矿浸出率达到 80% 需要 $30\sim 45\text{d}$ ）以及反应周期过长这一长期对生物湿法冶金发展造成制约核心问题，未来技术突破与研究方向将集中于多个维度协同创新，首要任务便是致力于开展开发以及应用具有高效耐逆特性微生物菌种资源相关工作，传统浸矿菌种（氧化亚铁硫杆菌），当面对高砷（砷浓度 $> 5\text{g/L}$ ）、高盐（ NaCl 浓度 $> 150\text{g/L}$ ）或者极端 pH（ $\text{pH} < 1.0$ 或 $\text{pH} > 3.5$ ）复杂矿物体系时，其活性会下降 60%~80%，铜浸出率从常规条件下 75% 降低至 30%~40%，稳性受到显著抑制^[4]，所以，借助基因工程手段定向选育耐逆工程菌，或者构建由多种功能微生物组成且具有互补增强效应复合菌系，将成为提高浸出效率根本性策略。

某研究团队通过 CRISPR - Cas9 基因编辑技术，对氧化亚铁硫杆菌砷抗性基因（*arsB*）进行强化表达，培育出工程菌在砷浓度 8g/L 、pH 值为 1.2 黄铜矿矿浆中，依旧能够维持 85% 以上活性，铜浸出率达到 72%（反应周期为 28d），相较于原始菌株提升了 40 个百分点；另一团队，构建“氧化亚铁硫杆菌+氧化硫硫杆菌+嗜酸氧化亚铁微螺菌”复合菌系，在 NaCl 浓度 200g/L 高盐体系中，协同代谢效率提升 35%，黄铜矿浸出周期从 45d 缩短至 25d，铜回收率达到 80%，这类新型菌群能够更好适应苛刻工业环境，维持旺盛代谢活性（胞外多糖分泌量增加 20%~30%），进而持续有效攻击矿物晶格，释放有价金属成分^[4]。不同菌种在复杂体系中的浸出性能对比见表 1，可清晰体现耐逆菌种的技术优势：

表 1 不同浸矿菌种在高砷高盐体系中的黄铜矿浸出性能对比

菌种类型	体系条件(砷浓度: g/L; NaCl 浓度: g/L; pH)	菌种活性维持率 (%)	铜浸出率 (28d, %)	浸出周期缩短比例 (vs 传统菌种)	胞外多糖分泌量 (μg/mL)
传统氧化亚铁硫杆菌	5; 150; 1.5	42	38	-	12.5
基因工程耐砷氧化亚铁硫杆菌	8; 150; 1.2	85	72	28%	18.3
“三菌”复合菌系	5; 200; 1.8	90	80	44%	22.1
嗜酸氧化亚铁微螺菌 (单一)	5; 150; 1.5	78	55	15%	15.7

表 2 不同工艺处理含砷难处理金矿 (砷含量 5.2%、金品位 3.8g/t) 效果对比

工艺类型	处理周期 (d)	金回收率 (%)	氰化物用量 (g/t, 仅氰化工艺)	尾矿砷含量 (%)	金精矿品位 (g/t, 仅浮选工艺)	吨矿处理成本 (元)
直接氧化工艺	1	35.2~38.6	500	5.2	-	185
单一生物浸出工艺	45	78.5~81.2	-	1.5 - 1.8	-	120
生物氧化-氰化联合工艺	8	90.5~92.8	300	0.8 - 1.2	-	150
生物氧化-浮选联合工艺	9	91.0~93.0	-	0.9 - 1.3	55 - 62	160

3.2 砷迁移与稳定化控制

高砷矿生物浸出过程在有效释放有价金属同时,也伴随着砷大量溶出与迁移,这一过程构成了显著环境风险,使砷治理成为技术应用不可回避核心问题,浸出液中砷主要以高毒性高迁移性三价砷(As(III))形态存在,其控制难度远大于五价砷(As(V)),所以,必须构建一套高效稳定且能与主工艺无缝衔接砷治理技术体系,其目标不仅是去除溶液中砷,更要实现其向稳定化固体定向转化,最终达到安全堆存要求。治理过程首要关键步骤是实现砷氧化与稳定化,通过精确控制溶液体系氧化还原电位(通常在500~600mV vs.SHE)和pH值(常在弱酸性范围),并借助催化剂或高效氧化菌(砷氧化菌),可促使溶出As(III)被高效快速氧化为毒性较低、更易于沉淀处理As(V),这一转化是后续沉淀反应基础,其效率直接决定了整个除砷流程成败。

在砷被充分氧化基础上,技术核心在于引导砷走向稳定矿物化固定,最有效且被广泛研究途径是促使砷与溶液中铁源在特定pH和温度条件下,形成溶解度极低晶体结构稳定臭葱石(FeAsO₄·2H₂O)沉淀,该过程不仅需要严格化学计量控制(通常要求Fe/As摩尔比大于3),还需对反应器混合方式停留时间和结晶环境进行精细优化,以确保生成是结晶良好稳定性高臭葱石,而非无定形砷酸铁胶体,后者在长期堆存中易发生相变和砷再释放。最终,实现砷选择性固定与安全堆存,是整个高砷矿生物浸出技术以成功工业化应用前提和底线,它不仅仅是一个单纯末端污染治理环节,更是深度嵌入生产工艺流程中重要组成部分,一套成功砷治理方案,必须在技术经济可行基础上,彻底阻断砷在环境中迁移路径,将潜在环境风险降至最低,从而保障资源绿色开发与行业可持续发展,这要求跨学科协作,将湿法冶金环境化学矿物学与微生物学知识相结合,共同攻克这一技术难题^[5]。

3.3 工艺耦合与集成创新

生物浸出技术固然拥有环境友好(废水回用率大于80%)以及成本较低(吨矿成本相较于火法低30%~40%)这样优势,然而其单一处理却存在着速率缓慢(难处理金矿回收率达到80%需要40~50d)、对于高砷(大于5%)高硫(大于20%)或者高包裹率(大于85%)矿石适应性有限,以及对环境波动敏感(温度在±5℃时微生物活性下降25%~30%)等诸多局限,所以,其发展方向便是与传统选冶工艺进行深度耦合,从而形成高效协同联合流程,以含砷难处理金矿(砷含量为3.2%~6.8%、金含量为2.5~5.8g/t、包裹金占比为88%~92%)为例,“生物氧化-浮选/氰化”联合工艺通过在30±2℃、pH1.8±0.2条件下进行7~10d微生物氧化,使硫化物氧化率达到85%~90%、砷脱除率达到78%~85%,金暴露率从不足15%提升至90%以上,后续与传统方法联合能够大幅提升各项指标:对于砷含量为5.2%、金含量为3.8g/t矿石,直接氧化回收率仅为35.2%~38.6%,而生物氧化-氰化(氧化7d,氰化物用量为300g/t,浸出12h)能够使金回收率稳定达到90.5%~92.8%;采用“生物氧化-浮选”(氧化8d,捕收剂用量为80g/t)则金精矿品位为55~62g/t、浮选回收率为91%~93%,尾矿金品位降至0.3~0.5g/t,该耦合模式总周期相较于单一生物浸出缩短了60%以上,减少了40%氰化物用量,尾矿砷含量从5.2%降至0.8%~1.2%,实现了经济效益与环境效益最大化^[6]。不同工艺处理含砷难处理金矿的效果对比见表2,可清晰体现联合工艺的优势。

4 结语

生物选矿技术为绿色开发高硫高砷复杂矿产资源提供了新途径,通过微生物代谢作用高效分离有价金属与砷、硫等有害组分,兼具低成本与环境友好的显著优势。然而,该技术目前仍面临浸出速率缓慢、砷稳定化处理

困难以及工程放大效果不稳定等挑战。未来需着力开发高效复合菌剂、动态优化反应条件、深化砷迁移转化与固定机制研究,并推进生物技术与传统选冶流程的创新集成。通过多学科交叉融合与关键技术突破,生物选矿将在资源节约与环境友好型矿业建设中发挥更为核心的作用。

[参考文献]

- [1]丁亚文,方棋,赵国锋.津巴布韦某铂族金属矿选矿技术研究[J].有色金属(选矿部分),2024(7):110-118.
[2]牛建昆.金属矿山选矿技术发展方向分析[J].世界有色金属,2022(23):49-51.
[3]王义伟.新型金属矿选矿技术在有色金属冶炼中的循环

利用体系研究[J].冶金管理,2023(24):72-74.

- [4]赵晶璇.金属矿山选矿技术发展分析[J].世界有色金属,2023(9):58-60.
[5]李汉鑫.国内外金属矿选矿技术的现状与发展[J].世界有色金属,2023(4):140-142.
[6]刘铭,阳华玲,易恋.某钨多金属矿选矿废水处理与回用技术试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):260-266.

作者简介:侯君一(1976.5—),毕业院校:南方冶金学院(江西理工大学),所学专业:选矿,当前就职单位名称:新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队,就职单位职务:矿业公司副总经理(地质矿产开发院副院长),职称级别:副高。

城市公园景观设计的人性化优化策略

李毅

河北大成建筑设计咨询有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着城市化进程不断加快,城市公园作为提升居民生活质量、改善城市生态环境的重要公共空间,其景观设计的人性化水平直接关系到公众的使用体验与城市形象的整体塑造。传统城市公园设计往往侧重景观形式与视觉效果,而忽视了不同人群的实际需求,导致空间利用效率不高、功能分区不够合理、互动性不足等问题。基于人性化设计理念,探讨城市公园景观优化策略具有重要的理论意义与实践价值。文中从人性化设计的内涵出发,分析城市公园建设现状与存在问题,并围绕功能布局、景观细节、生态环境、活动空间及智慧化管理等方面提出优化策略,以期对未来城市公园规划与设计提供可行路径,促进城市公共空间的可持续发展。

[关键词]城市公园;景观设计;人性化;城市生态;优化策略

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18606

中图分类号: TU986

文献标识码: A

Humanized Optimization Strategy for Urban Park Landscape Design

LI Yi

Hebei Dacheng Architectural Design Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the continuous acceleration of urbanization, urban parks, as important public spaces for improving residents' quality of life and enhancing the urban ecological environment, have a direct impact on the humanization level of their landscape design, which directly affects the public's user experience and the overall shaping of the city's image. Traditional urban park design often focuses on landscape form and visual effects, while ignoring the actual needs of different groups of people, resulting in low space utilization efficiency, unreasonable functional zoning, and insufficient interactivity. Exploring the optimization strategies for urban park landscapes based on the concept of humanized design has important theoretical significance and practical value. Starting from the connotation of humanized design, this article analyzes the current situation and existing problems of urban park construction, and proposes optimization strategies around functional layout, landscape details, ecological environment, activity space, and intelligent management, in order to provide feasible paths for future urban park planning and design and promote the sustainable development of urban public spaces.

Keywords: urban parks; landscape design; hommization; urban ecology; optimization strategy

引言

城市公园是城市公共空间的重要组成部分,不仅具有生态调节功能,还承担休闲健身、文化体验、社会交流等多重功能。随着人们对生活品质要求的提高,传统以观赏性为主的公园设计模式已难以满足公众的多层次需求,人性化、参与式、体验式的设计理念逐渐成为城市公园发展的主流趋势。从使用者角度出发进行公园景观设计,不仅能够提升空间使用效率,还能增强居民对城市环境的认同感和归属感,使公园成为真正意义上的民生工程。然而,在实际建设过程中,部分城市公园仍存在功能单一、设施不足、动线不合理、生态环境弱化等问题,导致使用体验不佳,人性化程度不足。基于此,探索以人为本的城市公园景观优化策略,对于促进城市公共空间高质量发展、提升城市宜居性具有十分重要的意义。

1 人性化城市公园景观设计的意义

1.1 提升居民生活质量与日常使用体验

在人口高度集聚的城市环境中,公园作为少数可供公

众自由进入的开放空间,其重要性日益凸显。公园不仅是居民缓解压力、获得身心平衡的场所,也是促进社区往来与社会互动的重要节点。人性化设计强调从使用者角度出发,通过优化空间布局、完善设施配置与提升环境舒适度,使居民能够在公园中获得轻松、愉悦与持久的体验。尤其在现代社会中,工作节奏加快、心理压力增大,公园承载着人们调节心理状态的功能。人性化设计能够促进居民深度参与公园活动,使其在休闲、运动、散步等日常行为中获得满足感。此外,人性化细节如便捷的步道系统、足够的座椅、合适的遮阴空间、贴近自然的植物搭配等都能增强居民对公园的认同感,使公园真正成为服务市民生活的重要公共设施。

1.2 推动城市生态系统的优化与环境可持续发展

城市公园不仅是景观设计对象,更是城市生态系统不可或缺的组成部分。随着城市生态问题日益凸显,如热岛效应、空气质量下降、水循环紊乱等,公园在生态调节中的作用愈发重要。人性化设计所倡导的植物多样性、土壤

透水性、水体自然性建设等措施,不仅提升景观品质,也能强化生态功能。例如多层次植物群落能够改善城市气候、增强碳吸收量、支持鸟类与昆虫栖息,使公园成为都市中的生态绿岛。此外,生态友好型设计能够减少资源消耗,促进城市可持续发展。人性化设计理念下的公园不再只是单纯的“绿化点”,而是与城市生态网络紧密相连的生机空间,通过景观设计与生态功能的结合,推动城市整体环境质量稳步提升。

1.3 塑造城市文化特色与增强城市公共空间活力

城市公园是展现城市文化形象的重要场所,其景观往往承担着文化传播、城市记忆承载与社区文化营造等功能。人性化设计不仅关注美观性,也强调文化性,使公园在自然景观之上具备精神价值。例如通过主题雕塑、文化墙、特色植物或地域符号强化地方文化认同,为居民提供可近距离接触城市文化的渠道。在空间活力层面,人性化设计中的互动空间、开放式草坪、文化交流区域等都能够促进市民互动,增加空间使用频率,延长停留时间,使公园成为城市生活动线的重要节点。通过满足人群多样化的活动需求,人性化设计能够构建兼具审美、文化与社会功能的综合性空间,使城市公园真正成为公共生活的活跃舞台。

2 城市公园景观设计中存在的主要问题

2.1 功能分区不合理导致空间使用效率低下

许多城市公园在规划阶段未能充分重视不同人群的行为需求,导致使用功能难以满足现实活动。例如部分公园以景观观赏为主,缺乏儿童活动场地、健身设施或安静阅读空间,使特定群体的需求被忽视。此外,部分公园功能分区随意拼贴,活跃区与静态区交叉干扰,运动场地与步行区域互相占用,使空间组织缺乏秩序性。一些公园将大片面积用于观赏性绿地,这种过度强调视觉效果的做法限制了可使用面积,使公园沦为“看得见却用不上”的景观。整体来看,不合理分区直接削弱了公园作为公共空间的应有功能,使空间利用率显著下降。

2.2 景观设施细节不足,缺乏人性化关怀

在景观设计中,细节往往决定体验。一些城市公园设施配置不合理,如座椅数量过少或舒适性差、步道材质粗糙、遮阴设施不足、水景互动区缺乏安全提示等,导致居民使用体验受限。此外,标识系统缺乏统一设计,年龄较大的居民难以理解路线指示;夜间照明过弱造成安全隐患或过强造成光污染;公共服务点设置不合理如饮水区偏远等,都反映出公园设计缺乏精细化考量。细节不到位不仅使使用者感到不便,更可能让人产生疏离感,大幅降低公园的吸引力。

2.3 生态功能弱化与资源利用不可持续

部分公园在建设过程中追求人工化视觉效果,过度使用外来观赏植物,忽略生态适应性 with 可持续性建设。大量硬质铺装减少雨水渗透,破坏水循环系统,加剧地表径流

压力。一些公园水体景观过度人工化,水循环不畅,易引发富营养化与水质恶化。此外,人工草坪、塑料制景观等材料大量使用,不仅影响生物栖息,还增加后期维护难度。生态功能弱化不仅使公园环境质量下降,也与人性化设计的可持续发展理念相悖。

3 人性化视角下的公园景观设计优化策略

3.1 基于行为需求的合理功能分区设计

优化公园功能分区的前提是深入分析不同人群的行为模式。儿童群体需要安全有趣的活动空间;青年群体倾向于运动与社交活动;老年群体偏好安静与健康步行;亲子群体则需要综合活动区域。在此基础上进行功能区分布设计,可使空间组织更具逻辑性与亲和力。功能区之间应设缓冲带,如植物隔离或景观小品,减少相互干扰。同时,应增加可灵活使用的开放空间,以适应节庆活动、市民健身、新型社交需求等多场景使用。设计过程需兼顾普适性与差异性,使公园具有包容性与多样性。

3.2 细化景观元素设计增强舒适性与使用效率

人性化的景观设计要求关注细节,从基础设施到氛围营造逐层优化。例如座椅设计需考虑材质舒适度、方位日照、视线等;步道应采用防滑、透水材料并保持连续性;照明系统需兼顾安全性、节能性与景观氛围;绿荫休憩区应依据本地气候确定树种、密度与布局。此外,明确的导视系统和无障碍设计对于老年人与特殊人群至关重要,体现设计的社会关怀。通过提升细节品质,使使用者在公园中感受到自然与人文的协调,使公园真正成为贴心、宜人的环境。

3.3 生态理念融入景观系统构建可持续空间

生态设计要求公园在满足审美与功能需求的同时,具备生态修复能力与环境适应性。在植物选择上,应优先使用乡土植物,以增强生态稳定性与减少维护难度;在场地铺装上,应采用透水性材料,促进雨水渗透,减轻城市排水压力;在水景设计上,应引入自然净化系统,如湿地植物、微生物系统等,使水体保持健康水质;同时可设置雨水花园、下凹绿地等海绵城市设施,以提升公园的水循环功能。城市公园应具备环保属性,使人性化与生态化设计相互融合。

4 增强公园空间活力的设计策略

4.1 打造可互动、多功能的开放式活动区域

空间活力来源于使用者的参与。设计中应通过开放草坪、运动区域、社交空间等多功能区域为居民提供不同类型的活动场景。开放式设计能够鼓励市民自主选择活动方式和停留时间,使空间持续呈现活力。同时应注意不同区域之间动线顺畅,避免拥堵,形成自然流动的人群节奏,使公园真正成为市民生活的一部分。

4.2 融入城市文化元素增强公园的精神价值

公园的文化属性直接影响其内涵与体验。设计中可通

过文化标识、公共艺术装置、主题景墙、地域植物与历史故事等元素构建城市文化风貌。例如融入与城市发展相关的历史意象、具有地域特征的植物景观、艺术氛围浓厚的雕塑小品等,使公园在视觉审美之上具有文化深度。文化元素的加入可以提升居民对公园空间的精神认同,使公园成为城市文化传播的重要窗口。

4.3 强化夜间景观塑造优化公园使用时段

随着城市生活节奏加快,夜间逐渐成为市民使用公园的重要时段,夜景设计在公园整体品质中的作用愈发突出。合理的照明设计需要在保障安全通行的基础上,满足休闲活动与环境营造的需求,既避免光线过强带来的视觉干扰,也防止照度不足引发安全隐患。灯光布局可结合空间节奏、植被形态和人群活动特点进行分区设置,使功能照明与景观照明形成协调统一的整体效果。通过柔和的光影变化,夜间环境更具层次感和舒适度。融入互动性和趣味性的灯光元素,如微光步道、光影水景和感应式照明装置,有助于增强夜游体验,激发公众参与热情。

5 智慧技术在城市公园人性化设计中的应用

5.1 智慧管理系统提升公园运行效率

智慧管理已成为现代城市公园运行维护的重要发展方向。通过引入物联网系统,对水体质量、植物生长状态、垃圾桶使用情况和能源消耗水平进行持续监测,管理者能够实时掌握公园运行状况,及时发现潜在问题并调整养护和管理策略。数据支撑下的精准管理,有助于提高资源利用效率,减少人工巡查压力,使运维工作更加科学有序。智能安防系统的应用,可以对重点区域进行动态监控,提升风险预警和应急处置能力。紧急联络系统的设置,为突发事件处理提供了快速响应通道,增强公众在公园活动中的安全感。智慧管理手段的综合运用,使公园运行从被动维护转向主动管理,在提升服务质量的同时,也为公众营造更加安全、稳定和可控的公共开放空间。

5.2 智能化导览系统提升游客体验

数字化导览服务的应用,为提升城市公园的服务质量和使用便利性提供了有效手段。通过设置二维码、语音解说系统和智能导览地图,游客可以快速获取公园功能分区、文化背景和景点位置等信息,减少信息获取成本,使游览过程更加顺畅。导览系统在数据支持下,能够根据游客的兴趣偏好和行动路线提供个性化推荐,增强游览体验的针对性和参与感。面向老年人等特殊群体,导览平台可提供界面简洁、操作直观的使用模式,降低技术使用门槛,体现公共空间的包容性。信息服务与空间体验的有机结合,使公园在满足基本休闲需求的基础上,进一步提升文化传播与公共服务水平,推动城市公园向更加人性化和智慧化

方向发展。

5.3 大数据分析助力景观设计与管理优化

随着信息技术和感知手段的不断进步,对公园人流量、停留时间和活动热点等数据进行系统分析,已成为提升管理科学性的有效方式。通过对这些数据的持续采集与整理,管理者能够准确了解不同区域的使用强度和空间吸引力,掌握公园整体运行状况。数据分析结果不仅服务于日常管理,也为后续规划调整提供可靠依据。依据使用数据,管理者可以判断是否需要增设遮阴设施、优化座椅分布、扩大活动场地或调整游览动线,使空间配置更加合理。对季节变化和不同时段活动规律的识别,有助于制定更具针对性的管理措施,提高服务供给的适配度。数据驱动的决策方式,使公园管理由经验判断转向科学分析,推动城市公园运行向精细化、动态化方向持续发展。

6 结论

人性化已成为现代城市公园景观设计的重要发展方向,其核心在于深入关注不同群体的使用需求,不断提升空间品质,并实现生态价值与文化内涵的有机融合。在实际设计过程中,通过合理划分功能分区,使休闲、运动、交流等活动空间各有侧重,有助于提升公园的使用效率。景观细节的精心处理能够增强空间的舒适度与安全感,提升公众的整体体验。生态构建强调对自然系统的尊重与修复,使公园在提供休闲功能的同时发挥生态调节作用。富有活力的空间设计有利于激发公众参与,增强公园的社会属性。智慧化管理手段的引入,使公园运行更加高效有序。未来的公园设计应持续深化以人为本理念,加强生态文明建设与信息技术融合,通过科学规划和动态优化,使城市公园成为提升居民生活质量和幸福感的重要公共空间。

[参考文献]

- [1]高雅丽,陈竹.高密度城市区域(超)高层建设影响评估关键问题[J].城市建设理论研究(电子版),2025(36):66-69.
- [2]宋建倩.人性化理念在风景园林设计中的应用——以龙门塔公园龙背山片区为例[J].四川水泥,2025(11):110-111.
- [3]李巍巍.植物景观与公共艺术的交融:创新实践路径与案例研究[J].分子植物育种,2025,23(21):7315-7320.
- [4]董伯许,庄惟敏.社区公共空间需求理论建构及效能因子初探[J].住区,2025(4):109-116.
- [5]杨飞宁,付鹏,孙宇,等.空间效率视角下的医疗建筑设计理论与方法综述(1980—2023年)[J].中外建筑,2025(7):27-36.

作者简介:李毅(1996.7—),男,汉族,毕业学校:山东工艺美术学院,现工作单位:河北大成建筑设计咨询有限公司。

老旧建筑改造中的设计创新研究

李心田¹ 程浩²

1.北方工程设计研究院有限公司,河北 石家庄 050000

2.九易庄宸科技(集团)股份有限公司,河北 石家庄 050000

[摘要]随着城市化进程的加快,老旧建筑的改造已成为城市更新与可持续发展的重要组成部分。老旧建筑不仅承载着历史记忆和文化价值,同时也是城市空间的重要资源。文中从设计创新的角度出发,探讨老旧建筑改造的必要性、核心理念与设计策略。通过对空间再利用、结构优化、绿色节能技术以及文化传承等方面的系统分析,研究指出设计创新应以“保留与更新并重、功能与艺术融合、传统与现代对话”为核心路径。文章认为,老旧建筑改造的创新设计不仅能改善城市空间品质,还能实现文化价值的再生与社会效益的提升,为城市的可持续发展提供新的动力。

[关键词]老旧建筑;设计创新;城市更新;空间再利用;可持续发展

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18631

中图分类号: TU201

文献标识码: A

Research on Design Innovation in the Renovation of Old Buildings

LI Xintian¹, CHENG Hao²

1. North Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the acceleration of urbanization, the renovation of old buildings has become an important component of urban renewal and sustainable development. Old buildings not only carry historical memory and cultural value, but also serve as important resources for urban space. Starting from the perspective of design innovation, this article explores the necessity, core concepts, and design strategies of renovating old buildings. Through systematic analysis of space reuse, structural optimization, green energy-saving technology, and cultural heritage, the study points out that design innovation should focus on the core path of "preserving and updating equally, integrating function and art, and dialogue between tradition and modernity". The article believes that innovative design for the renovation of old buildings can not only improve the quality of urban space, but also achieve the regeneration of cultural value and the enhancement of social benefits, providing new impetus for the sustainable development of cities.

Keywords: old buildings; design innovation; urban renewal; space reuse; sustainable development

引言

在当代城市建设中,老旧建筑改造已成为应对城市更新与资源紧缺的重要手段。大量建于上世纪的老旧建筑,由于设计标准落后、功能退化、能耗过高等问题,已难以满足现代社会的发展需求。然而,这些建筑又蕴含着丰富的历史文化内涵与城市记忆,直接拆除不仅造成资源浪费,也会破坏城市的文化连续性。因此,在老旧建筑改造中,如何在保护与创新之间取得平衡,成为建筑设计领域的重要研究方向。设计创新是实现老旧建筑可持续利用的关键路径,它不仅涉及技术层面的优化,更关乎社会、文化与生态价值的重构。本文从多维视角分析老旧建筑改造中的设计创新思路与实施策略,以期期为建筑师和城市规划者提供理论支撑与实践参考。

1 老旧建筑改造的必要性与现实困境

1.1 老旧建筑的社会与历史价值

老旧建筑作为城市发展的见证者,具有深厚的文化积淀与历史意义。它们反映了特定时代的建筑风格、技术水平与社会生活方式,是城市记忆的重要载体。通过改造,

这些建筑能够在新的城市语境中焕发活力,实现文化的延续与再生。

1.2 现实困境与改造挑战

目前,许多老旧建筑存在结构老化、设施落后、能源浪费严重等问题。部分建筑由于缺乏系统维护,已面临安全隐患。此外,改造过程往往受到政策、资金、技术和产权等多方面因素制约,使得设计创新难以全面落实。如何在保护原有建筑特征的基础上,融合现代设计理念,实现功能与审美的双重提升,是当前改造工作的核心难题。

1.3 政策导向与行业需求

国家“城市更新行动”及“碳达峰、碳中和”战略的推进,为老旧建筑改造提供了政策支撑。各地相继出台老旧小区改造和既有建筑节能改造的指导意见,鼓励采用创新设计与绿色技术,以实现建筑更新与环境改善的统一。

2 老旧建筑改造中的设计创新理念

2.1 “延续与再生”的设计思想

设计创新首先应建立在尊重原有建筑历史的基础之上。改造应保留建筑的文化基因与空间精神,通过设计手

段使其在新的使用环境中重生。设计者需把握“延续”与“再生”的关系，即既保留历史文脉，又赋予建筑新的功能与审美表达。

2.2 “功能复合化”的空间理念

老旧建筑改造的价值不仅体现在外观形态的更新，更重要的是功能体系的再造与社会价值的重构。通过引入复合型功能，建筑可以从单一用途转变为多元共享的城市空间。例如，在改造过程中融入文化展示、商业服务、社区交流等功能，使建筑成为集公共性、商业性与艺术性于一体的综合场所。功能的复合化使建筑具备更强的适应性与生命力，能够满足不同群体的使用需求，促进资源的高效利用。空间的开放与共享还带来了更丰富的社会互动，让人们在日常活动中重新建立情感联系，激发社区的凝聚力与城市的活力。

2.3 “绿色与智能”的可持续设计理念

设计创新的核心不仅在于形式的突破，更在于理念的更新。可持续发展理念为建筑改造提供了新的方向，使建筑在满足功能与美学需求的同时，实现能源节约与生态平衡。通过引入自然采光与通风系统，建筑内部能够充分利用环境资源，减少人工照明与机械通风的能耗。智能控制技术的应用，使照明、温度与能耗管理实现自动调节与动态优化，提高运行效率。低碳材料与再生资源的使用，则有效降低了建造过程中的碳排放，为绿色建筑提供了物质基础。太阳能光伏板、雨水回收与地源热泵等可再生能源系统的融入，使建筑在运行阶段保持高效节能与环境友好。

3 老旧建筑改造的空间重构与技术创新

3.1 空间重构策略

空间重构是老旧建筑改造中体现设计创新与价值提升的关键环节。设计者需要在确保结构安全与稳定的基础上，对内部空间进行科学规划与灵活调整。通过拆除非承重墙体、优化平面布局、引入共享空间和多功能区域，可有效提高建筑的使用效率与适应性。增加竖向交通联系，如设置电梯、连廊或中庭空间，不仅改善了动线组织，也增强了建筑内部的通透感与互动性。公共区域的重新设计在空间重构中尤为重要，通过增加自然采光、引入景观元素与开放式社交场所，使建筑焕发新的活力。光线、绿化与人流的有机融合，让空间成为交流与体验的载体，使老旧建筑重新融入现代城市生活。

3.2 结构与材料技术创新

老旧建筑结构的改造应充分融合现代工程技术，以实现安全性与可持续性的双重目标。通过采用碳纤维增强材料、钢结构加固技术和高性能复合构件等手段，建筑的承载能力与抗震性能得以显著提升，使其能够适应现代城市环境的使用需求。碳纤维材料具有高强度、轻重量和优良的耐久性，适合用于结构修复与局部加固；钢结构体系则为老旧建筑提供灵活可靠的支撑框架，减少结构风险并延长使用寿命。在材料选择方面，设计者应秉持绿色低碳理

念，优先使用再生混凝土、低碳钢材与透气环保涂层，使改造过程兼顾环境友好与节能效益。结构技术的创新不仅提升了建筑的安全性能，也体现了对生态责任的重视，使老旧建筑在功能更新中焕发新的生命力，成为可持续城市发展的重要组成部分。

3.3 数字化技术在改造中的应用

随着建筑信息模型(BIM)、三维扫描与虚拟现实(VR)等数字化技术的广泛应用，老旧建筑改造正迈入精细化与可视化的新阶段。设计师能够借助 BIM 技术对建筑的结构、材料与机电系统进行全面建模，实现信息的高效整合与动态管理。通过三维扫描获取建筑的真实数据，可精准还原空间形态，为后续设计提供可靠依据。虚拟现实技术让设计方案在虚拟环境中得以直观呈现，使设计师和使用者能够提前体验改造后的空间效果，从而优化设计决策并减少施工误差。数字化技术还可用于能耗分析与结构健康监测，对建筑运行状态进行实时评估，提升改造的科学性与安全性。这种以数据驱动的设计模式，使老旧建筑改造从经验操作转向理性分析，实现设计、施工与管理全过程的高效协同与创新突破。

4 文化遗产与美学创新的融合路径

4.1 文化基因的识别与再诠释

老旧建筑的改造应从文化层面出发，在尊重历史的前提下挖掘其深层价值。每一处旧建筑都承载着独特的历史记忆与地方特征，设计者需要通过文化识别与空间再诠释，让建筑的精神延续在当代语境中。形式、材料与空间的再设计不仅是外观的更新，更是文化符号的重构。通过提炼传统建筑元素、调整结构比例与细节表达，可以形成“新旧对话”的设计语言，使改造后的建筑在视觉与情感上保持历史的延续性。例如，通过保留原有的立面肌理或在结构中融入传统工艺，让现代材料与历史符号产生共鸣。这样的设计方法使建筑既具现代感，又不失地域文化的厚度。老旧建筑的更新应成为文化遗产与创新的桥梁，让历史在当代城市空间中以新的形式被感知与延展。

4.2 建筑美学的创新表达

美学创新是老旧建筑焕发新生的重要动力，它使改造不再停留于结构更新，而成为艺术与文化重塑的过程。设计者应在尊重历史文脉的基础上，运用现代设计语言重新诠释传统建筑的空间意象。通过光影的再组织、材质的更新与色彩的协调，赋予建筑新的视觉活力与时代气质。历史建筑的肌理与现代材料的融合，能够形成强烈的视觉张力，让古老与现代在同一空间中对话共生。玻璃、金属与混凝土等现代元素的引入，为传统建筑注入简洁与力量的美感，而保留的历史构件又延续了文化的深度与温度。美学创新的核心在于平衡传统与现代的关系，让建筑在延续记忆的同时展现创造力。当设计以艺术的方式回应时代诉求，老旧建筑便能在新的城市语境中获得再生，成为连接

过去与未来的文化象征。

4.3 公众参与与社区共建

文化传承不仅是建筑设计者的专业使命,更应成为公众共同参与的社会实践。老旧建筑改造的价值,在于激活社区记忆与文化情感,使空间重新融入人们的日常生活。通过社区共建、公众投票、文化展览等开放性形式,居民能够直接参与设计与决策过程,在表达自身需求与审美诉求的同时,增强对改造项目的认同感与归属感。公共参与使建筑更新不再是自上而下的工程行为,而是社会共创的文化行动。设计师在这一过程中扮演沟通与引导的角色,通过互动平台与文化活动让居民重新认识建筑的历史价值与当代意义。改造后的建筑不仅承担使用功能,更成为情感交流与文化共享的空间载体,凝聚社区的精神力量。公众参与的融入,让文化传承从被动保护走向主动更新,使城市记忆在共建中延续与生长。

5 老旧建筑改造的未来发展趋势

5.1 向生态低碳化方向发展

未来老旧建筑改造将更加注重低碳与环保的融合发展,使建筑更新成为推动城市绿色转型的重要力量。通过引入太阳能光伏板、地源热泵等可再生能源系统,建筑可在运行过程中实现能源自给与清洁利用,显著降低碳排放。绿色屋顶与垂直绿化的应用不仅改善了城市微气候,还能有效减少建筑能耗,提升隔热与保温性能。雨水收集与再利用系统的建设,使水资源得以循环利用,进一步增强建筑的生态效益。材料选择方面,倡导使用可再生、低污染的环保材料,以减少改造过程中的资源浪费与环境负担。老旧建筑的绿色更新不应只是节能改造的技术工程,更是生态理念的实践与传播。通过科学设计与系统管理,建筑能够在生态循环中焕发新生,成为低碳城市建设的重要支撑与可持续发展的生动范例。

5.2 向智慧化与数字化方向延伸

随着人工智能与物联网技术的深入应用,建筑改造正迈向智慧化管理的新阶段。传感系统的嵌入使建筑能够实时监测温度、湿度、光照与空气质量等环境数据,并通过自动控制系统调节照明、通风与供暖,实现舒适度与能源利用的动态平衡。智能化管理不仅提升了使用体验,也显著优化了建筑的运行效率。大数据技术的引入,使建筑的运行状态得以持续记录与分析,为后续的维护与节能策略提供科学依据。系统可通过数据模型预测能耗趋势,发现潜在隐患,从而实现精准运维与决策支持。智慧化建筑改造不再只是硬件升级的过程,而是一种融合数据智能、节

能理念与人本设计的综合创新。未来的建筑将成为具备自我感知与响应能力的“智能生命体”,在技术与环境的互动中展现高效、绿色与可持续的城市新形态。

5.3 向社会文化综合价值转型

老旧建筑改造正逐步从单纯的物理修复转向以社会价值创造为核心的综合更新过程。其意义已不再局限于改善建筑功能或延长使用寿命,而是通过空间重塑与文化再生,推动社区活力的重建与城市形象的提升。改造后的建筑应成为承载历史记忆与文化情感的场所,使人们在熟悉的空间中重新发现城市的精神归属。通过公共空间的优化与社区资源的整合,老旧建筑能够促进社会互动与文化共建,形成开放、共享的城市生活场景。设计者在更新过程中应关注社会公平与人文关怀,让不同群体都能从城市更新中受益。老旧建筑的再生不仅体现技术与美学的创新,更象征着文化自信的回归与城市精神的延续,使建筑成为连接过去与未来的社会文化载体。

6 结论

老旧建筑改造已成为推动城市可持续发展的重要途径,其意义不仅在于空间的再利用,更在于激活城市的文化记忆与社会活力。从设计创新的视角来看,老旧建筑的更新需要在空间重构、技术革新、文化传承和生态节能等层面形成系统化的优化策略。设计创新不仅是技术升级的结果,更是文化价值与社会意义的再创造。通过对原有空间结构的重新组织与现代技术的融合应用,建筑能够在保留历史文脉的基础上焕发新的生命力。公众的参与与多学科协作使改造过程更加开放和包容,实现从物理形态更新到文化精神更新的深层转变。未来,老旧建筑改造应以绿色理念为引导,以设计创新为核心动力,使建筑在新时代的城市更新中成为连接过去与未来的文化载体,展现出可持续与人文并重的发展愿景。

[参考文献]

- [1]王晓东.老旧建筑改造设计中的创新思维研究[J].建筑与文化,2022(10):58-62.
 - [2]张蕾.城市更新背景下老旧建筑再利用设计策略探讨[J].建筑科学,2023(5):43-49.
 - [3]刘明.可持续视角下的老旧建筑改造与文化遗产[J].建筑学报,2021(8):77-83.
- 作者简介:李心田(1984.9—),女,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:北方工程设计研究院有限公司;程浩(1986.2—),男,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:九易庄宸科技(集团)股份有限公司。

建筑设计中自然采光与节能策略研究

侯皞冉 郭瑞刚*

雄安城市规划设计研究院有限公司, 河北 保定 071700

[摘要]绿色建筑设计里自然采光很重要,其在提升建筑能效和居住舒适性上起着关键作用。合理引入自然光不仅能有效减少人工照明能耗,还能改善室内光环境质量。优化建筑空间布局、朝向设计和采光构造,自然采光策略就能让照明节能和热负荷控制的目标协同实现。研究显示,采用高反射材料、光导系统、智能遮阳装置等手段能提高光效利用率并减轻能耗负担,自然采光的合理应用是建筑节能和可持续发展的有效办法。

[关键词]自然采光;节能策略;绿色建筑;照明优化;建筑设计

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18630

中图分类号: TU243

文献标识码: A

Research on Natural Lighting and Energy-saving Strategies in Architectural Design

HOU Haoran, GUO Ruigang*

Xiong'an Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071700, China

Abstract: Natural lighting is very important in green building design, playing a key role in improving building energy efficiency and living comfort. Reasonable introduction of natural light can not only effectively reduce the energy consumption of artificial lighting, but also improve the quality of indoor lighting environment. By optimizing the spatial layout, orientation design, and lighting structure of buildings, natural lighting strategies can achieve the goals of energy-saving lighting and heat load control in synergy. Research has shown that the use of high reflective materials, light guiding systems, intelligent shading devices, and other means can improve light efficiency utilization and reduce energy consumption burden. The rational application of natural lighting is an effective way for building energy conservation and sustainable development.

Keywords: natural lighting; energy-saving strategy; green building; lighting optimization; architectural design

引言

现代城市快速发展使能源消耗和环境污染问题越来越突出,从而让人们建筑节能和生态可持续性的关注不断提高。自然采光这一兼具功能性和美学价值的设计手段既能有效减少能耗又能明显改善室内环境质量、提升使用者的舒适度。在建筑设计里如何将自然光科学高效地融入建筑空间是个亟待解决的重要课题,也为探索绿色低碳路径提供了新思路和新契机。

1 自然采光在建筑设计中的作用与意义

视觉舒适离不开自然采光,在节能减排和绿色建筑发展方面自然采光也起着重要作用,科学合理引入自然光是融合建筑功能性与可持续性的关键。

1.1 自然采光在建筑环境中的核心功能

在建筑设计里,自然采光的首要功能是满足室内基本照明需求并提升视觉舒适度,若自然光充足,白天可有效减少对人工照明的依赖且照明能耗也会显著降低,与人工光源相比,自然光色温稳定、照度自然,其光环境更接近人眼适应的那种,能减缓视疲劳且提高工作效率和生活品质,自然采光还能增强空间的通透感和层次感以改善建筑内部的感官体验,营造出明亮生动有生气的空间氛围,在办公建筑、教育建筑、居住建筑中,良好引入自然光对人

的生理节律、心理健康有积极影响已得到证实,将自然采光纳入建筑环境设计不只是技术层面的节能考虑,更展现了以人为本的设计理念。

1.2 自然采光助力建筑节能减排

建筑能源消耗里照明和空调系统占比挺大,合理利用自然采光能直接降低人工照明负荷并间接减轻灯具发热导致的空调负担以达成双重节能目的,像在设计时合理安排开窗位置和大小并根据室内空间功能需求来就能显著提高光照均匀度和利用效率,加上遮阳构件控制直射阳光可减少眩光和过热现象从而有效缓解夏季冷负荷增加产生的能耗问题,而且采用高反射率内装材料、浅色墙面和光导装置等技术手段能增强室内光线反射和扩散以提高自然采光利用率,在建筑的整个生命周期中自然光优化带来能源节省和运营成本降低也契合绿色建筑节能减排的核心目标并有力支撑实现“双碳”战略目标。

1.3 自然采光体现建筑可持续理念

绿色建筑设计中,自然采光是重要组成部分,其作用不只限于照明,已成为构建生态友好型建筑系统的关键策略,整体设计时,建筑朝向、体型、高度、窗墙比和开敞方式都与自然光的引入密切相关,需要统筹考虑才能实现生态、功能和美学的统一,自然采光被利用起来能减少对

能源的依赖,还可加强建筑和自然环境的融合,避免过度依赖人工设施,提高建筑的环境适应性,当代建筑理念里,自然采光会和通风、隔热、绿化等节能策略联动,一起构建低碳、健康、宜居的人居环境,这既体现设计师对自然资源的尊重与回应,也代表建筑设计朝着可持续、环境友好发展的总体趋势。

2 自然采光与建筑能耗的关系分析

在建筑能耗控制方面,自然采光起着显著作用,优化采光设计不但可降低照明与空调能耗,而且能为建筑节能给予系统性支持,达成绿色可持续发展目标。

2.1 自然采光影响照明能耗机制

日常建筑运营里,人工照明属于主要能耗来源的一种,合理引入自然光就能有效延长室内无需开灯的时间,像办公楼、教学楼这种白天使用频繁的建筑,节能效果特别明显,采光性能好的空间设计能保证室内各区域光照均匀,不会因有暗角或者光线不足开不必要的灯,而且自然光的色温更贴近阳光,能营造出自然明亮的环境氛围让空间更舒适,建筑师设计时得把采光计算和日照分析结合起来,确保建筑物的朝向、窗型、开窗比例这些参数跟采光目标相符,这样才能最大程度发挥自然光的照明作用,减少对电能的依赖,实现节能降耗。

2.2 自然采光对空调系统的间接影响

自然光有节能潜力,但要是处理不好,建筑热负荷可能增加且空调系统能耗也会间接上升,夏季或者温暖气候区,日照过强室内就会过热,需靠冷却系统降温从而导致能源浪费,建筑采光设计得合理控制进入室内的光热量,设置遮阳百叶、深窗洞口、外遮阳板或者用低辐射玻璃这些办法,能在引进光线时有效过滤多余热辐射进而减少空调能耗,再结合自然通风系统和昼夜温差调节技术,室内热环境能进一步优化,提高能源使用效率且达成“采光不增热”的设计目标,协调光与热的策略是自然采光提升建筑整体能效的关键。

2.3 综合采光策略与能耗控制路径

现代建筑节能设计越来越重视系统性和集成性,将自然采光和其他节能技术的协同作用当作设计重点,通过光导管、光反射天井等设备把自然光引导到室内核心区域,既能解决深层空间采光问题,又能减少许多辅助照明,在智能建筑里还能用光感应系统自动调节人工照明亮度以做到“以光补光”,进一步削减能源浪费,并且在建筑生命周期的不同阶段,需用仿真模拟评估采光对能耗的具体影响,以便及时优化设计方案,保证能耗控制目标达成,总体来讲,自然采光和建筑能耗是动态调节与平衡的关系,只有在设计、技术和管理方面高度协同,才会把它的节能潜力真正转化成实际效益,给绿色建筑发展提供有力支持。

3 建筑空间布局与自然采光优化设计

自然采光的质量和效率被建筑空间布局决定性地影响着,因此合理组织建筑平面和立面关系就能最大限度地引导自然光,提升空间利用率和节能效果。

3.1 建筑朝向与开敞关系配置

自然光进入路径与时间分布直接被建筑物朝向决定,这是采光设计的核心要素之一,合理的朝向有助于提高光照持续性和均匀性并能减少阴影干扰。北半球南向立面日照充足稳定,主要采光面和活动空间(如起居室、办公室等)适宜设置在此,而东西向光照变化剧烈,因此得加强遮阳设计以避免眩光和过热问题。组织开敞空间要充分考虑通路和通风需求,可通过中庭、天井、走廊等形式引导自然光深入建筑内部,有效扩大采光范围以解决深进空间照度不足问题,朝向和空间开敞程度协同布置是提升建筑自然采光质量的重要前提。

3.2 功能分区与光照适配策略

自然光的需求在不同功能空间里有差别,建筑空间布局时要科学分区、适配光照,像教学、办公、休闲这类需要稳定自然光环境的空间,优先布置在采光条件好的边缘区域较好,而仓储、设备间等对光照无特殊要求的空间安排在建筑核心或者地下层即可,并且采用开敞式平面设计,减少实体隔断,使自然光在空间自由传播能提高整体照明效率,引入内庭院、天窗和镜面反射墙也是优化光线分布的有效办法,有助于实现“光随功能”的空间分配原则,满足使用者不段、不同活动场景的采光需求,提升空间舒适度和使用效率。

3.3 建筑立面与开窗形式优化

自然光进入质量受立面设计和开窗形式的重要影响,在空间布局确定之后,若能控制窗户大小、窗地比、位置和形状等参数,就能进一步调节采光角度和强度,视野开阔、采光好的场所适合大面积落地窗,但得搭配遮阳装置来控制热增益,深进空间和多层建筑适合高窗和侧窗,这有利于把自然光引到室内较远的地方,使用双层幕墙系统和可调节百叶结构,能根据外部光照条件灵活调整入光量,在提高采光效率的增强建筑节能性能,立面构成和开窗方式得紧密配合建筑整体布局和功能逻辑,因地制宜因时制宜,高效利用自然光,全面提升空间品质。

4 自然采光辅助节能的关键技术与应用策略

绿色建筑发展进程里,自然采光和节能技术融合得越来越紧密,且关键技术手段与策略不断优化,自然光能效利用持续提升,这有助于建筑达成低碳可持续目标。

4.1 高性能采光构件的集成运用

高性能采光构件对提升自然光利用效率、减少能源损耗意义重大,自然光可被光导管系统经反射管道从屋顶传导至建筑深层空间,为无窗或光照不足区域提供高质量自

然光照明,大幅降低白天对人工照明的依赖;智能玻璃带有光学调节功能,低辐射镀膜玻璃技术也能有效调节光透过率与热传导性,在保证室内光照够量的控制热量进入,防止温度因阳光直射而升高、能耗增加;反射型遮阳板、导光棱镜和光棚等创新构件在建筑立面及屋顶广泛使用,丰富了采光方式并提升了建筑设计的技术美感;多种采光构件系统集成后,建筑就能定向调控自然光,实现智能管理,为节能运行提供保障。

4.2 智能感应与照明控制系统

自然采光辅助节能时,智能照明控制系统起承上启下的作用,光照传感器和智能控制器派上用场能实时监测室内外自然光照强度并自动调节人工照明的开与亮度以达成“光强补光弱”的高效照明策略,室外光线足时系统自动关灯或调暗灯具而光线不足就自动补光从而使照明能耗大幅降低,智能系统可结合建筑使用时间、人员活动规律、环境变化制定个性化光照方案如定时控制、分区照明、动态调光等,与建筑自动化管理系统(BAS)或者物联网平台对接后建筑光热环境能协同调节且和窗帘控制、遮阳设备、空调系统联动响应进而使节能效果进一步增强,智能照明控制系统的普及开来不仅提高建筑运营效率还为绿色低碳管理的实现提供强有力的技术支持。

4.3 采光设计与环境适应结合策略

自然采光设计被不同的地域和气候条件提出了差异化要求,能否最大化节能效果,因地制宜的采光策略很关键,高日照区域得重点控制直射阳光带来的过热风险,可采用深窗洞口、外遮阳构件或者植被遮蔽的方式来“滤光降温”,光照弱或者阴雨多的地区要增强采光通道的引导和反射功能以提高采光深度和光照均匀度,再考虑建筑的地理位置和朝向特点,灵活安排开窗位置、天窗形态和立面形式并配合材料和色彩的选择来优化室内光环境,特定使用场景如博物馆、图书馆这种对光照稳定性要求高的空间更得强化采光的可控性和柔和性以防止强光干扰使用功能,采光设计和地域环境、建筑功能、使用需求有机结合起来,建筑空间质量和节能水平就能双重提升,推动建筑朝着更智慧更生态的方向发展。

5 面向可持续发展的自然采光节能设计路径

“双碳”战略背景下,建筑节能设计急需踏上可持续发展道路,而绿色设计里自然采光作为重要部分不断融入系统化、智能化节能机制,从而使生态效益得以并重。

5.1 自然采光融入绿色设计体系

自然采光不再只是一种单一的照明手段,已变成绿色建筑的重要策略之一,在整体建筑设计中引入自然光既能提升空间环境的舒适度,也能被系统地当作控制能耗的重要变量,融入 LEED、绿色三星标准等绿色建筑评估

体系提高采光利用率指标就能优化建筑整体能效等级,与通风、绿化、雨水利用、可再生能源应用等可持续要素协同配合构建生态友好型建筑系统,这种综合性绿色设计策略可降低运营期能源成本、提升建筑环境质量和可持续形象,是未来建筑发展的重要方向。

5.2 低碳理念指导采光策略优化

可持续理念引领着自然采光策略优化围绕低碳目标展开,要从源头控制设计能耗,依靠建筑体型控制、朝向优化、空间组织等手段提高自然光引入效率,构件选材优先选择有环保性能的高反射率内饰材料和节能型玻璃以增强光线扩散和导入效果,还有使用可调节遮阳设施与动态立面系统达成光热平衡是进一步降低建筑能耗的有效办法,后期运营时结合建筑能耗监测平台 and 数据分析系统能实时评估和动态调控自然采光效果以实现建筑光环境和能耗管理长期协同,“源头控制-技术优化-智慧运营”框架下的低碳设计思路给构建节能高效采光系统指明了清晰路径。

5.3 推动设计标准与技术创新融合

制度引导和技术创新同步推进,自然采光与节能设计的可持续发展才能实现。如今很多国家和地区相关的采光与节能设计标准逐步完善,通过规范性指标和技术指南提升建筑光环境质量,引入建筑日照模拟分析、采光因子计算和能耗评估模型,这样在设计阶段就能把采光效益量化,给方案优选提供数据支撑,并且随着智能建筑和可再生能源技术不断发展,采光系统跟智能遮阳、光伏一体化构件、智能照明等集成融合,形成高度灵活又可持续的建筑光能管理体系。未来设计路径应更重视跨学科协作和全过程集成,促使建筑在节能性能、环境适应性和使用者体验方面达到更高水平的统一,在此过程中自然采光会一直发挥其生态引导和技术支撑的双重价值。

6 结语

在建筑设计里,自然采光是个具备美学和功能性的关键要素,它既能提升空间品质,又对建筑节能和可持续发展非常重要,通过合理布局空间、采用先进技术手段和智能控制系统来让自然采光调节照明和热环境,建筑运行能耗就会明显降低,在“双碳”战略和绿色发展理念引导下,自然采光节能设计越来越系统化、集成化、智能化,以后建筑要结合环境特性进行技术创新,不断优化采光策略以构建更生态、高效的人居环境。

[参考文献]

- [1]付亚东.基于节能的高层办公建筑自然采光设计策略研究[J].工程建设与设计,2019(15):21-23.
- [2]常雅倩,舒平.展览建筑的自然采光节能技术策略研究——以中国人居环境设计学年奖设计竞赛获奖方案为例

- [J].建筑节能(中英文),2021,49(7):63-68.
[3]金圃升.严寒地区近零能耗展览馆建筑节能设计策略研究[D].长春:吉林建筑大学,2022.
[4]赵一帆.基于自然光热性能的郑州地区办公建筑节能设计研究[D].郑州:郑州大学,2023.
[5]孟国祥,熊淳.超低能耗建筑设计中的节能策略研究[J].

中国住宅设施,2023(11):37-39.

作者简介:侯睥冉(1992.10—),女,汉族,毕业院校:昆明理工大学,现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司;*通讯作者:郭瑞刚(1977.6—),男,汉族,毕业院校:西安建筑科技大学,现就职单位:雄安城市规划设计研究院有限公司。

基于“三生融合”的乡村聚落建筑空间重构设计研究

李玉鹏

石家庄市万成民用建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]“三生融合”作为乡村振兴战略框架下的核心发展理念,为优化乡村聚落空间提供了具有前瞻性、系统性的导向。然而当前我国乡村俱乐建设空间普遍存在空间资源配置失衡,生产、生活及生态功能体系分割、地域特色缺失等不足,鉴于此,文章基于“三生融合”的内涵与入手,明确建筑空间重构的主要逻辑与导向,从而有针对性地提出四大重构策略,实现乡村聚落建筑空间“三生融合”协同发展。

[关键词]三生融合;乡村聚落;建筑空间;重构设计;功能协同

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18620

中图分类号: TU982

文献标识码: A

Research on the Spatial Reconstruction Design of Rural Settlement Architecture Based on the "Three Life Integration"

LI Yupeng

Shijiazhuang Wancheng Civil Architecture Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: "Three life integration" as the core development concept under the framework of rural revitalization strategy provides forward-looking and systematic guidance for optimizing rural settlement space. However, there is a widespread imbalance in the allocation of spatial resources, division of production, living, and ecological functional systems, and lack of regional characteristics in the construction space of rural clubs in China. In view of this, based on the connotation and starting point of "three life integration", this article clarifies the main logic and direction of architectural space reconstruction, and proposes four targeted reconstruction strategies to achieve the coordinated development of rural settlement architectural space "three life integration".

Keywords: three life integration; rural settlements; architectural space; refactoring design; functional collaboration

引言

乡村聚落的建筑空间形态不仅关乎着乡村居民的环境品质,同时也影响着乡村产业可持续发展与生态环境保护之间的协同效能^[1]。伴随着城镇化进程的加速乡村振兴战略全面深入的推进,在应对新的发展与与挑战时,传统乡村部落建筑空间存在一系列适配性欠佳的问题,因缺乏科学管控与合理规划,导致生态空间遭到无序侵占与破坏,建筑空间的布局并未充分考虑到当地的人文特色以及地域自然条件,生产空间与生活空间相互干扰等,这些问题对乡村“三生”功能的有机融合与协同共进造成了极大的限制,不利于乡村高质量发展。“三生融合”理念强调生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀,三者相互支撑、协同共生,为乡村聚落建筑空间的优化重构提供了全新的理论视角与价值准则^[2]。因此,本次研究将深入探析基于“三生融合”的乡村聚落建筑空间重构设计策略,旨在推动乡村可持续发展,改善村民的居住环境提供理论支撑与实践路径。

1 “三生融合”视角下乡村聚落建筑空间重构的理论框架

1.1 “三生融合”的核心内涵与空间逻辑

《我们共同的未来》指出,可持续发展需要“社会-

经济-环境”三方面兼顾、协调。相较于城市,村庄的社会、经济与环境结合更为紧密。村庄的可持续发展被认为是“三生融合”式的发展^[3]。当前关于“三生融合”的学术研究存在学科差异,环境科学、生态学以及地理学主要侧重于对“三生空间”内在机制进行解析,如生态系统的服务功能、资源承载力阈值的测算以及其动态响应机制;而城乡规划学更注重空间实践,强调要凭借优化用地的集约性、提升功能的协调性以及设计城乡要素流动的路径来实现“三生融合”的实际转变^[4]。“三生空间”涵盖自然生态、产业发展、居住生活。

自然生态:由地理地形、水文地质、动植物等因素叠加形成。传统建设活动改造生态基础,形成当下村庄生产生活基础。产业发展上,传统村庄长期农耕使生产与生态空间融合,近年产业变革催生新业态,改变村庄生产生活空间,推动布局、建筑及生活变革。

居住生活:以村驻地为核心,涵盖居住生活的物质空间以及文化生活空间,具体包括村庄布局、空间环境、建筑风貌、生态景观、民俗传统以及其他非物质文化等内容^[5],居住生活是村庄空间的核心,是自然生态、产业发展以及文化生活影响的产物。

1.2 重构的核心目标与价值导向

以“三生融合”为核心思想,对乡村聚落建筑进行

空间重构的目标可以总结为“三位一体”，即实现“产”的高效益、“居”的高品质以及“景”的高美感三个层面的综合提升。“产”的高效益指的是通过对土地空间格局进行合理的规划布局及多功能空间的复合性利用，提高农业生产、乡村旅游等各项产业的空间使用率；三是生态层面的韧性化，提升建筑空间对于自然生态系统环境的适应力。

其价值观主要包含三点：第一，生态优先导向，尊重乡村原生的自然生态格局，在建筑空间的设计中渗透生态保护的理念；第二，以人为本导向，充分考虑乡村居民的生活习惯及生产需求，“不搞一刀切”的空间改造；第三，可持续发展导向，兼顾当下及未来发展。增强建筑的空间灵活性及适应性。

1.3 重构的关键维度与关系模型

农村村落空间重构主要包括功能层面、布局层面、形态层面和技术层面四个方面的内涵。其中，功能层面主要考虑如何将“三生”的功能进行协同耦合，避免功能单一化及割裂化等问题的发生；布局层面主要考虑空间的层次划分以及资源分配，即如何对“三生”空间进行合理的分割并使之相互联系；形态层面则注重地域文化特征的继承与发展，防止千村一面；技术层面注重生态技术集成运用，增强空间生态韧性。

基于上述维度，构建“三生融合”导向下乡村聚落建筑空间关系模型（见图 1），该模型以生态空间为基底，

生产、生活空间依其布局，由公共空间廊道连接三者。引入“功能耦合度”“空间适配性”“生态承载力”三大指标，分别衡量“三生”功能协同、空间布局匹配度及界定开发边界。

2 当前乡村聚落建筑空间“三生”功能割裂的核心问题

2.1 功能布局失衡，“三生”空间相互干扰

当前乡村聚落建筑空间的功能布局主要呈现出混乱无序的状态，生活空间与生产空间之间缺乏有效的隔离衔接机制，生产设施安置在居住区域内，严重干扰到居民的日常生活。与此同时，不断侵占原本属于生产与生态的空间领域，进而影响到生产活动，破坏生态环境。除此之外，公共服务空间也存在不合理的情况，进而加剧了“三生”空间的割裂状态。

2.2 空间形态同质化，地域生态与人文基因流失

在乡村建设推进过程中，多数地区进入了盲目跟风的误区，主要参考城市建筑风格与空间模式，这种做法使得乡村聚落建筑空间形态千村一面，无特色，原本的乡村风貌被严重同质化。从生态维度进行深入剖析，在设计时并未充分考虑到乡村的气候特点，地形地貌，在设计过程中，应用高能耗建筑材料，对乡村的环境造成了严重影响。从人文城市进行审视，盲目追求现代化的建设浪潮中，传统的空间格局营造技艺被摒弃，乡村的历史文脉与地域记忆未能通过建筑空间得到有效的传承与延续。

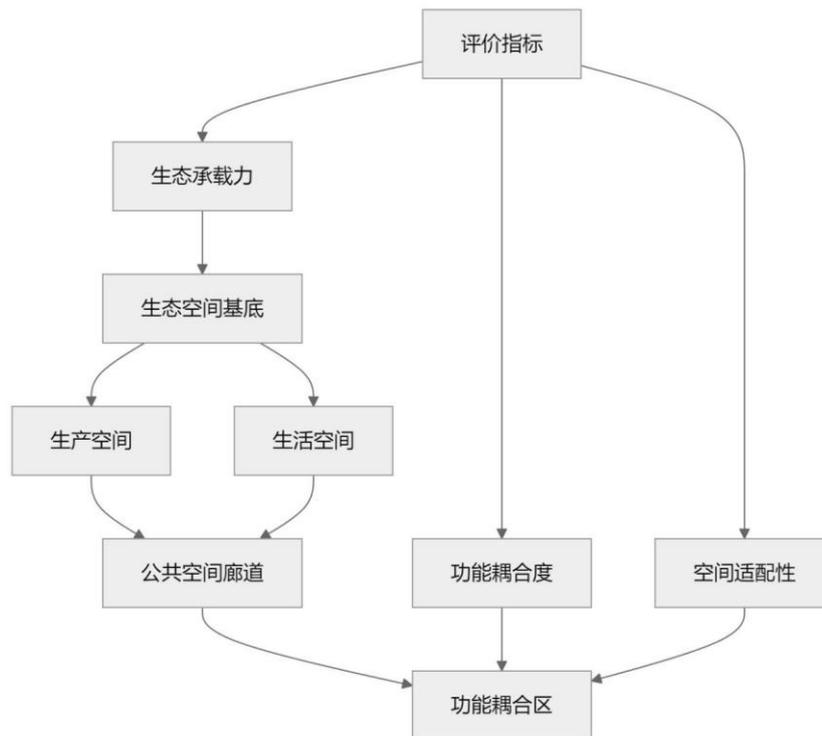


图 1 “三生融合”导向下乡村聚落建筑空间关系模型

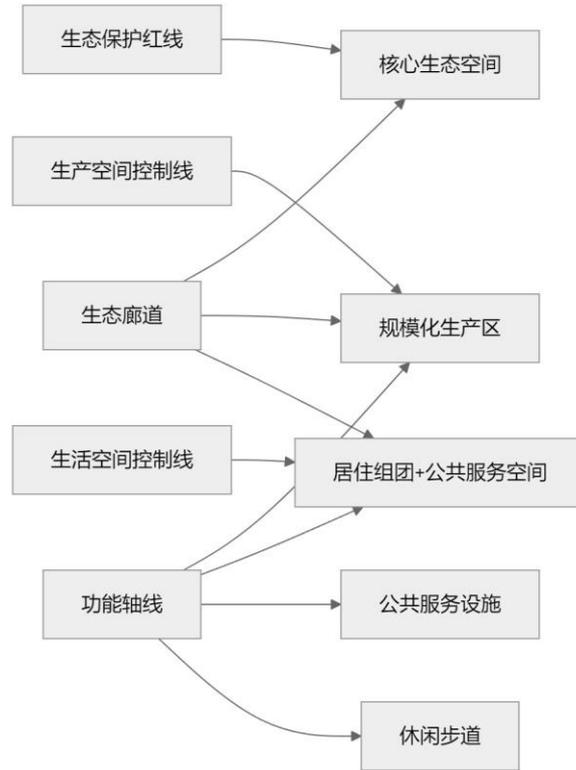


图2 乡村聚落“三生”空间宏观布局示意图

2.3 生态韧性不足，空间可持续性缺失

乡村聚落建设空间在生态韧性方面存在一些不足之处，一方面建筑单体生态性能有待进一步提升。在建筑规划设计阶段并未充分考量节能能力，对于保温隔热的性能表现欠佳，能源消耗量大。另一方面，空间系统的生态调节功能比较薄弱，现实中许多乡村地区在垃圾回收、污水处理、雨水收集等生态基础设施方面存在明显的缺失，导致乡村环境承载力下降。

2.4 功能适配性差，响应动态需求能力不足

随着居民生活模式的转变，乡村对“三生”空间的需求正经历着动态且持续的演变。然而乡村聚落中建筑空间主要以固定功能布局为主，传统的农业生产空间难以满足现代农业集约化、规模化的迫切需求，居住空间难以充分满足居民对于多元化生活方式的追求。

3 “三生融合”导向下乡村聚落建筑空间重构设计策略

3.1 宏观层级：生态基底约束下的“三生”空间统筹布局

一是以生态敏感性评价为基础确定生态保护红线，对山体、林地、河道、湿地等主要生态空间进行严格保护，形成乡村生态安全格局；二是根据农业生产资源分布及产业发展需求，划定生产空间控制线，集中布局农业种植、养殖、农产品加工等生产设施，形成规模化、集约化的生产功能区；第四，按照居民居住需求及公共服务半径确定

生活空间控制线，将居住组团和服务空间布置于生态环境良好、交通便利的地方。

构建“生态廊道+功能轴线”空间连接体系(见图2)，用生态廊道串联核心生态空间与功能区保生态连通性；以功能轴线连接生产与生活区，布局公服设施等，降低空间成本，衔接“三生”空间。

3.2 中观层级：功能复合导向下的建筑组团协同设计

一是农业生产-居住复合组团。适用于以农业为主导的乡村，采用“居住庭院+田间生产”的布局模式，在居住组团周边划定适度规模的家庭农场、菜园等生产空间，实现“房前屋后可耕作”的生产生活模式。组团内部设置共享晾晒场、农具存放间等公共生产辅助空间，同时配套建设邻里交往空间、小型休闲设施，兼顾生产效率与生活舒适度。结合村庄实际状况，充分考虑村民们提出的意见和诉求，按照“共建共享”的原则，大力加强村庄基础设施建设，全面改善村庄居住环境^[6]。规划居民点东南方新建1座小型污水处理设施，全面处理村内产生的污水。二是产业升级-公共服务复合组团。适宜发展乡村文旅、电商等新兴业态的乡村，将乡村闲置民居和公共建筑组合，改造为特色民宿、农产品展示馆、电商服务中心等产业空间，以及配套设置游客服务中心、文化活动广场、乡村食堂等公共服务空间。通过功能复合设计，推动产城融合，促进农村繁荣宜居发展。三是生态涵养-休闲体验复合组团。适用于生态资源丰富的乡村，依托山林、河道等生态

空间,布置生态步道、观景平台、露营基地等休闲体验空间以及生态科普馆、环境监测站等生态服务设施。规划采用“集中”和“分散”相结合的模式,构建村庄景观以及公共空间体系。沿村庄中部靠近村委会的主要道路,打造特色民俗风情街;结合党群服务中心、村史馆以及剧院所在的集合区域,对村委广场进行提升改造,形成村庄核心聚集区域;保留村委文化活动和便民服务室现状,对现有活动场所进行改造升级,规划新建广场和绿地公园,布置健身设施,让广场具备停车、休闲等多种功能;组团严格按照生态保护的原则进行规划,使用生态友好型的材料及施工方法,防止破坏环境。

3.3 微观层级:生态适配与地域传承的建筑单体设计

微观层面的核心是优化建筑单体的功能、形态与生态性能,实现建筑与自然生态、地域文化的适配。具体设计策略包括:

一是,功能弹性设计。建筑单体采用“主体空间+灵活附加空间”的布局模式,主体空间满足基本居住或生产需求,附加空间可根据需求灵活转换为居家办公、农产品加工、休闲娱乐等功能。例如,传统民居的堂屋可改造为多功能空间,兼具家庭聚会、农产品展示等功能;厢房可设置可移动隔断,实现空间的灵活划分。

二是生态技术集约化使用。基于乡村自然环境,引入被动式节能技术和主动式生态技术,增强建筑的生态弹性。被动式设计中充分利用地形地物进行自然通风和采光,运用当地乡土材料(如夯土、木头、石头)提高建筑的保温隔热能力;主动式设计中将太阳能光伏发点、雨水回收、小规模污水处理设施等技术进行整合,水能自给、资源循环。

地域形制延续。提取传统民居中的地域元素(屋面形式、门窗形式、院落形式),应用于现代建筑之中,在继承的基础上创新发展。比如,延续传统民居坡屋顶的形式,对屋面坡度进行改良,使之适合当地的降雨量情况;借鉴传统民居门窗的雕花形式,用新的材料对其进行重塑,既要体现地域特色,又要增加建筑的密闭性和安全性能。

针对生态空间,以保护为前提,保护村域内划定的生态保护红线,加大生态公益林的保护力度,杜绝开展破坏生态景观、污染环境的开发建设活动。保留村庄原本地貌、自然形态,保护村庄自然风光,对林网、水系等能够体现生态风貌的空间进行优化处理;对村庄的活动空间进行改造,增加景观休闲空间,设置健身休憩设施,对村庄入口

景观进行改造提升,在宅间、宅旁增设邻里小花园、小菜园,丰富村民日常生活,为村民提供散步、健身、休憩的活动场所。

4 结论与展望

“三生融合”理念为乡村聚落建筑空间的重构提出了系统性的理论之一,其主要在于突破生产生活以及生态三者之间的孤立格局,基于乡村聚落建筑的实际情况构建空间布局合理、功能协同共生、生态韧性彰显、具有浓郁地域特色的空间体系。本文研究中以乡村聚落建筑空间领域为研究对象,首先对当下乡村聚落建筑空间在三生功能方面所存在的核心问题进行了深入性的分析,基于上述分析提出了针对性的重构策略。对于乡村聚落建筑空间的有效构建,为了可以实现功能协同的核心目标,首先要以生态空间作为坚实的基底,合理利用资源配置。通过优化建筑单体,进一步提高建筑的使用性能与品质。我国地域辽阔,村庄规模大,资源禀赋各不相同,在规划引导村庄建设的各个阶段依然存在诸多挑战,加强数字化技术在乡村聚落建筑空间中的应用,基于不同类型乡村在文化传统、产业结构、地理区位等方面的差异化,需要进一步细化村庄分类,开展具有针对性、差异化、精细化的设计策略,针对资源禀赋发展阶段,提出特色的村庄规划编制路径,助力乡村振兴。

【参考文献】

- [1]华乐.国土空间规划体系下实用性村庄规划策略探讨[J].城乡规划,2021,11(11):69-81.
- [2]吴昊,陈前虎,黄鹏奇,等.国土空间规划背景下基于乡村单元的实用性村庄规划编制探索[J].小城镇建设,2022,40(11):41-49.
- [3]李梦洁,姜翠梅.国土空间背景下乡村规划体系构建:基于西安市的探索与经验[J].小城镇建设,2023,41(9):76-82.
- [4]刘燕.论“三生空间”的逻辑结构、制衡机制和发展原则[J].湖北社会科学,2016(3):5-9.
- [5]金星星,陆玉麒,林金煌,等.闽三角城市群生产-生活-生态时空格局演化与功能测度[J].生态学报,2018,38(12):4286-4295.
- [6]陈小卉,胡剑双.江苏省乡村空间治理实践:阶段、路径与模式[J].城市规划学刊,2024(1):38-45.

作者简介:李玉鹏(1989.3—),毕业院校:河北工程大学,所学专业:建筑学,当前就职单位:石家庄市万成民用建筑设计有限公司,职务:职员,职称级别:工程师。

传统营造技艺与现代建筑技术的融合

贾娟

石家庄市建筑设计院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]传统营造技艺承载着中华优秀传统文化精髓,体现了尊重自然、就地取材的营造理念及人文思想;而现代建造技术则是工业化、标准化、智能化为主导方向的现代化建筑体系,两者并不矛盾,而是有着一定的契合点。文章从跨学科角度出发,以传统营造技艺的本质内涵解读为起点,分析现代建筑技术发展的特点及不足之处,讨论两者的融合逻辑和契合层面,给出两者融合的方法途径和协同方式,说明两者的融合意义。研究发现,传统营造技艺和现代建筑技术的融合就是文化精神和技术方法上的结合,技术转译、理念协同及机制创新可实现文化传承与技术创新双轮驱动,进而助推现代建筑的高质量发展。

[关键词]传统营造技艺;现代建筑技术;融合逻辑;技术转译;文化传承

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18608

中图分类号: K879.1

文献标识码: A

The Integration of Traditional Construction Technology and Modern Architectural Technology

JIA Juan

Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Traditional construction techniques carry the essence of excellent traditional Chinese culture, reflecting the construction concept and humanistic ideas of respecting nature and using local materials; Modern construction technology, on the other hand, is a modern building system dominated by industrial production, standardization, and intelligence. The two are not contradictory, but have certain points of convergence. The article starts from an interdisciplinary perspective, interpreting the essence of traditional construction techniques as a starting point, analyzing the characteristics and shortcomings of modern architectural technology development, discussing the integration logic and compatibility level of the two, providing methods and collaborative approaches for their integration, and explaining the significance of their integration. Research has found that the integration of traditional construction techniques and modern architectural technology is the combination of cultural spirit and technical methods. Technical translation, conceptual collaboration, and mechanism innovation can achieve a dual wheel drive of cultural inheritance and technological innovation, thereby promoting the high-quality development of modern architecture.

Keywords: traditional construction technology; modern architectural technology; fusion logic; technical translation; cultural heritage

引言

随着现代化进程的加快及建筑工业化的兴起,以高效、准确、批量生产为特点的现代建筑技术逐渐成为了当今时代的主导模式^[1]。但同时,在强调技术和效率的同时,一些现代建筑又面临着千篇一律、脱离当地特色、缺乏环境亲和力的问题,人文关怀和文化内涵被弱化。在当代建筑中将传统建造工艺融入到建筑设计当中,不是两者简单相加或是相互复制,而是在各自特点基础上进行整合^[2]。目前对于如何将传统建造工艺融入到建筑设计中的研究,主要集中在个案探讨上。因此,本文寻求文化发展和技术进步双轨并进的发展模式,以期对建筑业迈向文化型、绿色型及科技型奠定一定的基础。

传统营造技艺与现代建筑技术的融合,并非简单的技术叠加或形式模仿,而是基于各自核心优势的有机重构^[3]。当前学界对二者融合的研究多集中于具体案例分析,缺乏对融合本质、逻辑与路径的系统性理论建构。基于此,本文摒弃案例堆砌的研究模式,从理论层面深入剖析二者融合的内在机理,探索实现文化传承与技术创新协同发展的

可行路径,为推动建筑行业向文化赋能、生态友好、技术先进的方向转型提供理论支撑^[4]。本文系统梳理传统营造技艺与现代建筑技术的核心内涵,借鉴建筑技术学、文化人类学、生态学等多学科理论,构建二者融合的理论框架,为后续相关研究与实践提供理论参考。

1 现代建筑技术的发展特征与局限

现代建筑技术是工业革命以来科学技术发展的产物,以工业化生产、标准化建造、智能化管控为核心特征,极大地提升了建筑建造的效率、质量与安全性。传统营造技艺蕴含着丰富的生态智慧,核心是“资源循环利用、低环境影响”的营造原则^[5]。在材料选择上,传统营造优先采用木材、石材、土坯等可再生、可降解的天然材料,这些材料不仅具有良好的环境兼容性,且在使用寿命结束后能够自然降解,减少对环境的污染。在建造工艺上,传统技艺注重材料的高效利用,通过精准的下料与构件设计,最大限度地减少材料浪费^[6]。然而,在快速发展过程中,现代建筑技术也暴露出诸多局限,主要表现为文化属性缺失、生态适应性不足与技术理性过度等问题,这些局限为传统

营造技艺的融入提供了契机。缺乏文化属性的特征也是现代建筑技术的一大弊端。受技术理性主义影响,现代建筑技术过于强调效率与标准,忽略了建筑所应具备的地域文化属性及人文精神,标准化的设计与建造带来了大批“千城一面”,将建筑从地域文化、历史文脉中剥离出来。人文气息淡化,城市的特色被弱化甚至消失,削弱了城市的文化记忆。建筑的人文关怀缺失,千城一面^[7]。

现代建筑多采用混凝土、钢铁等不可再生材料建造而成,现代建筑的技术手段缺乏生态适应性,其制造过程需耗费大量能源,并释放出大量碳排放物,对环境的影响不容小觑;而且现代建筑常借助空调、暖气等主动式的能源设备控制室内的温湿度变化,造成建筑能源消耗量大,违背可持续发展的理念。同时,当代建筑在建设过程中会对场区环境产生较大的影响,并没有顺应和尊重自然环境。技术理性泛滥造成建筑体验的同质化。现代建筑技术过分注重技术的功能性和实用性,忽略了人的情感需求和空间体验。千篇一律的空间设计、冷冰冰的空间材料、机械化的设计制作,让现代建筑缺少传统建筑的人情味和家的感觉,无法满足人们对于高品质的生活空间的需求。

2 传统与现代融合的核心逻辑与适配维度

2.1 融合的核心逻辑: 文化遗产与技术创新的双向赋能

整合的内在机理是实现传统文化与现代科技的双向赋能。一方面,传统营造技艺赋予现代建筑技术以文化的内涵和思想的力量。传统营造的“天人合一”观念、生态智慧与人文精神可以弥补现代建筑技术在文化上的空洞和生态上的狭隘,为现代建筑的技术发展提供思想指导;传统营造的模块化建构思维、材料运用方法等可以为现代建筑技术的发展完善提供实践经验参考;反过来,现代建筑技术又为传统营造技艺的继承发展提供技术手段与实现方式。现代建筑的工业生产、数字设计、智能管理等技术能解决传统营造技艺手工作业效率低、精准度不高、无法满足大量建造需求等问题,实现传统营造技艺的现代化更新;现代材料及技术手段,可提高传统营造技艺的适用性和耐久性,并扩展应用范围^[8]。

这一双向赋能的融合逻辑超越了传统与现代二元对立的状态,在实现文化价值和技术价值的同时,将传统营造技艺从一个静态的传统历史遗产转变为具有适应性功能的社会生活形态,同时赋予现代建筑技术以新的生命活力使其成为一种可感知的文化表达。

2.2 融合的适配维度: 理念、技术与价值的三重契合

思想观念上的契合是融合的基础。传统的营造“天人合一”的理念与现代可持续建筑理念、绿色建筑理念是一致的,它们都重视建筑与自然环境相协调,注意对自然资源的合理使用以及对自然环境的保护;传统的营造地域文化适配的理念与现代建筑的地域主义设计的理念也是相

通的,都注重建筑与地域文化、历史文脉之间的关系。理念上的契合度是二者融合的思想前提,让传统营造理念能很好地融入到现代建筑的设计及建造中去。

技术上的衔接是融合的关键。传统营造的模数制建造逻辑与当代建筑的工业建造技术有较好的可衔接性,传统的标准件与当代的预制装配式技术可以有效结合;传统营造的榫卯搭接方式与当代的钢结构连接技术、节点设计方法有着内在的力系逻辑契合,可以通过技术转译相互弥补;传统的营造被动式的生态策略可以和现代绿色建筑技术(自然通风优化技术、太阳能利用技术等)相结合来提高建筑的生态性。

技术层面的适配性,为二者的融合提供了技术支撑,使得传统营造技艺能够通过技术转译转化为现代建筑技术体系的组成部分。价值上的匹配是融通的前提条件。传统营造技艺所追求的“实用、美观、耐久”的价值取向以及现代建筑技术所追求的“安全、高效、舒适”的价值取向具有内在的一致性,都是为了实现人的需求为目的,在满足功能的前提下兼顾审美的感受,传统的文化价值和现代的技术价值可以互相弥补,构建“文化+技术”双价值系统,提升建筑整体价值。价值上的契合性,为二者融合提供动能,保证其可获得市场及社会认同。

为更清晰地展现二者的适配关系,表1从核心维度、传统营造技艺特征、现代建筑技术特征、适配点四个方面进行梳理:

表1 适配关系梳理

核心维度	传统营造技艺特征	现代建筑技术特征	适配点
理念维度	天人合一、地域适配、人文关怀	可持续发展、绿色生态、地域主义	自然和谐、地域文化、人文需求
技术维度	模块化构造、榫卯连接、被动式生态策略	工业化生产、预制装配、智能化管控	标准化构件、力学逻辑、生态协同
价值维度	实用、美观、耐久、文化传承	安全、高效、舒适、技术创新	以人为本、功能与审美统一、综合价值提升

3 融合的实现路径与协同机制

3.1 理念转译: 从传统到现代的思想赋能

理念转译是融合第一步,核心是把传统营造核心理念转化成现代建筑设计的原则。首先是将“天人合一”转译成现代建筑生态设计原则,即在建筑设计上考虑自然环境的影响,通过对地形、气候、水文等因素准确把握,从而对建筑物的布局、方向、门窗进行优化,促进建筑与地域的融合。第二,把传统的地域文化的适应观转译成现代建筑的地域主义观,充分发掘地域文化特色,把地域的文化要素以新的设计形式转译到建筑空间、构件及细部上,提升建筑的地域识别度。第三,把传统的关心体贴、以人为本的理念转化为现代建筑中人性化的设计思想,强调对人的感情的关注及空间感受,在建筑尺

度、空间气氛、材料触觉等方面营造出温暖、亲切、舒适的建筑空间环境。

应当把握传统观念的精神实质,结合时代需求和技术手段进行创新性转换。如传统的营造“风水”观念,其实是顺应并改善自然环境,可转化为现代建筑的环境心理学及生态设计法则,而不仅仅是形似的模仿。

3.2 技术协同:传统技艺的现代化转译与集成

融合体现在技术上的协同,即对传统营造技艺在形式上的现代化转译后所形成的现代建造技术与之相结合的过程。可以从以下三方面入手:一是构件及构造方面的技术转译。对传统营造中的标准性构件(如榫卯)利用数字模型、参数化手段等加以现代性的转译,使之适应当代工业化的制造模式。在榫卯连接的基础上,借鉴现代钢结构、混凝土结构中的节点设计思想和方法,形成有传统特色又能满足现代功能需求的新式节点。例如利用 BIM 建立传统的榫卯构件模型并对其进行受力分析,计算出其合理的尺寸大小以及连接方式以适应现代化的建筑。

二是材料的融合创新。一方面是对传统天然材料(木材、石材、土坯)进行现代加工改良,采用防腐、防火、加固等手段提高其性能,扩大其应用范围到现代建筑物中去;另一方面是传统材料与现代新型材料(高性能混凝土、节能玻璃、复合材料)结合,优势互补。如采用原木材料搭配钢材形成混搭式的结构系统。

三是生态技术的组合运用。将传统营造中的被动式生态策略(自然通风、遮阳、采光)和现代绿色建筑的技术手段(太阳能利用、地热能利用、雨水回收系统)结合起来,形成有效的生态建筑技术体系。通过现代技术手段对传统的被动式策略进行更新整合,以降低对主动式能源系统的依赖程度,减少房屋能源消耗及碳排放量。如借鉴传统建筑挑檐做法,在结合现代遮阳的基础上,研究新的遮阳构

件,做到遮阳功能与建筑造型相结合,下图 1 构建了传统与现代建筑技术协同的框架图:

3.3 机制保障:多元协同的支撑体系构建

融合的实现有赖于政策、技术、人才、市场等多方协作机制的建立。从政策上看,国家及地方政府应出台相关政策鼓励传统营造技艺与现代建筑技术的融合创新,并设立专项扶持资金,支持相关的技术研发以及项目示范;完善相关的标准规范,明确融合建筑技术要求及评价方法,指导融合实施方向。

从技术研发的角度,搭建产学研合作交流机制,发挥高校、科研机构、企业优势,进行传统营造技艺现代转译关键技术的研究;加大数字化技术应用力度,建立传统营造技艺数字化数据库,为技术转译及技术创新提供数据支持;促进技术成果转化和推广,研究成果在工程中的转化利用,促进研究和技术开发向生产力转化。

4 结论

传统营造技艺与现代建筑技术相结合,是文化传承与技术创新的要求,本质上是文化内核和技术逻辑的结合。传统营造技艺所具有的“天人合一”的思想、“积木式”的建造逻辑以及生态智慧,与现代建筑技术所追求的可持续发展理念、工业化生产技术、绿色建筑技术有着天然的契合点。以理念转译的技术路径、技术协同的技术策略和机制保证的工作方式为工具,使二者得以融合,达到文化价值、生态价值和技术创新价值的统一,在融合过程中深入挖掘传统营造技艺的价值内涵并结合当下社会需求和技术条件予以理念转译与技术协同。此外,建立多元联动的机制保障体系,保障融合的顺利进行。在未来的技术进步以及观念更新下,传统营造技艺与现代建筑技术的融合将会呈现更多样化、智能化的趋势发展,促进建筑业的文化赋能、生态绿色、技术先进化的转型发展,为建筑业高质量发展提供新动能。

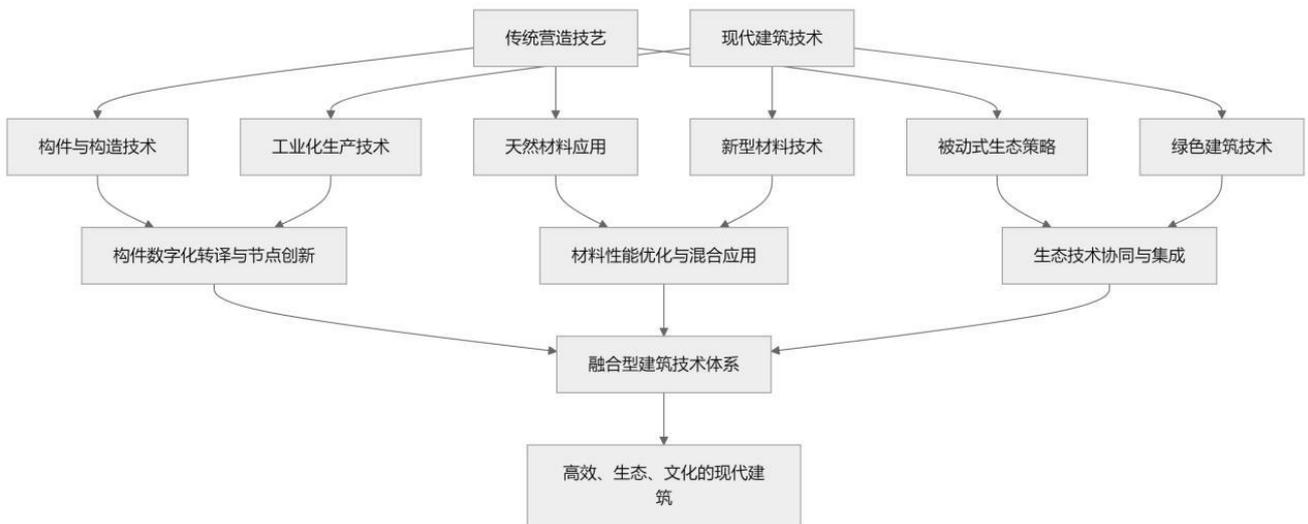


图 1 传统与现代建筑技术协同框架图

[参考文献]

- [1]周坤,王进.从景观生产到地方营造:传统村落更新理论循证[J].城市规划,2024,48(7):83-89.
- [2]赵巧艳.非物质文化遗产视角下传统技艺的传承与保护——以侗族木构建筑营造技艺为例[J].徐州工程学院学报(社会科学版),2014,29(5):89-94.
- [3]王颢霖.中国传统营造技艺整体性保护的思路与策略[J].建筑与文化,2023,11(5):170-172.
- [4]王薇,韩子藤.非遗视角下徽派传统民居营造技艺传承与创新研究[J].住宅科技,2021,41(7):47-51.
- [5]刘沛林,邓运员.数字化保护:历史文化村镇保护的新途径[J].北京大学学报(哲学社会科学版),2017,54(6):104-110.
- [6]唐丽.浅析传统艺术与媒体艺术的跨界设计——以上海世博会中国馆《清明上河图》为例[J].大众文艺,2012,11(23):109-110.
- [7]李伟荣.建筑遗产数字化保护集成设计研究[D].广东:广州大学,2024.
- [8]黄华青,王岩.历史空间与现实生活融合的“体验再现”——面向遗产展示的虚拟现实展陈设计路径初探[J].中国文化遗产,2024,11(2):23-31.

作者简介:贾娟(1994.5—),毕业院校:河北建筑工程学院,所学专业:城乡规划,当前就职单位:石家庄市建筑设计院有限责任公司,职务:职员,职称级别:中级工程师。

谈智能化技术在建筑设计中的应用与展望

康少存

河北大成建筑设计咨询有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]随着信息技术的飞速发展,智能化技术逐渐成为推动建筑行业革新的核心动力,从建筑设计理念到设计流程再到运营管理模式,均已发生显著变化。智能化技术为建筑设计提供了更加科学、高效和可持续的路径,使建筑功能性与使用者体验得以全面提升。文中基于智能化技术的发展现状,分析其在建筑设计中的典型应用,包括智能设计辅助系统、建筑信息模型技术(BIM)、人工智能算法、智能材料与智能环境控制等内容,同时探讨其对建筑设计逻辑、创新模式及行业未来发展的影响。文章进一步指出智能化技术应用中存在的挑战,并从标准体系建设、复合型设计人才培养及跨行业融合等方面提出展望,为建筑设计行业的持续发展提供理论参考与实践启示。

[关键词]智能化技术; 建筑设计; 建筑信息模型; 人工智能; 可持续建筑

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18605

中图分类号: TU243

文献标识码: A

Application and Prospect of Intelligent Technology in Architectural Design

KANG Shaocun

Hebei Dacheng Architectural Design Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the rapid development of information technology, intelligent technology has gradually become the core driving force for innovation in the construction industry. From architectural design concepts to design processes to operational management models, significant changes have occurred. Intelligent technology provides a more scientific, efficient, and sustainable path for architectural design, enabling comprehensive improvement of building functionality and user experience. Based on the current development status of intelligent technology, this article analyzes its typical applications in architectural design, including intelligent design assistance systems, building information modeling technology (BIM), artificial intelligence algorithms, intelligent materials, and intelligent environmental control. At the same time, it explores its impact on architectural design logic, innovation models, and future industry development. The article further points out the challenges in the application of intelligent technology and proposes prospects from the aspects of standard system construction, cultivation of composite design talents, and cross industry integration, providing theoretical reference and practical inspiration for the sustainable development of the architectural design industry.

Keywords: intelligent technology; architectural design; building information modeling; artificial intelligence; sustainable architecture

引言

当今世界正处于数字化、智能化快速发展的时代,建筑行业作为国民经济的重要组成部分,正不断加速技术革新与转型升级。智能化技术凭借其数据驱动分析、自动化处理、模拟预测与智能控制的优势,正在深刻改变建筑设计的流程与思维方式,使建筑从传统模式逐渐迈向精准化、可持续化与智慧化的发展路径。建筑设计不再仅仅依赖设计师的经验判断,而是通过大量数据采集、仿真模拟与智能推演,使建筑方案更加科学、合理、符合未来发展需求。当前,智能化技术在建筑设计领域的应用已初具规模,包括 BIM 技术、人工智能辅助设计系统、虚拟现实与增强现实技术、智能材料技术、智能运维控制系统等,它们极大提高了设计效率、优化了空间利用、增强了建筑安全性,并推动设计理念从以人为中心延伸到“人-建筑-环境”多维互动模式。然而,智能化技术在建筑设计实践中仍面临标准体系不完善、数据安全隐患、人才结构不足等难题,需要进一步探索发展路径。基于此,本文围绕智能化技术

在建筑设计中的应用现状、创新价值、现实困境以及未来展望展开研究,以期为建筑行业转型升级提供参考依据。

1 智能化技术推动建筑设计变革的背景与意义

1.1 信息技术发展引领建筑行业数字化转型

随着大数据、物联网、人工智能等技术在**全球范围内**迅速发展,各行业纷纷进入数字化转型阶段,建筑行业亦不例外。传统建筑设计在很长时期内依赖人工经验,设计流程复杂而冗长,数据采集效率低、图纸修改频率高、设计冲突难以及时发现。智能化技术的出现,使建筑设计模式逐渐由静态二维表达转向动态信息模型驱动,从信息采集、参数推演、性能评估到最终呈现,都能够实现数字化处理。智能化技术不仅提高了建筑设计的准确度,还能够通过多源数据整合实现信息共享,使建筑设计更具实时性、系统性与前瞻性。此外,数字化技术让建筑项目不再局限于单一环节的优化,而是可以通过全生命周期的管理结构实现从设计到施工再到运维的整体提升。这种技术变革为建筑行业的现代化发展奠定了基础,推动建筑设计范式从

传统模式向智能化模式演进。

1.2 智能化技术提升建筑设计效率与创新能

建筑设计需要兼顾结构安全、空间功能、美学表达与经济可行性等多项要求。在传统设计方法中,设计师需要进行大量手工计算、绘图、调整与比对,整个过程耗时耗力。而智能化设计系统的引入,使这一流程得以显著加速。例如,基于参数化设计技术,设计师只需调整关键参数,系统即可生成多种设计方案,并自动完成结构优化、空间评估与图纸输出,有效缩短设计周期。智能化技术还可以通过模拟建筑在不同气候条件、风场环境或光照变化下的性能表现,使设计方案更加符合科学规律。此外,智能化技术为建筑创新带来无限可能,使设计师能够突破传统限制,通过复杂生成算法探索新型空间形式与建筑语言,为建筑创作提供丰富的灵感源泉。可以说,智能化技术不仅提高了效率,还成为推动建筑设计创新的核心动力。

1.3 推动建筑行业向可持续发展与智慧化方向迈进

在全球倡导节能减排与生态文明建设的背景下,建筑行业作为能源消耗大户,其转型意义重大。智能化技术在建筑节能设计、碳排放控制、绿色材料选择等方面发挥了关键作用。设计师可以通过智能化工具模拟建筑能耗,优化自然通风系统,提高光照利用率,从而实现节能目的。在建筑运营阶段,智能系统能够实时监测能耗数据,并根据环境与使用情况自动调整设备运行状态,实现动态节能控制。此外,智能建材、自适应立面、智能采光系统等技术的出现,使建筑具备了环境响应能力,使其在复杂气候条件下依然保持舒适性与稳定性。智能化设计不仅提高建筑性能,也推动建筑行业朝着绿色化、智慧化方向不断深化,为实现城市可持续发展提供强大支持。

2 智能化建筑设计中的关键技术体系

2.1 建筑信息模型(BIM)引领建筑数字化全流程管理

BIM 技术是建筑行业数字化应用的核心,其优势不仅体现在三维建模上,更体现在信息整合与全生命周期管理功能上。通过 BIM 平台,参与设计、施工和运营管理的多方人员可以实时共享数据,提高协作效率,减少沟通误差。在设计阶段, BIM 能够自动生成施工图纸、检测碰撞问题、模拟功能布局,使设计科学性得到提升。在施工阶段, BIM 能够协助管理者制定施工组织计划,优化材料运输路径与施工工序安排,从而有效降低成本与施工风险。在运营阶段, BIM 模型与智能监测系统结合,可以实现管线管理、能耗分析与设备维护,提高建筑运营效率。可以说, BIM 构成智能化建筑设计与管理的基础平台,是未来建筑行业不可或缺的核心技术。

2.2 人工智能在建筑设计中的辅助作用

人工智能技术通过学习大量建筑数据与设计逻辑,能够在建筑设计阶段提供科学推演、自动化计算与方案生成等功能。参数化设计与生成式设计作为人工智能算法的典

型代表,能够根据设计师设定的约束条件自动生成大量设计方案,使建筑空间组织更加合理。例如,算法可以依据场地环境与建筑功能需求,自动优化窗墙比例、立面形式、结构框架等,从而实现最优设计。此外,人工智能还可用于建筑能耗预测、风环境分析、人流模拟等,通过快速计算与图形化呈现,帮助设计师更直观地了解设计方案表现,从而做出更加精确的决策。人工智能不仅是技术工具,更是推动建筑创意与科学融合的重要桥梁。

2.3 虚拟现实(VR)、增强现实(AR)与数字孪生技术的应用

VR 和 AR 技术为建筑设计提供了沉浸式体验,使设计师与业主能够在建筑尚未建成时“提前体验”。在 VR 环境中,设计师可以检查空间比例、光照效果与材料质感,并根据体验情况进行优化,减少施工后返工风险。AR 技术能够将数字模型叠加于真实场景,为施工指导提供直观依据。此外,数字孪生技术作为更高级的虚拟系统,能够同步映射现实建筑,在设计阶段进行超前模拟,在运营阶段进行实时监测,使建筑成为具有感知、分析与反馈能力的智能系统。

3 智能化技术提升建筑性能的机制

3.1 智能技术推动空间布局优化与功能组织完善

建筑设计的核心在于空间优化,而智能技术能够通过模拟计算为布局决策提供数据依据。例如在复杂建筑中,人流分布可能呈现多样化趋势,传统设计难以精确预估,而智能模型可以根据高峰流量、活动类型等进行模拟,帮助设计师规划合适的交通系统,提高空间效率。此外,智能系统还能够预测未来使用需求,使空间具备可变性与扩展性,这对于公共建筑与大型场馆具有重要意义。

3.2 促进建筑节能减排与环境适应能力提升

智能化设计工具能够模拟建筑在全年气候条件下的热环境、光环境与风环境表现,从而为节能设计提供科学依据。例如,通过模拟日照角度与遮阳效率,设计师可确定最优窗墙比例与外遮阳系统;通过风环境分析,可优化建筑形体与周边植被布局,以提高自然通风效率。此外,建筑运营阶段的智能控制系统可实时调节空调、照明等设备,使其在舒适性与能耗之间找到最佳平衡。

3.3 提高建筑安全性与结构可靠性

结构安全是建筑设计的首要目标。智能化技术可通过大数据分析 with 结构模拟预测潜在风险。例如,智能监测系统可以实时获取建筑结构受力状态、变形情况与震动数据,出现异常时及时预警,避免重大事故发生。此外,智能材料如自修复混凝土、变色玻璃等具有响应环境变化的能力,使建筑具备更高的耐久性与适应性,提升使用寿命与安全水平。

4 智能化建筑设计应用中存在的挑战

4.1 技术标准体系不完善制约行业发展

当前各地区智能技术应用标准存在差异,数据格式、

参数设定、评价方法缺乏统一规范,导致不同阶段与不同平台之间数据互通困难,影响协同效率。例如在 BIM 应用中,不同软件之间存在兼容性问题,使信息共享受限。缺乏统一标准也使建筑项目难以建立完整的智能化评估体系,进一步影响技术推广。

4.2 专业人才发展滞后,制约技术应用深度

智能化建筑设计需要跨学科能力,包括建筑学、计算机科学、数据分析、工程技术等复合背景。然而当前行业内具备综合能力的人才相对缺乏,大多数设计师对智能工具的掌握停留在表层,对参数化设计、生成算法等技术缺乏系统性理解。此外,部分施工与运维人员数字化素养不足,也影响智能技术在后期使用阶段的应用效果。

4.3 智能建筑数据安全问题亟待解决

智能建筑需要采集大量运行数据,包括人员流动、设备状态与环境数据等。如果数据管理机制不完善,可能造成信息泄露或遭受网络攻击,影响使用者隐私与建筑安全。目前建筑行业对数据安全的防护能力仍不足,应建立更严格的数据管理制度与安全防护策略。

5 智能化建筑设计的未来发展趋势

5.1 智能化建筑标准体系将更加完善

未来,建筑行业将逐步建立统一的数据管理标准、模型标准与操作流程,使智能化技术在不同环节中的衔接更加顺畅。标准化不仅能提升行业效率,也能为智能建筑的认证体系提供基础,使智能化建筑更加规范化、可量化与可评估。

5.2 复合型技术人才成为行业发展核心

智能化技术在建筑行业的不断深入应用,对建筑设计人才的能力结构提出了新的要求。未来的建筑设计师不仅需要扎实的专业基础,还应具备跨学科理解与协同能力,能够将建筑学知识与计算机科学、人工智能等领域的技术手段相结合。高校在人才培养过程中,将逐步加强学科交叉融合,通过课程整合和实践教学,引导学生掌握数字建模、智能分析和数据应用等能力,为行业发展提供复合型人才支撑。行业层面也需要持续推进在职培训和能力提升计划,帮助现有设计人员适应技术变革带来的新要求。通过系统培训和实践应用,设计人员的数字化思维和技术应用能力将不断增强。教育体系与行业培训的协同推进,有助于构建更加完善的人才培养机制,为建筑行业的智能化转型提供坚实的人才保障。

5.3 智能化技术与绿色建筑、智慧城市深度融合

面向未来发展,城市运行将更加依赖智慧化体系,智

能建筑作为其中的重要节点,将深度融入城市整体管理网络。通过与城市数据平台、能源系统和交通系统建立联动机制,建筑运行状态能够被实时感知和动态调节,为城市管理提供精细化支持。建筑不再是独立存在的空间单元,而是参与城市信息交互与资源调配的重要组成部分。智能化技术在这一过程中也成为绿色建筑发展的重要支撑,通过对能耗、环境参数和设备运行状态的智能控制,实现能源利用效率的持续提升。环境监测与数据分析手段的应用,使建筑能够根据外部条件和使用需求进行自我调节,减少资源浪费。智能建筑在节能减排中的作用日益突出,为城市实现低碳发展和碳中和目标提供有力支撑,推动城市向更加高效、可持续的方向演进。

6 结论

智能化技术的广泛应用,正在深刻改变建筑设计的理念与方式,使设计模式由传统的静态表达逐步迈向数字化、智能化和系统化发展阶段。借助数据分析、智能建模与仿真技术,设计过程更加高效精准,方案决策也更具科学依据。智能化手段的引入,不仅提升了建筑在结构安全、能源利用和功能适配方面的整体水平,也增强了建筑对使用者需求和环境条件的响应能力。建筑设计由单一形态塑造转向综合性能优化,设计价值不断拓展。技术快速发展的背景下,智能化应用在实践中仍面临标准体系尚未完善、复合型专业人才不足以及数据安全风险等现实挑战。推动行业协同探索技术规范、完善人才培养机制和强化数据治理,将有助于释放智能技术的潜力。面向未来,智能化技术与建筑设计的深度融合将持续推进,引领建筑向智慧、绿色与人性化方向发展,成为城市建设和行业转型的重要动力。

[参考文献]

- [1]赵建华,杨禹钦,周家正,等.数字化与智能化技术在建筑施工中的应用与展望[J].信息系统工程,2025(6):55-58.
- [2]吴淑芳.智能化技术在建筑工程设计中的创新应用研究[J].住宅产业,2025(3):82-84.
- [3]宋艳,林红利,衣淑丽.智能化技术在建筑设计中的应用与展望[J].城市建设理论研究(电子版),2024(32):95-97.
- [4]马晓亮.智能化技术在建筑电气设计中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2024(6):157-159.
- [5]樊云龙.智能化技术在绿色建筑设计与规划中的应用[J].绿色建造与智能建筑,2024(3):119-121.

作者简介:康少存(1997.4—),男,汉族,毕业学校:河北建筑工程学院,现工作单位:河北大成建筑设计咨询有限公司。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

www.viserdata.com

