

智能建造背景下工业建筑结构设计研究

崔丽娜

河北天艺建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050071

[摘要]智能建造技术体系对工业建筑结构设计提出新的范式要求。工业建筑荷载复杂、功能可变性强,对设计数字化与协同能力要求更高。面向制造和装配的设计策略要求结构模型直接对接生产设备,实现信息无损传递。参数化设计提升灵活性与精度,协同设计建立统一坐标体系。装配式结构与智能建造融合为高层工业厂房提供新范式。从数字化平台建设、全过程协同管理、设计与施工深度融合、质量控制评价四方面提出结构设计优化路径。

[关键词]智能建造;工业建筑;结构设计

DOI: 10.33142/sca.v9i9.20365

中图分类号: TU27

文献标识码: A

Research on Industrial Buildings Structural Design under the Background of Intelligent Construction

CUI Lina

Hebei Tianyi Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050071, China

Abstract: The intelligent construction technology system proposes new paradigm requirements for industrial building structural design. Industrial buildings have complex loads and strong functional variability, requiring higher requirements for design digitization and collaboration capabilities. The design strategy for manufacturing and assembly requires the structural model to be directly integrated with production equipment to achieve lossless information transmission. Parametric design enhances flexibility and accuracy, and collaborative design establishes a unified coordinate system. The integration of prefabricated structures and intelligent construction provides a new paradigm for high-rise industrial plants. Propose a structural design optimization path from four aspects: digital platform construction, full process collaborative management, deep integration of design and construction, and quality control evaluation.

Keywords: intelligent construction; industrial buildings; structural design

引言

建筑行业正从以劳动密集型为主向以技术密集型为主转变,智能建造成为建筑行业产业升级的主要驱动力。工业建筑结构设计要面对荷载多样、空间复杂、环境恶劣、改扩建频繁等诸多难题。传统的二维图纸设计模式协同不畅、变更成本高,已经不能满足现代工业建筑高质量的要求。设计阶段虽然只占项目全生命周期很小一部分时间,但是它所决定的运营成本却高达 80%。面向制造、装配的设计策略正在向技术工具深化, BIM 技术和智能算法的结合在工业上楼实践当中已经很好地解决了高荷载、大柱网等结构问题。因此需要对智能建造背景下工业建筑结构设计的基本要求和关键技术进行系统的梳理,探寻优化途径。

1 智能建造与工业建筑结构设计概述

智能建造是以新一代信息技术为依托,使建造过程数字化、网络化、智能化的一种新型建造方式。其核心技术体系包含 BIM 技术、物联网感知技术、人工智能算法、建筑机器人装备等,用数据驱动来达到设计、生产、施工、运维全生命周期的协同优化^[1]。工业建筑结构与民用建筑的不同点主要表现在四个方面。工业建筑的荷载组合要考虑设备荷载、吊车荷载、振动荷载等活荷载的共同作用。工业建筑对大跨度、大柱网、高层高的空间形态有要求。环境作用上高温、高湿、腐蚀等恶劣的环境会加大结构的耐久性。生产线的调整频率较高,所以结构体系要具有较强的改造适应性。智能建造同工业建筑结构设计相融合,有着明显的价值耦合效应。从设计效率上讲, BIM

模型可以进行快速的方案比选以及自动出图。质量控制上用协同设计平台消除各个专业之间的错、漏、碰、缺。从全生命周期管理角度来讲,数字化模型向前延伸到生产、施工、运维阶段,把结构信息进行连续传递。

2 智能建造背景下工业建筑结构设计的基本要求

2.1 工业建筑结构设计特点分析

工业建筑结构设计的技术特点可以从荷载体系、结构选型、空间组织三个方面进行分析。荷载体系属于首要考虑的因素^[2]。民用建筑以恒载、活载为主,工业建筑要考虑吊车荷载、设备荷载、振动荷载等特殊荷载。吊车荷载有竖向轮压和水平制动力两种,其作用位置随着吊车运行轨迹的变化而变化。设备荷载的分布形式同设备基础构造有关,振动荷载是机械设备运转产生的激励,要进行动力特性分析来防止结构共振。结构选型要考虑经济性、功能性、施工方便性。单层工业厂房一般用门式刚架、排架结构,依靠钢结构轻质高强的特点来达到大跨度覆盖的目的。多层工业厂房要根据混凝土框架、钢框架、钢-混凝土混合结构来决定。大跨度楼盖宜用预应力混凝土梁、钢桁架等高效截面形式。空间组织上工业建筑要满足工艺设备布置、物料运输、人员通行等各方面的要求。柱网尺寸要与工艺模块化的要求相适应,层高应留有设备安装的操作空间,特殊功能区域应设相应的围护结构。

2.2 智能建造对结构设计的新要求

智能建造技术体系应用之后,工业建筑结构设计就产生了三个方面的新的需求,即信息传递的连续性、设计过程的协同性以及设计成果的可制造性。信息传递的连续性要保证结构设计模型可以顺利地对接到后面生产的和施工的环节。面向制造和装配的设计策略要求设计师要具备制造工艺知识,使结构模型可以直接转换成生产设备可以识别的加工指令。构件拆分方案要兼顾工厂预制能力和运输限制,节点设计要利于现场装配操作。设计过程中需要各个专业在同一个数字平台上同时进行工作。以共享坐标为基础的多专业协同设计体系可以达到各个标段、单体、专业模型的即时整合,防止出现错漏碰缺的情况,减少传统二维设计繁琐的提资工作。设计成果的可制造性要求结构模型中包含生产制造所需要的所有信息。基于 BIM 的机器人制造框架把参数化设计信息直接转化为机器人加工路径,完成了设计到制造的信息自动化流转。

3 智能建造背景下工业建筑结构设计关键技术研究

3.1 BIM 技术在结构设计中的应用

BIM 技术在工业建筑结构设计中可以贯穿于规划、

设计、施工、运维的全过程。在规划设计阶段, BIM 技术可以进行方案比选和可行性分析。在改造设计和施工阶段, BIM 技术解决了旧工业建筑改造过程中建筑信息利用率低、协调设计和数据统计复杂的问题。在运营管理阶段, BIM 模型为结构健康监测和维护管理提供支撑。 BIM 技术在装配式钢结构建筑中已经得到了工程实践的证明。以上海某产业园为例,在设计、施工阶段采用参数化设计、结构深化、施工组织、模拟等 BIM 技术,结果表明可以有效地减少施工资源浪费,缩短工期。大跨度钢结构连廊等复杂的节点用泰克拉软件进行深化设计可以得到高精度的模块化安装定位。

3.2 参数化与协同设计技术应用

参数化设计技术就是对构件之间几何约束、逻辑关系进行定义,从而实现以参数为驱动的形态设计。工业建筑结构设计中参数化技术的应用价值表现在方案快速迭代、构件一致性高和模型可复用这三个方面。智能辅助设计工具已经渗透到工业建筑方案设计、初步设计、施工图设计、深化设计等各个环节中,以参数化设计、生成式设计、大数据分析等形式被广泛使用^[3]。在方案设计阶段,智能强排软件可以很快生成出多个方案的场地排布成果。初步设计阶段智能结构软件对构件在不同的工况下截面尺寸、荷载做最优设计,得到满足工业建筑高荷载、大柱网要求的结构体系。协同设计技术可以解决各个专业、各个参与方之间信息同步的问题。根据共享坐标的协同设计体系,把项目 BIM 总模型分成若干个标段模型,采用文件链接的方式进行分级整合,既保证各个专业的独立工作,又支持模型整合时的即时冲突检测。

3.3 装配式结构设计技术应用

装配式建筑属于智能建造技术应用的平台。在工业建筑方面,装配式结构有着天然的技术适配性,工业建筑标准度高、重复构件多、工期要求紧,给预制化生产赋予了规模化应用的条件。面向制造和装配的设计要求设计师在设计之初就考虑到材料的选择、成本的控制以及工厂的生产效率。工业建筑结构设计中的装配式设计关键环节有构件拆分、节点设计、公差控制这三个方面。构件拆分要兼顾运输限制和吊装能力,节点设计应利于现场快速装配,公差控制要保证构件在现场准确就位。工业上楼装配式建筑的智慧建造实践显示,装配式结构同智能建造技术的结合给高层厂房和产业园区建造赋予了新范式。从结构设计角度出发,要兼顾高层厂房竖向荷载传递途径和水平抗侧力体系,预制构件族系要形成标准化的产品库。从施工控制的角度来说,安全监测孪生系统可以对结构响应数据进

行实时采集，并将结果同设计模型加以比较。

3.4 结构性能优化与数字化仿真分析

数字化仿真分析技术把结构性能验证从建造之后的检验提前到设计阶段进行预判。工业建筑结构设计中仿真分析的应用场景有静力分析、动力分析、稳定性分析等各个方面。静力分析用来检验构件在荷载标准组合时的强度和刚度，对大跨度工业建筑来说要重点考虑楼盖竖向挠度和柱顶侧移。动力分析对受设备振动荷载作用的结构进行模态分析，得到自振频率和振型特征，评价共振风险。管线综合设计、模拟仿真属于施工图设计阶段的主要应用，用 AI 驱动的自动化碰撞检测系统可以实现工业建筑管线的智能排布，使得碰撞检测的覆盖率达到 95%以上。结构性能优化以仿真分析结果为依据，在保证安全性的基础上达到经济的目的。

4 智能建造背景下工业建筑结构设计优化措施

4.1 完善结构设计数字化平台建设

数字化平台属于结构设计智能化的基础性设施。完善的数字化平台应该具有模型创建、数据管理、协同工作、成果交付这四个主要功能。模型创建模块要支持主流 BIM 软件的原生文件格式，还要有参数化构件库。数据管理模块要创建起统一的构件编码系统以及数据字典。协同工作模块应该包含权限管理、版本控制以及在线批注等特性。成果交付模块应该可以将模型直接转化为施工图、材料清单等设计成果。平台创建应当遵照标准先行、分步实施的原则。提前制定出企业级 BIM 实施标准，对模型精度等级、命名规则、交付要求等做出规定。分步实施时，可以先选取一些典型项目开展试点，从中获得经验再慢慢推广。

4.2 强化结构设计全过程协同管理

协同管理是保证设计质量的重要机制。全过程协同管理分为设计准备阶段、方案设计阶段、初步设计阶段、施工图设计阶段和深化设计阶段共五个阶段，各个阶段的输入条件、输出成果和评审节点都要有明确的约定。设计准备阶段进行项目交底，确定设计范围和技术标准。方案设

计阶段结构工程师同时参与结构体系的确定。初步设计阶段开展阶段性模型整合，每个月组织全部专业的联合评审。施工图设计阶段用周例会制度来协调接口问题。深化设计阶段同预制构件厂创建起三方对接机制。以共享坐标为基础的多专业协同设计可以使得各个标段之间的模型及时整合起来，并且依靠在线比对、快速定位等智能审查手段来判定设计成果是否符合工程建设的标准规范。审查报告自动生成，问题整改实行闭环式管理。

4.3 推进智能化设计与施工深度融合

设计和施工深度融合发展属于释放智能建造价值的关键环节。传统的模式下设计成果同施工条件相脱离，造成很多现场变更。智能建造要求设计阶段就施工可行性进行充分考虑。深度融合的措施有施工方案前置设计、结构设计模型同步施工模拟、施工工艺嵌入设计、现场实测数据校准设计模型。以 BIM 为依托的节点吊装一体化管理依靠参数化建模来完成部件的精确定位以及质量追踪，借助物联网以及 AI 图像识别技术达成质量安全可视化预警和闭环改进。从技术角度来讲，设计模型里的构件信息会自动更新到施工进度计划系统当中，从而达成 4D 进度模拟以及资源调配的优化，设计变更和现场签证也能在线流转。

4.4 建立结构设计质量控制与评价机制

质量控制、质量评价属于保证结构设计质量水平的制度安排。智能建造背景之下，评价维度由原来的图纸规范性扩展为模型信息完备性、数据传递准确度、协同工作及及时性等诸多指标。质量控制体系要包含事前预防、事中检查、事后验收这三个部分。事前预防依靠设计输入评审、标准模板使用等手段来降低差错。事中检查采取模型自检、专业互检、平台自动检测相融合的办法。事后验收是由总工程师组织设计成果综合评审。智能审查工具应用可以大大提高质量控制效率，审查软件可以自动识别设计模型、工程图纸、计算书等成果，利用在线比对、在线批注、快速定位等方式来完成自动审查工作。评价机制上可以创建以关键绩效指标为依据的设计质量评价体系，评价结果同绩效考核相联系，从而形成持续改善的质量文化。

表 1 工业建筑结构设计智能建造技术应用矩阵

设计阶段	应用技术	核心功能	主要成效
方案设计	参数化设计/智能强排	多方案快速生成、场地优化	缩短比选周期 50%以上
初步设计	智能结构优化/BIM 协同	构件截面优化、多专业冲突检测	减少设计返工 30%
施工图设计	BIM 正向设计/自动出图	模型驱动图纸生成、材料统计	提升出图效率 40%
深化设计	面向制造与装配设计	构件拆分优化、加工信息输出	消除深化设计环节
施工配合	4D 模拟/数字孪生	施工过程仿真、现场监测比对	降低现场变更率

5 结语

智能建造技术体系正在改变工业建筑结构设计的技术范式。设计阶段对建筑全生命周期造成大约 80%的影响,智能建筑的设计工具应用能改善工业建筑的经济性以及可持续性。目前 BIM 技术、参数化协同设计、装配式设计、数字化仿真分析等技术已经形成了比较成熟的工业建筑结构设计应用模式。面向制造和装配的设计理念要求结构模型直接对接生产设备,工业上楼装配式建筑的智慧建造实践给高层工业厂房提供了一个新的范式。从工程实践的角度来说,健全数字化平台创建,加强全过程协同治理,推动设计同施工深度整合,创建质量把控评价体系,这都是推进结构设计智能化的途径。伴随着人工智能算法不断更新、建筑机器人技术不断完善,结构设计将由原来

的参数化控制转变为智能化的设计,从而实现结构设计更先进的自动化与建造智能化。

[参考文献]

- [1]王亚军,徐存银,许超,等.“工业上楼”装配式建筑的智慧建造方法与施工质量控制[J].四川建材,2026,52(2):87-89.
- [2]谢日升.BIM 技术在装配式钢结构建筑中的应用研究[J].建筑机械化,2024,45(9):125-128.
- [3]雷仕锋.基于 BIM 的高空连廊节点吊装一体化施工管理方法[J].四川建材,2025,51(10):207-209.

作者简介:崔丽娜(1981—),女,汉族,河北邢台人,高级工程师,河北工程学院毕业,现就职于河北天艺建筑设计有限公司,从事结构设计工作。