

智慧交通背景下桥梁设计数字化转型研究

王 恒

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

[摘要]智慧城市交通技术的突飞猛进促使了桥梁设计数字化转型进程的步伐加快。文章介绍了数字化转型对桥梁工程建设设计效率提高, 全寿命期管理, 资源节约等方面的重要影响以及阐述了数字化转型的关键技术支撑——建筑信息建模、数字孪生、大数据云处理、物联网及智能传感、人工智能。同时提出了实施步骤和措施方案、组织结构及人员培训、数据管理和信息安全保障、数字化设计质量监控、投入产出比分析五大内容作为数字化转型过程中的实施方式和管理方法。研究发现, 建设涵盖全寿命期的数字化设计系统可以保证桥梁工程质量稳步提升。

[关键词]智慧交通; 桥梁设计; 数字化转型; BIM 技术

DOI: 10.33142/ec.v9i7.20059

中图分类号: U442. 5

文献标识码: A

Research on Digital Transformation of Bridge Design under the Background of Intelligent Transportation

WANG Heng

Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: The rapid development of smart city transportation technology has accelerated the pace of digital transformation in bridge design. The article introduces the important impact of digital transformation on improving the efficiency of bridge engineering construction design, whole life cycle management, resource conservation, and elaborates on the key technical supports of digital transformation, including building information modeling, digital twins, big data cloud processing, Internet of Things and intelligent sensing, and artificial intelligence. At the same time, five major contents were proposed as implementation steps and measures, organizational structure and personnel training, data management and information security assurance, digital design quality monitoring, and input-output ratio analysis as the implementation methods and management methods in the process of digital transformation. Research has found that building a digital design system that covers the entire lifecycle can ensure a steady improvement in the quality of bridge engineering.

Keywords: smart transportation; bridge design; digital transformation; BIM technology

引言

2025 年 9 月, 交通运输部等七部门联合发布的《关于“人工智能+交通运输”的实施意见》首次提出了 2027 年人工智能在交通运输行业典型应用场景广泛应用的目标, 在 2030 年, 要使人工智能成为交通运输行业的一部分, 智能综合立体交通网全面推进, 为我国交通基础设施的数字化转型指明了方向。在这个背景下, 桥梁是交通系统中的一个重要的节点也是重大的工程, 它的设计环节如果实现数字化, 直接决定了之后的施工运维甚至全生命周期的效率以及安全性。传统的桥梁设计方式信息闭塞、相互协作难、设计与建设分离等问题十分明显, 不能满足智慧交通基础设施智能化程度的需求。BIM 技术已经由原

来的“配角”变成了解决建筑难题, 提高质量的“必需品”。是把我国建设成为“桥梁强国”的强大助力。所以对基于智慧交通背景下的桥梁设计数字化技术以及实施策略的相关理论的研究就显得十分必要了。

1 数字化转型对桥梁工程的意义

数字化转型对于桥梁工程建设的影响首先是提升了设计效率和质量。数字化协同设计平台可以保证各专业的数据同步更新与平行设计, 大大缩短了设计时间, 在此基础上还通过了碰撞检测及仿真技术, 在设计端就发现并解决了存在的问题, 大大降低了后期施工时出现的返工, 据统计能节省下 30% 以上的设计变更率。BIM 的技术不仅仅在设计环节有着巨大的作用, 在后续的制造过程、施工

建设以及使用运营环节也都能提供相应的帮助,使得信息更加集中,建筑物的整体寿命期得到更好的管理,这都是二维设计所达不到的效果。其次,数字化转型使设计到运行形成了全生命周期的数据对接。基于统一模型及标准化接口的设计成果可以便捷地流转至生产和施工端,从而在后续运维养护中获得可靠的“数字资产”,四川省公路规划设计院开发的“桥梁钢结构数字化设计与制造一体化技术”使得设计成果可以通过批量的自动转换直接用于钢结构下料生产,破除了从设计到生产制造之间的壁垒,在很大程度上提高了工业化的程度以及智能化程度;同时数字化设计也大大节省了成本,混凝土云工厂系统的库存实时监控和任务自动派送,平均降低了 20%的成本及消耗,大大支持了低碳环保和可持续建设。

2 桥梁设计数字化转型的关键技术基础

2.1 建筑信息模型技术

建筑信息化模型技术就是桥梁工程设计信息化的基础,它突破了传统的基于三维几何图形的建模方式,把结构部件、材料构成、施工方法等一系列的信息都汇总在一个数字化模型里,运用三维协同设计实现对结构件、管线、设备进行预先模拟式的“拼装”,可以解决上千个各专业的“错、漏、碰、缺”问题,使得设计更加准确可靠。对于复杂的桥梁建设项目来说,项目组创造性地使用了“X+1”的虚拟预拼装技术和 BIM 信息系统,进行大跨径桥梁合龙的“数字化彩排”,以高分辨率三维激光扫描仪收集好已经安装好的拱肋以及准备要合拢的拱肋所有的点云信息,建立一个 1:1 的“数字双胞胎”,在虚拟环境中完美再现整个合龙过程,精确检测各部件之间的衔接情况,从而达到毫米级的合龙精度^[1]。以 BIM 为基础进行数控下料以及钢结构桥梁焊接工艺模拟,实现了钢桥生产安装方案的合理化和焊接品质可视化,使得钢结构桥梁可以得到更高的工业加工等级。

2.2 数字孪生技术

数字孪生技术是基于 BIM 的一个更高级的应用,在这里关注的是物理对象和虚拟镜像之间实时的交互以及动态同步,实现了从“静态建模”到“动态仿真”的转变。陆杨新村大桥工程中,施工单位建立施工全过程数智建造平台,把 BIM 模型和现场监控信息以及有限元分析结合,生成一个数字双胞胎,对所有力系转化过程做全程动态仿真演练,“彩排”每一个阶段的拆除、加索之后各部分所承受的应力和形变状态,从而达到毫米级误差把控的目的,大大减少了施工风险的发生概率。数字化大桥建设的关键之处,在于对检测、监测、评估、决策、实施、后评估全流程中的大数据进行融合分析,使运行管理更加智能化、

养护决策更加智慧化,延续了设计阶段的数据价值。荆州长江公路大桥率先创建湖北省第一个在线大型桥梁数字孪生系统,“一盘全域模型、一个智慧大脑、多个应用场景”,建立桥区厘米级数字镜像,为桥梁长期监测以及定期保养提供精确的数据支撑。

2.3 大数据与云计算技术

大数据及云技术给桥梁设计提供充足的数据计算能力和存储分析能力,是存储巨大工程数据的重要基础设施,在桥梁的设计过程中,云技术可以进行大规模参数化的建模分析以及大量的方案比选,工程师可以在短时间内得到数十种结构形式的受力分析及经济比较,在施工、运营阶段可以对实时采集的数据进行处理分析。双柳长江大桥实现了对主缆内温度、湿度以及应变等多种状态的全天候全方位多维度的同时监控,运用大数据技术对桥梁结构的状态进行综合判断,达到全寿命周期的健康监测,使设计时的力学模型与运营期间的实际检测进行互相佐证。另外,运用数字分离,模块化隔离设计等方法建立交通基础设施数造与服务系统,包含深化设计、方案策划、虚拟施工、智慧施工、数字决策、数字维护六大业务环节,在很大程度上提高从设计到建造全流程协同工作效率,为不同阶段间的信息互通打下技术支撑。

2.4 物联网与智能感知技术

物联网及智能传感技术是桥梁设计过程对环境参数以及结构状况感知的前端支撑,在双柳长江大桥工程中率先提出一种基于阵列光纤光栅的“数字索股”,将传统的主缆改造成为遍布“神经”的智能体,可以实时地对主缆内部各部位状况进行同步感知,感知信息直接用于设计模型的校核。在施工感知层面,中国交建一局集团推出国内首款爆破法山岭隧道垂直域模型“蓝翼·穿岳”、拱桥垂直域模型“蓝翼·飞虹”,导入了 30755 个标准规范,150TB 工程数据,构建起强大合规性、高可翻译性的垂直域复合型大规模模型应用场景,提供感知数据智能化处理的基础支持。基于安装于桥梁重点区域的应变片、加速度计、温度湿度仪等设备的设计人员可以获取到真实的环境荷载条件及结构响应情况,用以检验并优化设计理念。

2.5 人工智能在桥梁设计中的应用

人工智能正由助手角色变为决策中枢,颠覆着传统桥梁设计模式,中交一局集团构筑起“新动能强力引擎”,使人工智能全方位驱动基础设施行业高质量发展,实现由经验走向数据的转变,在绍兴柯桥站换梁工程里就使用了该系统,利用数字孪生建造三维模型,用 40 处高精度传感器对梁体姿态进行实时监测,达到毫米级精确感知,自动调整并且联动控制 36 个顶升千斤顶以及 10 个水平顶推

千斤顶,为整个施工过程提供智能检测及自动化管控保障。对于复杂的受力计算,在人工智能系统中创建了高精度有限元计算模型,准确仿真平移换梁施工过程中的滑块支点压力、桥梁结构受力变化及结构变形情况等一系列重要指标并对可能出现的种种问题进行预警^[2]。并且通过深度学习的参数化建模方法可以按照设计条件自动产生最优解有效减少方案的比较时间。

3 数字化转型下桥梁设计实施路径与管理模式

3.1 转型实施步骤与策略

桥梁工程数字化转型应该采取“分层次进行、试点启动、全面推进”的实施方案,在数字化转型初期主要做好顶层架构及相关基础设施建设工作,比如:编制数字化转型总体规划、完善企业级 BIM 标准以及构建协同设计系统等;确定工作范围及路线图;在第二阶段先进行一些典型的桥梁项目的全生命周期数字化设计,总结过程经验和改进流程,智慧梁场平台助力对成品梁进行有效管理,减少 15%的时间成本 20%的成本支出,在此阶段取得良好效果可以增强向更大规模推广的信心,最后是推广应用期,把桥梁工程数字化设计应用到所有的新建桥梁工程中去,积极探索与数字孪生、人工智能结合的可能性,为后续发展打下坚实的基础。针对传统建筑各阶段数据断裂、管理零碎等问题,运用数算分离、模块解耦设计等技术,打造交通基础设施数字化建造及服务平台,提供数字化建造全过程服务体系及全方位协同管控,使转型成功有迹可循、有迹可查。

3.2 组织架构与人才培养

组织机构变革是数字化转型成功的必要条件。公司应当设置数字化设计研究中心或者 BIM 中心,分层落实公司的数字化责任,并成立由项目负责人、BIM 主管、设计师以及 IT 工程师组成的跨部门工作组,消除各部门之间的信息孤岛。在人力资源方面,要形成“培养+引进”的方式来提高公司的整体实力,在对原有设计人员开展数字技能的培训的同时积极招聘具有一定编程能力或者机器学习等相关知识背景的技术人员,构建多层次的人才结

构,尽快打造人才高地,使公司的数字化转型持续健康发展。可以实行校企联合、技能比拼、实操实训等方法来培养既有桥梁专业知识又有数字技能的交叉学科人才。

3.3 数据管理与信息安全

数据是数字化转型的基本资源,构建合理规范的数据管理体系及信息系统安全保障体系势在必行。对数据进行规范化管理,在数据标准化建设上要出台统一的数据字典以及模型交付标准,保障设计、建设、运维过程中各阶段之间的数据交互,防止出现新“数据烟囱”。对数据存储采取“本地加云端”的双层备份方案,运用云平台大空间、弹性化的特性来实施设计信息的数据集中管控^[3]。关于信息安全方面要坚持做好高质量发展与高水平安全并重,强化人工智能网络安全、数据安全,落实好应用安全分级分类管理措施,切实做好数据被窃取与被篡改的安全防护。针对涉及国家安全的大型桥隧建设项目,还要设立独立的安全保密数据处理程序以及审核审批程序,保证数字化改革是在安全稳定的轨道上进行。

3.4 数字化设计质量控制

数字化的设计质量控制覆盖了整个建模、审核、交付的流程,在建模过程中要建立分级别的建模精度要求以及各设计阶段的 LOD 等级的要求并且严格实施,保证建模深度符合设计进度,在审核阶段利用 BIM 技术深度融合焊缝图集、激光点云及虚拟预装配等先进智能化建筑工程,将设计深化到加工环节的质量控制形成一个闭合圈,让设计的质量能够被追踪、量化;最后在交付的过程中应当建立建模审核验收制度,通过自动校验软件来检验建模的几何准确度、属性完备性以及信息一致性等是否满足下一步施工与使用的需要^[4]。同时需建设设计变更的信息管理体系,在整个项目过程中产生的所有变更信息都要及时反馈到主模型当中去,防止发生因为版本不同带来的隐患。

3.5 投资成本与效益分析

数字化转型的成本投入是巨大的,但是综合利益也是相当可观的。下表对成本与效益这两个方面做了量化的分析。

表 1 桥梁设计数字化转型投资成本与效益分析表

类别	具体项目	估算占比 (或量化指标)	备注
投资成本	BIM 软件及协同平台采购	25%	含许可证、服务器、网络设备等
	数字孪生与仿真系统开发	20%	含建模与有限元分析模块
	高性能计算与云资源建设	15%	含算力资源与数据存储
	物联网感知设备部署	10%	传感器、数据采集终端等
	人员培训与技术支持	20%	含外部咨询与内部培训费用
	数据安全系统建设	10%	加密、备份、权限管理体系
效益分析	设计周期缩短	20%~30%	协同设计减少重复劳动
	设计错误检出率提升	40%以上	碰撞检测、自动校核
	综合成本节约	15%~25%	混凝土云工厂系统做到对存货实时掌握以及工作自动分配,平均减支 20%,节材 20%
	协同工作效率提升	50%以上	多专业云端协同,无纸化办公

从总体上来说,智慧梁场平台促进了对预制梁的精确管理,平均节省了约 15%的时间成本以及 20%的成本开销,数字孪生技术的应用使得拱肋安装速度提高了大约 40%,单个段落施工时长由原来的七天缩减到了五天之内。尽管初期花费较多,但是整个生命周期里所带来的总成本节约和收益增长十分可观,数字化改造投资回报时间一般都在两年到三年之间,在长期发展方面有着非常高的回报率。

4 结语

智慧交通快速发展为桥梁设计数字转型提供了广泛的应用前景以及强大的技术支持。桥梁工程数字转型的关键就是实现全过程的数据融合,从而使得运维管理更加便捷,维修保养更加合理,数字化是一个工具和方式,最终目的是保障结构安全,提高寿命,减少全寿命周期内维护费用。文章对 BIM、数字孪生、大数据、物联网及智能感知与人工智能五大核心技术作了详细论述,在此基础上从实施方法及方案、组织模式及人才培养、数据处理及安

全防护、数字化设计的质量控制、投资成本和收益评估五个方面进行阐述了实施方案路径。在实践中,公司应根据自己的发展状态以及项目的类型,循序渐进地进行数字化转型,在此基础上以科技赋能企业管理创新进而达到桥梁工程建设高水平发展及智慧公路建设相融合的目的。

[参考文献]

- [1]刘法全.智慧桥梁施工管理中的数字化+物联网技术[J].中国科技信息,2025(19):75-76.
- [2]吴远佳.数字化+物联网技术理念在智慧桥梁施工管理中的应用[J].江苏建材,2024(03):162-163.
- [3]钟奕麒.基于智慧城市建设的城市桥梁数字化管理路径探索[J].中国建设信息化,2024(06):62-65.
- [4]赵亮.智慧桥梁施工管理中“数字化+物联网技术”理念应用[J].智能建筑与智慧城市,2022(09):15-17.

作者简介:王恒(1996—),男,汉族,湖北洪湖人,工程师,2020年6月毕业于武汉理工大学交通运输工程专业,硕士研究生,桥梁设计专业。