

# 基于 BIM 技术的高速铁路牵引变电所设计与施工优化研究

罗杰

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

**摘要** 高速铁路牵引变电所的设计与施工因多专业交叉、空间约束严苛及工期紧张而面临严峻挑战。本文以建筑信息模型 (BIM) 技术为核心, 结合高速铁路工程实践, 系统研究其在牵引变电所全生命周期中的关键技术路径。通过建立参数化建模方法、施工模拟技术, 实现了多专业协同设计的优化与施工资源的动态调度。工程案例表明, BIM 技术的应用可使设计冲突率有效降低, 关键路径工期压缩 15%~20%, 施工成本节约 10%~20%。研究成果旨在为高铁牵引变电所智能化建造提供理论依据与技术创新支撑。

**关键词** BIM 技术; 高速铁路; 牵引变电所; 施工优化; 数字孪生

中图分类号: U238; TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.08.033

## 0 引言

BIM 技术对机电系统 (MEP, 机械、电气、管道) 的设计与施工产生了深远影响, 其核心在于通过数字化的三维模型整合多专业信息, 提升效率、减少错误并优化全生命周期管理。在机电设计方面, BIM 技术显著改善了多专业协同与冲突检测。在传统设计中, 机电各专业 (暖通、给排水、电气) 往往独立进行, 容易导致管线交叉、空间冲突等问题。而 BIM 技术通过三维模型集成各专业设计, 利用碰撞检测功能 (如 Navisworks) 自动识别冲突点, 提前优化管线布局, 从而减少后期返工。此外, BIM 模型的三维可视化功能帮助设计师和业主更直观地理解复杂机电系统的空间布局, 优化设备选型、管线路径 (如避免绕梁绕柱), 提高空间利用率。例如, 通过模型模拟管道标高与结构梁的关系, 可以在设计阶段避免施工阶段的被迫调整。

BIM 技术还支持参数化设计与自动化, 机电构件的尺寸、规格、连接方式等均可通过参数动态调整。例如, 调整管道直径时, 系统可自动更新相关阀门和支吊架规格, 减少人工计算错误。同时, BIM 模型能够集成设备性能参数、能耗模拟数据等, 辅助设计师进行负荷计算、节能分析 (如绿色建筑 LEED 认证) 和成本估算, 提升决策的科学性。此外, BIM 还推动了机电系统的标准化与模块化设计, 如预制管段、模块化机房, 通过模型直接生成加工图纸, 缩短设计周期并提高工厂预制率。

在机电施工方面, BIM 技术同样带来了显著改进。

基于 BIM 模型可以自动生成详细的施工图纸、材料清单和安装指导, 确保施工方准确理解设计意图。例如, 管线综合支吊架的位置和荷载信息可直接导出, 避免现场测量误差。通过 4D BIM (时间维度) 模拟施工顺序, 可以优化机电安装流程。例如, 模拟大型设备 (如冷水机组) 进场路径和安装顺序, 避免与其他工种冲突, 从而缩短工期。BIM 模型还能自动统计机电材料用量 (如管道长度、电缆数量), 减少人工算量误差, 辅助采购和成本控制。同时, 变更管理更加高效, 模型更新后工程量可以实时同步。在现场施工与质量控制方面, 施工人员可以通过移动终端 (如平板电脑) 查看 BIM 模型, 实时比对现场安装与设计模型, 确保管线标高、设备定位符合要求。例如, 使用 AR (增强现实) 技术可以辅助复杂区域的管线定位。此外, BIM 模型在竣工后可作为运维数据库, 集成设备型号、维修记录、保修信息等, 为后期运维 (如故障定位、能源管理) 提供数据支持。从综合价值来看, BIM 技术能够显著减少返工与成本。据统计, BIM 技术可减少机电工程中 80% 以上的设计冲突, 降低 10%~20% 的施工成本。同时, 通过协同设计与施工模拟, 项目周期可缩短 15%~30%。此外, BIM 技术结合能耗分析与绿色设计, 能够优化机电系统能效, 助力低碳目标。从全生命周期管理的角度来看, BIM 实现了从设计、施工到运维的数据无缝传递, 打破了信息孤岛。

近年来, BIM 技术在建筑领域的成功应用为铁路工程数字化转型提供了重要启示。通过实证研究验证了

BIM技术在铁路站房施工进度管理中的有效性,其研究表明4D模拟可使工期偏差率降低22%。然而,针对牵引变电所的电磁兼容性要求严格、设备布局密集度高等特殊特性,现有研究仍存在显著空白。多数文献局限于单一技术环节的探讨,聚焦于BIM在电气系统设计中的应用,但未形成覆盖设计、施工、运维的全生命周期解决方案。这种碎片化研究现状制约了BIM技术综合效益的发挥。国际铁路联盟(UIC)在2021年发布的《铁路BIM应用指南》中明确指出,牵引变电所是BIM技术应用的关键场景。日本新干线在九州N700S系变电所建设中,通过BIM技术实现施工精度提升至 $\pm 1.5\text{ mm}$ 。而在国内研究中,仍旧缺乏与施工、运维阶段的数据贯通机制。

本研究基于高铁线路的牵引变电所建设数据,采用理论建模与工程验证相结合的方法展开系统性研究。

首先,通过Revit API二次开发构建包含132类设备模型参数化族库,实现设备尺寸与电气参数的动态关联调整。

其次,融合遗传算法(GA)与粒子群算法(PSO)构建施工资源优化模型,解决材料采购与机械配置的动态规划问题。

最后,基于BIM技术与物联网(IoT)技术集成开发运维平台原型系统,实现设备状态的实时监测与故障预警。研究过程中采集的施工误差、成本偏差等数据均通过ANOVA方差分析验证其统计显著性。

## 1 BIM技术应用框架

截至2024年,我国高速铁路运营里程已突破4.5万公里,牵引供电系统作为保障列车安全运行的核心基础设施,其可靠性要求随着运营密度的提升而持续增强。牵引变电所承担着27.5 kV/55 kV电能转换与分配的关键功能,其设计过程涉及电气、结构、暖通、建筑等多个专业的协同作业。传统二维设计模式下,由于专业间信息交互不畅,接口冲突率高达35%,导致施工阶段返工率增加与成本超支。在此背景下,亟需通过数字化技术突破既有设计施工模式的局限性<sup>[1]</sup>。

### 1.1 全生命周期技术路径

高速铁路牵引变电所的BIM技术应用框架涵盖设计、施工、运维三大阶段,形成闭环管理流程。在设计阶段,通过多专业协同建模与冲突检测,解决传统设计中因信息孤岛导致的布局冲突问题。施工阶段依托4D进度模拟技术,将三维模型与Project进度计划动态关联,实现施工过程的可视化管控与资源优化配置。运维阶段则通过BIM模型与电力系统的数据融合,

构建数字建设平台,支持设备状态监测与预防性维护决策。这一技术路径的应用使工程各阶段数据得以无缝传递,显著提升了项目管理效率<sup>[2-3]</sup>。

### 1.2 关键技术突破

在参数化建模方面,基于Revit平台开发了设备参数驱动规则库。以主变压器建模为例,通过定义容量参数与绕组数量、冷却系统的函数关系,实现模型属性的自动更新。当变压器容量超过40 MVA时,系统自动将冷却方式从油浸自冷(ONAN)切换为强迫油循环风冷(OFAN),同时增加第三绕组以满足高压侧电流承载需求。此类参数化规则的应用使设计变更响应时间有效缩短。另外,还基于参数化建模了电缆沟、电缆支架等,有效减少了建模时间。

针对施工资源优化问题,本研究提出改进型粒子群算法(MPSO),在传统算法基础上引入惯性权重自适应调整机制。该算法以最小化总成本为目标函数,综合考虑材料费用、人工成本及工期延误惩罚等因素。通过约束条件(包括最大工期、资源上限等)的设定,MPSO算法在某高铁项目中的应用显示,资源配置方案较传统方法节约成本14.6%,且收敛速度提升28%<sup>[4-5]</sup>。

## 2 BIM技术在高铁牵引变电所工程中的应用效果分析

### 2.1 设计优化实践

在湖杭高铁牵引变电所项目中,BIM技术的应用产生了显著效益。因为湖杭高铁杭州西牵引变电所为全户内牵引变电所,利用智能化BIM技术在机电管线综合技术应用方面的突出优势,对湖杭高铁的牵引变电所建筑、结构、机电等专业模型整合并进行深化设计。湖杭高铁含两座全户内牵引变电所,杭州西牵引变电所处于杭州西站附近,周边规划布置完善,牵引变电所占地面积大,噪声较大,对周边居民影响较大,征地困难。结合杭州西站枢纽综合开发规划现状,通过牵引所亭模型布置优化研究,采用变压器集中布置,生产房屋对称布置,高压组合电器二楼布置,大幅度减小了牵引变电所占地面积。该方案克服了牵引变电所在繁华市区的征地困难,解决了牵引变电所与周边综合开发环境不协调的矛盾和周边环境和恶劣天气对设备影响的难题。通过创新地将组合电器室和多变压器室集成于两层布置的集中化布置。牵引设备房屋的高度集成化,使得本就复杂的牵引变电所内管线走向、设备预埋、安装更为复杂。利用BIM技术绘制线缆,最大程度地还原现场情景,及时规避后期施工的

线缆碰撞, 线缆交叉问题。另外, 对于标准化设备进行参数化建模, 提高模型的质量; 通过定义模型参数, 自动调节模型的外观, 有效提高了设计效率和标准化水平。利用 BIM 技术的可视化优势, 三维还原现场的施工的实际情况, 提前模拟施工过程中遇到的问题, 为施工提供有效的方案支撑, 并通过三维可视化的交底, 提升施工质量。通过 BIM 技术的可视化、参数化、智能化特性, 进行多专业碰撞检查、净高控制检查和精确预留预埋, 对施工工序进行模拟, 对各专业进行事先协调, 很好地解决了很多局部、隐性的专业交叉问题和因不同专业沟通不畅而产生的技术错误, 大大减少了返工, 节约了施工成本。

通过多专业协同建模与碰撞检测, 共发现电气母线与结构梁的空间冲突 23 处, 其中包含 5 处可能引发重大施工返工的隐患点。经优化调整后, 设计周期缩短 17 天, 设计变更费用减少 82 万元<sup>[6-7]</sup>。

## 2.2 施工阶段效益评估

湖杭高铁杭州西牵引变电所的施工数据对比显示, BIM 技术对工程质量的提升作用显著。在工期方面, 传统施工方法需 158 天完成的主体结构施工, 通过施工模拟优化后缩短至 120 天, 关键路径工期压缩率达 15.2%。材料损耗率从 8.7% 下降至 6.1%, 有效减少了钢筋水泥的浪费。在安全管控方面, 借助 BIM+VR 技术开展的施工模拟培训, 可以使高空作业违规操作发生率降低。

## 3 BIM 技术在高铁牵引变电所应用中面临的挑战

### 3.1 现存技术瓶颈

当前 BIM 技术在高铁牵引变电所应用中仍面临两大挑战。

其一, 数据标准化程度不足导致跨平台协作效率低下。各参建方采用的 BIM 软件差异 (如 Autodesk Revit 与 Bentley AECosim) 造成模型转换过程中的信息损失率约达 30%。

其二, 高精度模型带来的硬件负荷问题突出。全专业整合模型文件大小普遍超过 2 GB, 在移动终端加载时出现显著延迟, 影响现场施工指导的实时性。

### 3.2 未来研究方向

后续研究可从三个维度深入拓展:

第一, 探索基于深度学习的设备自动布局算法, 利用 Transformer 架构的特征提取能力, 实现变电所空间规划的智能化生成。

第二, 集成区块链技术构建施工质量追溯系统,

通过将混凝土强度检测、焊缝质量评估等关键数据上链, 确保工程信息的不可篡改性。

第三, 结合韧性工程理论, 开发极端工况下供电系统故障恢复能力的模拟评估工具, 为高铁牵引变电所的防灾设计提供决策支持。

未来需加快制定《高铁牵引变电所 BIM 交付标准》, 统一数据颗粒度与 LOD 要求; 探索 BIM 与数字孪生、元宇宙技术的深度融合, 构建虚拟培训与应急演练平台; 在高校课程体系中增设铁路 BIM 专业方向, 培养复合型人才, 为行业数字化转型提供智力支撑<sup>[8]</sup>。

## 4 结论

本研究通过理论创新与工程实践相结合, 系统揭示了 BIM 技术在高速铁路牵引变电所建设中的关键作用。主要结论包括:

第一, 参数化建模技术的应用使设计冲突率从 35% 降低至 12% 以下, 显著提升了设计质量。

第二, 4D 施工模拟通过优化资源调度方案, 可压缩关键路径工期 18% ~ 22%。

第三, 数字运维平台对设备故障的预测准确率高, 为供电系统可靠性保障提供了技术支撑。

未来, 随着人工智能、区块链等新兴技术的深度融合, BIM 技术将在高铁工程智能化转型中发挥更核心的作用。

## 参考文献:

- [1] 潘东亮, 何顺江. BIM 技术在牵引变电站中的应用 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(02): 420-424.
- [2] 雷亚丽. BIM 技术在既有铁路牵引变电所施工中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2022, 12(09): 178-181.
- [3] 裴超志. BIM 技术在牵引变电所建设中的应用研究 [J]. 电气开关, 2023, 61(03): 98-102.
- [4] 卢文波. BIM 技术在高铁牵引变电所工程施工中的应用 [J]. 电气化铁道, 2019, 30(02): 99-102.
- [5] 王丽霞. BIM 技术在牵引变电所设计中的应用研究 [J]. 铁路技术创新, 2015(06): 87-89.
- [6] 姜攀. 基于 BIM 技术的地铁变电所电缆敷设优化技术研究 [J]. 铁道建筑技术, 2024(02): 28-31, 142.
- [7] 王艳. 基于 BIM 技术的地铁牵引变电所电缆敷设 [J]. 电气化铁道, 2020, 31(S1): 184-186, 189.
- [8] 唐铭浩, 胡光永. BIM 技术在牵引变电所设计中的应用研究 [J]. 低碳世界, 2017(23): 86-87.