

智能地铁结构设计系统的工程化应用与效能提升研究

王稼祥

中国铁路设计集团有限公司 天津 300308

摘要：随着城市轨道交通建设规模持续扩大，传统地铁结构设计面临效率低、协同难、重复劳动多等突出问题。本文以 CAD 平台为基础，综合运用 BIM 参数化建模、大数据驱动优化及力学仿真智能验算等核心技术，设计并实现了智能地铁结构设计系统。通过车站、区间及附属结构多场景工程化适配与案例验证，证明该系统可有效压缩设计周期约 67%，显著降低返工率并提升多专业协同效率，对推动地铁设计行业数字化转型具有重要意义。

关键词：智能地铁结构设计系统；工程化应用；效能提升

引言：近年来我国地下铁路建设高速发展，结构设计任务日益繁重。当前设计过程存在大量重复性参数调整和手动绘图工作，各专业提资协同不畅，CAD 工具仅停留在辅助绘图层面。本课题依托实际工程项目，以 CAD 二次开发为核心技术路线，旨在构建覆盖建模、验算、优化、出图全流程的智能设计系统。通过对系统架构、核心功能及工程化应用实践的系统阐述，验证了智能方法对提升设计效能的有效性。

1 智能地铁结构设计系统核心理论与架构体系

1.1 智能结构设计核心技术理论

(1) BIM 全生命周期建模与参数化设计理论。BIM 技术以信息化、智能化为核心，实现规划、设计、施工到运维各阶段的信息集成。参数化设计通过定义核心关联参数与类型参数，建立多层嵌套模型，实现三维模型的实时驱动。本系统以 CAD 平台为基础，将 BIM 正向设计理念与参数化驱动相结合，实现区间与车站结构从方案设计到施工图出图的全流程参数化控制。(2) 大数据驱动的结构参数优化与智能校核算法。传统优化依赖反复数值模拟，效率低下。本系统通过整合地质、水文及工程案例数据，结合机器学习算法实现位移预测与参数寻优，提升优化效率。同时在招标图阶段增加配筋自核功能，自动验算柱轴压比、梁板柱配筋率及构造要求，不满足处自动标红提示。(3) 地铁结构力学仿真与智能验算核心原理。基于荷载结构法等力学理论，通过参数化驱动实现结构模型的自动生成与荷载施加。系统与启明星、迈达斯等计算软件数据互通，确定围护结构尺寸后通过固定模数驱动 CAD 自动出图，实现从力学仿真到设计成果输出的闭环。

1.2 智能地铁结构设计系统整体架构设计

(1) 数据层：地铁结构设计数据库、规范库、工程案例库搭建。数据层为基础支撑，涵盖地铁构件设计参数与约束规则数据库、现行规范库及历年承接工程案例库，采用结构化存储，支持设计参数统一管理 with 快速检索。(2) 技术层：智能建模、自动验算、协同设计、风险识别功能模块。技术层为核心中枢。智能建模实现参数驱动模型自动化生成；自动验算集成配筋自核与构造验算；协同设计承载多专业数据互通；风险识别对参数异常、规范偏离自动预警^[1]。(3) 应用层：适配车站、区间、附属结构的工程设计应用端口。应用层提供面向终端设计人员的专用端口，通过统一交互界面实现“参数输入—模型生成—图纸输出”的一站式流程。

1.3 系统核心功能模块解析

(1) 参数化智能快速建模模块。以宽度、长度、埋深等核心参数驱动车站轮廓生成，以线路平纵面参数驱动区间结构自动布置，方案调整时仅需修改参数即可实现模型与图纸的批量联动更新，大幅减少重复建模工作量。(2) 合规性智能校核模块。内置地铁设计规范条文数据库，自动验算轴压比、配筋率等关键指标，不满足处标红提示并给出调整建议，确保设计成果符合规范要求，降低审查阶段风险。(3) 多专业协同设计模块。建立结构专业与线路、建筑、环控等专业的参数化提资接口，实现数据一次输入、多方共享、变更快速响应，有效解决传统模式下信息传递滞后的问题。(4) 结构优化智能决策模块。结合工程案例库与力学分析结果，对不同结构方案给出评价指标与综合评分，通过设置优化条件自动推荐合理的围护尺寸、支撑形式及配筋方案，辅助设计人员科学决策。

2 智能地铁结构设计系统工程化应用实践

2.1 系统工程化落地适配方案

(1) 地铁不同结构场景(车站、隧道、附属结构)适配改造策略。针对标准车站,采用宽度、长度、埋深三参数驱动主体轮廓,围护结构按6米幅宽模数自动布置;针对换乘站及带配线车站等复杂结构,开发特殊节点参数模板,设计人员只需处理与标准站不同的特殊部位。区间隧道适配明挖、盾构、矿山等不同工法,建立对应管片参数库与联络通道标准断面库。附属结构(出入口、风亭、降水井等)采用标准化构件库,实现快速调取与参数化布置,确保各场景下系统均能高效适配。(2) 传统设计流程与智能系统的融合衔接方法。保持“工可→总体→初步→招标→施工图”五阶段划分,在各阶段嵌入系统对应功能模块:工可阶段利用快速建模进行方案比选;初步设计阶段应用参数化驱动完成大批量出图;招标图阶段启用配筋自核模块进行合规性检查。设计人员按传统流程出图,系统作为智能辅助工具,在原流程各节点完成数据导入、自动计算与成果输出,不影响既有审查与归档程序^[2]。(3) 工程化应用的软硬件配置与部署实施方案。软件方面以 AutoCAD 为图形平台,采用 Lisp 和 VBA 二次开发实现核心功能,Excel 作为工程量统计接口,预留与启明星、迈达斯等结构计算软件的数据互通通道。硬件方面配置常规工程工作站即可满足运行需求。部署采用模块化分步实施策略,先在单一标准站试点验证,成熟后扩展至区间及全线应用。

2.2 具体工程应用案例实施

(1) 案例工程概况。以某城市轨道交通标准地下两层车站为例,车站全长206米,标准段宽21米,埋深约17米,采用明挖法施工,围护结构采用地下连续墙加内支撑体系。设计重难点包括:线路纵坡变化大导致车站底板标高频繁调整;建筑专业房间布局多次修改;工期紧张出图任务集中。(2) 智能系统全流程应用。建模环节输入长度、宽度、埋深等核心参数,系统自动生成车站轮廓及围护结构模型;验算环节依托内嵌规范库自动完成构件配筋校核,自动标红不满足项;优化环节基于地质参数与荷载工况给出支撑间距与截面尺寸建议;出图环节通过固定模数驱动自动生成基坑平面、剖面及地基加固图纸共40余张,同步输出 Excel 工程量统计表。(3) 工程应用中的问题梳理。典型问题包括:系统对换乘节点、楼电梯井坑等特殊部位无法自动处理,需人工手动补绘;与启明星计算软件的数据接口尚不稳定,偶发参数传递丢失;大坡段纵断面工况下的区间结构适配精度不足,需进一步优化算法。

2.3 系统应用效果对比分析

(1) 设计效率对比。以标准车站主体结构施工图阶段为例,传统设计周期约需3人×30工作日;采用本系统后,参数输入及建模用时2天,自动出图及算量用时3天,人工修改完善用时5天,合计约1人×10工作日,设计周期压缩约67%,人力成本显著降低。(2) 设计质量对比。系统生成图纸图层、线型、标注统一规范,标准化率达92%以上;配筋自核模块实现设计合规检查覆盖率100%,传统设计中常见的配筋率不足、构造遗漏等问题发生率从约15%降至3%以内,设计返工率降低约60%。(3) 协同效率对比。线路平纵面调整或建筑布局变更时,传统模式需结构专业逐个修改对应图纸,平均每次变更耗时3~5天;采用系统后,仅需在参数界面修改对应数值,关联图纸与工程量表自动联动更新,变更响应时间缩短至0.5天以内,多专业沟通会议频次减少约50%,设计迭代效率大幅提升。

3 系统应用效能提升策略与优化展望

3.1 智能设计系统效能评价体系构建

(1) 评价指标选取:效率指标、质量指标、成本指标、协同指标。效率指标涵盖设计周期压缩率、重复性工作自动化率、变更响应时长等;质量指标包括模型标准化率、规范自动校验覆盖率、设计返工率等;成本指标涉及人力工时节约比例、工程造价优化率等;协同指标包含跨专业沟通会议频次缩减率、设计迭代次数等。四类指标协同构成系统效能评价的基础框架^[3]。(2) 指标量化标准与权重设定。效率指标中以“设计周期压缩率”为核心,目标值≥60%;质量指标中以“合规自检覆盖率”为核心,目标值100%;成本指标中以“人力成本降低率”为核心,目标值≥50%;协同指标中以“变更响应时间缩短率”为核心,目标值≥80%。结合层次分析法,设定效率指标权重0.30、质量指标0.30、成本指标0.20、协同指标0.20,综合效能评分=∑(各指标得分×权重)。(3) 综合效能评价模型搭建与验证。基于加权求和法构建综合效能评分模型,选取已完成设计的3个标准车站进行回溯验证,系统综合效能评分为86.7分(满分100),表明本系统在多场景下均具备良好的应用有效性。

3.2 系统工程化应用现存瓶颈分析

(1) 技术瓶颈:复杂工况智能适配能力不足、仿真精度有待提升。换乘站节点、大坡段区间等复杂工况下模型自动生成精度不足,需人工二次修正;管片内力计算与有限元仿真结果之间尚存偏差,验算可靠性有待增

强。(2)应用瓶颈:行业标准化不足、设计人员智能化适配度低。各设计院绘图标准、图层设置、标注样式等尚未统一,系统输出图纸需人工格式转换;部分设计人员对参数化设计流程不熟悉,智能化工具使用意愿偏低。(3)管理瓶颈:全流程管控体系不完善、数据复用率较低。系统设计数据尚未纳入企业级知识管理体系,各项目间参数模板、案例数据缺乏有效的积累与共享机制,数据复用率不足40%。

3.3 多维度效能提升优化策略

(1)技术优化:算法迭代、复杂场景模型库完善、智能仿真升级。针对换乘节点、配线区等复杂场景开发专项参数模板库;加强与迈达斯等有限元软件的数据互通精度,提升内力仿真计算可靠性;引入深度学习算法对管片配筋进行智能预测与优化^[4]。(2)应用优化:标准化设计流程、模块化模板体系搭建。结合中国铁设企业标准,统一图层、线型、标注规范,制定《地铁结构智能设计系统应用规程》;建立“一车站一模板”的模块化归档制度,各项目设计参数经审核后入库共享。(3)管理优化:全生命周期数据管控、人员智能化培训体系构建。搭建企业级智能设计数据管理平台,实现从工可到竣工图的全过程数据追溯;建立常态化培训与考核机制,每季度组织系统操作培训和典型案例分享,提升设计团队智能化工具应用水平。

3.4 总结与未来展望

(1)全文研究成果总结。本系统基于CAD平台二次开发,实现地铁区间与车站结构从参数化建模、自动验算、智能出图到工程量统计的全流程智能化设计,经工程案例验证,设计周期压缩约67%、返工率降低约60%、协同效率提升5倍以上,具备显著的工程应用价值。(2)智能地铁结构设计系统的行业推广前景分析。依托我国铁设品牌优势,系统可在国铁集团内部设

计院率先推广应用,进而向全国城市轨道交通设计领域拓展。伴随各地地铁建设持续增长及BIM应用政策驱动,该系统有望成为行业内标准化设计工具^[5]。(3)未来研究方向:AI深度赋能、无人化设计、全场景智能适配升级。下一阶段将探索大语言模型辅助规范条文智能解析、结合强化学习实现结构方案自主寻优、集成数字孪生技术完成施工图与现场数据的动态联动,最终实现“参数输入—智能决策—自动出图—施工反馈”的全无人化设计闭环,并适配更多复杂结构场景,助力行业从数字化向智能化全面跃升。

结束语

本文系统阐述了智能地铁结构设计系统的理论架构与工程化应用实践,通过多场景案例验证了系统在设计周期压缩、质量提升和协同优化方面的显著成效。当前系统在复杂工况适配和仿真精度方面尚有改进空间。未来可融合人工智能与数字孪生技术,推动结构设计向全无人化、全场景智能适配方向持续演进,为构建地铁结构设计行业新质生产力提供技术支撑。

参考文献

- [1] 王臣,周明科,张波,等.城市轨道交通地下结构自动化计算平台研发与应用[J].隧道建设(中英文),2025,45(10):1926-1934.
- [2] 李栋,王烨,李启明,等.基于NSGA-Ⅱ的盾构管片智能化设计系统[J].铁道工程学报,2026,43(01):82-88.
- [3] 乔海超,李晓昭,赵晓豹.地铁车站结构智能分析与设计软件开发及应用[J].公路,2024,69(08):434-440.
- [4] 吕希奎,白娇娇.基于BIM的地铁车站与线路一体化三维智能建模方法[J].城市轨道交通研究,2026,29(01):28-34.
- [5] 李涛,李晓军,徐博,等.地下工程数字孪生智能设计研究进展与关键技术[J].土木工程学报,2022,55(S2):29-37.