

盾构隧道结构全生命周期数智化管控关键技术及应用

一、背景与挑战

随着我国交通和城市建设进程加速，盾构隧道在轨道交通、铁路、市政道路等领域已得到广泛应用，其规模与复杂度持续增长，其结构安全与长期服役性能直接关乎公共安全和城市韧性。然而，传统管理模式在盾构隧道的规划设计、施工建造、运维管养等全生命周期各阶段存在诸多痛点：

（1）盾构管片设计效率较低

盾构管片为弧形结构，且管片上存在大量复杂的螺栓孔、定位孔、注浆孔、手孔、对齐标记等，而实际管片出图一般为二维图纸，导致三维投射到二维的设计图纸绘制效率低下。

（2）盾构隧道质量管控较粗放

从管片厂生产、隧道口临时堆放、隧道内拼装直至后期运营的流程较长，过程中有时会出现拼装后开裂渗水、运营期缺角掉块等质量缺陷，缺乏过程中质量管控和后期数据溯源。

（3）盾构隧道运营结构风险预警滞后

盾构隧道日常巡检较简单，容易忽视收敛变形、沉降等肉眼无法直接观察到的病害，而定检频次较低，导致常出现结构风险预警滞后。

（4）养护决策依赖主观经验，缺乏数据支持

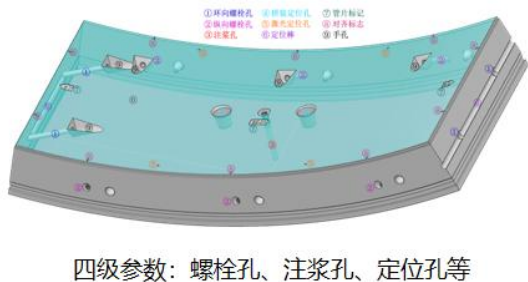
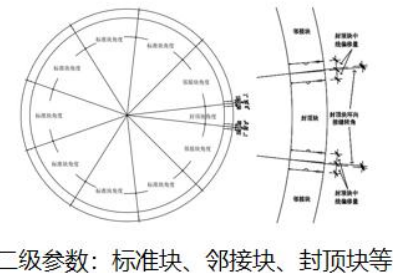
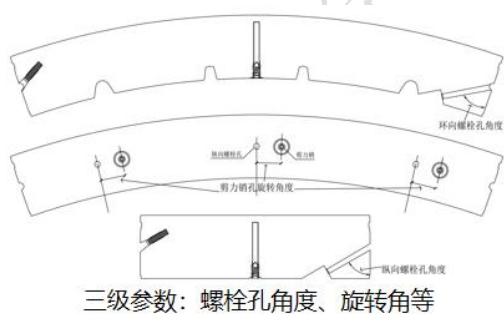
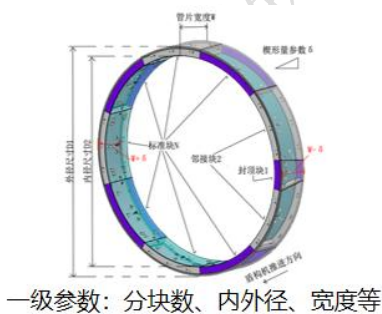
盾构隧道巡检、定检、监测各环节独立进行，多种数据未能有效融合，数据分析挖掘不够，养护决策依赖经验而相应数据支撑欠缺。

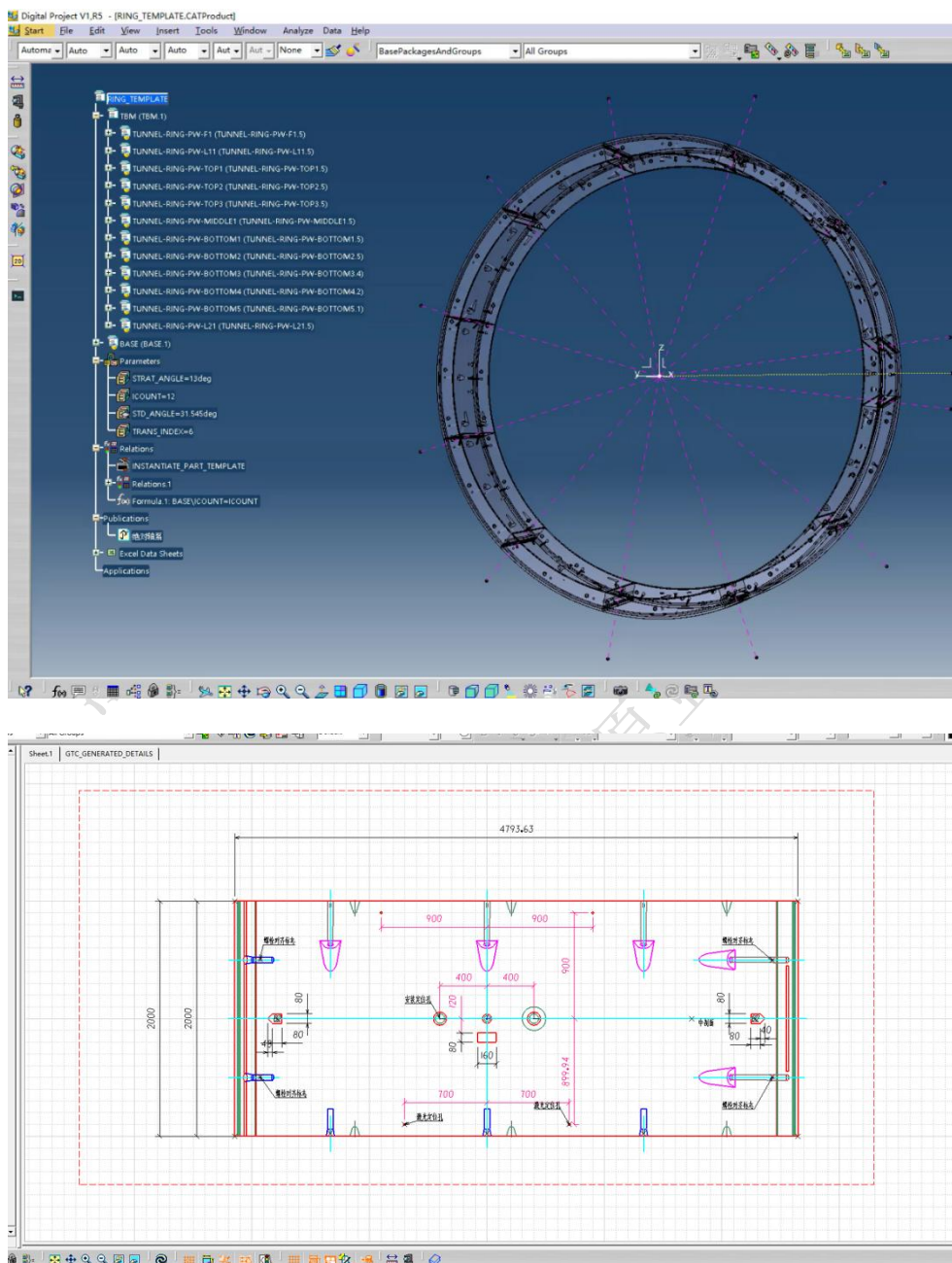
二、解决方案与创新点

本项目针对传统以人工为主管理模式在盾构隧道的设计、建造、运维等全生命周期中存在的管片设计效率低、建造质量管控粗放、运营风险预警滞后、养护决策缺乏数据支持等痛点，创造性将 AI、物联网、区块链等技术引入盾构隧道设计、建造、运维的全生命周期管控，结合浙江省多项科研课题攻关及工程实践，形成成果“盾构隧道结构全生命周期数智化管控关键技术及应用”。主要创新点如下：

主要创新点 1：提出了盾构隧道结构三维参数化智能设计技术。

首创了四级分层参数化设计方法、三阶段管片拼装理论以及高精度轴线计算与管片拼装算法，实现了结构生成的精细控制与自动化拼装；基于 CATIA 软件平台，通过二次开发完善和简化盾构隧道的设计方法，实现了盾构隧道设计阶段 LoD2、LoD3 等级模型的创建；基于三维模型关联自动生成二维工程图纸以及实现二维工程图同步更新。该技术提升了设计效率与质量，促进了隧道设计阶段数字化管控技术水平。

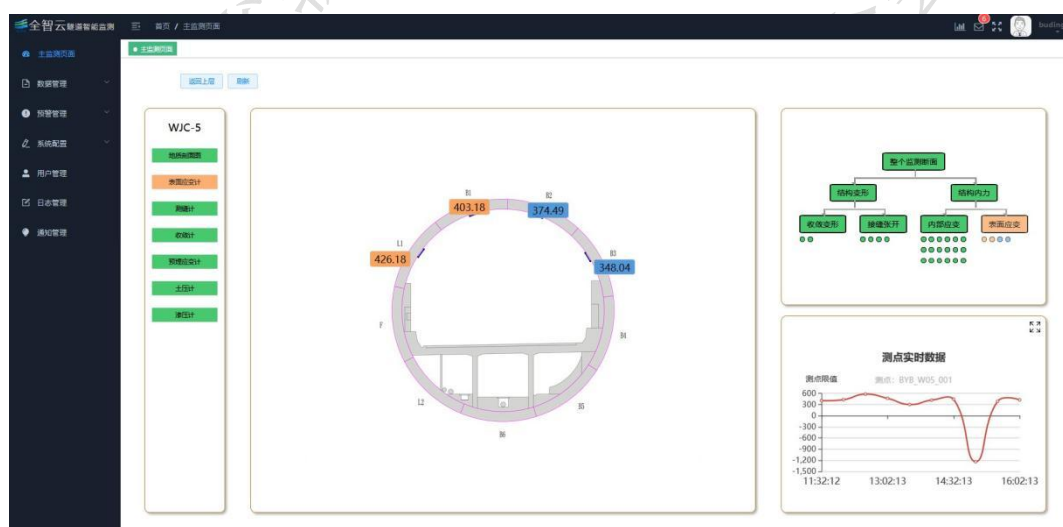
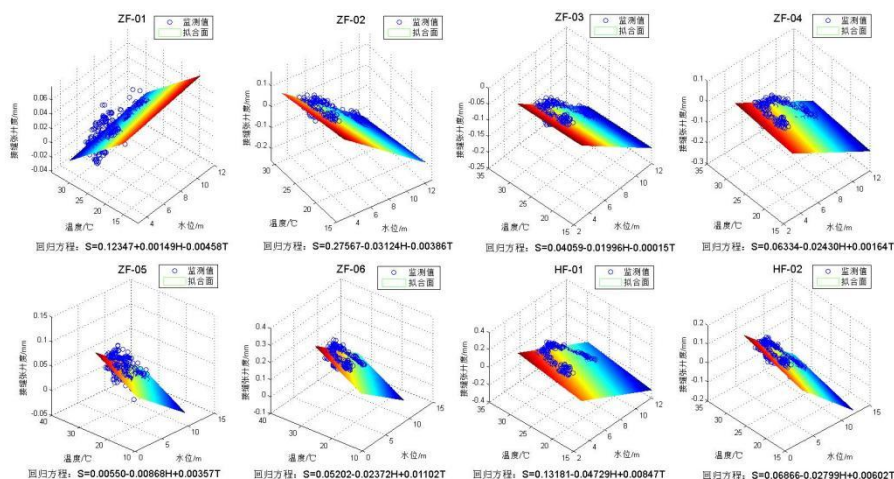




主要创新点 2：建立了基于 RFID+区块链+BIM 技术的盾构隧道预制构件全寿命期数字化质量管控技术体系。提出了盾构隧道预制构件全寿命期数字化追踪方法，开发了预制构件数字化质量管控平台（Web、APP）。该技术实现了对盾构隧道预制构件的生产、运输、安装、养护等环节的追踪监控，有效预防和减少了潜在的质量安全问题，促进了工程建设各方信息共享和高效协作。

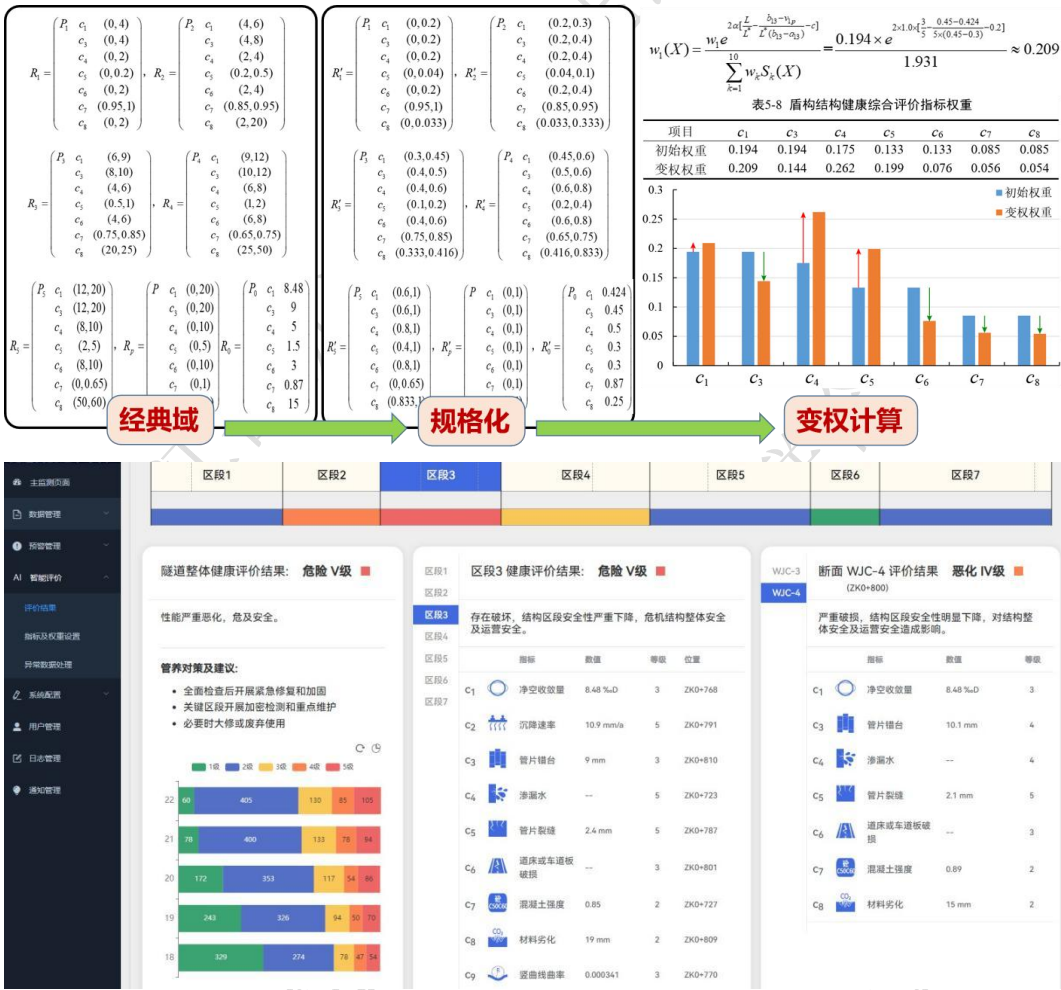


主要创新点 3: 提出了盾构隧道运营期结构智能安全监测及预警技术。融合数值模拟、力学计算与病害成因分析，建立了盾构隧道结构多维度监测指标体系；提出了基于监测数据多元线性回归分析的盾构隧道结构安全评价指标预警值确定方法；建立了融合层次分析法和模糊数学的隧道结构健康状况多层次实时在线分级预警综合评价方法，开发了盾构隧道结构智能监测预警平台。该技术实现了多传感器、多指标、多层次数据融合基础上的在线分级预警，可改善现有健康监测系统普遍存在的虚警或漏警的问题，提高结构安全风险识别率，降低人工巡检频次，提高了隧道安全运维管养的智能化水平。



主要创新点 4: 提出了数据驱动的盾构隧道结构安全评价及养护决策技术。建立了“断面-区段-整体”多层次盾构隧道结构健康评价指标体系，研发了基于改进中值滤波法的数据噪声滤除算法和基于深度学习的缺失数据补全算法，提出了基于变权理论和物元可拓模型的盾构隧道结构健康多源数据融合评价方法，考虑隧道健康等级、养护需求、经济成本等因素提出了“性能优先、平衡和经济优先”三种隧道养护策略。该技术实现了融合在线监测数据、日常巡检数据、定期检测数据的多源数据综合评价及养护决策，克服了根据人工主观判断及工程经验进行养护决策不够科学的缺点，提高了盾构隧道运维管理的技

术水平和工作效率，降低了隧道安全运营风险和隧道长期运营维护的成本。



三、成果与效益（质量安全、经济效益与社会效益）

本成果是在完成浙江省交通厅、浙江省科技厅等 5 项科研课题研究的基础上形成的，共获得授权发明专利 4 项，实用新型专利 3 项，软著 10 项，代表性论文 15 篇，地方标准 1 项，团体标准 3 项。本成果已通过由浙江省技术经纪人协会组织的鉴定，经国内多位知名隧道专家组成的鉴定委员会评定结论：研究成果具有创新性，总体达到国际先进水平，其中盾构管片四级分层参数化设计方法和三阶段管片拼装算法、基于 RFID+区块链+BIM 技术的盾构隧道预制构件数字化

质量管控技术达到国际领先水平。

本成果在近几年盾构隧道工程的设计建造及运营养护中得到广泛应用，累计新增盾构隧道设计和运营期结构健康监测销售额 44369 万元，累计新增利润约 4175.4 万元。

本成果提升了盾构隧道设计-施工-运维全生命期的工作效率和数智化水平，提高了盾构隧道结构的设计施工质量和运营安全：可推动盾构隧道结构三维参数化设计应用，提高设计及变更效率，减少设计工时 20%，降低人工成本 20%，实现精细化可视化展示，便于后期隧道的建设及运营养护，提升隧道结构质量安全；实现了对盾构隧道预制构件的生产、运输、安装、养护等环节中各类质量管控数据的追踪监控，减少质量安全事故 20%，提高信息管理的透明度，实现构件信息溯源准确率 100%，提高质检效率 30%；可实现实时在线监测、评价及预警，减少隧道人工巡检频次 30%，提高运营期结构安全风险识别率 30%，保障隧道运营安全；可实现融合隧道结构在线监测数据、日常巡检数据、定期检测数据的多源数据综合评价，帮助管理人员明确隧道病害主要类型及重点区域，开展精细化的大中小修决策，进行针对性的维修加固，优化维修资金的配置，预计可提高隧道大中小修决策效率 30%，延长隧道结构服役年限 10%。

本成果能够显著提升盾构隧道建养的数智化水平，提高效率，提升质量，保障安全，促进隧道行业的数智化转型和高质量发展。

四、可复制性与展望（最后注明课题研发团队、联系人）

本项目成果已应用于如通苏湖城际铁路隧道群、杭州天目山路隧

道、湖州南浔古镇隧道、舟山普陀湾隧道、绍兴群贤路隧道等工程中，提升了盾构隧道设计-施工-运维全生命期的工作效率和数智化水平，提高了盾构隧道结构的设计施工质量和运营安全：（1）在设计阶段，盾构隧道结构三维参数化智能设计技术，提高了盾构隧道管片设计的精细度和设计效率，其成果获浙江省交通厅 BIM 技术职工职业技能竞赛金奖；（2）在施工阶段，基于 RFID+区块链+BIM 技术的盾构隧道预制构件全寿命期数字化质量管控技术，实现了对预制构件生产、运输、安装和运营等全流程中质量数据的监控追踪，提升了信息流转效率，提高了工程质量管控水平；（3）在运维阶段，盾构隧道运营期结构智能安全监测及预警技术和数据驱动的盾构隧道结构安全评价及养护决策技术，一方面采用智能化健康监测技术对结构异常进行及时监测预警，另一方面实现了融合在线监测、日常巡检、定期检测等多源数据的结构健康综合评价和养护决策，成果被列入浙江省交通厅科技成果推广目录，并在浙江省交通厅第二届科技成果推介会推介。

总的说来，研究成果已成功应用于十多座盾构隧道工程，其应用明显提高了盾构隧道全过程管理的数智化水平和工作效率，提高了设计施工质量和运营安全，促进隧道工程领域的高质量发展，具有广阔应用前景，后续拟在浙江省内乃至全国的各类盾构隧道工程中继续推广应用。

项目团队：

浙江数智交院科技股份有限公司：钟方杰、李长俊、涂智溢、丁赛华、

李永明、孙飞、陈宝林、李伟平、郭洪雨、陆钰铨、郑云辉、渠成堃、
方宇超

联系人：涂智溢 15990187599