Key Technologies and Applications of Safety Control in Subway Construction

Xinyu Liu

China Railway Beijing Engineering Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., Hefei, Anhui, 230088, China

Abstract

With the rapid development of urban rail transit construction, subway construction faces immense challenges in safety risk prevention and control due to complex geological conditions, sensitive surrounding environments, and diverse construction techniques. This paper, based on the construction general contracting project of the fourth civil engineering section for the first phase of Shenzhen Metro Line 22, systematically elaborates on key technologies and practical approaches for subway construction safety management from four dimensions: safety control system development, critical risk identification and assessment, core control technology application, and implementation effectiveness. Building upon summarized practical experience, the study integrates risk management theory and safety system principles to theoretically explain the causes of risks and the technical mechanisms of control measures, thereby strengthening the scientific foundation of safety management. By establishing a comprehensive control mechanism and integrating geological investigation, structural support, and information-based monitoring technologies, the study achieves effective prevention and control of core risks such as deep foundation pits, shield tunneling, and pipeline protection, providing a reference for the safe construction of similar subway projects.

Keywords

risk formation mechanism; Support principle; Information monitoring

地铁施工安全管控关键技术与应用

刘芯瑜

中铁北京工程局集团城市轨道交通工程有限公司，中国·安徽 合肥 230088

摘　要

随着城市轨道交通建设的快速发展，地铁施工因地质条件复杂、周边环境敏感、施工工艺多样等特点，安全风险防控难度极大。本文以深圳市城市轨道交通22号线一期工程施工总承包土建四工区项目为依托，从安全管控体系构建、关键风险识别与评估、核心管控技术应用及实施效果四个维度，系统阐述地铁施工安全管控的关键技术与实践路径。在总结实践经验的基础上，本文结合风险管理理论，安全系统原理，从理论层面解释风险形成原因与技术作用机制，增强管控措施的科学依据。通过建立全流程管控机制，整合地质勘察、结构支护、信息化监测等技术手段，实现对深基坑、盾构施工、管线保护等核心风险的有效防控，为同类地铁工程安全施工提供参考。

关键词

风险形成机理；支护原理；信息化监测

1 引言

地铁作为城市公共交通的骨干，在缓解交通拥堵、促进区域发展中发挥着关键作用。但地铁施工多处于城市核心区域，涉及深基坑开挖、盾构掘进、管线迁改等高危作业，面临地质条件复杂、周边建（构）筑物密集、地下管线交错等多重挑战，安全事故风险较高。从理论上看，地铁施工安全风险是人、机、料、法、环等多因素耦合作用的结果，其形成与传导具有一定的规律性。深圳市城市轨道交通 22 号线一期工程串联多个市、区级重点片区，线路全长 2570.511m，包含 2 站 2 区间，施工中面临临时征地、管线迁改、盾构穿越既有结构等七大重难点。基于此，本文结合该项目实践，在系统总结管理经验与技术方法的基础上，尝试从风险形成机理、技术控制原理和系统管理理论等角度进行适度提升，以增强管控实践的科学性与普适性，为地铁施工安全管理提供更扎实的理论与实践依据。

【作者简介】刘芯瑜（1987–），女，中国甘肃白银人，本科，工程师，从事安全管理研究。

2 地铁施工安全管控体系构建

2.1 组织架构与责任分工

构建“横向到边、纵向到底”的安全管控组织体系是安全施工的基础。该体系的设计体现了系统安全管理思想，

通过明确各层级、各岗位的安全职责，形成责任闭环。项目成立以项目经理、党支部书记为组长，总工程师、安全总监等为副组长，各部门负责人为组员的安全质量环保领导小组，明确各级人员职责。领导小组下设办公室，由安质部、工程部牵头负责日常管理工作，形成“决策层 - 管理层 - 执行层”三级管控模式。

执行层按施工区域实行网格化管理，将项目划分为生产区和生活区共 6 个网格，每个网格设负责人、网格员和监督员，实现“安全有网、网中有格、格中定人、人负其责”的管理格局。这种模式源于网格化治理理论，通过空间与责任的细分，提高风险响应与处置的精细度。

2.2 管理制度体系建设

完善的管理制度是安全管控的保障，其设计需符合 PDCA 循环（计划 - 执行 - 检查 - 处理）的管理原则，实现持续改进。结合项目特点，制定 24 项核心管理制度，涵盖安全生产责任制、安全教育培训、隐患排查治理、危大工程管理等关键环节。

安全教育培训实行“岗前三级教育 + 专项培训 + 常态化教育”模式，该模式基于安全行为塑造理论，通过反复、系统的培训输入，强化作业人员的安全意识与规范操作能力。隐患排查采用“定期检查 + 日常巡查 + 专项检查”机制，体现了风险动态管控理念，通过多频次、多维度的检查活动，及时发现并消除隐患，形成闭环管理。

3 地铁施工关键风险识别与评估

3.1 风险识别方法

采用“现场勘察 + 资料分析 + 专家论证”的综合方法识别风险。从理论层面看，风险识别需关注风险的来源、类型与传导路径。结合项目地勘资料、周边环境调查结果，梳理出四大类核心风险：周边环境风险（管线冲突、既有建构筑物影响）、施工技术风险（深基坑坍塌、盾构掘进姿态偏差）、设备安全风险（起重吊装、临时用电）、管理风险（人员违规操作、制度落实不到位）。

以深圳市 22 号线四工区为例，项目识别出 27 项周边环境风险、23 项施工技术风险，其中盾构上跨 6 号线区间（最小竖向净距 3.3m）、民乐站与 4 号线换乘节点暗挖施工（最小竖向净距 0.5m）等风险等级为Ⅰ级，需重点防控。

3.2 风险评估与分级管控

采用风险矩阵法，从风险发生可能性和影响程度两个维度，将风险划分为Ⅰ级（重大）、Ⅱ级（较大）、Ⅲ级（一般）、Ⅳ级（较小）四个等级。该方法本质上是一种半定量风险评估模型，它将主观判断转化为可比较的风险等级，为差异化管控提供依据。针对不同等级风险制定差异化管控措施：Ⅰ级风险实行“提级管控、专人盯防”，制定专项防控方案并开展应急演练；Ⅱ级风险强化过程监测，优化施工参数；Ⅲ、Ⅳ级风险加强日常巡查，落实常规防控措施。

例如，针对横岭站邻近高层民房（Ⅰ级风险），采用综合支护与自动化监测等措施，

针对不同等级风险制定差异化管控措施，体现了风险分级防控原则。例如，针对横岭站横岭村五区 20~21 层民房（距离基坑 5.5m，Ⅰ级风险），采用 1000mm 厚地下连续墙支护、袖阀管预注浆加固、自动化监测等综合措施；针对盾构施工中的喷涌风险（Ⅱ级风险），优化盾构掘进参数，采用双螺旋输送器，加强同步注浆和二次补浆，其设计依据包括变形控制标准及监测预警模型。通过理论指导实践，提升措施针对性与可靠性。

4 地铁施工安全管控核心技术应用

4.1 深基坑施工安全管控技术

深基坑施工是地铁车站建设的核心环节，面临坍塌、突涌、周边沉降等风险。结合 22 号线项目流程（见图 1），核心技术包括：

1. 支护结构优化：根据地质条件采用“地下连续墙 + 内支撑”或“咬合桩 + 内支撑”支护体系。该体系的作用机理在于通过围护结构承担侧向土压力，内支撑提供反向约束，共同控制基坑变形。民乐站主体基坑采用 800mm/1000mm 地下连续墙，附属结构采用 800@1000mm 钻孔桩 + 旋喷桩止水帷幕，确保支护结构刚度和止水效果。

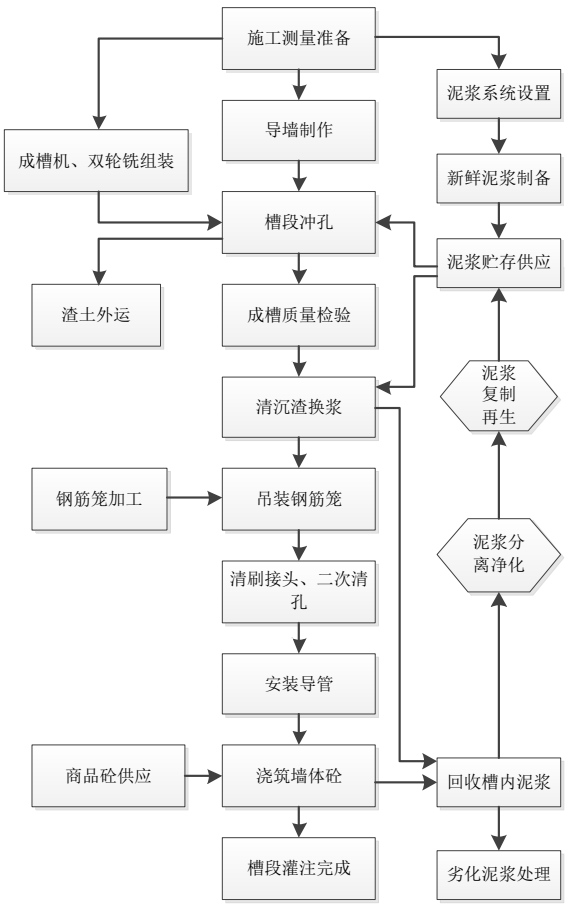


图 1 地下连续墙流程示意图

2. 分层分段开挖技术：遵循“竖向分层、纵向分段、

先撑后挖、快速封底”原则，控制每层开挖厚度不超过 2m，分段长度不超过 10m，支撑安装时间不超过 24 小时，利用时空效应减少基坑变形。

3. 动态监测技术：监测的本质是通过数据反馈判断系统状态。在基坑周边、既有建构筑物、管线等关键部位布设监测点，采用自动化监测系统实时监测沉降、位移、轴力等数据，监测频率为每日 1~2 次，数据超预警值时立即启动应急措施，见图 2。

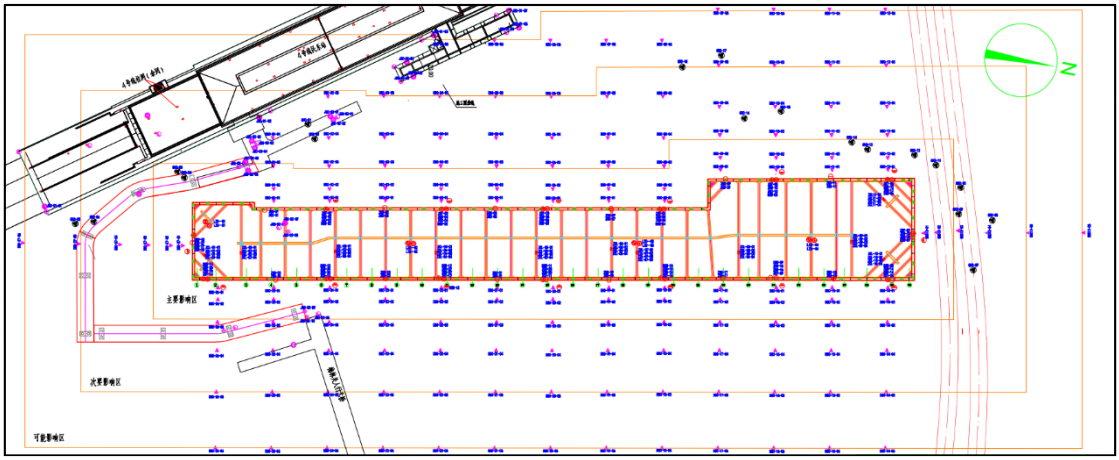


图 2 基坑施工监测平面布置图

4.2 盾构施工安全管控技术

盾构施工涉及始发接收、姿态控制、穿越既有结构等关键环节，风险点多且隐蔽，核心技术包括：

1. 始发与接收加固技术：采用二重管旋喷桩对始发、接收端地层进行加固，加固范围为洞门周边 3m，确保地层稳定性；安装帘布橡胶板密封洞门，防止涌水涌砂。22 号线项目盾构始发前，对加固区域进行取芯检测，确保加固强度达到设计要求。

2. 姿态精准控制技术：通过盾构机导向系统实时监测掘进姿态，结合地质条件优化掘进参数（推力、扭矩、出土量），控制盾构轴线偏差在 ±50mm 内。针对上软下硬地层，采用低转速、大扭矩掘进模式，加大发泡剂注入量，减少刀具磨损和姿态偏差。

3. 穿越风险防控技术：穿越施工的核心在于控制地层变形。盾构穿越既有线路、桥梁桩基、建筑物时，采用“预注浆加固 + 同步注浆 + 二次补浆”组合技术，通过注浆压力与浆液填充，补偿土体损失，减少沉降传递。例如，民横区间上跨 6 号线区间时，采用克泥效防沉降浆液，同步注浆量提高 30%，二次补浆长度达 31.1m，有效控制地层沉降在 3mm 内。

4.3 地下管线安全保护技术

地铁施工区域地下管线密集，涉及给水、燃气、电力、通信等多种类型，管线保护是安全管控的重点，核心技术包括：

1. 管线精准探测：采用物探仪结合人工探沟的方式，探明管线位置、埋深、材质等参数，对探明的管线进行标识和公示，建立管线档案。22 号线项目对民乐站、横岭站周边管线进行全面探测，发现 12 处未标注管线，及时调整施工方案。

2. 差异化保护措施：对影响施工的管线采用迁改、悬吊或原位保护（见图 3）。例如，横岭站 DN400 给水管采用临时迁改方案，DN1000 雨水管采用悬吊保护，燃气管道周边施工时设置硬隔离，禁止机械开挖，采用人工开挖。

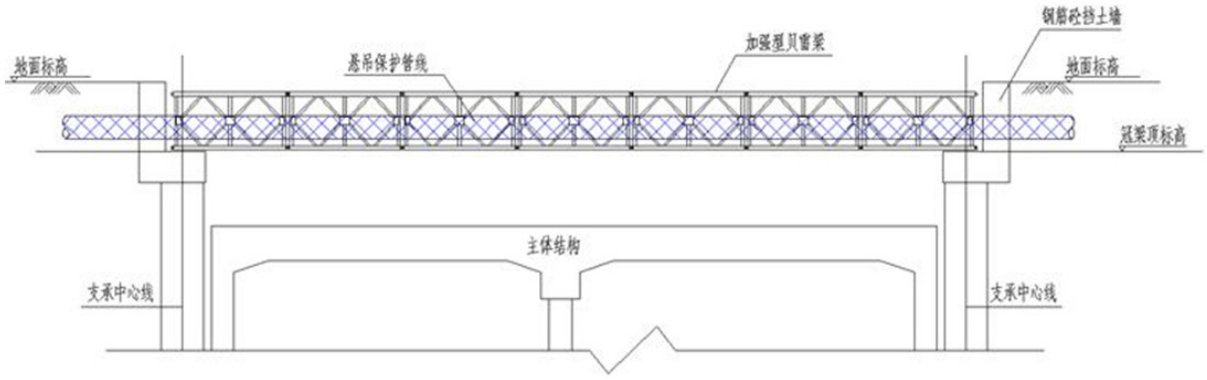


图 3 管线悬吊保护示意图

3. 动态监测与应急响应：在管线周边布设沉降监测点，监测频率为每日 1 次，沉降速率超 2mm/d 时立即停工，采取注浆加固等应急措施。建立管线产权单位联动机制，施工前签订保护协议，明确应急处置流程。

4.4 信息化安全管控技术

信息化管控体现了数据驱动决策的安全管理新趋势。依托信息化手段实现安全管控的智能化、可视化，核心技术包括：

1. 视频监控与网格化管理系统：在施工现场出入口、基坑周边、盾构机房等关键部位安装高清摄像头，接入监控中心实现 24 小时实时监控；通过视频图像识别与网格责任绑定，实现风险可视化与责任可追溯，其背后是人机协同与智能巡检的理论支持。

2.BIM 技术应用：建立项目 BIM 模型，整合地质、管线、结构等数据，在施工前进行碰撞检测，优化施工方案。例如，民乐站与 4 号线换乘节点施工前，通过 BIM 模型模拟暗挖施工路径，提前规避管线冲突和结构碰撞风险。

3. 应急管理信息化：建立应急物资管理系统，实时监控应急物资储备情况；制定 13 项专项应急预案，每年开展 1~2 次应急演练，通过视频监控和数据记录评估演练效果，优化应急处置流程，提升了响应速度与调度效率，符合应急协同理论中信息共享与资源整合的要求。

4.5 环保与职业健康管控技术

地铁施工对周边环境和作业人员健康影响较大，需同步落实环保和职业健康管控技术：

1. 扬尘与噪声控制：施工现场主要道路硬化处理，裸露土方覆盖密目网，配备雾炮机、洗车槽等降尘设备；选用低噪声设备，搭设隔音棚，合理安排施工时间，夜间 23:00 至次日 7:00 严禁高噪声作业，确保场界噪声昼间 ≤70dB、夜间 ≤55dB。

2. 水土保持技术：施工区域设置排水沟、沉淀池，施工污水经沉淀处理后排放；临时堆土区采用沙袋挡护，长时间裸露区域采取覆绿措施，防止水土流失。

3. 职业健康保护：为作业人员配备安全帽、安全带、防尘口罩等防护用品，定期开展职业健康培训和体检；高温天气合理安排作息，避开正午高温时段作业，提供清凉饮料；有限空间作业前进行气体检测，配备通风设备和应急救援人员。

5 安全管控实施效果与优化建议

5.1 实施效果

通过系统应用上述管控体系与技术措施，深圳市 22 号线四工区项目实现了施工全过程安全受控。项目未发生一般及以上安全责任事故，各项监测数据均控制在允许范围内，并成功获评“深圳市安全文明施工标准化工地”。从理论角度看，该成果验证了“技术体系化、管理流程化、责任网格化”综合防控模式的有效性，表明风险识别准确、措施得当、执行到位，形成了良好的项目安全生态。

5.2 优化建议

1. 强化机理研究指导工艺优化：建议今后在类似工程中，加强对地层 - 结构相互作用、盾构掘进参数与地层响应关系等的机理研究，用理论模型指导施工参数精细化调整。

2. 推动安全管理从“经验型”向“科学型”转变：应建立基于数据积累与案例分析的风险知识库，利用统计分析、机器学习等方法，挖掘风险规律，提升预测预警能力。

3. 构建“人防 + 技防 + 智防”三位一体管控体系：在现有人员管理与技术应用基础上，进一步集成物联网、大数据与人工智能技术，实现风险的智能感知、自主评估与动态调控。

6 结论

地铁施工安全管控是一项多维度、全过程的系统工程，本文结合深圳 22 号线工程实践，在系统总结安全管理体系、风险识别评估与核心技术应用的基础上，适度融入了相关理论阐释，从原理说明与理论依据等角度增强了实践做法的科学性与说服力。实践证明，通过构建健全的管理体系、实施精准的风险分级管控、并综合运用多项关键技术，可有效防控地铁施工中的各类安全风险。未来，随着智能建造与数字化管理技术的发展，地铁施工安全管控将进一步向数据驱动、机理融合、智能决策的方向演进，为实现城市轨道交通建设高质量发展提供更加坚实的安全保障。

参考文献

[1] 建筑施工场界环境噪声排放标准（GB 12523-2011）[S]. 2011.

[2] 地铁设计规范（GB 50157-2013）[S]. 2013.

[3] 危险性较大的分部分项工程安全管理规定（住建部令第37号）[Z]. 2018.

[4] 李兴高. 地铁盾构施工安全风险管控技术研究[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1234-1237.