

地铁工程建设施工关键技术探析

谷江河

中铁二十三局集团有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：城市化进程加速背景下，地铁工程作为城市轨道交通核心载体，建设规模持续扩大，施工环境日趋复杂，对施工技术的安全性、高效性与环保性提出更高要求。本文聚焦地铁工程建设核心环节，系统探析明挖法、盾构法、浅埋暗挖法三大主流施工技术的原理、适用场景、关键参数及技术要点，同时梳理深基坑支护、防水防渗、智能化监测等配套关键技术，结合工程实践数据对比分析不同技术的应用效果，总结当前技术应用痛点并提出优化方向。研究可为复杂城市环境下地铁工程施工技术选型、工艺优化及安全管控提供理论参考与实践借鉴，助力地铁工程高质量建设。

【关键词】：地铁工程；施工技术；明挖法；盾构法；浅埋暗挖法；深基坑支护

1 引言

地铁工程具有埋深大、线路长、地质条件复杂、周边环境敏感等特点，施工过程需穿越软土、砂层、岩溶等特殊地层，临近密集建筑群、地下管线及既有交通设施，安全风险高、技术难度大。施工技术作为地铁工程建设的核心支撑，直接决定工程质量、施工安全、建设工期与经济效益。

我国地铁建设起步较晚但发展迅猛，截至 2025 年底，全国已有 50 余座城市开通地铁，运营里程超 9000 公里，施工技术体系不断完善，明挖法、盾构法、浅埋暗挖法等技术广泛应用，同时 BIM、物联网、智能化监测等新技术逐步融入施工全过程。但在繁华城区、富水软土、岩溶发育等复杂工况下，仍存在施工扰动控制难、效率偏低、环保压力大等问题。因此，系统梳理地铁工程核心施工技术，剖析技术要点与应用逻辑，对提升地铁施工技术水平、保障工程安全高效推进具有重要现实意义。

2 地铁工程核心施工技术探析

2.1 明挖法施工技术

明挖法是地铁车站及浅埋区间常用施工方法，原理是直接开挖地表土体，施作主体结构后回填，具有施工简单、速度快、造价低等优势，适用于地质条件较好、埋深较浅（一般 $\leq 10\text{m}$ ）、周边开阔无密集建筑的区域。

2.1.1 关键技术要点

（1）深基坑支护技术：明挖法核心是基坑稳定，常用支护形式包括地下连续墙、咬合桩、土钉墙、钢板桩及内支撑体系。软土地区深基坑（深度 $\geq 12\text{m}$ ）优先采用地下连续墙 + 钢支撑复合支护，墙厚 $0.8\sim 1.2\text{m}$ ，插入比 ≥ 1.2 ，可有效控制基坑变形；粉砂地层采用咬合桩止水帷幕，桩径 $1.0\sim 1.2\text{m}$ ，桩间距 1.2m ，咬合厚度 $\geq 20\text{cm}$ ，防渗效果显著。

（2）分层分区开挖：遵循“分层开挖、先撑后挖、严禁超挖”原则，分层厚度 $2\sim 3\text{m}$ ，分区长度 $20\sim 30\text{m}$ ，每层开挖后 24h 内完成支撑安装，避免基坑暴露时间过长引发失稳。

（3）降水与排水：富水地层采用深井降水 + 明沟排水，井径 600mm ，井距 $6\sim 8\text{m}$ ，深度低于基坑底 $5\sim 8\text{m}$ ，将地下水位降至基坑底以下 0.5m ，防止涌水、流砂。

2.1.2 应用案例与效果

北京地铁 6 号线某车站采用明挖法施工，基坑长 220m 、宽 22m 、深 16m ，采用地下连续墙 + 钢支撑支护，分层分区开挖，地表沉降控制在 10mm 以内，水平位移 $\leq 8\text{mm}$ ，较暗挖法缩短工期 30%，造价降低 15%。

2.2 盾构法施工技术

盾构法是地下区间隧道主流施工技术，通过盾构机刀盘切削土体，同步完成隧道开挖、支护、衬砌拼装，具有自动化程度高、施工速度快、对周边环境扰动小等优势，适用于软土、砂层、复合地层等长距离隧道施工。

2.2.1 关键技术要点

（1）盾构机选型：软土地层选用土压平衡盾构，控制土仓压力 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ ，推进速度 $3\sim 5\text{cm/min}$ ，避免地表隆起或沉降；岩石地层采用泥水平衡盾构，配备滚刀式刀盘，刀盘转速 $2\sim 3\text{r/min}$ ，减少刀具磨损；复合地层选用双模盾构，可在土压 / 泥水模式间切换，适应性强。

（2）掘进参数控制：土压平衡盾构出土量控制在理论值的 $95\sim 100\%$ ，同步注浆压力 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ ，注浆量为建筑空隙的 $120\sim 150\%$ ，防止衬砌上浮与地表沉降。

（3）姿态控制：通过传感器实时监测盾构轴线偏差，自动调整推进油缸压力，将轴线偏差控制在 5mm 内，确保隧道线形精准。

2.2.2 应用案例与效果

上海地铁 11 号线某区间隧道全长 3.2km，穿越软土地层，采用直径 6.28m 土压平衡盾构施工，月均掘进进度 300m，地表沉降 $\leq 15\text{mm}$ ，无重大安全事故，较浅埋暗挖法效率提升 2 倍，噪声降低 15dB。

2.3 浅埋暗挖法施工技术

浅埋暗挖法由我国自主研发，原理是利用土层短时间自稳能力，先支护后开挖，分步施工，具有不影响交通、无污染、噪声小等优势，适用于城市核心区、埋深 $\leq$ 隧道直径、周边建筑密集的浅埋隧道施工。

2.3.1 关键技术要点

(1) 超前预支护：富水砂层采用超前小导管注浆 + 格栅钢架，小导管直径 42mm，长 3~5m，环向间距 30cm，注浆压力 0.5~0.8MPa，形成止水帷幕，渗漏量降低 90%。

(2) 工法选择：根据断面大小与地层稳定性，选用 CD 法、CRD 法或双侧壁导坑法。大跨软土隧道优先采用 CRD 法，将传统 0.5m 步距调整为 0.8m，同步采用液压凿岩台车开挖，施工效率提升 30%。

(3) 监控量测：实时监测地表沉降、拱顶下沉、周边收敛，控制地表沉降 $\leq 30\text{mm}$ ，拱顶下沉 $\leq 20\text{mm}$ ，数据异常立即停工处理。

2.3.2 应用案例与效果

北京地铁复兴门折返线（浅埋暗挖法发源地）采用 CRD 法施工，隧道埋深 6m，穿越粉质黏土地层，地表沉降控制在 25mm 内，未影响周边建筑与交通，成为城市核心区浅埋隧道施工典范。

2.4 三大核心施工技术对比

为直观呈现不同技术的适用场景与效果，结合工程实践数据，从地质适应性、施工效率、环境影响、造价等维度对比分析，结果如下：见表 1。

3 地铁工程配套关键技术

3.1 深基坑变形控制技术

深基坑施工易引发地表沉降、周边建筑开裂，核心控制技术包括：装配式支护（预制地下连续墙安装速度达 20m / 天，钢支撑回收率 90%）、分区支护（不同区域采用差异化支护参数）、

实时监测反馈（通过物联网传感器监测变形，动态调整开挖与支护参数）。某地铁深基坑采用装配式支护 + 实时监测，水平位移最大值 8.6mm，垂直沉降 9.2mm，远低于 15mm 警戒值。

3.2 防水防渗技术

地铁工程防水遵循“以防为主、刚柔结合、多道防线、综合治理”原则，关键技术包括：结构自防水（采用 P6~P8 抗渗混凝土，添加膨胀剂减少裂缝）、外包防水（铺设 2mm 厚高分子防水卷材，接缝热熔焊接）、接缝防水（施工缝设置止水钢板，变形缝采用橡胶止水带）。富水地层采用“注浆堵水 + 结构防水”复合技术，渗漏率控制在 0.01% 以下。

3.3 智能化施工监测技术

基于 BIM、物联网、大数据的智能化监测技术，可实现施工全过程动态管控：BIM 技术用于施工模拟、工序优化与碰撞检测，减少设计变更；物联网传感器实时采集基坑变形、盾构姿态、地下水位等数据，传输至监控平台；数字孪生技术构建工程虚拟模型，实时映射施工状态，提前预警风险。某地铁项目应用 BIM + 物联网监测，施工风险预警准确率达 90%，工期缩短 15%。

4 技术应用痛点与优化方向

4.1 应用痛点

(1) 复杂地层适应性不足：岩溶、上软下硬等特殊地层中，盾构机刀具磨损快、暗挖法坍塌风险高，施工效率低、成本超支。

(2) 绿色环保压力大：传统施工扬尘、噪声、泥浆污染严重，不符合绿色施工要求，城区施工扰民问题突出。

(3) 智能化程度不均衡：部分中小城市地铁施工仍以人工为主，BIM、智能化监测等新技术应用普及率低，管控精度不足。

4.2 优化方向

(1) 技术集成创新：融合盾构法与浅埋暗挖法优势，开发复合施工工法；研发适用于特殊地层的专用盾构机（如岩溶盾构、硬岩 TBM），提升地质适应性。

(2) 绿色施工技术升级：推广装配式结构（车站构件工厂预制、现场拼装，减少扬尘）、泥浆无害化处理（泥浆固化再利用，降低污染）、低噪声设备（电动盾构、液压凿岩机，噪声 $\leq$

表 1 地铁工程核心施工技术对比

对比维度	明挖法	盾构法	浅埋暗挖法
适用地质	地质较好、埋深 $\leq 10\text{m}$	软土、砂层、复合地层	浅埋（ ≤ 1 倍洞径）、松散地层
施工速度	快（月进度 50~80m）	极快（月进度 200~300m）	较慢（月进度 80~120m）
环境影响	大（占地多、扰动强）	小（地表沉降 $\leq 15\text{mm}$ ）	极小（不占道、噪声低）
工程造价	低（1.2~1.5 万元 / m）	高（2.0~2.5 万元 / m）	中（1.8~2.2 万元 / m）
安全风险	中（基坑失稳风险）	低（自动化程度高）	高（坍塌、涌水风险）

75dB)。

(3) 智能化技术深度融合: 构建 “BIM + 物联网 + AI” 智能施工体系, 实现施工参数自动优化、风险自动预警、质量自动管控, 推动地铁施工向数字化、智能化转型。

5 结论

地铁工程建设施工技术体系以明挖法、盾构法、浅埋暗挖法为核心, 配套深基坑支护、防水防渗、智能化监测等技术, 形成了适应不同地质与环境条件的施工技术方案。明挖法适用于浅埋开阔区域, 效率高、造价低; 盾构法适用于长距离复杂

地层隧道, 自动化程度高、环境扰动小; 浅埋暗挖法适用于城市核心区浅埋隧道, 对交通与环境影响极小。

当前地铁施工技术仍面临复杂地层适应性不足、绿色环保压力大、智能化程度不均衡等痛点, 未来需通过技术集成创新、绿色技术升级、智能化深度融合等方向持续优化。在实际工程中, 应结合地质条件、周边环境、工期造价等因素, 科学选型施工技术, 优化工艺参数, 强化安全管控, 实现地铁工程安全、优质、高效、绿色建筑, 为城市轨道交通可持续发展提供坚实技术支撑。

参考文献:

- [1] 王梦恕中国地铁工程施工技术发展展望 [J]. 隧道建设, 2020, 40 (1):1-8.
- [2] 赵光泉, 刘鹏, 周强, 等青岛地铁 1 号线过海隧道工程双护盾 TBM 应用关键技术 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (7):169-173.
- [3] 万良勇, 宋战平, 曲建生, 等新建地铁隧道 “零距离” 下穿既有车站施工技术分析 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (1):168-175.
- [4] 牛富生, 郑若泓, 卫心怡, 等上软下硬地层浅埋大跨地铁车站施工技术 [J]. 施工技术, 2024, 53 (18):45-48.
- [5] 魏纲, 俞国骅, 杨波新建隧道上穿既有隧道引起的剪切错台变形研究 [J]. 自然灾害学报, 2018, 27 (4):50-58.
- [6] 葛佳佳, 董卫国, 江苏洋, 等新建城际铁路盾构小净距下穿既有地铁隧道沉降控制研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (8):48-55.
- [7] 潘泓, 蔡磊, 罗俊兴, 等上细下粗富水复合砂层渗透破坏机制试验及初步工程应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (7):1778-1788.
- [8] 中国城市轨道交通协会城市轨道交通施工技术标准 (2024) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.