

# 大直径长距离双曲线顶管施工关键技术研究

张春辉 裴昊 冯辉

中电建铁路建设投资集团有限公司，北京，100070；

**摘要：**本文依靠某双曲线顶管施工，通过对双曲线段每节管节的精准测量、顶管设备的实时操作纠偏，以及在施工区间内科学合理布设中继间等技术手段，实现对顶管机轨迹的高精度控制，最终实现大直径长距离双曲线顶管施工线型的精准控制。

**关键词：**大直径长距离；顶管施工；双曲线；测量

**DOI：**10.69979/3029-2727.26.05.075

## 引言

当前，大直径、长距离、顶管施工技术为城市基础设施建设提供了突破性解决方案，在城市建设中具有广阔应用前景。然而，长距离顶管施工的线型控制受测量误差累积影响，随着顶进距离增加，控制精度难以保障，且当前纠偏技术存在滞后性，多依赖施工经验，难以确保纠偏效果稳定可靠。因次，在大直径长距离曲线顶管施工中的施工测量就显得更加重要，同时顶管施工工艺提升，也对顶管施工测量提出了更高的要求。

本文将结合武汉某双曲线顶管工程，对顶管施工在大直径长距离曲线顶管中线性控制关键技术加以论述。

## 1 工程概况

江汉区电力通道工程（一期）项目常青一路电力通道位于武汉市江汉区，总长 2.189km，线路沿线主要为居住用地、教育用地和商业用地，两侧多为密集居民住宅楼群和学校。电缆通道采用 D3500 圆形顶管施工，其中 CQ2~CQ3 顶管区间长约 390m，地质构成为粉质黏土、淤泥质粉质黏土以及粉质黏土、粉土、粉砂互层。

为避开周边建构筑物，顶管平面线形采用双曲线设计（直线段（48m）+曲线段（149m）+直线段（57m）+曲线段（107m）+直线段（29m）），两段曲线半径均为 600m。除此之外，竖向线形同时存在 600m 半径曲线段，长度约 93m。

## 2 曲线段竖井联系测量

### （1）控制点引测：

将地面控制点（KZ1、KZ2）的三维坐标引测至工作井井下。由于工作井深度较大，应规范要求控制全站仪俯仰角应小于 30°，可在工作井井壁增设强制对中点（QZ1），通过 QZ1 将坐标传递至井下强制对点（QZ2），最终在井下形成已知边（QZ1-QZ2），通过井下已知边

（QZ1-QZ2），可时时测得机头坐标（x,y,z）。

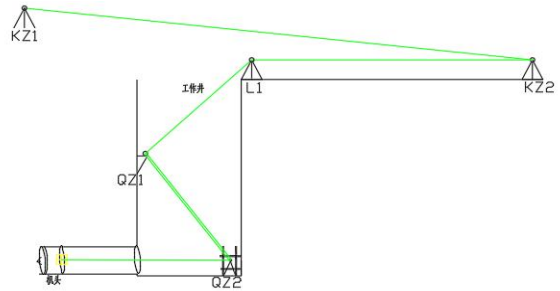


图 1 推进测量示意图

### （2）机头坐标监测：

在推进过程中，基于井下已知边（QZ1-QZ2），实时测量机头的三维坐标（x,y,z），并将实测坐标与设计轴线进行对比，计算当前偏差值，为后续纠偏提供数据支撑。

### （3）隧道内增设测站：

随着隧道顶进长度增加，当机头进入曲线段后，若 QZ2 仪台处无法通过全站仪观测到机头中心靶牌，需在隧道内增设测量仪台（ZD1）。ZD1 测站采用三角铁焊接的三脚架，三脚架顶部设置强制对中盘，且井下观测全程采用强制对中方式架设仪器，以最大限度减小测量误差。当隧道继续延长，ZD1 仪台出现观测盲区时，按相同方法增设 ZD2、ZD3 等测站，各测站间距控制在 100~150 米。

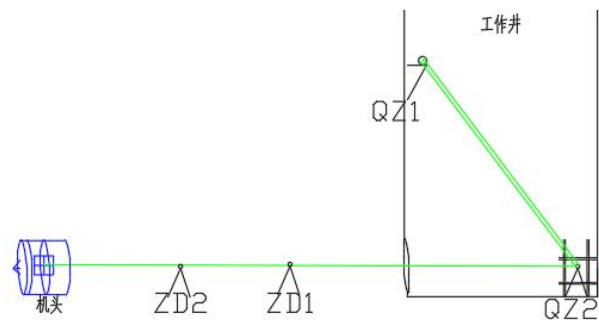


图 2 隧道内增设测站测量示意图

### 3 曲线区间中继间设置要点

#### (1) 中继间布设原则

1) 进入曲线段前 20~50 米设置第一个中继间，提前分散顶推力，避免曲线段顶力集中。

2) 进入曲线段后，根据曲线半径与顶力需求加密布设中继间：常规曲线段间距缩短至 50~100 米，急曲线段（曲率半径较小）间距可进一步缩短至 30 米。

3) 避免将中继间设置在软硬不均地层或高水压地层段，防止因地层受力不均或水压过大导致中继间密封失效。

#### (2) 间距控制

曲线段需根据公式计算调整间距，具体公式参考：

$$L=R*\theta /F_{max}$$

其中：L 为中继间距（m）；R 为曲线半径（m）； $\theta$  为单次顶进允许的转角（一般 $\leq 0.5^\circ$ ）； $F_{max}$  为单节管节允许顶力（KN）。

#### (3) 中继间结构与安装要求

1) 结构设计：中继间采用高强度钢环作为外壳，内嵌液压油缸（油缸数量根据实际顶力需求配置）；密封系统采用双道橡胶止水圈+注脂密封结构，防止泥水渗入，其中曲线段外侧密封压力需适当加强。

2) 安装精度：安装时需确保中继间壳体与设计曲线切线方向一致，偏差控制在 $\leq 2\text{mm/m}$ ；油缸需对称布置，顶进过程中同步加压，避免单侧受力导致管节扭曲；安装完成后，需对密封圈进行预压注脂，填充初始间隙，保障密封效果。

#### (4) 曲线段中继间特殊处理

1) 密封压力调整：曲线段外侧密封注脂压力提高至 0.3~0.5MPa（直线段通常为 0.2MPa），增强外侧密封性能。

2) 缝隙补偿：在管节接口处增设楔形垫片，补偿因管节偏转产生的缝隙，避免接口渗漏或受力不均。

3) 辅助纠偏：中继间顶进时，结合导向系统数据，通过调整油缸行程辅助纠偏（如延长曲线外侧油缸行程），但禁止仅依赖中继间进行大角度纠偏，需与顶管机头部纠偏协同配合。

#### (5) 监测与维护

1) 顶力监测：每个中继间安装压力传感器，实时监控顶力，确保实际顶力 $\leq$ 管节抗压强度的 70%，且重点监测曲线段外侧油缸压力，防止过载。

2) 密封维护：每顶进 10~20 米，检查密封圈磨损

情况，及时补充密封油脂；若发现渗漏，需立即停机，采用快硬水泥或化学注浆方式封堵。

### 4 曲线段顶进参数控制要点

#### (1) 顶力控制

1) 曲线段顶力因转弯摩擦阻力增大，通常比直线段增加 20%~40%；单节管节顶力需满足： $F_{实际} \leq 0.7F_{允许}$ （ $F_{允许}$  为管节抗压强度对应的允许顶力），并根据顶力传感器实时数据，优化主顶站与中继间的推力分配。

2) 曲线段外侧油缸推力增加 10%~20%，抵消离心力导致的阻力。主顶站与中继间采用“分段接力”模式顶进，避免局部顶力集中。

#### (2) 纠偏参数控制

1) 转角控制：单次纠偏角度 $\leq 0.5^\circ$ ，防止因急弯导致管节接口错位或密封失效；累计纠偏角度需与设计曲线曲率半径匹配，满足公式  $R=L/\theta$ （L 为管节长度， $\theta$  为相邻管节偏转角）。

2) 纠偏频率：每顶进一节管节需进行一次纠偏量计算，若地质条件复杂或偏差较大，需每 0.5~1 米测量一次，采用高频小幅度调整方式，确保纠偏安全可靠；曲线起始段需提前预调机头角度（预偏角  $0.3^\circ \sim 0.5^\circ$ ），降低后续纠偏压力。

#### (3) 顶进速度控制

顶进速度需根据地质条件调整，常规控制在 3~5cm/min；曲线段整体速度需降低至直线段的 60%~80%，确保纠偏操作与注浆作业同步跟进。刀盘转速控制在 1~2rpm，若遇阻力突变（如遇到障碍物），需立即停机检查，避免盲目顶进导致轴线偏移。

#### (4) 注浆参数

1) 浆液配比：砂层地层采用膨润土基浆液，水灰比 1:1~1:1.2，膨润土掺量 5%~8%；黏土地层采用聚合物浆液，利用其高流动性减少管节与地层的摩擦阻力。

2) 注浆压力与用量：同步注浆压力控制在 0.3~0.5MPa，曲线外侧压力可提高 10%~15%；注浆量按理论空隙的 120%~150% 控制，其中曲线段外侧需增量填充，确保空隙充分填充。

#### (5) 中继间参数

1) 推力分配：主顶站承担 50%~60% 的总推力，中继间根据顶力需求接力顶进，每台中继间实际顶力不超过其设计值的 80%。

2) 启动顺序：曲线段中继间优先启动靠近机头的设备，逐步向后接力，避免前端顶力不足。

3) 同步控制: 液压系统同步误差 $\leq 5\%$ , 防止管节受扭; 单次顶进行程 $\leq 30\text{cm}$ , 减少轴线累积偏差。

#### (6) 监测参数

1) 轴线偏差监测: 每顶进一管节测量一次轴线偏差, 必要时每 0.5~1 米测量一次, 允许偏差 $\leq 30\text{mm}$  (急曲线段 $\leq 20\text{mm}$ )。

2) 地面沉降监测: 地面沉降预警值设为 10mm, 报警值设为 20mm; 当沉降速率 $> 2\text{mm/h}$  时, 需立即补浆或调整顶进参数, 控制沉降发展。

## 5 曲线段顶管顶进纠偏控制要点

### (1) 实时监测与数据反馈

#### 1) 监测手段

采用激光导向仪 (精度 $\pm 2\text{mm}$ ), 实时显示顶管机姿态 (水平/垂直偏差、俯仰角)。管节顶进过程, 用全站仪复核轨迹。地面沉降监测沿曲线外侧加密监测点 (间距 5-10m), 监测沉降速率 (控制值 $< 2\text{mm/h}$ )。

#### 2) 偏差预警

允许偏差: 水平/垂直偏差 $\leq 30\text{mm}$  (急曲线段 $\leq 20\text{mm}$ ), 角度偏差 $\leq 0.5^\circ$ 。

分级响应: 预警级 (偏差 15mm): 调整顶进参数, 加强监测频率。报警级 (偏差 30mm): 立即停机, 启动纠偏程序。

### (2) 纠偏策略与操作要点

#### 1) 渐进式纠偏

采用小角度调整方式, 单次纠偏量 $\leq 0.3^\circ$ , 通过多次微调逐步修正轨迹, 避免因单次纠偏幅度过大导致管节受力不均。

#### 2) 纠偏油缸操作

油缸行程差控制: 水平纠偏调整左右侧油缸行程差 (例如左偏时, 右侧油缸多伸 5~10mm)。垂直纠偏时, 调整上下油缸行程差, 同时结合土压平衡, 防止机头“抬头”或“载头”。

纠偏频率: 每顶进 20~30cm 调整一次油缸行程, 避免连续顶进导致偏差累积。

#### 3) 预偏角设置

在进入曲线段前 10~20m, 提前调整机头偏向曲线内侧 (预偏角  $0.2^\circ \sim 0.5^\circ$ ), 利用后续顶进的自然趋势形成设计曲线, 减少主动纠偏压力。

### (3) 纠偏与施工参数的协同控制

#### 1) 顶进速度匹配

纠偏时降低顶速至正常速度的 50%~70% (如软土

段从 5cm/min 降至 3cm/min), 确保纠偏动作充分生效。纠偏后恢复顶速需缓慢 (每分钟提升 $\leq 0.5\text{cm}$ ), 防止惯性导致二次偏移。

#### 2) 刀盘扭矩调节

曲线外侧刀盘提速: 增加外侧刀具转速 (例如提高 10%~15%), 减少切削阻力差异, 辅助机头沿设计曲线推进。

#### 3) 注浆协同纠偏

曲线外侧增量注浆: 外侧注浆量增加 20%~30%, 填充因转弯产生的空隙, 减少管节与地层的摩擦阻力差异。

纠偏后补浆: 纠偏完成后对管节外侧补注快硬浆液 (如水泥-水玻璃双液浆), 固定修正后的轨迹, 防止回弹。

## 6 结论

本文通过实践研究, 确定了该地质条件下长距离双曲线顶管施工最优的施工方案和最合理的施工参数, 通过应用上述关键技术控制要点, 该工程在施工过程中各项指标均符合规范要求, 顶管工程圆满结束, 不仅取得了良好的经济效益和社会效益, 并可为类似地质条件下曲线顶管工程提供技术参考和实践经验。

### 参考文献

- [1] 杨兴医. 大口径双曲线管廊顶进施工关键技术应用研究[D]. 河南工业大学, 2017.
- [2] 丁东强. 大直径长距离曲线顶管施工测量关键技术及应用[J]. 山西建筑, 2025, 51(02): 107-111. DOI: 10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.02.023.
- [3] 潘国荣, 吴廷, 白昀. 顶管自动导向系统在三曲线顶管工程中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(04): 102-105+109. DOI: 10.14075/j.jgg.2014.04.035.
- [4] 姜斌. 复杂环境下长距离曲线顶管施工技术研究[J/OL]. 铁道建筑技术, 1-5[2026-03-24]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3368.TU.20260126.1411.014>.
- [5] 费征云. 长距离曲线双顶管施工关键技术[J]. 中国给水排水, 2012, 28(18): 106-108.
- [6] 刘旭. 砂土地层顶管施工中的管土作用机理及减阻技术研究[D]. 天津大学, 2022. DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2022.004448.