

轨道交通工程长大隧道贯通测量误差预计与控制

梁华鹏¹ 张东升²

1. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司; 2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司

摘要:城市轨道交通多建于经济发达城市,其地面高大建筑密集、地下设施复杂,叠加地质断裂带、岩溶等环境,对工程建设提出高要求。隧道准确贯通是轨交测量核心,当前单向开挖贯通长度超1500m的长大隧道逐年增多,贯通误差控制直接影响工程进度。依据《城市轨道交通工程测量规范》(GB/T50308-2017)与《铁路工程测量规范》(TB10101-2018),本文分析地面/地下控制网、联系测量、陀螺定向对贯通误差的影响,通过误差计算验证:加测陀螺方位角可将横向贯通误差控制在±50mm内、高程误差控制在±25mm内,满足规范要求,为长大隧道贯通提供技术支撑。

关键词: 轨道交通; 长大隧道; CPI/CPII控制网; 联系测量; 陀螺定向; 贯通误差。

1 轨道交通工程地面控制网的优化及测量

1.1 CPI、CPII控制网优化

为实现全线平面与高程基准统一,CPI、CPII控制网需与城市高等级控制点或连续运行基准站(CORS)联测;地面GNSS控制点需结合现场环境布设,优先选长期保存、网形合理的位置,且相邻点需保证1-2个观测方向,满足车站、洞口及竖井施工测量与联系测量精度需求。

1.2 CPI、CPII控制网测量

CPI采用GNSS二等施测,CPII采用GNSS三等施测,核心技术要求见表1,且控制点复测平面坐标较差需满足 $CPI \leq 20\text{mm}$ 、 $CPII \leq 15\text{mm}$ 。

1.3 平面加密控制网测量

平面加密采用附和导线法或GNSS静态观测,以

CPI/CPII为起始数据并检核坐标。

1.3.1 导线网布设原则

a、邻近边长差异不宜过大,最短边长 $\geq 100\text{m}$;

b、点位避开塌陷区、地下管线,利用现有城市导线点;

c、沿隧道方向布设,采用配套导线或多节点导线网;

d、导线点与相邻GNSS网垂直角 $\leq 30^\circ$,两点间视线无遮挡干扰。

1.3.2 导线测量技术要求(见表2)

1.4 高程控制网测量

高程控制网采用二等水准与精密水准,技术要求见表3。

表1 GNSS主要技术要求

等级	固定误差	比例误差	基线方位角中误差	约束点间的边长 相对中误差	约束平差后最弱边边长 相对中误差
二等	≤ 5	≤ 1	1.3	1/250000	1/180000
三等	≤ 5	≤ 1	1.7	1/180000	1/100000

表2 导线测量主要技术要求

等级	测角中误差(")	测距相对中 误差	方位角闭合差 (")	导线全长 相对闭合差	测回数			
					0.5"级 仪器	1"级 仪器	2"级 仪器	6"级 仪器
二等	1	1/250000	$\pm 2\sqrt{n}$	1/100000	6	9	-	-
隧道二等	1.3	1/200000	$\pm 2.6\sqrt{n}$	1/100000	6	9	-	-
三等	1.8	1/150000	$\pm 3.6\sqrt{n}$	1/55000	4	6	10	-

注:1、 n 为测站测角个数。

2、边长 $< 500\text{m}$ 时,二等/隧道二等边长误差 $\leq 2.5\text{mm}$,三等 $\leq 3\text{mm}$,四等/一级 $\leq 5\text{mm}$,二级 $\leq 7.5\text{mm}$ 。

表 3 高程控制网技术要求

水准测量等级	每千米水准测量偶然中误差 M_{Δ} (mm)	每千米水准测量全中误差 M_W (mm)	附和路线或环线周长的长度 (km)	
			附和路线长	环线周长
二等	≤ 1	≤ 2	≤ 400	≤ 750
精密水准	≤ 2	≤ 4	≤ 150	≤ 200

2 联系测量

联系测量通过导线、水准测量将地面控制点坐标 / 高程经洞口、竖井等传递至地下。单向隧道长度超 1500m 且无竖井或定向条件时，每掘进 1000m 需开展含联系测量的地下控制测量，并结合陀螺测定坐标方位。

2.1 平面联系测量

2.1.1 一井定向法

竖井内悬挂 2 根钢丝，测量井口点距离与角度确定钢丝位置，假设井底钢丝位置已知，计算地下导线点坐标。关键要求：

- a、钢丝间距 $\geq 5m$ ，定向角 $\alpha < 1^\circ$ ， b/a 、 b'/a' < 1.5 ；
- b、用校准钢尺测 3 次，地面偏移 $\leq 0.5mm$ 、地下 $\leq 1.0mm$ ，上下较差 $\leq 2mm$ ；
- c、I 级全站仪六测回测角，误差 $\pm 1''$ ，方位角较差 $< 20''$ 、中误差 $\pm 12''$ ，每定向操作独立 3 次取均值。

详见图 1：

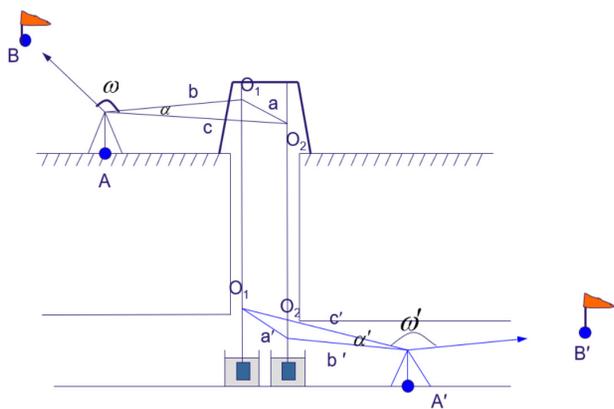


图 1 一井定向（联系三角形）测量示意图

2.1.2 两井定向法

两竖井各挂 1 根钢丝，待稳定后，井上以检核加密点为后视、井下以待测点为后视，同步观测钢丝角度与距离，避免钢丝抖动移位。见图 2。

2.1.3 导线直传法

按三等导线技术要求施测，垂直角 $\leq 30^\circ$ ，井口边长 $\geq 50m$ ，测距需双向观测，适用于井口直径大、垂直角小的场景。

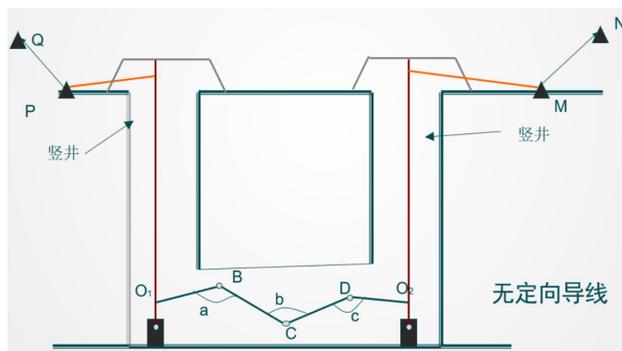


图 2 两井定向测量示意图

2.2 高程联系测量

2.2.1 近井水准测量

地面、地下近井水准严格按二等水准标准施测，地面近井水准点需附和至二等及以上高程控制点。

2.2.2 高程传递测量

采用悬挂钢尺法，地面与地下同步用水准仪采集数据，钢尺下挂重锤校准。独立测量 3 次且每次调整仪器高度，上下水准点高差较差 $\leq 3mm$ 。

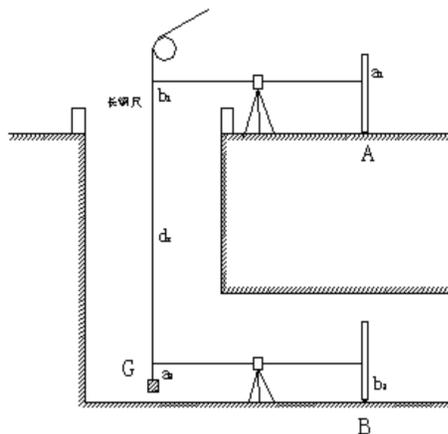


图 3 高程传递示意图

3 地下控制网测量

3.1 测量要求

3.1.1 地下平面 / 高程控制点通过联系测量或导线直传获取；

3.1.2 贯通面一侧隧道长超 1500m 时，加测陀螺方位角提升导线精度；

3.1.3 采用前需检验地下控制点。

3.2 地下控制点埋设

检查地下导线是否有 2 个以上联系测量起算方位

角、水准是否有 2 个以上起算高程点,按隧道施工方法与结构布设导线点标志。直线/曲线隧道起始点每掘进 200m/100m 设地下平面控制点并测量。

3.3 地下平面控制测量

隧道贯通前控制导线设为闭合导线,按 TB10101-2018 三等导线要求,控制导线点至少测 3 次且与联系测量同步。隧道长超 800m 需布设洞内 CPII 网,采用导线或自由测站边角交汇法施测。

洞内 CPII 控制网采用导线法施测,测量等级按表 4,表 5 要求。

3.4 地下高程控制测量

采用二等水准施测,测量点位于地下近井处,线路往返、附和/闭合误差控制在毫米级。贯通前需测 3 次,重复测量较差 ≤ 5mm 取均值;相邻竖井、车站隧道贯通后,高程控制网形成附和/水准路线。

4 陀螺仪定向测量

导线延伸中测角、测距误差累积会降低精度,需定期用陀螺定向校正方位。单向隧道长超 1.5km 时,掘进 1000m 后需开展含陀螺定向的地下控制测量,测定控制网边陀螺方位角并转化为坐标方位角。

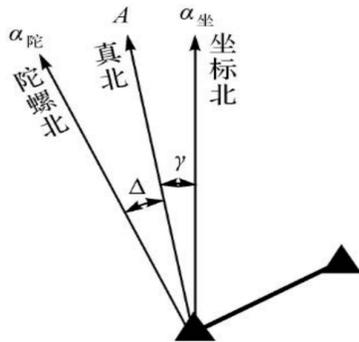


图 4 各方位角关系图

4.1 地面已知边上测量检核

地面陀螺观测点需避开振动、气流、电磁干扰,地下定向边设于施工受限区外,边长 ≥ 60m。下井前

在已知边对向观测取真方位角均值,计算坐标方位角(需子午线收敛角改正,其中为测站点与 3° 带中央子午线经度差, B 为纬度),与已知边坐标反算方位角比对,达标则完成仪器检核;下井后重复检核,前后真方位角较差需合规。

4.2 在井下定向边上测定坐标方位角

仪器设站测定定向边真方位角取均值,经子午线收敛角改正的坐标方位角。每条边测 ≥ 3 测回,对向观测取均值,陀螺与全站仪坐标方位角较差 < 10" ;单向隧道建议用 ≥ 5" 级陀螺,较差超 15" 需校验调整。

5 贯通误差预计、控制及调整

5.1 贯通测量中误差限值

横向贯通中误差 ≤ ± 50mm,高程 ≤ ± 25mm。贯通面上的横向中误差:

$$m_{\text{横向}} = \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2};$$

$$m_{y\beta} = \frac{m''}{\rho''} \sqrt{\sum R_x^2} \quad (\text{测角误差影响});$$

$$m_{yl} = \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d^2 y} \quad (\text{测边误差影响}).$$

$$m_{\Delta h} = M_{\Delta} \sqrt{L}$$

(M_Δ 为每千米水准偶然中误差, L 为洞内高程路径长度)

5.2 误差来源与参数确定

误差主要来自地面控制、联系测量、地下控制,其中联系与地下控制对精度影响更大,参数按规范与实测数据确定:

地面控制: GNSS 点位中误差 ± 15mm,三等导线相邻点位中误差 ± 8mm;

联系测量: 单次定向中误差 ± 4.24" ,两次定向方位角较差 ≤ ± 12" ;

地下控制: 三等导线测角中误差 ± 1.8" ,一级

表 4 洞内 CPII 导线测量等级

轨道结构	列车设计速度 V	隧道长度 (km)	测量等级	备注
无咋	V=160km/h	L > 6	隧道二等	导线网
		2 < L ≤ 6	三等	导线网

注:导线网独立闭合环的边数宜控制在 4 ~ 6 条边。

表 5 洞内 CPII 导线的主要测量技术要求

等级	边长 (m)	测距中误差 (mm)	测角中误差 (")	相邻点相对点位中误差 (mm)	导线全长相对闭合差	导线全长相对闭合差
隧道二等	250 ~ 500	2.0	1.3	5.0	1/100000	± 2.6√n
三等	250 ~ 500	3.0	1.8	7.5	1/55000	± 3.6√n

注:小半径单线隧道适当缩短边长。

全站仪测距精度 $\pm(1+2\text{ppm})$ 。

5.3 误差计算与控制

以 K 点为贯通点，按 5000m 隧道长度计算：

5.3.1 横向贯通误差

1) 地面控制误差: $M_1 = \pm 15\text{mm}$ (GNSS 点位误差)；

2) 联系测量误差：一井定向无陀螺边时，单次定向引发误差 $\pm 102\text{mm}$ ；经 10 次联系测量后， $= \pm 32.5\text{mm}$ 。

3) 地下导线误差测角误差引发横向误差 $\pm 116.9\text{mm}$ ，两次独立测量后 $M_3 = \pm 82.6\text{mm}$ ；测边误差 (20 条 250m 边，每条误差 1.8mm) $M_4 \approx \pm 15\text{mm}$ ；

4) 总误差

$$M_x = \pm \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 + M_4^2} \\ = \pm \sqrt{15^2 + 32.5^2 + 82.6^2 + 15^2} = \pm 91.3\text{mm}$$

总误差 $M_x > \pm 50\text{mm}$ ，不满足限差要求，须采取提高精度的方法。

超限原因是定向边短、导线误差累积。

优化措施：加测陀螺方位角，形成方位角附和导线减少误差累积。

一个陀螺系统在进行 i 次陀螺方位角的测量时，会形成 i 条方位角附和导线。这些附和导线与 $n-k$ 之间的支导线是独立的，因此，我们可以推导出，在等间距测量 i 次陀螺方位角后，地下导线对 K 点的横向误差预测公式如下：

$$M_3^2 = \left(\frac{m_\beta \times S}{\rho}\right)^2 \times i \times \left[\frac{k(k-1)(2k-1)}{6} + (k^2+1)Q_\alpha - \left[\frac{(k-1)^2(k+2Q_\alpha)}{4} \right] \right] \\ + \left(\frac{m_\alpha \times S}{\rho}\right)^2 (n-ik+1)^2 + \left(\frac{m_\alpha \times S}{\rho}\right)^2 \frac{(n-ik)(n-ik+1)(2n-2ik+1)}{6}$$

式中， $Q_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_\beta}$ ， k 为加测陀螺定向边理论最佳

位置， n 为隧道内导线边数， S 为导线边长度 (m)。依据上式计算得出加测不同数量陀螺方位角的 K 点横向中误差 M_3' ，其计算结果见下表。

表 6 显示了不同数量陀螺的方位角贯通误差增益的加测结果。

表 6

导线等级	未加测方位角	加测 1 个		加测 2 个		加测 3 个		加测 4 个		加测 5 个		加测 6 个	
	M_3/mm	M_3'/mm	增益 /%										
I 级	116.9	67.7	42.1	47.4	59.4	39.7	66.1	34.3	70.6	31.3	73.19	29.9	74.4

根据计算数据，为了达到 M_3' 的限制误差标准并符合标准规定，需增加 6 个陀螺的方位角测量，这样就等于 29.9mm。陀螺的方位角需要根据隧道的长度进行平衡。

按加测 6 个陀螺方位角后各部分误差影响重新计算贯通横向总误差 M_x ：

$$M_x = \pm \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3'^2 + M_4^2} \\ = \pm \sqrt{15^2 + 32.5^2 + 29.9^2 + 15^2} = \pm 48.9\text{mm}$$

结果表明，加测 6 个陀螺方位角后贯通横向总误差满足规范要求。

5.3.2 高程贯通误差

以 K 点为贯通测量点。

1) 地面水准误差：

洞外 $L=5\text{km}$ ， $m_{h1} = \pm 2\sqrt{5} \approx \pm 4.5\text{mm}$ 。

2) 高程传递误差：水准路径 $L=0.5\text{km}$ 。悬挂钢尺误差 3mm，

$$m_{h2} = \pm \sqrt{2} \times \sqrt{(4^2 \times 0.5 + 3^2)} \approx \pm 5.2\text{mm}$$

3) 地下水水准误差：

地下 $L=5\text{km}$ ， $m_{h3} = \pm 4\sqrt{5} \approx \pm 8.9\text{mm}$

4) 总误差 m_h 为：

$$m_h = \pm \sqrt{m_{h1}^2 + m_{h2}^2 + m_{h3}^2} \\ = \pm \sqrt{4.5^2 + 5.2^2 + 8.9^2} = \pm 11.25\text{mm}$$

由此看出，按照此方法进行施测，高程满足规范中的竖向贯通限差要求。

6 结语

本文分析轨道交通长大隧道贯通误差影响因素，验证地面 / 地下控制网、联系测量的误差贡献，通过数据表明：加测陀螺方位角可有效控制导线误差累积，使横向贯通误差满足 $\pm 50\text{mm}$ 限值，高程误差天然合规。未来需结合新仪器、新技术 (如智能全站仪、GNSS-RTK) 优化测量流程，完善精度控制标准，为长大隧道贯通提供更高效的技术方案。

参考文献：

[1] 《城市轨道交通工程测量规范》(GB/T50308-2017)
 [2] 《铁路工程测量规范》(TB10101-2018)
 [3] 《工程测量通用规范》(GB 55018-2021)
 [4] 《全球定位系统城市测量技术规程》(CJJ73-2010)
 [5] 《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897-2006)
 [6] 《控制测量学》，孔祥元，郭际明著，武汉大学出版社，2015 年 11 月 11 日，第四版