

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2014.04.022

后方交会法在地铁盾构控制测量中的应用

王建华¹ 王玉振²

(1. 中铁七局集团有限公司 郑州 450016; 2. 河南水利与环境职业学院 郑州 450011)

摘要 地铁盾构施工具有一次成洞、开挖横断面狭窄、曲线半径小、距离较长等特点,对控制测量提出较高的精度要求。结合工程实践,探索采用后方交会测量方法进行地铁盾构施工测量,结果表明:该方法不但能提高隧道的贯通精度,解决地铁盾构施工一次成洞对测量提出的高精度要求,还可以为后续地铁铺轨控制测量、提高地铁线路的平顺性及地铁列车的乘坐舒适性提供测量技术保障。

关键词 城市轨道交通;后方交会;地铁盾构;控制测量
中图分类号 U455.43 **文献标志码** A
文章编号 1672-6073(2014)04-0099-04

1 工程概况

地铁区间隧道施工一般采用盾构法,具有施工速度快、一次成洞、隧洞较长、埋深较大的特点,因此对地铁控制测量的精度提出了较高要求。地铁隧道的横断面相对狭小,曲线半径小,传统的导线网控制测量难以满足其精度要求。笔者结合实例首次在隧道管片壁上布设80 m一对的边角后方交会网,以自由设站的后方交会的方式进行施测,采用专用软件平差,实现外业数据自动化采集和处理分析,提高了洞内控制网精度和测量施工效率。通过与常规导线网的理论和实际对比分析,形成一种全新的高精度的洞内控制测量方法。

郑州市轨道交通2号线一期工程向阳路站—南四环站区间线路,从向阳路站出发,沿紫荆山路向南,下穿南水北调干渠工程后到达南四环站。区间左线盾构区间长度为2 045.813 m,右线盾构区间长度为2 047.239 m。

收稿日期: 2013-08-28 修回日期: 2013-11-08
作者简介: 王建华,男,高级工程师,从事工程测量技术方面的研究,wyz3007@163.com

2 方案实施

洞内控制网布设时以向阳路站底板控制点为控制测量的起算依据(T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4)。 T_1 、 T_3 为起算点,左线延伸控制网 XZ_1 、 XZ_2 、 XZ_3 …延伸到掘进面,然后返回,通过转点回到站内 T_2 、 T_4 做附和导线(见图1)。

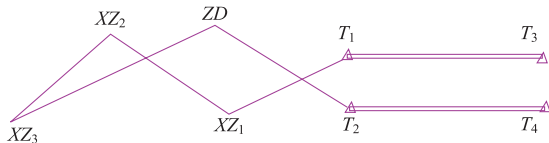


图1 洞内控制网布设

根据郑州市地铁2号线向阳路至南四环区间的盾构施工情况,在隧道内部使用强制对中形式的观测点。强制对中队设在已成隧道的管片侧壁上,距地面1.5 m左右;每隔80~100 m设置一对强制对中队,左右对称。施测时采用Leica TCA 2003全站仪、Leica原装精密对中棱镜底座、原装进口高精度专业棱镜。洞内平面控制网施测采用自由设站的后方交会法,每站观测3对目标,每站3测回,保证每个点至少在不同的测站上被测量3次以上,每测站重复观测多于3个的目标观测点,每测站观测距离不大于150 m,相邻两测站距离不大于120 m(见图2)。控制网的段落搭接时受各种因素的影响必然存在偏差,为了消除这种偏差或者将这种偏差降到最小,在进行控制网的测量时必须要在段落搭接的地方进行重复观测,一般重复观测的测站数不应少于1个测站。

3 精度分析

3.1 常规导线网控制测量精度分析

洞内附和导线布设形式如图2所示。地下隧道贯

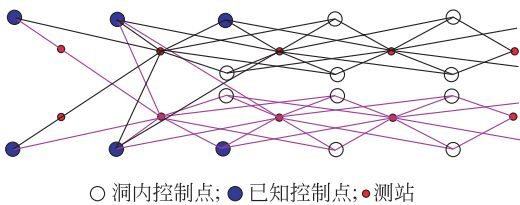


图2 洞内平面控制网

通长度设置为 2 km,则附合导线全长约为 5 km,因为地铁隧道的一般设计半径很小,导线平均边长设为100 m,从该附合导线明显看出最弱点为 XZ_3 (设为 K 点,为隧道掘进终点处)距起始点长度约为 2.5 km,最弱点的权为 $P_w = 2/2.5^2 = 0.32$,仍取 1 km 导线长为单位权长度,取 $m_B = \pm 2.5''$,仍采用上述仪器观测,将有关数据代入单位权中误差公式

$$m_0 = \sqrt{nm_s^2 + \lambda^2 L^2 + m_B^2 L^2 / \rho^2 (n + 1.5) / 3}$$

则 $m_0 = \pm 24.0 \text{ mm}$ 。

在不考虑起算点误差的情况下,最弱点 W 的点位误差为 $m_w = m_0 \sqrt{1/P_w} = \pm 42.4 \text{ mm}$;考虑起算点误差的影响,则 $m_w = \pm \sqrt{2.9^2 + 42.4^2} = \pm 42.5 \text{ mm}$ 。

按 2 倍中误差计算,最弱点的最大误差将达到 $\pm 85 \text{ mm}$;假设纵向误差为 0,最弱点的横向误差也将达到 $\pm 85 \text{ mm}$ 。对于超过 2 km 的地铁隧道,附合导线在没有其他定向方式矫正的情况下,横向贯通误差很可能超过 100 mm,不能保证盾构机的正常出洞。由此可见,常规导线控制在 2 km 以上的盾构掘进,保证其正确贯通是很困难的。

3.2 洞内后方交会法控制测量精度分析

根据测量方案,洞内后方交会采用自由设站、强制对中、重复观测的方式进行施测。建立后方交会精度分析模型如图 3 所示。

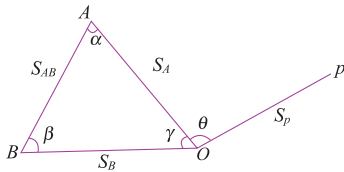


图3 后方交会精度分析模型

洞内测量仍然采用 Leica 全站仪 ($0.5''$, $1 + 1 \text{ ppmD}$),水平角观测 3 测回,边长观测 3 测回。设 A 、 B 为已知点, O 为测站点, P 为目标点。 S_A 、 S_B 、 S_P 为边长观测值, γ 、 θ 为角度观测值。

3.2.1 测站点点位误差

由图 3 可得

$$\begin{cases} \alpha = \arcsin\left(\frac{S_B}{S_{AB}} \sin \gamma\right) \\ \alpha_{AO} = \alpha_{AB} - \alpha = \alpha_{AB} - \arcsin\left(\frac{S_B}{S_{AB}} \sin \gamma\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_O = X_A + S_A \cos \alpha_{AO} \\ X_O = X_A + S \cos \left[\alpha_{AB} - \arcsin\left(\frac{S_B}{S_{AB}} \cdot \sin \gamma\right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

已知点误差对于常规方法和本方案没有区别,所以不考虑已知点误差。对上式微分,得

$$dx_O = \frac{S_A \sin \alpha_{AO}}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_B}{S_{AB}} \sin \gamma\right)^2}} \frac{S_B}{S_{AB}} \cos \gamma d\gamma + \cos \alpha_{AO} dS_A + \frac{S_A \sin \alpha_{AO}}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_B}{S_{AB}} \sin \gamma\right)^2}} \frac{\sin \gamma}{S_{AB}} dS_B \quad (3)$$

在不考虑已知点误差的情况下, $\sin \alpha_{AO}$ 、 $\cos \alpha_{AO}$ 取极值,则

$$dx_O = \frac{S_A \cos \gamma}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}} d\gamma + dS_A + \frac{\sin \gamma}{\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}} dS_B$$

令 $K = 1/\sqrt{1 - \sin^2 \gamma}$, 则

$$dx_O = \begin{pmatrix} KS_A \cos \gamma & 1 & K \sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\gamma \\ dS_A \\ dS_B \end{pmatrix} \quad (4)$$

于是

$$m_{XO}^2 = \begin{pmatrix} KS_A \cos \gamma & 1 & K \sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_\gamma^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_{SA}^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_{SB}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} KS_A \cos \gamma \\ 1 \\ K \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (5)$$

洞内控制点测量时测距按 100 m 计算,自由设站时取 $S_A = 50 \text{ m}$, $m_\gamma = \pm 1.3''$, $m_{SA} = m_{SB} = \pm 1.1 \text{ mm}$, $\gamma = 60^\circ$,从而得出测站点点位误差 $m_{XO} = \pm 2.2 \text{ mm}$ 。同理, $m_{YO} = \pm 2.2 \text{ mm}$, 则 $m_O = \sqrt{m_{XO}^2 + m_{YO}^2} = \pm 3.1 \text{ mm}$, 在 2 个已知点交会情况下, $m_O = 3.1/\sqrt{2} = \pm 2.2 \text{ mm}$ 。

采用 2 组图形交会,则测站点点位误差为 $m_O = 2.2/\sqrt{2} = \pm 1.6 \text{ mm}$ 。

3.2.2 目标点点位误差

由图 3 可得

$$\alpha_{AO} = \alpha_{AB} - \alpha = \alpha_{AB} - \arcsin\left(\frac{S_B}{S_{AB}} \sin \gamma\right) \quad (6)$$

$$d\alpha_{AO} = -\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_B}{S_{AB}}\sin\gamma\right)^2}} \frac{S_B}{S_{AB}} \cos\gamma d\gamma - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_B}{S_{AB}}\sin\gamma\right)^2}} \frac{\sin\gamma}{S_{AB}} dS_B$$

由于 $S_A \approx S_B$, 得

$$d\alpha_{AO} = -\frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2\gamma}} \cos\gamma d\gamma - \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2\gamma}} \frac{\sin\gamma}{S_{AB}} dS_B$$

令 $K = 1/\sqrt{1 - \sin^2\gamma}$, 则

$$d\alpha_{AO} = \begin{pmatrix} K\cos\gamma & K\frac{\sin\gamma}{S_{AB}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\gamma \\ dS_B \end{pmatrix} \quad (7)$$

于是

$$m_{\alpha AO}^2 = \begin{pmatrix} K\cos\gamma & K\frac{\sin\gamma}{S_{AB}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_\gamma^2 & 0 \\ 0 & m_{SB}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K\cos\gamma \\ K\frac{\sin\gamma}{S_{AB}} \end{pmatrix}$$

取 $S_{AB} = 50\text{ m}$, $m_\gamma = \pm 1.3''$, $m_{SB} = \pm 1.1\text{ mm}$, $\gamma = 60^\circ$, 代入上式, 得 $m_{\alpha AO} = \pm 1.3''$, 将 $m_{\alpha AO}$, m_θ 代入 $m_{\alpha OP} = \pm\sqrt{m_{\alpha AO}^2 + m_\theta^2}$, 得 $m_{\alpha OP} = \pm 1.8''$ 。

在不考虑测站点误差的情况下, 取 $S_P = 50\text{ m}$, $m_{SP} = \pm 1.1\text{ mm}$, $m_{\alpha OP} = \pm 1.8''$, 得 $m_{XP} = \pm\sqrt{m_{SP}^2 + m_P^2 m_{\alpha OP}^2} = \pm 1.2\text{ mm}$

同理, $m_{YP} = \pm 1.2\text{ mm}$, 于是目标点点位误差为 $m_P = \pm\sqrt{m_{XP}^2 + m_{YP}^2} = \pm\sqrt{1.2^2 + 1.2^2} = \pm 1.7\text{ mm}$ 。

考虑测站点误差, 则目标点点位误差为 $m_P = \pm\sqrt{1.6^2 + 1.7^2} = \pm 2.3\text{ mm}$ 。

采用 2 次图形交会, 则目标点点位误差为 $m_P = \pm 2.3/\sqrt{2} = \pm 1.6\text{ mm}$ 。

3.2.3 隧道贯通处点位误差

洞内后方交会测站点的点位精度为 $\pm 1.6\text{ mm}$, 洞内已知点的点位精度也按 $\pm 1.6\text{ mm}$ 计算, 则目标点的点位误差为 $m_P = \pm\sqrt{1.6^2 + 1.6^2} = \pm 2.3\text{ mm}$

隧道在掘进过程中, 假设交会法测量向前推进的点位误差是呈线性变化的。设隧道全长为 2 km , 交会推进的次数为 20 次, 则掘进终点处目标点的点位误差为 $\pm 2.3\sqrt{20} = \pm 10.3\text{ mm}$, 按 3 倍的中误差计算, 端点处点位的最大误差为 $10.3 \times 3 = \pm 30.9\text{ mm}$ 。所以由控制点本身造成的横向贯通误差最大为 30.9 mm , 高于洞内导线测量的精度。通过以上分析可知, 在地铁洞内平面控制测量中, 采用目标点强制对中方式, 结合自由

建站多站点边角后方交会测量方法施测, 可以达到较高的贯通点位精度。尤其对长大地铁隧道 (2 km 及以上) 掘进控制具有明显的优势。

4 实测对比分析

4.1 后方交会成果及点位精度

洞内后方交会部分成果及点位精度见表 1。

表 1 洞内后方交会部分成果及点位精度

序号	点名	X/m	Y/m	MX/mm	MY/mm	备注
1	G1	3 839 920.323 20	470 284.680 92	0.00	0.00	
2	G2	3 839 749.166 71	470 285.004 20	0.00	0.00	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
101	Z54	3 837 683.886 88	470 231.042 04	1.89	29.69	
103	GS	3 837 682.448 44	470 229.299 26	1.91	29.72	贯通点

洞内后方交会测量总里程为 2.05 km ; 通过表 1 中测量数据可以看出洞内测量点位的横向最大中误差为 29.72 mm , 基本和理论分析的横向贯通误差 30.9 mm 相一致。远远能够满足盾构横向偏差施工与验收规范要求, 可保证盾构机正确出洞。

4.2 导线控制网与后方交会成果坐标比较

通过隧道左线洞内导线网平面控制点 XNZ7 和 XNZ8 与洞内后方交会成果中点 Z30、Z33 的平面坐标偏差的比较, 得出对隧道偏差的影响, 获得更优的测量技术方法 (见表 2)。

表 2 导线网平面控制点与洞内后方交会成果

点号	导线网 X/m	导线网 Y/m	X 较差/mm	Y 较差/mm
XNZ7	3 838 572.680 5	38 470 256.891 4	8	15
Z30	3 838 572.688 7	470 256.033 5		
XNZ8	3 838 400.093 7	38 470 256.906 4	7	13
Z33	3 838 400.101 1	470 256.046 5		

隧道贯通后, 通过对测量结果对比分析, 得出采用导线网法和后方交会法在隧道中线 1.4 km 处的左偏值分别为 26.7 、 11.7 mm , 所以后方交会法更利于隧道贯通。

4.3 公共边导线、后方交会坐标方位角对比

为保证大长盾构区间的正确贯通, 项目部用高精度陀螺仪进行方位角测量, 并纠正导线方位角, 结果如表 3 所示。

从以上数据比较结果可以看出, 本方案成果相比导线网成果更加接近陀螺仪成果, 与陀螺仪成果只相差 3 s ; 其精度之高足以满足地铁隧道施工和设计要求。

表3 方位角测量结果

起点	终点	方位角/(° ' ")				较差/(")		
		陀螺仪		导线网				
XNZ7	XNZ8	179	42	51.60	179	42	56.85	5.25
起点	终点	方位角/(° ' ")				较差/(")		
		陀螺仪		后方交会测量				
XNZ7	XNZ8	179	42	51.60	179	42	54.60	3.0

5 结论

本文通过理论分析对比与现场测量相结合,得到如下结论:运用后方交会法能够提高隧道的贯通精度,可解决地铁盾构施工一次成洞对测量的高精度要求,而且对后续地铁的铺轨具有较好的控制指导意义,为地铁线路的平顺

性,提高地铁列车的乘坐舒适性提供了测量技术保障。

参考文献

[1] TB 10601—2009 高速铁路工程测量规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2009.

[2] GB 50026—2007 工程测量规范[S]. 北京:中国计划出版社,2010.

[3] JGJ/T 8—2007 建筑物变形测量规程[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

[4] GB 50308—2008 城市轨道交通工程测量规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[5] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003:6-21.

(编辑:郝京红)

Resection Method Applied in the Measurement of Subway Shield Tunnel Control

Wang Jianhua¹ Wang Yuzhen²

(China Railway 7th Bureau Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016;

Henan Vocational College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou 450011)

Abstract: Subway tunnel construction features forming shapes in one time, narrow cross section, small curve radius, long distance, etc.. The control measure should be implemented with high accuracy. On the basis of engineering practice, the measurement method of resection for metro construction was explored. The results show that the method can improve the breakthrough precision of tunnel, meet the high precision requirement on measurement of forming a subway shield construction, well control subway track laying, ensure the smoothness of subway lines and improve comfort of taking subway trains.

Key words: urban rail transit; resection; subway shield; control measurement

(上接第96页)

参考文献

[1] 杨挺,王心联,许琼鹤,等.箱形隧道基坑下已建地铁盾构隧道隆起位移的控制分析与设计[J].岩土力学,2005,26(S):187-192.

[2] 戚科骏,王旭东,蒋刚,等.临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):5485-5489.

[3] 侯学渊,刘国彬,黄远雄.城市基坑工程发展的几点看法[J].施工技术,2000,29(1):5-7.

[4] 王卫东,吴江斌,翁其平.基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J].岩土力学,2004,25(2):251-255.

[5] 陈郁,李永盛.基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算

方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(1):91-94.

[6] 龚晓南.地基处理手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2008:481-482.

[7] 刘国彬,侯学渊.软土基坑隆起变形的残余应力分析法[J].地下工程与隧道,1996(2):2-7.

[8] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑回弹的实用计算方法[J].土木工程学报,2000,33(4):61-67.

[9] 姚燕明,杨金刚,王哲.分析基坑开挖对其下卧隧道、管线变形的影响[J].地下空间与工程学报,2013,9(S2):2029-2033.

(编辑:郝京红)

Case Analysis of the Influence of Foundation Pit Excavating on Shield Tunnel of Ningbo Metro

Yao Yanming¹ Yang Jingang² Wang Zhe²

(1. Ningbo Urban Rail Transit Management Department, Ningbo, Zhejiang 315000;

2. East China Company of China Railway Eryuan Group Co., Ltd., Hangzhou 310004)

Abstract: In terms of a real project of foundation pit excavating over a built shield tunnel structure in Ningbo city, 3D finite element method and residual stress method are used to study the influence of foundation pit excavation on the uplift of the shield tunnel. The mechanics of different consolidation methods to control the foundation deformation and shield tunnel uplift are analyzed mainly. The deformation monitoring of the newly built tunnel is carried out and the monitoring data is analyzed at the same time during the construction process of the upper pit. The research can provide a certain reference for similar projects in the future.

Key words: urban rail transit; foundation pit; shield tunnel; deformation; uplift; Ningbo Metro