

Research on Control Precision Design of Rail Transit Shield Tunnel

Zhuhua Yang^{1*}, Shunming Xu^{2#}

¹China Railway Liuyuan Group Co., Ltd., Tianjin

²Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Email: #xushunming@gzmtr.com

Received: Mar. 26th, 2020; accepted: Apr. 21st, 2020; published: Apr. 28th, 2020

Abstract

This paper discusses the main content of the shield tunneling control measurement and the accuracy measurement design of the borehole control. The method of estimating the penetration error is studied in detail. The estimation of the through-hole error in the measurement method of GNSS and precision wire is carried out. Analysis, derivation, calculation, combined with the control accuracy of the Dongyang interval tunnel of Guangzhou Metro Line 1 to demonstrate the specific value of the reasonable assignment of the shield tunneling measurement estimate, and finally propose to improve the control accuracy of the tunnel. The measures are available for tunnel peer reference.

Keywords

Rail Transit, Shield Tunnel, Precision Design, Measurement

轨道交通盾构隧道控制贯通精度设计

杨祝华^{1*}, 徐顺明^{2#}

¹中铁六院勘察设计院集团有限公司, 天津

²广州地铁集团有限公司, 广东 广州

Email: #xushunming@gzmtr.com

收稿日期: 2020年3月26日; 录用日期: 2020年4月21日; 发布日期: 2020年4月28日

*第一作者。

#通讯作者。

摘要

本文论述盾构隧道洞外控制测量、洞内控制测量精度设计的主要内容,对贯通误差的估算方法进行了较详细的研究,就GNSS、精密导线等测量方法在的洞内贯通误差估算进行了分析、推导、计算,结合广州地铁1号线东杨区间隧道控制测量贯通精度进行论证,根据盾构隧道贯通测量估算预计提出合理的配赋的具体数值,最后提出了提高隧道洞内控制测量精度的措施,可供隧道测量同行参考。

关键词

轨道交通, 盾构隧道, 精度设计, 测量

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

轨道交通是一项结构复杂的系统工程,其主要特点是线路上的车站和区间同时施工、施工方法多种多样(矿山法、高架法、盾构法等)。其中盾构隧道施工过程中,测量任务是要保证盾构设计中线按正确方向贯通和各种构筑物的形位符合设计要求。设计规定贯通误差的限值对衡量盾构隧道是否正确贯通有了标准,也为确定不同阶段的测量精度提供了依据。贯通误差限值是根据地下隧道限界预留的安全裕量(裕量在一定的限界基础上另加的值)和测量技术的发展情况来决定。研究了盾构隧道控制网精度设计包括平面、高程控制测量精度设计,轨道交通沿线布设三等平面和二等水准网,隧道贯通中误差:横向 $\leq \pm 50$ mm、纵向 $\leq \pm 25$ mm [1]。确定测量精度等级、导线边长以及水准点长度、测量仪器、观测量要求等。

通过研究得出隧道的洞外、洞内控制测量设计必须统筹考虑,隧道外测量精度较易控制,可考虑将洞外测量的贯通影响富裕量用于洞内测量设计,隧道控制网的精度设计主要依据隧道长度和控制测量误差引起的贯通误差应限定在规范允许范围内,因此,控制测量设计主要的工作就是隧道贯通误差的计算,横向贯通误差与坐标系统的建立无关。

2. 隧道贯通误差

隧道贯通误差是指隧道施工中,由两相邻开挖洞口的施工中线在贯通面处的偏差。有横向贯通误差、纵向贯通误差和高程贯通误差。

根据现行的《新建铁路工程测量规范》及《城市轨道交通工程测量规范》中有关铁路隧道测量的要求,其贯通误差限差见表1、表2。

Table 1. Tolerance of through error

表 1. 贯通误差的限差

两开挖洞口间长度(km)	<4	4~<8	8~<10	10~<13	13~<17	17~<20
横向贯通限差(mm)	100	150	200	300	400	500
高程贯通限差(mm)				50		

Table 2. Influence value and accuracy requirements of through error
表 2. 贯通误差影响值及精度要求

测量部位	横向中误差(mm)						高程中误差(mm)
	两相向开挖洞口间长度(km)						
	<4	4~<8	8~<10	10~<13	13~<17	17~<20	
洞外	30	45	60	90	120	150	18
洞内	40	60	80	120	160	200	17
总和	50	75	100	150	200	250	25

平面控制主要考虑的是横向贯通误差, 一般将洞外平面控制测量误差作为一个独立误差因素, 将地下两相向开挖的盾构隧道内导线测量误差分别作为一个独立误差因素。按等影响的原则进行贯通误差的计算, 设隧道总的横向贯通中误差为 M_q , 则隧道外平面控制测量引起的贯通中误差为:

$$M_{外}^q = \pm\sqrt{\frac{1}{3}}M_q = \pm 0.58M_q \quad (式 1)$$

隧道内导线测量误差引起的贯通中误差为:

$$M_{内}^q = \pm\sqrt{\frac{2}{3}}M_q = \pm 0.82M_q \quad (式 2)$$

对于高程贯通中误差与隧道长度关系甚微、影响不大, 按表 1 规定, $M_h = \pm 25 \text{ mm}$ 。一般将洞外、隧道内高程控制测量误差各作为一个独立误差因素, 也按等影响的原则进行分配, 则高程控制测量引起的高程贯通中误差为:

$$M_{内}^h = M_{外}^h = \pm\sqrt{\frac{1}{2}}M_h = \pm 0.71M_q \quad (式 3)$$

对于纵向贯通误差, 主要影响隧道中线的长度, 对于一般隧道只要满足定测中线的精度即可, 一般可以忽略。

3. 隧道贯通误差计算方法

3.1. GNSS 测量引起横向贯通误差计算

关于横向贯通误差, 它是是布设盾构隧道平面控制网的一项重要指标, 规范中给出了隧道横向贯通误差的计算公式, 如果已知各控制点的坐标及方差-协方差阵就直接按照公式计算隧道外平面控制网测量误差对横向贯通的影响。

1) 近似估算应按(式 4)计算:

$$M^2 = m_J^2 + m_C^2 + \left(\frac{L_J \cos \theta \times m_{\alpha_J}}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{L_C \cos \varphi \times m_{\alpha_C}}{\rho}\right)^2 \quad (式 4)$$

式中: m_J 、 m_C ——分别为隧道进出口控制点的 Y 坐标误差;

L_J 、 L_C ——分别为隧道口 GNSS 控制点至贯通点的长度;

m_{α_J} 、 m_{α_C} ——分别为进出口控制点联系边的方位中误差;

θ 、 φ ——分别为进出口控制点至贯通点连线与贯通点线路切线的夹角。

2) 严密估算应按(式 5)计算:

$$M^2 = \sigma_{\Delta x}^2 \cos^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta y}^2 \sin^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta x \Delta y} \sin 2\alpha_F \quad (\text{式 5})$$

式中: $\sigma_{\Delta x}$ 、 $\sigma_{\Delta y}$ 、 $\sigma_{\Delta x \Delta y}$ 分别为贯通点 x 、 y 坐标的方差和协方差; α_F 为贯通面的方位角。

从隧道坐标系的各种情况可以看出, 直线隧道其贯通面与 X 轴垂直, 曲线隧道其贯通面与 X 轴并不垂直, 而在组合隧道, 其有些贯通面与 X 轴也不垂直, 因此在推导横向贯通误差的计算公式时应顾及到贯通面与 X 轴不垂直的情况。

如图 1 所示, A 、 D 为进洞控制点并位于中线上, B 、 E 为进洞方位点, P 为贯通面, 隧道工程坐标系为 XAY , 该坐标系顺时针旋转 φ 角建立与贯通面相垂直的坐标系 $X'AY'$, 则由 A 、 D 分别推算 P 点的坐标为:

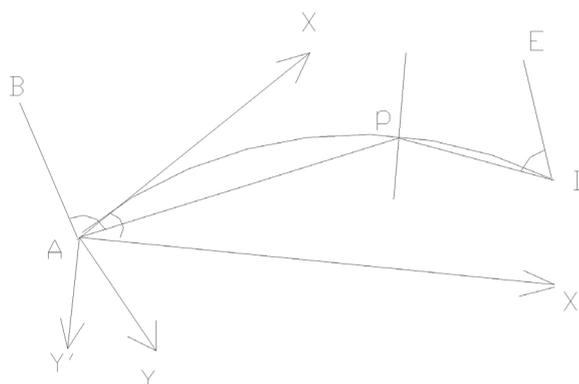


Figure 1. Transverse penetration error
图1. 横向贯通误差

$$X_{PA} = X_A + S_{AP} \cdot \cos \alpha_{AP} \quad (\text{式 6a})$$

$$X_{PD} = X_D + S_{PD} \cdot \cos \alpha_{PD} \quad (\text{式 6b})$$

$$Y_{PA} = Y_A + S_{AP} \cdot \sin \alpha_{AP} \quad (\text{式 6c})$$

$$Y_{PD} = Y_D + S_{PD} \cdot \sin \alpha_{PD} \quad (\text{式 6d})$$

它们的坐标差为:

$$\Delta X_P = X_{PD} - X_{PA} = X_D - X_A + S_{DP} \cdot \cos(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{AP} \cdot \cos(\alpha_{AB} + \beta_A) \quad (\text{式 7a})$$

$$\Delta Y_P = Y_{PD} - Y_{PA} = Y_D - Y_A + S_{DP} \cdot \sin(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{AP} \cdot \sin(\alpha_{AB} + \beta_A) \quad (\text{式 7b})$$

隧道贯通面横向贯通误差为:

$$\Delta P = \cos(90^\circ + \varphi) \cdot \Delta X_P + \sin(90^\circ + \varphi) \cdot \Delta Y_P = -\sin \varphi \cdot \Delta X_P + \cos \varphi \cdot \Delta Y_P \quad (\text{式 8})$$

边长 S_{AP} 、 S_{DP} 和定向角 β_A 、 β_D 的误差放在隧道测量中, 因此有微分式:

$$d(\Delta X_P) = dX_D - dX_A - \Delta Y_{DP} \cdot d\alpha_{DE} + \Delta Y_{AP} \cdot d\alpha_{AB} \quad (\text{式 9a})$$

$$d(\Delta Y_P) = dY_D - dY_A + \Delta X_{DP} \cdot d\alpha_{DE} - \Delta X_{AP} \cdot d\alpha_{AB} \quad (\text{式 9b})$$

$$d(\Delta P) = -\sin \varphi \cdot d(\Delta X_P) + \cos \varphi \cdot d(\Delta Y_P) \quad (\text{式 9c})$$

其中, $d\alpha_{IJ} = a_{IJ} \cdot dX_I + b_{IJ} \cdot dY_I - a_{IJ} \cdot dX_J - b_{IJ} \cdot dY_J$, $a_{IJ} = \sin \alpha_{IJ} / S_{IJ}$, $b_{IJ} = -\cos \alpha_{IJ} / S_{IJ}$ 。

顾及 $\Delta Y_{AP} \cdot \sin \varphi + \Delta X_{AP} \cos \varphi = \Delta X'_{AP}$, $\Delta Y_{DP} \cdot \sin \varphi + \Delta X_{DP} \cos \varphi = \Delta X'_{DP}$
得:

$$d(\Delta P) = f_p^T dX \tag{式 10}$$

其中:

$$dX^T = (dx_A, dy_A, dx_B, dy_B, dx_E, dy_E, dx_D, dy_D)$$

$$f_p^T = (\sin \varphi - a_{AB} \Delta X'_{AP}, -\cos \varphi - b_{AB} \Delta X'_{AP}, a_{AB} \Delta X'_{AP}, b_{AB} \Delta X'_{AP},$$

$$-a_{DE} \Delta X'_{DP}, -b_{DE} \Delta X'_{DP}, -\sin \varphi + a_{DE} \Delta X'_{DP}, \cos \varphi + b_{DE} \Delta X'_{DP})$$

横向贯通中误差为

$$m_p = \pm \sigma_0 (f_p^T Q_{XX} f_p)^{1/2} \tag{式 11}$$

其中, σ_0 为单位权中误差, Q_{xx} 为坐标协因数矩阵。

如考虑由于中央子午线的不同, 投影面高度的不同或者由于 GNSS 基线本身存在系统的尺度误差而产生的投影在隧道坐标系中的 GNSS 网尺度与隧道内测距导线边的尺度存在着差异, 设尺度差异中误差为 m_b/b , 则横向贯通中误差为

$$m_p = \pm \sqrt{m_0^2 f_p^T Q_{xx} f_p + \left(\frac{m_b}{b}\right)^2 (y'_D - y'_A)^2} \tag{式 12}$$

以任一方向 AG 为 X 轴正向建立坐标系, 此时贯通面的坐标及整个网点的坐标、方差协方差都发生变化, 通过程序计算说明此时按(式 12)算出的结果与以 AD 为 X 轴正向的结果是一致的。任意给定贯通面的位置和方位, 通过计算说明起算数据的变化在同样的基准点和基准方位下按(式 12)计算的横向贯通误差结果不变, 证明横向贯通误差与坐标系统的建立无关[2]。

3.2. 常规控制测量引起横向贯通中误差

3.2.1. 三角网、精密导线误差引起的隧道横向贯通中误差计算

考虑到洞内导线按设计等级施测后, 因洞内通视条件的限制及施工等多方面的影响, 而未能按设计路线或方案进行施测, 都要根据已施测的成果对该导线进行精度估算。

1) 近似估算按(式 13)计算:

$$M = \sqrt{m_{y\beta}^2 + m_{yl}^2} \tag{式 13}$$

其中:

$$m_{y\beta} = \frac{m_\beta}{\rho''} \sqrt{\sum R_x^2}, \quad m_{yl} = \frac{m_l}{l} \sqrt{\sum d_y^2}$$

式中: $m_{y\beta}$ ——测角误差影响在贯通面上的横向中误差(mm);

m_{yl} ——测边误差影响在贯通面上的横向中误差(mm);

m_β ——控制网设计的测角中误差(");

R_x ——控制网邻近两洞口连线的一系列测边上的各点至贯通面的垂直距离(m);

m_l/l ——控制网设计的边长相对中误差;

d_y ——控制网邻近隧道两洞口连线的一系列测边在贯通面上投影长度(m)。

例如：一号线东杨区间隧道洞外控制贯通误差，其洞外控制网在三等三角基础上按四等精度导线进行作业，实测的测角中误差 $m_\beta = \pm 0.87''$ ，导线边相对中误差小于 $1/100000$ 。最短边长为 186.896 m ，最长边长为 1145.235 m ，平均边长为 573.39 m ，点位中误差最大 6 mm 。隧道洞外控制测量贯通误差见表 3。

Table 3. Through error of control survey outside the tunnel

表 3. 洞外控制测量贯通误差

点号	各点到贯通面距离		各边在贯通面投影长	
	R_x	R_x^2	d_y	d_y^2
SGK21	620	38400	20	400
SGK25	150	22500		
SGK24	595	354025	144	20736
Σ		760925		21138

代 $m_\beta = \pm 0.867''$ ， $m_l/l = 1/100000$ ， $\rho = 206265''$ ， $\sum R_x^2 = 760925 \text{ m}^2$ ， $\sum d_y^2 = 21138 \text{ m}^2$ 入下式：

$$m = \pm \sqrt{\left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \sum R_x^2 + \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 \sum d_y^2} = \pm 4 \text{ mm} \quad (\text{式 14})$$

2) 严密平差按(式 15)计算：

$$M^2 = \sigma_{\Delta x}^2 \cos^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta y}^2 \sin^2 \alpha_F + \sigma_{\Delta x \Delta y} \sin 2\alpha_F \quad (\text{式 15})$$

式中： $\sigma_{\Delta x}$ 、 $\sigma_{\Delta y}$ 、 $\sigma_{\Delta x \Delta y}$ 分别为贯通点 x 、 y 坐标的方差和协方差； α_F 为贯通面的方位角。

3.2.2. 东杨区间隧道贯通计算

隧道内因测角误差和边长误差影响产生在贯通面上的横向中误差，按《广州轨道交通工程测量管理细则》为 $\pm 30 \text{ mm}$ 。根据区间的设计线路平面图及贯通面位置，结合区间施工的具体情况，竖井测量的方式方法，先在线路平面图上布设洞内平面控制点，量出洞内平面控制点的坐标，计算各平面控制点至贯通面的垂直距离 $R_x (\text{m})$ ，各边在贯通面上的投影长度 $d_y (\text{m})$ 。

1) 测边边长相对中误差 m_l 的确定

测距仪本身精度 m_1 ：

$$m_1 = \sqrt{a^2 + b^2 \cdot s^2} \quad (\text{式 16})$$

对于仪器 TC1610，标称精度($2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$)，取边长为 200 m ，则 $m_1 = \pm 2.4 \text{ mm}$ ；

目标偏心误差所引起的测距中误差 m_2 ，取 $m_2 = \pm 2 \text{ mm}$ ；

仪器对中误差所引起的测距中误差 m_3 ，取 $m_3 = \pm 2 \text{ mm}$ ；

垂直角观测精度 m_A 所引起的测距中误差 m_4 ； $m_4 = h \cdot m_A / \rho$ 。高差、垂直角测角中误差与测距中误差成正比，高差，垂直角中误差逾大，测距中误差也逾大，垂直角观测两测回 m_A 定为 $\pm 3''$ ，则 $m_4 = \pm 0.1 \text{ mm}$ ， $m_4 = \pm 0.2 \text{ mm}$ 。

东杨区间隧道洞外测量贯通误差计算外界影响 m_5 ，考虑 5 个因素影响，外界影响占 $1/\sqrt{5}$ ，取 $m_5 = \pm 2 \text{ mm}$ 。因而有测边中误差 m_l

$$m_l = \pm \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 + m_5^2} = \pm 4.219 \text{ mm} \quad (\text{式 17})$$

取最短边长 $l_{\min} = 50 \text{ m}$ ，则测边边长相对中误差 $m_l/l = 1/11851 = 1/12000$ 。

2) 洞内导线测量测角中误差 m_β 的确定

$$m = \pm \sqrt{\left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \sum R_x^2 + \left(\frac{m_l}{l}\right)^2 \sum d_y^2} \quad (\text{式 18})$$

代 $m_l/l = 1/12000$, $\sum R_x^2$, $\sum d_y^2$, $m = \pm 30 \text{ mm}$ 入上式, 求得洞内导线测量要求的测角中误差 m_β 。东杨区间测量设计见表 4、表 5。

Table 4. Design of traverse survey in the right tunnel of Dongyang section
表 4. 东杨区间右线洞内导线测量设计表

点号	坐标		里程	备注
	X	Y		
1	29049	41044	YDK12 + 805	
2	29068	41122	YDK12 + 890	
3	29103	41280	YDK13 + 038	贯通面里程 YDK13 + 117 贯通面方位 77-00-41
4	29134	41418	YDK13 + 190	
5	29165	41550	YDK13 + 326	曲线要素 $R = 600$ $L_0 = 50$ $\alpha = 12-05-25$
6	29190	41622	YDK13 + 402	
7	29228	41705	YDK13 + 492	曲线起止里程 $ZH = YDK13 + 275.944$ $HZ = YDK13 + 452.553$
8	29268	41788	YDK13 + 585	
9	29138	41894	YDK13 + 700	
10	29738	41895	2#竖井	

Table 5. Design and calculation of survey in the left line tunnel of Dongyang section
表 5. 东杨区间左线洞内测量设计计算

点号	各点到贯通面距离(m)		各边在贯通面投影长(m)	
	R_x	R_x^2	d_y	d_y^2
1	375	140625	0.383	0.147
2	290	84100	0.920	0.846
3	140	19600	0.205	0.042
4	10	100	0.061	0.004
5	145	21025	8.085	65.044
6	222.5	49506	18.972	359.937
7	310	96100	19.347	374.306
8	401.5	161202	25.009	625.450
9	515	265225	58.128	3378.864
10	535	286225		
Σ		1123708		4804.641

代 $m = 0.03 \text{ m}$ 可得:

$$\sum R_x^2 = 1123708 \text{ m}^2, \quad \sum d_y^2 = 4804641 \text{ m}^2$$

代 $\rho = 206265(m_t/l) = 1/12000$ 入下式:

$$m = \pm \sqrt{\left(\frac{m_\beta}{\rho}\right)^2 \sum R_x^2 + \left(\frac{m_t}{l}\right)^2 \sum d_y^2} = \pm 4 \text{ mm} \quad (\text{式 } 19)$$

解得 $m_\beta = \pm 5.73''$ 符合要求。

3.3. 隧道高程贯通中误差计算

隧道洞外、洞内高程控制测量误差产生的高程贯通中误差按(式 20)计算:

$$m_{\Delta h} = \pm m_\Delta \sqrt{L} \quad (\text{式 } 20)$$

式中: m_Δ ——每千米水准测量偶然中误差(mm);

L ——洞外或洞内高程路线长度(km)。

由进、出洞口水准点引进的两水准路线均联测至 E 点上, 这样 E 点就得到两个高程值 H_{JE} 和 H_{CE} , 实际的高程贯通误差为:

$$f = H_{JE} - H_{CE} \quad (\text{式 } 21)$$

3.4. 隧道洞内导线误差引起的横向贯通中误差

如图 2 所示, 隧道洞内导线误差引起的横向贯通中误差, 按(式 22)求得

$$M_{q\text{内}} = \pm \sqrt{M_{\beta\text{内}}^2 + M_{T\text{内}}^2} = \pm \sqrt{\frac{M_{\beta\text{内}}^2}{\rho^2} \sum R_{x\text{内}}^2 + \frac{M_{T\text{内}}^2}{l^2} \sum d_{y\text{内}}^2} \quad (\text{式 } 22)$$

式中: $M_{\beta\text{内}}$ ——导线的测角中误差;

$M_{T\text{内}}$ ——导线的测距中误差;

l ——导线边长;

$\sum R_{x\text{内}}^2$ ——各导线点至贯通面的垂直距离的平方和;

$\sum d_{y\text{内}}^2$ ——各导线边在贯通面上投影长度平方和。

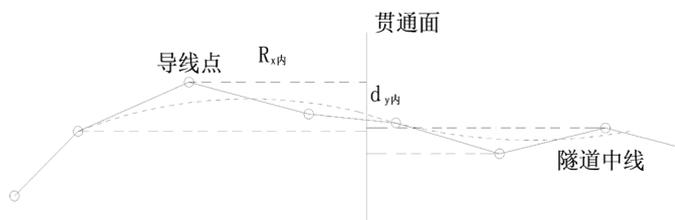


Figure 2. Error diagram of traverse in tunnel

图 2. 隧道洞内导线误差示意

为保证盾构隧道的正确贯通, 根据以往广州地铁贯通测量经验, 测量误差的合理配赋为: 地面控制测量的横向中误差应在 $\pm 25 \text{ mm}$ 之内, 联系测量中误差应在 $\pm 20 \text{ mm}$ 之内[3], 地下导线测量中误差应在 $\pm 30 \text{ mm}$ 之内; 配赋给地面高程控制测量的中误差为 $\pm 16 \text{ mm}$, 向地下传递高程的中误差为 $\pm 10 \text{ mm}$, 地下高程控制测量的中误差为 $\pm 16 \text{ mm}$ 。

3.5. 提高洞内控制测量精度的主要措施

- 1) 严格按方案规定步骤进行观测, 观测中尽量采用三联脚架法, 注意各基座与棱镜、仪器有无隙动、对中偏离是否较大、气泡是否偏离等等, 如果有上述问题就要对仪器进行检修校正, 解决观测问题;
- 2) 导线布设尽量能形成等边直伸型导线, 在隧道内测量环境允许情况下尽可能选长边观测; 隧道每掘进到一定阶段或一定长段时应及时对导线进行复测及精度估算;
- 3) 盾构隧道掘进到足够长度时要及时增设导线点, 指导掘进的临时点要控制在 2~3 个以内, 而且要经常检测其正确性, 确保盾构掘进按设计精度前进, 同时还可以校正盾构导向系统和盾构姿态;
- 4) 进行三角高程测量时, 必须按正确步骤施测, 如垂直角的观测要同测距在同一次照准时完成, 对于三角高程等级在三等或高于三等时一定要提高精度的措施进行观测, 如提高对中精度、隔点设站法等;
- 5) 在隧道贯通面较多时, 要全面检查隧道全部贯通后的轴线误差情况, 对施工隧道内有过矿山法砼衬砌的, 还要对相向挖的两条洞内导线进行联测, 必须做平差处理或贯通误差分配等措施。

4. 小结

本文根据盾构隧道建设经验、隧道运行限界裕量对贯通的精度要求以及 GNSS 定位测量的先进手段等因素, 采用不等精度分配误差原则, 探讨了地面平面控制测量和高程控制侧量的分级布网原则[4], 论证了各级网的精度指标和测量措施等。得出: 地铁地面平面控制网分两级布设。首级 GNSS 网, 最弱点的点位中误差不大于 15 mm, 相邻点的相对点位中误差不大于 10 mm, 二级精密导线, 最弱点的点位中误差不大于 20 mm。相邻点的相对点位中误差不大于 5 mm。高程控制网在城市三等水准基础上。再做一个等级的精密水准, 要求每千米高差中数的偶然中误差不大于 2 mm, 路线往返较差。附和或环线闭合差不大于 ± 8 mm。这些指标是符合实际要求, 已被广州市地铁一号线所施测的 GNSS 网与精密导线实践所验证, 是可靠的。

参考文献

- [1] 铁道部. TB10101-99 新建铁路工程测量规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [2] 姚连璧, 刘大杰, 周全基, 等. 隧道 GPS 网对横向贯通误差的影响[J]. 测绘学报, 1997(3): 207-212.
- [3] 牛学军. 城市地铁盾构施工测量若干问题的探讨[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [4] 于来法. 地下铁道地面控制网布设方案和测量精度设计[J]. 测绘通报, 1996(6): 11-14.