

地下工程贯通精度的优化计算

韩 群 柱

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

〔摘 要〕 针对地下工程水平方向的贯通误差问题,在精度分析中将贯通点看作两个不同的点,得到其方差—协方差阵。通过计算它们的相关误差椭圆确定贯通点的贯通误差结果证明,地下控制网的精度比地面控制网的精度更为重要。

〔关键词〕 地下工程;导线测量;贯通误差;误差椭圆

〔中图分类号〕 P221+.4

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1671-9387(2005)11-0141-04

不管是对铁路、公路工程还是水利工程而言,隧洞建设项目的费用均十分巨大,其施工常常采用两边同时对向掘进施工,或从中部通过竖井进行地下对向开挖施工,而为了保证各相向开挖面能完好地准确贯通,在施工时需要对其轴线进行合理的设计和精度的测量工作^[1~5]。目前,关于隧洞开挖定线的研究很多,但是很少能给出合适的关于贯通精度的计算及优化方法。本文试图通过对地下工程水平方向贯通误差优化计算的研究,以期为提高隧洞贯通的测量精度,以及合理设计制定施工方案提供理论依据。

1 贯通误差的计算

为了说明问题,以图 1 所示的直线隧洞两边同时开挖的情况为例,图 1 中 A, B 为两端开口控制点, P 点为贯通设计点,轴线 AP 和 BP 在 P 点相连,点 P 的位置可由工程设计事前确定,但实际施工中,由于地面控制网和隧洞控制测量误差的影响,由 AP 方向所得到 P 点的实际点位 P' 和由 BP 方向所得到的实际点位 P'' 不相重合。因此,在误差分析中,尽管两者有相同的设计坐标,贯通点 P 应被看作两个不同的点 P' 和 P'' ,如图 2 所示。

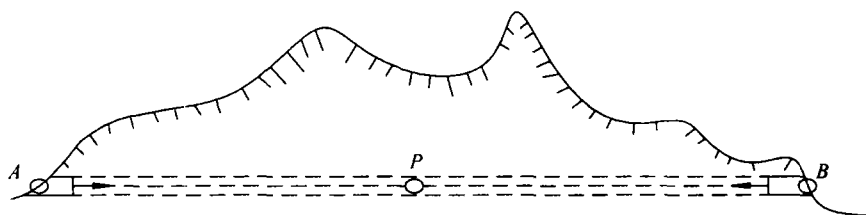


图 1 具有两个相对开挖面的隧道示意图

Fig. 1 Sketch of tunnel with two opposing headings

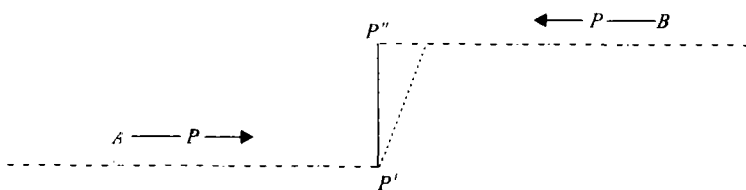


图 2 贯通误差分析示意图

Fig. 2 Sketch of Breakthrough error analysis

〔收稿日期〕 2005-09-09

〔基金项目〕 西安理工大学青年基金项目(210306)

〔作者简介〕 韩群柱(1967—),男,陕西礼泉人,讲师,硕士,主要从事水利水电工程施工及工程测量研究。

为了在应用计算程序进行误差分析时避免产生某些数字问题, P' 和 P'' 的平面设计坐标 x, y 应有较小差异, 在此限制 x, y 的差异均应小于 0.5 m。在图 2 中, $P'P''$ 为总的贯通误差, 其横向分量 e 比纵向分量更为重要。因此, 本文中贯通精度的优化研究主要是对 e 的估计。

1.1 贯通点误差曲线的推求

在测量误差理论中, 利用相对误差曲线(即误差椭圆)^[2]可以较好的表达贯通点在任何方向的相对点位误差。因此, 为了求得点位误差的误差曲线, 首先必需用严密的误差传播定律, 通过连接 P' 和 P'' 的地下或地面控制网推算, 求得 P' 和 P'' 的方差—协方差阵, 误差的估计可以通过参数平差法^[1]求得, 在参数平差法中求得全部参数(未知点坐标)的方差—协方差阵 D_x , 如下式所示。

$$D_x = \delta_0^2 (A^T P A)^{-1}, \quad (1)$$

式中, δ_0 为单位权观测误差估计方差; A 为观测方程(误差方程)系数阵; P 为观测值权矩阵。

就一般情况而言, 隧洞在设计完成之前, 地面控制网已经建立和计算出来。因此, 地面控制网的方差—协方差阵 D_x 在进行贯通分析前就已经得到, 在此情况下, 没有必要把所有观测值考虑在式(1)中, 仅仅需要把已经平差的地面控制网坐标作为观测值考虑在式(1)内, 并求其权阵 P_x :

$$P_x = D_x^{-1}. \quad (2)$$

这样, 将其权阵同地下观测结合起来, 得到同式(1)一样的结果, 但其形式如下:

$$D_x = \delta_0^2 [P_x + (A^T P A)_n]^{-1}. \quad (3)$$

P_x 由地面控制点得到, 这些控制点直接连接地下控制网, 而矩阵 $(A^T P A)_n$ 仅由地下观测测量得到, 这些观测测量连接贯通点与地面控制网。

不管采用式(1)或式(3) D_x 总是相同的, 从 D_x 中可以抽出关于 P' 与 P'' 的子矩阵, 并且计算 P' 和 P'' 相对标准误差椭圆的半长轴与半短轴, 如式(4)所示。

$$D_{x_p} = \begin{bmatrix} \sigma_{x'}^2 & \sigma_{x'y'} & \sigma_{x'x''} & \sigma_{x'y''} \\ \sigma_{x'y'} & \sigma_{y'}^2 & \sigma_{y'x''} & \sigma_{y'y''} \\ \sigma_{x'x''} & \sigma_{y'x''} & \sigma_{x''}^2 & \sigma_{x'y''} \\ \sigma_{x'y''} & \sigma_{y'y''} & \sigma_{x'y''} & \sigma_{y''}^2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$$a^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2 + \sqrt{(\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2)^2 + 4\sigma_{\Delta x \Delta y}^2}),$$

$$b^2 = \frac{1}{2} (\sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_{\Delta y}^2 - \sqrt{(\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2)^2 + 4\sigma_{\Delta x \Delta y}^2}). \quad (5)$$

式中, $\sigma_{\Delta x}^2 = \sigma_{x'}^2 + \sigma_{x''}^2 - 2\sigma_{x'x''}$; $\sigma_{\Delta y}^2 = \sigma_{y'}^2 + \sigma_{y''}^2 - 2\sigma_{y'y''}$;
 $\sigma_{\Delta x \Delta y} = \sigma_{x'y'} - \sigma_{x''y'} - \sigma_{x'y''} + \sigma_{x''y''}$ 。

图 3 给出了相对误差椭圆与相对误差曲线的示意图, 虚线为误差曲线, 实线为误差椭圆。

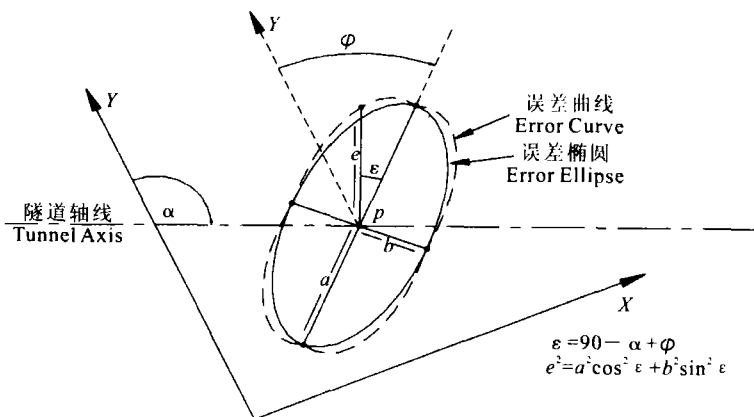


图 3 贯通点 P' 和 P'' 的相对误差椭圆(实线)和相对误差曲线(虚线)

Fig. 3 Relative error ellipse and relative error curve for the breakthrough points P' and P''

1.2 横向贯通分量 e 的计算

由图 3 可知, 相对误差椭圆半长轴的方位角可由下式计算得到^[2]:

$$\tan 2\varphi = \frac{2\sigma_{\Delta x \Delta y}}{\sigma_{\Delta x}^2 - \sigma_{\Delta y}^2}. \quad (6)$$

相对误差椭圆半长轴应是 $P'P''$ 相对位置的最

大期望方差 $\sigma_{\max}$, 在任意方向 ϵ 的方差可由误差椭圆得到, 也可由下式计算

$$\sigma_\epsilon = a^2 \cos^2 \epsilon + b^2 \sin^2 \epsilon. \quad (7)$$

贯通误差 e 可以作为误差曲线在垂直于隧道轴线方向的分量, 即在公式(7)中

$$\epsilon = 90^\circ - \alpha + \varphi. \quad (8)$$

式中, φ 为 P 点的隧道轴线方位角。 σ_e 的计算结果即为 $P'P''$ 相对位置在 e 方向的中误差。

通常贯通误差的限差可取 95% 的概率水平:

$$e_{\max} = e_{95\%} = 1.96e \approx 2e. \quad (9)$$

2 贯通误差的优化分析

从以上计算过程来看,当贯通控制网设计完成后,在测量手段和精度等确定的情况下,可以预求 $e_{\max}$ 。如果得出的 $e_{\max}$ 大于工程所要求的限度,则必须改变工程控制网的设计。这可以通过改变控制网的几何形状或观测手段,从而改变矩阵 A 或者改变权阵 P ,即改变事前估计的测量精度来实现^[2,6]。作为控制网的优化,这个过程应由地面控制网和地下控制网分开进行。这是因为两个控制网的设计及测量手段是互不相同的,有时地面控制网在贯通点最后设计完成之前就已建立。因此,贯通误差由两个不同的方面来计算,即地面控制网的影响 e_g 和地下控制网的影响 e_u ,

$$e^2 = e_g^2 + e_u^2. \quad (10)$$

对应式(10)的方差—协方差阵可写为

$$D_{xp} = (D_{xp})_g + (D_{xp})_u. \quad (11)$$

为了计算贯通点 P 的方差—协方差阵 D_{xp} ,在误差分析时将地下观测值看作无误差的量。如图 4 所示,在由支导线组成的地下控制网中,地下控制网被两个无误差的假定距离 AP 、 BP 及模拟角度(图 4 中 $\angle 3AP$ 、 $\angle 6AP$)来代替,而不是考虑所有的地下观测值,从而节省了计算时间。为了避免这些无误差的量(从而权为无限大)在计算中引起的数字问题,文中给定小误差来代替无误差,如将距离取为 0.1 mm,角度取为 $0''.01$ 。

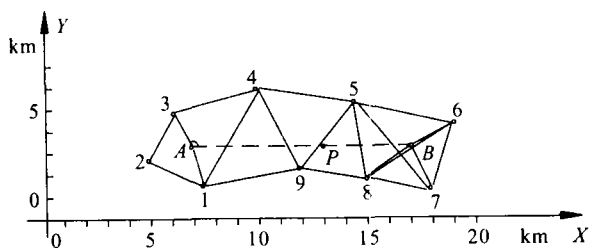


图 4 某隧道平面控制网

Fig. 4 Horizontal control network for a tunnel construction

为了计算地下控制网影响的方差—协方差阵 $(D_{xp})_u$,所有的地下和联结地面的观测值都要考虑在式(1)中,并给予适当的权,所有的地面控制点都被看作已知点且无误差。

对于长而窄的隧道,地下控制网的设计一般无太多的选择,它必须以支导线形式建立起来,从误差传播的角度来看,这是极为不利的。

如果在建设时开挖通风竖井,则根据竖井投影技术^[1,5]通过连接地面控制网的办法可以检查地下导线。但在很多情况下,支导线长达数百米至数千米,且无任何自我约束条件,为了检核常常需要建立二、三级导线^[1]。首先,低级导线布设和隧道开挖一起进行,即施工导线,用其作为开挖过程的连续控制。由于大气折光、灰尘和其他障碍的影响,这种导线边长一般只有几十米,一旦隧道开挖达 1~2 km 以上就要建立更高精度的导线,它能检查施工导线最后点的位置,如有必要,对此点的位置和坐标进行改正,一旦距离很长时,就要建立第三根更高精度的导线,也叫主要导线,边长为 150~800 m^[2],最后对隧洞轴线改正进行计算,并注意改正应来自所有导线的加权平均,而不是把最高级导线作为无误差量,从而使低级导线的改正等于低级导线与高级导线的差值。就支导线的测量来说,所有的角度和距离都要观测,如果隧道是直的,那么导线距离的影响将不影响最后的贯通精度,所以优化过程仅有的选择是只测角度或陀螺方位角或者两者都测^[7]。

如果测量角度 β 和距离 s ,那么导线最后点的方差和协方差阵可通过误差推估公式计算。

$$\begin{aligned} \sigma_{y_n}^2 &= \sigma_\beta^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1})^2 + \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{S_i} \right)^2, \\ \sigma_{x_n}^2 &= \sigma_\beta^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})^2 + \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{S_i} \right)^2, \\ \sigma_{xy}^2 &= -\sigma_\beta^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})(x_i - x_{i-1}) + \\ &\quad \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{S_i^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

这里 σ_β 与 σ_s 为角度和距离的估计方差,如果在每个测站仅观测陀螺方位角及距离,那么方差和协方差阵可通过下式计算^[6,7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{y_n}^2 &= \sigma_\alpha^2 \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i-1})^2 + \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{S_i} \right)^2, \\ \sigma_{x_n}^2 &= \sigma_\alpha^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})^2 + \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{S_i} \right)^2, \\ \sigma_{xy}^2 &= -\sigma_\alpha^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i-1})(x_i - x_{i-1}) + \\ &\quad \sigma_s^2 \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - y_{i-1})(x_i - x_{i-1})}{S_i^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

式中, σ_α 为陀螺方位角的估计方差。

如果既观测了角度又观测了陀螺方位角,则产

生了多余观测,可以用式(1)求方差—协方差阵。

3 实例分析

如图 4 所示,地面控制网是一个边角全测网,测定网中所有的角度和距离,且以最小的约束条件(包括位于地方坐标系中的点与方位角)进行平差。由于这些约束条件是任意的,它的改变不影响贯通精度,该地下控制网包含长约 6 km 和 4 km 的 2 个支导线,它们应在 P 点相遇。

设观测精度为:

距离(地面网与地下网) $\delta_s = (5 \text{ mm})^2 + (3 \times 10^{-6} S)^2$,

方向(地面网) $\sigma_\alpha = 1''$, 角度(地下导线) $\sigma_\beta = 1''$, 2。

由以上分析可得到贯通误差:

在 95% 的概率水平下,地面控制网的影响为 $e_s = 55 \text{ mm}$, 地下控制网的影响为 $e_u = 125 \text{ mm}$, 因此,在 95% 的概率水平下, $e_{\max} = \sqrt{e_s^2 + e_u^2} = 137 \text{ mm}$ 。

由上例可以看出,地下导线的精度比地面控制网精度更为重要。如果地面控制网由导线 A—1—9—8—B 构成,以上面所给的精度观测所有的方向和距离, e_s 的精度将从 55 mm 增加到 88 mm,而总的贯通误差 $e_{\max}$ 仅从 137 mm 增加到 149 mm,增幅小于 10%。上述结果对大部分工程而言是较为典型的。由此可以认为,与地下控制网的影响相比,地面控制网的影响有时是可以忽略不计的。

4 结 论

对于平面控制测量而言,地面上的条件较洞内好,当地下控制网精度未作估算时,地面控制网的设计和测量精度即使要求较高也容易达到,同时地面控制网精度的增幅达不到贯通误差增幅的 1/10。因此,贯通精度的优化必须集中在地下控制网的优化和改进上。陀螺方位角的加测和电磁波测距的联合运用在限制误差累积,提高贯通误差精度,保证地下工程贯通中发挥着越来越重要的作用。

[参考文献]

- [1] 李青岳,陈永奇. 工程测量学(修订版)[M]. 北京:测绘出版社,1995.
- [2] 孔祥云,梅吴义. 控制测量学(上下册)[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996.
- [3] 胡伍生,潘庆林,黄 腾. 土木工程施工测量手册[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [4] 周立吴,张国庆. 矿山测量[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1986.
- [5] 赵吉先,吴良才,周世健. 地下工程测量[M]. 北京:测绘出版社,2005.
- [6] 武汉测绘科技大学测量平差教研室. 测量平差基础[M]. 第 2 版. 北京:测绘出版社,1994.
- [7] 韩群柱,耿宏锁,李 宇. 地下工程导线测量中加侧陀螺方位角的最佳位置研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(12): 111—120.

Optimal calculation of the breakthrough accuracy in traversing of underground engineering

HAN Qun-zhu

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In guide horizontal breakthrough errors of underground engineering, the breakthrough point should be treated as two different points "in the accuracy analysis and the breakthrough error is found from the relative error ellipses calculated for it". Study proves that the accuracy of the underground control measures is much more important than the accuracy of the surface control network, and the basic principle applies to the vertical breakthrough.

Key words: underground engineering; traversing; breakthrough error; error ellipse