

GPS 在隧道工程测量中的应用

邢庭松

(中铁隧道集团三处有限公司 广东乐昌 512205)

摘 要 阐述了隧道 GPS 网数据处理的基本原理和一般过程, 针对隧道控制测量的特点, 通过具体的实例提出了布网原则和方案, 及对影响隧道贯通精度的主要因素进行讨论。同时还涉及到精度评定、GPS 测量的优点等问题, 以及求取贯通误差的内容。

关键词 GPS 网 贯通精度 隧道控制

1 概 况

GPS 全球定位系统, 这一高新技术的出现为解决隧道施工控制测量提供了有力的保障, 近年来在工程测量领域中得到了广泛的应用, 它与传统地面测量相比较, 具有操作简单、灵活、方便, 可达到高的精度, 以及它的网点不需要通视, 对网的要求低; 全天时、全天候观测的优势, 是其它隧道控制测量无法比拟的。随着其价格的降低, 理论的完善, 势必成为将来最有前途的控制形式。

广汕高速公路丰顺莲花山的柚树下、清潭二隧道, 采用 GPS 控制网, 对其两端的 16 个控制点进行测量, 在短短 8 天的工作中得到各基线的数据, 在内业工作中编成了相应的工程处理软件, 对各点进行平差, 求出了各点的方差阵、高斯坐标、独立坐标、方位角及其中误差。以此在此基础上对两个隧道进行横向贯通精度的比较分析, 得出了 GPS 隧道控制点的选点方案, 布网的原则。通过此次 GPS 测量技术的探讨, 进一步说明 GPS 在工程控制测量中的优势, 在将来的工程领域中, 利用其特点将发挥其事半功倍的效果。

2 GPS 在工程测量中的优点

在传统的办法中, 建立隧道施工控制网通常采用三角测量方法, 近几年来又采用精密导

线法。但是, 这些常规方法受到通视条件、图形条件、地形条件等诸多因素的影响。所以, 控制网在选点、布网及观测等诸多过程中受到限制。而隧道一般在山区, 其地形复杂, 采用常规测量办法其难度不难想象。而 GPS 建立隧道控制网时, 由于 GPS 观测不受通视条件限制, 其网形也不像常规控制网那么严格, 故在隧道测量中采用卫星测量是一种有效的办法。

GPS 在测量中的应用, 有如下几个优点:

a. 观测站之间不需要通视。这就减少了测量工作中的经费和时间问题, 同时也使点的选择变得十分灵活。

b. 定位精度高。在小于 50km 的基线上, 其相对精度可以达到 1ppm ~ 2ppm, 随着基线的加长, 其定位相对精度就越高。这样的精度是一般测量手段很难达到的。

c. 观测时间短。目前, 利用经典的静态定位方法, 完成一条基线的相对定位所需要的观测时间, 根据要求的精度不同, 一般为 1h~3h。为了进一步缩短观测时间, 提高作业速度, 近年来发展的短基线(不超过 20km)快速相对定位法, 其观测时间仅需数分钟。

d. GPS 观测成果同时提供了三维坐标。GPS 在精确提供测站点的平面位置的同时, 可以精确测定测站点的大地高程。这就为研究大地水准面的形状和地面点的高程开辟了新途

径。

e. GPS 操作简便,重量轻,体积小。这就为经典测量体系中观测程序复杂、仪器笨重等不利条件提供了解决办法,使得测量人员在很大程度上减轻了劳动强度。

f. GPS 能全天候作业。GPS 在任何地点、任何时间均可以连续观测,一般不受天气条件限制。

g. 可以避免常规测量中需要大量砍伐森林,破坏生态环境等问题。

随着国民经济的发展,交通工程建设发生着日新月异的变化。高等级的工程级别越高长大隧道也就越多,用常规的测量技术已不能适应高标准,而 GPS 具有以上的优势,所以已经广泛地应用在公路、铁路工程中。我集团在秦岭隧道、军都山隧道、云台山隧道、磨沟岭隧道等工程中都成功地运用了 GPS 技术,并且取得了技术成果,为社会带来了巨大的经济效益。

3 GPS 控制网的布设原则

3.1 隧道控制测量的特点

a. 为便于计算施工放样数据,一般采用独立坐标系。

b. 控制网的基线面为某一高程的重力水准面,而非椭球面,因为网的范围较小,实际工作又将控制网的基线面视为平面。

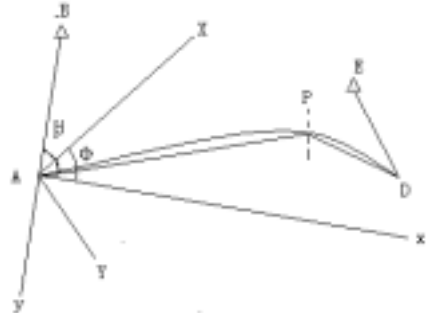
c. 水平角和距离测量均是以垂线为准,而不是以椭球的法线为准。

GPS 控制点布设的原则

a. 为了使 GPS 控制点的坐标与隧道设计坐标取得统一,便于计算施工放样数据,直线隧道的中心线上或曲线隧道的每个切线上,均应布设两个 GPS 控制点;

b. 每一进洞处至少应布设两个相互通视的 GPS 控制点,为安全起见,最好布设三个控制点,各洞的控制点不要求通视;

c. 为消除或减弱垂线偏差对测设方向的



影响,每一进洞处的三个控制点最好位于同一高程面上,在可能的情况下,各洞口控制点之间的高差尽量小一些;

d. 布设的 GPS 控制点满足良好的接收卫星信号的要求;

e. 各洞口投点宜设在便于施工进洞处,并且要尽可能便于 GPS 观测,各洞口点间高差不宜太大,距离以在 300m 左右为宜,严禁出现长度不足 100m 的短边。

f. 对于直线隧道,在隧道中心线上应布设两个 GPS 控制点,以利于建立施工坐标系;对于曲线隧道,在每一切线上应布设两个 GPS 控制点,以便准确求得转折角,计算施工放样数据。

4 隧道横向贯通精度的计算

4.1 通用计算公式

由隧道坐标系的各种情况可以看出,直线隧道贯通面与 x 轴垂直,曲线隧道贯通面与 x 轴不垂直,因此在推导横向贯通误差计算公式时应顾及到贯通面与 x 轴不垂直的情况。

图 1 横向贯通误差

如图 1 所示,A、D 为进洞控制点并位于中心线上,B、E 为进洞方位点,P 为贯通面,隧道工程坐标为 XAY,该坐标系时针旋转 ϕ 角与贯通面相垂直的坐标系 xAy,则由 A、D 分别推算 P 点的坐标为:

$$X_{PA} = X_A + S_{AP} \cos \alpha_{AP} \quad X_{PD}$$

$$= X_D + S_{DP} \cos \alpha_{DP}$$

$$Y_{PA} = Y_A + S_{AP} \sin \alpha_{AP} \quad Y_{PD}$$

$$= Y_D + S_{DP} \sin \alpha_{DP}$$

$$\Delta X_P = X_{PD} - X_{PA}$$

$$= X_D - X_A + S_{DP} \cos(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{AP} \cos(\alpha_{AB} + \beta_A)$$

$$\Delta Y_P = Y_{PD} - Y_{PA}$$

$$= Y_D - Y_A + S_{DP} \sin(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{PA} \sin(\alpha_{AB} + \beta_A) \quad (1)$$

贯通面的横向贯通误差为:

$$P = -\sin\phi \cdot \Delta X_P + \cos\phi \cdot \Delta Y_P \quad (2)$$

微分得:

$$d(\Delta X_P) = dX_{PD} - dX_{PA}$$

$$= dX_D - dX_A + \Delta Y_{PD} \alpha_{DE} + Y_{PA} \alpha_{AB}$$

$$d(\Delta Y_P) = dY_{PD} - dY_{PA}$$

$$= dY_D - dY_A + \Delta X_{PD} \alpha_{DE} - X_{PA} \alpha_{AB}$$

$$dP = -\sin\phi \cdot d(\Delta X_P) + \cos\phi \cdot d(\Delta Y_P) \quad (3)$$

$$dP = f_P^T dX$$

(4)

其中

$$dX^T = (dX_A, dY_A, DX_B, DY_B, DX_E,$$

$$DY_E, DX_D, DY_D)$$

$$f_P^T = (a, b, c, d, e, f, g, h)$$

(5)

$$\text{其中: } a = \sin\phi - \alpha_{AB} \Delta X_{AP}',$$

$$b = -\cos\phi - b_{AB} \Delta X_{AP}',$$

$$c = \alpha_{AB} \Delta X_{AP}',$$

$$d = b_{AB} \Delta X_{AP}',$$

$$e = \alpha_{DE} \Delta X_{DP}',$$

$$f = -b_{DE} \Delta X_{DP}',$$

$$g = -\sin\phi + \alpha_{DE} \Delta X_{DP}',$$

$$h = -\cos\phi + b_{DE} \Delta X_{DP}'$$

因此横向贯通中误差为:

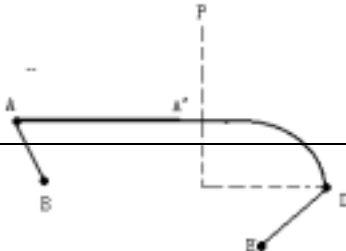
$$m = \pm \delta \cdot \sigma(f_P^T Q_{XX} f_P) \quad 1/2$$

(6)

4.2 横向贯通的近似估算 (见图 2)

图 2 贯通误差的估算

在实际工作中进行严密估算可能会有一些



困难,因而在实际工程中用近似方法较为简易。

A、D 为洞口点, B、E 为进洞定向点。设 GPS 测得 AB、DE 的方位误差为 ma_{AB} 和 ma_{DE} 且相互独立, A、D 边长相对误差为 ma_{AB} / S_{AD} , 则由此引起的贯通面上的横向中误差的计算公式为:

$$m = \pm \sqrt{m_{ya}^2 + m_{ys}^2} \quad (7)$$

$$m_{ya}^2 = (m_{aAD}^2 / P'^2) AAA'^2 + (m_{aDB}^2 / p'^2) \cdot DD'^2$$

$$m_{ys}^2 = (m_{aAD}^2 / S_{AD}^2) \cdot A'D'^2 \quad (8)$$

式中, AA' 为点 A 到贯通面 P 的距离; DD' 为点 D 到贯通面 P 的距离; $A'D'$ 为 AD 在 P 上的投影。

从(7)、(8)式可以看出, 若 AD 与 P 垂直, 则边长误差 M_s 引起的横向误差为零, 贯通误差均由方位误差来引起, 称此类隧道为第一类隧道; 若 AD 不垂直 P, 则贯通误差由边长和方位误差共同引起, 称为第二类隧道。略去边长误差的影响, 并假设贯通位于中间, 近似估算公式可简化为:

$$m_p = K \cdot (s / p'') (m_a / \sqrt{2}) \quad (9)$$

其中 s 是隧道的长度, K 是隧道的精度提高系数, 经过大量的实验证明 K 的变化与隧道的长度有明显的相关性, 隧道越短, 由多次观测引起的定向边方位精度的提高越明显, K 值越小; 反之 K 越大。

4.3 贯通精度的分析

从示意图中我们以桉树下 A1 点和 D4 点做为进洞和出洞的控制点进行分析, 见图 3、表 1。

表 1 桉树下隧道严密贯通值与近算值的比较关系

序号	点位	后视点	点位	后视点	严密贯通 (mm)	近算贯通 (mm)
----	----	-----	----	-----	--------------	--------------

1	A1	N77	D4	D6	29.92	24.62
2	A1	N77	D4	D4-3	29.67	24.93
3	A1	N77	D4	D5	23.12	19.57
4	A1	N77	D4	D8	22.32	18.90
5	A1	N77	D4	S03	24.77	20.37
6	A1	N79	D4	D6	21.69	16.55
7	A1	N79	D4	D4-3	22.03	16.85
8	A1	N79	D4	D5	25.77	22.00
9	A1	N79	D4	D8	24.56	21.10
10	A1	N76	D4	D6	22.82	20.32
11	A1	N76	D4	D5	13.35	13.79
12	A1	N76	D4	D8	11.42	12.69
13*	D8	A1	D4	D5	11.56	12.58
14	N77	A1	D4	D4-3	11.80	12.52
15	N77	N76	D5	S03	13.05	13.45
16	N77	A1	D5	S03	14.95	14.36
17	N77	A1	D5	D4-3	15.89	14.56

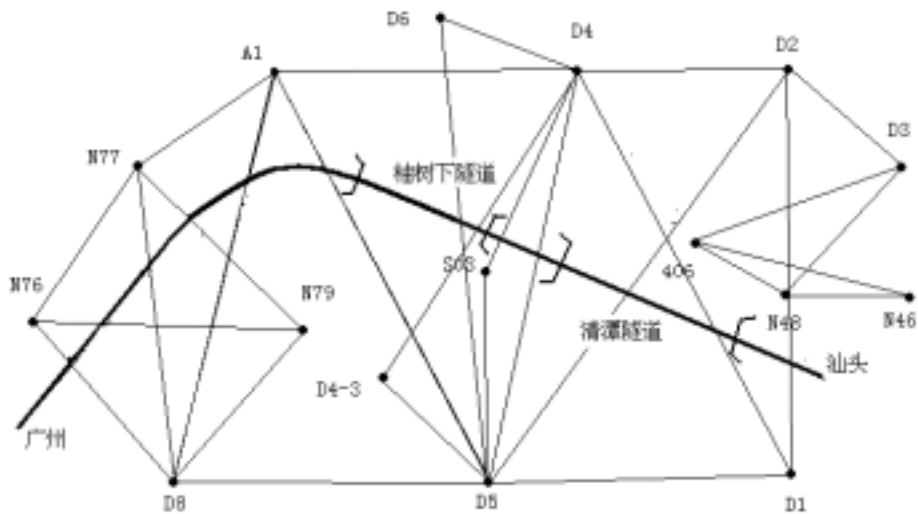


图 3 柚树下、清潭隧道 GPS 示意图

从表中我们可以看出(1)的贯通精度最低,就此问题分析如下:

A1 - N77 的边长为 270.0159m,D4 - D6 边长为 258.4415m 两条定向边长都小于 300m,这一结果的精度为 29.92mm 与上次测的贯通精度 27.3mm(估)相差很小。从表 1 比较来的结

果,进洞定向边 A1 - N76、出洞定向边 D4 - D8 的精度表现的最高(即(12))。在此基础上可得出这样一个结论:洞口应布设 3 个以上相互通视的控制点,由于地形条件的限制,定向的长度不应小于 300 m,方可提高贯通的精度。有了这个结论我们选进洞处最长且能通视的 A1 -

D8(L566.1313m)做进洞定向。

同样的方法到出口, D4 - D8 虽长, 不能通视只好放弃, 实际地面上长边为 D5 - D6 或 D4 - D7, D7 点在施工中已经破坏, D5 - D6 因施工视线受阻, 只能取 D5 - D4(注: D4-3、S03 是在原控制网中加测的两个控制点), 由这样的结果我们计算出其精度为 11.56mm(即 $13''$), 从而进一步证明了先前的结论。

同是一条边(A1-D4)取不同的后视点, 其贯通的精度是不一样的。从 1 与 13 的比较中我们知道它们的贯通值前者为 29.92mm, 后者为 11.56mm, 同样的情况 2 与 14 的贯通值前者为 26.97mm, 后者为 11.50mm, 从这两组数据我们不难推论出: 在观测时有一个点在中线上作为后视, 其精度可以大大的提高。在独立坐标系中可以看出 A1 - N79 与中线的夹角小于 A1 - N77 与中线的夹角, 在相同的条件下, 用 A1 - N79 做进洞边, 比 A1 - N77 做定向边的精度都要高。同理, 从图上可见 A1 - N76 与中线的夹角小于 A1 - N77 与中线的夹角, 在相同的观测条件下 A1 - N77 的精度上又逊色些了, A1 - N76 表现出高的精度。从这个实例中我们不难推出选点时一个点在中线上为测点, 后视点方向上尽量靠扰中线, 与中线呈较小的夹角。

4.4 小 结

a. 定向边大于 300m, 500m 为最合适。因

为当基线边大于 500m 以后, 其边长的相对精度很难再提高;

b. 在选点时以网中中线上的一点为后视点可靠性高;

c. 一个控制点在中线上, GPS 控制点闭合, 靠扰中线, 与中线呈较小的夹角。

根据以上的分析我们可以来估计一下清潭隧道的贯通情况:

边长的长度方面: D4-D4-3 和 D5-D4-3 的距离都是 340m 的范围满足边长大于 300m 的要求;

点位选择方面: D4-3 在隧道的中线上, 这样就要比较 D4-D4-3 和 D5-D4-3 与中线的夹角的大小了, 从示意图我们可以看出 D5-D4-3 与中线的夹角小于 D4-D4-3 与中线的夹角, 故在清潭的进口方向我们选定 D5-D4-3。

同样的方法我们在清潭的出口方面比较各边, D1-D3 是最佳符合分析的边。

故我们可以初步的估计 D5 - D4-3 和 D1-D3 做为清潭隧道的进口、出口的定向边, 贯通误差应会最小。现在我们把这个推论用于清潭隧道指导进洞、出洞定向跟我们预先预料的一样, 最短的边 D2 - 406 呈现的精度最低达到了 43.5mm, 选 D4 - D5、D1 - D3 的精度最高为 11.3mm。清潭隧道各点位的贯通精度见表 2。

表 2 清潭隧道各点位的贯通精度

测点	后视点	测点	后视点	前距(m)	后距(m)	严密贯通(mm)	近似贯通(mm)
D4	D6	D1	406	258.44	462.35	21.32	20.19
D4	D6	D1	D2	258.44	494.79	19.16	18.41
D4	D6	D3	N48	258.44	250.93	22.48	21.46
D4	D6	D3	D2	258.44	346.37	19.59	17.58
D4	D6	D3	D1	258.44	443.47	18.35	16.92
D4	D4-3	D1	406	346.97	462.35	21.40	20.27

D4	D4-3	D1	D2	346.97	494.79	19.25	18.49
D4	D4-3	D3	N48	346.97	250.93	22.55	21.54
D4	D4-3	D3	D2	346.97	346.37	19.68	17.67
D4	D4-3	D3	D1	346.97	443.47	18.44	17.01
D5	S03	D1	406	149.54	462.35	24.51	23.45
D5	S03	D1	D2	149.54	494.79	22.65	21.94
D5	S03	D1	D3	149.54	443.47	20.66	20.32
D5	S03	D3	N48	149.54	250.93	25.52	24.56
D5	S03	D3	D2	149.54	346.37	23.02	21.25
D5	S03	D3	D1	149.54	443.47	21.97	20.70
D5	D4-3	D1	406	344.08	462.35	20.70	19.52
D5	D4-3	D1	D2	344.08	494.79	18.46	17.67
D5	D4-3	D3	N48	344.08	250.93	21.88	20.84
D5	D4-3	D3	D2	344.08	346.37	18.91	16.81
D5	D4-3	D1	D3	344.08	443.47	17.62 *	16.12

在比较中我们看出与预测的效果是一致的, 用 D5-D4-3 和 D1-D3 做定向边的精度最高是 17.62mm, 证明以上我们分析的是可信的。

从小结中的原理我们可以根据其理论对 GPS 布网提出以下的原则:

a. 在隧道选点布网时, 洞口应有二个可以通视的控制点, 从安全方面布设三个控制点为好, 这样可以检验其观测成果, 故在满足条件下控制点尽量的小些, 可以减少工作量和提高工程速度。

b. 定向边的长度应以 300m~500m 为最合适, 最好在中线布设有后视点, 方向上尽量靠近中线, 与中线呈较小的夹角;

c. 控制点应选在同一个平面上, 这样可以消除、减弱垂线偏差的影响。

d. 布点处应有好的接收条件, 高度角大于 15 度。有效卫星 5 个或更多, 时间长 60min 或更长, 几何强度因子(PDOP)大等于 4。

从图 3 上看定向边位于隧道中线的同相和异相对其贯通精度会不会有影响, 就这个问题我们可进一步对隧道的通用公式(4-1)、(4-2)进

行分析。

现在假设 A、D 都在隧道中线上且 $AB \perp AD$ 、 $DE \perp AD$,

$X_D - X_A = S_{隧}$, $Y_D - Y_A = 0$ 旋转角为 0, 故有:

$$P = \Delta Y_P = Y_{PD} - Y_{PA} \\ = Y_D - Y_A + S_{DP} \sin(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{PA} \sin(\alpha_{AB} + \beta_A)$$

如果同相有:

$$P_{同} = 0 + s/2 \cdot \sin(90^\circ - 90^\circ) - s/2 \cdot \sin(90^\circ + 90^\circ) = 0$$

如果异相有:

$$P_{异} = 0 + s/2 \cdot \sin(270^\circ - 90^\circ) - s/2 \cdot \sin(90^\circ + 90^\circ) = 0$$

$P_{同} = P_{异} = 0$ 从这一组特例证明定向边的选择无相关性。

在此基础上我们把旋转角定为 90° , $Y_D - Y_A = S_{隧}$, $X_D - X_A = 0$, 得到:

$$P = -\Delta X_P = X_{PD} - X_{PA} = X_D - X_A + S_{DP} \cos(\alpha_{DE} - \beta_D) - S_{PA} \cos(\alpha_{AB} + \beta_A)$$

同样得出 $P_{同} = P_{异} = 0$ 进一步证明了其无相关性。

从严密贯通精度与估算精度的比较我们还可以发现当严密精度值较小时,估算精度就越来越接近,如果用两条曲线来表示严密精度和估算精度,当在一定条件下估算精度与严密精度势必有点,也就是说在选点条件好的情况下,用估算精度就可以算出其精度。

5 结束语

本文通过阐述 GPS 在工程测量中的优势,浅述了 GPS 控制网布设原则,用具体的数据证明不同布网的贯通精度,进一步论述了 GPS 在隧道控制测量中的可行性,同时对点位位于隧道中线同相、异相时,其对贯通精度的影响作了计算比较,从数据分析中证明其无相关性。

参考文献

- 1 周忠谟,周琪. GPS 卫星测量原理与应用
- 2 陈光金. 隧道 GPS 测量与控制网图形. 工程勘

察, 1994, (4)

- 3 刘大杰, 白征东, 施一民, 沈云中. 大地坐标转换与 GPS 控制网平差计算及软件系统.
- 4 路伯祥, 许提多, 黄丁发, 熊永良, 卓健成, 张项铎. GPS 在铁路隧道平面控制测量中的应用. 铁道学报, 1995 17(2)
- 5 姚连璧, 刘大杰, 周全基, 李文泉. 隧道 GPS 网对向贯通误差的影响. 测绘学报. 1997 年 8 月第 26 卷第 3 期
- 6 姚连璧, 刘大杰, 沈云中, 胡丛玮. 铁路隧道 GPS 网布设的精度分析. 武汉测绘科技大学学报, 1997 22 (2)
- 7 陈新焕. 铁路隧道 GPS 施工控制网的建立

作者简介: 邢庭松, 男, 学士学位, 助理工程师

(收稿日期: 2001 年 5 月)

(上接第 15 页)

d. 当列车在洞顶通过时, 列车动载对围岩变形的影响究竟有多大, 此次虽做了一些测试, 但由于缺少一种能把动载影响分离出来的量化方法, 因而对列车动载影响还未能达到定量的程度, 尚待今后继续探索。

e. 中隔墙法因不能充分利用机械施工, 故进度较慢。据统计, 自 2000 年 9 月至 2001 年 1 月中隔墙法施工终止, 每月完成的成洞数依次为 11.5m、11.5m、33m、54m、74m, 平均月成

洞为 36.8m。如果隧道只是浅埋而没有列车动载, 改用一层台阶的中隔墙法则较为合适机械化施工, 也可能获得较高的进度。

本文部分资料由刘卫铭、刘经熠、杨平、欧林果等同志提供, 特致谢意。

作者简介: 盛仁声, 男, 中铁四局集团技术顾问教授级高工

(收稿日期: 2001 年 10 月)