

# 铁路隧道 GPS 施工控制网的建立

陈新焕\*

(铁道部第一勘测设计院)

**提 要** 本文结合生产和科研工作,介绍铁路隧道 GPS 施工控制网布网设计、观测纲要设计、外业观测、数据处理后的结果精度和 GPS 测量的体会,原则上适用于桥梁施工控制网测量、线路控制测量、航测外控点测量和铁路工程测区国家等级控制点的加密测量。

**主题词** 隧道 GPS 测量

1993年3月至6月,铁道部第一勘测设计院利用GPS全球定位技术建立了西康线秦岭特长隧道的施工控制网(包括平面控制网和高程控制网),完成了秦岭越岭地段国家等级点的加密和初测导线起闭点的测量。其中隧道施工控制网包括平面控制点10个,高程控制点5个(有二个与平面控制点同点位),高程转换试验网10个。全网使用三台Trimble 4000SSE GPS接收机,化费了13个工作日,完成了GPS外业观测、基线矢量处理、外业资料检核和GPS网平差等工作。实践证明,GPS定位测量速度快、精度高,是建立隧道施工控制网的理想方法。

## 1 概述

秦岭特长隧道设计长度近19km,是我国最长的铁路隧道。隧道通过地区地形复杂,如犬牙交错。山势陡峻,相对高差最大达2000米左右。地面80—90%被原始森林覆盖,其中越岭地段为10多公里无人居住区。测区气候变化无常,山头终日云雾缭绕,日夜温差很大。使用常规大地测量方法建立施工控制网,其通视条件、观测条件和后勤供应都相当困难,测量精度要达到《铁路测量技术规则》(以下简称《规则》)规定的Ⅱ等网精度,不但测量周期长,费用高,而且也是非常不容易的。

考虑到GPS全球定位技术具有精度高,不要求相邻点间通视,不受气候条件限制,速度快,费用省,能同时提供定位点的三维信息等优点,参考了国处施测隧道GPS网的经验,经过较充分的技术调研、方案论证和科研工作,我们采用GPS静态定位方法和快速静态定位方法,建立了秦岭特长隧道施工控制网,为我国铁路隧道施工控制网测量提供了首次生产应用实践。

全网平均边长4.1km,最短边190m,最长边18.6km,共观测30条独立基线。为利用GPS高程转换,建立隧道高程控制网,施测Ⅱ等精密水准25.5km。

\* 参加此项工作研究和作业的人员还有铁道部第一勘测设计院的陈光金、王卫民、吴杭舜、陈秀兰、付宏平、李爱文、李春明等同志。本文收稿日期:1995-01-22 陈新焕 高级工程师 铁道部第一勘测设计院勘测处 兰州 邮编:730000

GPS 基线矢量计算和网平差是用厂方提供的 Trimvec Plus (E 版本) 和 GPSurvey (1.0 版本) 两种软件对算。隧道施工坐标和 WGS84 坐标之间的转换、黄海高程和 WGS84 大地高程之间的转换, 使用铁一院研制 SUIDAOSZB 和 FCHG 软件计算。

## 2 GPS 施工控制网的设计

### 2.1 布网方案设计

隧道施工控制网测量的最终目的, 是确定布设在施工中线上的控制点在施工平均高程面内的相对位置和两端洞口水准基点在黄海高程系统中的相对高差, 为隧道施工提供方向控制和高程控制。传统的布网方案所测量的网点中, 仅仅洞口投点和水准基点对施工有直接用途, 大量的过渡点的作用是为了将坐标和高程从一端洞口传递到另一端洞口。GPS 定位技术无需相邻点间通视就可把坐标和高程信息传递过去, 测量大量坐标(或高程)过渡点就没有必要了。因此, 布设 GPS 施工控制网与传统方法布网比较就显得简单得多, 隧道 GPS 施工控制网一般由洞口点群(包含洞口投点和洞口水准基点)所组成的洞口网和两洞之间联系网组成。秦岭特长隧道没有设计辅助导坑, GPS 施工控制网是采用边联式结构将各网点联系起来, 其网形如图 1 所示。

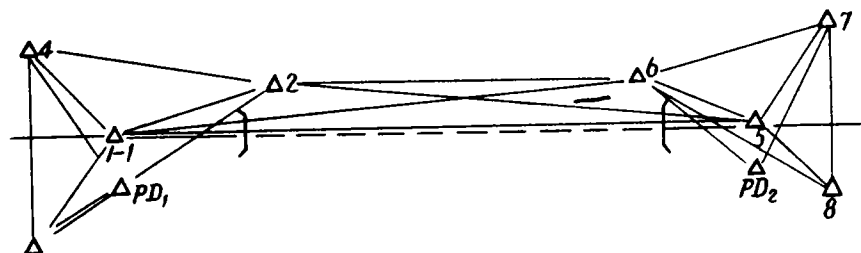


图1 GPS网示意图

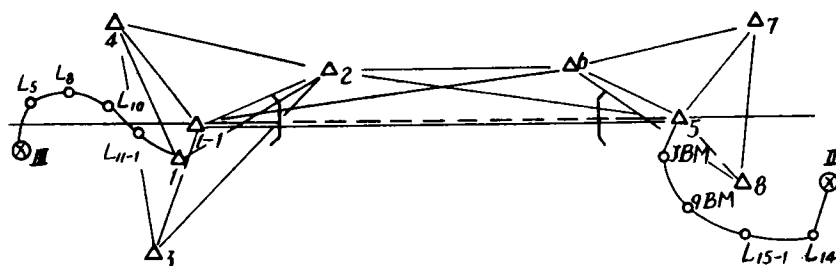


图2 GPS高程控制示意图

隧道高程测量因该地区地形复杂, 绕行水准路线将长达 80—140km, 每公里设站次数将高达 25—50, 要达到 II 等水准精度也是相当困难的。同时, 水准线路多在无人区绕行, 后勤保障难度极大。为了探索利用 GPS 提供的高程信息建立高程控制的方法, 隧道高程控制采用精密几何水准和 GPS 高程转换两种方法建立。即用 II 等精密水准将黄海高程传递到洞口水准基

点,获得两端水准基点之间的间接高差。再利用 GPS 观测值,采用高程转换方法,获得隧道两端水准基点间的 GPS 高差。这两个高差较差在限差(隧道高程贯通中误差两倍)范围内,任何一种高差都可作为隧道高程控制。隧道 GPS 高程控制网的结构如图 2 所示。图中除进、出口各施测一条 GPS 导线,为 GPS 高程转换提供 GPS 和水准同测点外,主体网就是图 1 所示的 GPS 网。

## 2.2 选点要求

从理论上讲,GPS 定位技术可以全天候地在地球任何地方为用户提供三维坐标成果,事实上 GPS 定位精度一定程度上取决于卫星定位信号的顺利接收和采取必要的措施减弱多路径误差对卫星信号的干扰。测绘行业标准《全球定位系统(GPS)测量规范》(以下简称《规范》)就规定了 GPS 定位选点的技术条件。比如,测站视野开阔,视场内障碍物高度角应小于  $15^\circ$ ,点位应离开高压输电线路和远离大功率无线电发射台,应避开强烈干扰卫星信号接收的物体等。但是,铁路隧道一般位于山区和高山区,要选择符合《规范》规定的测站是困难的。特别是洞口投点选择难度最大,因为隧道洞口位置一般山势陡峻且隐蔽,视场内高度角大于  $15^\circ$  的障碍物较多,选的点位既满足施工要求又符合 GPS 测量要求是很不容易的。如何将矛盾着两个方面统一起来,是值得研究的课题。经过论证,秦岭隧道 GPS 网选点的基本原则是:

(1)测站点首先应满足隧道施工测量使用方便;

(2)测站点点位必须考虑点位选择的主要技术条件(例如避开对卫星信号有强烈干扰的无线电信号源),尽可能考虑 GPS 定位的其他技术要求;

(3)点位交通方便,便于机组到达;

(4)GPS 与水准同测点点位应选在隧道所在地区地形变化总趋势上;

(5)如果点位周围有成片高度角大于  $15^\circ$  的障碍物存在,可在选点时测量点位环视图,在时段设计时,用优选同步观测时段的方法解决不满足 GPS 测量技术要求所存在的问题。

## 2.3 观测纲要设计

观测纲要设计的基本要素,是观测时所使用的接收机台数,所采用的作业方式,测区最新星历和点位环视图。秦岭特长隧道 GPS 定位网观测使用接收机 3 台,主体网采用静态定位方式测量,高程试验网采用快速静态方式测定。同步观测时段设计采用 Trimplan 和 GPSurvey 的计划软件完成。主要技术参数是,采用静态定位,PDOP $\leq 8$ ,时段长度 60 分钟至 90 分钟,有效观测卫星个数 $\geq 6$ ,时段数等于 2,数据采样间隔为 15 秒。采用快速静态方式,PDOP $< 7$ ,同步观测卫星数 $> 4$ ,数据采样间隔为 5 秒。经过时段设计,白天晚上都有较好的观测时段可以利用,大多时段集中在白天。考虑到晚上作业,人员的机具的安全问题,GPS 观测均在白天进行。

## 3 GPS 外业测量

GPS 外业观测前,根据时段设计,编制调度命令。秦岭隧道 GPS 定位测量都是严格按照调度命令执行的。主体网每条基线都用 2 个时段测定,联系网边每时段观测 90 分钟,洞口网边每时段 60 分钟。采用快速静态方式观测的时段长度,由快速静态定位软件根据所接收的卫星个数决定,量短 5 分钟,最长 20 分钟。全网共设站 43 次,每个定位点平均设站 2.2 次,所有定位点均进行过重复观测,满足 GPS 定位要重复设站的要求。

4 观测成果检核

秦岭隧道 GPS 施工控制网是我国首次使用 GPS 定位技术建立的隧道控制网,也是我国隧道长度最长的施工控制网。为了保证成果质量,我们对 GPS 接收机和水准仪进行了检定,对 GPS 观测进行了检核。除水准仪检验校正外,其余检定、检核成果如下。

4.1 GPS 接收机天线平均相位中心稳定性检验

检验工作按照《规范》规定的方法,在铁一院基线场上进行。被检机的编号为№1 221、№1 602、№1 231。交换天线前后基线矢量 dx、dy、dz 较差最大值 5mm,小于 C 级网固定误差 10mm,旋转天线方向 90°,交换天线前后基线矢量较差最大值为 6mm,满足 C 级网的要求。

4.2 基线(三角网边)比测

检测工作分别在国家 I 等基线场(含一条 ME5 000 测定的 I 等 EDM 基线)和 II 等网边上进行,检验结果列入表 1。

表 1 GPS 基线比长成果

边 名	等 级	直(间)接边	GPS 边长 (m)	基线(网)边长 (m)	$\Delta S$ (mm)	$\Delta S/S$ (ppm)
杜山—陆岭	I	直(EDM)	4656.1245	4656.1138	+10.7	2.30
吴山—汉化	II	间(网边)	45263.645	45263.6343	+10.7	0.24
01—03	I	直(基线)	257.037	257.036	+1.0	3.89
L4—L7	I	直(基线)	311.611	311.6156	-4.6	14.79
L2—B7	I	直(基线)	479.406	479.4064	-0.4	0.83
李家庄—湖口	城 II	间	12076.292	12076.2809	+11.1	0.92
王庄—李庄	城 II	间	8062.1123	8062.1051	+7.2	0.89
石店—江边	城 II	间	7648.564	7648.5851	-21.1	2.76

注:① $\Sigma S=78654.791$      $\Sigma \Delta S=0.0146$      $\frac{\Sigma \Delta S}{\Sigma S}=0.18PPm$   
②在石店—江边比长测量时,美国正在调整卫星姿态和施加 SA 影响,信号质量较差, $\Delta S$ 较大。

比长结果表明,GPS 所测边长和常规方法所测边长比较,没有明显的差异,说明 GPS 测量没有明显的尺度比。

4.3 GPS 观测方向检测

方向检测工作分别在 II 等网边和 III 等网边上进行。比测的目的是检验 GPS 定位方向和常规方法测量有无明显差异。比测方法是 GPS 定位获得的大地方位角,在不考虑系统转换情况下,归化为坐标方位角,与网边坐标方位角比较。II 等边上的比较结果是 GPS 坐标方位角比常规方法的坐标方位角大 0".39, III 等边上比较结果是 GPS 坐标方位角比已知值小 0".06。这些较差都远小于 II、III 等网的测角中误差,说明 GPS 所测方向与常规方法比较,没有显著的差异。

4.4 控制网环闭合差检验

全网共组合成 15 个闭合环,检验统计结果列入表 2。从统计数字看,GPS 测量的环闭合差  $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$  分量都远远小于 C 级网的限差,环相对闭合差为 C 级网限差的 1/3.5—1/17。

表 2 GPS 网环闭合差检验统计

环 号	环的组成 (环长 S)	闭 合 差 (mm)				$\sigma_S$	ws/s (ppm)	限 值 (ppm)
		dx	dy	dz	限值			
1	1—1.2.5.6 (37415.285)	-20	-15	-7	286	0.026	0.69	13.28
2	1—1.2.5 (37365.902)	-16	+5	+10	328	0.020	0.53	15.17
3	1—1.2.6 (36768.189)	-20	-5	-2	323	0.021	0.56	16.01
4	1—1.5.6 (37386.805)	0	-25	-30	328	0.039	1.04	15.19
5	6.5.2 (36935.338)	+6	+24	+21	324	0.032	0.88	15.19
6	1—1.2.3 (877.679)	-7	0	0	52	0.007	7.97	102.50
7	1—1.3.4 (1025.589)	-5	-4	+14	52	0.015	14.63	88.68
8	1—1.2.4 (900.873)	+6	+18	+14	52	0.024	26.20	101.00
9	2.3.4 (1158.353)	-7	-12	+8	52	0.016	13.84	78.50
10	5.6.7 (997.469)	+17	+4	-20	52	0.026	26.63	91.17
11	5.6.8 (866.160)	0	+8	-13	52	0.015	17.62	104.96
12	6.7.8 (1035.421)	-16	-3	-12	52	0.020	19.54	87.83
13	5.7.8 (505.380)	0	-6	-18	52	0.019	37.57	178.22
14	2.3.PD1 (878.251)	-5	+2	+6	52	0.008	9.18	103.53
15	6.7.PD2 (1032.468)	-8	-4	0	52	0.009	8.66	88.08

#### 4.5 时段较差和重复边检验

这项检验工作共统计了 500m 以内短边 15 条,时段基线长较差在 5mm 以内的有 13 条,其余两条的较差分别为 6mm 和 7mm。C 级网规定较差允许值为 14mm,时段较差均为限差的 1/2 以下。隧道进出口间长边(18.6km 左右)的时段较差量大 13mm,最小 2mm,允许限差 67mm,为限差 1/5 以下。重复观测边互差最大 7mm,为限差的 1/2。

通过检验,秦岭隧道 GPS 定位测量的观测质量是良好的,完全达到了《规范》规定的 C 级网标准。

5 平差结果及精度

5.1 平差结果精度

主体网 WGS84 坐标是以在国家Ⅰ等三角点连续观测 3 个小时的单点定位结果为起始点,用自由网平差来推求的。平差后,GPS 定位点在 WGS84 系统中的坐标精度  $m_x$  最大±3mm 最小±1.7mm; $M_y$  最大±2.6mm,最小±1.8mm; $m_h$ (大地高中误差)最大±7.9mm,最小±5.5mm。平差后方位角精度和边长精度的统计结果列入表 3。

表 3 平差后方位角和边长精度统计

方位误差(″)	边 数	边长误差(mm)	边 数
<1.0	7	<2mm	13
1.0~1.5	6	2~3.0	7
1.5~2.0	2		
>2.0	5		

GPS 定位的边长误差和方位误差均与边的长度密切相关。《规范》规定 GPS 定位点至方位点的距离不应短于 300m,国外 GPS 规范和作业指导书规定不短于 200m。秦岭隧道 GPS 定位网最短边 190m,200m—300m 的边有 4 条,方位角精度大于±2″的 5 条边就是这 5 条边。隧道 GPS 施工控制网布设短边是万不得已的。一方面洞口地形限制,另一方面主要考虑施工测量时,要求洞口与洞口其它点通视。还要考虑一旦洞口投点或其它点被施工破坏,应用常规方法恢复点时,要求所有洞口点间通视,这是隧道 GPS 施工控制网的一个突出特点。

GPS 观测获取的 WGS84 坐标和隧道施工坐标之间的转换是以 WGS84 参考椭球为基础,采用隧道工程椭球,用直接投影转换法获取的。转换后的施工坐标精度列入表 4。

表 4 GPS 网点位误差表

点 号	坐 标 精 度 (mm)		点 号	坐 标 精 度 (mm)	
	mx	my		mx	my
1—1	0	0	02	2	2
05	2	3	03	2	2
PD1	2	2	04	2	2
PD2	3	3	06	2	2
08	3	3	07	3	3

GPS 施工控制网测量对贯通误差的影响是考虑洞口投点的相对横向误差和洞内施工测

量定向边方向误差对贯通的影响估算的。因为洞口投点相对横向误差仅±3mm,地面 GPS 测量对贯通的影响主要是洞内施工测量所使用的定向边方向误差对横向贯通的影响,经估算,隧道横向贯通误差±122mm,小于《测规》±150mm 的规定。

隧道高程控制所使用的 GPS 高程转换是采用高程异常变化梯度非参数回归法推算的。转换后洞口水准基点之间的黄海高差与精密几何水准测得的间接高差的较差为 24.2mm。根据极差等于 2 倍中误差的原理,转换后的 GPS 高差满足隧道高程贯通中误差±18mm 的规定。

5.2 GPS 定位精度与常规测量精度比较

GPS 定位测量的边长误差、方位误差、点位误差用平均值统计。常规测量的精度用《测规》的规定,按理想的网形计算。比较结果列入表 5 和表 6。从统计结果来看出具有精度高和均匀的优点。

表 5 GPS 测量精度统计

项 目	方 位 角 (")	边 长 (mm)	点 位 误 差	
			mx	my
最 大 值	2.57	2.8	3	3
最 小 值	0.03	1.2	2	2
边(点)数	20	20	10	10
$\sigma_0$	±1.31	±2	±2.1	±2.2

表 6 GPS 测量精度与常规方法精度比较

比 较 项 目	方 位 角 (")	边 长 (mm)	点 位 (mm)	高 程 (mm)
GPS $\sigma_0$	±1.31	±2	±2.2	±12
《测规》 $\sigma$	±3.64	±3	±67	±12
$\sigma/\sigma_0$	2.8	15.0	30.0	1.0

注:《测规》规定的  $\sigma$  是误差平均值,点位误差按理想的图形用公式推算。

6 经济效益

根据秦岭地区的地形、植被情况,交通条件,后勤供应和生活条件,安全生产条件。参考我院精密测量工作定额和工资、奖金、津贴的现行标准。依据当地政府关于雇工费和树木青苗赔偿费的有关规定。估算了使用常规测量方法的劳动组织、测量周期和经费支出,并和 GPS 定位测量的实际统计数字比较,其结果列入表 7。GPS 测量工期含精密水准测量在内。

表 7 GPS 测量和常规测量效率、效益比较

测 量 方 法	GPS 测 量	常 规 测 量
劳 动 组 织(人)	10	50
工 期(d)	38天	150
工 天	375	7500
工 时 比	1 : 20	
测 量 费 用(万元)	5	55
费 用 比	1 : 11	

顾及到 GPS 测量精度的提高,特别是考虑到引进接收机的费用,GPS 定位测量与常规测量综合效益之比约为 4 : 1。

7 体会和建议

7.1 布设隧道 GPS 施工控制网的优点:

- (1)减少布网层次,免除大量过渡点(坐标和高程)测量,提高测量精度,节省人力和物力。
- (2)测量精度高且均匀,控制网没有最弱边和最弱点,如果不考虑洞口投点方位误差对贯通横向误差的影响,隧道 GPS 施工控制网测量设计比常规测量简单。
- (3)测量速度快,费用省,观测工作劳动强度低。

7.2 布设隧道 GPS 施工控制网应注意的问题

- (1)定位点选择和网形结构
- 测站选择应首先考虑 GPS 定位测量对环境主要条件的要求和隧道施工测量对点位的要求,包括点位周围不应有高压输电线,不应有对卫星信号传输有强烈干扰的大功率无线电发射源,点位应便于使用常规测量方法进行控制点加密和向洞内引测方向等。而对一些次要条件,如点周围不应有高度角大于 15°的成片障碍物存在,可以放宽要求。如果对空视场内存在障碍物阻挡信号接收,可留待同步观测时段设计时妥善解决。

隧道 GPS 网的结构设计宜采用边联式,以便形成更多的独立观测闭合环,检核观测质量。

- (2)最短边限制
- GPS 测量精度除受观测时间长短、网形结构、卫星信号质量和卫星轨道精度影响外,测边的长短也直接影响基线的长度和方位精度。《规范》规定,GPS 点至方位点的距离不应小于 300m。考虑到铁路测量的特点,相邻 GPS 点间的距离一般不短于 300m,困难时不应短于 200m。

- (3)信号质量
- 美国政府为了限制军事目的精密定位,对卫星信号施加了 SA 和 AS 影响,人为地降低了定位精度和限制 P 码定位的应用。我们在进行 GPS 定位测量时,应特别注意卫星信号的质量,在美国调整卫星姿态或进行某种试验时(如加 SA 或加 AS),应停止定位测量。网起始点的



GPS 测量特别应选择卫星信号质量稳定时进行。

(4) 调度命令

编制 GPS 定位的调度命令应严密, 生产调度应严格, 观测机组应根据调度命令开机、关机, 不然将贻误工作, 造成损失。

(5) 后勤保障

GPS 定位测量的高速度和效率依靠现代化的交通工具和通讯设备来保证。隧道 GPS 定位至少需配备两辆八座越野车和 3 台通讯距离不短于 50km 的电台, 以保证交通和通讯联络。

秦岭隧道 GPS 施工控制网测量是我们进行的第一次大型工程项目的 GPS 测量, 许多技术问题是我们在实践中探索的结果, 仅供进行铁路 GPS 定位测量时参考。

## SET UP GPS CONTROL NETWORK FOR CONSTRUCTING PAIL-WAY TUNNELS

Chen Xinhuan

Survey Dept., First Survey and Design Institute of MOR, Lanzhou 730000

**Abstract** Combined with the engineering and scientific research works, this paper introduces the design of the GPS control network for tunnel construction, the design of surveying programme, field surveying works, accuracy of data-processing results and the experience of GPS surveying. The principles are applicable for surveying the bridge construction control network, the track control surveying, surveying the field control points of aerial survey, surveying on enlarging the national-class control points in the railway engineering surveying area, etc.

**Keywords** tunnel; GPS; surveying

### 技术市场存在的五个问题

国家科委技术市场办公室, 最近对国内技术市场的发展现状及前景进行了一次全面评定。从评定的结果看, 目前有五大问题亟待解决。

1. 对应属国家拥有专利技术和非专利技术要予以保护, 不能轻易流失。一些人参与了国家项目的研究, 离开原单位后又将此技术作为个人成果任意进行转让, 是不允许的。
2. 要善于运用契约对技术活动进行法律上的调整 and 限制, 凡属职务内或保密的项目, 进行外汇和转让都是非法的。
3. 对技术市场要加强交易管理, 要实行登记制, 否则交易无效。
4. 在签订合同时, 应考虑所订条款在法律上是否有效, 是否侵犯第三者的利益。
5. 企业购买了不成熟的技术, 在签订合同时, 责、权、利又不清, 会后患无穷。

(张 红)