

深圳地铁三号线 GPS 平面控制网建立及精度分析

王国祥

(铁道第二勘察设计院, 四川成都, 610031)

[摘要] 本文全面介绍了深圳地铁三号线 GPS 平面控制网的布设方案, 包括 GPS 控制网技术设计、外业观测、基线向量解算、控制网平差及精度分析和可靠性检验等。同时对地铁 GPS 平面控制网建立的有关问题提出一些建议。

[关键词] 基线向量解算; 网平差; 精度分析; 可靠性检验

测绘信息网 <http://www.othermap.com> 网友测绘人提供

Construction of GPS Control Net and Precision Analysis of the Shenzhen Metro Line 3

WANG Guo-xiang

(The Second Survey & Design Institute of China Railways, Chengdu 610031, China)

Abstract: This article introduces the plan of the Shenzhen metro line 3 overall, including GPS control net design, field observation, baseline vector procession, control net adjustment and precision analysis and reliability test etc. And at the same time, some suggestions on some problems relative to the construction of GPS control net of the metro were proposed.

Key words: baseline vector procession; net adjustment; precision analysis; reliability test

1 工程与测区概况

深圳地铁三号线工程初期建设线路起自红岭中路站, 止于龙兴街站, 沿线所经区域有罗湖区的东门、水贝、布心片区, 龙岗区布吉镇、横岗镇、龙岗中心城及龙岗镇。正线全长 32.91km, 其中地下线长 6.92km, 高架线长 25.71km。全线共设 21 个车站和 1 个车辆段, 其中红岭中路站至布心站 6 个车站为地下站, 布吉联检站至龙兴街站 14 个车站为高架站, 塘坑站为半地下站。该项目全线位于特区内, 特别是地下线部分红岭中路—老街—东门中路三站两区从东门老街商业繁华地带穿过, 高楼林立、街道狭窄、交通繁忙、城市无线电干扰严重, 给 GPS 测量带来困难。

2 GPS 控制网设计

2.1 布网原则

本项目 GPS 控制网根据《地下铁道、轻轨交通工程测量规范》、《城市测量规范》以及《全球定位系统城市测量技术规程》中相关技术要求布网。GPS 网沿地铁线路呈带状分布, 采用边连接形式构网, 由多个同步大地四边形或三角网组成, 网内重合了 4 个城市二等控制点, 并对包括重合点在内的控制网进行长边大地四边形观测, 以便对整网进行长度基准控制。GPS 控制网由非同步独立观测边构成闭合环或附合路线, 每个闭合环或附合路线中的

边数不大于 6 条。

2.2 选点与埋石

根据布网原则和现场实际情况, 沿线路每隔 2km 左右布设一对相互通视的 GPS 点, 为保证精密导线联测需要每个 GPS 点至少与两个相邻 GPS 点通视, 每对 GPS 点边长 800~2000m。GPS 点均选在利于保存、便于施测的建筑物顶面, 点位视野开阔, 远离高压输电线和无线电发射装置。

2.3 主要技术指标

依据《地下铁道、轻轨交通工程测量规范》的技术要求, 本项目 GPS 控制网按 GPS C 级网施测。最弱点位中误差不大于 12mm, 相邻点相对点位中误差不大于 10mm, 最弱边相对中误差不大于 1/9 万, 与原有控制点的坐标较差不大于 50mm。

3 外业观测

GPS 控制网采用 6 台 Trimble 5700 双频 (标称精度为 $\pm 5\text{mm} + 1\text{ppm}$) 接收机作业。GPS 测量作业前, 接收机在一般检视和通电检验后, 还进行了 GPS 接收机内部噪声水平测试和接收机天线平均相位中心稳定性检验, 并对基座光学对中器和卷尺进行检校。根据编制的 GPS 卫星可见性预报表及卫星的几何图形强度 (其 PDOP 值不应大于 6), 选择最佳观测时段。

观测时按相对静态定位模式进行观测, 每条边

观测时段 ≥ 2 ，每个观测时段长度 $\geq 90\text{min}$ ，卫星高度角 $\geq 15^\circ$ ，天线整平对中误差 $\leq 1\text{mm}$ 。每时段观测前后各量取天线高一次，两次量测值互差 $\leq 3\text{mm}$ ，并取平均值作为最后天线高。

全网共联测 4 个原有城市二等控制点（II 27 海岭、II 32 红花顶、II 37 求水坳、II 82 深勘大厦）、1 个城市三等控制点（III 526 植物园）共 5 个

重合点以及新布设的 32 个 GPS 点。观测时除对 GPS 控制网内短边未知点进行构网观测，全线还选择 7 个 GPS 控制点（GPS04、GPS06、GPS21、GPS23、GPS27、GPS30、GPS32）和 5 个重合点构成长边图形观测，保证了 GPS 网的精度均匀及减少了尺度比的误差影响。深圳市地铁 3 号线 GPS 控制网联测图如图 1。

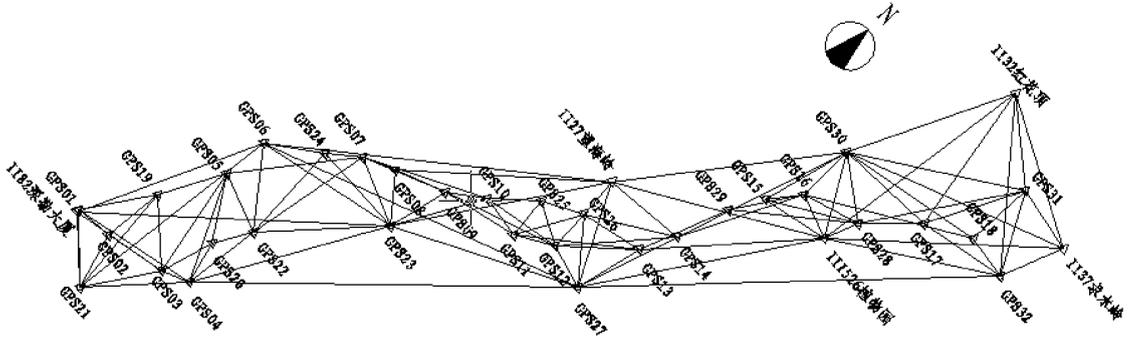


图 1

4 基线向量解算

4.1 基线向量解算

基线向量解算是利用二个或多个测站的 GPS 同步载波相位观测值确定测站之间坐标差的过程。本项目采用 Trimble 随机软件 TGO1.62 按静态相对定位模式解算，基线解算采用卫星广播星历坐标作为基线解的起算数据。因测区处于经济发达地区，城市无线电信号强烈，再加上太阳等天体辐射影响，GPS 信号通过电离层时，传播路径和传播速度会发生变化，从而影响 GPS 卫星至地面接收机之间的观测距离，若不加以仔细改正，会严重损害 GPS 观测值精度。本项目在施测时利用多台 GPS 双频接收机进行同步观测，并在基线解算时通过高级参数设置，利用 TGO 电离层改正模型对大于 4km 的基线进行电离层改正。电离层改正模型考虑了折射率中的高阶项以及地磁场的影响，并且沿着信号传播路径进行积分，通过基线解算精度比较，加入改正模型后的精度均优于 2mm，可显著提高基线向量解算观测值水平和垂直精度。

4.2 基线向量质量控制与精度分析

基线向量质量控制是为了后续数据处理分析提供合格的基线向量结果。对基线向量质量可根据以下基线解算指标进行控制：

4.2.1 相对指标

(1) 单位权方差因子即参考因子；(2) 观测值的 RMS 即观测值残差的均方根，RMS 值越小越好；(3) 数据删除率，数据删除率越高说明观测值质量越差；(4) 比率 RATIO，它反映了所确定的整周未知数参数的可靠性，该值越大，可靠性越高，它主要与观测时卫星星座的数量和几何分布图形有关；(5) 卫星强度因子 RDOP，它的值的大小与观测时间段有关。以上五个指标均在一定程度上反映观测值质量的优劣，但还无法判定基线解算质量是否合格。

4.2.2 半相对半绝对指标

同步环闭合差，从理论上讲同步观测基线间具有一定内在联系，闭合差三维向量总和应该为 0。但在实践中只要数学模型正确，数据处理无误，即使观测值质量不好，同步环闭合差也有可能非常小。当同步环闭合差超限，则能说明闭合环中至少有一条基线向量有问题，但当闭合差不超限时也不能说明环中所有基线质量均合格。

4.2.3 绝对质量指标

4.2.3.1 异步环闭合差

当异步环闭合差满足限差要求，说明组成异步环的所有基线解算质量均合格。深圳地铁三号线 GPS 控制网基线向量异步环闭合差统计见表 1。

表1 异步环闭合差统计

| 闭合环个数 | 三维向量闭合差 W (mm) | | | | 闭合差相对中误差 S/W | | |
|-------|----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------------------|-----------------------|
| | W ≤ 10 | 10 < W ≤ 20 | 20 < W ≤ 30 | 30 < W ≤ 40 | S/W ≤ 1/100 万 | 1/100 万 < S/W ≤ 1/40 万 | 1/40 万 < S/W ≤ 1/25 万 |
| 167 | 85 | 61 | 20 | 1 | 76 | 79 | 12 |

基线向量异步环闭合差限差为 $W \leq 2\sqrt{3n}\sigma$ (σ 为基线向量的弦长中误差 (mm), $n = 3$), 可见本项目基线向量所有异步环闭合差均满足限差要求。

4.2.3.2 重复观测基线较差指不同的观测时段对同一条基线进行重复观测的观测值间的差异, 当其

表2 重复观测基线较差统计

| 重复观测基线数 | 重复观测基线较差 ds (mm) | | | |
|---------|------------------|------------|------------|--------|
| | ds ≤ 2 | 2 < ds ≤ 5 | 5 < ds ≤ 8 | ds > 8 |
| 33 | 17 | 15 | 1 | 0 |

重复观测基线向量较差限差为 $ds \leq 2\sqrt{2}\sigma$ mm。以上统计表明: 本项目所有重复观测基线向量较差均满足规范限差要求, 即 GPS 控制网中所有基线向量解算均合格, 基线解算成果可靠。

影响基线向量解算的因素很多, 很复杂, 对于基线向量解算质量好坏的判定比较简单和实用的方法是条件允许时利用全站仪重复观测基线, 看能否满足重复观测基线较差的限差要求。

5 控制网平差及精度分析

GPS 控制网平差包括三维无约束平差和二维约束平差, 平差数据采用基线向量的双差固定解进行。网平差和坐标转换均利用西南交通大学研制的 XJGPS 商用软件, 以 II 27 望海岭的 WGS - 84 系的三维坐标作为起算数据, 在 WGS - 84 坐标系中进行三维无约束平差, 以检定基线向量网自身的内符合精度及其系统误差和粗差。经三维无约束平差计算, 基线向量网中最弱边相对中误差为 II 37 ~ GPS31: 1/ 611744; 最大方位角中误差为 II 37 ~ GPS31: 0. 31"; 最弱点点位中误差为 II 37:

表3 已知坐标值与约束坐标值较差

| 点名 | 已知坐标值 | | GPS 约束坐标值 | | 坐标较差 | | 点位较差 (mm) |
|---------|------------|-------------|------------|-------------|---------|---------|-----------|
| | X (m) | Y (m) | X (m) | Y (m) | ΔX (mm) | ΔY (mm) | |
| II 27 | 32964. 556 | 129215. 303 | 32964. 567 | 129215. 308 | 11 | 5 | 12 |
| II 32 | 44064. 522 | 135740. 635 | 44064. 522 | 135740. 622 | 0 | -13 | 13 |
| III 526 | 36611. 724 | 135017. 280 | 36611. 701 | 135017. 285 | -23 | 5 | 24 |

从表 3 中可看出已知点间具有较高的相对精度, 满足与原有控制点的坐标较差 < 50mm 限差要求。因此, 采用 II 27 望海岭、II 32 红花顶、II 37

满足限差要求时说明基线向量解算是合格的, 当不满足时则说明至少有一个时段观测的基线有问题, 这条基线可通过多条复测基线来判定哪个时段的基线观测值有问题。深圳地铁三号线 GPS 控制网重复观测基线较差统计见表 2。

0. 55cm。经统计所有基线向量改正数的绝对值均满足《地下铁道、轻轨交通工程测量规范》中限差要求。三维无约束平差计算通过后, 再以已知深圳城市控制点的城市平面直角坐标对基线网进行边长和方位角约束平差, 并将 GPS 平面控制点的 WGS - 84 坐标转换为深圳城市平面直角坐标, 即得到 GPS 平面控制网中各点的坐标成果。经二维约束平差计算, GPS 控制网最弱边相对中误差为 II 37 ~ GPS31: 1/3450874; 最大方位角中误差为 II 37 ~ GPS31: 0. 05"; 最弱点点位中误差为 GPS31: 0. 08cm。通过以上数据分析, 全网共 32 个新设点, 点位中误差均小于限差 ± 12mm 精度要求, 同时也满足最弱边相对中误差 1/9 万的精度要求。

6 已知点可靠性检验

在二维约束平差前要对已知点可靠性进行检验, 以确保所采用的已知点的正确性。先以 II 37 求水坳、II 82 深勘大厦为已知点进行二维约束平差, 对其它已知点的坐标进行比较。已知点坐标与未知点二维约束平差坐标间较差如表 3。

求水坳、II 82 深勘大厦 4 个二等城市控制点对整个 GPS 平面控制网进行二维约束平差, 保证了约束坐标的正确性和高精度。

7 结束语

(1) 地铁 GPS 控制网应采用边连接形式构网, 由多个同步大地四边形或三角网组成, 并要对包括重合点在内的控制网进行长边大地四边形观测, 以便对整网进行长度基准控制。

(2) GPS 基线向量的解算非常重要。要加强基线解算质量控制, 严格用异步环闭合差和重复观测基线较差两个绝对质量指标来判定基线解算质量。

(3) 影响基线解算质量的原因较多, 但最基本的是观测条件, 即观测点位置和观测时段。观测点位置主要考虑多路径效应的影响及无线电干扰, 选点时应尽量避开高大建筑物、大面积水域及远离高压输电线和无线电发射装置; 观测时段主要根据卫星星历预报图和卫星星座相对测区的几何分布, 选择最佳观测时间。

(4) 在城市中进行高精度 GPS 控制测量, 为减小电离层对基线解算的影响, 在施测时可利用多台 GPS 双频接收机进行同步观测, 并在基线解算时利用 TGO 电离层改正模型对长基线进行电离层改正。通过本项目基线解算精度比较, 加入改正模型后的精度均优于 2mm, 可显著提高观测值基线向量解算精度。

(5) 对高精度的 GPS 控制网重复基线观测非常

重要, 控制网中骨干网点应重复观测, 重复观测次数 ≥ 2 , 通过多条重复观测基线可直接判定基线解算质量和整个基线向量网的好坏。

(6) 在二维约束平差前应对已知点进行可靠性检验, 对参与约束平差的已知点进行分析和筛选, 选择正确而且精度较高的已知点进行二维约束平差, 以免利用了错误或精度较低的已知点影响整个 GPS 控制网的最终成果。

参考文献

- [1] 徐绍铨, 等. GPS 测量原理及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [2] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [3] 魏二虎, 黄劲松. GPS 测量操作与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [4] GB50308—1999, 地下铁道、轻轨交通工程测量规范 [S].

[收稿日期] 2006-01-12

[作者简介] 王国祥 (1973-), 男, 1996 年毕业于西南交通大学航空摄影测量与遥感专业, 学士, 工程师。

(上接第 158 页)

- based on additional contextual information - first experience [A]. In: International association for primate refuges and sanctuaries [c].
- [2] Schyns PG, Goldstone RL, Thibaut JP. The development of features in object concepts [J]. Behavior and Brain Sciences, 1998, 21, (1): 1~54.
 - [3] 丰茂森. 遥感图像数字处理 [M]. 北京: 地质出版社, 1992.
 - [4] 李艳, 彭嘉雄. 港口目标特征提取与识别 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29, (6): 10~12.
 - [5] 明冬萍, 骆剑承, 周成虎, 等. 高分辨率遥感影像信息提取及块状基元特征提取研究 [J]. 数据采集与处理, 2005, (1): 22~28.
 - [6] 鲁学军, 王钦敏, 明冬萍, 等. 空间特征在遥感影像分析中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2004, 9, (6): 737~743.
 - [7] 崔林丽, 唐娉, 赵忠明, 等. 一种基于对象和多种特征整合的分类识别方法研究 [J]. 遥感学报, 2006,

10, (1): 104~110.

- [8] 牟凤云, 朱博勤, 贺华中. 基于多特征的高分辨率遥感图像分析 [J]. 测绘通报, 2004 (10): 4~6.
- [9] 林辉, 李际平, 莫登奎. QuickBird 卫星图像信息识别 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10, (10): 1504~1510.
- [10] 德国 defiens image 公司开发的图像分析软件 [Z].
- [11] 王耀南, 李树涛, 毛建旭. 计算机图像处理与识别技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [12] eCognition user guide [Z]. <http://www.definiens-imaging.com/down/trial.htm>, 2004.
- [13] 孙即祥, 等. 模式识别中的特征提取与计算机视觉不变量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[收稿日期] 2006-04-23

[作者简介] 王俊芳 (1978-), 女, 硕士研究生。主要从事 3S 技术在数字国土中的应用研究。