

基于GPS定位原理的轨道外部几何参数测量系统

傅勤毅, 刘芝平, 李焜武

中南大学交通运输工程学院, 长沙 410083

摘要 利用GPS定位全天候、高效率、低成本的特性,设计一种新型的轨道外部几何参数测量系统。该系统由卫星系统、加载接收机的轨检仪、控制网和GPRS发射站组成。测量前,先构建边连式同步图形扩展式带状轨道监测控制网,并在现有的轨检仪上加载GPS接收机。测量过程中,轨检仪沿轨道运动:GPS控制网中4个GPS基站与轨检仪上GPS流动站实时采集定位信息;定位信息经双差处理和整周模糊度解算后,得到RTK(real-time kinematic)观测量,确立轨道中心线;结合轨检小车测出的轨道内部几何参数和轨道中心线,解算出轨道高程。静态实验与外场试验结果表明:该测量系统自动化程度较高,静态观测误差在0.5 mm以内,动态误差在15 mm以内,完全能够满足轨道外部几何参数高精度测量的要求。

关键词 GPS;轨道外部几何参数;控制网;外场试验

中图分类号 U216.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.31.004

An External Railway Geometric Parameter Measurement System Based on GPS

FU Qinyi, LIU Zhiping, LI Kunwu

School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract An external geometric parameter measuring system is designed using the GPS positioning technology. The traditional track inspection technology and GPS positioning technology are combined into the system. The system is composed of a four-component-satellite system, track inspection apparatus carrying a receiver, control network and GPRS station. The track observation network is built at first while GPS base stations are already set up. At the same time, the GPS receiver is loaded on the existing track inspection instrument as a moving station. The data acquisition module of the measurement system consists of GPS base stations and a moving station. Then, real-time location information is collected by the GPS stations while the track inspection instrument walks along the track. The positioning data are processed by the double differencing carrier phase algorithm. The integer ambiguity resolution based on LAMBDA (the least-squares ambiguity decorrelation adjust method) is the key problem of the GPS positioning. Next, the position of the antenna center is calculated. Finally, using internal geometric parameters and antenna center positioning data, the external railway geometric parameters are calculated. The results of the static experiment and field test confirm the validity of the measurement system. On the one hand, the static observation error is within 0.5 mm while the dynamic measurement error is less than 15 mm, on the other hand the labor cost of the system is low due to high automation.

Keywords GPS; external railway geometric parameters; control network; field test

收稿日期:2014-04-17;修回日期:2014-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50975789,51275531)

作者简介:傅勤毅,教授,研究方向为轨道检测、故障诊断,电子邮箱:978891375@qq.com;刘芝平,硕士研究生(共同第一作者),研究方向为轨道检测、数字信号滤波,电子邮箱:18874865947@163.com

引用格式:傅勤毅,刘芝平,李焜武.基于GPS定位原理的轨道外部几何参数测量系统[J].科技导报,2014,32(31):41-45.

随着中国铁路事业的飞速发展,列车速度不断提升,重载列车持续增多,钢轨的各种磨损和线路的几何尺寸的变化急速增加,引发轮轨动力作用增大,可能导致机车车辆冲击、摇晃、甚至脱轨等重大安全事故^[1-3]。因此,在铁路铺设和日常维检过程中,高精度的轨道几何参数测量在保证列车运营安全、提升轨道使用寿命方面显得尤为重要^[4]。

目前应用较多的轨道几何参数测量设备主要包括:1) 轨道综合检测车。国外比较典型的有 East-i 和阿基米德等,国内常用的轨检车有 GJ-3、GJ-4、GJ-5 型^[5],可以测量铁路线路的平顺性数据,但价格昂贵,轨道不平顺原因难以明确且里程误差随着时间的增长而累积。2) 轨检仪。国外比较著名的有德国 Sinning 公司生产的 GEDO CE 轨检仪和瑞士 Amberg 公司研发的 GRP 系列轨检仪,国内具有代表性的轨检仪为江西日月明公司的 GJY-H-5 轨检仪、成都瑞邦研发的 SGJ-T-RB-1 型客运专线几何状态测量仪等^[6,7],测量数据较精确,但均存在成本高、效率低的缺陷。

GPS 定位具有全天候、高效率、低成本的特性^[8],可以较好的确定接收机天线中心的点位,恰好可以弥补传统轨检仪的不足。将 GPS 定位引入到传统的轨检技术中,借鉴轨道外部几何参数的测量原理:建立 GPS 轨道监测控制网,并在传统轨检仪上加载 GPS 接收机,实时接收天线中心的点位信息,再经过双差处理和整周模糊度解算,得到精确的点位;结合天线中心点位信息和轨检仪自身测出的轨道内部几何参数,基于轨道外部几何参数测量模型,即可计算出轨道外部几何参数的量值。

1 系统工作原理

1.1 测量系统结构

检测系统主要由导航卫星系统、加载 GPS 接收机的轨检仪、控制网和 GPRS 发射站组成。整体方案结构如图 1 所示。

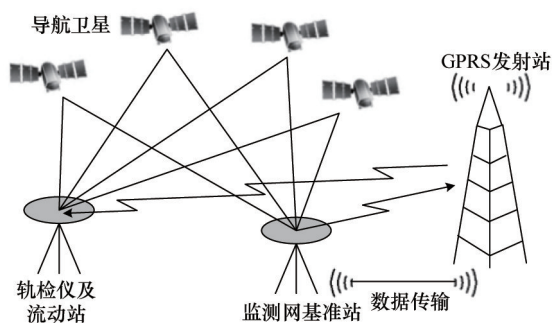


图1 整体方案示意

Fig. 1 Schematic diagram of the overall scheme

基于 GPS 的轨道外部几何参数测量系统是在传统轨检仪的基础上加载 GPS 接收机,结合绝对测量和相对测量,通过 RTK 测量方式实时获取接收机天线中心点的三维坐标,再整合轨检仪上各传感器的数据,得到轨道外部几何参数数值,具体测量流程如图 2 所示。

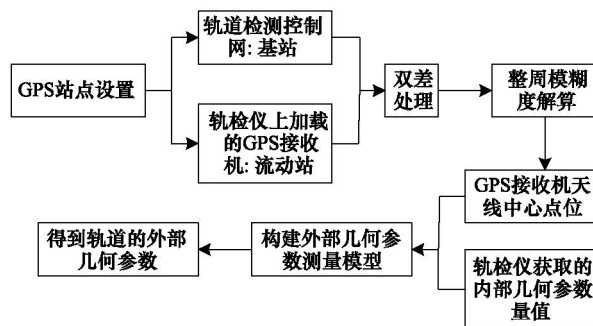


图2 轨道外部几何参数测量流程

Fig. 2 Schematic diagram of the external railway parameter measurement

1.2 轨道检测控制网构建

GPS 控制网是由 2 台及 2 台以上的接收机组成,在同一时段进行连续跟踪观测,是 GPS 测量的参考与基准,也是整个系统的基础。针对轨道线路狭长且周围环境复杂的特点,并结合 GPS 的轨道检测控制网布设时在精确性、可靠性和经济性等方面的要求,确定布网形状和布网形式。

1) 布网形式。在铁路测量时,检测控制网中各测站测量完一段区间后,就迁移到下一段区间,如此往复。针对该特性,布网采用同步图形扩展式,同步图形间进行边连式连接,因此仅需 4 台接收机即可进行测量。如图 3 所示,在测量完 ABCD 区段后,将 A、B 接收机安放在 E、F 位置上即可进行下一区段的测量。

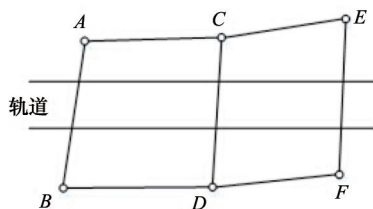


图3 布网形式

Fig. 3 Form of control network

2) 基线长度。针对轨道狭长的特点,控制网的形状确定为带状网。这种网形具有较好的适应性和较高的精度。假设铁路轨道检测的天窗时间一般为 2 h,人推行轨检仪行走的速度约为 4 km/h,因此一个测量周期约为 8 km。参考文献[9],在精度较高的控制网中,每隔 5 km 左右布设一对点,而轨道外部几何参数测量对精度要求很高,因此考虑在铁路线路两侧每 4 km 设置一对点。且考虑到如果各基线长度相差较大导致控制网的精度不均匀,故每对点两点之间的距离设置为 1 km 左右。

3) 基线数目。由于控制网的精度和可靠性与 GPS 网的形状无关,而与 GPS 控制网中基线向量的数量、每个点连接的基线的数量等有关。基线数量越多,点位误差越小。

本研究方案中,每次测量时的四边形中只有6条基线,数目较少,因此应在每个单独的四边形中解算所有的基线以便得到较高精度的观测数据。

1.3 轨道外部几何参数测量模型

测量轨道外部几何参数时,将轨检仪上的GPS流动站安装在轨检仪的正中,并测量天线距离轨检仪底座的高度,同时,采用RTK^[10]对流动站和基站数据进行双差处理,并通过LAMBDA^[11]解算整周模糊度,得到精确的天线中心位置。而后,解算轨道外部几何参数。

1) 中心线。轨道中心线是轨道断面顶部中点连线所组成的代表轨道走向的参数,是检测其他轨道平顺性参数的基础。测量原理如图4所示。

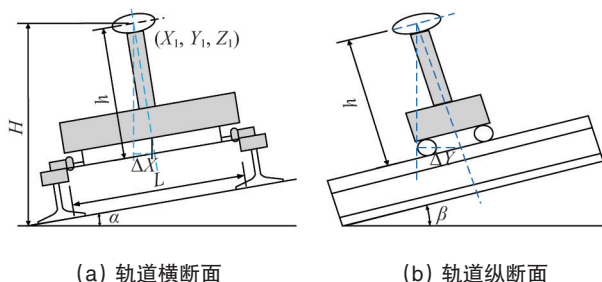


图4 轨道中心线测量原理

Fig. 4 Schematic diagram of track centerline measurement

设定轨道走向与Y坐标轴平行,轨道横断面与X坐标轴平行,当轨道断面如图4(a)所示时,天线中心位置坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) ,则此时轨道中心线在X方向的位置为

$$X = X_1 + \Delta X = X_1 + h \sin \alpha \quad (1)$$

式中, α 为两轨道间的高度角。

同理,假设轨道沿轨道走向的坡度角为 β ,如图4(b)所示,则轨道中心线在Y方向的位置为

$$Y = Y_1 + \Delta Y = Y_1 + h \sin \beta \quad (2)$$

中心线上点的高程坐标Z为

$$Z = Z_1 - h \cos \alpha \cos \beta \quad (3)$$

综上所述,可得轨道中心线上某一位置的坐标为

$$(X, Y, Z) = (X_1 + h \sin \alpha, Y_1 + h \sin \beta, Z_1 - h \cos \alpha \cos \beta) \quad (4)$$

若轨道平面与大地坐标间存在夹角,将坐标值投影到对应坐标轴即可。

2) 高程。在得到轨道中心线上点的坐标后,即可根据相应的轨距和倾角得到左右轨高程,具体计算公式为

$$h_g = Z \pm \frac{L}{2} \sin \alpha \quad (5)$$

式中,内侧轨道取负号,外侧轨道取正号。

2 实验结果及分析

2.1 静态测量试验

实验数据选择2012年10月30日的一组静态观测数据,观测基站为4个,其中较短基线长度在1000~2000 m,较长的

基线长度在4000~5000 m,接收机均安放在开阔、少干扰的地方。考虑到系统所要求的精度以及接收机所处的环境,确定基线测量时段为60~90 min,各测站的采样频率为5 s,各测站位置如图5所示。

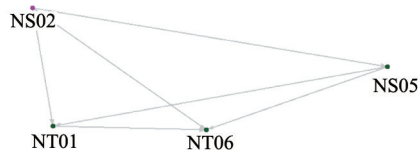


图5 测站位置

Fig. 5 Observation station location

经过基线解算以及三维无约束平差后,得到的结果如表1所示。由表1可知,控制网的静态观测平面误差为0.5 mm,高程为0.6 mm,满足静态观测的要求。

表1 平差结果

Table 1 Adjustment results

站点名	S_N/m	S_E/m	S_U/m	$\Delta S_N/mm$	$\Delta S_E/mm$	$\Delta S_U/mm$
NS02	2868477.4134	590932.4131	46.9461	0.0	0.0	0.0
NS05	2868966.3802	595785.3560	94.9103	0.6	0.5	0.5
NT01	2868805.0765	599547.9093	64.9324	0.4	0.4	0.6
NT06	2868952.4914	591146.7242	41.9562	0.5	0.3	0.6

注:下标N表示北向,E表示东向,U表示纵向。

2.2 动态测量试验

在武广高铁长沙段的线路上布设GPS带状控制网,加载GPS流动站的GJY-T-4A轨检仪以大约5 km/h的速度连续通过轨道,并实时接收由周围GPRS基站发送的控制网中各接收机数据,再将其保存在上位机中。考虑到静态监测与动态测量时数据具有较强的相关性,因而,选取了同一型号的GPS模块,即美国Trimble公司最新开发的BD970 GNSS模块。基准站为TS11,观测时间7 min,移动站为TS12,观测时间为4 min,历元240个,采样频率均为1 s。

由观测数据得知,区域内共收到7颗卫星。利用LAMBDA法解算整周模糊度, $ratio$ (固定双差解质量因子)限值设定为2。搜索模糊度值所需历元数目为2,如图6所示。

计算得到 $ratio$ 值变化曲线如图7所示。从图6和图7中可知, $ratio$ 值设定为2时,均解算成功,但在历元34~35处 $ratio$ 值较小。

利用解算后的坐标绘制平面位置变化曲线,如图8(a)所示,可以看出运动线路是一条直线,测量过程中点均匀分布,说明速度变化较均匀,在接近结束时,点的分布较密集,说明此时流动站速度较低或处于暂停状态。速度变化曲线如图8(b)所示。

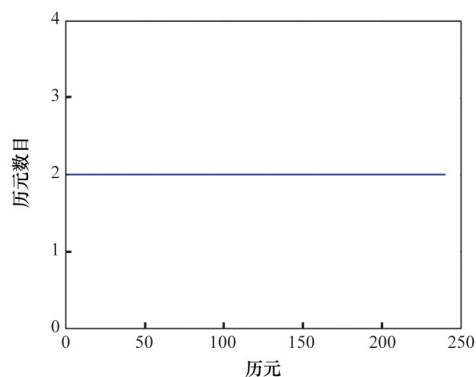


图6 模糊度解算所需历元数目
Fig. 6 Epoch number required

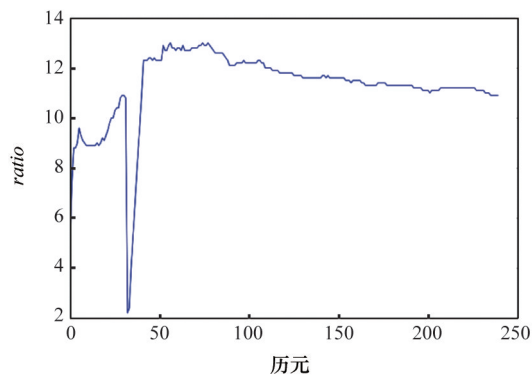
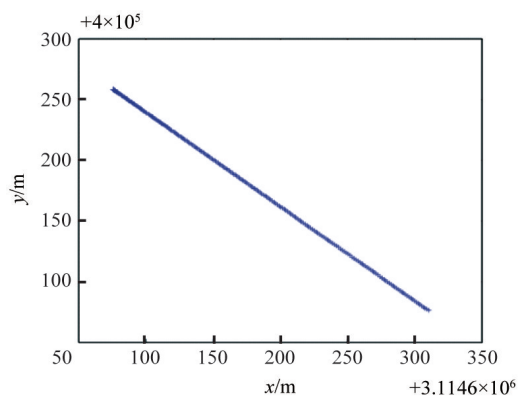
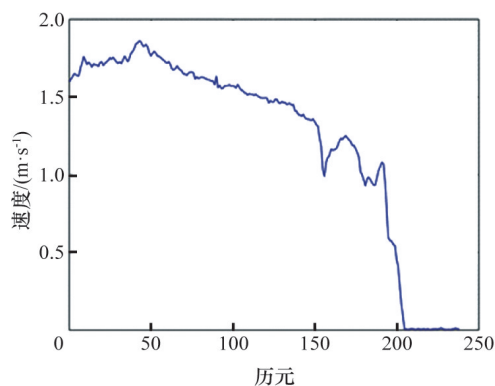


图7 *ratio*随历元变化曲线
Fig. 7 Curve of *ratio* change with epoch data



(a) 位置变化



(b) 速度变化

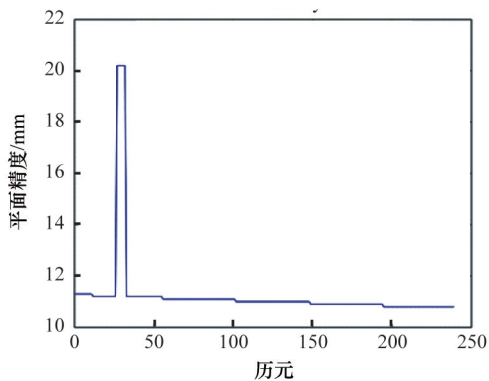
图8 位置和速度变化
Fig. 8 Changes of position and velocity

从图8可以看出,流动站的运动速度波动不大,符合轨道检测过程中速度低且不断变化的特点。在运动的最后,流动站处于暂停状态。

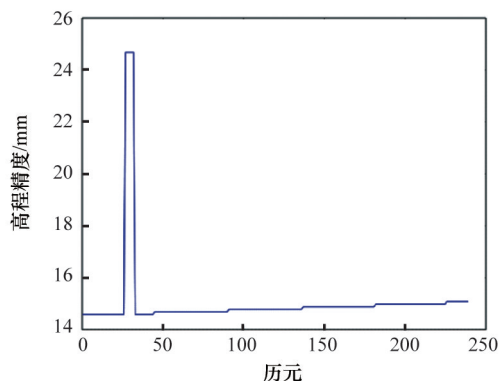
误差曲线如图9所示,精度值在*ratio*较低的地方出现急

剧增加,说明此时模糊度解算不准确,误差较大,予以剔除。通过分析可知,各点的平面误差平均为11.0 mm,高程误差平均为14.8 mm。

以上分析显示,基于GPS定位原理的轨道外部几何参数



(a) 平面误差



(b) 高程误差

图9 定位精度
Fig. 9 Position accuracy

测量系统的静态观测误差 ≤ 0.5 mm,动态测量误差 ≤ 15 mm,基本满足本研究方案的测量要求。速度变化曲线中,最大速度为 1.86 m/s,平均速度为 1.44 m/s,接近人推轨检仪行走的速度,符合实际测量需求。

3 结论

1) 针对铁路线路的特点,研究并设计了轨道控制网的布网方案。在考虑测量精度、可靠性以及费用等指标后,布网形式采用边连式同步图形扩展,基线长度确定为 4 km,每次测量时基线数目为 6 条。

2) 采用 GPS 接收机实时获取轨检仪上加载的 GPS 接收机天线中心的位置信息,并与轨道检测控制网中 GPS 基站获取的定位信息进行双差处理,再通过 LAMBDA 解算整周模糊度,得到的天线中心点位静态误差及动态误差分别为 0.5 mm 和 15 mm。

3) 基于 GPS 全天候、全球性的特点,轨检时最大速度达到 1.86 m/s,平均速度为 1.44 m/s,长、短波不平顺问题均得以解决,不再受陀螺仪精度等引发的距离限制。

GPS 定位具有全天候、高效率、低成本的特点。利用该特点,结合传统的轨检技术测量轨道几何参数,大大提高了自动化程度,减少了成本。

参考文献(References)

- [1] 陈强, 刘丽瑶, 杨莹辉, 等. 高速铁路轨道几何状态的车载摄影快速检测方法与试验[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 80-86.
Chen Qiang, Liu Liyao, Yang Yinghui, et al. Static geometry measurement of high-speed railway tracks by vehicle-borne photogrammetry[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 80-86
- [2] 罗林. 高速铁路轨道必须具有高平顺性[J]. 中国铁路, 2000, 10(9): 8-11.
Luo Lin. High smoothness, a must for the high-speed railway tracks[J]. Chinese Railways, 2000, 10(9): 8-11.
- [3] 伏思华, 于起峰, 王明志, 等. 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3203-3208.
Fu Sihua, Yu Qifeng, Wang Mingzhi, et al. Railway geometric parameters measurement system based on video metrics[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3203-3208.
- [4] Alippi C, Casagrande E, Scotti F, et al. Composite real-time image processing for railways track profile measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(3): 559-564.
- [5] 高春雷, 王发灯. 利用激光准直技术检测线路的长波不平顺[J]. 铁道建筑, 2009, 15(1): 81-85.
Gao Chunlei, Wang Fadeng. Inspection of long-wave non-smoothness for the railway track using the laser alignment technology[J]. Railway Engineering, 2009, 15(1): 81-85.
- [6] Iyengar R N, Jaisal O R. Random field modeling of railway track irregularities[J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(4): 303-308.
- [7] 胡庆丰, 安博格. GRP1000 轨检小车进行无砟轨道检测的作业方法[J]. 铁道勘察, 2008(3): 17-20.
Hu Qingfeng, An Boge. Operational method for checking ballastless track with GRP1000 track checking car made by amberg technology AG[J]. Railway Investigation and Surveying, 2008(3): 17-20.
- [8] 夏敬潮, 叶世榕, 刘炎炎, 等. Wi-Fi 辅助下附有高程信息的 GPS 定位[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2014, 39(1): 52-55.
Xia Jingchao, Ye Shirong, Liu Yanyan, et al. Wi-Fi assisted GPS positioning with fixed geodetic height[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(1): 52-55.
- [9] 刘沛, 王剑. 带状 GPS 控制网的方案探讨及实例分析[J]. 工程勘察, 2009(2): 435-439.
Liu Pei, Wang Jian. Optimization layout and implementation survey of ribbon GPS control network[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(2): 435-439.
- [10] Yoon S, Lundberg J B. An integer ambiguity resolution algorithm for real-time GPS attitude determination[J]. Applied Mathematics and Computation, 2002, 129(1): 21-41.
- [11] 宋高顺, 王昌明, 何云峰, 等. 模糊度函数法中适应度函数的自适应设计[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 840-845.
Song Gaoshun, Wang Changming, He Yunfeng, et al. Self-adaptive design of fitness function in ambiguity function method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 36(5): 840-845.

(编辑 陈华姣)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。