

快速车载式道路高程测量系统

韩 毅,马 建,宋宏勋

(长安大学 汽车学院,陕西 西安 710064)

摘 要:针对道路高程人工测量中效率较低、误差不易控制等问题,提出了基于 GPS 和惯性原理的快速车载式路面高程测量方法。以 GPS、姿态传感器和增量式旋转编码器等传感器为基础,在车辆高速行驶时,同步采集传感器测量的经纬度、海拔、行驶速度以及车辆的俯仰角,分别解算出俯仰角度积分高程和 GPS 高程,并对二者采用数据融合的方法计算出道路的高程,最后进行了实例验证和测量误差分析。研究表明:给出的车载式路面高程测量方法,在 20~50 km/h 的测量速度下,高程测量的平均误差为 15 cm,测量相关性优于 99.9%;该测量方法简单、高效,具有较强的实用性,可用于车载式道路高程的快速准确测量。

关键词:汽车工程;高程测量;车载式;GPS;旋转编码器;数据融合

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Fast vehicle-mounted road elevation survey system

HAN Yi, MA Jian, SONG Hong-xun

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency and poor error control in artificial elevation survey, this paper presented a fast vehicle-mounted road elevation measurement method based on GPS and inertial principle. On the basis of GPS, attitude sensor, incremental rotary encoder and other sensors, the latitude, longitude, altitude, vehicle speed and pitch angle of the vehicle were measured when the vehicle was driving at high speed. The pitching angle integral elevation and the GPS elevation were calculated respectively. With these data, the elevation of the road was calculated by employing data fusion method. Finally, an experiment was given to verify this system and the error analysis of measurement was made. The research results show that by using the method of vehicle-mounted road elevation survey system, the average error of road elevation survey is 15 cm at the vehicle speed of 20 km/h to 50 km/h, and the measurement correlation is more than 99.9%. This method is simple, efficient and easy to implement. It can be used for the rapid and accurate measurement of vehicle-mounted road elevation. 3 tabs, 7 figs, 9 refs.

Key words: automobile engineering; elevation survey; vehicle-mounted; GPS; rotary encoder; data fusion

0 引言

高程指的是某一点到基准面的竖向垂直高度。它通常分为绝对高程和相对高程 2 种类型,高程是确定地面点位置的重要元素之一。目前,测量高程最常用的 2 种方法为水准法测量^[1-3]和三角高程测量^[4-5]。水准法测量高程所使用的仪器——水准仪能够提供水平视线,去测量 2 个地面点之间的高度差。三角高程测量通过测量 2 点之间的天顶距和水平距来获得 2 点间的高程差。这 2 种方法沿用多年,虽然也有许多改进(例如水准测量中的自动读数、引入 GPS 进行定位等),但总体来说测量仍需要人工完成,测量效率低下。为了提高路面高程的测量效率,降低测量的难度,减小测量误差,本文提出了一种基于 GPS 与惯导系统相融合的快速车载式道路高程测量方法,该方法测量效率高,测量准确,可以实现车载式快速测量,特别适合在道路的普查和养护过程中使用。

1 系统结构

道路高程测量系统以车为载体,由距离与车速传感器、多通道数据采集系统、姿态传感器、GPS 系统和工业控制计算机组成,测量系统原理见图 1。图中: $V(t)$ 、 $S(t)$ 分别为车辆速度和里程; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别为车辆的航向、俯仰和横滚角。

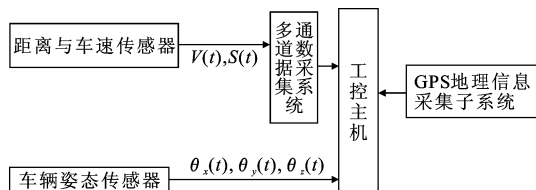


图 1 测量系统原理

Fig. 1 Principle of measurement system

本系统主要的仪器设备都采用可上架式结构,并在车内布置机柜,放置各类设备。在车顶安装 GPS 系统的天线,在后轮上安装距离与车速传感器来测量车辆的行驶里程和行驶速度。

本系统的多通道数据采集系统选用美国 NI-USB6210 接口卡,主要用于采集距离与速度传感器的信号。工控主机选用台湾研华高性能工业控制计算机,主机配置为:CPU: Intel Core2 四核 2.4 GB;内存: Kingston 2 GB × 2DDR3 (800);主板: Asus P5E;硬盘: 希捷 320 GB。

选用“北斗天璇”GPS 接收机为 GPS 地理信息采集子系统^[6],该机支持最高 20 Hz 的定位信息输

出频率,输出的定位信息既可直接被程序使用,也可保存后用于进一步的研究。

为得到检测车的姿态信息,本系统选用 NV-AHRS M2-0.25 航姿参考系统(attitude and heading reference system)^[7],可以在高动态的环境中实现测量车辆的姿态参数(横滚、俯仰和航向)、角速度和加速度。通常在动态情况下,能够以 100 Hz 的频率输出车辆的横滚角、俯仰角和航向角,且精度可以达到 0.4°。

本系统中的距离与速度传感器选用欧姆龙增量型 E6C3-CWZ5GH 光电旋转编码器^[8],每周 2 048 个脉冲,ABZ 三相输出,12 V 供电。

2 基于姿态测量系统的高程测量

本系统中的姿态测量传感器能够以 100 Hz 的采集频率得到车辆的俯仰角度。当汽车高速行驶时,将旋转编码器实时采集的车辆行驶里程信息和姿态测量系统实时采集的车辆俯仰角度信息进行综合处理,采用下述方法,道路的高程曲线形状就可以计算出来。

当车辆在路面上行驶时,通过姿态测量系统,能够实时的测量出汽车前进方向与水平方向之间的角度 θ_y ,即车辆的俯仰角度,见图 2。



图 2 系统工作原理

Fig. 2 System principle

显然

$$\dot{h}(t) = V(t) \sin(\theta_y) \quad (1)$$

式中: h 为路面高程; V 为车辆的行驶速度; θ_y 为俯仰角度; t 为时间。

因此

$$h(t) = h(0) + \int_0^t V(t) \sin(\theta_y) dt \quad (2)$$

又因为

$$V(t) = \dot{S}(t) \quad (3)$$

从而得到

$$h(t) = h(0) + \int_0^t \dot{S}(t) \sin(\theta_y) dt = h(0) + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{t=0}^t (S(t) + \Delta t - S(t) \sin(\theta_y)) \quad (4)$$

式中: S 为车辆的行驶里程。

在实际测量过程中,光电编码器的脉冲计数采

集是以 22 kHz 的采样频率工作的,因此可以取采样间隔 Δt 为

$$\Delta t = \frac{1}{22\,000}(\text{s}) = 45(\mu\text{s}) \quad (5)$$

因此,在已知车辆俯仰角度和同步的行驶里程的条件下,可根据式(4)求得任意 t 时刻的路面高程 $h(t)$,从而可以获得路面高程起伏曲线。

利用上述方法,在一段相同的路面上,比较基于姿态测量系统测量获取的路面高程曲线与人工用水准仪测量得到的曲线,结果见图 3。经对比计算,对于本路段的测量单点高程之间的相对误差不超过 5%,绝对误差小于 0.1 m。

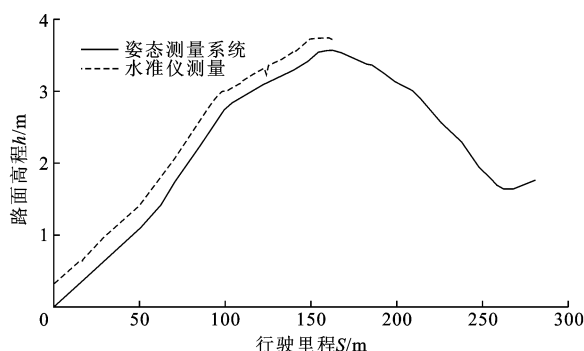


图 3 水准仪与姿态测量系统测量对比曲线

Fig. 3 Contrast curve between leveling instrument and attitude measurement system

3 基于 GPS 测量系统的高程测量

本系统使用的 GPS 系统可以测量天线中心所在位置的经纬度坐标以及海拔高度的数据,最高采集频率为 20 Hz。因此根据 GPS 返回的 GPGGA 指令中的海拔数据配合光电编码器的行驶里程数据,就可以得到道路的高程数据。

根据大量试验发现,虽然理论上单个 GPS 所测海拔的精度比较低,但是测量 2 点之间的相对海拔差的精度是比较高的,尤其是用于定位的卫星质量比较好而且在观测过程中一直保持与 GPS 接收机的载波联系(锁定卫星)的情况下,相对高度的测量精度会更高。因此,本测量系统采用 GPS 返回的海拔高度来计算道路的高程曲线。在卫星状况比较好的情况下,实际验证的结果如图 4 所示。

但是在卫星状况比较差或者存在建筑物、树木或林荫遮挡时,GPS 系统返回的高程数据会存在相当大的误差,几乎不可用。在同一段从空旷到林荫遮挡的路面上,基于 GPS 系统测量的道路高程与人工用水准仪测量的道路高程比对如图 5 所示。

因此,对于基于 GPS 测量系统的道路高程测

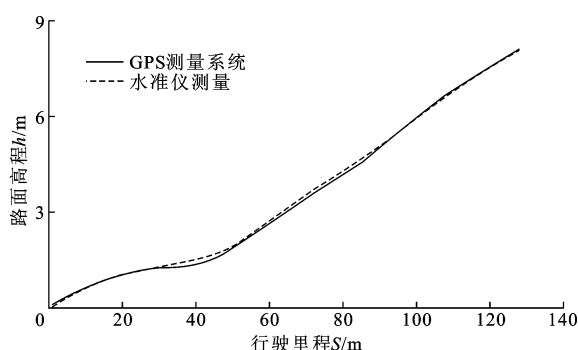


图 4 水准仪与 GPS 测量系统对比曲线

Fig. 4 Contrast curve between leveling instrument and GPS measurement system

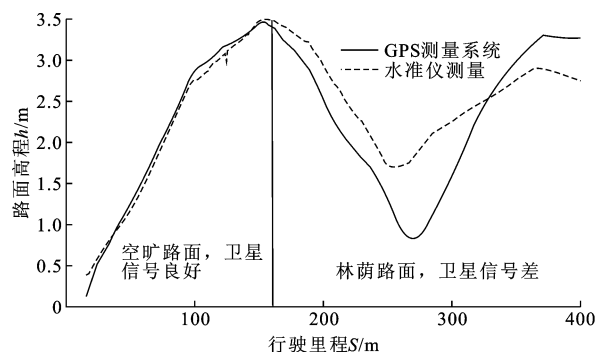


图 5 空旷路面和林荫路面 GPS 与水准仪测量对比曲线

Fig. 5 Contrast curve between leveling instrument and GPS measurement system in different road conditions

量,应该根据 GPS 系统返回的卫星信息,对 GPS 数据进行筛选。要求用于运算的 GPS 数据,对应的数据输出状况为,卫星个数应多于 6 个,且稳定运行时间应在 3 s 以上。

4 GPS 与姿态测量传感器的数据融合

基于姿态测量系统数据计算得到的路面高程和基于 GPS 测量系统数据计算得到的路面高程,其各有优缺点。

(1)GPS 系统采集的海拔数据,只存在单点测量误差,不存在累计误差,而且测量误差是固定的。但是 GPS 系统的采样速率低,只有 20 Hz,在某些卫星被遮挡路段以及特殊天气环境下,GPS 的数据信息才不可用。

(2)基于姿态测量系统数据计算的道路高程,虽然采样频率高,全程路段都有数据,但是因为计算环节中有累加的积分运算,因此存在累积误差。

采用上述 2 种方法计算得到的道路高程数据各有优势,因此本文采用多数据融合的方法对这 2 种数据计算结果进行综合,尽量提高道路高程的测量

精度。本文采用如下方法步骤对其进行数据融合。

(1)当 GPS 系统采集的海拔数据有效时,采用卡尔曼滤波法对 2 种传感器的信号进行融合,得到道路的高程数据。

(2)当 GPS 信号无效时,找到之前有效的海拔数据的最末点,从该点开始采用姿态测量系统的数据来计算道路高程。

(3)当 GPS 信号从无效恢复到有效时,将前面基于姿态测量系统得到的道路高程,利用直线拟合的方法连接至有效的海拔数据的起始点,然后再根据步骤(1)进行计算。

在上述的数据融合方法中,当 GPS 系统采集的海拔数据有效时,需要采用卡尔曼滤波法来融合 2 种传感器的信号数据,计算得到道路的高程数据^[9],该算法如下所述。

已知行驶里程 S ,俯仰角度 θ_y ,海拔信息 h_{GPS} ,速度 V ,计算道路高程 h 。

根据状态方程 \mathbf{X}_k 与观测方程 \mathbf{Z}_k

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \tag{6}$$

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{q}(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \tag{7}$$

$$\mathbf{X} = (s, v_s, h, v_h)^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z} = (h_{\text{GPS}}, V, \theta_y)^T$$

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{v_h}{v_s^2} & 0 & \frac{1}{v_s} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ v_s \\ \frac{v_h}{v_s} \end{bmatrix}$$

式中: T 为随机噪声; v_h 、 v_s 分别为速度 V 在高度和水平方向的分量。

推导出 Kalman 滤波方程

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} \\ \mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1} \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T [\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{q}(\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1})] \\ \mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_{k,k-1} \end{cases} \tag{8}$$

利用方程组式(8) 进行反复叠代运算,从而可以得到 h 。

5 误差分析

针对大的路面起伏,采用 Kalman 滤波法融合 GPS 与姿态传感器的信号实现测量。根据设备所提供的参数,在卫星情况较好时,基于 GPS 数据测量的道路高程误差约为 $\pm 0.1\text{ m}$,基于姿态测量系统数据测量的车辆俯仰角度误差约为 $\pm 0.4^\circ$ 。

在车载式道路高程测量系统中,取 GPS 测量误差与姿态测量传感器的积分误差中的最小值作为系统的综合误差。姿态测量传感器的积分误差 Δ_{gyro} 与积分路段长度 L 相关,有

$$\Delta_{\text{gyro}} = L \sin(\Delta_{\theta_y}) \tag{9}$$

式中: Δ_{θ_y} 为车辆俯仰角度的测量误差,取 0.4° 。

从而得到车载式道路高程测量系统的综合误差 Δ 为

$$\Delta = \min(\Delta_{\text{gyro}}, 0.1) = \min(L \sin(0.4^\circ), 0.1) \tag{10}$$

为方便直观地了解测量误差,由式(9) 计算得到的积分误差见表 1,由式(10) 计算得到的系统综合误差见下页表 2。

表 1 姿态测量传感器的积分误差

Tab. 1 Integral error of attitude measuring sensors	
里程 L/m	姿态仪积分误差 $\Delta_{\text{gyro}}/\text{m}$
10	0.07
20	0.13
50	0.35
100	0.70
200	1.40
500	3.50
1 000	6.98

由表 2 可得出,在信号良好的情况下,通过锁定卫星等技术,GPS 可以做到单点 0.1 m 的测量误差。因此如果 GPS 信号良好,道路高程测量系统的综合误差就可以控制在 0.1 m 范围内。所以在 GPS 信号良好的情况下,如空旷地带,应优先使用 GPS 采集的海拔数据作为道路高程的计算依据(计算时,GPS 参数选取比较宽松的值),此时系统的测

量精度较高。对于 10% 的坡度测量,系统可以达到如表 2 所示的精度。但如果在长距离测量时,出现卫星丢失或者锁星失败的情况,GPS 信号本身所引入的误差可能非常大,如果继续使用 GPS 采集的海拔数据,则会给测量系统带入较大的误差。此时应使用姿态测量传感器的数据并与 GPS 采集的海拔数据进行融合,以达到较高的系统测量精度。

表 2 道路高程测量系统综合误差及精度分析(GPS 状况良好)

Tab. 2 Comprehensive error of road elevation survey system and accuracy analysis (GPS good condition)

GPS 误差/m	测量里程/m	综合误差 Δ/m	10%坡度 起伏/m	设备精度/%
0.1	10	0.07	1	7.0
	20	0.10	2	5.0
	50	0.10	5	2.0
	100	0.10	10	1.0
	200	0.10	20	0.5
	500	0.10	50	0.2
	1 000	0.10	100	0.1

6 实例验证

利用前述的数据融合方法,选取某一段路进行了实例验证,检测结果见图 6。其中细线为将 GPS 系统的海拔数据与姿态测量系统的车辆俯仰角度数据融合后计算得到的道路高程数据;粗线为 GPS 信号无效时,仅依靠姿态测量系统的数据通过积分计算得到的道路高程。根据试验结果可看出,该方法可以比较准确地还原真实的路面高程数据。

为了进一步检验该方法的测量精度以及车速对测量结果的影响,选取了一段 200 m 长,最大落差约 15 m 的路段进行实际测量验证。选择多次试验中的 3 次来分析,车速分别是 10、20、40 km/h,测量曲线如图 7 所示。

将检测车对该路段不同车速下的 3 次测量数据与水准仪测量的误差进行统计,结果如表 3 所示。

表 3 不同车速下的试验数据误差分析

Tab. 3 Error analysis of experiment data at different speeds

车速/(km·h ⁻¹)	10	20	40	平均值
平均/m	0.318	0.179	0.112	0.203
最大/m	0.603	0.317	0.386	0.435
最小/m	0.001	0.002	0.001	0.002
方差/m ²	0.031	0.007	0.006	0.015
标准差/m	0.177	0.085	0.079	0.114
相关系数	0.999	0.999	0.999	0.999

通过分析可见,在该路段测量中,检测车测量数

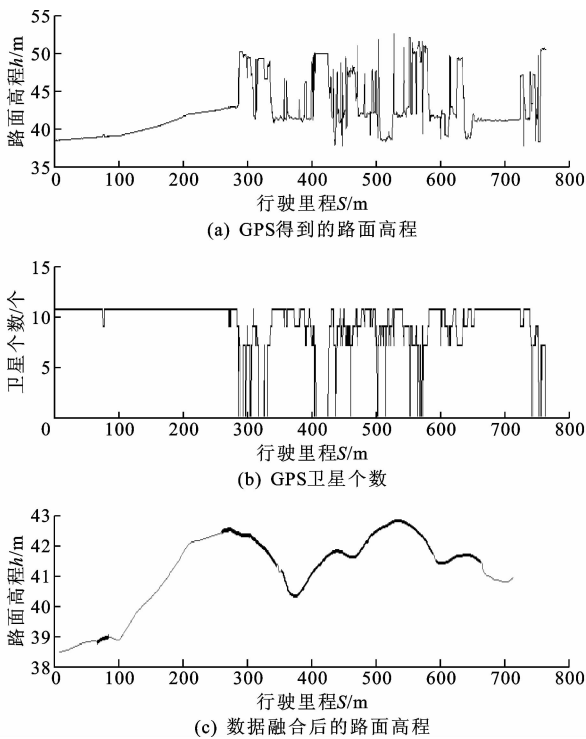


图 6 采用数据融合方法得到的道路高程

Fig. 6 Road elevation using data fusion method

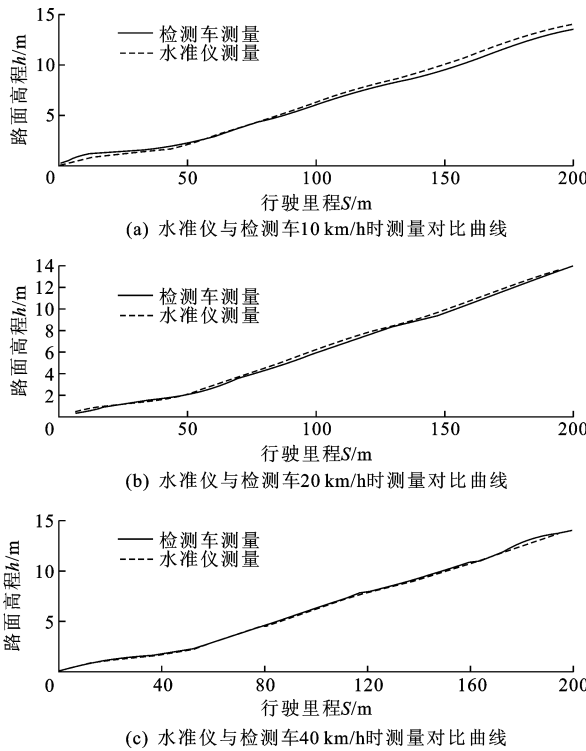


图 7 实测结果与水准仪对比曲线

Fig. 7 Contrast curve between measured results and leveling instrument

据与水准仪测绘数据的相关性可达到 99%,平均误差为 20 cm 左右。从试验数据还可看出,10 km/h 低速测量时系统误差偏大,可达到 30 cm 左右,而

20 km/h和 40 km/h 车速测量时系统误差较小。其原因在于车速在 10 km/h 左右时,车辆行驶速度难以维持稳定,容易出现车身姿态的变化,导致陀螺测量误差增大,从而增加系统误差。基于此试验结果,检测车的测试速度应控制在 20~50 km/h,在该测量速度范围内,系统的平均误差为 15 cm 左右,测量相关性在 99.9%以上。

7 结 语

(1)本文基于姿态测量传感器采集的车辆俯仰角度数据,配合行驶里程数据以及 GPS 采集的海拔数据,给出了一种测量和计算道路高程的方法。

(2)通过将车辆俯仰角度、行驶里程以及海拔等数据的融合,提高车载式道路高程测量系统的测量精度,给出了相关的融合算法。

(3)对测量方法进行了实例验证,分析了系统综合误差,系统的平均误差约为 15 cm,测量相关性在 99.9%以上。

(4)采用本文提出的算法,以车载方式进行道路高程测量,可以极大地降低人工劳动强度,提高道路高程测量效率,且精度能满足道路普查和养护的基本要求。

参考文献:

References:

[1] 杨保华,孙志刚,高树亮. 电子水准仪和 Excel 在 +255 沉降观测中的应用[J]. 价值工程, 2013, 19 (32):201-203.
YANG Bao-hua,SUN Zhi-gang,GAO Shu-liang. Application of electronic level and excel in +255 settlement observation [J]. Value Engineering, 2013, 19 (32):201-203. (in Chinese)
[2] 谭明哲. 井下全站仪水准法高程测量应用分析[J]. 金属材料与冶金工程, 2013, 41(1):39-42.
TAN Ming-zhe. Application analysis on high journey measurement by full-stand instrument level law under the shaft[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2013, 41(1):39-42. (in Chinese)

[3] 杜 强,满 松. 水准法全站仪高程测量方法研究[J]. 工程勘察, 2012(5):77-81.
DU Qiang, MAN Song. Research on the method of leveling by using total station[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012(5):77-81. (in Chinese)
[4] 张义良. 光电三角高程测量在高铁 CPⅢ 测量中的应用[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
ZHANG Yi-liang. Application of photoelectric triangulated height measurement in measuring high-speed rail CPⅢ [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
[5] 曹鹏亮,曹仁君. 全站仪三角高程测量替代水准仪观测桥梁预压沉降量[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(11):247-248.
CAO Peng-liang, CAO Ren-jun. Alternative method of trigonometric leveling measurement of total station to leveling for bridge pre-loading settlement observation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36(11):247-248. (in Chinese)
[6] 北斗星通公司. 北斗天璇 GPS 接收机[Z]. 北京:北斗星通公司, 2013.
BDStar Navigation Co. Ltd. BD Tianxuan GPS receiver[Z]. Beijing: Bdstar Navigation Co. Ltd. , 2013. (in Chinese)
[7] Innalabs Holding Inc. Attitude and heading reference system INNALABS AHRS M2, M3 User's Manual. Revision 4. 3 [Z]. Ukraine, Kiev: Innalabs Holding Inc, 2003.
[8] OMRON Inc. E6C3-A Optical Rotary Encoder[Z]. Kyoto:OMRON Inc, 2012.
[9] 李 刚,蔡成林,李思敏,等. 抗差与自适应组合的卡尔曼滤波算法在动态导航中的研究[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2015, 27(1):37-43.
LI Gang, CAI Cheng-lin, LI Si-min, et al. Robust adaptive Kalman filter in kinematic positioning [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications; Natural Science Edition, 2015, 27 (1):37-43. (in Chinese)