

文章编号:0494-0911(2012)02-0018-05

中图分类号:P228.4

文献标识码:B

# 高精度 GPS 大型桥梁工程控制网数据处理与质量评估方法研究

郭际明<sup>1</sup>,周命端<sup>1</sup>,吴迪军<sup>2</sup>,郭秋云<sup>3</sup>,熊 伟<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 测绘学院,湖北 武汉 430079; 2. 中铁大桥勘测设计院有限公司,湖北 武汉 430050; 3. 山东省煤田地质局第一勘探队,山东 滕州 277500)

## Research on the Approach to Data Processing and Quality Analysis of High Precision GPS Major Bridge Engineering Control Network

GUO Jiming, ZHOU Mingduan, WU Dijun, GUO Qiuyun, XIONG Wei

**摘要:**以某大桥 GPS 首级控制网的观测数据为基础,探讨高精度 GPS 数据处理的关键技术,提出采用基准点技术和卫星轨道固定技术进行基线解算的思路,分析基线处理与网平差的精度评估方法,最后总结一套高精度 GPS 大型桥梁工程控制网数据处理与质量评估方法。实践证明,应用该方法可获得较高的数据处理精度。

**关键词:**GPS 网;桥梁工程;数据处理;精度评估;CGCS2000

### 一、大型桥梁工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口外伶仃洋海域,是连接香港、珠海和澳门的大型跨海通道。大桥的起点位于香港大屿山,经大澳,跨越珠江口,最后分成“Y”字形,一端连接珠海,一端连接澳门,全长约 50 km,跨海达 35 km。大桥主体工程全长约 29.6 km,采用桥隧组合方案,其中海中桥梁总长约 22.9 km,海底隧道长约 6.7 km,并在主体工程隧道两端设置两个海中人工岛,以实现桥隧转换。港珠澳大桥具有跨海距离长、总体规模宏大、建设条件复杂、技术难度大、施工周期长、地理位置特殊、政治意义重大等突出特点。为保证大桥勘察、施工及变形监测等工作的需要,于 2008 年建立了高精度的大桥首级 GPS 控制网。为验证该 GPS 控制网的测量精度及其可靠性,确保测量成果在网形、精度、质量等方面满足大桥工程建设的基本要求,必须进行同精度的复测<sup>[1]</sup>。

GPS 复测首级网使用 16 台双频接收机(11 台 Trimble 5700 GPS 接收机、4 台 Trimble R8 GNSS 接收机、1 台 Trimble 5800 GPS 接收机)进行同步连续静态观测,数据采样间隔为 30 s。同步观测时, GPS 接收机天线均架设在强制对中墩上,连续观测 4 个时段,每个时段采用基于 24 h 为一时段的连续观测方式,其中白天、晚上所占时间均匀,每测站累计

观测时间均达到 96 h,以达到最佳观测效果,满足首级 GPS 网的观测时间长度要求。

本文以 2009 年 3 月 19—22 日连续 4 天的 GPS 观测数据为基础,采用卫星轨道固定技术和基准站技术<sup>[2]</sup>,应用 GAMIT + CosaGPS 数据处理软件对港珠澳大桥 GPS 首级控制网进行数据处理,以探讨高精度 GPS 数据处理的关键技术,分析基线处理与网平差的精度分析方法,总结一套高精度 GPS 大型桥梁工程控制网数据处理与质量评估方法,为今后大型桥梁工程的 GPS 应用提供参考和借鉴。

### 二、高精度 GPS 数据处理关键技术

#### 1. CGCS2000 系统与坐标转换

从 2008 年 7 月 1 日起,我国正式启用 2000 国家大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000)作为国家法定的坐标系,作为我国新一代的平面基准<sup>[3]</sup>。CGCS2000 系统是以 ITRF97 参考框架为基础,与 GNSS 观测系统一致的参考框架,参考历元为 2000 年 1 月 1 日<sup>[4]</sup>。它是全国 GPS 一、二级网,国家 GPS A、B 级网和地壳运动观测网等在 ITRF 框架下联合平差得到的 2000 国家 GPS 大地网在参考历元为 Epoch 2000.0 的点坐标和速度的具体实现。

由于 CGCS2000 系统是在 ITRF97 框架下实现

收稿日期:2011-03-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(20102140101000002)

作者简介:郭际明(1965—),男,山东青州人,教授,主要研究方向为高精度 GNSS 定位技术及其应用。

的,所以在高精度GPS数据处理时,需要将GPS测站点的三维直角坐标从ITRF2005或ITRF2000框架转换到ITRF97框架,参考历元为Epoch 2000.0,即涉及坐标框架之间的转换、同一框架内历元之间的转换和框架转换参数计算3方面内容<sup>[5]</sup>。

对于在同一参考历元下,不同ITRF参考框架间的坐标转换,可以通过坐标系之间的相似变换实现坐标框架的转换。如ITRF2000与ITRF97框架之间的七参数转换模型为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{97} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2000} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{2000} \quad (1)$$

式中,  $(X, Y, Z)_{97}$  和  $(X, Y, Z)_{2000}$  分别为ITRF97和ITRF2000框架下的三维直角坐标;3个平移量  $(T_1, T_2, T_3)$ 、3个旋转量  $(R_1, R_2, R_3)$  以及框架之间的尺度改正因子  $(D)$  即为七参数,可通过全球分布的IGS跟踪站估算得出,具体数值见IERS网站<sup>[6]</sup>。

对于在同一参考框架下,不同历元时刻间的历元转换,7个参数值并不是固定不变的,需要考虑年日变化速率的影响。对于给定时刻  $t$  的任一参数  $P$  值,可根据式(2)计算得到

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P}(t - t_0) \quad (2)$$

式中,  $P(t)$  是归算历元  $t$  的参数;  $P(t_0)$  是参考历元  $t_0$  的参数;  $\dot{P}$  是参数变化速率。

值得注意的是,由于地壳运动的影响<sup>[7]</sup>,GPS测站在框架内的位置随时间而变化,这种运动一般比较缓慢,近似匀速的。当两个框架的历元不同时,需要先将框架的坐标按运动速度归算到一致的历元上来,类似式(2),某一历元的坐标计算公式为<sup>[8]</sup>

$$X(t) = X(t_0) + \dot{X}(t - t_0) \quad (3)$$

式中,  $X(t)$  和  $X(t_0)$  分别为GPS测站点在此框架中归算历元  $t$  和参考历元  $t_0$  的3个坐标分量;  $\dot{X}$  为运动速率。

根据技术设计书要求,本次GPS大桥首级控制网数据处理是在CGCS2000坐标系统下进行的。

### 2. 基准站技术

为确保长基线处理的精度要求,地面基准站点坐标框架及历元与卫星星历的框架及历元须保持一致。为提高首级GPS控制网的基线解算精度及工程建设要求,考虑采用基准站技术,以获得测站

点精确的绝对地心坐标。基本思路是:以国内外已有精密地心坐标和同步GPS观测资料的IGS基准站为加权控制数据,引入中国及周边10个全球永久性IGS跟踪站与位于香港、澳门的7个CORS站构成坐标基准传递网,用于传递首级GPS控制网的坐标基准,然后将首级GPS控制点与7个CORS站进行联合基线解算。选取的IGS跟踪站与测区站点构成的GPS网图如图1所示。

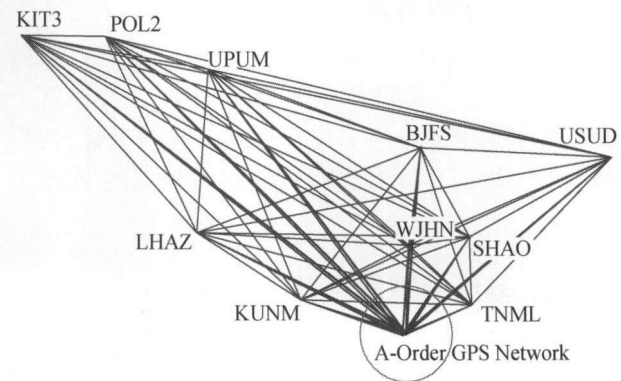


图1 GPS网形图(IGS站与测区站点)

### 3. 卫星轨道固定技术

GPS基线处理时,由于所采用的坐标框架及参考历元为观测期间IGS精密星历所对应的ITRF2005参考框架和瞬时历元为Epoch 2009.2123,因此需应用高精度科研与分析软件GAMIT 10.34<sup>[9]</sup>进行基线解算。为保证首级GPS网基线解算的高精度,且顾及IGS组织提供的最终精密星历的GPS卫星轨道精度可达到  $\pm(2 \sim 5) \text{ cm}^{[10-11]}$ ,为此考虑采用卫星轨道固定技术(Choice of Experiment = BASELINE)进行高精度基线处理。

### 4. 数据处理(基线解算和网平差)方法

大桥GPS首级控制网进行基线解算时,采用GAMIT 10.34软件处理基线,其基线解算策略的主要参数配置如表1所示。

表1 主要参数配置表

处理模式	BASELINE	观测值的选择	LC_HELP
批处理迭代方案	1-ITER	对流层延迟改正模型	Saas + GMF + 2h
光压模型	BERNE	大气梯度模型	Y
卫星钟差	BRDC星历改正	卫星和接收机PCV	AZEL/ELEV
数据筛选	AUTCLN	ARC参数系统	IGS92
惯性框架	J2000.0	卫星截止高度角	10°
IGS站坐标约束	(0.05, 0.05, 0.05)	工程网坐标约束	(100, 100, 100)

网平差处理采用武汉大学测绘学院研发的 Co-saGPS V5.13 软件。将 7 个 CORS 站 ITRF 框架下的三维坐标,利用式(1)~式(3)实现坐标框架与历元转换,以获得 CGCS2000 坐标系下的三维坐标,将其作为 GPS 网平差的起算坐标,并选取合格的独立基线进行网的三维无约束平差计算,以获得首级 GPS 控制点 A(位于珠海)、B(位于香港)的 CGCS2000 坐标系下的三维坐标与精度指标。

根据大桥独立坐标系平差的需要,删去与 7 个 CORS 站有关的所有基线向量及方差-协方差阵等观测量,以 A 点和 B 点的 CGCS2000 坐标系下的三维直角坐标作为工程网平差的起算坐标,再重新选取合格的独立基线进行大桥首级 GPS 网平差处理。

### 三、基线处理质量评估方法

#### 1. NRMS 值分析

GAMIT 软件基线解算结果 o-file 或 q-file 中,标准化均方根误差(normalized root mean square, NRMS)用来表示单时段解算出的基线值偏离其加权平均值的程度,是从历元的模糊度解算中得出的残差<sup>[12]</sup>。NRMS 值是衡量 GAMIT 软件基线解算结果的一个重要指标,其计算公式为

$$NRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sigma_i^2}} \quad (4)$$

式中, $X_i$ 、 $\bar{X}$  分别为基线向量某分量值和其加权平均值,对应的方差为  $\sigma_i^2$ ;  $n$  为基线条数。

由于 GAMIT 软件采用全组合网解的方式解算基线向量,所以同步环闭合差在基线处理完时已经进行了分配(同步环闭合差恒为零)。因此,可以将时段基线解算精度指标标准化均方根误差 NRMS 值作为同步环优劣检核的一个指标<sup>[13]</sup>。一般认为 NRMS 值在 0.12~0.5 内是合理的。根据国内外 GPS 数据处理经验, NRMS 值在 0.25 左右为最优。

本文对港珠澳大桥首级 GPS 控制网的基线处理,按 4 个时段分别解算,基线解算后 NRMS 值如表 2 所示。

表 2 NRMS 值

时段号	1	2	3	4
Prefit NRMS	0.252 65E +00	0.270 85E +00	0.239 31E +00	0.233 97E +00
Postfit NRMS	0.185 87E +00	0.184 50E +00	0.183 24E +00	0.183 11E +00

从表 2 可以看出,首级 GPS 基线解算的 4 个时段同步图形的标准化后均方差 NRMS 值在 0.18~0.19 内,这表明大桥首级 GPS 控制网基线解算是合理的。

#### 2. 基线重复性分析

基线重复性是衡量数据处理质量的重要指标之一。基线向量重复性和相对重复性的计算公式为<sup>[14]</sup>

$$R = \sqrt{\left( \frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - X_m)^2}{\sigma_{X_i}^2} \right) / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{X_i}^2}} \quad (5)$$

$$R_r = R/X_m \quad (6)$$

式(5)~式(6)中, $R$  为基线向量的重复性; $R_r$  为基线向量的相对重复性; $n$  为同一基线的总观测时段数; $X_i$  为第  $i$  时段的基线分量(N, E, U)或边长; $\sigma_{X_i}^2$  是该时段  $i$  相应于  $X_i$  分量的方差; $X_m$  为单天解各时段基线向量或边长的加权平均值,计算公式为

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i / \sigma_{X_i}^2}{\sum_{i=1}^n 1 / \sigma_{X_i}^2} \quad (7)$$

进一步以基线重复性为观测值,用线性拟合求出重复性的常数部分和与边长成比例的部分为<sup>[15]</sup>

$$R = a + bL \quad (8)$$

为了分析港珠澳大桥首级 GPS 控制网基线处理的质量情况,各条基线向量分量或边长的重复性值统计分析如图 2 所示。

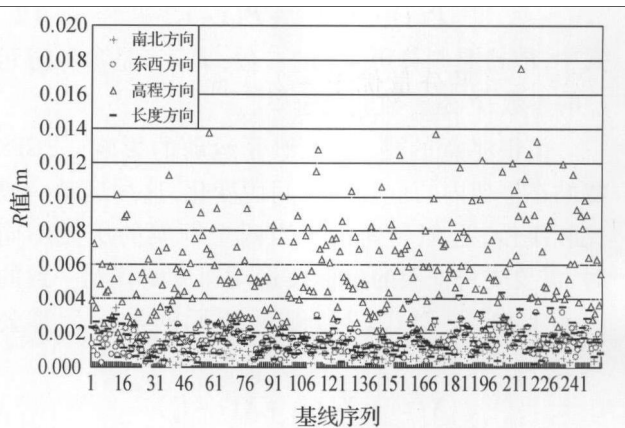


图 2 重复性值统计分析

从图 2 可以反映出,所有基线向量重复性在南北方向平均值为 1.3 mm,最大值在 13 号基线,值为 3.5 mm;东西方向平均值为 1.5 mm,最大值在 204 号基线,值为 4.1 mm;高程分量平均值为 17.5 mm,最大值在 213 号基线,平均值为 5.8 mm;边长方向平均值为 1.6 mm,最大值在 204 号基线,值为 4.3 mm。

为分析所有基线向量重复性的变化趋势特性,

对各条基线分量重复性与边长的关系进行线性拟合,结果如表3所示。

表3 基线(分量及边长)重复性与边长的关系

	南北	东西	垂直	边长
基线重复性	1.2 mm + $0.1 \times 10^{-8}$	1.2 mm + $1.3 \times 10^{-8}$	5.4 mm + $1.3 \times 10^{-8}$	1.3 mm + $1.1 \times 10^{-8}$

### 3. 基线解算中误差分析

为了分析首级GPS控制网基线解算的精度情况,对GAMIT解算的4个时段所有的基线向量的水平分量、垂直分量的中误差作数值分析,如图3所示。

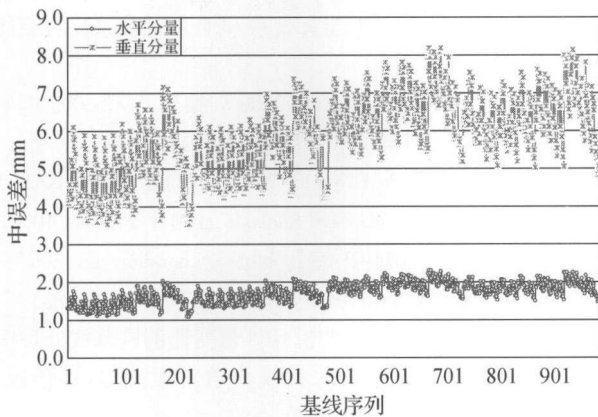


图3 基线中误差精度分析

从图3可以反映出,首级GPS控制网基线处理精度在水平分量优于 $\pm 2.4$  mm,垂直分量优于 $\pm 8.3$  mm。这表明首级GPS网的基线解算精度完全满足GPS控制网相邻点间基线水平分量(中误差 $\leq \pm 5$  mm)和垂直分量(中误差 $\leq \pm 10$  mm)精度指标要求。

### 4. 其他精度指标分析

另外还对GPS基线的重复基线较差、异步环闭合差等进行了质量检核,均满足相应规范及设计要求。限于篇幅,未能一一列出。

综上所述,首级GPS控制网的整体外业观测方案合理,数据质量较高,内业数据处理基线解算精度高。

## 四、网平差处理精度评估方法

### 1. 基线三维分量改正数分析

为检验和评估首级GPS网平差处理的精度情况,本文对所选的独立基线向量三维分量残差改正进行数值分析,如图4所示。

从图4可以看出,首级GPS网所选独立基线向

量经过网平差处理后,对于基线向量的3个分量(X、Y、Z)的改正量,X方向分量的改正数在 $-5.2 \sim 5.7$  mm内;Y方向分量的改正数在 $-12.0 \sim 11.1$  mm内;Z方向分量的改正数在 $-9.3 \sim 6.2$  mm内。各基线向量三维分量的改正量均在限差范围之内,满足A级GPS网规定的精度指标要求。

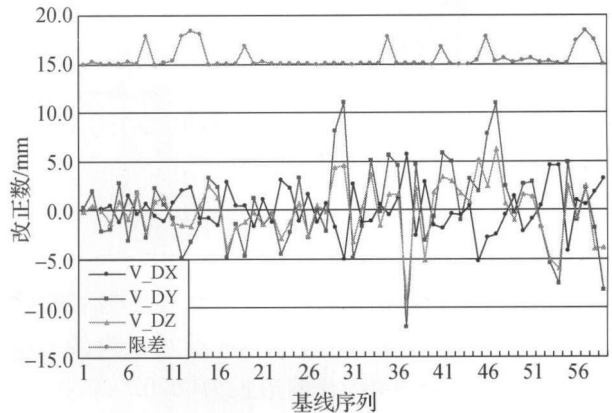


图4 三维分量改正数值分析

### 2. 点位坐标精度分析

为分析首级网控制点的点位坐标估值精度情况,对首级GPS网平差后的点位结果进行精度统计分析,如图5所示。

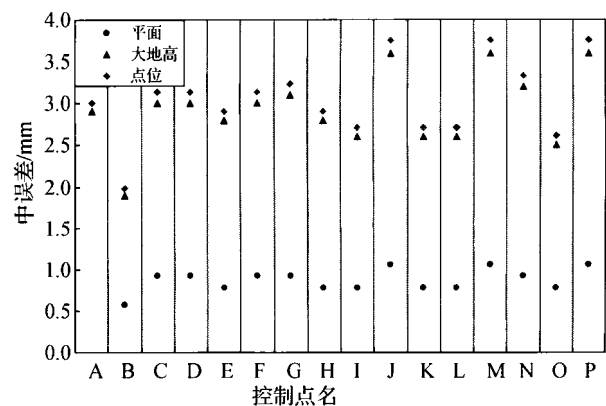


图5 点位精度分析

从图5可以看出,首级GPS网各测站点位精度在平面方向上优于 $\pm 1.2$  mm,高程方向上优于 $\pm 3.7$  mm,点位精度优于 $\pm 3.9$  mm;最弱点在M点,所有测站点位精度满足设计书(中误差 $\leq \pm 5$  mm)的精度指标要求。

### 3. 基线边长相对中误差分析

为分析平差后基线边长中误差相对于基线长度的精度情况,对网平差后的基线边长相对精度进行了统计分析,如图6所示。

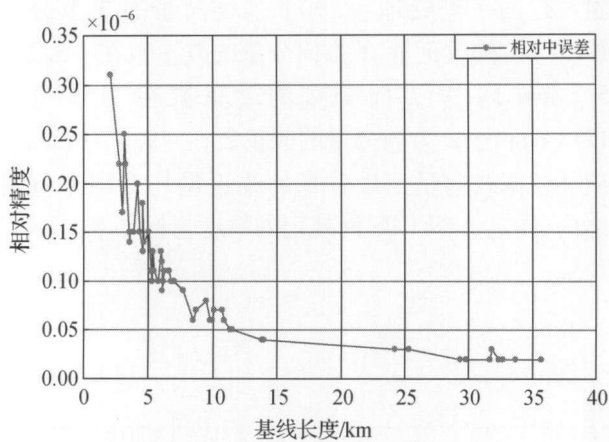


图6 边长相对精度分析

从图6可以看出,对于首级GPS网平差后的基线边长相对精度,基线长小于15 km的边长为 $(0.04 \sim 0.31) \times 10^{-6}$ ,15~40 km的边长为 $(0.02 \sim 0.04) \times 10^{-6}$ ;基线边长平均相对精度为 $0.1 \times 10^{-6}$ 。最弱边基线长为2 090.516 m,相对中误差为 $1/322.9 \times 10^{-4}$ ,即为 $0.31 \times 10^{-6}$ 。

因此,首级GPS网基线边长相对精度均优于GPS平面控制网同岸最弱边边长相对精度(相对中误差 $\leq 1/30 \times 10^{-4}$ )和跨海最弱边边长相对精度(相对中误差 $\leq 1/100 \times 10^{-4}$ )的允许精度指标。对图5~图6的数值分析表明:首级GPS网平差处理结果精度较高。

## 五、结束语

本文以港珠澳大桥GPS首级控制网的观测数据为基础,探讨了高精度GPS控制网数据处理的关键技术,提出了采用基准点技术和卫星轨道固定技术进行基线解算的思路,并对数据处理精度进行了分析。最后总结出了一套高精度GPS大型桥梁工程控制网数据处理与质量评估方法,利用文中算例证明了本文方法的应用可获得较高精度的测量成果,为今后大型桥梁工程的GPS应用提供参考和借鉴。

## 参考文献:

- [1] 张建军,吴迪军,李剑坤,等. 港珠澳大桥首级控制网复测[J]. 地理空间信息,2010,8(2):134-136.
- [2] 李毓麟,刘经南,葛茂荣,等. 中国国家A级GPS网的数据处理和精度评估[J]. 测绘学报,1996,25(2):81-86.
- [3] 陈俊勇. 中国现代大地基准——中国大地坐标系系统2000(CGCS2000)及其框架[J]. 测绘学报,2008,37(3):269-271.
- [4] 蒋志浩,张鹏,秘金钟,等. 基于CGCS2000的中国地壳水平运动速度场模型研究[J]. 测绘学报,2009,38(6):471-476.
- [5] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005.
- [6] 顾国华. 参考框架、坐标变换和地壳运动[J]. 测绘通报,2006(8):24-27.
- [7] 于强,易长荣,占惠. ITRF2000转换到CGCS2000框架的分析[J]. 全球定位系统,2009(5):49-51.
- [8] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT Release 10.3. [EB/OL]. [2011-01-03]. [http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT\\_Ref\\_10.35.pdf](http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref_10.35.pdf).
- [9] 姜卫平,刘经南,叶世榕. GPS形变监测网基线处理中系统误差的分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2001,26(3):196-199.
- [10] WARREN D, RAQUET J. Broadcast vs. Precise GPS Ephemerides; a Historical Perspective[J]. GPS Solutions, 2003(7):151-156.
- [11] 许才军,张朝玉. 地壳形变测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009.
- [12] 曾旭平,刘元良,杨晓滨. 青岛海湾大桥首级控制网高精度GPS数据处理[J]. 公路,2006(7):57-60.
- [13] DIXON T H. First Epoch Geodetic Measurement with the Global Positioning System across the Northern Caribbean Plate Boundary Zone[J]. Journal of Geophysical Research, 1991(96): 2397-2415.
- [14] LIU Jingnan, GE M. Data Analysis of '92 GPS Campaign in China[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995,20(1):40-45.