

DOI: 10.7672/sgjs2025240053

基于 GNSS 的测量放样技术在六枝特大桥主墩爬模施工中的应用*

肖云¹, 玉进勇¹, 周国云², 吴南山¹, 梁利文¹

(1. 柳州黔桥技术有限公司, 广西 柳州 545112; 2. 贵州路桥集团有限公司, 贵州 贵阳 550001)

[摘要] 在桥梁高墩液压爬模施工中,模板定位精度是高墩线形控制的关键,而模板定位精度又取决于测量放样精度。传统全站仪与激光铅垂仪测量方法受环境、气候和人为因素影响大,且人工工作量大,实时性差。在六枝特大桥主墩施工中引入基于 GNSS 的测量放样技术,实现模板定位的自动监测,为模板姿态调整提供实时参数。应用结果表明,基于 GNSS 的测量放样技术在模板定位监测中具有良好的精确度和可靠性,同时具有全天候、实时性、人工成本低等优点。

[关键词] 桥梁;全球导航卫星系统(GNSS);测量;液压爬模;定位;施工技术

[中图分类号] U445.55⁺9;U445.463

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0053-04

Application of GNSS-based Measurement Lofting Technology in Climbing Formwork Construction of the Main Pier of Liuzhi Super Large Bridge

XIAO Yun¹, YU Jinyong¹, ZHOU Guoyun², WU Nanshan¹, LIANG Liwen¹

(1. Liuzhou Qianqiao Technology Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545112, China;

2. Guizhou Road and Bridge Group Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: In construction of hydraulic climbing formwork for high piers of bridges, the positioning accuracy of formwork is the key to the linear control of high piers, and the positioning accuracy of formwork depends on the accuracy of measurement and lofting. The measurement methods of traditional total station and laser plummet apparatus are greatly affected by environment, climate and human factors, and the manual workload is large, the real-time performance is poor. In construction of the main pier of Liuzhi Super Large Bridge, the GNSS-based measurement lofting technology is introduced to realize the automatic monitoring of the formwork positioning and provide real-time parameters for the formwork attitude adjustment. The application results show that the GNSS-based measurement lofting technology has good accuracy and reliability in formwork positioning monitoring, and has the advantages of all-weather, real-time and low labor cost.

Keywords: bridges; global navigation satellite system (GNSS); measurement; hydraulic climbing formwork; positioning; construction

0 引言

在山区大跨度桥梁建设中,因受地形影响,常采取高墩设计。高墩线形控制是高墩施工难点,其控制精度关键在于模板的定位精度,而模板的定位精度又取决于测量放样的准确性。传统施工多采

用全站仪与激光铅垂仪配合使用的方法进行高墩线形控制^[1-2],该方法不足之处在于,采用人工测量成本高、效率低,且易受专业测量人员在岗不稳定因素影响;不能全天候实时监测,数据不连续、滞后,难以为施工提供实时指导参数;受通视、作业环境和气候因素影响大。全球导航卫星系统(GNSS)硬件和软件的不断发展,以及我国北斗技术发展成熟,为桥梁施工和安全监测提供了新机遇,在偏位、

* 贵州省交通运输厅科技项目(2023-122-005)

[作者简介] 肖云,高级工程师, E-mail: 1224673365@qq.com

[收稿日期] 2024-11-20

变形监测等方面得到不少应用^[3-8],也为解决上述问题提供了新思路。结合贵州纳晴高速公路六枝特大桥工程,探讨基于 GNSS 的测量放样技术在桥梁爬模施工监测中应用的可行性和优越性。

1 工程概况

六枝特大桥是贵州省纳雍—兴义国家高速公路纳雍—晴隆段的控制性工程,其桥型布置为 $5\times 40\text{m}$ 预应力混凝土 T 梁+ $(166\text{m}+3\times 320\text{m}+166\text{m})$ 预应力混凝土空腹式连续刚构箱梁+ $13\times 40\text{m}$ 预应力混凝土 T 梁,最大跨径 320m,主桥长 1 292m,全桥长 2 023.5m。桥梁单跨最大跨径 320m,最大墩高 196m,箱梁宽度 16.55m,桥面距谷底最大垂直高度 315m。其中,其主墩高度、单跨跨径、桥长目前在同类型桥梁中均排名世界第一。

六枝特大桥有 4 个主墩,空腹区根部以下高度分别为 163,145,163,106m,均采用双肢变截面空心薄壁墩,采用液压爬模方法施工。由于主墩较高,采用分阶段施工方式,线形控制难度大,特别是由于每个主墩有 4 个肢,共 16 个工作面,施工时在模板闭合、混凝土浇筑前后均需测量定位、复核,如采用传统的全站仪测量方法,测量工作量巨大,由于墩柱很高使得测量视线易受阻,需多次更换观测点及控制点,加之桥址处常年多雨多雾,受视通影响大,不仅操作难度大,还难以控制测量精度,同时由于采取人工、间断性测量,无法实现实时监测。为此,引入 GNSS 进行模板定位监测。

2 GNSS 测量放样系统设计

2.1 GNSS 监测原理

GNSS 可单机实现定位及定向功能。六枝特大桥主墩模板定位监测系统主要包括北斗卫星、基准站、流动站和云服务器。为了得到高精度测量数据,采用 RTK 测量模式。RTK 是以载波相位观测量为根据的实时差分 GNSS 测量模式,其工作原理是将 1 台接收机置于基准站上,另一台或几台接收机置于载体(称为流动站)上,基准站和流动站同时接收同一时间、同一 GNSS 卫星发射的信号,基准站所获得的观察值与已知位置信号进行比较,得到 GNSS 差分改正值,然后将此改正值通过无线电数据链电台及时传递给共视卫星的流动站优化其 GNSS 观察值,从而得到流动站较准确的实时位置^[9]。监测数据通过网络实时上传云服务器,云服务器对信息进行处理,计算偏移量并传输到液压爬模控制中心,控制中心根据结果发出指令进行模板位置调整,同时云服务器将结果显示于计算机和手机终端。其监测原理如图 1 所示。



图 1 GNSS 模板监测原理

Fig. 1 Formwork monitoring principle by GNSS

2.2 GNSS 测量放样系统组建

2.2.1 基站设置

基站设在桥址附近,要求环境空旷、地基稳定、连接牢固。通过远程云测量得到该点的精确坐标。为提高监测精度,基站要求接收到的卫星数量>20 颗,<20 颗需另选基站位置。基站一旦确定,在整个工程测量定位期间不允许移动,后续测量都是以此基站位置进行差分运算。

2.2.2 流动站(测点)布设

流动站(测点)布设在模板顶面,每块模板设置 2 个,每套模板共 8 个(1~8 号),每个桥墩 4 根墩柱,共设置 32 个流动站(测点),如图 2 所示。每块模板的流动站位置要求固定,后续测量都必须一一对照。

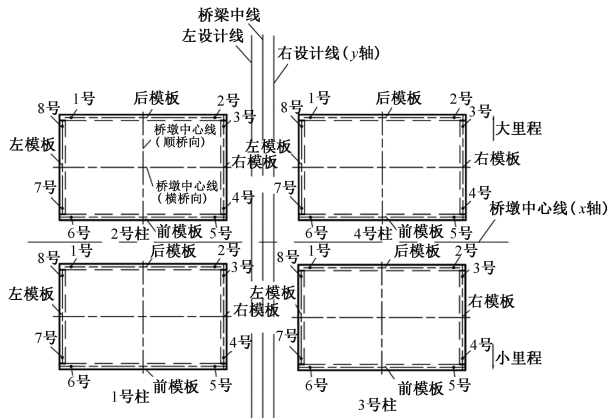


图 2 流动站布设

Fig. 2 Layout of rover stations

3 坐标转换

六枝特大桥设计坐标系统采用 1980 西安大地坐标系,高程系统采用 1985 国家高程基准。GPS 采用 WGS84 大地坐标系,BDS 采用 CGCS2000 大地坐标系,同一测点在 2 个坐标系的坐标一致^[10]。为精确计算流动站与设计位置的水平偏差以便确定模板调整参数,需将大地坐标转换为高斯平面投影坐

标。坐标转换步骤为 WGS84 或 CGCS2000 大地坐标-1980 西安 80 直角坐标-1980 西安大地坐标-高斯平面投影坐标。坐标转换通过编程实现。

4 基线设置与距离计算

4.1 基线与基线点设置

根据桥梁设计确定基线,基线与桥梁轴线平行,在基线上适当位置设基线点,在本项目中设 3 个基线点,分别为 5 号墩基线点 A、7~8 号墩中间基线点 B 和 10 号墩基线点 C,如图 3 所示。基线和基线点作为计算的基准,其中 6 号墩以 5 号墩基线点 A 为计算基准,7、8 号墩以 7~8 号墩中间基线点 B 为计算基准,9 号墩以 10 号墩基线点 C 为计算基准。在实际监测中,为方便计算和直观显示,以右幅路线设计线(右设计线)为 y 轴、每个桥墩中心线为 x 轴,通过测定测点到右设计线的实时距离 x、测点到桥墩中心线的实时距离 y,并与设计值进行比较得出偏移量。桥梁右设计线平行于基线和桥梁轴线,右设计线与基线距离 L_1 、基线点与桥墩中心线距离 L_2 需提前测定。

4.2 距离计算

4.2.1 基础数据测定

基础数据为偏移计算的必要条件,包括:①基线点坐标 $A(x_a, y_a), B(x_b, y_b), C(x_c, y_c)$;②右设计线与基线距离 L_1 ;③基线点与桥墩中心线距离 L_2 ,包括 5 号墩基线点 A 到 6 号墩中心线距离、7~8 号墩中间基线点 B 到 7 号墩中心线距离、7~8 号墩中间基线点 B 到 8 号墩中心线距离、10 号墩基线点 C 到 9 号墩中心线距离;④根据任 2 个基线点的坐标求出基线在高斯平面内的直线方程。

$$Ax + By + C = 0$$

(1)

4.2.2 x 值计算

在模板安装过程中,流动站实时监测测点坐标并传输至服务器;服务器将坐标转换为高斯投影坐标,然后计算出测点到基线距离 l_1 ,再减去右设计线与基线距离 L_1 ,得出测点到右设计线距离 x 。如测

点 M 的高斯投影坐标为 (x_0, y_0) ,则有:

$$x = l_1 - L_1 = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} - L_1$$

(2)

当测点 M 在桥梁左幅(即 1,2 号柱)时, $L_1 > l_1$, x 为负值;当测点 M 在桥梁右幅(即 3,4 号柱)时, $L_1 < l_1$, x 为正值。

4.2.3 y 值计算

以 6 号墩为例,根据基线点坐标 $A(x_a, y_a)$ 和测点坐标 $M(x_0, y_0)$ 可得两点间距离:

$$s = \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2}$$

(3)

$$l_2 = \sqrt{s^2 - l_1^2} = \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2 - l_1^2}$$

(4)

$$y = l_2 - L_2 = \sqrt{(x_0 - x_a)^2 + (y_0 - y_a)^2 - l_1^2} - L_2$$

(5)

当测点 M 在桥墩中心线右边(小里程端,即 1,3 号柱)时, $L_2 > l_2$, y 为负值;当测点 M 在桥墩中心线左边(大里程端,即 2,4 号柱)时, $L_2 < l_2$, y 为正值。

5 模板姿态调整

根据 GNSS 监测到的偏移情况,利用液压爬模智能控制系统进行模板姿态调整,以理论值为控制目标调整 x, y 值的偏移量到允许范围,以达到模板水平定位目标,从而实现主墩轴线偏位控制和墩身几何尺寸控制;通过控制前、后节段模板的定位精度,实现墩身垂直度控制。模板的垂直度利用倾角传感器测校。对于变截面,根据设计坡度和高度,结合 GNSS 定位和倾角传感器实现坡度控制。

6 GNSS 与全站仪测量数据对比

为验证 GNSS 测量效果,在部分阶段利用全站仪对 GNSS 测量数据进行校核对比,GNSS 和全站仪水平测量数据对比如表 1 所示,高程测量数据对比如表 2 所示。由表 1,2 可看出,GNSS 和全站仪水平偏差 $\leq 5\text{mm}$,高程偏差 $\leq 20\text{mm}$,吻合度较好。

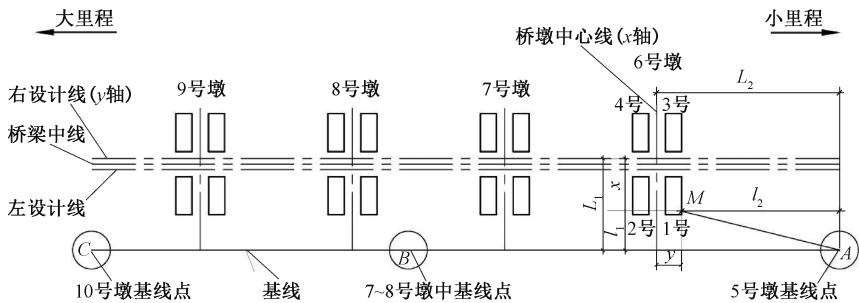


图 3 基线与基线点设置

Fig. 3 Setting for baseline and baseline points

表 1 GNSS 与全站仪水平测量数据对比

Table 1 Comparison of the level measurement data for GNSS and total station										m
日期/ (年-月-日)	墩柱	项目	1 号测点		2 号测点		3 号测点		4 号测点	
			x	y	x	y	x	y	x	y
2022-08-27	6 号墩 4 号柱	全站仪	-3.246	10.031	-11.679	10.003	-12.354	9.582	-12.340	7.616
		GNSS	-3.250	10.034	-11.681	10.008	-12.349	9.587	-12.336	7.614
		全站仪与 GNSS 差值	0.004	-0.003	0.002	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	0.002
2022-08-28	6 号墩-1 号柱	全站仪	13.711	-3.997	4.699	-4.004	4.670	-5.230	4.664	-9.151
		GNSS	13.716	-3.994	4.695	-3.999	4.673	-5.233	4.666	-9.153
		全站仪与 GNSS 差值	-0.005	-0.003	0.004	-0.005	-0.003	0.003	-0.002	0.002
2022-08-29	6 号墩-3 号柱	全站仪	-3.027	-3.994	-11.502	-4.011	-12.362	-4.619	-12.341	-9.490
		GNSS	-3.031	-3.989	-11.505	-4.008	-12.366	-4.617	-12.346	-9.482
		全站仪与 GNSS 差值	0.004	-0.005	0.003	-0.003	0.004	-0.002	0.005	-0.003
2022-08-29	7 号墩-2 号柱	全站仪	12.887	10.017	6.039	10.015	4.820	8.615	4.844	4.494
		GNSS	12.887	10.021	6.034	10.020	4.816	8.635	4.840	4.499
		全站仪与 GNSS 差值	0.000	-0.004	0.005	-0.005	0.004	-0.020	0.004	-0.005

表 2 GNSS 与全站仪高程测量数据对比

Table 2 Comparison of the elevation measurement data for GNSS and total station								m
序号	时间/(年-月-日 时:分:秒)		墩柱	测点	全站仪	北斗	偏差	
1	2022-09-06	17:58:54	8 号墩-4 号柱	1 号	143.446	143.455	0.009	
2	2022-09-07	18:57:41	9 号墩-4 号柱	1 号	76.066	76.049	0.017	
3	2022-09-13	10:31:54	7 号墩-4 号柱	2 号	146.440	146.436	0.004	
4	2022-09-15	10:52:59	8 号墩-4 号柱	2 号	153.800	153.803	0.003	
5	2022-09-18	17:21:00	7 号墩-2 号柱	1 号	150.496	150.506	-0.010	
6	2022-09-19	10:01:00	7 号墩-3 号柱	3 号	1 227.442	1 227.440	0.002	
7	2022-09-20	15:52:00	8 号墩-4 号柱	1 号	1 213.301	1 213.297	0.004	
8	2022-09-20	15:53:00	8 号墩-4 号柱	2 号	1 213.248	1 213.247	0.001	
9	2022-09-20	15:55:00	8 号墩-4 号柱	6 号	1 213.299	1 213.284	0.015	
10	2022-09-26	15:36:00	7 号墩-2 号柱	1 号	1 236.671	1 236.671	0.000	
11	2022-09-26	15:38:00	7 号墩-2 号柱	6 号	1 236.656	1 236.670	-0.014	
12	2022-09-26	15:41:00	7 号墩-2 号柱	5 号	1 236.666	1 236.674	-0.008	
13	2022-09-27	10:30:00	7 号墩-2 号柱	1 号	1 237.384	1 237.401	-0.017	
14	2022-09-27	10:30:00	7 号墩-2 号柱	3 号	1 237.372	1 237.355	0.017	
15	2022-09-27	10:30:00	7 号墩-2 号柱	4 号	1 237.371	1 237.380	-0.009	
16	2022-09-27	10:30:00	7 号墩-2 号柱	6 号	1 237.408	1 237.402	0.006	
17	2022-09-28	16:30:00	7 号墩-4 号柱	1 号	1 203.746	1 203.731	0.015	
18	2022-09-28	16:30:00	7 号墩-4 号柱	3 号	1 203.742	1 203.734	0.008	
19	2022-09-28	16:30:00	7 号墩-4 号柱	6 号	1 203.730	1 203.715	0.015	
20	2022-09-28	16:30:00	7 号墩-4 号柱	8 号	1 203.720	1 203.737	-0.017	

7 结语

六枝特大桥主墩模板液压爬模施工采用基于 GNSS 的测量放样技术进行桥墩模板定位,拓展了 GNSS 应用领域。应用结果表明,其测量精度和稳定性均达到了相应的技术标准,满足施工要求。与全站仪相比,该技术具有独特的优势,如不受环境、气候、视通影响,可实现全天候实时测量,即时为模板姿态调整提供参数;可实现数据实时采集、传输、云端保存和共享;人工成本低、安全性好等。

参考文献:

[1] 贾康田. 桥梁高墩施工线形控制技术[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 44-47.
JIA K T. Control technique of linear form in high bridge piers construction[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2009,

31(5): 44-47.
[2] 廖文华. 宜万铁路渡口河特大桥 128m 高墩施工控制技术[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(8): 79-81.
LIAO W H. Construction control technology of 128m high pier of Dukouhe Bridge on Yiwan Railway[J]. Railway standard design, 2007, 51(8): 79-81.
[3] 谢鸿, 张涛. 北斗定位技术在山区桥梁高墩纠偏监测中的应用[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(4): 115-118.
XIE H, ZHANG T. Application of Beidou positioning technology in the rectification monitoring of high pier of bridge in mountainous area [J]. Hunan communication science and technology, 2019, 45(4): 115-118.
[4] 李鹏. 北斗与 GPS 在桥梁变形监测中的对比分析[J]. 北京测绘, 2020, 34(1): 92-95.

6.3 关键技术创新

- 1)微生物-植物协同机制:构建根际微生物群落(如丛枝菌、根真菌),促进磷素活化效率提升 35%。
- 2)低碳材料研发:利用粉煤灰替代 20% 的水泥,碳排放强度降低 18%。
- 3)智能监测体系:集成温、湿度传感器与无人机巡检,预警准确率达 90%。

7 结语

植被混凝土技术通过工程固坡与生态修复的有机结合,成功解决了高陡岩质边坡的生态恢复难题。其技术优势体现在抗冲刷性能强(抗剪强度提升 40%)、生态效益显著(3 年形成稳定群落)、经济性突出(综合成本降低 30%)。未来通过智能监测、微生物强化等技术创新,该技术将在“双碳”目标背景下发挥更大作用,为国土空间生态修复提供关键技术支撑。

未来研究方向和技术展望如下。

- 1)菌种功能强化:开发耐极端气候(如高寒、干旱)的复合菌剂,拓展技术适用范围。
- 2)智能监测系统:结合 AI 算法预测植被生长状态,实现养护决策精准化。
- 3)碳汇计量标准化:建立植被混凝土修复项目的碳汇核算体系,推动生态价值市场化。

参考文献:

[1] 高翔宇. 微生物菌剂在边坡生态修复中的应用进展[J]. 环境科学与技术,2025,48(4):102-108.

GAO X Y. Advances in the application of microbial agents in ecological restoration of slope [J]. Environmental science and technology, 2025,48(4):102-108.

(上接第 56 页)

LI P. Comparative analysis of Beidou and GPS in bridge deformation monitoring [J]. Beijing surveying and mapping, 2020,34(1):92-95.

[5] 王晓明,曾旭平,马鑫程,等. GNSS 精密控制网在特大型桥梁施工监测中的应用——以虎门二桥为例[J]. 全球定位系统, 2019,44(5):106-110.

WANG X M, ZENG X P, MA X C, et al. Application of GNSS precision control network in super large bridge construction monitoring;a case of the Second Humen Bridge[J]. GNSS world of China,2019,44(5):106-110.

[6] 梅秀道,钟继卫,史晶. GNSS-RTK 在大跨斜拉桥施工期位移监测中的应用[J]. 桥梁建设,2020,50(4):36-41.

MEI X D, ZHONG J W, SHI J. Application of GNSS-RTK to displacement monitoring in construction period of long-span cable-stayed bridge[J]. Bridge construction,2020,50(4):36-41.

[7] 王华平,林忠和,马俊. 基于 GNSS-RTK 技术的超高层结构施工期水平变形实测[J]. 施工技术(中英文),2022,51(8):41-44.

[2] 樊剑峰. 植被混凝土护坡技术在高陡岩石边坡生态防护中的应用[J]. 工程技术研究,2024,9(6):85-87.

FAN J F. Application of vegetation concrete slope protection technology in ecological protection of high and steep rock slope [J]. Engineering and technological research,2024,9(6):85-87.

[3] 湖北金源绿通公司. CBS 植被混凝土 AB 菌技术白皮书 [Z]. 2025.

Hubei Jinyuan Lütong Company. CBS vegetation concrete AB bacteria technology white paper [Z]. 2025.

[4] 朱骏灵,王晓华,梁楠,等. 广西桂林高陡岩质边坡生态修复技术研究及应用[J]. 勘察科学技术,2025(1):56-61.

ZHU J L, WANG X H, LIANG N, et al. Research and application of ecological restoration technology for high-steep rock slopes in Guilin, Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. Site investigation science and technology,2025(1):56-61.

[5] 高翔宇. 挖方岩石边坡绿化技术研究[J]. 亚热带水土保持, 2025,37(2):12-17.

GAO X Y. Research on greening techniques for excavated rock slopes [J]. Subtropical soil and water conservation, 2025, 37(2):12-17.

[6] 三峡大学. 植被混凝土护坡绿化技术专利文件[Z]. 2024.

China Three Gorges University. Patent document for vegetation concrete slope protection and greening technology [Z]. 2024.

[7] 王来,杜昱樊,陈奎娟. 不同水环境梯度下水生植物细根丛枝菌根真菌感染特征研究[J]. 生物化工,2025,11(2):184-186,190.

WANG L, DU Y F, CHEN K J. Study on the characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi infection of fine roots of aquatic plants in different water environmental gradients [J]. Biological chemical engineering,2025,11(2):184-186,190.

[8] 深圳新闻网. 植被混凝土技术破解边坡绿化难题[N]. 2021-05-10(A03).

Shenzhen News Network. Vegetation concrete technology solves the problem of slope greening [N]. 2021-05-10(A03).

WANG H P, LIN Z H, MA J. Horizontal deformation measuring of a super high-rise building during the construction stage based on GNSS-RTK technology [J]. Construction technology, 2022, 51(8):41-44.

[8] 赵帅,王胜,杨淑娟,等. 基于 GNSS 技术的结构位移监测应用研究进展[J]. 施工技术(中英文),2022,51(21):6-10,16.

ZHAO S, WANG S, YANG S J, et al. Research progress of structural displacement monitoring based on GNSS technology [J]. Construction technology,2022,51(21):6-10,16.

[9] 范晓曼. 整体 GNSS RTK 模型及方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2021.

FAN X M. Research on integration GNSS RTK model and method [D]. Wuhan:Wuhan University,2021.

[10] 魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学,2008,28(5):1-5.

WEI Z Q. China geodetic coordinate system 2000 and its comparison with WGS84 [J]. Journal of geodesy and geodynamics,2008,28(5):1-5.