

文章编号: 1000-050X(2001)06-0514-04

文献标识码: A

# 长距离跨海高程基准传递方法的研究

李建成<sup>1</sup> 姜卫平<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 研究了利用 GPS 定位技术所确定的相对大地高差, 联合精确的大地水准面差距进行高程传递的方法。在洋山岛地区, 利用该方法将黄海高程由陆地传递到距离上海芦潮港 30km 的洋山岛上。传递后的高程与两种独立的潮位观测结果比较差值分别为 1cm 和 6cm, 传递后的两段高程差与洋山岛三等水准测量结果的独立高差比较为 0.2cm 和 0.7cm。

**关键词:** GPS; 大地水准面; 高程

中图法分类号: P228.4; P207

长距离跨海高程传递问题长期以来受到海洋大地测量学者的普遍关注。目前跨海高程基准传递的方法通常有静力水准法、动力水准法、GPS 水准法及常规大地测量法 4 种。静力水准法是采用连通管进行高程传递, 由于跨海距离较长, 因此不但对连通管的质量要求极高, 而且为了保持流体静力平衡, 必须保证填充物(连通管中的液体)中无气泡, 这一过程可通过流体动力学和化学两种方法实现。此外, 还需考虑气压差、密度差等因素对平衡状态的影响, 其花费十分昂贵。20km 的 Great Belt 海峡高程传递是世界上第一次应用流体静力水准法来完成的(Madsen, Tscherning, 1990)。动力水准法即验潮法, 或称之为海洋动力学法, 它需要长时间连续的潮位观测资料, 周期较长且需建立长期验潮站。常规大地测量方法常用的有精密水准测量和三角高程测量两种。精密水准测量无法实现长距离高程传递, 而采用三角高程测量的精度较低。其主要原因是受到大气折射的限制, 观测需要在不同的测站高度和不同高度的观测目标间往返测量天顶距, 且要求在不同时间段进行, 此外还需作相应的气候改正。我国海南岛高程基准的传递就是利用这一方法以大地四边形图形结构观测实施的。GPS 水准法是利用大地高差与大地水准面差距之差传递高程基准, 相对而言, 其所需经费较少, 周期也较短, 也比较方便实用。Madsen 和 Tscherning 成功地利用

GPS 水准将高程基准跨越 Great Belt 海峡传递到离陆地 20km 的岛上, 传递的高程基准与静力水准所得的结果相差 4~5cm (Madsen, Tscherning, 1990)。

大地高可由 GPS 精确地确定, 它与水准高相差一个似大地水准面高。因而, 只要求得高精度的似大地水准面高相对差值, 由下式便能求得具有相应精度的水准高差:

$$\Delta h = \Delta H - \Delta N$$

式中,  $\Delta H$  为大地高差;  $\Delta h$  为水准高差;  $\Delta N$  为似大地水准面高差。

在局部大地水准面确定方面, 由于近 20 年来重力测量技术和卫星重力探测技术的迅速发展, 重力场的逼近已取得了重大的进展。一些发达地区的局部或区域性重力场由于地面重力测量密度的改善, 以及 GPS 水准的应用, 分辨率已达几 km (如欧洲地区), 区域大地水准面的精度达 dm 级, 有的甚至达到 cm 级(李建成, 1993)。

洋山岛位于舟山群岛, 距上海最近约 30km, 用常规的几何测量方法来解决高程基准的传递很难甚至是不可能实现的。采用高精度 GPS 相对定位技术, 结合我国现有陆地、海洋重力资料及其他重力场信息和数据成果, 并运用国内外确定大地水准面的严密理论和算法来确定高精度的局部大地水准面, 可以将我国高程基准从上海市传递到离芦潮港 30km 的洋山岛上。

## 1 GPS 控制网设计及数据处理

按照有利于观测和长期保存的基本要求, 充分考虑 GPS 卫星接收的地理条件, 同时顾及到水准联测的方便性, 在洋山港区周围及陆地引测点处, 按国家 GPS B 级网有关技术要求, 共建立 8 个三等 GPS 埋石标点(李建成等, 1998)。

GPS 控制网由 14 个点组成, 其中陆地上 4 个, 包括 3 个国家三等水准点; 岛上 10 个点。利用 8 台 ASHTECH Z12 GPS 接收机进行同步观测, 全网由两个同步环组成。数据处理时, 将国际 IGS 跟踪站上海站加进来一起处理, 并将其作为起算的基准。网的结构如图 1 所示。

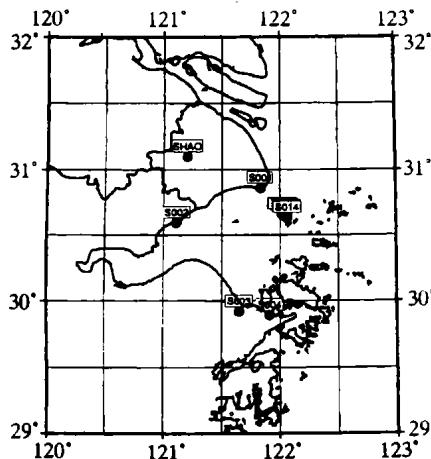


图 1 整网结构示意图

Fig. 1 The Sketch Map for the GPS Network

基线处理软件采用 GAMIT 软件, 星历采用 IGS 精密星历。基线处理方案如下: 由于洋山岛上的 GPS 点距离较短(1km 左右), 而陆地上的 GPS 点间距较长(大约在 80km 左右, 有的甚至超过 100km), 如将它们一起处理, 会影响处理的方法及结果精度。因此, 计算时采取分步的原则, 即先将陆地上所有的 GPS 点同岛上的一个点同时处理, 其目的是按中长基线所构成的 GPS 网将高精度的 GPS 坐标传递到岛上, 然后将岛上所有的点按短基线所构成的 GPS 网处理。图 2 为小洋山 GPS 点的分布图。

整体平差采用原武汉测绘科技大学研制的 PowerAdj, 其基准为一个国家 A 级点和两个 B 级点。先在 ITRF 框架下进行三维无约束平差, 然后进行三维约束平差, 采用三维约束平差结果作为最终结果。平差成果最弱点位中误差水平分量优于 0.007m, 高程分量优于 0.022m, 岛上点的高程分量中误差优于 0.010m。基线短边中误差优

于 0.004m, 长边相对中误差优于  $1.5 \times 10^{-7}$ , 达到了国家 B 级网的精度要求。

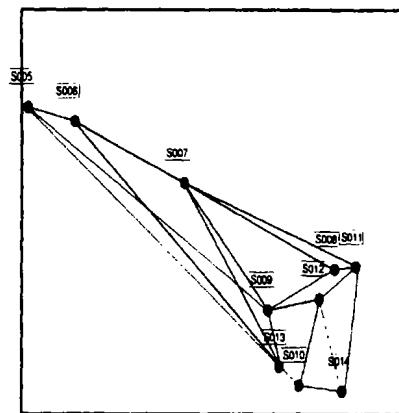


图 2 洋山岛上的控制点示意图

Fig. 2 The Sketch Map for GPS Points in Yangshan Island

## 2 似大地水准面的确定

在上海和浙江地区共有 7 个 GPS 水准点, 其中 5 个为国家 GPS B 级网点, 如图 3 所示。将其作为大地水准面的基本点控制。图 4 给出了小洋山 GPS 及重力点的分布图。在上海和浙江地区(经度  $119^{\circ}$  E ~  $124^{\circ}$  E, 纬度  $33^{\circ}$  N ~  $28^{\circ}$  N), 采用了 102 815 个重力点值。为了保持与目前国际重力局采用的椭球一致, 在计算中采用 GRS80(即 WGS84)椭球作为参考椭球。

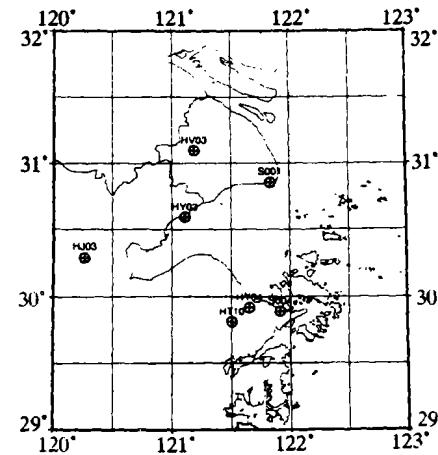


图 3 GPS 水准点的分布情况

Fig. 3 The Distribution of GPS/ Levelling Points

格网空间重力异常的内插计算采用点布格重力异常, 利用移去-恢复原理计算局部似大地水准面(李建成等, 1999)。利用点布格重力异常内插其相应的  $2'30''$  格网值时, 采用 Shepard 曲面内插方法。首先以  $2'30''$  为搜索半径, 且满足不少于有

5个点重力值进行推估,如果不满足这一条件,就逐次扩大其搜索半径,增加量为 $2'30''$ ,最大搜索半径限制为 $30'$ (宁津生等,1993)。

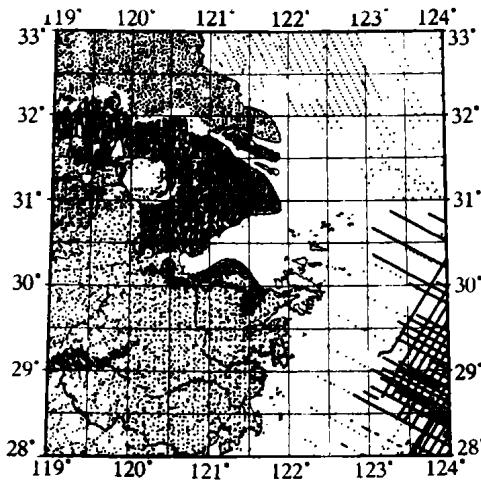


图4 重力点分布情况

Fig. 4 The Distribution of Gravity Points

对于 $2'30''$ 格网内没有实测重力值的情况,则采用原武汉测绘科技大学1994年研制的360阶次WDM 94作为参考重力场模型进行填补。最后利用 $2'30''$ 格网空间重力异常和WDM94模型,以及由一维Stokes卷积公式计算了大地水准面(宁津生等,1994)。

大地水准面高与似大地水准面高的转换关系为(Heiskanen, Moritz, 1967):

$$\zeta = N - \frac{\bar{g} - \gamma}{\gamma} h \approx N - \Delta g_B h$$

式中, $\bar{g}$ 为大地水准面和地面之间沿铅垂线的平均重力值; $\gamma$ 为椭球面和正常地形面之间沿正常垂线的平均正常重力值; $h$ 为正高; $\Delta g_B$ 为布格异常。所求得的似大地水准面如图5所示。

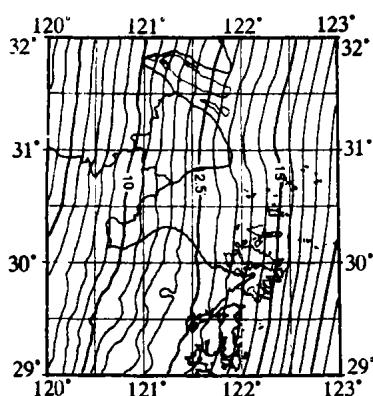


图5 上海、江浙地区似大地水准面

Fig. 5 The Quasi-geoid in Shanghai and Its Adjacent Areas

重力似大地水准面与GPS水准似大地水准面由于两者存在着各种误差,所以两种大地水准面存在着垂向偏差和水平倾斜差异。只考虑垂向

偏差,其数学表达式为(李建成等,1998):

$$\zeta_{\text{GPS}} = \zeta_{\text{G RA}} + B$$

式中, $\zeta_{\text{GPS}}$ 为GPS水准似大地水准面高; $\zeta_{\text{G RA}}$ 为重力似大地水准面; $B$ 为GPS水准似大地水准面高与重力似大地水准面的偏差。

### 3 成果分析

表1给出了分别采用WDM94和EGM96模型计算的已知GPS水准点上的大地水准面高同GPS水准大地水准面高的比较结果。从表1可知,WDM94模型结果优于EGM96模型,因此最终采用WDM94模型作为参考重力场。

表1 GPS大地水准面高与WDM94和EGM96模型值的比较/m

Tab. 1 Comparison between GPS Levelling Quasi-geoid Height and WDM94 Model and EGM96 Model/m

点名	WDM 94 差值	EGM 96 差值
HV03	-0.110	0.527
S001	-0.227	0.067
S002	0.380	0.805
S003	0.159	0.224
S004	0.148	0.298
HT10	0.313	0.137
HJ03	0.343	0.504

表2给出了点布格重力异常内插恢复的格网空间重力异常和由Stokes公式计算的 $2'30'' \times 2'30''$ 大地水准面高与GPS水准似大地水准面高比较结果。从表中可知,S003、S004、HT10和HJ03的GPS水准资料比较可靠,内符合精度也较高,因而在计算时只采用这4个点。

表2  $2'30'' \times 2'30''$ 大地水准面高与GPS水准似大地水准面高比较统计/m

Tab. 2 Comparison between  $2'30'' \times 2'30''$  Quasi-geoid Height and GPS Levelling Quasi-geoid/m

点名	差值
HV03	0.123
S001	0.017
S002	0.576
S003	0.258
S004	0.296
HT10	0.314
HJ03	0.241

利用S003、S004、HT10和HJ03的GPS水准资料和 $2'30'' \times 2'30''$ 重力大地水准面作为传递洋山及诸岛垂直基准的依据,所计算的大地水准面高与重力似大地水准面高比较统计结果在表3中

给出。表 3 表明, GPS 水准资料与重力似大地水准面的系统偏差为 0.277m, 标准差为  $\pm 0.033m$ 。

表 3  $2'30'' \times 2'30''$  大地水准面高与 S003、S004、HT10 和 HJ03 的 GPS 水准似大地水准面高比较统计/m

Tab. 3 Comparison between  $2'30'' \times 2'30''$  Quasi-geoid Height and GPS Levelling Quasi-geoid Height Determined by S003, S004, HT10 and HJ03/m

点数	最大值	最小值	平均值	均方差	标准差
4	0.314	0.241	0.277	$\pm 0.279$	$\pm 0.033$

## 4 传递结果的外部检核

### 4.1 几何水准联测的高程差与所求得的高程差比较

图 2 给出了小洋山 GPS 点的分布图, 其中 S008、S009 和 S010 按三等水准点联测的有关技术规定联测了水准高差, 所得的两个独立高差, 与本项目传递的高差比较结果由表 4 给出, 最小值和最大值分别为 0.002m 和 0.007m。

表 4 小洋山 GPS 重力水准与水准测量  
检核资料比较统计结果/m

Tab. 4 Comparison between GPS Levelling Quasi-geoid Height and the Data of Leveling/m

点名	大地高差	GPS 重力水准高差	水准高差
S009	-29.685	-29.718	-29.720
S008	19.299	19.217	19.224
S010			

### 4.2 利用潮位观测方法传递高程基面

利用小洋山 1997-08 ~ 1998-07 全年潮位观测数据, 根据有关理论, 结合沿岸各站的多年观测资料, 计算出小洋山多年的平均海平面(相对于上海吴淞基面)为 186cm, 由 GPS 水准引测的高程计算的平均海面为 185cm(相对于上海吴淞基面), 仅相差 1cm。

此外, 还采用了与上述独立的潮位资料进行了检核, 使用的资料为小洋山站 1997 年 12 月 20 日至 1998 年 12 月 24 日共 369d 的资料、1999 年 6 月 16 日至 7 月 16 日共 30d 的资料和上海、江浙地区沿岸各验潮站 19a 的资料。在计算得到小洋山理论最低潮面  $L$  值后, 并对  $L$  值进行了归化。用该方法传递高程的精度为 3.81cm。求得的小洋山平均海平面(相对于上海吴淞基面)为 191cm, 与由 GPS 引测计算的平均海面仅相差 6cm。

## 5 结语

本文利用 GPS 水准结合重力大地水准面将我国黄海高程传递到距上海 30km 的洋山岛上, 并将其传递的高差与大地测量几何水准结果进行内符合比较, 以及对海洋学潮位观测法的传递结果进行外部检核。比较结果表明, 其传递的高程基准可以满足工程建设对高程精度的要求。GPS 水准结合重力大地水准面进行长距离跨海高程基准引测是一种廉价、高效、可靠的方法。当陆海重力资料在密度和分布较好的情况下, 可望以更高的精度传递高程。

## 参 考 文 献

- 宁津生, 晁定波, 李建成. 由一维和二维 FHT 技术计算大地水准面高和垂线偏差的比较. 测绘遥感信息工程国家重点实验室 1992 ~ 1993 年报, 1993. 99 ~ 104
- 宁津生, 李建成, 晁定波, 等. WDM 94 360 阶地球重力场模型研究. 武汉测绘科技大学学报, 1994. 19(4): 283 ~ 291
- 李建成, 宁津生. 局部大地水准面精化的理论和方法. 见: 陈俊勇编. 祝贺陈永龄院士 90 寿辰大地测量学论文专集, 北京: 测绘出版社, 1999. 71 ~ 81
- 李建成. 物理大地测量中的谱方法: [ 学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993
- 李建成, 崔民元, 王明世, 等. 塔里木盆地高分辨率高精度大地水准面的确定. 塔里木石油勘探开发指挥部石油地球物理勘探局第三地质调查处, 武汉测绘科技大学, 1997
- 李建成, 刘经南, 姜卫平, 等. 洋山港 GPS 水准点引测课题研究报告. 武汉测绘科技大学, 1998
- 李建成, 刘经南, 晁定波, 等. 海南高精度高分辨率大地水准面的确定课题研究报告. 武汉测绘科技大学, 1998
- Heiskanen W A, Moritz H. Physical Geodesy. San Francisco-London: Freeman & Company, 1967
- Madsen F, Tscherning C C. The Use of Height Differences Determined by the GPS in the Construction Process of the Fixed Link across the Great Belt. XIX International Congress Helsinki, Finland 1990

作者简介: 李建成, 教授, 博士生导师, 现从事物理大地测量学和空间大地测量学的研究。代表成果: 全球重力场的确定, 局部重力场的逼近和卫星测量学在大地测量中的应用; 联合多种卫星测高数据分析全球和中国海海平面变化, 等。

E-mail: jc@wutsm.edu.cn

(下转第 532 页)

- national Hydrographic Review, 1999a, LXXVI(2): 93 ~ 102
- 6 黄谟涛, 管 铮, 翟国君, 等. 海洋重力测量网自检校平差. 测绘学报, 1999, 28(2): 162 ~ 171
- 7 Huang M T. Marine Gravity Surveying Line System Adjustment. Journal of Geodesy, 1995, 70(4): 158 ~ 165
- 8 Hunag M T, Zhai G J, Guan Z, et al. On the Compensation of Systematic Errors in Marine Gravity Measurements. Marine Geodesy, 1999b, 22(3): 183 ~ 194

**作者简介:**管铮,教授。现主要从事海洋重力场及海洋测量数据处理研究。

E-mail: nvsurvey@public.tjuc.com.cn

## Real-time Processing System for Marine Gravity Measurement

GUAN Zheng<sup>1</sup> OUYANG Yongzhong<sup>1</sup> HUANG Motao<sup>1</sup> LU Xiuping<sup>1</sup>

(1 Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road Tianjin, China 300061)

**Abstract:** The first set of real-time processing system for marine gravity measurement in China is introduced in this paper, including its hard and soft configurations, its technical specifications, the improvements in theory related to the data processing and its performances in test and applications.

**Key words:** marine gravity; real-time processing; error analysis

---

**About the author:** GUAN Zheng, professor. He is engaged in the studies of marine gravity field and data processing for marine surveying.  
E-mail: nvsurvey@public.tjuc.com.cn

(上接第 517 页)

## Height Datum Transference within Long Distance across Sea

LI Jiancheng<sup>1</sup> JIANG Weiping<sup>1</sup>

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract:** This paper focuses on the study of the height transference within long distance across sea, by combining ellipsoidal height of GPS with gravimetric geoidal height. Using this method, the Yellow Sea Height Datum is transferred to Yangshan Island which is 30 km faraway from Shanghai.

As an external check, the transferred heights of stations by the method are compared with those determined from two independent sets of gauge records, and the differences are 1.0 cm and 6.0 cm respectively. Moreover, the transferred height difference of two sections between the stations on the island are also compared with the measured ones precise leveling, which shows that the differences are 0.2 cm and 0.7 cm respectively.

**Key words:** GPS; geoid; elevation

---

**About the author:** LI Jiancheng, professor, Ph. D supervisor. His main research interests are the physical geodesy and space geodesy. His typical achievements include geopotential model determination, local gravity field approximation, altimetry application in geodesy, mean sea level variation using historic satellite altimeter data, etc.

E-mail: jcli@wtusm.edu.cn