

申请学位级别：工程硕士

领域名称：计算机技术

校内导师姓名：李云岭

职 称：副 教 授

校外导师姓名：杨 颖

职 称：高级工程师

山 东 科 技 大 学

二零零五年五月

论文题目：

GPS 技术在平面控制网中的应用与研究

作者姓名：于立国 入学时间：2002年3月
专业名称：计算机技术 研究方向：地理信息系统
校内导师：李云岭 职 称：副教授
校外导师：杨颖 职 称：高级工程师

论文提交日期：2005年5月

论文答辩日期：2005年6月10日

授予学位日期：

APPLICATION AND STUDY OF GPS TECHNOLOGY IN PLAN CONTROLLING NET

A Dissertation submitted in fulfillment of the requirements of the degree of

MASTER OF ENGINEERING

from

Shandong University of Science and Technology

by

Yu Ligu

Supervisor: Associate Professor Li Yunling

Supervisor: Senior Engineer Yang Ying

College of Information Science and Engineering

May 2005

2

声 明

本人呈交给山东科技大学的这篇工程硕士学位论文，除了所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人在导师指导下的研究成果。该论文资料尚没有呈交于其它任何学术机关作鉴定。

硕士生签名：于立国

日 期：2005.6.6

AFFIRMATION

I declare that this dissertation, submitted in fulfillment of the requirements for the award of Master of Engineering in Shandong University of Science and Technology, is wholly my own work unless referenced or acknowledged. The document has not been submitted for qualification at any other academic institute.

Signature: 于立国 Yuliguo

Date: 2005.6.6

3

摘 要

在我国大中城市一般布设 C 级 GPS 网作为首级控制，其主要任务是发展城市基础控制网，为测图和施工放样服务。这类网的特点是控制区域有限，边长短，观测时间短。由于 GPS 定位的高精度、快速度、省费用 等优点，建立城市平面控制网的手段我国已基本被 GPS 技术所取代。可以说 GPS 定位技术已完全取代了用常规测角、测距手段建立城市平面控制网。有些大中城市 C 级 GPS 网，由于生产单位对规范要求理解不同，在建立 GPS 控制网时，有很大的随意性，致使很多城市平面控制网留有瑕疵。

在本文中作者详细阐述了 GPS 控制网从设计、选择坐标系统、起始数据检验、到观测、平差计算等建立一套完整的 GPS 控制网施工方案。并且针对有些生产单位建立城市控制网时，只重视观测、计算等主要生产工序，缺少坐标系统选择、抵偿范围研究等问题，作了详细的研究。

本文通过拉萨—贡嘎、GPS 控制网的研究，根据地理位置不同，选择合适的中央子午线和基准投影面，是抵御长度变形的有效手段；同时提出选择合适的抵偿投影面，讨论抵偿范围，求出参考椭球参数，将起始点大地坐标转换到独立坐标系中去等问题，寻找出一种合适的坐标系统选择方法。

本文通过对威海市城市二等 GPS 控制网的研究，从设计、选择坐标系统、起始数据检验、到观测、平差计算等工序作了系统的论述；通过威海城市二等 GPS 控制网高程拟合问题的讨论，研究高程拟合的适用范围，选择合适的高程异常已知点，尤其对于高程异常变化剧烈的山区，高程拟合的精度问题进行了研究。建立了一套完整的 GPS 控制网施工方案。

关键词：坐标系统选择；长度变形；抵偿范围；GPS 控制网；高程拟合；平差计算

Abstract

In our country, the first degree for controlling nets of GPS is C in many middle and big cities, which main purpose is to develop the basic control nets and to give service for construction and layout. The main characters of these nets are the followings: the region controlled is limited; and have short baseline; time for measuring is short. The technology to make city horizontal control nets are gradually displaced by GPS technology in our country, because of its characters of high precision、fast speed and low cost, and so on. That is to say that GPS technology is displacing the common ways to survey angels and distances to develop the horizontal control nets in many middle and big cities. Because the ways to make GPS control nets are so random that different companies have different understandings to the specifications of surveys, many horizontal control nets in many big cities have some fault.

In this article the author discusses a series processes in detail from GPS control nets layout、selecting coordinate system and checking the raw datum to survey and adjustment and so on. The paper also makes deeply research on the lack of coordinate system choosing and the replace region, because many companies for production only pay more attention on measuring and computing when they make the control nets.

According to the research on the GPS control nets in LASA, the conclusion is that it is an effective way to control the length deformation through choosing a proper central meridian and basic project plane according to the different location is generated. At the same time, other research on the followings: how to choose a proper replace project plane, discussing replace region, making out reference ellipsoid parameters, transferring the geodetic coordinate system to the regional coordinate system, seeking for the proper way to choose coordinate system.

According to the research on the second degree GPS control nets of WeiHai, a fully and systemic account is generated from layout、choosing a coordinate system and checking the original datum to the objection and adjustment computation. According to the research on the problem of height fitting in the GPS control nets of WeiHai, some facts are made by author as the followings: what is the region the height fitting is for, how to select the proper height

abnormity basic point especially for the region in which the height abnormity is common to change, research on the precision of the height fitting. And developing series full layouts for the GPS control nets.

Keywords: coordinate system; length deformation; replace region; GPS control net; height fitting; adjustment computation.

目 录

1 绪论	1
1.1 GPS 发展的背景	1
1.2 研究目的和意义	2
1.3 国内外同类课题研究现状	3
1.4 研究思路	6
2 城市控制网的建立	8
2.1 GPS 定位原理	8
2.2 坐标系统的选择	10
2.3 检验 GPS 网起算始数据	16
2.4 高程拟合的精度分析	17
3 高原地区平面控制网坐标系统的选择	20
3.1 工程概况	20
3.2 抵偿投影面的选择	20
3.3 抵偿范围	22
3.4 参考椭球的选择	22
4 城市高等级 GPS 控制网的建立	24
4.1 工程概况	24
4.2 已有资料的分析利用	24
4.3 技术要求	25
4.4 二等 GPS 控制网的布设与测量	26
5 结论与建议	38
5.1 结论	38
5.2 GPS 高程拟合外业观测的几点建议	39
参考文献	40

Contents

1 Introduction	1
1.1 The background of GPS development	1
1.2 The intension and meaning of study	2
1.3 The national and overseas present condition of same subject	3
1.4 The process of thinking	6
2 The building of plane controlling net	8
2.1 The positioning theory of GPS	8
2.2 The selection of coordinate system	10
2.3 Checking the original data of GPS	16
2.4 The precision analysis of elevation approaching	17
3 The selection of coordinate system of plane controlling net of altiplano area	20
3.1 The general situation of the project	20
3.2 The selection of commuting projection surface	20
3.3 The commuting range	22
3.4 The selection of referencing ellipse sphere	22
4 Building the high-level GPS controlling net of city	24
4.1 The general situation of the project	24
4.2 The analysis and use of the existing material	24
4.3 The technology request	25
4.4 The layout and surveying of the second-level GPS controlling net	26
5 The conclusion and suggestion	38
5.1 The conclusion	38
5.2 The several suggestions of surveying outside in GPS elevation approaching	39
Reference	40

分类号: P228.42

U D C : _____

密 级: 公 开

单位代码: 10424

工程硕士学位论文详细摘要

GPS 技术在平面控制网中的应用与研究

于 立 国

申请学位级别: 工程硕士

领域名称: 计算机技术

校内导师姓名: 李云岭

职 称: 副 教 授

校外导师姓名: 杨 颖

职 称: 高级工程师

山 东 科 技 大 学

二 零 零 五 年 五 月

详细摘要

作为较早采用 GPS 技术的领域,在测量中,它最初主要用于高精度大地测量和控制测量,建立各种类型和等级的测量控制网;现在,它除了继续在这些领域发挥着重要作用外,还在测量领域的其它方面得到充分的应用,如用于各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。

在我国大中城市一般布设 C 级 GPS 网作为首级控制,其主要任务是发展城市基础控制网,为测图和施工放样服务。这类网的特点是控制区域有限,边长短,观测时间短。由于 GPS 定位的高精度、快速度、省费用 等优点,建立城市平面控制网的手段我国已基本被 GPS 技术所取代。可以说 GPS 定位技术已完全取代了用常规测角、测距手段建立城市平面控制网。

在本文第二章介绍了 GPS 定位原理、GPS 测量中常用的坐标系统及不同坐标系统之间的互相转换,并且针对有些生产单位建立城市控制网时,只重视观测、计算等主要生产工序,缺少坐标系统选择、抵偿范围研究等问题,通过 GPS 测量的投影变形的分析,提出采用抵偿坐标系减少长度变形的影响。即:根据测区的已知平均高程和中心位置的经纬度,就可以确定抵偿投影带的中央子午线位置。抵偿带选定后,应用高斯投影坐标计算的方法,将国家点坐标换算成大地坐标 B, L 。再由大地坐标计算这些点在抵偿带内的平面直角坐标 X, Y 。这实际上仅仅是一个换带计算问题。反之,已知某点在抵偿带内的平面直角坐标,也可以方便地求出它在国家统一坐标系统内的坐标值。该章还详细阐述了 GPS 控制网从设计、选择坐标系统、起始数据检验、到观测、平差计算等建立一套完整的 GPS 控制网施工方案。

高等级公路施工控制网坐标系统的选择,是以投影长度变形值不大于 2.5cm/km 为原则,如何选取抵偿投影面和合适的投影带,是限制投影长度变形,保证放样数据直接利用和计算方便的关键。《公路勘测规范》规定长度变形大于 2.5cm/km 时,可采用:

- (1) 投影于抵偿高程面上的高斯正形投影 3° 带平面直角坐标系;
- (2) 投影于 1954 年北京坐标系或 1980 西安坐标系椭球面上的高斯正形投影任意带平面直角坐标系。

本文第三章通过拉萨—贡嘎高速公路 GPS 控制网作为实例进行研究,提出根据地理位置不同,选择合适的中央子午线和基准投影面,是抵御长度变形的有效手段;同时提

出选择合适的抵偿投影面,讨论抵偿范围,求出参考椭球参数,将起始点大地坐标转换到独立坐标系中去等问题,寻找出一种合适的坐标系统选择方法。

有些大中城市 C 级 GPS 网,由于生产单位对规范要求理解不同,在建立 GPS 控制网时,有很大的随意性,致使很多城市平面控制网留有瑕疵。

本文第四章通过对威海市城市二等 GPS 控制网的研究,该章首先介绍工程概况、技术要求及二等 GPS 控制网的布设;然后从设计、选择坐标系统、起始数据检验、到观测、平差计算等工序作了系统的论述,建立了一套完整的 GPS 控制网施工方案。威海二等 GPS 网控制测量联测了国家 GPS AA 点,并采用其 WGS-84 坐标作为起算点进行三维无约束平差,求得本网其他点精确的 WGS-84 坐标。该网联测原有威海控制网(规划网、国土网)中的 7 个控制点,为以后威海控制网的统一和改算做好了充分准备。本次测量从布网到观测到平差计算均严格按照规范和设计执行,各项检核及精度指标均满足规范设计要求。

GPS 技术用于建立大地控制网,在确定平面位置的同时,能够以很高的精度确定控制点间的相对大地高差。GPS 高精度高程测量同高精度的平面测量一样,是 GPS 测量应用的重要领域。本测区地处山区,控制范围比较大,实施常规的几何水准测量有困难。为节省资金,采用高程拟合法求解各控制点高程。由于内插点精度要高于外推点精度,因此要求固定点要均匀分布,且控制范围边沿要有固定点。为了求得各二等点正常高,用 GPS 联测均匀分布的 7 个四等以上等级水准点进行高程拟合。

通过威海城市二等 GPS 控制网高程拟合问题的讨论,研究高程拟合的适用范围,选择合适的高程异常已知点,尤其对于高程异常变化剧烈的山区,高程拟合的精度问题进行了研究。高程拟合是一种纯几何的方法,因此,一般仅适用于高程异常变化较为平缓的地区(如平原地区),其拟合的准确度可达到一个分米以内。对于高程异常变化剧烈的地区(如山区),这种方法的准确度有限,这主要是因为在这些地区,高程异常的已知点很难将高程异常的特征表示出来。但是在山区,往往由于这些地区地形条件的限制,实施常规的几何水准测量有困难,在精度要求不高的小比例尺控制测量中,GPS 高程测量无疑是一种有效的手段。但是可以预期,随着 GPS 定位技术的发展和普及,布设足够密度和精度的 GPS 观测站,将变得容易实现。另外,专家认为,GPS 测量和水准测量资料,与重力测量资料(或地形资料)相结合,来精密确定大地水准面的高程,将是一种有潜力的方法。目前国家局正在做精化大地水准面这项工作。

Detailed Abstract

As the realm of using the technique of GPS early, at the beginning in the survey it mainly used for the earth survey and control survey with high accuracy, and building up various type and grades control net; Now, it is not only play a important role in these realms, and also get the full application in other realms in survey, such as all kinds of constructions and layout、distortion observation 、 photo-grammatical and the data collection in GIS etc.

In our country, the first degree for controlling nets of GPS is C in many middle and big cities, which main purpose is to develop the basic control nets and to give service for construction and layout. The main characters of these nets are the followings: the region controlled is limited; and have short baseline; time for measuring is short. The technology to make city horizontal control nets are gradually displaced by GPS technology in our country, because of its characters of high precision、 fast speed and low cost, and so on. That is to say that GPS technology is displacing the common ways to survey angels and distances to develop the horizontal control nets in many middle and big cities.

The Chapter two introduces the theory of GPS, the common coordinate systems used by GPS surveying and the method of convert different coordinate systems mutually; The paper also makes deeply research on the lack of coordinate system choosing and the replace region research, because many companies for production only pay more attention on measuring and computing when they make the control nets. Through the analysis of the GPS surveying distortion, the author puts forward adopting the commuting coordinate system to reduce the influence of the length distortion.

Firstly it can make sure the central meridian position of basic project plane according to the average height that has already known and the longitude and latitude degree of the center position in the surveying area. After that, we adopt the Gauss coordinate method to transfer the points coordinate to the geodetic coordinate B, L. then calculating the X, Y coordinate by

geodetic coordinate. This is only a problem that how to calculate when changing area. Whereas, if we have known the point's X, Y coordinate in replace region, it can easily get the coordinate in the unification coordinate system. This chapter also introduces the detailed project to develop a series full layouts for the GPS control nets from layout、choosing a coordinate system and checking the original datum to the objection and adjustment computation

The coordinate system's selection of the high grade highway control net takes the length shadow of distortion no bigger than the 2.5 cm/ km as the principle, how to select a proper central meridian and basic project plane is the key to control the length deformation, make full use of data and the convenient computing. 《The norm of highway surveys》 prescribes: When the distortion bigger than the 2.5 cm/ km, adopt the following principle:

- (1) Using the coordinate system of flat surface and right angle and Gauss projection
- (2) Using the coordinate system of Beijing 54 and Xian 80 and Gauss projection

In the Chapter three of this paper, According to the research on the GPS control nets in LASA, the conclusion is that it is an effective way to control the length deformation through choosing a proper central meridian and basic project plane according to the different location is generated. At the same time, other research on the followings: how to choose a proper replace project plane, discussing replace region, making out reference ellipsoid parameters, transferring the geodetic coordinate system to the regional coordinate system, seeking for the proper way to choose coordinate system.

Because the ways to make GPS control nets are so random that different companies have different understandings to the specifications of surveys, many horizontal control nets in many big cities have some fault.

According to the research on the second degree GPS control nets of WeiHai in the chapter four, a fully and systemic account is generated from layout、choosing a coordinate system and checking the original datum to the objection and adjustment computation. The second degree GPS control nets of WeiHai surveys all the country GPS AA points to get the precise

WGS-84 coordinate of other points, which takes WGS-84 coordinate as the beginning point to three-dimensional and no restraint adjustment computation,. This net includes seven points that have been in WeiHai control net (layout net. Country net), which has made full prepare for the unification and amendment. The survey carries out strictly according to the norm and designs from distributing net to observation even adjustment computation, various examination and the accuracy index all satisfy the norm and design request.

The GPS technology that used to building the control net can compute the opposite margin between the control points with high accuracy when it makes sure the position of flat surface simultaneity. The GPS technology used to height survey with the high accuracy is an important realm in GPS survey technology. Because the survey area is mountainous area, and the control area is vast, it has difficulty to adopt the common method. In order to save money, we adopt the height fitting to know the height of the control points. And the accuracy of inside points is high than outside points, it is necessary that the fixed point distribute equality, especially the margin of control area must has the fixed point. In order to get the height of the second-degree points, we use seven more than fourth-degree points surveying by GPS to height fitting

According to the research on the problem of height fitting in the GPS control nets of WeiHai, some facts are made by author as the followings: what is the region the height fitting is for, how to select the proper height abnormality basic point especially for the region in which the height abnormality is common to change, research on the precision of the height fitting. And developing series full layouts for the GPS control nets.

Height fitting is a Geometrical method, which is only applicable to the area that the height changes slowly (such as the plain region), and the accurate degree can reach one decimeter. The accuracy is limited in the area that the height changes acutely, because in these areas the points that have been known can't show the feature of the exceptional area. But in mountainous area, it has difficult to using the common method because of the limitation of terrain. The GPS height survey is an effective way to small-scale control survey that the

accuracy request is **not high**.

With the **development and universalities** of GPS, we can anticipate that establishing enough density and **accuracy observation** posts of GPS will become to realistically easily. Moreover, the expert think, it is a potential method of the GPS survey combine together with to the data of level survey, the data of gravity survey (or the geography data) to gained the height of the earth level. Currently the national bureau is doing the work to predigest the earth level.

1 绪论

1.1 GPS 发展的背景

1957 年世界上第一颗人造卫星发射成功后,利用卫星导航定位的研究提到了议事日程。1973 年 12 月,美国陆、海、空三军继“海军导航卫星系统”(简称“NNSS”,1958 年开始研制,1964 年正式运行)后,开始联合研制新一代空间卫星导航定位系统,历时 20 多年,耗资 300 亿美元。其目的主要是为陆、海、空三大领域提供实时、全天候和全球性的导航服务,并用于情报收集、核爆监测和应急通讯等军事目的,是美国独霸全球战略的重要组成部分。

美国为了维护其军事利益和国家安全,分别对 GPS 实施了 AS 和 SA 技术。AS (Anti-Spoofing) 技术也叫反电子欺骗技术,它是一种 GPS 保护技术,是为了防止敌方和黑客对 GPS 信息的破坏和干扰以及防止非授权用户(民用用户)使用精密导航信息(军用码)。SA (Selective Availability) 技术即选择可用技术,是通过在非精密导航信息(民用码)里人为地加入高频干扰信号和降低卫星星历精度,从而降低了普通用户的定位精度,使民用单点定位误差达到 100 米。SA 政策是影响民用定位精度的主要原因。

为了应对美国 SA 政策,提高定位精度,世界各国纷纷采用差分技术。即利用多台接收机同时接受同一颗卫星信号,采用一次或多次求差的方法,抵消同一颗卫星的各种人为干扰误差和大气误差,从而提高定位精度。在此基础上又发展了的广域差分、实时差分等定位技术,有效的减弱了 SA 和 AS 政策的影响。

为了促进 GPS 的发展,1998 年美国提出了 GPS 现代化计划,总体上可归纳为以下三个方面:

- (1) 保护。采用各种措施保护 GPS 不受敌方和黑客的干扰,增加军用讯好的强度,增强抗干扰能力。
- (2) 阻止。阻止敌方利用 GPS 军用讯号,设计新的信号结构,将军用频道和民用频道彻底分开。
- (3) 改善。改善 GPS 定位和导航精度,增加 2 个民用频道,提前结束 SA 政策。

为了促进 GPS 产业发展,2000 年 5 月 1 日,克林顿总统宣布取消 SA 干扰,使 GPS 单点定位精度提高了 10 倍。为了不给美国国家安全带来威胁,美军升级了军用 GPS 系统并声称在其认为国家安全受到威胁时,还将增加地区性的认为干扰。

自 20 世纪 80 年代末期以来, GPS 技术已在我国的测绘、地质、航空、航天、海洋、交通、航道、石油、水利、渔业、农业和信息等行业获得了广泛的应用。GPS 现代化将加速 GPS 技术在我国更多领域的应用。GPS 卫星导航定位技术与通信、遥感和电子消费产品的不断融合, 又将创造出更多的新产品和新服务。特别是我国自行研发的北斗卫星导航系统的成功运行和伽利略卫星导航定位系统的即将建成, 将开创卫星导航定位应用的新天地。

1.2 研究目的和意义

全球定位系统 (Global Positioning System, 简称 GPS) 是美国布设的第二代卫星无线电导航系统。它是在地球上空布设 24 颗 GPS 专用卫星, 卫星轨道即每时刻的精确位置由地面监控站测定, 并通过卫星用无线电波向地面发播; 地面上用 GPS 接收机同时接收 4 颗以上卫星信号, 根据卫星的精确位置以求得地面点位置。它能为用户提供全球性、全天候、连续、实时、高精度的三维坐标、三向速度和时间信息。

GPS 具有精度高、速度快、全天候、距离远等特点, 促使大地测量的作用大大向外扩展延伸。其作用可归纳如下一些:

- (1) 为飞机、船舶、运载体提供定位和导航信息;
- (2) 布设城市、矿山、海洋等各类控制网, 不需造标观测, 可灵活方便又廉价的满足经济建设和国防建设的需要;
- (3) 布设地面监测网, 可监测地壳形变、板块运动、固体潮、海平面升降等地球动力学现象;
- (4) 可用于标定国界、海疆和联测沿海岛屿;
- (5) 用于建立以地球质心为坐标系原点的地心坐标系, 为建立大地测量参考框架提供资料;
- (6) 利用 GPS 和水准测量资料精化大地水准面;
- (7) 应用在已知点上的 GPS 观测资料, 可反求大气对流层的气象元素等。

作为较早采用 GPS 技术的领域, 在测量中, 它最初主要用于高精度大地测量和控制测量, 建立各种类型和等级的测量控制网; 现在, 它除了继续在这些领域发挥着重要作用外, 还在测量领域的其它方面得到充分的应用, 如用于各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。尤其是在各种类型的测量控制网的建立这一方面, GPS 定位技术已基本上取代了常规测量手段, 成为了

主要的技术手段,很多城市也都采用 GPS 技术建立了城市控制网。

目前,大中城市控制网一般采用 C 级 GPS 网,有些生产单位对规范要求理解不同,在建立 GPS 控制网时,有很大的随意性,致使很多城市平面控制网留有瑕疵。具体存在以下问题:

(1)生产单位建立城市控制网时,重视观测、计算等生产工序,往往忽略坐标系统选择、起始数据检验等基础性工作,不利于以后工作的拓展。

(2) 由于城市地理位置不同,选择合适的中央子午线和基准投影面,是抵御长度变形的有效手段。有些生产单位选择坐标系统时,只是机械地选择国家常规分带中央经线,没有考虑长度变形大于 2.5cm/km 的影响,增加了施工放样难度。

(3) 我们国家三角测量是五十年代起步,各三角网采用分区平差,两区交界处坐标误差很大, GPS 控制网经二维约束平差时,不经检验和取舍用它们作为起始点,精度就会下降。

(4) 在丘陵与山区建立控制网,因用 GPS 拟合的方法求高程没有明确的结论,尽管使用水准或测距高程导线方法测高程很非常困难,也大多采用此法,增加了工作难度。

本论文的研究内容主要分为三个方面:

1、抵偿投影面问题研究。以拉萨—贡嘎 GPS 控制网为对象,通过研究抵偿范围,求出参考椭球参数,将起始点大地坐标转换到独立坐标系中去。

2、GPS 控制网完整解决方案研究。通过对威海市城市二等 GPS 控制网的研究,从设计、选择坐标系统、起始数据检验、到观测、平差计算等建立一套完整的 GPS 控制网施工方案。

3、山区与丘陵地区 GPS 高程拟合研究。丘陵与山区建立控制网,用水准或测距高程导线方法测高程是非常困难的,目前用 GPS 拟合的方法求高程尚无定论,本次论文想通过对 GPS 控制网的研究,以期得出一些结论。

1.3 国内外同类课题研究现状

2000 年 12 月,我国北斗卫星导航系统建设成功,它是我国耗资 23 亿元建成的第一代卫星导航定位系统,标志着我国的卫星导航定位技术进入了独立自主的新时代。按计划,我国将于 2008 年建成第二代卫星导航定位系统。

2002 年 3 月 24 日,欧盟首脑会议批准了建设伽利略卫星导航定位系统的实施计划。由于在科索沃战争以及阿富汗战争期间,欧洲军队使用 GPS 技术事实上都受到了限制。

因此，欧盟首脑们意识到：“如果放弃伽利略计划，我们将在今后 20—30 年间失去防务上的主动权。”此外，伽利略计划带来的经济利润也是不容忽略的。欧盟的一项研究预测表明，发展伽利略卫星导航定位技术，仅在欧洲就可以创造出 14 万多个就业岗位，每年创造的经济收益将会高达 90 亿欧元，到 2020 年，伽利略系统的经济收益将达到 740 亿欧元。因此，2004 年第四季度，计划发射 GSTB 试验卫星；2005—2006 年内，计划发射 4 颗伽利略工作卫星，实施在轨作业试验；2008 年年底，建成 (27+3) 伽利略卫星工作星座。我国已成为建设伽利略系统的合作伙伴，并于 2004 年 1 月 10 日，在长江上进行了 EG—NOS 欧洲静地卫星导航重叠系统的动态应用测试，为合作建设伽利略系统进行科技准备。

由此看来，伽利略系统将成为我国一个实用的卫星导航定位系统，加上已经使用的 GPS 系统、GLONASS 系统和北斗卫星导航系统，我国将有多种卫星导航定位系统用于生产实践。而上述卫星导航定位系统采用不同的大地坐标系，例如，GPS 系统采用 WGS—84 大地坐标系，俄罗斯 GLONASS 系统采用 PZ—90 大地坐标系。为了求解这两个大地坐标系的变换参数，1998 年 10 月 19 日—1999 年 4 月 19 日，国际大地测量协会、国际 GPS 服务中心、美国导航研究所和国际地球自转服务中心共同组织了一次 GLONASS / GPS 国际大联测，称之为国际 GLONASS 试验。

该次大联测在俄罗斯、美国、法国和中国香港、台湾等 26 个国家和地区布设了 61 个 GLONASS 观测站，国际激光测距服务中心 (ILRS) 也参加了 GLONASS / GPS 国际大联测，它组织了中国、美国、日本和澳大利亚等 15 个国家 30 台卫星激光测距仪，对 9 颗 GLONASS 导航激光卫星进行了激光测距。依据上述 GLONASS 全球观测网的测量成果，才解算出了 PZ—90 坐标与 WGS—84 坐标和 ITRF 坐标之间的变换参数。由此可见，解求多种卫星导航系统的统一坐标并非易事，需要组织较大测量队伍，布设分布适宜的观测网才能够取得较满意的成果。

在导航定位测量中，导航卫星是作为一种动态已知点参与导航定位解算的。因此，导航卫星在轨位置的精度高低，直接影响着定位解算的精度，而需要精确测定导航卫星在轨位置，为了解算出用户位置，除了测量站星距离以外，还必须知道导航卫星的实时在轨位置，称之为动态已知点，它是借助导航卫星发给用户的星历解算的。

为了获取高精度的动态已知点，卫星导航定位系统多采用全球定轨观测网，测定导航卫星的轨道参数。例如 GPS 卫星采用全球定轨观测网。因国情所致，我国难以采用类似于 GPS 卫星全球定轨观测网，现行的北斗导航卫星只能够采用局域定轨观测网。但是，

可利用我国在国外建立的卫星观测站,构成我国导航卫星定轨观测网,例如,充分利用我国设立在澳大利亚墨尔本的定轨观测站、阿根廷圣胡安的卫星激光测距站以及我国在南极中山站建立的 GPS 跟踪站与国内现有的 IGS 跟踪站,构成定轨观测网;并力争国际合作,建设多个国外定轨观测站。这样,可以实现准全球定轨测量,获取较高精度的导航卫星星历。

随着我国对地观测卫星的精密定轨需求的增强,我国对地观测卫星的不断发射升空,将给测绘工作者提供用武的新天地。

70 年代后期,我国航天科技单位在从事多年理论研究的同时,引进并试制成功了各种人造卫星观测仪器。其中有人卫摄影仪、卫星激光测距仪和多普勒接收机。根据多年的观测实践,完成了全国天文大地网的整体平差,建立了 1980 年国家大地坐标系,建立了南海群岛的联测。

80 年代初,我国一些院校和科研单位已开始研究 GPS 技术。十多年来,我国的测绘工作者在 GPS 定位基础理论研究和应用开发方面作了大量工作。

80 年代中期,我国引进 GPS 接收机,并应用于各个领域。同时着手研究建立我国自己的卫星导航系统。至今十多年来,据有关人士估计,目前我国的 GPS 接收机拥有量约在 4 万台左右,其中测量类约 500~700 台,航空类约几百台,航海类约 3 万台,车载类数千台。而且以每年 2 万台的速度增加。足以说明 GPS 技术在我国各行业中应用的广泛性。

在大地测量方面,利用 GPS 技术开展国际联测,建立全球性大地控制网,提供高精度的地心坐标,测定和精化大地水准面。组织各部门(10 多个单位,30 多台 GPS 双频接收机)参加 1992 年全国 GPS 定位大会战。经过数据处理, GPS 网点地心坐标精度优于 0.2m,点间位置精度优于 10^{-8} 。在我国建成了平均边长约 100km 的 GPS A 级网,提供了亚米级精度地心坐标基准。此后,在 A 级网的基础上,我国又布设了边长为 30~100km 的 B 级网,全国约 2500 个点。A、B 级 GPS 网点都联测了几何水准。这样,就为我国各部门的测绘工作,建立各级测量控制网,提供了高精度的平面和高程三维基准。

在我国大中城市一般布设 C 级 GPS 网作为首级控制,其主要任务是发展城市基础控制网,为测图和施工放样服务。这类网的特点是控制区域有限,边长短,观测时间短。由于 GPS 定位的高精度、快速度、省费用 等优点,建立城市平面控制网的手段我国已基本被 GPS 技术所取代。

1.4 研究思路

1.4.1 研究的主要方案

1.4.1.1 通过 GPS 城市控制网资料及地理位置的大地坐标的研究, 选择合理的坐标系, 分析起算数据检验方法, 讨论高程拟合的精度问题; 寻找一种完整而系统的建立平面控制网的方案。

1.4.1.2 坐标系统的选择

一个完整的坐标系是由坐标系和基准两方面要素所构成的。坐标系指的是描述空间位置的表达形式, 而基准指的是为描述空间位置而定义的一系列点、线、面。在大地测量中的基准一般是指为确定点在空间中的位置, 而采用的地球椭球或参考椭球的几何参数和物理参数, 及其在空间的定位、定向方式, 以及在描述空间位置时所采用的单位长度的定义。

平面控制网坐标系统的选择, 是以投影长度变形值不大于 2.5cm/km 为原则, 如何选取抵偿投影面和合适的投影带, 是限制投影长度变形, 保证数据直接利用和计算方便的关键。规范规定长度变形大于 2.5cm/km 时, 可采用:

(1) 投影于抵偿高程面上的高斯正形投影 3° 带平面直角坐标系;

(2) 投影于 1954 年北京坐标系或 1980 西安坐标系椭球面上的高斯正形投影任意带平面直角坐标系。

1.4.1.3 检验 GPS 网起算始数据

在进行 GPS 网的约束平差或联合平差时, 为了保证 GPS 控制网的精度不因约束数据的影响而显著降低, 对起算数据质量的检验是很必要的, 特别是对于起算数据较多的情形。起始点又分属于两分区平差接合部。

1.4.1.4 高程拟合的精度分析

高程拟合就是利用在范围不大的区域中, 高程异常具有一定的几何相关性这一原理, 采用数学方法, 求解正高、正常高或高程异常。

将高程异常表示成多项式, 通常是二次多项式

$$\zeta = a_0 + a_1 dB + a_2 dL + a_3 dB^2 + a_4 dL^2 + a_5 dBdL$$

利用公共点上的 GPS 测定的大地高和水准测量测定的正常高计算出该点的 ζ , 存在 m 个公共点, 可列出 m 个方程, 组成法方程, 按最小二乘法解算出高程异常。采用部分

重合点用于拟合，部分重合点用于检查，最后用所有可靠的重合点进行拟合，以提高拟合的精度和可靠性。

本文想通过威海城市二等 GPS 控制网，研究高程拟合的适用范围，选择合适的高程异常已知点，对于高程异常变化剧烈的山区，这种方法的准确度有多大。

1.4.2 需要解决的关键技术问题和创新点

1.4.2.1 抵偿面的选择

当有些地区偏离国家常规 3° 带中央子午线较远或海拔高程较大，在进行归算改正时，长度变形会超出规范要求。长度变形来自于将地面边归算到参考椭球面的长度变形 ΔS_1 ，和由参考椭球面边长投影到高斯平面的长度变形 ΔS_2 。长度变形是一种系统误差，抵偿面选定的目的是在某一特定区域内，使各测距边的长度变形小于 2.5cm/km ，因此选择抵偿投影面的基本条件就是在测区中心位置上 $\Delta S = 0$ ，此处长度变形完全得到了补偿。但抵偿面在东西跨度的最大范围究竟是多少？也就需要推导公式讨论抵偿范围。

1.4.2.2 坐标转换

我们通常采用的 1954 年北京坐标系（或 1980 西安坐标系）已知点成果，都是先归算至 Krasovsky 参考椭球面上(或 Geodetic Ref Sysytem 1980 china)，然后投影至高斯投影面上的坐标成果，有些测区虽然采用中央子午线也是国家常规 3° 分带的经线，但选择抵偿投影面并建立了独立坐标系后，也就改变了原 54 北京（或 80 西安）坐标系所用参考椭球体的参数。这就需要虚拟一个区域性参考椭球面，使新椭球面与独立坐标系拟定的投影基准面重合，并求出参考椭球参数，最后将起始点大地坐标转换到独立坐标系中去。本次论文也将寻求合适的方法完成此项工作。

2 城市控制网的建立

2.1 GPS 定位原理

GPS 接收机对收到的卫星信号, 进行解码或采用其它技术, 将调制在载波上的信息去掉后, 就可以恢复载波。严格而言, 载波相位应被称为载波拍频相位, 它是收到的受多普勒频移影响的卫星信号载波相位与接收机本机振荡产生信号相位之差。一般在接收机钟确定的历元时刻量测, 保持对卫星信号的跟踪, 就可记录下相位的变化值, 但开始观测时的接收机和卫星振荡器的相位初值是不知道的, 起始历元的相位整数也是不知道的, 即整周模糊度, 只能在数据处理中作为参数解算。相位观测值的精度高至毫米, 但前提是解出整周模糊度, 因此只有在相对定位、并有一段连续观测值时才能使用相位观测值, 而要达到优于米级的定位精度也只能采用相位观测值。

GPS 由以下部分组成

(1) 空间部分: 由分布在 6 个轨道面上的 24 颗卫星组成 (21 颗工作卫星和三颗备用卫星), 卫星上安置了精确的原子钟、发射和接受系统等装置;

(2) 地面控制部分: 由主控站 (负责管理、协调整个地面系统的工作)、注入站 (即地面天线, 在主控站的控制下向卫星注入导航电文和其他命令)、监测站 (数据自动收集中心) 和通讯辅助系统 (数据传输) 组成;

(3) 用户装置部分: 由天线、接收机、微处理机和输入输出设备组成。

在 GPS 观测量中包含了卫星和接收机的钟差、大气传播延迟、多路径效应等误差, 在定位计算时还要受到卫星广播星历误差的影响, 在进行相对定位时大部分公共误差被抵消或削弱, 因此定位精度将大大提高, 双频接收机可以根据两个频率的观测量抵消大气中电离层误差的主要部分, 在精度要求高, 接收机间距离较远时 (大气有明显差别), 应选用双频接收机。

在进行控制网观测时, 一般均采用静态定位, 将几台接收机静置于测站上同时观测, 以确定一个点在 WGS-84 坐标系中的三维坐标 (绝对定位), 或两个点之间的相对位置 (相对定位)。它能最大限度地发挥 GPS 的定位精度。大地测量或工程测量均应采用此种方法进行相对定位。

GPS 定位的基本原理是根据高速运动的卫星瞬间位置作为已知的起算数据, 采用空间距离后方交会的方法, 确定待测点的位置。如图所示, 假设 t 时刻在地面待测点上安

置 GPS 接收机，可以测定 GPS 信号到达接收机的时间 Δt ，再加上接收机所接收到的卫星星历等其它数据可以确定以下四个方程式：

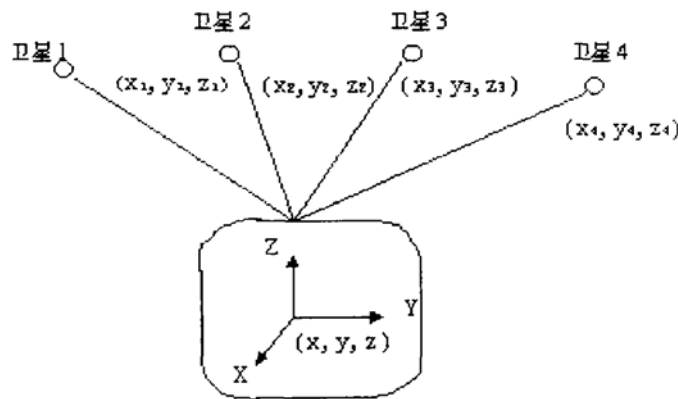


图 2.1 GPS 定位原理

Fig 2.1 the positioning principle of GPS

$$\begin{aligned} [(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_1}-\tau_{t_0})&=d_1 \\ [(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_2}-\tau_{t_0})&=d_2 \\ [(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_3}-\tau_{t_0})&=d_3 \\ [(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2]^{1/2}+c(\tau_{t_4}-\tau_{t_0})&=d_4 \end{aligned} \quad (2.1)$$

上述四个方程式中待测点坐标 x 、 y 、 z 和 τ_{t_0} 为未知参数，其中 $d_i=c\Delta t_i$ ($i=1、2、3、4$)。

d_i ($i=1、2、3、4$) 分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3、卫星 4 到接收机之间的距离。

Δt_i ($i=1、2、3、4$) 分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3、卫星 4 的信号到达接收机所经历的时间。

c 为 GPS 信号的传播速度（即光速）。

四个方程式中各个参数意义如下：

x 、 y 、 z 为待测点坐标的空间直角坐标。

x_i 、 y_i 、 z_i ($i=1、2、3、4$) 分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3、卫星 4 在 t 时刻的空间直角坐标，可由卫星导航电文求得。

τ_{t_i} ($i=1、2、3、4$) 分别为卫星 1、卫星 2、卫星 3、卫星 4 的卫星钟的钟差，由卫星星历提供。

τ_{t_0} 为接收机的钟差。

由以上四个方程即可解算出待测点的坐标 x 、 y 、 z 和接收机的钟差 τ_{t_0} 。

2.2 坐标系统的选择

在大地测量中坐标系统是由坐标系和基准两方面要素所构成的。坐标系指的是描述空间位置的表达形式，而基准是指为确定点在空间中的位置，而采用的地球椭球或参考椭球的几何参数和物理参数，及其在空间的定位、定向方式，以及在描述空间位置时所采用的单位长度的定义。

2.2.1 GPS 测量中常用的坐标系统

2.2.1.1 WGS-84

WGS-84 坐标系是目前 GPS 所采用的坐标系统，GPS 所发布的星历参数就是基于此坐标系统的。

WGS-84 坐标系统的全称是 World Geodical System-84 (世界大地坐标系-84)，它是一个地心地固坐标系统。

WGS-84 坐标系统由美国国防部制图局建立，于 1987 年取代了当时 GPS 所采用的坐标系统—WGS-72 坐标系统而成为 GPS 的所使用的坐标系统。

WGS-84 坐标系的坐标原点位于地球的质心，Z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极方向，X 轴指向 BIH1984.0 的起始子午面和赤道的交点，Y 轴与 X 轴和 Z 轴构成右手系。

WGS-84 系所采用椭球参数为：

$$a = 6378137m$$

$$f = 1/298.257223563$$

$$\bar{C}_{20} = -484.16685 \times 10^{-6}$$

$$\omega = 7.292115 \times 10^{-5} rad \cdot s^{-1}$$

$$GM = 398600.5 km^3 \cdot s^{-2}$$

2.2.1.2 1954 年北京坐标系

1954 年北京坐标系是我国目前广泛采用的大地测量坐标系。该坐标系源自于原苏联采用过的 1942 年普尔科夫坐标系。

建国前，我国没有统一的大地坐标系统，建国初期，在苏联专家的建议下，我国根据当时的具体情况，建立起了全国统一的 1954 年北京坐标系。该坐标系采用的参考椭球是克拉索夫斯基椭球，该椭球的参数为：

$$a = 6378245m$$

$$f = 1/298.3$$

遗憾的是, 该椭球并未依据当时我国的天文观测资料进行重新定位, 而是由前苏联西伯利亚地区的一等锁, 经我国的东北地区传算过来的, 该坐标系的高程异常是以前苏联 1955 年大地水准面重新平差的结果为起算值, 按我国天文水准路线推算出来的, 而高程又是以 1956 年青岛验潮站的黄海平均海水面为基准。

1954 年北京坐标系建立后, 全国天文大地网尚未布测完毕, 因此, 在全国分期布设该网的同时, 相应地进行了分区的天文大地网局部平差, 以满足经济和国防建设的需要。局部平差是按逐级控制的原则, 先分区平差一等锁系, 然后以一等锁环为起算值, 平差环内的二等三角锁, 平差时网区的连接部仅作了近似处理, 如有的仅取两区的平差值, 当某些一等锁环内的二等网太大, 在当时的计算条件下无法处理时, 也进行了分区平差, 连接部仍采用近似处理的方法。

2.2.1.3 1980 年西安大地坐标系

1978 年, 我国决定重新对全国天文大地网施行整体平差, 并且建立新的国家大地坐标系, 整体平差在新大地坐标系统中进行, 这个坐标系统就是 1980 年西安大地坐标系。1980 年西安大地坐标系统所采用的地球椭球参数的四个几何和物理参数采用了 IAG 1975 年的推荐值, 它们是:

$$\begin{aligned}a &= 6378140m \\GM &= 3.986005 \times 10^{14} m^3 \cdot s^{-2} \\J_2 &= 1.08263 \times 10^{-3} \\\omega &= 7.292115 \times 10^{-5} rad \cdot s^{-1}\end{aligned}$$

该椭球面同似大地水准面在我国境内符合最好, 高程系统以 1956 年黄海平均海水面为高程起算基准。

2.2.1.4 独立坐标系

GPS 平面控制网坐标系统的选择, 是以投影长度变形值不大于 2.5cm/km 为原则, 如何选取抵偿投影面和合适的投影带, 是限制投影长度变形, 保证数据直接利用和计算方便的关键。规范规定长度变形大于 2.5cm/km 时, 可采用:

(1) 地方坐标系的建立, 通常是根据需要以本区某国家控制点为原点, 作为地方坐标系的起始点, 过原点的经线为中央经线, 投影面选择测区平均高程面。

(2) 投影于抵偿高程面上的高斯正形投影 30 带平面直角坐标系统。由于地面边归算到参考椭球面的长度变形变化较大, 只能在 a 的基础上改变投影面以消除这种变化的影响。

2.2.2 坐标转换

在 GPS 测量中,经常要进行坐标系变换与基准变换。所谓坐标系变换就是在不同的坐标表示形式间进行变换,基准变换是指在不同的参考基准间进行变换。

2.2.2.1 坐标系的变换方法

空间直角坐标系与空间大地坐标系间的转换

在相同的基准下,空间大地坐标系向空间直角坐标系的转换方法为:

$$\begin{aligned} X &= (N+H) \cos B \cos L \\ Y &= (N+H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1-e^2)+H] \sin B \end{aligned} \quad (2.2)$$

其中:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}, \text{ 为卯酉圈的半径;}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

a 为地球椭球长半轴;

b 为地球椭球的短半轴。

在相同的基准下,空间直角坐标系向空间大地坐标系的转换方法为:

$$\begin{aligned} L &= \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ B &= \arctan\left\{\frac{Z(N+H)}{\sqrt{(X^2+Y^2)[N(1-e^2)+H]}}\right\} \\ H &= \frac{Z}{\sin B} - N(1-e^2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

在采用上式进行转换时,需要采用迭代的方法,先将 B 求出,最后在确定 H 。

2.2.2.2 坐标系统的转换方法

不同坐标系统的转换本质上是不同基准间的转换,不同基准间的转换方法有很多,其中,最为常用的有布尔沙模型,又称为七参数转换法。

七参数转换法是:

设两空间直角坐标系间有七个转换参数—3个平移参数、3个旋转参数和1个尺度参数。

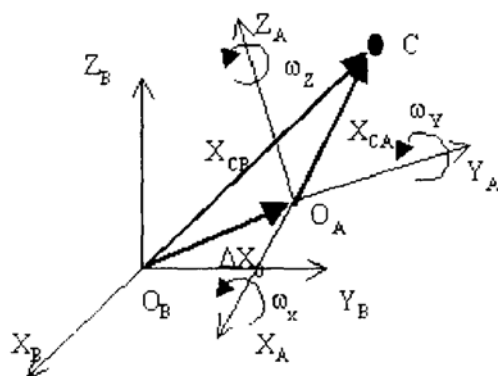


图 2.2 七参数转换

Fig 2.2 the transformation among the seven parameters

若:

$(X_A \ Y_A \ Z_A)^T$ 为某点在空间直角坐标系 A 的坐标;

$(X_B \ Y_B \ Z_B)^T$ 为该点在空间直角坐标系 B 的坐标;

$(\Delta X_0 \ \Delta Y_0 \ \Delta Z_0)^T$ 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的平移参数;

$(\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$ 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的旋转参数;

m 为空间直角坐标系 A 转换到空间直角坐标系 B 的尺度参数。

则由空间直角坐标系 A 到空间直角坐标系 B 的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{bmatrix} + (1+m)R(\omega) \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

其中:

$$\begin{aligned} R(\omega_x) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_x & \sin \omega_x \\ 0 & -\sin \omega_x & \cos \omega_x \end{pmatrix} \\ R(\omega_y) &= \begin{pmatrix} \cos \omega_y & 0 & -\sin \omega_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_y & 0 & \cos \omega_y \end{pmatrix} \\ R(\omega_z) &= \begin{pmatrix} \cos \omega_z & \sin \omega_z & 0 \\ -\sin \omega_z & \cos \omega_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.5)$$

一般 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 均为小角度, 可以认为:

$$\cos \omega \approx 1$$

$$\sin \omega \approx \omega$$

则有:

$$R(\omega) = R(\omega_z) R(\omega_y) R(\omega_x) = \begin{bmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

也可将转换公式表示为:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ \Delta Z_A \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ m \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -Z_A & Y_A & X_A \\ Z_A & 0 & -X_A & Y_A \\ -Y_A & X_A & 0 & Z_A \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.3 GPS 测量的投影变形分析

GPS 所测的基线长度实际上为地面上两点的斜距, 而内业计算是在高斯投影平面上进行的, 当有些地区偏离国家常规 3° 带中央子午线较远或海拔高程较大, 在进行归算改正时, 长度变形会超出规范要求。长度变形来自于将地面边归算到参考椭球面的长度变形 ΔS_1 , 和由参考椭球面边长投影到高斯平面的长度变形 ΔS_2 。

(1) 地面边归算至椭球面改正数

GPS 所测为斜距, 改成平距后应投影到参考椭球面上, 将改成后平距归化到椭球面上时, 应加如下改正数:

$$\Delta S_1 = H_m \cdot S_m / R_A \quad (2.8)$$

式中: R_A --- 长度所在方向的椭球曲率半径;

H_m --- 长度所在方向相对于椭球面的平均高差;

S_m --- 地面边平距。

(2) 椭球面投影至高斯平面的改正数

将椭球面上大地线长度 S 描写在高斯投影面上, 变为平面长度 D' 。 D' 和 S 之间的关系式如下:

$$D' / S = 1 + y_m^2 / 2R_m^2 \quad (2.9)$$

则有:

$$\Delta S_2 = S \cdot y_{m2} / 2R_m \quad (2.10)$$

式中 R_m 表示按大地线始末两端点的平均纬度计算的椭球的平均曲率半径, y_m 取大地线投影后始末两点横坐标平均值, 即:

$$y_m = (y_1 + y_2) / 2 \quad (2.11)$$

(3) 长度综合变形

高斯投影保证了角度无变形, 但其长度变形较为严重, 为了限制这种长度变形, 必须依中央子午线进行分带, 把投影范围限制中央子午线东西两侧一定的狭长带内分别进行。当大比例尺测图时, 尤其在工程测量中, 采用 3° 、 1.5° 或任意带投影。

由上述可知, 长度变形由两部分组成, 即:

$$\Delta S_1 = -S_H \cdot H_m / R_A \quad \Delta S_2 = S \cdot y_{m2} / 2R_m \quad (2.12)$$

长度综合变形

$$S = S_1 + S_2 = S \cdot y_{m2} / 2R_m - S_H \cdot H_m / R_A \quad (2.13)$$

(4) 长度综合变形分析

长度变形是一种系统误差, 抵偿面选定的目的是在某一特定区域内, 使各测距边的长度变形小于 2.5cm/km , 因此选择抵偿投影面的基本条件就是在测区中心位置上 $\Delta S = 0$, 此处长度变形完全得到了补偿。

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = S \cdot y_{m2} / 2R_m - S_H \cdot H_m / R_A \quad (2.14)$$

可得:

$$H_m = 0.078 y_2 \pm 160$$

式中 H_m 以米为单位, y 以公里为单位。

如果具体的工程对于长度变形有要求, 则可以把相应的长度变形容许值代入, 得到实际的长度变形关系式。

对于某已知高程面的测区, 利用上式可以计算出长度变形不超过容许数值的 3° 带内 y 坐标的取值范围; 同理, 对于不同的投影区域可以算出使综合变形不超过容许数值时的测区平均高程的取值范围。

(5) 抵偿坐标系的建立

为了尽量减小长度变形, 有下述方案: 选择抵偿投影带, 保持国家统一的椭球面作为投影面不变, 任意带高斯正形投影平面直角坐标系。

在这种坐标系中, 仍把地面观测结果归算到参考椭球面上, 但投影带的中央子午线不按国家 3° 带的划分方法, 而是依据补偿高程面归算长度变形而选择的某一条子午线

作为中央子午线。即在式 6 中保持 H_m 不变, 可得:

$$y_{m2}=2R_{m2}*S_{H1}*H_m/S*R_A\approx 12.82H_m \quad (2.15)$$

根据测区的已知平均高程和中心位置的经纬度, 就可以确定抵偿投影带的中央子午线位置。抵偿带选定后, 应用高斯投影坐标计算的方法, 将国家点坐标换算成大地坐标 B, L 。再由大地坐标计算这些点在抵偿带内的平面直角坐标 X, Y 。这实际上仅仅是一个换带计算问题。反之, 已知某点在抵偿带内的平面直角坐标, 也可以方便地求出它在国家统一坐标系统内的坐标值。

2.3 检验 GPS 网起算始数据

GPS控制网经过合理布网、数据采集、基线处理、基线检验和三维无约束平差后, 可以获得其在WGS-84地心坐标系的高精度空向向量网。而实际工作中, 要得到GPS网在实用坐标系(如国家坐标系、地方独立坐标系等)中的成果户通常是在网中适当位置联测一定数量(3个以上)坐标起算点, 经过约束平差, 将GPS网所在WGS-84地心坐标转换到实用的坐标系统中来, 当起算点中存在粗差点或起算点中部分点间相对精度较低时, 约束平差后GPS网在实用坐标系下的成果精度会急剧下降, 甚至达不到预期的精度和等级要求。

在进行GPS网的约束平差或联合平差时, 为了保证GPS控制网的精度不因约束数据的影响而显著降低, 对起算数据质量的检验是很必要的, 由于全国的天文大地控制点是采用分区平差, 实际上不能形成一个整体, 区与区之间有一定的隙距, 如在泰安与曲阜之间就是临清二网与菏泽二网的接合部, 同一点在不同区的坐标值相差0.6米左右, 不同分区的尺度差异也很大, 而且坐标传递是从东北到西北和西南, 后一区是以前一区的最弱部作为坐标起算点, 因而一等锁具有明显的坐标积累误差。

在绝大多数情况下约束平差的精度比无约束平差的精度要低, 利用符合路线法和检查点法对起始点进行检验, 剔除误差大的起始点, 以保证约束平差后, GPS单位权中误差符合规范要求。

2.4 高程拟合的精度分析

2.4.1 GPS 高程方法

在测量中常用的高程系统有以参考椭球面为基准面的大地高系统。大地高一般用符号 H 表示;

以大地水准面为基准面的正高系统。正高用符号 H_g 表示；以似大地水准面为基准的正常高系统。正常高用 H_r 表示。高程系统间的相互关系如图所示：

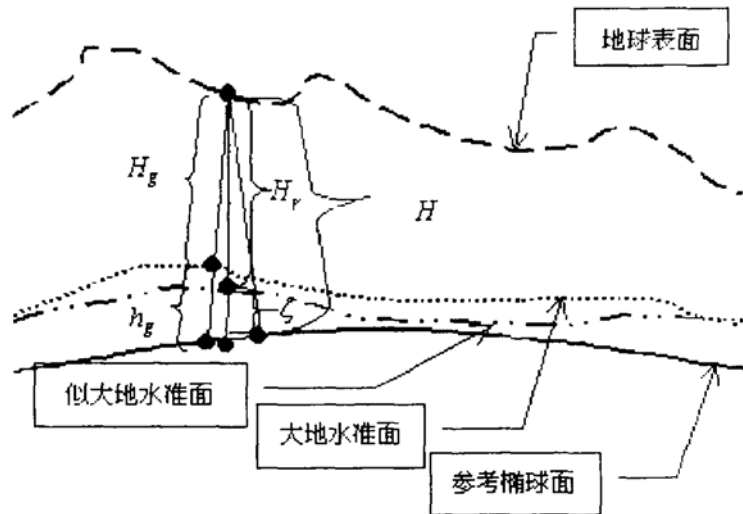


图 2.3 高程系统间的相互关系

Fig 2.3 the correlation among elevation system

大地水准面到参考椭球面的距离，称为大地水准面差距，记为 h_g 。大地高与正高之间的关系可以表示为：

$$H = H_g + h_g \quad (2.16)$$

似大地水准面到参考椭球面的距离，称为高程异常，记为 ζ 。大地高与正常高之间的关系可以表示为：

$$H = H_r + \zeta \quad (2.17)$$

由于采用 GPS 观测所得到的是点在 WGS-84 坐标系中的大地高，为了确定出正高或正常高，需要有大地水准面差距或高程异常数据。而我国常用的正常高 (H_r) 则须有一定精度的高程异常值 ζ ，才能保证由大地高求得。

2.4.2 高程拟合法

高程拟合就是利用在范围不大的区域中，高程异常具有一定的几何相关性这一原理，由已知点的 H_g 、 H_r 在一定的数学模型和统计准则下求出未知点的高程异常，从而求出待定点的正常高。

若要用零次多项式进行高程拟合时,要确定 1 个参数,因此,需要 1 个以上的已知点;若要采用一次多项式进行高程拟合,要确定 3 个参数,需要 3 个以上的已知点;若要采用二次多项式进行高程拟合,要确定 6 个参数,则需要 6 个以上的已知点。

将高程异常表示为下面多项式的形式:

$$\text{零次多项式: } \zeta = a_0$$

$$\text{一次多项式: } \zeta = a_0 + a_1 \cdot dB + a_2 \cdot dL$$

$$\text{二次多项式: } \zeta = a_0 + a_1 \cdot dB + a_2 \cdot dL + a_3 \cdot dB^2 + a_4 \cdot dL^2 + a_5 \cdot dB \cdot dL \quad (2.18)$$

其中:

$$dB = B - B_0;$$

$$dL = L - L_0;$$

$$B_0 = \frac{1}{n} \sum B;$$

$$L_0 = \frac{1}{n} \sum L;$$

n 为 GPS 网的点数。

利用公共点上 GPS 测定的大地高和水准测量测定的正常高计算出该点上的高程异常 ζ , 存在一个这样的公共点, 就可以依据上式列出一个方程:

$$\zeta_i = a_0 + a_1 \cdot dB_i + a_2 \cdot dL_i + a_3 \cdot dB_i^2 + a_4 \cdot dL_i^2 + a_5 \cdot dB_i \cdot dL_i \quad (2.19)$$

若共存在 m 个这样的公共点, 则可列出 m 个方程:

$$\zeta_1 = a_0 + a_1 \cdot dB_1 + a_2 \cdot dL_1 + a_3 \cdot dB_1^2 + a_4 \cdot dL_1^2 + a_5 \cdot dB_1 \cdot dL_1$$

$$\zeta_2 = a_0 + a_1 \cdot dB_2 + a_2 \cdot dL_2 + a_3 \cdot dB_2^2 + a_4 \cdot dL_2^2 + a_5 \cdot dB_2 \cdot dL_2$$

.....

$$\zeta_m = a_0 + a_1 \cdot dB_m + a_2 \cdot dL_m + a_3 \cdot dB_m^2 + a_4 \cdot dL_m^2 + a_5 \cdot dB_m \cdot dL_m \quad (2.20)$$

即有:

$$V = Ax + L \quad (2.21)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & dB_1 & dL_1 & dB_1^2 & dL_1^2 & dB_1 \cdot dL_1 \\ 1 & dB_2 & dL_2 & dB_2^2 & dL_2^2 & dB_2 \cdot dL_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & dB_m & dL_m & dB_m^2 & dL_m^2 & dB_m \cdot dL_m \end{bmatrix}$$

$$x = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5]^T$$

$$V = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \dots \quad \zeta_m]^T \quad (2.22)$$

通过最小二乘法可以求解出多项式的系数：

$$x = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (2.23)$$

其中：P 为权阵，它可以根据水准高程和 GPS 所测得的大地高的精度来加以确定。

按上述方法便可以确定计算点的高程，其精度主要决定于GPS测量的精度。这一方法的优点是概念明了，计算简单，精度高。不过，为描述大地水准面的细节，它需要布设均匀的、密度充分的GPS观测点，并且在这些点上，需要同时具有精密的水准资料。这些要求在实际工作中有时会遇到困难，但是可以预期，随着GPS 定位技术的发展和普及，布设足够密度和精度的GPS观测站，将变得容易实现。另外，专家认为，GPS测量和水准测量资料，与重力测量资料（或地形资料）相结合，来精密确定大地水准面的高程，将是一种有潜力的方法。目前国家局正在做精化大地水准面这项工作。

3 高原地区平面控制网坐标系统的选择

高等级公路施工控制网坐标系统的选择,是以投影长度变形值不大于 2.5cm/km 为原则,如何选取抵偿投影面和合适的投影带,是限制投影长度变形,保证放样数据直接利用和计算方便的关键。《公路勘测规范》规定长度变形大于 2.5cm/km 时,可采用:

(1) 投影于抵偿高程面上的高斯正形投影 3° 带平面直角坐标系;

(2) 投影于 1954 年北京坐标系或 1980 西安坐标系椭球面上的高斯正形投影任意带平面直角坐标系。

本文以西藏拉萨至贡嘎机场一级公路为例,重点按第一种方法介绍高海拔地区选择坐标系统选择的若干问题。

3.1 工程概况

拉萨~贡嘎机场公路是西藏自治区东西向交通主动脉 318 国道的有机组成部分,它的跨河新建段地处拉萨市西南,拉萨市曲水县与山南地区贡嘎县交界地带,距拉萨市约 50km。全长约 14 公里。位于东经 $90^{\circ} 53' \sim 91^{\circ} 02'$, 北纬 $29^{\circ} 06' \sim 29^{\circ} 38'$, 平均海拔 3700 米。该地区太阳辐射强烈,日照时间长,常年气温偏低,四季不分明。年平均气温为 7°C , 干湿季分明,干季多大风,立体气候显著。

中国人民解放军总参测绘局施测的国家一等三角点 IQJ1、ILY2、IYSL、IHL 等点保存完好。以四点作为坐标起算点。依据《公路全球定位系统(GPS)测量规范》新布设 12 个新四等 GPS 点,组成该工程的施工控制网。作为坐标起算点的国家一等三角点,采用 1954 年北京坐标系,按常规的 3° 带投影,中央子午线为 90° 。

四等 GPS 控制网观测使用三台 Trimble-4000 单频 GPS 接收机(仪器精度指标: $5\text{mm}+1\text{ppm}\times D$)进行快速静态定位测量,采用点连与边连相结合的方式构网。基线解算采用利普软件包;基线解算、预处理、平差计算均采用 GPSurvey(2.350)软件包。

3.2 抵偿投影面的选择

用于工程测量的独立坐标系统应选择合适的投影面,使今后的施工放样中不必考虑投影变形的改正问题。

高原地区海拔高程大,其长度变形就大。所谓长度变形来自于以下两个方面:

(1) 将地面边归算到参考椭球面的长度变形 ΔS_1 :

$$\Delta S_1 = \frac{H_m}{R} S \quad (3.1)$$

(2) 由参考椭球面边长投影到高斯平面的长度变形 ΔS_2 :

$$\Delta S_2 = \frac{y_m^2}{2R^2} S \quad (3.2)$$

式中:

S — 实测边长度;

H_m — 测区平均高程面至参考椭球体面的高度;

y_m — 测区平均横坐标;

R — 地球平均曲率半径;

长度变形是一种系统误差, 抵偿面选定的目的是在某一特定区域内, 使各测距边的长度变形小于 2.5cm/km, 因此选择抵偿投影面的基本条件就是在测区中心位置上 $\Delta S = 0$, 此处长度变形完全得到了补偿。如设测区平均高程面到抵偿面高为 H , 则测区中心位置上有:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 0 \quad (3.3)$$

即:

$$\frac{y_m^2}{2R^2} S - \frac{H}{R} S = 0 \quad (3.4)$$

简化得:

$$H = \frac{y_m^2}{2R} \quad (3.5)$$

测区中心离 90° 经线距离为 95 公里, 但高海拔地区, 长度变形主要是以高程归化为主, 高斯投影所带来的长度变形所占的比重不大, 所以仍可选独立坐标系中央子午线为 90° 。将测区平均横坐标 Y_m 为 95 公里, 地球平均曲率半径 R 为 6371 公里代入上式得: $H=708$ 米。

则抵偿投影面的高程为:

$$H_d = H_m - H = 3700 - 708 = 2992 \text{ 米} \quad (3.6)$$

因此，本测区可取整选 3000 米高程面为独立坐标系的抵偿投影面

3.3 抵偿范围

采用抵偿面坐标时，所谓抵偿范围是指在东西跨度的最大范围内，长度变形小于 2.5cm/km。设测区横坐标范围 $Y_{\min}$ -- $Y_{\max}$ ，则抵偿范围内有：

$$\left| \frac{y_m^2}{2R^2} - \frac{H}{R} \right| \leq 2.5\text{cm/km} = \frac{1}{40000} \quad (3.7)$$

整理得：

$$Y_{\min} = \sqrt{2RH - R^2 / 20000} \quad (3.8)$$

$$Y_{\max} = \sqrt{2RH + R^2 / 20000} \quad (3.9)$$

(1) 如果采用引言中方法一建立坐标系，中央子午线仍选 90° ， $H=700$ 米，代入上式有：

$$Y_{\min}=83.6\text{km}$$

$$Y_{\max}=105.1\text{km}$$

这种方法适合的抵偿范围即东西跨度最大为 21.5 km；由于本测区东西跨度仅为 15 km，所以符合要求。

(2) 如果采用引言中方法二建立坐标系，中央子午线应选测区中心子午线（ $90^\circ 59'$ ），投影面选择测区平均高程面，此时 $H=0$ ，代入(7)式有： $Y_{\min} = -45\text{km}$ ， $Y_{\max} = 45\text{km}$ ，抵偿范围为 90 km。但是此时既改变了投影带也改变了投影面，已知点坐标计算较为复杂。

3.4 参考椭球的选择

我们通常采用的 54 北京坐标系（或 80 西安坐标系）已知点成果，都是先归算至 Krasovsky 参考椭球面上(或 Geodetic Ref Sysytem 1980 china)，然后投影至高斯投影面上的坐标成果，本测区虽然采用中央子午线也是国家正规标准 30 分带经线，但选择抵偿投影面，并建立了独立坐标系后，将原 54 北京坐标系所用参考椭球体 E_0 改变为 E_1 ，使椭球面与独立坐标系拟订的投影基准面重合，也就是虚拟一个区域性参考椭球面，将国家坐标系的参考椭球 E_0 的半径 a 增大为 a_1

$$a_1 = a + \Delta a_1 \quad (3.10)$$

$$\Delta a_1 = \sqrt{1 - e^2} \cdot (1 + e'^2 \cdot \cos^2 B_m) \cdot H_m \quad (3.11)$$

新椭球体的扁率与 E_0 相同。

新椭球体的长半径与扁率确定后，其余五参数 b_1 、 M_1 、 N_1 、 e_1 、 $e_1'^2$ 也就随着确定了。根据莫洛金斯基公式将起始点大地坐标转换到独立坐标系中的大地坐标：

$$B' = B + \Delta B \quad (3.12)$$

$$L' = L \quad (3.13)$$

其中：

$$\Delta B = N / (M + H) \cdot (a_1 - a) / a \cdot e^2 \cdot \sin B \cdot \cos B$$

然后根据正算公式，求出四个起始点在独立坐标系中的平面直角坐标。

该测区起始点的转换采用《GPSurvey(2.35)软件包》，以 Krasovsky 参考椭球扩展后成为 E_1 椭球，正反算及投影程序得各起始点的抵偿面的坐标。

用武汉测绘科技大学所编制的 Poweradj (3.01) 软件包进行平差计算，基线解算、同步环、异步环等各项技术指标符合规范要求。GPS 网在多固定点的二维平差中，四等 GPS 网最弱边边长相对中误差最大为 1/48156。

4 城市高等级 GPS 控制网的建立

GPS 相对定位技术具有精度高、速度快、费用省、操作简便、全天候作业等优点,布网不受常规通视条件的限制,已经成为建立高等级城市控制网的主要技术手段。本章以“网上(数字)山东”地理空间基础框架工程建设项目威海实验区为例,具体介绍 GPS 定位技术在高等级城市控制网测量中的应用。

4.1 工程概况

威海市位于山东半岛的东北端,东西北三面濒临黄海,与辽宁的旅顺口隔海对峙,共扼渤海门户。本次测绘任务即为控制威海市环翠区全境 700 余平方公里的城市二等 GPS 控制网。

4.2 已有资料的分析和利用

4.2.1 平面控制资料

(1) 本测区有 1971—1972 年由总参测绘局施测的蓬莱——荣城一等三角锁点棉花山和玉皇庙两点。经普查标石完好,可以使用。该网平差后测角中误差为 $\pm 1.20''$ (菲列罗公式计算为 $\pm 1.20''$)。

(2) 本测区有 1953 年由总参测绘局施测的海阳——威海二等基本锁点猴子山、老虎窝,该锁平差后测角中误差为 $\pm 1.03''$ (菲列罗公式计算为 $\pm 1.01''$),最弱点点位中误差 $\pm 0.13\text{m}$,最弱边相对中误差 1/90000;胶东二、三、四等补充网点双岛烟墩山、青山顶、金线顶等多点,该网平差后测角中误差为 $\pm 1.71''$ (菲列罗公式计算为 $\pm 1.62''$),最弱点点位中误差 $\pm 0.16\text{m}$,经普查标石完好,可以使用。

(3) 1997 年威海市规划局委托山东省淄博勘察测绘研究院施测的威海市规划区 C 级 GPS 网(以下简称规划网)。该网平均边长 3 公里,共有 57 点,控制面积 380 平方公里。该网最弱点点位中误差为 $\pm 1.7\text{cm}$ 符合规范设计要求。

(4) 1999 年威海市土地管理局委托山东省正元地理信息中心施测的威海市地籍调查 D 级 GPS 网(以下简称国土网)。该网平均边长 2.8 公里,共有 61 点,控制面积 380 平方公里。该网最弱点点位中误差为 $\pm 1.45\text{cm}$;最弱边相对中误差为 1/145926,符合规范设计要求。

经普查确认规划网(汉字点名)和国土网(字母编号)GPS 点烟墩山(C8)、双岛烟

墩山 (C2)、旗顶山 (C25)、远遥墩 (C15)、老虎山 (C7)、老虎窝 (C42)、羊亭 (C30) 保存完好, 本次二等 GPS 网可以利用其标石。

4.2.2 高程控制资料

(1) 测区内有陕西测绘局第四测绘大队于 1975 年施测的一等水准沙河——青岛段, 高程系统为 1985 国家高程基准, 其中 I 沙青 77、I 沙青 86 两点标石完好, 可以使用。

(2) 济南军区测绘大队施测的二、三等水准掖威、城威段, 其中 II 牟威 M7、II 牟威 M8、II 城威 127、II 城威 118 四点标石完好, 可以使用, 但其成果为 1956 年黄海高程系。

但两网由于受当时任务的局限性, 控制范围小, 且破坏严重, 点位分布不均匀, 已不能满足本次任务的需要。

4.3 技术要求

4.3.1 作业依据

- (1) CJJ 73 — 97 《全球定位系统城市测量技术规程》
- (2) CJJ 8 — 99 《城市测量规范》
- (3) GB 12898 — 91 《国家三、四等水准测量规范》
- (4) CH 1002 — 95 《测绘产品检查验收规定》
- (5) 技术设计书

4.3.2 坐标、高程系统

平面坐标系统为 1980 西安坐标系, 中央经线为 $123^{\circ} 00'$ ($122^{\circ} 10'$), 采用高斯正形投影。

高程系统为 1985 国家高程基准。

4.4 二等 GPS 控制网的布设与测量

4.4.1 坐标系统的选择

2001 年 9 月山东省国土资源厅下达了《鲁国土资发[2001]234 号》文件, 文中强调了各城市控制网应尽量采用 1980 西安坐标系, 以便于与国家大地网统一, 避免由于各地分别采用各自地方坐标系带来的混乱。根据《规范》要求, 城市控制网应尽量采用国家统一坐标系, 便于与国家大地网统一, 避免由于采用地方坐标系带来的混乱。并应满足投影长度变形值不大于 2.5CM/KM 的要求。因此, 该测区的平面成果采用 1980 西安坐标

系，高斯正形投影任意带的平面直角坐标，中央子午线 $122^{\circ} 10'$ ；考虑到与国家坐标系统一，另行计算中央经线为 123° 的坐标成果一套。高程采用 1985 国家高程基准。

4.4.2 控制网的建立

根据该测区控制网多、坐标系统复杂、控制面积大的特点，布设威海市城市二等 GPS 网作为本测区的首级控制网。该网以国家一等三角锁点棉花山、玉皇庙两点作为起算点，西起初村镇，东至泊于镇；南濒环翠文登交界，北临大海共计 19 点组成。网中最长边 12 公里，最短边 5 公里，平均边长 8 公里，控制面积约 700 平方公里。

该 GPS 控制网由若干个独立观测环构成，独立观测环的边数应 ≤ 10 。网形布设成由大地四边形和三角形，保证其结构坚强。

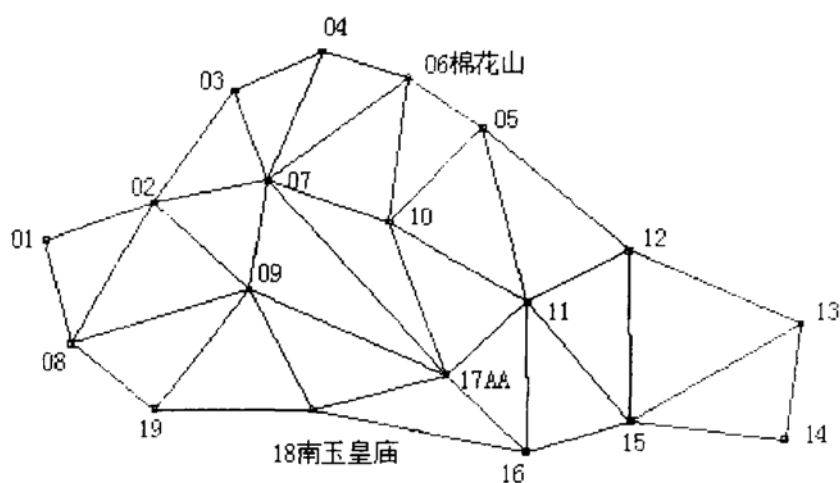


图 4.1 GPS 控制网布设略图

Fig 4.1 the layout about GPS controlling net

考虑到历史的继承性，该网与“规划网”、“国土网”三网重合 7 点，便于将“规划网”、“国土网”两网成果整合到新网中来。利用重合点坐标作为“规划网”和“国土网”的起算点，重新将老网平差，从而达到对老网进行改造的目的。

威海二等 GPS 控制网共计 19 点，控制点情况如下表：

表 4.1 威海二等 GPS 控制点

Tab 4.1 the second-class GPS controlling points of Weihai

本网点名	原三角网（锁）点名	“规划网”点名	“国土网”点名
棉花山 I 等	棉花山 I 等		
南玉皇庙 I 等	南玉皇庙 I 等		
威海 AA 点 II 等	AA 级 GPS		

冢子庄 II 等	冢子庄 IJK		
双岛烟墩山 II 等	双岛烟墩山 II 等	双岛烟墩山	C2
烟墩山 II 等	烟墩山	烟墩山	C8
老虎山 II 等	老虎山 II 等	老虎山	C7
羊亭 II 等	羊亭	羊亭	C30
旗顶山 II 等	旗顶山 II 等	旗顶山	C25
猴子山 II 等	猴子山 II 等		
老虎窝 II 等	老虎窝 II 等	老虎窝	C42
逍遥山 II 等	逍遥山 II 等		
远遥墩 II 等	远遥墩 IJK	远遥墩	C15
王家产 II 等	王家产 IJK		
堂子北 II 等	堂子北 IJK		
豆山 II 等	豆山 IJK		
皂埠咀 II 等			
孔家滩东 II 等			
灰顶 II 等			

4.4.3 选点与埋石

二等 GPS 网与国家各级控制点重合 14 个，充分利用原有控制点的标石，并用水泥、沙子、石子对重合点进行了加固，点名采用原点名。新埋设控制点三个。标石规格按照规范要求埋设，并根据实地选点情况，按村名、地名选取了点名。

该 GPS 控制网点与点之间均有两个方向通视，点位的基础坚实稳定，易于长期保存，便于安置仪器，视野开阔，并远离大功率无线电发射源。

4.4.4 观测技术要求

根据测区的地理位置，以及最新的卫星星历，对卫星状况进行预报，作为选择合适的观测时间段的依据。根据 GPS 控制网的布设图以及测区的实际情况，确定出具体的作业方案，作业方案的内容包括作业小组的分组情况，GPS 观测的时间段以及测站等。GPS 观测小组在技术负责人的带领下，进行外业观测，外业观测人员除了严格按照作业规范、作业指令进行操作外，根据一些特殊情况，灵活地采取应对措施。

GPS 控制网观测可使用 4 台 TOPCON Hiper GD 型双频接收机，出厂时各项指标测试

全部合格,在作业前通过了山东省测绘仪器鉴定站检测,性能和精度均符合规范要求,其标称精度为 $\pm(3+1\times 10^{-6}D)$ 。按照 GPS 控制网布设图,采用边连式构网制定联测方案。并按下表要求进行外业观测。观测时认真、仔细、正确填写测量手簿。

表 4.2 测量手簿

Tab 4.2 the surveying notebook

卫星高度角	观测卫星数 静态	GDOP	数据采样间隔	同步时段长度	平均重复设站数
$\geq 15^\circ$	≥ 4	≤ 6	10 秒	≥ 90 分钟	≥ 2

4.4.5 数据处理

(1) 数据传输

数据传输采用 PC_CDU 软件,将每天观测的数据传输到计算机,并将外业记录的点名、点号、观测时间、观测时段、天线高等数据输入到计算机中,连同 GPS 接收机接收的数据一起进行备份。

(2) 基线解算

基线解算采用随机软件 Pinnacle 进行,基线解算模型采用双差固定解,采用单基线解算模式。基线解算时解算属性一般采用缺省设置,通过选取卫星截止高度角为 15° 和剔除观测时间较短的卫星以达到最优的解算结果。

(3) 基线解算的质量检验

基线解算的质量检验包括同步环检核、异步环检核、复测基线检核。在武汉测绘科技大学 PowerADJ 软件中提取基线解算结果,通过自动预处理,对同步环、异步环和复测基线进行检核,并对检核结果形成文本文件进行保存。

① 规范和设计要求同步环全长相对闭合差小于 3ppm,同步环坐标分量相对闭合差小于 2ppm。下表中对各同步环的全长相对闭合差、全长闭合差和分量闭合差进行了统计,可以看出各同步环的全长相对闭合差最大为 1.857ppm,满足限差要求,分量闭合差最大为: $W_x = 0.041$, $W_y = 0.040$, $W_z = 0.060$ 。其同步环全长分别为 23.7 公里、31.7 公里、47.7 公里,对应的分量相对闭合差分别为 1.73ppm、1.26ppm 和 1.25ppm,满足限差要求。

表 4.3 基线解算

Tab 4.3 the baseline computation

环号.	Wx (米)	Wy (米)	Wz (米)	dw (米)	相对精度 (ppm)
1	-0.0090	0.0280	0.0180	0.034	1.139
2	0.0170	0.0000	0.0000	0.017	0.559
3	0.0040	-0.0210	-0.0140	0.026	0.992
4	0.0220	-0.0070	-0.0040	0.023	0.744
5	-0.0050	0.0070	0.0040	0.009	0.219
6	0.0130	0.0210	0.0140	0.028	0.819
7	0.0260	-0.0280	-0.0180	0.042	1.055
8	0.0090	-0.0140	-0.0040	0.017	0.701
9	-0.0140	0.0140	0.0130	0.024	0.882
10	-0.0040	-0.0020	0.0020	0.005	0.213
11	-0.0190	0.0300	0.0150	0.039	1.391
12	0.0050	-0.0160	-0.0020	0.017	0.565
13	-0.0100	0.0160	0.0110	0.022	0.653
14	-0.0230	0.0280	0.0170	0.040	1.037
15	0.0020	-0.0030	-0.0020	0.004	0.179
16	0.0140	0.0050	-0.0090	0.017	0.673
17	-0.0190	0.0090	0.0120	0.024	0.725
18	0.0000	-0.0020	-0.0030	0.004	0.178
19	0.0180	-0.0060	0.0040	0.019	0.751
20	-0.0010	0.0050	0.0190	0.020	0.737
21	-0.0180	0.0040	-0.0070	0.020	0.584
22	-0.0010	0.0030	0.0160	0.016	0.465
23	0.0190	-0.0110	-0.0150	0.027	0.714
24	-0.0020	-0.0090	0.0070	0.012	0.355
25	-0.0060	0.0000	0.0060	0.008	0.313
26	-0.0040	0.0100	-0.0010	0.011	0.296
27	0.0000	0.0010	0.0000	0.001	0.041
28	-0.0060	0.0010	0.0060	0.009	0.233
29	-0.0020	-0.0100	0.0070	0.012	0.311
30	-0.0040	0.0090	-0.0010	0.010	0.223
31	-0.0080	0.0210	-0.0060	0.023	1.016
32	0.0060	0.0320	0.0090	0.034	1.087
33	0.0080	-0.0040	0.0030	0.009	0.341
34	-0.0060	-0.0150	-0.0120	0.020	0.824
35	0.0000	0.0170	-0.0030	0.017	0.445
36	-0.0020	0.0360	0.0060	0.037	1.028
37	0.0140	0.0110	0.0150	0.023	0.735
38	-0.0190	0.0080	-0.0140	0.025	0.994
39	-0.0160	0.0090	0.0030	0.019	0.672
40	0.0020	-0.0010	0.0020	0.003	0.142
41	-0.0050	0.0000	-0.0190	0.020	0.746
42	-0.0140	0.0080	0.0050	0.017	0.456
43	-0.0210	0.0090	-0.0160	0.028	0.831

44	-0.0030	-0.0010	-0.0170	0.017	0.585
45	0.0200	-0.0090	0.0050	0.022	0.873
46	-0.0030	0.0010	-0.0010	0.003	0.169
47	0.0040	-0.0020	0.0010	0.005	0.238
48	-0.0190	0.0080	-0.0050	0.021	0.945
49	0.0160	-0.0070	0.0040	0.018	0.599
50	0.0010	-0.0010	0.0000	0.001	0.054
51	0.0230	-0.0100	0.0060	0.026	0.831
52	0.0150	0.0160	-0.0090	0.024	0.887
53	0.0400	-0.0200	-0.0040	0.045	1.892
54	0.0140	-0.0270	0.0170	0.035	1.398
55	-0.0110	0.0090	0.0120	0.019	1.015
56	0.0290	-0.0110	0.0080	0.032	1.021
57	0.0260	0.0070	-0.0210	0.034	0.991
58	0.0250	-0.0360	0.0050	0.044	1.583
59	-0.0120	0.0180	0.0260	0.034	1.357
60	-0.0020	0.0030	0.0050	0.006	0.250
61	-0.0140	0.0180	0.0250	0.034	1.464
62	-0.0040	0.0030	0.0040	0.006	0.289
63	0.0020	0.0000	0.0010	0.002	0.081
64	-0.0160	0.0210	0.0300	0.040	1.260
65	-0.0100	0.0150	0.0210	0.028	0.781
66	-0.0010	0.0010	0.0050	0.005	0.210
67	-0.0170	0.0190	0.0420	0.049	1.465
68	-0.0180	-0.0150	-0.0170	0.029	0.942
69	-0.0020	-0.0330	-0.0540	0.063	1.555
70	0.0010	0.0340	0.0590	0.068	1.470
71	-0.0190	-0.0140	-0.0120	0.026	0.642
72	-0.0160	0.0180	0.0370	0.044	1.047
73	0.0010	0.0050	-0.0130	0.014	0.450
74	-0.0020	0.0010	0.0020	0.003	0.147
75	0.0030	-0.0010	-0.0030	0.004	0.166
76	0.0000	0.0050	-0.0120	0.013	0.446
77	0.0010	0.0000	-0.0010	0.001	0.044
78	-0.0020	0.0060	-0.0100	0.012	0.300
79	0.0030	0.0040	-0.0150	0.016	0.447
80	0.0100	0.0020	-0.0060	0.012	0.438
81	0.0010	0.0060	0.0000	0.006	0.168
82	-0.0190	-0.0050	0.0090	0.022	0.742
83	0.0100	0.0090	-0.0030	0.014	0.439
84	-0.0090	-0.0030	0.0030	0.010	0.275
85	0.0200	0.0110	-0.0090	0.025	0.663
86	-0.0090	0.0040	0.0060	0.012	0.228
最大值	0.040	0.036	0.059	0.068	1.892

② 规范和设计要求异步环的坐标分量闭合差和全长闭合差满足以下公式要求：

$$\begin{aligned}w_x &\leq 2\sqrt{n} \sigma \\w_y &\leq 2\sqrt{n} \sigma \\w_z &\leq 2\sqrt{n} \sigma \\w &\leq 2\sqrt{3n} \sigma\end{aligned}\tag{4.1}$$

$$\text{式中 } w \text{ 一环闭合差, } w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2};\tag{4.2}$$

n 一独立环中的边数。

本网中基线长度最小为 4.9 公里, 其标准差也最小, 为 0.014 米, 异步环边数取最小数 3, 计算得坐标分量闭合差和全长闭合差的限差为 0.048 米和 0.084 米。从下表可以看出各异步环的坐标分量闭合差和全长闭合差均小于限差要求。

表 4.4 异步环精度统计

Tab 4.4 the precision statistic of asynchronism ring

序号	w_x (米)	w_y (米)	w_z (米)	w (米)	相对精度 (ppm)	异步环
1	0.0140	-0.0069	-0.0249	0.012	0.717	11-16(02)16-11(05)
2	0.0039	-0.0079	-0.0060	0.001	0.098	17-18(04)17-18(05)
3	0.0147	-0.0093	-0.0150	0.007	0.451	17-18(04)17-18(06)
4	-0.0080	0.0061	0.0078	0.001	0.049	1-8(07) 8-1(08)
5	0.0039	0.0029	-0.0032	0.004	0.177	9-1(0007)1-9(08)
6	-0.0029	-0.0139	0.0030	0.004	0.209	10-4(10)4-10(11)
7	-0.0090	-0.0020	0.0141	0.010	0.641	6-10(11)10-6(12)
8	0.0030	-0.0152	-0.0157	0.003	0.201	6-10(11)10-6(13)
9	0.0112	-0.0039	-0.0302	0.016	0.780	11-5(13)11-5(14)
10	0.0053	-0.0100	-0.0020	0.002	0.187	5-6(13)5-6(14)
11	-0.0120	-0.0010	0.0041	0.013	0.515	10-7(12)6-7(11)6-10(11)
12	-0.0141	0.0268	-0.0134	0.033	1.328	10-7(12)7-4(10)10-4(10)
13	-0.0208	-0.0141	0.0029	0.025	0.783	3-2(09)10-3(10)10-7(12) 7-2(09)
14	-0.0014	0.0119	0.0177	0.021	0.475	9-1(07)1-8(07)2-8(08) 3-2(09)3-9(09)
15	0.0098	0.0249	0.0070	0.028	0.890	19-9(06)9-1(07)1-19(07)

16	-0.0009	-0.0353	-0.0104	0.037	0.535	17-18(04)18-19(06)19-9(06) 10-3(10)10-7(12)17-7(12) 3-9(09)
17	-0.0136	0.0059	-0.0061	0.016	0.621	17-16(04)17-18(04) 16-18(05)
18	0.0167	0.0231	0.0400	0.049	0.918	11-16(02)17-16(04)6-7(11) 5-6(13)11-5(13)17-7(12)
19	-0.0009	0.0079	-0.0007	0.008	0.347	11-15(03)11-16(02) 15-16(03)
20	0.0024	-0.0059	-0.0310	0.032	1.172	5-12(14)11-5(13)11-12(02)
21	0.0052	0.0058	-0.0041	0.009	0.361	15-12(02)11-15(03) 11-12(02)
22	0.0066	0.0158	-0.0063	0.018	0.526	13-12(01)15-12(02) 14-15(01)13-14(01)
最大值	0.0208	0.0353	0.0400	0.049	1.328	

③ 复测基线精度统计

规范和设计要求复测基线较差满足以下公式 $ds \leq 2\sqrt{n} \sigma$ 要求。本网中基线长度最小为 4.9 公里，其标准差也最小，为 0.014 米，计算复测基线较差限差为 0.04 米，从下表可以看出复测基线均满足要求。

表 4.5 复测基线精度统计

Tab 4.5 the precision statistic of repeated baseline

序号	重复基线	W_x (m)	W_y (m)	W_z (m)	W (m)	相对精度 (ppm)
1	15-12(1)12-15(2)	-0.0070	-0.0050	-0.0200	-0.016	-1.684
2	11-12(2)12-11(14)	-0.0010	0.0000	0.0070	0.003	0.474
3	11-15(2)15-11(3)	-0.0040	0.0200	0.0000	0.004	0.401
4	11-16(2)16-11(3)	0.0010	0.0050	0.0030	0.005	0.559
5	11-16(2)16-11(5)	0.0140	-0.0070	-0.0250	0.012	1.439
6	16-15(2)15-16(3)	0.0010	0.0140	-0.0010	-0.010	-1.685
7	11-16(3)16-11(5)	0.0130	-0.0120	-0.0220	0.007	0.880
8	17-16(4)16-17(5)	0.0000	-0.0080	-0.0040	0.002	0.377
9	17-18(4)18-17(5)	0.0040	-0.0080	-0.0060	-0.001	-0.195
10	17-18(4)18-17(6)	0.0150	-0.0090	-0.0150	0.007	0.956
11	18-16(4)16-18(5)	0.0000	-0.0110	0.0150	0.003	0.209
12	17-18(5)18-17(6)	0.0110	-0.0010	-0.0090	0.009	1.151

13	19-9(6)9-19(7)	0.0040	-0.0070	-0.0020	0.003	0.344
14	1-8(7)8-1(8)	-0.0080	0.0060	0.0080	0.000	0.066
15	9-1(7)1-9(8)	0.0040	0.0030	-0.0030	0.004	0.368
16	9-8(7)8-9(8)	0.0040	0.0040	-0.0010	0.006	0.561
17	2-9(8)9-2(9)	-0.0020	-0.0030	-0.0020	0.003	0.411
18	7-3(9)3-7(10)	0.0230	-0.0360	-0.0040	0.022	4.160
19	10-4(10)4-10(11)	-0.0030	-0.0140	0.0030	0.004	0.414
20	10-7(10)7-10(11)	-0.0100	-0.0040	-0.0050	-0.012	-1.644
21	10-7(10)7-10(12)	0.0000	0.0000	-0.0040	-0.001	-0.140
22	7-4(10)4-7(11)	0.0050	-0.0010	-0.0350	-0.025	-3.281
23	10-7(11)7-10(12)	0.0100	0.0040	0.0010	0.011	1.504
24	6-10(11)10-6(12)	-0.0090	-0.0020	0.0140	-0.010	-1.273
25	6-10(11)10-6(13)	0.0030	-0.0150	-0.0160	0.004	0.446
26	6-7(11)7-6(12)	0.0040	-0.0020	0.0050	-0.002	-0.202
27	10-6(12)6-10(13)	-0.0120	0.0130	0.0300	0.014	1.719
28	11-5(13)5-11(14)	0.0110	-0.0040	-0.0300	-0.015	-1.552
29	11-6(13)6-11(14)	-0.0030	-0.0240	-0.0110	-0.005	-0.372
30	5-6(13)6-5(14)	0.0050	-0.0100	-0.0020	0.002	0.321

④ 三维无约束平差

由于威海 GPS AA 点有精确的 WGS-84 坐标，三维无约束平差采用固定 GPS AA 点进行平差，求得各点的 WGS84 空间直角坐标和大地经纬度坐标。

三维无约束平差基线向量的改正数应小于各基线标准差的 3 倍，若超过则说明该基线及其附近存在粗差。下表中对参与平差的各基线向量改正数进行了统计，并根据基线长计算得各基线的标准差，由下表可以看出各基线向量改正数均远小于 3 倍标准差，说明参与平差的各基线不存在粗差。

表 4.6 三维无约束平差

Tab 4.6 the three dimension adjustment without constraints

基线边		Dx (cm)	Dy (cm)	Dz (cm)	边长 (m)	改正数限差 (cm)	基线相对精度
13	12	-0.04	-0.33	0.24	10340.97	6.9	1/17543860
13	14	-0.05	0.41	0.12	6395.23	4.9	1/3984064
13	15	0.22	-0.56	-0.87	10752.13	7.1	1/18518519
14	15	-0.13	1.13	0.41	8614.74	6.0	1/1930502
11	12	-0.24	0.09	-0.02	6327.50	4.8	1/8771930
15	12	0.75	-0.27	-0.89	9322.57	6.3	1/3095975
16	15	0.53	-0.82	-0.49	6039.69	4.7	1/12048193
11	15	-0.48	0.96	0.47	8753.83	6.0	1/7194245
11	16	-0.91	0.08	0.86	8184.55	5.8	1/2352941
17	16	0.08	0.10	0.01	6137.51	4.7	1/8000000
18	16	1.62	-0.21	-1.21	12032.55	7.8	1/1050420
17	11	-0.30	0.23	0.64	5895.68	4.6	1/1848429
17	16	0.08	-0.70	-0.39	12032.55	7.8	1/3968254
17	18	0.27	0.02	-0.29	7636.88	5.5	1/3003003
17	9	0.30	0.00	-0.54	11923.57	7.8	1/11363636
18	19	-0.28	-0.03	0.11	8740.10	6.0	1/3333333
18	9	-0.47	0.08	0.04	7526.32	5.4	1/2320186
1	8	0.20	-0.18	-0.08	5868.61	4.6	1/5128205
19	8	-0.25	0.28	0.23	5884.30	4.6	1/7462687
9	19	-0.21	0.68	0.26	8340.04	5.8	1/2923977
1	9	1.67	-0.34	1.23	11591.60	7.6	1/734214
2	1	0.61	-0.38	0.00	6301.60	4.8	1/3717472
8	9	0.66	0.14	0.81	10210.09	6.8	1/2770083
2	9	0.17	-0.22	-0.37	7173.00	5.2	1/10989011
3	2	0.95	-1.41	-0.82	7554.19	5.4	1/2481390
7	2	-0.04	0.50	0.43	6356.12	4.9	1/3048780
7	9	-0.17	0.37	-0.03	6074.37	4.7	1/2252252
10	7	1.04	0.02	0.70	7101.46	5.2	1/630517
3	4	-0.36	0.36	0.75	5298.78	4.4	1/2164502

7	3	0.91	-1.49	0.76	5335.00	4.4	1/341880
4	7	0.05	0.33	0.79	10137.33	6.8	1/2132196
6	4	0.61	-0.31	-0.40	4929.51	4.2	1/1353180
6	7	0.26	0.32	0.79	9547.84	6.6	1/37037037
10	6	0.48	-0.20	-1.50	8050.21	5.7	1/827815
17	10	0.02	0.81	-0.21	8988.85	6.2	1/2557545
17	7	-0.74	-0.67	-1.61	14654.07	9.3	1/955110
11	10	0.23	-0.32	1.35	8892.82	6.1	1/1353180
5	10	0.73	-0.61	-1.47	7350.91	5.3	1/1158749
5	6	-0.19	0.59	0.23	5024.91	4.3	1/11363636
11	5	0.90	-0.21	-0.47	9972.55	6.7	1/5000000
5	12	-0.23	0.50	0.56	10694.89	7.1	1/8333333
5	6	0.31	-0.41	0.03	5024.91	4.3	1/2439024
最大值		1.67	-1.49	-1.61			1/341880

⑤ 二维约束平差

二维约束平差采用一等三角锁点棉花山和南玉皇庙作为已知点进行约束平差，平差后各基线向量改正数及基线相对精度统计如下表：

表 4.7 二维约束平差

Tab 4.7 the two dimension adjustment with constraints

基线边	Dx (厘米)	Dy (厘米)	基线相对精度
13--12	.42	.26	1/1731810
13--14	-.09	-.16	1/1047729
5--12	.14	-.15	1/2844589
5--6	.34	.02	1/2195825
5--6	-.18	-.09	1/2195825
5--10	-.69	-.30	1/1166981
11--10	1.28	.07	1/2303078
11--5	.07	-.57	1/2618007
17--10	-.52	-.39	1/2472480
17--7	-1.21	1.04	1/2941115
6--7	.39	-.44	1/1543368
6--4	-.16	-.38	1/1140410
4--7	.51	-.24	1/1203046
7--3	1.61	.11	1/1378794
3--4	.30	.07	1/875013

10--7	.80	-.87	1/1481147
7--9	-.25	.02	1/1355295
7--2	.09	-.22	1/1384169
3--2	.45	-.12	1/1159173
2--9	-.11	.05	1/2355879
8--9	.83	-.47	1/1493342
2--1	.29	-.37	1/1089962
1--9	1.81	-1.07	1/2145104
9--19	-.22	-.30	1/1189868
19--8	-.07	.02	1/2083097
1--8	.18	-.09	1/1549349
18--9	-.06	.56	1/2476117
18--19	.10	.35	1/1441589
17--9	-.35	-.10	1/2175844
17--18	-.27	-.29	1/1513006
17--16	.15	.30	1/2376349
17--11	.37	.13	1/1223796
18--16	-.13	-1.21	1/2249772
17--16	.06	-.13	1/2376349
11--16	.34	.74	1/1865591
11--15	-.24	-.11	1/2478107
16--15	.24	-.02	1/1011985
15--12	-.29	-.49	1/1635480
11--12	-.07	.14	1/1027779
14--15	-.28	-.46	1/1059155
13--15	-.29	.16	1/1130051
10--6	-.85	-.25	1/1627904
最大值	-1.81	-1.21	1/875013

最弱边相对中误差为 1/875013，起点号：3，终点号：4；

最弱点点位中误差为 14 号点，点位误差 1.52cm。

⑥ 高程拟合

GPS 技术用于建立大地控制网，在确定平面位置的同时，能够以很高的精度确定控制点间的相对大地高差。本测区地处山区，控制范围比较大，实施常规的几何水准测量有困难。为节省资金，采用高程拟合法求解各控制点高程。由于内插点精度要高于外推点精度，因此要求固定点要均匀分布，且控制范围边沿要有固定点。为了求得各二等点正常高，用 GPS 联测均匀分布的 7 个四等以上等级水准点进行高程拟合。高程拟合模型采用二次曲面模型，高程拟合的内符合精度为 0.88cm，由于本网控制范围比较大，东西

跨度四十多公里，且多数点在山上，各点所在位置的高程异常值有较大差异，决定了拟合结果存在较多的不确定性，因此对于拟合点的高程成果只能参考使用。本测区用三等水准连测了 3、9、11 号点，另用 GPS 连测 4 个国家水准点，共计 7 个水准联测点作为已知点。拟合时将高程异常表示为二次多项式的形式拟合区域大地水准面，求解其它控制点高程。平差计算使用 PowerADJ 软件，平差后内符合精度： $\text{cto} = 0.880\text{E}+00$ （厘米），说明高程拟合的很好。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) GPS 作业有着极高的精度，它不受人为因素的影响。不要求测站间相互通视，它的作业不受环境和距离限制，非常适合于地形条件困难地区。

(2) 高原地区公路测量中，坐标系统的选择应该引起足够的重视，否则会给以后的放样工作带来很大的困难。由于测区起伏较大，单一考虑移动中央子午线抵偿长度变形的的方法不能满足要求，这是需要选择合适的抵偿面，还应考虑抵偿范围，超出一定范围，投影长度变形值就会大于 2.5cm/km。

(3) 独立坐标系是克服长度变形的主要手段，在高海拔地区，长度变形主要是以高程归化为主的，随着高程的增加，抵偿范围会逐渐减少。如果东西跨度太大，则应考虑建立具有抵偿面的任意带独立坐标系。

(4) 威海二等 GPS 网控制测量联测了国家 GPS AA 点，并采用其 WGS-84 坐标作为起算点进行三维无约束平差，求得本网其他点精确的 WGS-84 坐标。该网联测原有威海控制网（规划网、国土网）中的 7 个控制点，为以后威海控制网的统一和改算做好了充分准备。本次测量从布网到观测到平差计算均严格按照规范和设计执行，各项检核及精度指标（见下表）均满足规范和设计的要求。

表 5.1 检核及精度指标

Tab 5.1 the target of correction and precision

项 目	绝对精度	相对精度	环号 边号 点号
同步环最大值	0.068cm	1.892ppm	10-3(10)3 7(10)7-10(10)
异步环最大值	0.049cm	1.328ppm	10-6(12)6-5(13)10-5(13)
复测基线最大值	0.025cm	4.160ppm	7-3(9)3-7(10)
三维无约束平差相对精度		1/3]41880	7 3
二维约束平差相对精度		1/875013	3 — 4
点位中误差	1.53cm		14 号点

(5) GPS 高精度高程测量同高精度的平面测量一样，是 GPS 测量应用的重要领域。高程拟合是一种纯几何的方法，因此，一般仅适用于高程异常变化较为平缓的地区（如

平原地区),其拟合的准确度可达到一个分米以内。对于高程异常变化剧烈的地区(如山区),这种方法的准确度有限,这主要是因为在这些地区,高程异常的已知点很难将高程异常的特征表示出来。但是在山区,往往由于这些地区地形条件的限制,实施常规的几何水准测量有困难,在精度要求不高的小比例尺控制测量中,GPS 高程测量无疑是一种有效的手段。

5.2 GPS 高程拟合外业观测的几点建议

为了确保在山区困难的条件下,满足 GPS 高程拟合成果的精度要求,在外业观测中应达到以下几点技术要求:

(1) 为了能客观评定 GPS 高程拟合的精度和可靠性,在布设几何水准联测线路时,应适当多联测几点,其点位也应均匀地布设于全网,以作外部检核用。

① 严格保证每个观测时段的数据质量;

② 严格保证线高的量测精度;

③ 须保证已知水准点的正常高成果精度及相互间的兼容性。由于各测区国家水准点等级不同,施测年代、平差方法、沉降情况各异,因此必须对测区内的水准点进行可靠性检验,以剔除含粗差的水准点,并保证 GPS 拟合网点水准成果基准的一致性。

(2) 选择合适的高程异常已知点

高程异常的已知点的高程异常值一般是通过水准测量测定正常高、通过 GPS 测量测定大地高后获得的。在实际工作中,一般采用在水准点上布设 GPS 点或对 GPS 点进行水准联测的方法来实现,为了获得好的拟合结果要求采用数量尽量多的已知点,它们应均匀分布,并且最好能够将整个 GPS 网包围起来。若拟合区域较大,可采用分区拟合的方法,即将整个 GPS 网划分为若干区域,利用位于各个区域中的已知点分别拟合出该区域中的各点的高程异常值,从而确定出它们的正常高。

参考文献

1. CJJ8—99. 城市测量规范, 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
2. CJJ73—97. 全球定位系统城市测量技术规程, 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
3. 刘基余、李征航、王跃虎、桑吉章. 全球定位系统原理及其应用[M], 北京: 测绘出版社, 1999
4. 王唤良、李星照、段祝庚. 通过 GPS 测量获得多种坐标系[J], 测绘通报: 2003(8)
5. 孔祥元、梅是义主编. 控制测量学[M], 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996
6. JTJ061—99. 公路勘测规范, 北京: 人民交通出版社, 1999
7. 广州英迪实业有限公司. 测绘世界网站, 2004
8. 测量师网站. GPS 定位原理概述, 2004
9. 测量师网站. 全球定位系统 (GPS), 2004
10. 李斯主编. 测绘技术应用与规范管理实用手册[M], 北京: 金版电子出版公司, 2002

致 谢

全球定位系统 (Global Positioning System, 简称 GPS) 是美国布设的第二代卫星无线电导航系统。它是在地球上空布设 24 颗 GPS 专用卫星, 卫星轨道即每时刻的精确位置由地面监控站测定, 并通过卫星用无线电波向地面发播; 地面上用 GPS 接收机同时接收 4 颗以上卫星信号, 根据卫星的精确位置以求得地面点位置。它能为用户提供全球性、全天候、连续、实时、高精度的三维坐标、三向速度和时间信息。

作为较早采用 GPS 技术的领域, 在测量中, 它最初主要用于高精度大地测量和控制测量, 建立各种类型和等级的测量控制网; 现在, 它除了继续在这些领域发挥着重要作用外, 还在测量领域的其它方面得到充分的应用, 如用于各种类型的施工放样、测图、变形观测、航空摄影测量、海测和地理信息系统中地理数据的采集等。尤其是在各种类型的测量控制网的建立这一方面, GPS 定位技术已基本取代了常规测量手段, 成为了主要的技术手段, 很多城市也都采用 GPS 技术建立了城市控制网。

在我国大中城市一般布设 C 级 GPS 网作为首级控制, 其主要任务是发展城市基础控制网, 为测图和施工放样服务。这类网的特点是控制区域有限, 边长短, 观测时间短。由于 GPS 定位的高精度、快速度、省费用 等优点, 建立城市平面控制网的手段我国已基本被 GPS 技术所取代。GPS 技术在平面控制网中的应用与研究就是在这样的背景下提出来的, 本人作为主要研究开发人员承担了本项目。

在项目完成并撰写完毕本硕士学位论文之际, 本人要真诚地感谢指导老师——山东科技大学地球信息科学与工程学院的李云岭教授与山东省国土测绘院的杨颖高级工程师, 感谢他们在选题、课题的研究方向、研究内容和相关理论和知识方面所给予的认真指导和热情帮助, 感谢他们认真审阅本论文并提出了许多宝贵的修改意见。同时, 本人还要真诚的感谢山东省第一测绘院的有关同志, 他们提供了详尽的外业数据, 为本课题的研究提供了热情帮助和支持。

本文不足指出, 恳请专家和读者批评指正。

于立国

2005 年 3 月

科研学习简历及攻读硕士期间主要成果

于立国，男，1963年3月出生，1983年7月毕业于武汉测绘学院工程测量系获工学学士学位，1998年12月取得高级工程师任职资格。毕业后一直在山东省第一测绘院（山东省外业测绘大队）工作，先后从事GPS控制网的应用研究、基础测绘成果的数据采集、各种比例尺地形图的全外业采集、生产技术管理等工作。2002年3月起在山东科技大学学习计算机技术工程硕士课程并撰写毕业论文，研究方向为地理信息系统。

工作期间，多次到武汉测绘科技大学、国家测绘局等单位进修。并先后在省级基础测绘1:1万地形图生产、更新工作、济青、德济高速公路测量等项目担任技术负责人；德州、东莞、黄岛地籍图；烟台市地理信息系统建设担任项目负责人。同时，利用业余时间先后独立研究开发了导线网平差计算程序、水准网平差计算程序、换带计算程序，这些程序已在生产中得到广泛利用。

攻读硕士学位期间，2001年5月—2003年10月主持完成了聊城地理信息系统建设、胶南地理信息系统建设等项目的外业工作；2003年3月—2004年6月，参加了山东省信息化建设重点项目：山东省地理空间基础框架建设项目（一期工程威海试点），作为项目负责人之一，负责完成了1:100000、1:2000基础数据库建设、威海市城市二等GPS控制网等工作，项目通过了由山东省信息产业厅组织的专家验收。