



# GPS

## 高程测量理论方法及工程应用

Theoretical Methods and  
Engineering Application of  
GPS Vertical Survey

宋 雷 / 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.



# GPS 高程测量理论方法 及工程应用

Theoretical Methods and  
Engineering Application of  
GPS Vertical Survey



宋 雷 / 著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书主要介绍 GPS 高程测量的基本理论方法及其工程应用。内容包括:适用于卫星重力信息融合的神经网络算法;多时段、多卫星区域重力场信息融合技术;卫星重力在工程线路区域似大地水准面精化中的应用;高精度 GPS 高程测量及高海拔地区交通工程应用等。研究表明,BP 神经网络方法可以有效融合卫星重力信息;多时段卫星重力信息融合可明显提高区域似大地水准面的精度,使 GPS 高程测量的精度达到四等几何水准的精度要求。

本书可供高等学校测绘相关专业师生参考,也可供测绘工程技术人员阅读借鉴。

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 高程测量理论方法及工程应用 / 宋雷著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018. 11

ISBN 978-7-114-14757-9

I. ①G… II. ①宋… III. ①全球定位系统—测量—高等学校—教材 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 118187 号

书 名: GPS 高程测量理论方法及工程应用

著 作 者: 宋 雷

责任编辑: 李 坤

责任校对: 孙国靖

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京虎彩文化传播有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.75

字 数: 228 千

版 次: 2018 年 11 月 第 1 版

印 次: 2018 年 11 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14757-9

定 价: 60.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

## 作者简介

**宋雷** 男,山东交通学院教授。2005年在中国科学院测量与地球物理研究所获得硕士学位,2008年在河海大学获得博士学位,2014年3月在东南大学完成博士后研究工作。研究方向为地球重力场、似大地水准面精化、神经网络技术应用和卫星重力信息融合等。主持山东省中青年科学家奖励基金项目一项、交通运输部应用基础研究项目一项,参加国家自然科学基金项目和省部级项目多项,发表相关论文20多篇。

# 前 言

在工程中,我国采用似大地水准面为基准面的正常高系统,但 GPS 测量获得的高程信息是相对于 WGS-84 椭球的大地高, GPS 技术结合高精度、高分辨率似大地水准面模型才可以测定正常高,真正实现 GPS 技术在几何和物理意义上的三维定位功能。在国家现代测绘基准体系建设方面,厘米级精度似大地水准面作为目标已经提出,至今也取得了许多成果。我国中西部地形起伏剧烈,地球重力场短波成分复杂,包含局部重力场信息的观测数据的获取异常困难,这是影响我国中西部高精度、高分辨率似大地水准面精化的瓶颈问题。随着 CHAMP、GRACE 和 GOCE 等卫星重力任务的实施,对于消除陆地重力空白区和改善地面重力稀少区域的分辨率提供了前所未有的条件,超高阶地球重力场模型的发展以及 GPS/水准和高分辨率数字高程模型也为精化似大地水准面提供了丰富的数据源。

本书结合作者多年来在 GPS 高程测量理论方法及其工程应用方面的研究成果,主要介绍:适用于卫星重力信息融合的神经网络算法;多时段、多卫星区域重力场信息融合技术;卫星重力在工程线路区域似大地水准面精化中的应用;高精度 GPS 高程测量及高海拔地区交通工程应用等内容。希望通过作者相关研究工作,有效利用卫星重力信息改善地面重力数据缺乏区域似大地水准面的精度和分辨率,为我国中西部地区实现高分辨率、厘米级似大地水准面提供新的思路。

本书涵盖作者近十年的研究成果,主要以博士后研究报告和交通运输部应用基础研究项目研究报告为基础,也吸纳了近几年参与“未来中国卫星重力计划的数值模拟及其对全球重力场反演的贡献”项目研究的新成果。在研究过程中,得到中国科学院上海天文台吴斌研究员、周旭华研究员,东南大学交通学院

胡伍生教授等专家学者的指导和帮助;在出版过程中,得到人民交通出版社股份有限公司的大力支持,在此一并表示感谢。

本书的出版,得到了交通运输部应用基础研究项目(2015319817280、2013319817120)、国家自然科学基金项目(11573053)、“未来中国卫星重力计划的数值模拟及其对全球重力场反演的贡献”项目的资助。

限于作者水平,本书内容难免出现不足之处,恳请专家学者批评指正。

作 者

2018年6月18日

# 目 录

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                           | 1  |
| 1.1 引言 .....                           | 1  |
| 1.2 国内外(似)大地水准面研究现状及分析 .....           | 2  |
| 1.3 卫星重力探测技术的发展 .....                  | 5  |
| 1.4 多源区域重力信息融合技术 .....                 | 7  |
| 第2章 GPS 测量基本原理 .....                   | 9  |
| 2.1 GPS 系统组成 .....                     | 9  |
| 2.2 GPS 卫星轨道理论 .....                   | 12 |
| 2.3 GPS 卫星星历 .....                     | 16 |
| 2.4 GPS 卫星信号 .....                     | 24 |
| 2.5 伪距测量与载波相位测量 .....                  | 26 |
| 2.6 GPS 测量的误差来源 .....                  | 30 |
| 2.7 GPS 实时动态测量(RTK) .....              | 33 |
| 2.8 连续运行站技术 .....                      | 46 |
| 第3章 GPS 高程测量理论与方法 .....                | 55 |
| 3.1 高程系统及相互关系 .....                    | 55 |
| 3.2 GPS 高程测量的高程异常等值线图法 .....           | 57 |
| 3.3 地球重力场模型法 .....                     | 58 |
| 3.4 GPS 高程测量的曲面拟合法 .....               | 59 |
| 3.5 区域似大地水准面精化 .....                   | 66 |
| 3.6 Stokes 边值问题和 Molodensky 边值问题 ..... | 68 |
| 第4章 区域重力似大地水准面精化 .....                 | 73 |
| 4.1 地面重力观测值的归算及格网化 .....               | 73 |
| 4.2 重力(似)大地水准面计算方案 .....               | 81 |
| 4.3 重力似大地水准面的确定 .....                  | 86 |

|       |                                           |     |
|-------|-------------------------------------------|-----|
| 4.4   | 重力位模型和 GPS 水准数据联合确定区域似大地水准面 .....         | 90  |
| 4.5   | 区域似大地水准面确定中不同数据的作用分析 .....                | 94  |
| 第 5 章 | 神经网络方法及 GPS 高程测量应用 .....                  | 99  |
| 5.1   | 神经网络方法基本原理 .....                          | 99  |
| 5.2   | BP 算法基本原理 .....                           | 102 |
| 5.3   | Bayesian 正则化 BP 神经网络原理及仿真设计 .....         | 104 |
| 5.4   | Bayesian 正则化 BP 神经网络初始条件对拟合结果的影响 .....    | 107 |
| 5.5   | Bayesian 正则化 BP 神经网络方法和曲面拟合方法比较 .....     | 111 |
| 5.6   | Bayesian 正则化 BP 神经网络方法拟合区域内似大地水准面结果 ..... | 115 |
| 5.7   | 结论 .....                                  | 116 |
| 第 6 章 | 多时段、多卫星区域重力场信息融合技术研究 .....                | 118 |
| 6.1   | 多时段卫星重力信息融合理论 .....                       | 118 |
| 6.2   | 卫星重力信息融合的计算方法 .....                       | 119 |
| 6.3   | GPS/水准数据 .....                            | 119 |
| 6.4   | 基于 CHAMP 卫星区域重力信息的似大地水准面精化 .....          | 119 |
| 6.5   | 基于 GRACE 卫星区域重力信息的似大地水准面精化 .....          | 122 |
| 6.6   | GOCE 卫星区域高程异常信息融合 .....                   | 124 |
| 6.7   | 卫星区域高程异常信息融合 .....                        | 125 |
| 6.8   | 结论 .....                                  | 128 |
| 第 7 章 | 基于卫星重力信息的省级似大地水准面精化研究 .....               | 129 |
| 7.1   | 似大地水准面格网插值方法及精度分析 .....                   | 129 |
| 7.2   | 仿真软件及 GPS/水准数据 .....                      | 131 |
| 7.3   | 利用卫星重力信息精化山东省似大地水准面 .....                 | 133 |
| 7.4   | 多源重力信息融合精化山东省似大地水准面 .....                 | 138 |
| 7.5   | 结论 .....                                  | 150 |
| 第 8 章 | 高精度 GPS 高程测量及交通工程应用 .....                 | 151 |
| 8.1   | GPS 高程传递控制网 .....                         | 151 |
| 8.2   | GPS 高程传递在隧道工程中的应用 .....                   | 158 |
| 8.3   | 高速公路线路似大地水准面精化及应用 .....                   | 162 |
| 8.4   | 基于卫星重力信息的高海拔地区 GPS 高程测量 .....             | 165 |
| 8.5   | 结论 .....                                  | 174 |
| 参考文献  | .....                                     | 175 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引言

传统的大地测量技术以角度测量、距离测量和高差测量为主要方式确定控制点的位置和高程,传统测量模式要求观测仪器与照准目标间相互通视,由于受到地球曲率以及地形、建筑物和地表植被等遮挡的影响,为保证观测点之间保持通视,需要在控制点上修建觇标,花费大量的人力与物力。在测量过程中,以光学仪器为主的传统测量技术也受到观测边长的限制,且迁站困难,致使工作效率较低。全球定位系统(Global Positioning System,简称 GPS)的出现,给测绘行业带来了前所未有的技术革新,使用 GPS 系统进行精确定位的方式在测绘技术中已经逐步取代了传统的光学与电子测绘仪器。在大地测量方面,目前已利用 GPS 技术建立各级测量控制网,测定和精化(似)大地水准面,提供高精度的平面和高程三维基准。在工程测量方面,应用 GPS 静态相对定位技术,布设精密工程控制网,进行大坝和高层建筑物的变形监测;进行隧道贯通测量的洞外控制等方面也获得广泛应用,并取得较好效果。此外,GPS 技术在航空摄影测量、地球动力学研究和海洋测量等诸多方面都发挥了重要作用,充分显示它在测绘领域比常规控制测量具有更大的优越性和适应性。

目前,工程中获得高程信息的主要手段仍然是水准测量,在地形起伏较大的区域,水准测量存在劳动强度大、外业进展较慢和误差累积等诸多缺点,甚至某些项目中水准方法实施高程测量极为困难。虽然 GPS 定位技术能够在相对于基线长度  $10^{-7} \sim 10^{-9}$  的量级精度上获得所测点位的三维相对坐标,但是在具体的工程应用中,点位的高程信息未得到有效应用, GPS 技术仅在平面控制测量中发挥了较大的作用,这是因为 GPS 技术获得的高程信息是相对于 WGS-84 椭球的大地高,而我国工程应用中的法定高程系统是以似大地水准面为基准的正常高。将 GPS 大地高转换为正常高,是 GPS 应用领域的一个研究热点。

在工程应用中,我国以正常高作为法定高程系统,正常高是以似大地水准面为基准定义的高程系统,高精度、高分辨率的似大地水准面数值模型,可以给出任一点的似大地水准面高(高程异常),因而其被看作一种测定正常高的参考框架。GPS 技术结合高精度、高分辨率似大地水准面模型可以取代传统的水准测量方法测定正常高,真正实现 GPS 技术在几何和

物理意义上的三维定位功能。因此,在当今 GPS 定位时代,精化区域似大地水准面和建立新一代传统的国家或区域高程控制网同等重要,也是建立现代高程基准的主要任务。随着 GPS 技术在测绘领域的广泛应用,对高精度、高分辨率似大地水准面的要求也越来越迫切。

目前我国似大地水准面精化问题仍然是大地测量工作的重点。厘米级精度的似大地水准面作为目标已经提出,许多学者对此做了大量的研究,取得了许多成果。我国东部某些省市的局部似大地水准面精度已能够达到厘米级,并在不断地精化和改进。在地形起伏复杂的区域,特别是我国中西部,地球重力场短波成分复杂,精化似大地水准面所需的数据获取困难,更多的包含局部重力场信息的观测数据的获取一直是影响我国西部高精度、高分辨率似大地水准面精化的瓶颈问题。随着 CHAMP、GRACE 和 GOCE 等卫星重力任务的实施,对于消除陆地重力空白区和改善地面重力稀少区域的分辨率提供了前所未有的条件,卫星重力数据的不断积累和后续卫星重力计划的实施(比如 GRACE Follow On 等),使(似)大地水准面起伏信息更加丰富,精度和分辨率也在不断提高,利用卫星重力信息进行高精度、高分辨率似大地水准面精化必然成为新的发展方向。

## 1.2 国内外(似)大地水准面研究现状及分析

大地水准面和似大地水准面都是大地测量定义高程系统的参考面,前者作为测定正高的基准面,后者作为测量正常高的基准面。我国规定采用正常高系统,高程基准面是似大地水准面。北美国家一般采用正高系统,高程基准面是大地水准面。大地水准面是代表地球形状的一个封闭重力等位面,具有严密的物理意义;似大地水准面是为计算方便假设的面,不是重力等位面,但在海洋上,若略去海面地形影响则似大地水准面与大地水准面重合。因此正常高和正高的起算基准都是由验潮站确定的平均海面。全球大地水准面相对于椭球面的起伏约在  $-105.9 \sim 83.7\text{m}$  之间。图 1-1 为利用 EGM96 重力场模型计算的全球大地水准面相对于椭球面起伏的等值线。

目前,世界各国和地区的(似)大地水准面精化有了很大的发展,分辨率和精度都有很大提高。尤其是近几年,由于重力数据的积累、构建数字地形模型 DTM 的手段不断改进、超高阶重力位系数模型的分辨率和精度的显著提高,使确定高精度、高分辨率的重力(似)大地水准面成为可能,GPS/水准的出现,对结果的精度评定,也提供了一个可靠的外部检核标准。

整个欧洲地区(似)大地水准面的计算始于 20 世纪 80 年代初期,第一代欧洲重力大地水准面 EGG1 和 EAGG1 的精度为几分米,分辨率为 20km。从 1994 年开始,欧洲先后推出 EGG94、EGG95、EGG96 和 EGG97 系列欧洲重力似大地水准面。EGG97 以  $1.0' \times 1.5'$  格网表示,中、长波系统误差为  $\pm 8.0\text{cm}$ ,短波误差信号为  $\pm 1.3\text{cm}$ 。美国在 20 世纪 90 年代前期

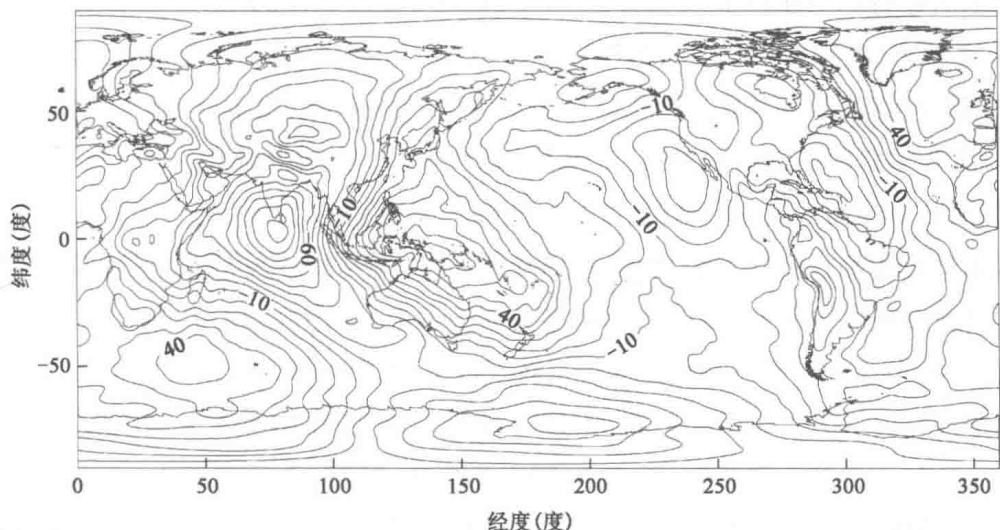


图 1-1 利用 EGM96 重力场模型计算的全球大地水准面异常图

先后推出了 GEOID90、GEOID93 和 G9501 区域大地水准面模型, G9501C 模型的精度为  $\pm 2.6\text{cm}$ 。20 世纪 90 年代中后期, 美国对精化其局部大地水准面作了进一步的努力, 主要是大力扩展 GPS/水准网, 提高其分辨率和精度, 推出的 GEOID99 的分辨率提高到了  $1.0' \times 1.0'$ , 精度为  $\pm 2.0 \sim \pm 2.5\text{cm}$ , 由 GPS 椭球高转换为正高的精度为  $\pm 4.6\text{cm}$ , 任意两点高差的精度为  $\pm 2.0\text{cm}$ 。最新的重力大地水准面模型 USGG2003 和大地水准面模型 GEOID03 构建过程中更新了深海重力异常数据, GPS/水准点的空间覆盖也有所增加。日本的重力大地水准面 JGEOID2000 与遍布全国的 GPS/水准网利用最小二乘配置法拟合, 形成日本混合大地水准面模型 GSIGEO2000, 内符合精度为  $\pm 4.0\text{cm}$ , 外符合精度为  $\pm 4.5 \sim \pm 5.4\text{cm}$ 。现在各国正在考虑运用新一代卫星重力计划 CHAMP、GRACE 和 GOCE, 进一步改进大地水准面, 使其达到传统水准测量的精度。近十几年来, 许多国家和地区先后研制和推出了各自的 (似) 大地水准面模型, 如欧洲的 EGG07、加拿大的 CGG2005、新西兰的 NZGeoid09、澳大利亚的 AUSGeoid09 以及美国的 GEOID09 等。欧洲地区的 EGG07 模型是在 EGG97 的基础上, 融合 CHAMP、GRACE 卫星重力场模型信息和最新的重力和地形数据建立的, 总体精度较 EGG97 模型提高 25% ~ 65%; 加拿大大地水准面模型 CGG2005 的分辨率为  $5' \times 5'$ , 精度为  $\pm 7.2\text{cm}$ ; 新西兰的 NZGeoid09 大地水准面模型, 分辨率为  $1' \times 1'$ , 精度约为  $\pm 6.2\text{cm}$ ; 澳大利亚的 AUSGeoid09 大地水准面模型, 分辨率为  $1' \times 1'$ , 精度为  $\pm 3.0\text{cm}$ ; 美国的 GEOID09 大地水准面模型, 分辨率为  $1' \times 1'$ , 精度为  $\pm 1.5 \sim \pm 1.6\text{cm}$ 。

我国的似大地水准面确定工作在 20 世纪 70 年代初取得初步成果, 先后构建了似大地水准面 CLQG60 (Chinese Local Quasi Geoid 1960)、CQG80 和 WZD94 等模型。我国新一代似大地水准面数值模型 (CQG2000) 是原国家测绘局建立的能直接用于测绘生产并完全覆盖我

国国土(包括海域区)的中国似大地水准面。CQG2000 的分辨率为  $15' \times 15'$ , 与地壳运动观测网络工程 GPS/水准点比较, 标准差为  $\pm 0.360\text{m}$ , 表明了 CQG2000 的精度为分米级。CQG2000 模型的成功研制是我国精化(似)大地水准面的阶段性进展, 分辨率和精度达到一个新的水平, 但和国际先进水平相比, 还有比较大的差距。我国中西部区重力场的短波成分很复杂, 要全面实现厘米级(似)大地水准面的目标, 还需坚持不懈的努力。目前, 国家已经成功完成了部分省市的厘米级似大地水准面精化工作, 其中 2005 年完成的浙闽赣区域似大地水准面外符合精度达到  $\pm 0.062\text{m}$ , 2007 年完成的华东、华中区域似大地水准面总体外符合精度达到  $\pm 0.041\text{m}$ , 精度均达到厘米级。在完成的都市(似)大地水准面中, 许多城市的似大地水准面精度均优于  $0.010\text{m}$ 。例如, 2011 年 12 月宁波市似大地水准面精化模型内符合精度为  $\pm 1.0\text{cm}$ , 外符合精度为  $\pm 1.5\text{cm}$ , 实用性静态(GNSS)高程精度为  $\pm 1.9\text{cm}$ , 实用性动态(GNSS)高程精度为  $\pm 2.5\text{cm}$ , 均满足利用城市四等 GNSS 高程测量代替四等水准测量的规范技术指标。

目前, 国家已经先后成功完成了部分省市的似大地水准面精化工作, 部分省级似大地水准面精度达到厘米级, 城市(似)大地水准面精度优于  $0.010\text{m}$ 。部分省市的似大地水准面模型还在不断精化和改进。例如, 2005 ~ 2006 年, 华东区域似大地水准面精化项目中, 山东省似大地水准面外符合精度达到  $\pm 3.4\text{cm}$ ; 2014 ~ 2016 年, 山东省测绘基准体系优化升级工程对山东省似大地水准面模型改进升级, 外符合精度达到  $\pm 2.0\text{cm}$ ; 青海测绘基准体系基础设施建设一期工程建立了分辨率为  $2' \times 2'$ 、精度优于  $\pm 8.0\text{cm}$  的精密似大地水准面模型; 2017 年最新发布的青海第二期似大地水准面  $2' \times 2'$  格网精度达到  $\pm 6.1\text{cm}$ 。总体来说, 在我国西部建立精度优于  $\pm 5.0\text{cm}$  的似大地水准面模型还需要较多的区域重力信息资源。我国是一个幅员辽阔、地形起伏很大的国家, 各省市经济发展很不平衡, 重力场的变化也较复杂, 特别是中西部区重力场的短波成分很复杂, 要全面实现厘米级(似)大地水准面的目标, 还需长期的努力。

国内外进行(似)大地水准面精化研究的学者众多, 如宁津生、李建成、陈俊勇、许厚泽、晁定波、魏子卿、罗志才、李斐、申文斌、章传银、D. N. Arabelos、C. C. Tscherning、N. Darbeheshti 等。他们在(似)大地水准面精化领域提出许多原创性的理论和方法, 将(似)大地水准面模型的精度和分辨率不断推进。其中, 武汉大学李建成等学者提出确定(似)大地水准面严密的陆海统一算法和具有原创性的球冠谐分析方法, 导出顾及地球曲率的各类地形位(间接影响)及地形引力影响(直接影响)的球面严密积分公式, 解决了  $1\text{cm}$  精度城市似大地水准面和  $5\text{cm}$  精度省级似大地水准面的关键技术。以地球重力场位理论为基础, 通过解算相应的大地测量边值问题来确定(似)大地水准面的理论也在不断发展, 在经典的边值问题 Stokes 理论和 Molodensky 理论的基础上, GPS/重力边值问题理论也有新的发展。

超高阶地球重力场模型也不断推出。2008年4月,美国国家地理空间情报局在充分利用最新数据的基础上研制并发布了新一代地球重力场模型——EGM 2008 地球重力场模型(阶次分别为2190,2159)。模型的空间分辨率约为9km,无论在精度方面还是分辨率方面均取得了巨大的进步,为区域似大地水准面的精化提供了牢固的中、长波框架,并提供部分短波信息。虽然最近十几年随着卫星重力探测技术的发展,地球重力场信息较之以前更为丰富,但在局部重力场逼近方面,仍然存在全球重力观测数据的精度和分辨率有待提高的现实问题。

### 1.3 卫星重力探测技术的发展

随着卫星 CHAMP、GRACE 和 GOCE 等卫星重力任务的实施,卫星轨道跟踪、卫星重力梯度测量和卫星测高技术等现代重力场探测技术的不断发展和应用,地球重力场信息的精度和分辨率出现了质的飞跃,CHAMP 卫星主要优势在于确定地球重力场的长波和部分中波信息;GRACE 卫星轨道信息中包含丰富的地球重力场中长波分量,GOCE 卫星通过星载的重力梯度仪来测定空间3个方向的重力梯度,有助于更好探测地球重力场的中短波信息。

#### 1.3.1 CHAMP 重力卫星

CHAMP(Challenging Mini-Satellite Payload)卫星是由德国地球科学中心(GeoForschungsZentrum,简称GFZ)研制的首次采用卫-卫跟踪技术(HL-SST)的重力卫星,于2000年7月15日成功发射。CHAMP卫星是一颗低轨道、近极卫星,低轨道保证了它对地球重力场有高的敏感性,而近极轨道可以对全球进行连续的覆盖扫描。CHAMP卫星在地球重力学研究方面的主要目的是确定全球中、长波长静态重力场及其时变。CHAMP卫星重力探测如图1-2所示。CHAMP卫星上搭载有两个重要设备,星载双频GPS接收机和放置于整个卫星系统重心处的三轴加速度计,其中星载双频GPS接收机接收高轨GPS卫星信号用于精密地确定CHAMP卫星的轨道;放置于整个卫星系统重心处的三轴加速度计,用以直接测定卫星的非保守力摄动。CHAMP卫星反演地球重力场的空间分辨率可达到500km,即1000km波长以上中波长大地水准面测定精度可达到1cm。

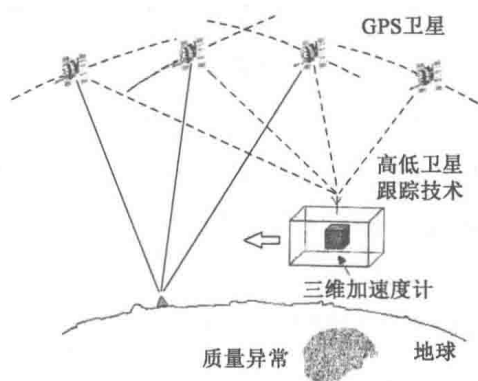


图 1-2 CHAMP 重力探测示意图

### 1.3.2 GRACE 重力卫星

GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星是美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration,简称 NASA)和欧洲联合研制的重力卫星,重要科学目标是提供高精度和高空间分辨率的静态及时变地球重力场,是两颗卫星的组合,于2002年3月成功发射。GRACE卫星采用低-低卫星跟踪(LL-SST)技术,即在同一轨道上发射两颗相距约220km的低轨道卫星,卫星轨道高度在300~480km之间。GRACE卫星的主要星载设备有GPS接收机、加速度计和高精度的微波测量装置。GPS接收机用于卫星的精密轨道确定,加速度计用于测定卫星受到的非保守力,微波测量装置测定两卫星间的距离和距离变率,即LL-SST观测值。通过LL-SST观测值可以探测出重力场的变化信息。其反演地球重力场的精度较CHAMP卫星有很大提高。GRACE卫星数据反映的大地水准面的变化为地球物理、海洋科学和大地测量等学科研究提供重要的基础数据。GRACE卫星重力探测如图1-3所示。

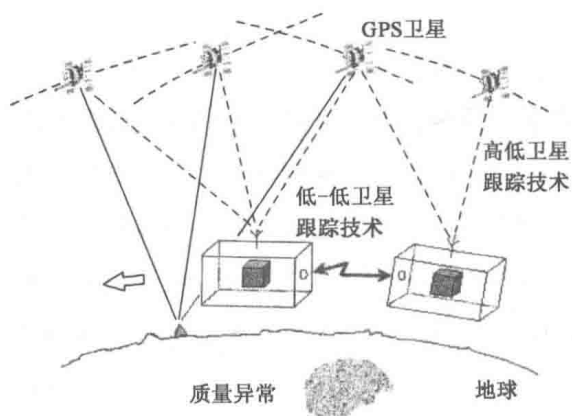


图 1-3 GRACE 重力探测示意图

美国的CSR(Center for Space Research of the University Texas in Austin)及德国的GFZ(GeoForschungsZentrum)是最早获得GRACE地球重力场的研究机构,其中CSR发布了第一个GRACE地球重力场模型GGM01,该模型在半波长为300km尺度上,确定大地水准面精度约为0.02m;德国GFZ早期也发布与GGM01模型精度相近的GRACE地球重力场模型——EIGEN-GRACE01S。这两种模型都没有采用地面、海洋、航空重力测量数据及其他卫星跟踪资料,但中长波部分精度却有明显的提高,证实了GRACE实现其预期科学目标的可行性,随着GRACE卫星观测资料的日益增多,处理卫星资料方法的进一步完善,国际上一些研究机构又推出了一系列更高精度的GRACE产品,例如EIGEN-GRACE02S是GFZ在2004年的产品,在半波长为1000km的空间分辨率上,确定的大地水准面精度好于0.001m,而且此模型计算的海洋重力异常能和重力异常数据(NIMA数据)符合得很好。

2004年8月底,GRACE资料全球公开,极大地推动了GRACE卫星观测资料的研究,其主要研究内容集中在以下几方面:利用GRACE资料确定高精度地球重力场,研究大地水准面和重力异常,利用GRACE时变重力场研究地球表面流体质量的季节性分布变化,特别是全球水质量分布变化。

### 1.3.3 GOCE 重力卫星

GOCE(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation)卫星是欧洲空间局经过十多年研究确定的探测高精度、高分辨率地球重力场的研究计划,在2009年3月发射。GOCE卫星搭载的主要设备有GPS/GLONASS组合接收机、三轴重力梯度仪以及姿态控制系统。GOCE卫星的飞行高度约为260km,轨道倾角为96.5°,该轨道的优点是太阳的光照总是在同一个方向,缺点是测不到极点地区附近的数据,该部分的数据缺口由CHAMP或GRACE卫星的数据补充,也可以用极点地区的航空重力数据补充。GOCE重力探测如图1-4所示。

GPS/GLONASS组合接收机的卫星轨道跟踪数据提供低频部分的重力场观测值,重力梯度仪测量中高频的重力场数据,GOCE卫星的数据可计算直至200阶的重力场模型,相应的分辨率为100km,重力异常的精度优于2mgal,大地水准面的精度优于5cm。2013年11月11日,GOCE卫星完成使命且燃料耗尽,卫星的碎片坠入南大西洋。以安全方式返回地球,堪称完美收场。

CHAMP卫星、GRACE卫星、GOCE卫星计划是卫星重力研究计划的一个整体系列,它们彼此互补并具有不同的科学应用。

在卫星重力信息应用方面,利用重力卫星星历信息恢复地球重力场是主要的研究方向,国内学者周旭华、钟敏等利用卫星重力信息计算的地球重力场系数的短周期变化,获得地球大气、陆地水储量及海水质量迁移等季节变化情况。

## 1.4 多源区域重力信息融合技术

目前在地球重力测量领域已经形成了陆地、海洋、航空、卫星等全方位的测量体系,局部重力场信息日益丰富和多源化,如何从理论上有效地配置不同类型的观测数据,在融合过程中消除数据间的矛盾和差异,从而获得可靠、统一的高程异常起伏数据,一直是物理大地测量学者感兴趣的课题。测绘界学者在大地测量数据融合方面提出过许多有效的方法,包括最小二乘配置法、最小二乘谱组合法等方法。随着计算技术的进步,神经网络技术在测绘学科的应用方面也有诸多进展,以BP神经网络为代表的人工智能方法基于经验积累,具有较强自学能力、高容错能力和复杂映射能力,为解决复杂的非线性、不确定系统问题开辟了新

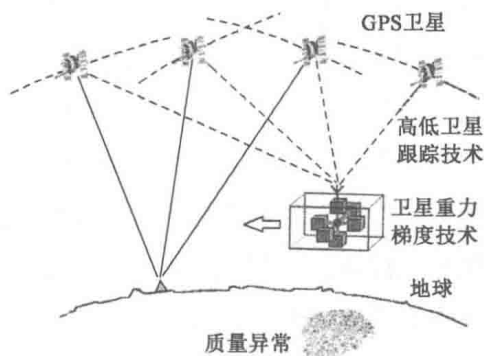


图1-4 GOCE重力探测示意图

途径,并被广泛应用到测绘学科的多个领域。东南大学胡伍生教授潜心研究神经网络技术,利用神经网络方法构造了一个独特的模型,将此模型命名为“神经网络 H-BP 算法”,该算法已在电离层模型构建、对流层水汽含量预测和(似)大地水准面拟合等方面得到有效应用。

人工神经网络模型是生物神经系统简化后的近似,属于自适应非线性动力学系统,它具有学习、记忆、计算和各种智能处理功能。神经网络适于从环境信息复杂、背景知识模糊、推理规则不明确的非线性空间系统中挖掘分类知识,因此,神经网络技术将在多源数据融合中发挥极其重要的作用。重力卫星观测数据包含了丰富的似大地水准面起伏信息,GPS/水准和高分辨率数字高程模型也为精化似大地水准面提供了丰富的数据源。有效融合多源数据中的有效信息,建立高精度、高分辨率的区域似大地水准面模型应该是一个新的发展方向。

在局部重力场信息融合方面,神经网络技术也有其独特的优势,本书作者初步利用神经网络对 GRACE 卫星不同时期的重力场模型进行信息融合结果,获得的融合似大地水准面精度统计精度比单个时期的模型似大地水准面提高近 50%,说明通过神经网络技术进行重力信息融合是有效的。但在卫星重力信息融合的具体应用中,神经网络技术在理论、模型、算法、应用和实现等方面还有许多问题有待探索和研究。例如,神经网络 BP 算法存在局部极小值、收敛速度慢、计算结果不稳定等问题。

综上所述,在当今 GPS 定位时代,精化区域似大地水准面和建立新一代传统的国家或区域高程控制网同等重要,也是建立现代高程基准的主要任务。精化区域似大地水准面需要的地球重力信息可由卫星重力探测等技术进行补充,多源局部重力信息融合方法用于精化似大地水准面,用于高精度 GPS 高程测量,代替低等级水准测量在工程应用中有重要价值。

# 第 2 章    GPS 测量基本原理

## 2.1    GPS 系统组成

全球定位系统 GPS 由美国研制,从 20 世纪 70 年代开始,历时 20 年,耗资 300 亿美元,于 1994 年全面建成,是具有在海陆空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。GPS 系统可以保证在任意时刻、地球上任意一点都可以通过接收到的卫星信号计算出经纬度和高度,以便实现导航、定位、授时等功能。GPS 系统由三部分组成:GPS 卫星星座(空间部分),地面监控系统(控制部分),GPS 信号接收机(用户部分)。GPS 卫星系统组成如图 2-1 所示。

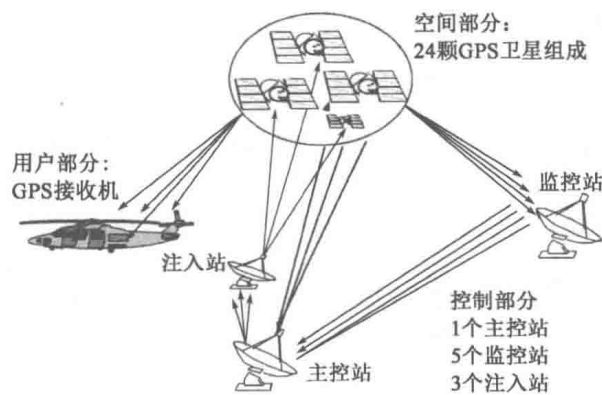


图 2-1    GPS 卫星系统组成

### 2.1.1    空间部分

GPS 系统的空间部分是由 24 颗工作卫星组成,实际上现在可用卫星约 30 颗;GPS 卫星位于距地球表面约 20200km 的轨道上,空间卫星均匀分布在 6 个轨道面上(每个轨道面约 4 颗卫星),卫星的轨道倾角为  $55^{\circ}$ ,卫星运行周期为 12 恒星时。卫星的分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星,并能保持良好定位解算精度的几何图形。GPS 系统的空间部分如图 2-2 所示。