



铁路工程卫星定位 高程拟合技术



刘成◎著

TIELU GONGCHENG WEIXING DINGWEI
GAOCHENG NIHE JISHU



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路科技图书出版基金资助出版

铁路工程卫星定位高程拟合技术

刘 成 著

中国铁道出版社

2018年·北京

内 容 简 介

本书在介绍卫星定位高程拟合技术原理的基础上,结合高程拟合技术在铁路勘察设计行业应用特点及地球重力场模型的发展演变,进行了详细的误差分析,阐述了高程拟合误差产生的原因,并针对原因进行分析,提出了高程拟合的技术设计方案、数据处理方法和精度评定标准。结合国内不同地形特点以及部分国外项目情况,有针对性地进行了高程拟合对比分析,提出了不同地区不同项目应用卫星定位高程拟合技术的经验性结论。

全书共分8章。第1章简要介绍了GNSS高程拟合技术以及国内外地球重力场模型发展情况;第2章介绍了GNSS高程测量的相关理论和方法;第3章介绍了GNSS高程拟合的方法以及拟合过程中的误差分析;第4章介绍了GNSS高程测量具体技术设计参数及精度要求;第5章介绍了GNSS高程拟合数据处理及精度评定;第6、7章分别结合国内不同地形项目情况和国外不同地区项目特点进行高程拟合对比分析及提出经验性结论;第8章对卫星定位高程拟合技术的发展和前景进行了展望。

本书可供工程勘察技术人员及相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铁路工程卫星定位高程拟合技术/刘成著. —北京:

中国铁道出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-113-25028-7

I. ①铁… II. ①刘… III. ①铁路工程-卫星定位-拟合 IV. ①U28

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第231377号

书 名: 铁路工程卫星定位高程拟合技术

作 者: 刘 成

策 划: 傅希刚

责任编辑: 陈小刚

编辑部电话: 010-51873193

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 胡明锋

责任印制: 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

版 次: 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16 印张: 15.5 字数: 354 千

书 号: ISBN 978-7-113-25028-7

定 价: 79.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010) 51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010) 51873659,路电(021) 73659,传真(010) 63549480

作者简介

刘成，男，河北承德人。1995年毕业于长春地质学院地球科学系测绘工程专业。现任中国铁路设计集团有限公司测绘地理信息研究院副院长兼总工程师、教授级高级工程师、中国铁路设计集团有限公司专家、铁路总公司科技专家、天津市测绘学会理事。曾获集团公司“十一五”优秀科技工作者、铁路青年科技拔尖人才、火车头奖章等荣誉称号。长期从事铁路工程测量方面的研究和生产实践，在精密工程测量方面成绩突出，在京津城际项目中率先应用精测网技术，参与了《高速铁路工程测量规范》编写。潜心研究国家大地水准面精化技术，关注超高阶重力场模型的最新发布成果，对研究成果及时进行推广应用。所主持和完成的项目获得过多项奖励。参与完成的“京津城际铁路精密工程控制测量”项目获得2008年度全国优秀勘察设计金奖；参与完成的“京津时速350公里线路工程技术及应用”项目获得2009年度铁道科技奖特等奖；参与完成的“高速铁路精密测量控制技术试验研究”获得2012年度铁道科技奖一等奖；主持完成的“京沪高速铁路（北京至济南段）区域地面沉降监测”项目获得2013年度全国优秀测绘工程奖白金奖；作为主要参与者完成的“坦桑尼亚至赞比亚铁路修复改造工程初测工程测量”项目获得2016年度全国优秀测绘工程奖白金奖。

序

该书系统介绍了铁路卫星定位高程拟合技术的原理、方法、精度分析及适用范围。结合国内山区、林区以及平原相应项目特点进行针对性的分析；得出了适用于相应地区的拟合方法及精度指标，解决了铁路勘察技术中全线高程测量面临的关键问题；提出了高精度、高效率和高可靠性的解决方案。结合“一带一路”建设，针对国外的铁路勘察项目进行了高程拟合精度分析；得出南美、非洲以及东南亚等地区的拟合经验算法。

作者一直致力于研究国家大地水准面精化技术，关注超高阶重力场模型的最新发布成果，研究成果及时推广应用到勘察项目。该书用大量的实际案例进行了高程拟合对比分析，以图表的形式直观地介绍了各种拟合方法的拟合精度，对比分析一目了然；并结合各地区特点提出相应地区的经验结论。这些经验结论对于促进铁路勘察技术的发展，对于卫星定位技术在铁路测量全面应用，以及在公路、石油管线和高压输电线路等长大带状勘察项目中应用具有很重要的参考价值和指导作用。该书是我国铁路工程卫星定位技术在铁路及相关领域应用的研究和实践总结，内容丰富、涵盖范围广泛、针对性强，是一本特色鲜明、实用性强；具有很高出版价值、值得期待的著作。

在此向工程勘察界技术人员推荐该书，皆因其提出的拟合算法及经验结论，对铁路及相关领域进行工程勘察有很好的指导与帮助作用；推荐该书尽早面世，为推动卫星定位技术在铁路及其他工程勘察项目全面应用做出更大贡献！

全国工程勘察设计大师



2018年8月8日

前言

从工程测量出现以来，人们一直在寻找减少外业测量工作量、提高工作效率、提升成果精度的作业技术和方法。GNSS 定位技术的出现，给工程测量作业模式带来了根本性改变，被广泛应用到铁路勘察、施工及运营维护各个阶段，大大提高了测量精度和工作效率。利用 GNSS 技术很容易地确定地面点厘米级甚至毫米级的三维坐标。随着 CHAMP、GRACE 和 GOCE 等重力卫星探测计划的成功实施，地球重力场模型在精度和分辨率等方面均获得了大幅度提高。将 GNSS 定位技术和地球重力场模型融合处理，即可将高精度的大地高转换为工程建设需要的正常高，从此解决了长期以来 GNSS 仅用于平面控制测量，而无法用于高等级的高程控制测量的瓶颈问题。

自 2002 年以来，通过不断学习技术、总结经验，笔者先后完成了长昆客专、大西客专、商合杭客专、哈佳铁路、石济客专、京石客专、哈大客专等多个境内项目勘察的 GNSS 高程控制测量，以及坦赞铁路、埃塞俄比亚铁路、泰国曼谷至呵叻高铁、巴拿马铁路、印度尼西亚雅加达至万隆高铁等多个境外勘察项目的 GNSS 高程控制测量。根据实践需要，开发了基于超高阶重力场模型和 GNSS 定位技术的高程拟合软件，极大地提高了工作效率。

为了及时总结国内外铁路工程测量和铁路工程卫星定位测量的经验和心得，特别是铁路工程卫星定位高程拟合测量的宝贵经验，推动铁路工程测量的技术创新和新成果的应用，以及满足铁路工程测量从业者技术业务培训的需要，特组织编写了《铁路工程卫星定位高程拟合技术》一书。

本书是一部适用于铁路（包括高速铁路、客运专线、新建和改建普速铁路）工程勘察、施工、运营维护各个阶段 GNSS 高程测量工作的实践性工具书。全书分为八章，涵盖内容有 GNSS 高程拟合技术发展、GNSS 高程测量理论、GNSS 高程拟合方法与误差分析、GNSS 高程测量、GNSS 高程拟合数据处理、GNSS 拟合技术在国内外应用案例。本书内容全面、系统，注重实用性和实践操作性，结合国内外铁路勘察项目地形地貌情况，按照山区、平原、



林区以及不同国别等分别进行了拟合计算。拟合计算时采用不同的拟合算法,同时考虑地形改正等因素,分别得出了相应地区的拟合经验算法。本书可供铁路勘察设计、施工等阶段测量人员使用,亦可供大专院校相关专业师生参考。

参与编写本书的有中国铁路设计集团有限公司的技术专家和工程技术人员以及广东工业大学的学者。主要编写人员有梁永、张兴福、匡团结、王兵海、郑雪峰、张天航、袁士涛、欧阳全欢、彭理、张志刚、刘晓明、杜辉等。本书在编写过程中,得到了中国铁路设计集团有限公司副总工程师、全国工程勘察设计大师王长进的悉心指导;得到中国铁路设计集团有限公司科技部、测绘院领导和部门的大力支持,在此表示衷心的感谢。

希望本书能够对从事 GNSS 高程测量的技术人员带来帮助,能够为推动 GNSS 高程拟合技术在国内各工程勘察设计项目中推广应用起到一定的作用。

由于作者工作环境所限,对资料的收集汇总或有遗漏,造成书中存在不当之处者,恳请专家、同行批评指正,俟机勘修。

刘 成
2018 年 8 月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 GNSS 高程拟合技术发展	1
1.2 地球重力场模型的发展	2
1.3 顾及地球重力场模型的地形模型改正	6
第 2 章 GNSS 高程测量理论	7
2.1 坐标系统和高程系统	7
2.2 GNSS 静态相对定位技术	11
2.3 GNSS 精密单点定位技术	12
2.4 连续运行参考站 (CORS) 技术	17
2.5 GNSS 高程测量原理	25
第 3 章 GNSS 高程拟合方法与误差分析	27
3.1 常用的几种拟合模型	28
3.2 顾及地球重力场模型拟合原理及方法	30
3.3 顾及地球重力场模型的降维处理方法	31
3.4 顾及地球重力场模型和地形改正拟合原理及方法	32
3.5 GNSS 高程拟合误差分析	34
第 4 章 GNSS 高程测量	45
4.1 技术设计	45
4.2 选点、埋石	47
4.3 接收机选择和检验	48
4.4 GNSS 线路高程控制测量	49
4.5 航测 GNSS 高程控制测量	52
4.6 跨河 GNSS 高程控制测量	53
第 5 章 GNSS 高程拟合数据处理	56
5.1 GNSS 数据预处理	56



5.2	GNSS 基线解算	56
5.3	GNSS 网无约束平差	59
5.4	高程联测数据处理	60
5.5	GNSS 高程拟合	60
5.6	拟合精度评定	70
第 6 章	GNSS 高程拟合技术在国内铁路工程中的应用	71
6.1	长沙至昆明铁路客运专线 GNSS 高程控制测量项目	71
6.2	大西客运专线大同至运城段 GNSS 高程控制测量项目	92
6.3	商丘至合肥至杭州铁路商丘至阜阳段 GNSS 高程控制测量项目	118
6.4	哈尔滨至佳木斯铁路 GNSS 高程控制测量项目	138
6.5	京津唐铁路 CORS 技术应用	165
6.6	小 结	175
第 7 章	GNSS 高程拟合技术在国外铁路工程中的应用	176
7.1	坦赞铁路 GNSS 高程控制测量项目	176
7.2	埃塞俄比亚铁路 GNSS 高程控制测量项目	192
7.3	泰国曼谷至呵叻高速铁路 GNSS 高程控制测量项目	205
7.4	巴拿马共和国巴拿马城至戴维铁路 GNSS 高程控制测量项目	220
7.5	小 结	228
第 8 章	展 望	229
8.1	重力卫星的发展	229
8.2	高精度似大地水准面精化	229
8.3	铁路行业的应用前景	230
8.4	其他行业应用前景	230
	参考文献	231

第1章 概述

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 是指中国的北斗 BDS、美国的全球定位系统 GPS、俄罗斯的 GLONASS 和欧洲的 GALILEO 等的统称。GNSS 技术具有在陆、海、空进行全方位三维导航与定位能力, 由于该技术具有卓越的效率、精度、全天候以及不受通视条件限制等优点, 自 20 世纪 90 年代开始推广以来, 已被成功应用到大地测量、航空摄影测量、空间飞行器的导航与定位、地壳运动监测、地球动力学、地球物理勘探、工程测量等多种学科, 具体表现在: 全球及国家坐标参考框架的建立与维护、区域似大地水准面精化、地形图测绘、地籍测量、高精度的施工控制测量、水下地形测量、航测像控点测量以及 GNSS 高程测量等。我国应用 GNSS 技术建立了首个高精度的地心三维坐标框架——CGCS2000 大地坐标系, 自 2008 年 7 月起正式启用该系统; 另外我国很多城市建立了基于 GNSS 技术的 CORS 实时定位系统, 用于城市基础测绘的实时三维定位服务。可以说 GNSS 技术的出现是大地测量与工程测量发展历史上的一个重要里程碑, 相比传统测绘手段, 该技术具有很大的优势。GNSS 定位技术具有自动化程度高、观测速度快、定位精度高、经济效益高等优点, 已经给测绘科学带来了巨大的推动作用, 利用此项技术, 我国已经完成了国家 A, B 级网的施测工作, 给社会带来了巨大的经济效益。很多生产单位也结合自己的实际情况, 进行了具有本单位特色的 GNSS 技术的应用理论研究。

虽然通过 GNSS 定位技术确定地面点高精度的三维坐标不存在任何技术问题, 很容易达到设计的精度指标, 但 GNSS 技术获得点的高程为大地高, 而实际工程需要的是正常高, 因此要使 GNSS 测高具有实用性, 需将 GNSS 大地高转换为正常高, 这正是 GNSS 测量的一个难点和热点。随着 GNSS 定位技术、理论与方法的不断完善和发展, 地球重力场模型的精度和分辨率的大幅度提高, 高精度和高分辨率数字地形模型 (DTM) 产品的释放, 均为 GNSS 高程转换提供了一个有利条件。综合利用 GNSS 定位技术和地球重力信息 (如: EGM96、EGM2008 和 EIGEN-6C4 地球重力场模型) 代替一定等级的常规水准测量 (结合区域地形情况, 经过拟合可达三、四等水准测量精度) 已经得到广泛应用。此项技术不但为生产单位节约了大量的人力和物力, 而且提高了工作效率。

1.1 GNSS 高程拟合技术发展

目前在大地测量或者工程测量领域, 常规水准测量仍然是用于测定地面两点正常高差的常用技术手段, 其测量精度与两点间距离平方根成反比, 虽然水准测量结果可达到很高的精度 (优于 0.1 mm/km), 但水准测量的工作强度大、效率低, 在长距离铁路线路工程测量中, 常规水准测量工作是最为耗时、耗力的工作。GNSS 技术的出现给测量作业模式



带来了根本性改变,被广泛应用到铁路勘测、初测、定测及检测等各个阶段的测量工作中,大大提高了工作效率。利用 GNSS 技术可很容易地确定地面点具有厘米级甚至毫米级的三维坐标,但由于 GNSS 技术所采用的坐标系是地心坐标系,它所获得的高程是大地高,而非我们所采用的正常高,其高程成果不能直接用于工程建设。GNSS 技术可长距离、高精度、高效率地确定地面点的大地高或点间的大地高差,如何将 GNSS 技术获得的大地高或大地高差转换为工程建设需要的正常高或正常高差是 GNSS 高程测量技术发展的瓶颈。

由 GNSS 相对定位得到的三维基线向量,通过 GNSS 网平差,可以得到高精度的大地高差。如果网中一点或多点具有精确的 WGS84 大地坐标的大地高程,则在 GNSS 网平差后,可求得 GNSS 点的 WGS84 大地高程 H 。实际应用中,地面点的高程采用正常高系统,正常高 H_r 是地面点延铅垂线至似大地水准面的距离,是通过水准测量的方法确定的,这就需要确定大地高与正常高的关系。似大地水准面与参考椭球面间的高差即高程异常, $H_r = H - \zeta$, 其中 H_r 为正常高, H 为大地高, ζ 为高程异常。高程拟合方法的基本思路:在 GNSS 网中联测一定数量的高等级水准点(要求这些点分布均匀、密度充分),再利用这些点上的正常高和大地高求出它们的高程异常值,再据这些点上的高程异常值与坐标的关系,用最小二乘法拟合测区的似大地水准面,利用拟合的似大地水准面内插出其他 GNSS 点的高程异常,从而求出各个未知点的正常高。

GNSS 高程拟合技术的发展随着实践的应用以及地球重力场模型精度的提高逐渐推广。最早主要依靠联测国家已知水准点进行拟合计算,以便求出该区域的重力异常值,但是由于地形起伏的变化,地球重力场的不均匀变化,以及联测的国家已知水准点分布不均匀,从而导致拟合成果与实测结果出入较大,较难满足国家水准测量相应等级精度要求。随着 EGM96、EGM2008 和 EIGEN-6C4 地球重力场模型的相继问世,地球重力场模型在精度和分辨率等方面均获得了大幅度提高,模型阶次从 360 阶逐步提高至 2160 阶,目前以阶次高达 2160 的 EIGEN-6C4 重力场模型为最高精度。随着重力场模型精度的提高,对 GNSS 高程拟合的原理及方法研究逐步深入和拓展,拟合的方法也逐步多样化,出现了直线拟合模型、二次曲线拟合模型、三次曲线拟合模型、平面拟合模型、二次曲面拟合模型等多种拟合算法,结合工程实际情况,面对国家水准点稀少情况,还增加了实测部分段落高差,增加拟合权重,提高拟合精度。由于铁路沿线地域狭长,沿线地形起伏较大,为提高拟合精度又加入了地形改正。通过不同地区不同项目的实践检验,GNSS 高程拟合技术在铁路勘测中应用越来越广泛。

1.2 地球重力场模型的发展

1.2.1 国外重力场模型发展

地球重力场模型通常是指用来表示地球重力场特征的一些基本参数的组合,在地学中所指的地球重力场模型是指一组球谐系数或引力位系数,是对真实地球重力场的最佳拟合逼近。地球重力场是地球科学研究与分析中的基本物理场,是研究地球内部和外部物质运



动状态及动力学机制、地球物理环境及其变化的重要信息，高精度、高分辨率地球重力场可为大地测量等相关地球科学的研究提供更加精细的地球重力场信息，以用于全球或区域高程基准统一、大地水准面确定等。Kaula 于 1966 年首次利用卫星轨道的线性摄动理论建立了 8 阶地球重力场模型，CHAMP 卫星发射前，反演地球重力场模型的数据源主要以卫星测高、地面重力数据为主，代表性的地球重力场模型有美国哥达德宇航中心研制的 GEM 系列模型，美国哥达德宇航中心、马里兰大学天文系以及德克萨斯大学空间研究中心等科研机构共同研制的 JGM 系列模型，美国俄亥俄州立大学研制的 OSU 系列模型，美国哥达德宇航中心、美国影像制图局等科研机构联合研制的 360 阶 EGM96 模型。其中，EGM96 模型使用了大量的卫星测高、地面重力等数据，是 CHAMP 卫星发射前精度较高的地球重力场模型。

2000 年前，国外一些研究机构和大学推出了一系列利用地面重力数据和卫星观测数据（卫星测高和地面卫星跟踪数据）得到的地球重力场模型见表 1.1，其中 EGM96 模型是国际上公认的精度较高的模型之一。

表 1.1 国外 2000 年前主要重力场模型一览表

Model	Year	Degree	Data	Citation
PGM2000A	2000	360	S, G, A	Pavlis et al, 2000
TEG4	2000	180	S, G, A	Tapley et al, 2000
GRIM5C1	1999	120	S, G, A	Gruber et al, 2000
GFZ97	1997	359	PGM062w, G, A	Gruber et al, 1997b
EGM96	1996	360	EGM96S, G, A	Lemoine et al, 1998
TEG3	1996	70	S, G, A	Tapley et al, 1997a
EGM96S	1996	70	S	Lemoine et al, 1998
OSU91A	1991	360	GEMT2, G, A	Rapp et al, 1991

注：S—卫星跟踪数据；G—地面重力数据；A—卫星测高数据。

20 世纪地球重力场模型主要依靠地面重力观测、卫星测高和地面卫星跟踪三种资料的综合模式，其中长波长的重力场信息主要由地面对空间多颗不同倾角人造卫星的跟踪资料恢复提取，中波长的重力场信息则来自地面重力观测和卫星测高资料。

卫星跟踪卫星重力测量技术（CHAMP 卫星、GRACE 卫星和 GOCE 卫星）的发展为确定地球重力场模型的中低波长提供了高精度的观测数据。表 1.2 为国外最新公布的地球重力场模型（2000 年后，卫星重力观测数据大大改善了重力场的中、低位系数的精度）。

表 1.2 国外最新的地球重力场模型一览表

Model	Year	Degree	Data	Citation
GOCO01S	2010	224	S (GOCE, Grace)	Pail et al, 2010b
EIGEN-51C	2010	359	S (Grace, Champ), G, A	Bruinsma et al, 2010
AIUB-CHAMP03S	2010	100	S (Champ)	Prange, L. et al, 2010



续上表

Model	Year	Degree	Data	Citation
EIGEN-CHAMP05S	2010	150	S (Champ)	Flechtner et al, 2010
ITG-Grace2010s	2010	180	S (Grace)	Mayer-Gürr et al, 2010
AIUB-GRACE02S	2009	150	S (Grace)	Jäggi et al, 2009
GGM03C	2009	360	S (Grace), G, A	Tapley et al, 2007
EIGEN-5C	2008	360	S (Grace, Lageos), G, A	Förste et al, 2008
EGM2008	2008	2160	S (Grace), G, A	Pavlis et al, 2008
GGM03S	2008	180	S (Grace)	Tapley et al, 2007
AIUB-GRACE01S	2008	120	S (Grace)	Jäggi et al, 2008
ITG-Grace03	2007	180	S (Grace)	Mayer-Gürr et al, 2007
EIGEN-GL04C	2006	360	S (Champ, Grace), G, A	Förste et al, 2006c
EIGEN-CG03C	2005	360	S (Champ, Grace), G, A	Förste et al, 2005c
GGM02C	2004	200	S (Grace), G, A	UTEX CSR, 2004
GGM02S	2004	160	S (Grace)	UTEX CSR, 2004
EIGEN-CG01C	2004	360	S (Champ, Grace), G, A	Reigber et al, 2004c
EIGEN-CHAMP03S	2004	140	S (Champ)	Reigber et al, 2005b
EIGEN-GRACE02S	2004	150	S (Grace)	Reigber et al, 2005a
GGM01C	2003	200	TEG4, S (Grace)	UTEX CSR, 2003

注：S—卫星跟踪数据；G—地面重力数据；A—卫星测高数据。

随着 CHAMP、GRACE 和 GOCE 等重力卫星探测计划的成功实施，地球重力场模型在精度和分辨率等方面均获得了大幅度提高。美国国家地理空间情报局（NGA）经过多年的研究和总结，在以往构建地球重力场模型的经验 and 理论上，采用最先进的建模技术与算法，研制了 EGM2008 模型，该模型阶次完全至 2160（另外，球谐系数的阶扩展至 2190 次），相当于模型空间分辨率为 5'（空间分辨率约 9 km）。该模型采用了 GRACE 卫星跟踪数据（ITG-GRACE03S 位系数信息以及相应的协方差信息）、卫星测高数据和地面 5'×5' 重力异常数据等，具体数据源如图 1.1 所示。EGM2008 模型无论在精度还是在分辨率方面均取得了巨大进步，全球大地水准面精度约 20 cm。

随后，德国地学研究中心 GFZ 等科研机构综合 GRACE 卫星数据、LAGEOS 卫星数据、GOCE 卫星数据、2'×2' 的 DTU 海洋重力异常数据以及 EGM2008 重力场模型等数据源研制了阶次高达 2190 的 EIGEN-6C4 重力场模型，具体数据源及其对不同阶次的贡献如图 1.2 所示。各项检核结果表明，EIGEN-6C4 重力场模型的精度要优于同阶次的 EGM2008 重力场模型。

截至目前，ICGEM 网站已发布了 170 余个地球重力场模型，其中，EGM96、EGM2008 以及 EIGEN-6C4 重力场模型是地球重力场模型研制过程中非常有代表性的阶段性成果。表 1.3 给出了利用全球 GNSS 水准数据对 3 种地球重力场模型进行检核的精度统计结果，表 1.3 结果显示，EIGEN-6C4 模型精度要略好于 EGM2008 模型，比 EGM96 重力



场模型精度提高接近1倍。

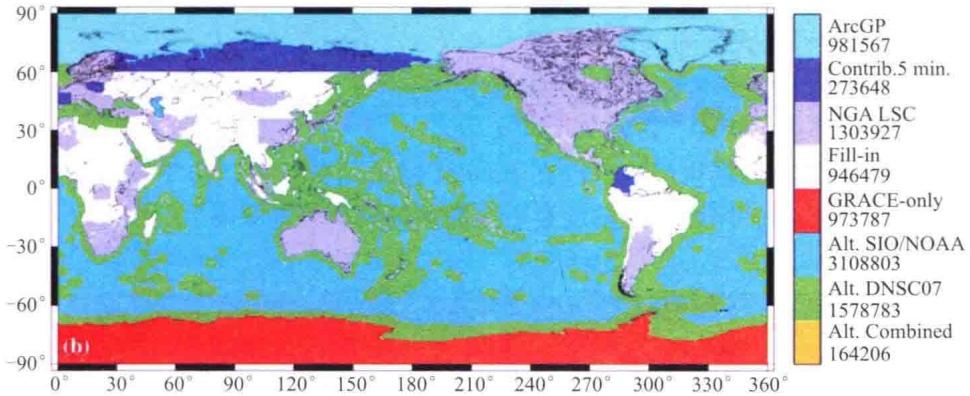


图 1.1 用于研制 EGM2008 重力场模型的数据源情况

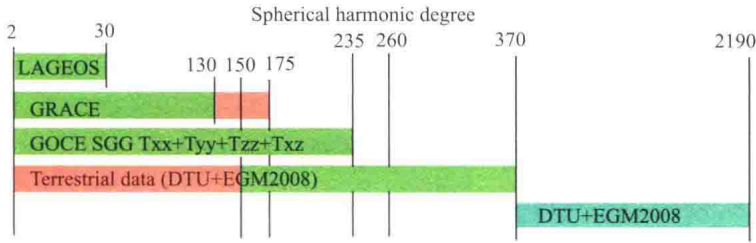


图 1.2 用于研制 EIGEN-6C4 重力场模型的数据源及其对不同阶次的贡献情况

表 1.3 利用 GNSS 水准数据检核 EGM96、EGM2008 以及 EIGEN-6C4 模型精度统计结果

模型	最高阶	美国 (6169 点)	加拿大 (2691 点)	欧洲 (1047 点)	澳大利亚 (201 点)	日本 (816 点)	巴西 (1112 点)	总共 (12036 点)
EGM96	360	0.379	0.353	0.493	0.298	0.364	0.730	0.4270
EGM2008	2160	0.248	0.128	0.125	0.217	0.083	0.460	0.2395
EIGEN-6C4	2160	0.247	0.126	0.121	0.212	0.079	0.446	0.2359

注：此表数据来自 ICDEM 网站。

1.2.2 国内重力场模型发展

经过近几十年的发展，国内地球重力场模型的研究也取得了突破性的进展，现主要有三个系列：

1. 中国科学院测量与地球物理研究所 IGG 系列

1971 年许厚泽院士研制了我国第一个地球重力场模型（14 阶），随后于 1993 年和 1997 年分别推出了 360 阶地球重力场模型 IGG93E、360 阶青藏高原模型 QZ93G、720 阶重力场模型 IGG97L 和 2005 年结合 GRACE 卫星资料数据获得的 360 阶次的 IGG05b 模型。

2. 西安测绘研究所的 DQM 系列

西安测绘研究所于 1977、1984 和 1994 年相继推出了 DQM77A/B（22 阶）、DQM77A ~



E (B、E 为 36 阶, A、C、D 为 50 阶)、DQM94A 以及近几年推出的 2160 阶的 DQM2000D 等地球重力场模型。

3. 原武汉测绘科技大学的 WDM 系列

武汉测绘科技大学于 1989、1994 年研制出 180 阶的 WDM89 模型和完全到 360 阶次的 WDM94 模型 (宁津生, 1990, 1994)。

国外大部分地球重力场模型均可以在 ICGEM 网站免费获得, 由于国内重力场模型加入了地面重力数据, 在一定程度上精度有所提高, 但模型较难获得。

1.3 顾及地球重力场模型的地形模型改正

通常我们用一组有限阶次的球谐系数来逼近和表示全球重力场, 这一组系数称为重力位系数或地球重力场模型。模型的阶次越高, 其分辨率就越高, 如模型的阶次为 360, 则其分辨率为 $30'$ (约 55 km); 2160 阶次的 EGM2008 模型, 其空间分辨率为 $5'$ (约 9 km)。地球重力场模型总是表示为一定的阶次, 即使高阶甚至超高阶 (如 2160 阶次) 地球重力场模型也很难模型化重力场的高频部分 (比重力场模型波长短的部分), 而这一部分正是由局部地形起伏引起的, 这就存在所谓的模型截断误差。应用 SRTM 全球数字地形数据、冰川厚度以及水深数据等计算了全球数字地形模型——DTM2006.0, 该模型的阶次完全到 2190。在 EGM2008 模型构建过程中, DTM2006.0 全球数字地形模型用于计算与地形有关重力量及其归算。基于剩余地形模型 (RTM) 理论, 用于超高阶重力场模型的截断误差补偿的方法即为地形模型改正。

第2章 GNSS 高程测量理论

传统地面观测技术确定地面点的位置时，平面位置和高程通常是独立确定的，原因有两个：一个是平面位置和高程分别采用不同的观测手段、基于不同的参考基准，确定平面位置时，采用参考椭球为基准，而确定高程时则以大地水准面或似大地水准面为基准；另外平面位置观测通过测量水平角和边长的方法确定，而高程则通过水准测量或测量竖直角和边长的方法来确定。

近年来，GNSS 以其精度高、速度快、经济方便等优点，在布设各种控制网、变形监测及精密工程测量等诸多方面都得到了迅速、广泛的应用。国内外大量的 GNSS 测量实践证明，它的平面相对精度达到了 10^{-9} 甚至更高的精度，这是常规地面测量技术难以比拟的。GNSS 技术也能较容易获得高精度的大地高差，但大地高差是相对于 WGS84 大地坐标系统的，也就是说大地高差仅有几何意义，不具有我们常使用的正常高的物理意义，无法直接采用。正常高一般通过水准测量的方法求得。众所周知，水准测量野外工作繁重，容易引入人为误差和系统误差。为此，为能够充分发挥 GNSS 可以提供高精度的三维坐标优越性，尤其是 GNSS 高程测量在工程中的应用，必须实现 GNSS 大地高向正常高的转换。如果能够获得相应点的高程异常，就可以进行高程系统转换，将大地高转换为正常高。

2.1 坐标系统和高程系统

2.1.1 坐标系统

坐标系统是定义坐标如何实现的一套理论与方法。包括坐标原点定义、坐标轴的指向以及与之相关的基本的数学和物理模型。坐标系根据原点位置的不同可以分为参心坐标系和地心坐标系，例如我国 1954 北京坐标系和 1980 西安坐标系均属于参心坐标系，GNSS 测量中常用的 ITRF (International Terrestrial Reference Frame)、WGS84 (World Geodetic System 84, 世界大地坐标系 84) 以及 CGCS2000 坐标系 (China Geodetic Coordinate System 2000)，属于地心坐标系。

1. ITRF 坐标框架

ITRF 是目前国际上精度最高并被广泛采用的参考框架，其定义和维持服务由 IERS 具体负责。该框架是利用 VLBI、SLR、GPS 和 DORIS 等空间大地测量技术来实现和维护的，是由一系列连续跟踪站或 IGS 跟踪站的三维直角坐标 (X, Y, Z) 和其对应的站坐标速度及相应的地球定向参数组成。随着全球连续运行跟踪站数量的不断增加、数据处理方法的改进、观测手段和技术的进步、测站精度的提高以及观测资料的不断累积，ITRF 框架的精度也在不断地改进和完善。迄今为止，已经建立了 10 多个 ITRF 版本，一般用 ITRF_{yy}



的形式表示各版本，其中 yy 表示建立该版本所用到的资料的最后年份。每一个版本的 ITRF 框架的定义均由三部分组成：原点、尺度和定向。

ITRF 的不同版本间的坐标转换可采用七参数布尔莎模型，具体转换公式为：

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

式中 $[X_2, Y_2, Z_2]^T, [X_1, Y_1, Z_1]^T$ ——转换后框架和原始框架的坐标；

$T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$ ——原始框架到目标框架的 7 个转换参数。

部分 ITRF 框架转换参数见表 2.1，需特别注意表 2.1 中的转换参数必须利用公式 (2.1) 的转换模型。

表 2.1 几种 ITRF 框架间转换参数

转换框架	T_1	T_2	T_3	D	R_1	R_2	R_3	EPOCH
	cm	cm	cm	ppb	0.001"	0.001"	0.001"	
RATES	T_1	T_2	T_3	D	R_1	R_2	R_3	
	cm/y	cm/y	cm/y	ppb/y	0.001"/y	0.001"/y	0.001"/y	
ITRF2005-ITRF2000	0.10	-0.80	-5.80	0.40	0.00	0.00	0.00	2000.0
RATES	-0.20	0.10	-1.80	0.08	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000-ITRF97	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
RATES	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF2000-ITRF96	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
RATES	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF2000-ITRF94	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997.0
RATES	0.00	-0.06	-0.14	0.01	0.00	0.00	0.02	
ITRF2000-ITRF93	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988.0
RATES	-0.29	-0.02	-0.06	0.01	-0.11	-0.19	0.07	

表 2.1 除给出了在历元 EPOCH 的转换参数外，还给出了各转换参数对应的速率，用于非 EPOCH 历元时刻的框架转换，任意时刻 t 转换参数计算公式为：

$$P(t) = P(\text{EPOCH}) + \dot{P}(\text{EPOCH})(t - \text{EPOCH}) \quad (2.2)$$

式中 $P(t)$ ——待求的 t 时刻框架转换参数；

$P(\text{EPOCH})$ ——EPOCH 历元转换参数(见表 2.1)；

$\dot{P}(\text{EPOCH})$ ——EPOCH 历元转换参数变化率。

2. WGS84 坐标系

WGS84 是美国建立的全球地心坐标系。坐标系原点位于地球的质量中心， Z 轴与 IERS 参考极 (IERS Reference Pole, IRP) 指向相同，该指向与历元 1984.0 的 BIH 协议地极 (Conventions Terrestrial Pole, CTP) 一致； X 轴指向 IERS 参考子午线 (IERS Reference Meridian, IRM) 与通过原点并垂直于 Z 轴的平面的交点，IRM 与在历元 1984 时的 BIH 零