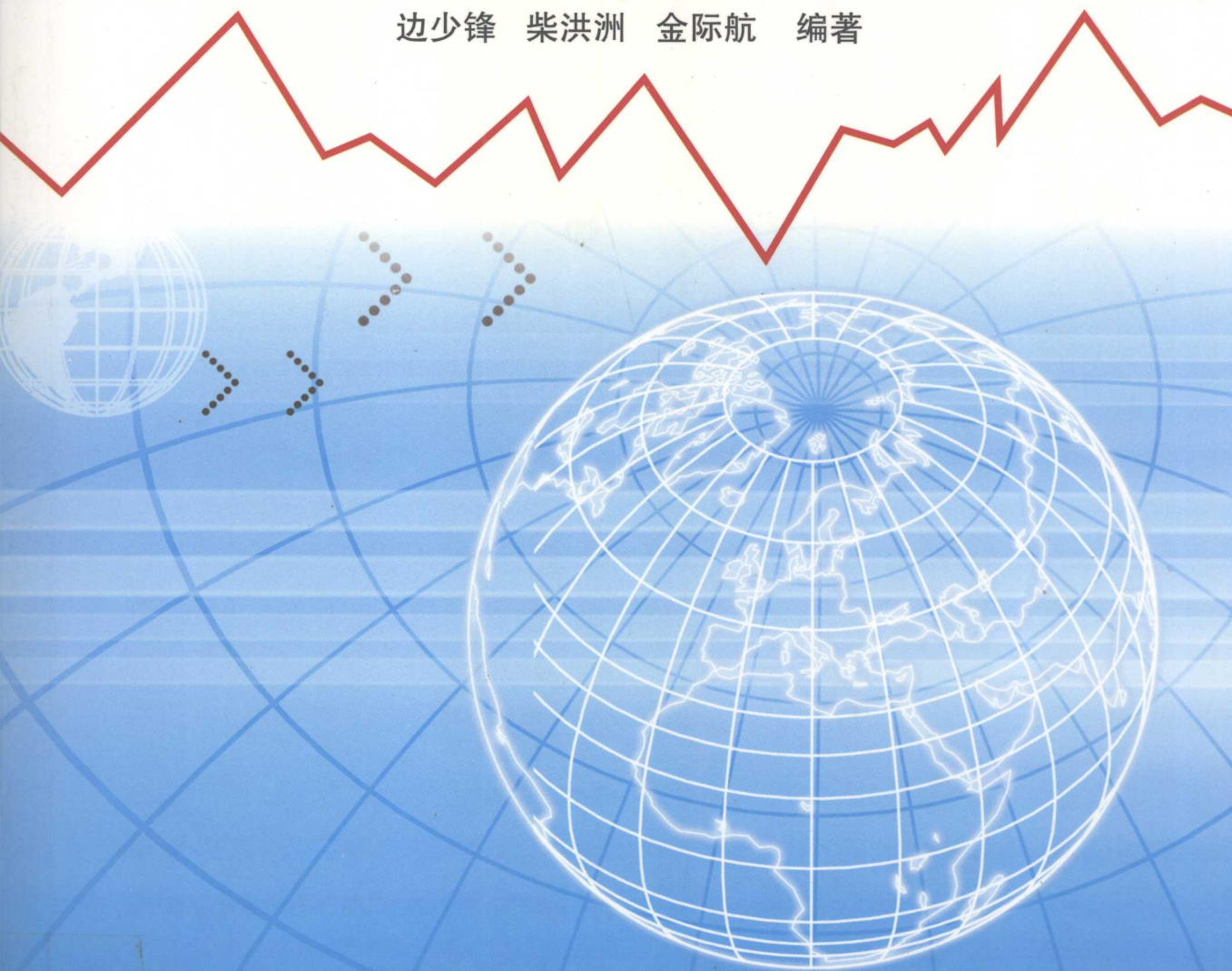


大地坐标系 与大地基准

边少锋 柴洪洲 金际航 编著



北 國 防 工 業 出 版 社

<http://www.ndip.cn>

P22
B787.1/2

国家自然科学基金(批准号 40125013)资助出版

大地坐标系与大地基准

边少锋 柴洪洲 金际航 编著

国防工业出版社

地址：北京·... 著者：边少锋、柴洪洲、金际航

2003.2 国防工业出版社

ISBN 7-118-03804-0

... 大地坐标系与大地基准 ...

... 大地坐标系与大地基准 ...

2003.2 国防工业出版社

... 大地坐标系与大地基准 ...

2003.2 国防工业出版社

... 大地坐标系与大地基准 ...

2003.2 国防工业出版社

... 大地坐标系与大地基准 ...

2003.2 国防工业出版社

... 大地坐标系与大地基准 ...

国防工业出版社

北京·... 地址：北京·... 邮编：100044

·北京·

发行部：(010) 68411335
编辑部：(010) 68411335
发行部：(010) 68411335
编辑部：(010) 68411335

内 容 简 介

本书是一本面向非大地测量专业人员介绍大地坐标系和大地基准的教学或业务参考书。第1章绪论介绍大地测量研究内容、发展简史和大地基准的概念与发展,第2章介绍常用大地坐标系及其转换,第3章介绍我国国家大地控制网的建立与发展,第4章介绍作为大地测量数学基准参考椭球的一些数学关系及解算方法,第5章介绍作为地图绘制数学基础面的 Gauss 投影和 Mercator 投影,第6章根据国外有关文献比较全面和详细地介绍了得到广泛应用的 WGS84 世界大地坐标系的定义、基本常数、正重力场模型和与其他局部大地基准的转换,第7章简要介绍了其他一些常见大地坐标系和基准,第8章和第9章结合航海和海用导航的特点,介绍了世界地磁模型 WMM2000 和中国近海海洋概况及简单的海洋测绘和海洋遥感知识。

本书可以作为导航、航海、航天、地震、石油、水利、农业、林业、GIS、遥感等专业从事测量、导航和定位服务方面的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大地坐标系与大地基准/边少锋等编著. —北京:国防工业出版社,2005.5

ISBN 7-118-03804-0

I.大... II.边... III.①大地坐标系—研究生—教材②大地测量基准—研究生—教材 IV.P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 004754 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13½ 307 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

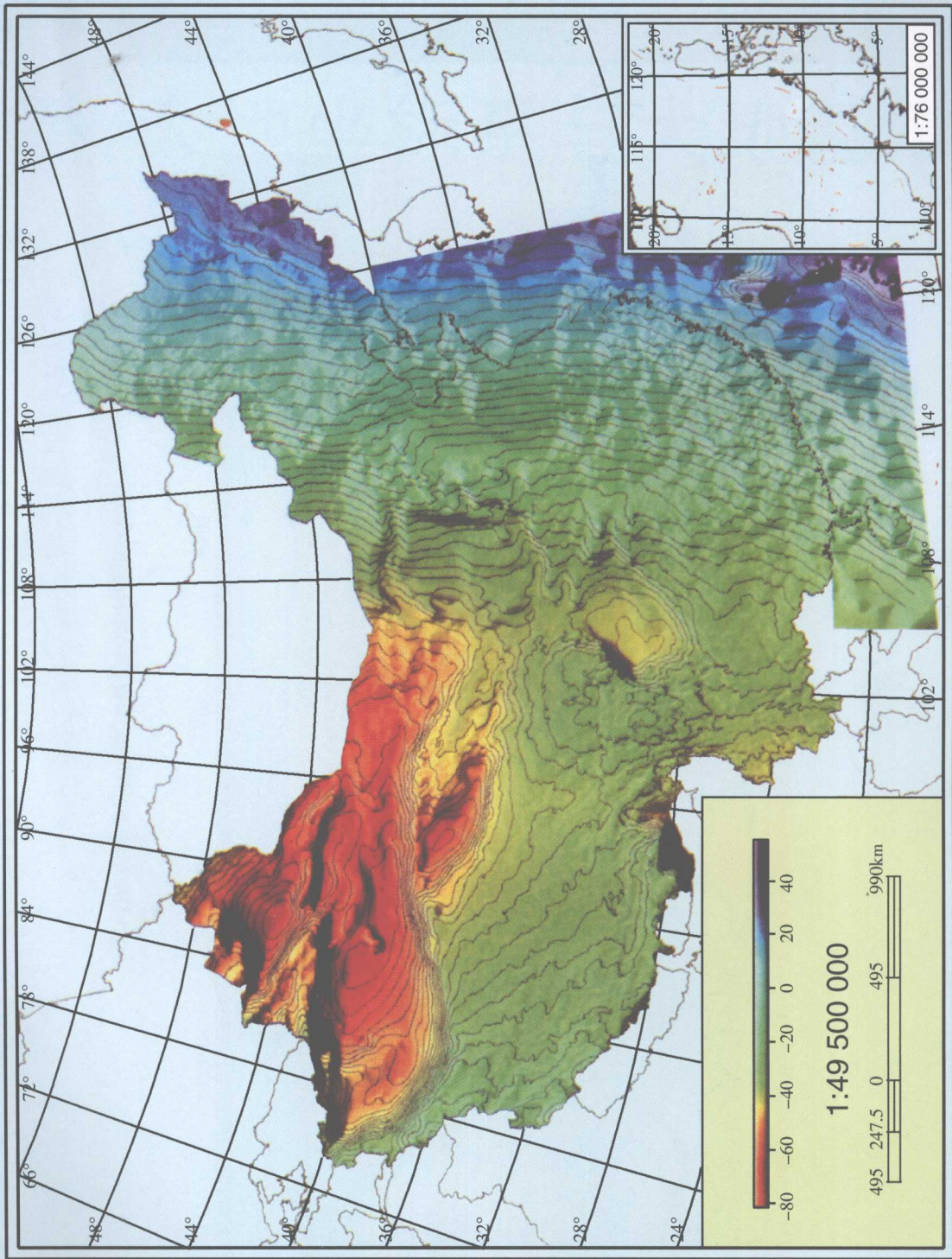
发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

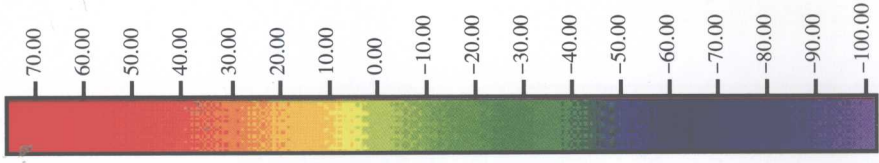
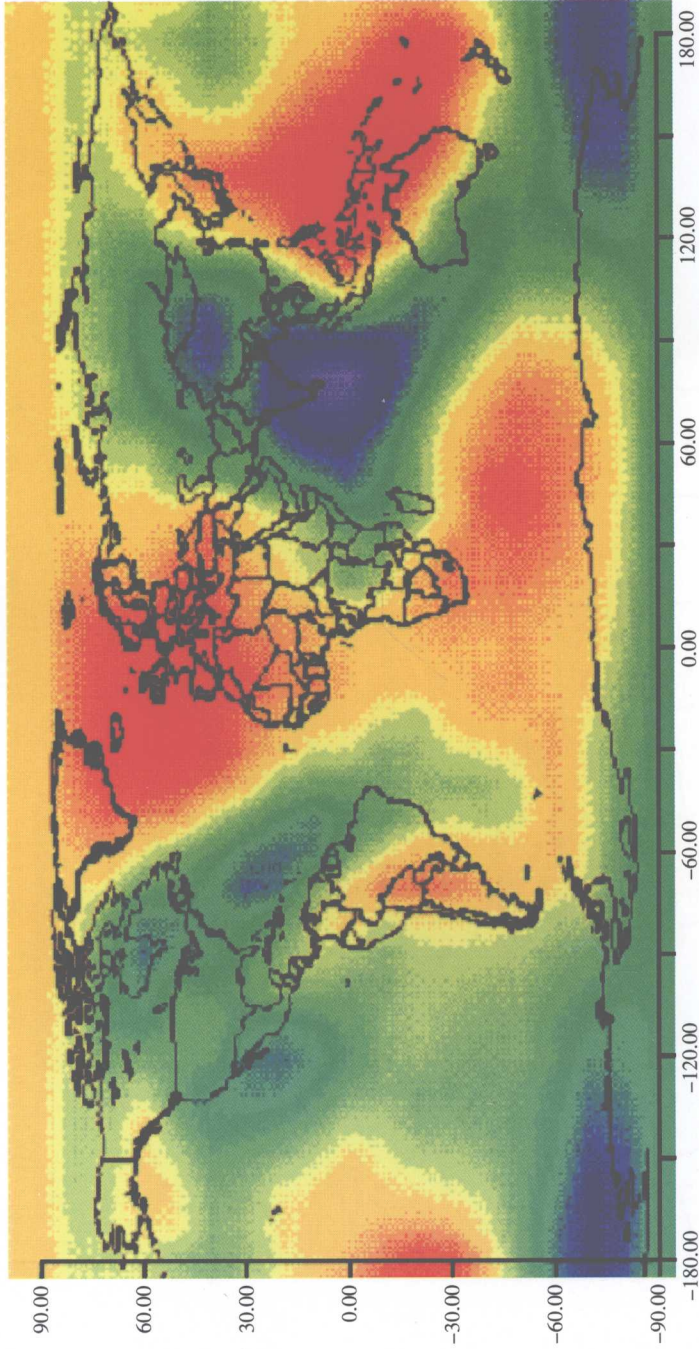


边少锋，1961年出生，山西五台人，现为海军工程大学导航教研室教授。1982年本科毕业于解放军测绘学院，获学士学位；1985年研究生毕业于解放军测绘学院，获工学硕士学位；1992年博士研究生毕业于武汉测绘科技大学，获工学博士学位。1996年获德国洪堡基金会洪堡奖学金，并赴德国Stuttgart大学进行合作研究。2000年获国家杰出青年基金资助。先后主持或参加国家、军队科研项目十余项，在国内外期刊发表学术论文五十余篇。主要研究方向为地球重力场确定、精密定位技术和卫星导航定位技术与应用。



我国大地水准面等值线图 (引自李建成、陈俊勇等编写的《地球重力场逼近理论与中国 2000 似大地水准面的确定》^[16])

WGS84 Geoid Height



Meters

From DMA 10 by 10 Degree Geoid Height Grid

全球大地水准面起伏图

前 言

导航和制导的目的是确定载体位置,并解决如何到达目的地或如何实现精确打击两个根本问题。这两个问题都涉及大地测量方面的知识。描述物体的运动首先要选择参考系,这在大地测量中就叫大地坐标系或大地基准。除导航和制导学科外,其他许多学科,尽管其研究的内容千差万别,但在很多情况下,研究对象都具有位置属性,都需要相关的位置信息。

编著者长期从事大地测量教学与研究,以后又从事导航、制导方面的教学与研究,深感大地测量坐标系广泛服务于导航制导、远洋航海、航天测控、资源开发、城市规划、国土整治、地球物理和国防建设,因而有必要编写一本面向非大地测量专业人员的有关参考书,以期使非大地测量专业人员能对大地坐标系和大地基准有一个概括的了解。

全书共分9章,第1章至第5章、第9章由边少锋编写,第6章、第8章由金际航编写,第7章和第3章第9节、第10节由柴洪洲编写。金际航绘制了全书插图,边少锋对全书进行了最后的修改和定稿。

本书在编写过程中,曾参考和引用了陈俊勇院士的多篇学术论文,冯士筭院士等编著的《海洋科学导论》,宁津生院士等编著的《测绘学概论》,徐正扬教授等编著的《大地控制测量学》,李建成教授等编著的《地球重力场逼近理论与2000似大地水准面确定》,及国内外其他一些学者的文献,由于参考和引用之处甚多,未能在正文中一一注明,特此表示感谢。

海军工程大学导航工程系周永余副教授、陈永冰副教授审阅了本书初稿并提出了许多宝贵意见,特此表示感谢。本书能够出版,还要特别感谢国家自然科学基金委员会国家杰出青年科学基金的资助。

最后,由于编著者学识水平有限,对各个学科需要大地测量保障的认识了解不够全面,收集的编写资料也非常有限,加之编写的时间仓促,书中难免有以偏概全和谬误不妥之处。在此,恳请各位同仁批评指正,编著者将不胜感激。我们的邮件地址是 sfbian@sina.com。

编著者

2004年12月于海军工程大学
信息工程大学

符号诠释

a, α	参考椭圆长半径与扁率
M, N	子午线曲率半径, 卯酉圈曲率半径
e, e'	参考椭球第一偏心率与第二偏心率
N, ξ, η	大地水准面差距, 垂线偏差子午分量与卯酉分量
B, L, H	大地纬度、大地经度和大地高程
$\varphi, \lambda, H_{\text{正}}$	天文纬度、天文经度和正高(即海拔高)
γ, ε	春分点与黄赤交角
α, δ	赤经, 赤纬
u, β, λ	椭球坐标
GM, ω	地球引力常数与地球质量乘积, 地球自转角速度
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	欧拉角
q, B	等量纬度与开拓后的复数纬度
Φ	复数底点纬度
m, γ	高斯投影尺度比与子午线收敛角
A	大地方位角
$\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$	正常化的地球引力位系数
J_2	地球引力位二阶带谐系数
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	坐标系平移参数
γ_e, γ_p	水准椭球赤道正常动理论值, 极点正常动理论值
U_0, γ_0	水准椭球表面理论正常重力位, 正常重力
S, σ	椭球面从赤道起算的大地线长, 球面从赤道起算的球面角距
D, I	磁偏角和磁倾角
F, H	磁场总量和磁场水平分量
X, Y, Z	空间直角坐标分量或磁场在三坐标轴分量
$g_n^m(t), h_n^m(t)$	地磁模型内高斯系数
$q_n^m(t), s_n^m(t)$	地磁模型外高斯系数
$\dot{D}, \dot{I}, \dot{H}, \dot{F}$	磁偏角、磁倾角、磁水平分量和磁场总量年变率

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大地测量学的任务和研究内容	1
1.1.1 大地测量学的任务	1
1.1.2 大地测量学研究内容	2
1.2 大地测量学发展简史	3
1.3 大地水准面和参考椭球面	7
1.3.1 水准面和大地水准面	7
1.3.2 总地球椭球和参考椭球	8
1.4 大地基准的发展与展望	10
第 2 章 常用大地坐标系统与大地测量基准	14
2.1 空间直角坐标系与空间大地坐标系	14
2.2 天文坐标系与垂线偏差	17
2.3 天球的基本概念与天球坐标系	20
2.4 站心切平面坐标系	22
2.5 正交椭球双曲坐标系	24
2.6 大地测量基准与正常重力场	26
2.7 不同空间直角坐标转换	29
2.8 大地坐标微分公式	31
2.9 大地测量时间基准	35
2.9.1 世界时时间基准	35
2.9.2 原子时基准	36
2.9.3 协调世界时系统	36
2.9.4 GPS 时间系统	37
第 3 章 国家大地控制网及我国大地基准	38
3.1 国家大地控制网及其作用	38
3.1.1 国家大地控制网	38
3.1.2 国家大地控制网的作用	39
3.2 建立国家大地控制网的方法	40
3.2.1 建立国家水平控制网的方法	40
3.2.2 建立国家高程控制网的方法	44
3.3 国家三角网的布设及其精度	45
3.3.1 国家三角网的布设原则	45

3.3.2	国家三角网的布设	47
3.3.3	我国各级三角网的布设规格和精度	49
3.4	国家水准网的布设及其精度	51
3.4.1	国家水准网的布设	51
3.4.2	国家水准网的精度	52
3.5	1954年北京坐标系	53
3.6	1980年国家大地坐标系	56
3.7	1954年北京坐标系(整体平差转换值)	59
3.8	1985年国家重力基准网和地球重力场研究	60
3.9	我国高精度GPS控制网的建立	63
3.9.1	全国GPS一、二级网	63
3.9.2	国家GPS A、B级网	64
3.9.3	中国地壳运动观测网络	65
第4章	椭球几何学	69
4.1	椭球几何参数定义及其相互关系	69
4.2	大地纬度、地心纬度与归化纬度	71
4.3	法截线、子午圈和卯酉圈曲率半径	74
4.4	子午线弧长、平行圈弧长和椭球表面积	76
4.5	相对法截线与大地线	78
4.6	Bessel大地问题解算	81
4.7	法截线方位角与Bessel大地问题反解直接法	88
4.8	大椭圆法解大地问题	91
第5章	椭球面到平面的描写	94
5.1	地图投影概述	94
5.2	高斯投影与分带	95
5.2.1	高斯投影概述	95
5.2.2	高斯投影的分带	96
5.3	复变函数表示的高斯投影正解公式	98
5.4	高斯投影反解公式	100
5.5	高斯投影尺度比和子午线收敛角	102
5.6	墨卡托投影平面直角坐标系	104
第6章	WGS世界大地坐标系	107
6.1	概述	107
6.2	WGS84坐标系	107
6.2.1	WGS84坐标系定义	108
6.2.2	时间变化的影响	109
6.2.3	协议天球参考系(CCRS)与WGS84坐标系的数学关系	110
6.3	WGS84椭球基本常数	111
6.4	WGS84基本常数导出的常用几何量与物理量	113

6.5	WGS84 水准椭球正常重力公式	115
6.5.1	椭球面的正常重力	115
6.5.2	椭球面上的正常重力	115
6.6	WGS84 地球重力场模型 EGM96	117
6.7	WGS84 大地坐标系中的大地水准面	119
6.8	WGS84 与其他大地坐标系的关系	121
6.8.1	WGS84 与国际地球参考框架 ITRF 的关系	122
6.8.2	WGS84 和 NAD83 的关系	122
6.8.3	局部大地基准与 WGS84 大地基准的转换	123
6.8.4	局部基准转换多元回归方程 MRE	123
6.8.5	WGS72 与 WGS84 转换参数	127
6.9	WGS84 坐标的精度	127
6.10	WGS84 世界大地坐标系应用指南	128
第 7 章 其他常见大地坐标系		132
7.1	PZ-90 坐标系	132
7.2	PZ-90 与 WGS84 坐标转换参数	133
7.2.1	坐标转换参数的求解方法	133
7.2.2	已有的 PZ-90 与 WGS84 坐标转换参数	134
7.3	ITRF 国际地球参考框架	136
7.4	北美大地坐标系与大地基准	138
7.4.1	1927 年北美大地坐标系	138
7.4.2	1983 年北美大地坐标系	139
7.5	欧洲大地基准	140
7.6	苏联 1942 年大地坐标系	142
7.7	印度大地坐标系与大地基准	143
7.8	日本大地坐标系与大地基准	144
第 8 章 地球磁场与世界地磁模型 WMM2000		146
8.1	地球磁场及其研究进展	146
8.2	确定 WMM2000 的数据源	149
8.2.1	台站数据	149
8.2.2	卫星数据	151
8.2.3	其他数据	154
8.3	确定 WMM2000 的台站分布	155
8.3.1	建立长期变化模型的数据	155
8.3.2	主磁场模型数据	156
8.4	确定 WMM2000 的数学方法	157
8.4.1	长期变化预测	157
8.4.2	模型的参数表示	157
8.4.3	最小二乘法确定模型参数	158

8.4.4	坐标转换	159
8.4.5	WMM2000 推导	160
8.5	世界地磁模型 WMM2000	160
8.6	WMM2000 各地磁要素等值线图及其分析	163
第 9 章	中国近海海洋概况	167
9.1	四海区概况	167
9.2	四海区地形	169
9.3	四海区气候	173
9.4	近海海洋水文状况	175
9.5	四海区海洋环流	184
9.6	潮汐、潮流和海浪	187
9.7	海洋测绘	189
9.8	海洋遥感	193
附录 1	EGM 地球重力场模型 (截断到 $n = m = 18$)	197
附录 2	缩写词	203
附录 3	Mathematica 计算机代数系统简介	204
	参考文献	206

第 1 章 绪 论

1.1 大地测量学的任务和研究内容

本书主要介绍大地坐标系和大地基准,以期非大地测量专业人员能通过本书对大地坐标系和大地基准有比较全面的了解。在介绍大地坐标系和大地基准之前,先谈一下大地测量学的任务和研究内容。

1.1.1 大地测量学的任务

大地测量学的任务主要有以下三个方面。

(1) 在广大面积上建立一系列地面点构成的大地控制网,以精密确定地面点的位置及随时间的变化规律,为测制地图、经济建设、国防建设和地球动力学等科研工作提供控制基础,也为人造卫星、导弹和各类航天器控制与通信提供精确的轨道坐标和地面控制站坐标。

(2) 研究和测定地球形状、大小及其随时间的变化规律,为大地控制网、地球科学和空间科学提供基准面和基本数据(这就涉及到大地坐标系和大地基准问题)。

(3) 研究和测定地球重力场及其变化情况,为大地控制网的归算、人造卫星精密定轨、远程武器的精确打击和地球物理反演、地震预报等提供必要的资料。

总的来说, GPS 技术出现之前的传统大地测量的主要任务是建立大地控制网,其中包括水平控制网和高程控制网。大地控制网的作用可概括为以下四个方面。

1. 控制地形测图

地球的形状近似一个椭球,在小范围内测绘地形图可不考虑地球的曲率,而在全国范围内测绘和编制各种比例尺地形图时,必须把地球看成一个曲面。但椭球面是个不可展平的曲面,解决方法是在测图前先进行大地测量。在全国范围内布设大地控制网,精确测定网中各大地点的平面坐标和高程,按一定的数学方法将这些点投影到平面上,构成一个完整的、精确的测图控制系统。根据这些点进行测图,就能使地球表面上的地貌、地物测绘在平面上,而且,还可以保证各地区同时开展测制的地图拼接而不产生明显的变形和裂口,有效地控制测图时产生的误差积累,把误差限制在控制点之间,确保地图的精度。

2. 为经济建设和国防建设提供控制基础

开发矿山资源、建设工业基地、建设铁路、建设高速公路、兴修水利工程、建设开发区和国土综合整治等各项经济建设,不仅需要各种比例尺的地形图为“蓝图”进行规划和设计,还需要直接利用大地测量成果。例如:在长江综合开发利用规划设计中,就测了两万多个三角点和十几万公里的水准;正在规划的南水北调工程,需要沿东、中、西三条线路附近有更多、更精确的大地资料;城市中的地下铁道掘进也是根据地面上大地点所指示的方向,以保证地下隧道的贯通。日本由北海道到本州的地下隧道高速铁路,全长为 53.9km,

水下部分达 23.3km,就是根据精密测量来满足隧道的直线性和贯通精度的;全国正在开展的地籍测量,必须在大地测量供给的统一坐标系统的前提下进行界址测量。

在军事上,常规火炮和远程导弹的发射和精确打击,要能命中几十公里、几百公里,甚至上万公里以外的打击目标,首先必须知道发射点和打击点的精确坐标、距离和方位;其次要标定火炮在某一坐标系下方位标的方位和天文坐标,这是大地测量所要解决的一项重要任务。现代精确制导武器,需要实时地测定其飞行位置,这个任务可由具有高动态性能的 GPS 接收机来完成。在国防工程建设上,如军事基地、机场、军港、地下设施、边疆和新疆的标定,都需要大地测量保障。试验洲际导弹的命中精度,要在导弹运行的沿线地面上设立许多跟踪站(海上时由大型测量船跟踪),以观测导弹运行轨道,并要测量发射场周围的重力异常,以计算轨道的重力修正。这些跟踪站间距离达上千公里,站间位置的相对精度要高于 0.5×10^{-6} ,都是通过大地控制测量和重力测量来保证的。

3. 为确定更精确的大地基准、大地坐标系和研究地球形状提供资料

大地测量中所测定的地球大小是指测定地球椭球的参数,研究地球的形状是指研究大地水准面的形状。椭球的形状可以用长半径和短半径来表示,也可以用长半径和扁率来表示,要精确测定椭球参数长半径、短半径(或扁率),就必须综合利用大地控制测量、天文测量、重力测量和卫星大地测量等资料。

大地测量是在地球表面进行的,为了正确处理大地测量成果,就必须知道表示地球椭球的长半径和扁率。大地测量为确定地球形状提供资料,而所确定的地球椭球面又反过来作为大地测量成果计算的基准面,这是一个相辅相成、逐步趋近的过程。由于大地测量手段、方法和精度的不断改进和提高,特别是卫星大地测量手段的出现,目前对地球椭球参数的确定已有相当高的精度。

具有确定几何参数(如长、短半径)的地球椭球辅之以定位、定向参数和一定的物理参数(如自转角速度参数等)则构成相应的大地基准,以该大地基准为基础形成的坐标系,即是大地坐标系。

4. 为地球物理学、地球动力学、地震学和海洋学等基础科学研究提供数据

地球和其他物质一样,是在不断运动和变化的,如地壳的水平移动和垂直升降、大陆漂移、海洋面高度变化、地球两极的周期性运动等,这些运动都影响着大地测量结果,反过来通过长期重复测量,综合分析比较新、旧大地测量资料,就可以发现该地区地壳变化情况,板块运动使大西洋以平均每年 2.5cm 的速度扩大,地球表面温度的升高使海平面以每年 2.1mm 的速度上升,这些都是通过比较重复大地测量资料所获得的结论。地球重力场变化更是地球内部密度和结构变化的直接反映,高精度的重力场数据结合地震波数据可以反演地球的内部结构和地球内部动力学机制,结合卫星测高数据,可以反映海面地形和海洋环流,可以极大地丰富人类对地球内部的了解。

1.1.2 大地测量学研究内容

大地测量学是研究地球形状和大小,确定地面点位、长度和方向,确定地球重力场及其变化的科学。在长期的发展过程中,大地测量的研究内容已经具有一定的特色,并形成了一些分支学科。

传统的大地测量是研究布设大地网的理论和方法的,其主要工作是设计和布设较合理

的国家大地控制网,并对网中控制点间的角度、距离、高差等进行精密测量,经过严密的成果处理,以尽可能高的精度得到大地点的三维坐标。控制网的设计和布设,测量仪器的原理、检验和使用,测量方法的探讨以及成果的检核等,称为**应用大地测量学**或**控制大地测量学**。

计算大地网中各控制点位置时,必须选用一个基准面。地球近似于一个旋转椭球,显然使用与地球接近的椭球面,可以使点位有较高的精度。地形图是以平面形式表示的,控制点还要按一定方法从椭球面投影到平面上。有关椭球大小确定、椭球定位、椭球面数学理论、椭球面与平面或其他曲面关系的理论探讨和投影的学科,称为**椭球大地测量学**。

在大地网的某些点需要观测天体的位置来确定其天文经纬度和至某一方向的天文方位角,从而提供大地网归算资料和提高网的精度;空间技术中需要用 CCD 摄像机拍摄以恒星为背景的图像,以确定太空中卫星的有关姿态信息;军事上,潜艇使用的星光仪,也是通过观测恒星来确定潜艇的位置。研究天文测量的基础理论、使用仪器、测量方法以及成果计算处理等内容的学科,称为**大地天文学**。

在地面上布设重力控制网为研究地球重力场提供直接观测资料,这也是研究地球形状的传统方法,当重力资料足够多时,可以推算地球椭球的扁率和大地水准面。现代空间技术的发展,使得人们可以用卫星摄动分析、卫星测高、卫星跟踪卫星和卫星重力梯度测量等手段,以较高的分辨率和较好的覆盖性测量地球表面及近地空间的重力场。讨论地球形状的理论基础、重力测量的原理和方法、重力测量数据的数据处理算法以及重力在大地测量、空间技术和地球科学其他领域的应用等内容的学科,称为**大地重力学**,也叫**物理大地测量学**。

测量必然有误差,为了保证大地控制网的质量,需要增加剩余观测。为提高大地网的精度和可靠性,需要依据数理统计原理(一般情况下为最小二乘原理)进行网的平差,以获得点位坐标和高程的比较可靠的估计值。运用有关概率统计理论进行观测误差的分析和观测数据的处理,称为**测量平差法**。

传统的大地测量仅限于在大陆范围内开展,每个国家只能采用与本国领土比较接近的椭球面来计算大地网,从而产生了许多独立的大地坐标系。1957 年第一颗人造卫星发射成功后,可以以卫星为观测目标实现洲际联测,可以分析卫星的摄动运动来确定地球重力场的低阶项。空间技术的出现,给传统的大地测量带来了革命性的变革,如卫星测高、卫星跟踪卫星、卫星重力梯度测量等,但影响最深刻、应用最广泛的还是全球定位系统 GPS。研究卫星轨道分析理论、卫星精密轨道测量技术、卫星测高技术、GPS 大地网布设理论等内容的学科,称为**卫星大地测量学**,也称为**空间大地测量学**。

此外,尚有在惯性导航基础上发展起来的惯性大地测量,它能实时提供测量数据,且机动灵活不受天候限制,并在工程测量、矿山测量和海洋测量中得到应用。研究惯性测量的原理和方法、数学模型、误差分析和成果处理等内容的学科,称为**惯性大地测量学**。

综上所述,大地测量学由大地控制测量学、椭球大地测量学、大地天文学、物理大地测量学、测量平差、空间大地测量学和惯性大地测量学等学科组成。

1.2 大地测量学发展简史

两千多年前,为了兴修水利和研究地球形状大小,大地测量就已经处于萌芽状态。埃

及在尼罗河泛滥后利用测量方法来解决大地的区划问题。我国夏禹治水就使用了测量高低和距离的器械准绳和规矩。公元前 3 世纪,希腊学者埃拉托斯特尼(Eratosthenes)观察到尼罗河上游色尼(今阿斯旺,纬度近于 $23^{\circ}27'$)在夏至正午时,日光正好直射井底,但在同一时刻北面的亚历山大地方日光向南偏出一个角度,与垂直方向构成 $1/50$ 圆周角,即 $\Delta\varphi \approx 7.2^{\circ}$ 。根据骆驼商队行走的时间估计两地相距 5000stadia(古希腊长度单位,1stadia \approx 185m),并认为两地在同一子午线上(实际经度相差约 2°),估算了地球半径约为 40000stadia。尽管 1stadia 等于多少米的看法不一致,但这是人类应用弧度测量概念对地球大小的第一次估算。

公元 724 年我国唐代的南宫说等人在张遂(一行)的指导下,在今河南省滑县至上蔡实测了一条约 300km 的子午弧长,并在滑州、开封、扶沟、上蔡等四个地方,测量了同一时刻的日影长和北极星高度,日影长之差或北极星高度之差实际上代表了纬度差。所以,这是世界上第一次弧度测量的实践。

1615 年荷兰人斯涅耳(Snell)首创三角测量法进行弧度测量,克服了直接丈量距离的困难。继而望远镜、水准器、测微器等发明,使测量精度大幅度地提高。17 世纪末,牛顿(Newton)和荷兰的惠更斯(Huygens)用力学的观点研究地球的形状,并推论地球是南北略扁的椭球。1683 年—1716 年法国卡西尼(Cassini)父子用三角测量方法,测量了弧幅达 $8^{\circ}20'$ 的弧长。由其中两段弧长和各段弧长两端点的天文纬度,推算地球椭球的长半径和扁率,由于纬度测量误差较大,得出了地球为两极伸长的椭球的结论,与牛顿、惠更斯的推断正好相反。为了解决扁球与长球的疑问,法国科学院于 1734 年派遣两个测量分队,一队到赤道附近的秘鲁,一队到北极圈附近的拉普兰(在瑞典和芬兰的边境上),进行弧度测量,于 1739 年完成了测量任务。两次测量结果证实了同样 1° 的子午弧长,北弧大于南弧,即地球形状是两极略扁的椭球。这次弧度测量有力地支持了地球形状的物理学论断。由于地球形状的争论,测量仪器和弧度测量方法的改进,使大地测量有了很大进展。因此,可以说大地测量的科学体系是 17 世纪末叶开始逐渐形成的。

1708 年—1718 年我国清朝康熙年间,为编制《皇舆全图》进行了大规模的天文大地测量,就已发现高纬度东北地区每度子午线弧比低纬度河北地区的要长,这个发现比法国科学院早,当时还规定以一度子午弧长为 200 市里来确定长度计量单位。这是世界上第一次把长度单位与地球子午线长度联系起来。

1792 年—1798 年由法国人德兰布尔(Delambre)领导的测量队进行从法国到西班牙的弧度测量,弧幅达 $9^{\circ}40'$,综合法国和秘鲁的测量结果,第一次在近代地球形状理论上导出了地球椭球模型。并取子午圈一象限弧长的 4 万分之一作为长度单位,命名为 1m,这是世界上通用米制的起源。

18 世纪到 20 世纪初,大地测量的理论方法和仪器又有了巨大的进展。在理论方面主要有:

- 1743 年法国人克莱劳(Clairaut)发表《地球形状理论》,指出用重力精确求定地球扁率的方法。

- 1806 年法国人勒让德(Legendre)和 1794 年德国人高斯(Gauss)(图 1-1)提出最小二乘法理论并用于天文大地测量成果处理,产生了测量平差理论,至今仍广泛应用于大地测量和其他学科中。



图 1-1 德国数学家、测量学家 Gauss

• 1822 年德国人高斯发表了椭球面投影到平面的保角映射理论,应用于大地测量测图,稍后又由德国测量学家克吕格(Krüger)加以发展形成了今天仍广泛使用的高斯-克吕格投影,简称高斯投影。

• 1849 年英国人斯托克斯(Stokes)(图 1-2)提出将地面重力测量值归算至大地水准面这一特殊的等位面上确定大地水准面的理论,开创了大地测量特别是物理大地测量的新纪元,至今这一理论仍得到广泛应用。但是地壳密度假设是斯托克斯理论的缺陷。

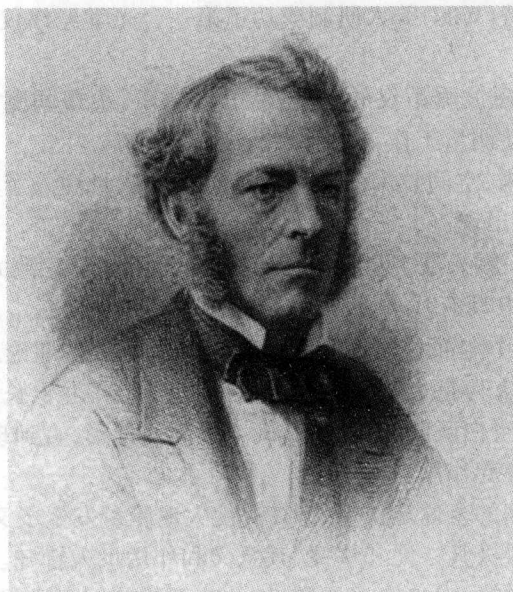


图 1-2 英国数学家、地球物理学家 Stokes