

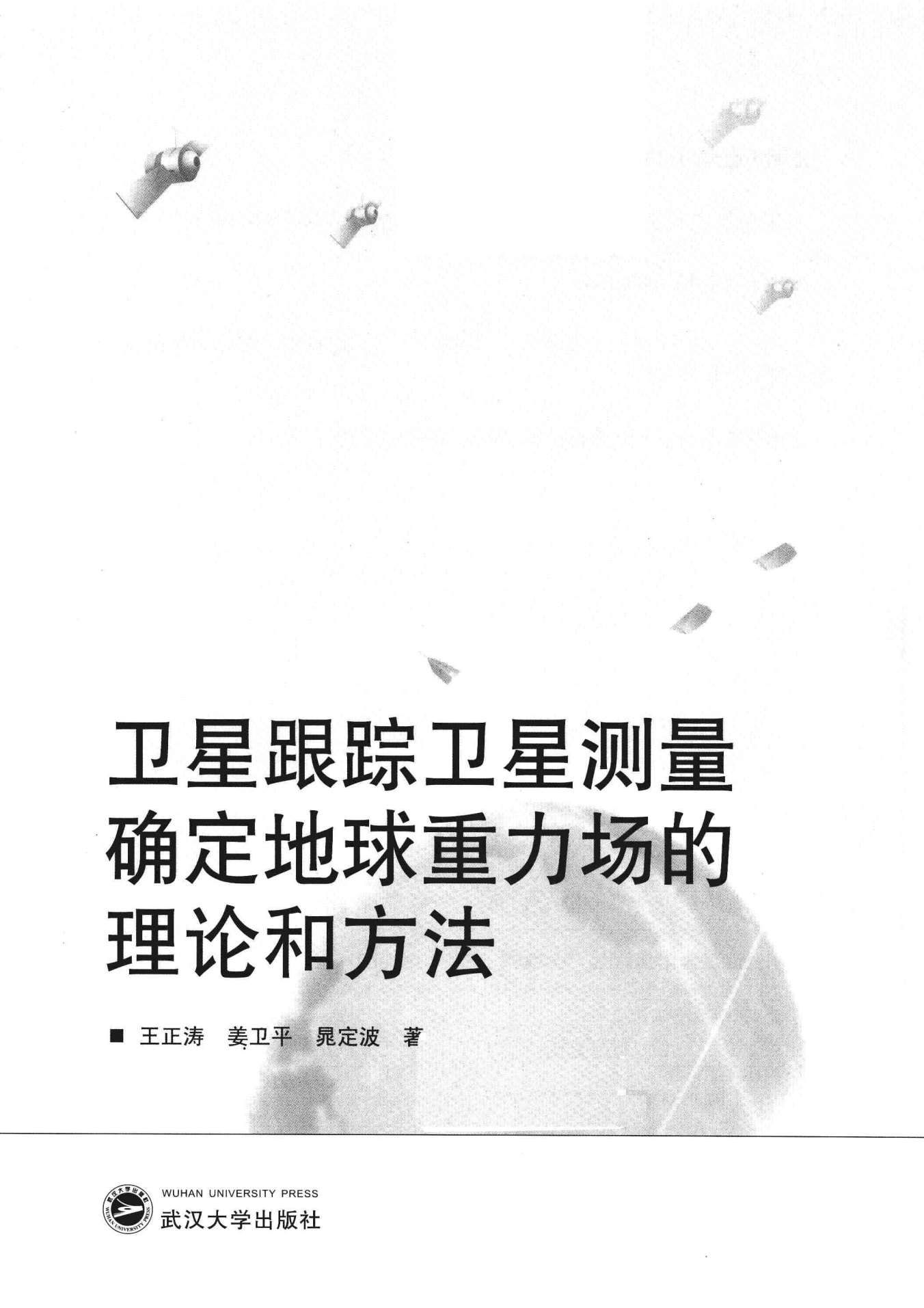
卫星跟踪卫星测量 确定地球重力场的 理论和方法

■ 王正涛 姜卫平 晁定波 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



卫星跟踪卫星测量 确定地球重力场的 理论和方法

■ 王正涛 姜卫平 晁定波 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

卫星跟踪卫星测量确定地球重力场的理论和方法/王正涛,姜卫平,晁定波著. —武汉:武汉大学出版社,2011.5

ISBN 978-7-307-08533-6

I. 卫… II. ①王… ②姜… ③晁… III. 地球重力场—卫星测量法—研究 IV. P312.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021095 号

责任编辑:黄汉平 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉中远印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:342千字 插页:2

版次:2011年5月第1版 2011年5月第1次印刷

ISBN 978-7-307-08533-6/P·179 定价:36.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

测定地球重力场,确定高分辨率、高精度的地球重力场模型和大地水准面,是大地测量学的主要任务之一,也是与相关地球学科交叉研究的重要领域。卫星技术的出现和迅速发展,使物理大地测量学家有了进行全球重力测量的有效工具。卫星的轨道运动主要受制于地球重力场,可视为承载地球重力场信息的一种传感器,研究利用卫星轨道跟踪观测数据恢复地球重力场的理论和方法,形成了卫星重力学这一新的学科分支,已经历了 40 余年的发展。从 20 世纪 60 年代开始,利用地面站对卫星的激光测距(SLR)跟踪数据,至今已建立了近百个不同序列的长波重力场模型,可确定分米级精度的全球大地水准面。20 世纪末研制成能在高动态条件下接收和处理 GPS 导航信号的星载 GPS 接收机,实现了高轨 GPS 卫星对低轨专用重力卫星的精密跟踪测轨,精度达到厘米级,同时突破了两颗低轨卫星之间的同轨跟踪测距和星载加速度计测定大气阻力等非保守力的技术,以及制成了星载重力梯度仪。据此,21 世纪初实施了新一代国际卫星重力探测计划,相继发射了 GHAMP、GRACE 和重力梯度测量卫星 GOCE,研究利用新一代卫星重力观测数据建立高精度地球重力场模型,提出新方法,发展新技术,研制新软件,是当前物理大地测量学者高度关注的研究前沿。

本书在系统研究、消化和总结现有国内外研究成果的基础上,把握这一领域涉及的基本力学概念和原理,重点从实用出发,系统掌握所有的基本数学模型,着力研究 GHAMP 和 GRACE 数据恢复地球重力场的实用计算模型和算法细节,发展经典理论,重点研究其中的能量守恒法,创新计算方法,开发新技术,并完成一个有应用价值的 GRACE 卫星地球重力位模型,对模型的可靠性和精度进行检验分析和评价,提出需进一步研究的问题和建议。

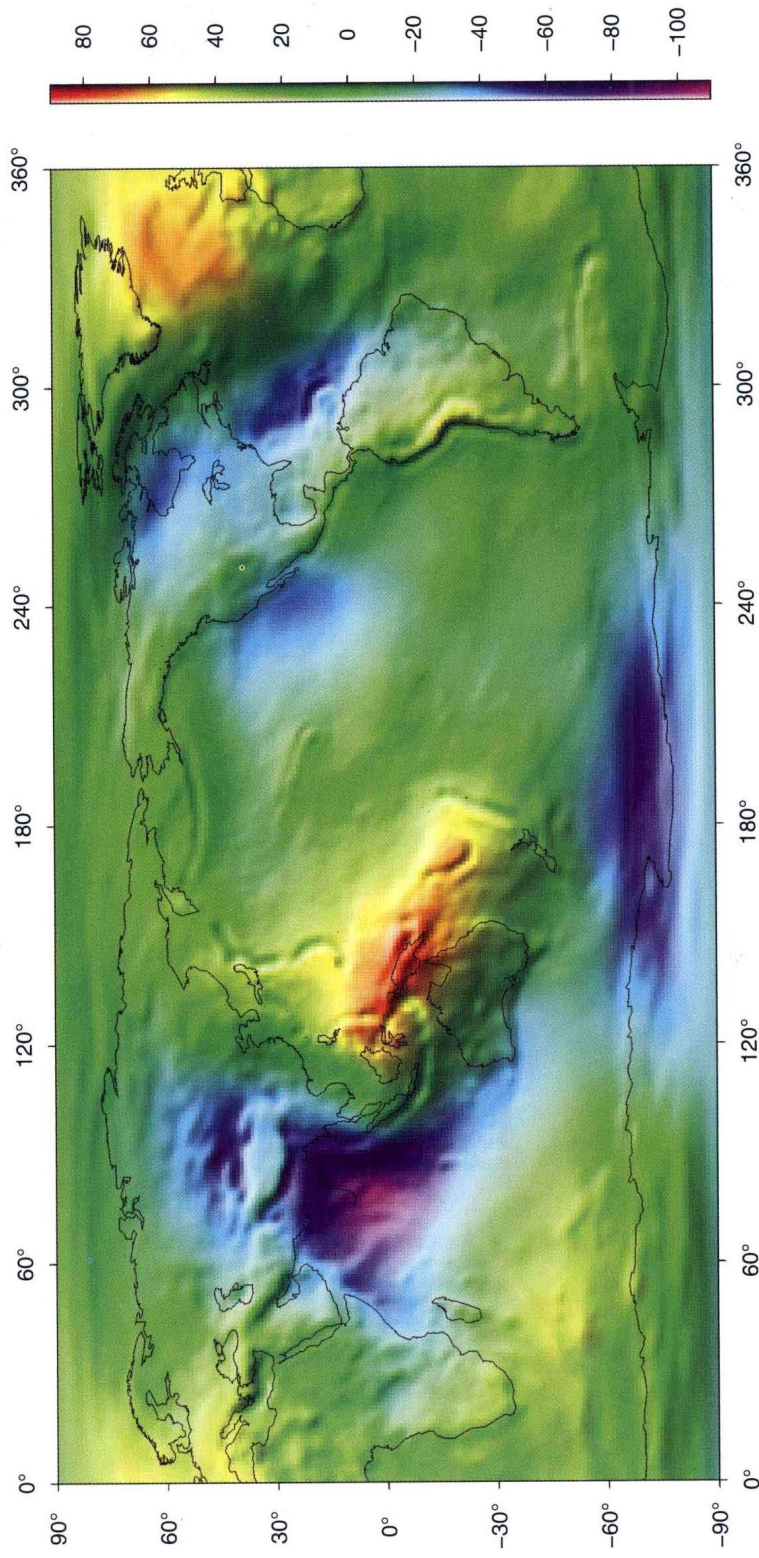
全书内容共分七章,其中:第一章评述精化地球重力场模型在现代大地测量发展及其相关地球科学交叉研究中的作用;对实现确定厘米级精度大地水准面及相应地球重力场模型可能存在的问题和困难提出作者的思考;总结卫星重力技术的发展阶段和现有研究成果,概括理解、表述各种卫星重力技术和方法的一般原理和共性,根据作者的研究实践提出目前有待解决的关键性技术问题。第二章从卫星重力学的角度出发,研究卫星轨道理论,给出涉及时空参考系统的精确定义和数学表述及互相转换的实用计算模型,研究开普勒轨道的实用算法,总结各种摄动力的数学模型,作详细的数值分析。第三章研究星载 GPS 精密动力法定轨所涉及的概念和实用计算模型,重点是卫星状态转移矩阵和参数敏感矩阵的结构和数学表述以及基于此两类矩阵的变分方程的建立,用于确定卫星观测方程线性化所需偏导数矩阵;详细研究现有轨道数值积分方法,给出可供实用计算的计算公式及其系数值,以及并行积分器的设计;给出动力法定轨的详细计算模型和流程。第四章总结研究现有的基于 GPS 精密定轨的三类求解重力场模型的方法和实用算法,即动力法、能量法和加速度法,重点研究能量守恒法,导出改进的严密计算模型,对该法进行误差分析。第五章研究重力场

模型现有各种数值解法及优化算法技巧,包括时域法和空域法,重点研究应用预条件共轭梯度法解重力场模型法方程的实用算法及其改进,讨论应用具有并行计算功能的计算机求解重力场模型的算法和技术问题。第六章研究 GRACE 数据预处理算法及有关技术问题,包括加速度计数据、KBR 数据和 GPS 定轨数据,以及数据文件的编辑和生成。第七章研究能量法解算重力场模型的软件系统设计,重点是各功能模块的设计;并利用 18 个月的 GRACE 实测数据分别求解 60 阶、90 阶和 120 阶扰动重力位模型;研究卫星重力位模型质量检验评价的方法,对本书所求解的重力位模型进行较全面的比较、检验和评价。

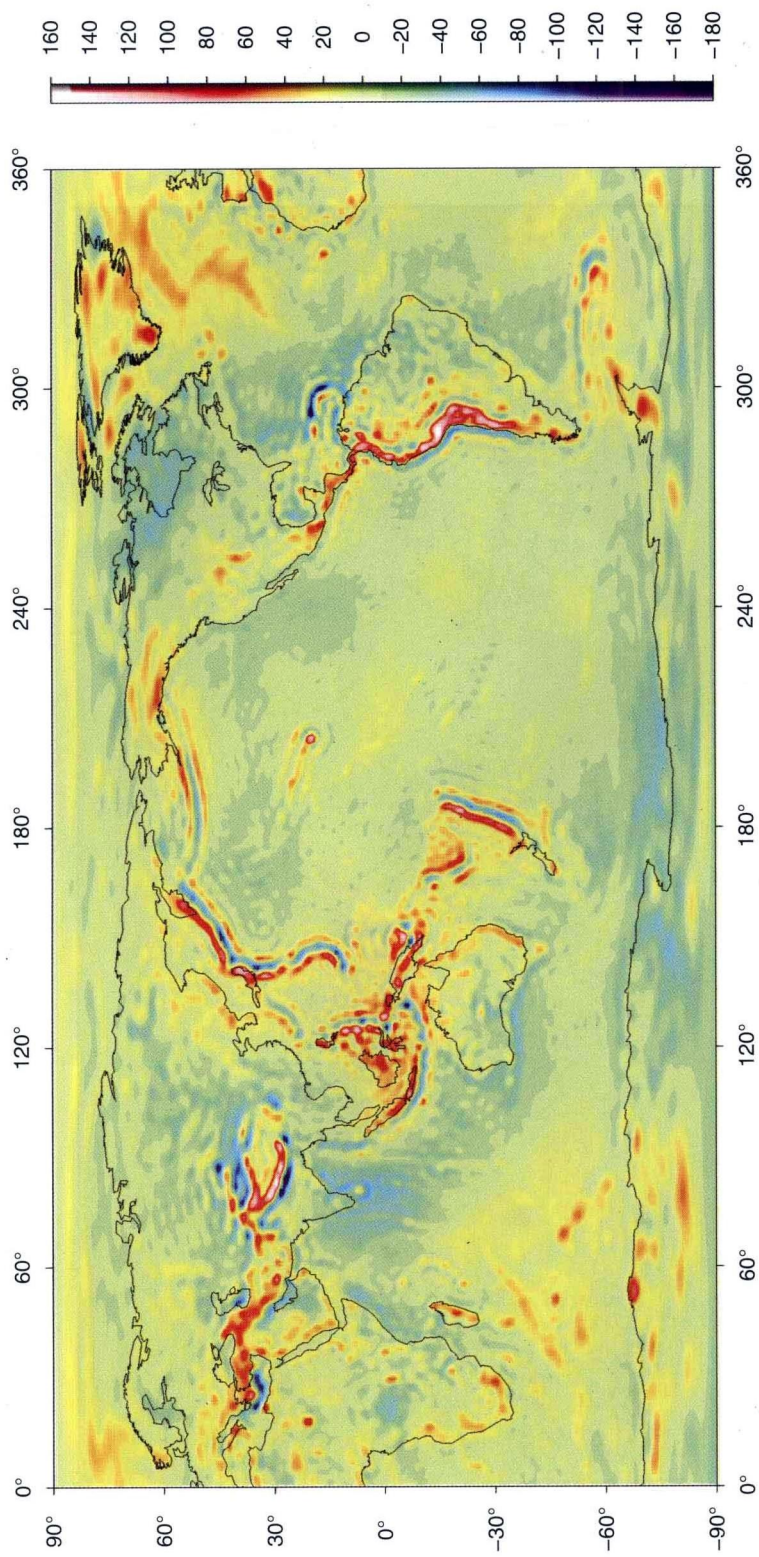
编写本书的目的,主要是系统总结和阐述卫星重力测量确定地球重力场研究领域的关键技术和方法,更多关注 GRACE 卫星重力数据的精化处理 and 数值算法的实现,使读者能够全面了解此方向的发展前沿,期望能解决实际工作中遇到的问题。由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2011 年 2 月



WHU-GM-05D重力场模型全球大地水准图



WHU-GM-05D重力场模型全球重力异常分布

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 地球重力场信息与现代地球科学及面临的挑战和思考	1
§ 1.2 卫星重力探测技术与地球重力场模型的发展及展望	7
§ 1.3 卫星技术恢复重力场的原理和方法的理解.....	14
§ 1.4 卫星跟踪卫星观测数据恢复重力场的方法和技术问题.....	18
1.4.1 数据处理问题.....	20
1.4.2 计算模型的选择和精化问题.....	20
1.4.3 数值算法的选择和改进问题.....	20
§ 1.5 本书研究的内容.....	21
§ 1.6 本章小结.....	21
第二章 卫星轨道理论	22
§ 2.1 引言.....	22
§ 2.2 卫星大地测量坐标与时间系统.....	22
2.2.1 时间系统.....	24
2.2.2 空固坐标系.....	27
2.2.3 地固坐标系.....	28
2.2.4 特殊坐标系.....	29
2.2.5 大地测量基准和大地坐标系.....	31
2.2.6 坐标系统的转换.....	32
§ 2.3 卫星轨道基本理论.....	37
2.3.1 开普勒轨道.....	38
2.3.2 开普勒方程.....	39
2.3.3 卫星在轨道直角坐标系中的瞬时状态.....	41
2.3.4 开普勒轨道根数与卫星状态向量之间的转换.....	42
§ 2.4 卫星轨道摄动分析.....	45
2.4.1 保守力摄动.....	45
2.4.2 非保守力摄动.....	54
2.4.3 附加摄动与经验力摄动.....	60
§ 2.5 本章小结.....	69

第三章 星载 GPS 精密定轨技术	70
§ 3.1 引言	70
§ 3.2 卫星运动的摄动方程	71
3.2.1 拉格朗日摄动方程	72
3.2.2 高斯方程	73
3.2.3 摄动运动方程的完整解	75
§ 3.3 卫星轨道相关偏导数	75
3.3.1 状态转移矩阵及其微分方程表示	76
3.3.2 参数敏感矩阵及其微分方程	76
3.3.3 各种摄动加速度的偏导数	77
3.3.4 偏导数的微分近似计算	81
§ 3.4 数值积分	82
3.4.1 单步积分法	82
3.4.2 多步积分法	84
3.4.3 联合并行积分器	95
§ 3.5 星载 GPS 动力学精密定轨原理	97
§ 3.6 本章小结	100
第四章 卫星跟踪卫星技术确定地球重力场的方法	101
§ 4.1 引言	101
§ 4.2 地球重力场模型及有关特性	101
4.2.1 模型的球坐标与直角坐标展式	101
4.2.2 阶数 l 的特性	103
4.2.3 球谐系数排列选择	104
§ 4.3 利用卫星轨道摄动确定地球重力场的动力学计算模型	109
4.3.1 数学模型	109
4.3.2 数值分析	113
§ 4.4 利用能量守恒恢复地球重力场的理论	121
4.4.1 基于单星的能量守恒原理	122
4.4.2 基于双星的能量守恒法	127
§ 4.5 利用卫星加速度数据确定地球重力场的方法	132
§ 4.6 本章小结	134
第五章 地球重力场模型数值解法	135
§ 5.1 引言	135
§ 5.2 最小二乘法 (LS)	136
§ 5.3 迭代求解法-预条件共轭梯度法 (PCCG)	139

§ 5.4	半解析法 SA(Semi-Analytical Approach)	142
§ 5.5	基于超级计算机平台的并行解技术	144
5.5.1	并行计算机系统	144
5.5.2	并行算法设计技术	145
5.5.3	并行程序设计平台 MPI	147
5.5.4	矩阵运算的 MPI 并行化设计与实现	149
§ 5.6	本章小结	151
第六章	GRACE 卫星重力计划与数据分析	152
§ 6.1	引言	152
§ 6.2	GRACE 卫星测量系统与任务目标	152
§ 6.3	星载加速度计数据处理与分析	160
6.3.1	加速度计数据分析	161
6.3.2	基于参考重力场模型的加速度计校准	163
6.3.3	基于交叉点平差的加速度计校准	166
§ 6.4	GRACE KBR 数据分析与处理	170
§ 6.5	GRACE 精密轨道类型及有关分析	174
§ 6.6	本章小结	177
第七章	GRACE 重力场模型 WHU-GM-05 的计算及检验	178
§ 7.1	利用卫星重力数据恢复地球重力场程序模块	178
§ 7.2	当前国际 GRACE 模型发展与评价	181
§ 7.3	GRACE 重力场模型 WHU-GM-05 系列的确定	182
7.3.1	采用的 GRACE 卫星数据	182
7.3.2	GRACE 卫星数据预处理	182
7.3.3	能量守恒方法观测值各项误差估计与精度分析	183
7.3.4	基于能量守恒方法的 GRACE 卫星重力场模型 WHU-GM-05	188
§ 7.4	重力场模型的检验	192
§ 7.5	计算结果分析与比较	193
§ 7.6	本章小结	203
缩写词		204
符号		208
常数		211
参考文献		213

第一章 绪 论

§ 1.1 地球重力场信息与现代地球科学及面临的挑战和思考

现代地球科学的任务是致力于把地球作为一个整体的静态和动态系统来研究,该系统主要由岩石圈(固体)、水圈(液体)和大气圈(气体)组成,重力场、电磁场和大气层及电离层则反映其基本的物理特性,制约着地球及其邻近空间所发生的物理事件。其中地球重力场反映地球物质的空间分布、运动和变化,确定地球重力场的精细结构及其时间变化不仅是现代大地测量的主要科学目标之一,而且也将为现代地球科学解决人类面临的资源、环境和灾害等问题提供重要的基础地球空间信息。

现代大地测量学、地球物理学、地球动力学和海洋学等相关地学学科的发展均迫切需要更加精细的地球重力场支持。其中用 GPS 水准测定正高要求在 100km 波长范围内有厘米级精度的大地水准面;研究地球深部结构则要求在几十公里到几千公里的波长范围内具有厘米级精度的大地水准面和 $\pm 1\text{mGal}$ ($1\text{mGal} = 10^{-5} \text{m/s}^2$) 精度的重力异常;目前最新地球重力场模型只能以亚分米级的精度满足中低轨卫星定轨的要求;利用卫星测高测定的海面高来研究海面地形和洋流,则要求有相应波长的厘米级海洋大地水准面;建立全球高程系统要求在 50~100km 的波长范围内具有优于 5cm 精度的大地水准面。目前全球大地水准面的精细程度与上述要求大约还相差一个量级,确定全波段厘米级大地水准面是 21 世纪初期物理大地测量的主要目标之一。实现这一目标首先取决于在全球范围内测定重力和探测近地空间重力场信息的技术发展水平。传统重力探测技术获取全球均匀分布的高精度重力场信息的能力受到了限制,迫切需要新的技术突破。卫星跟踪卫星技术和卫星重力梯度测量技术被认为是 21 世纪初最有价值和最具应用前景的高效重力探测技术,是新一代卫星重力计划,其主要科学目的除了测定地球重力场的精细结构及长波重力场随时间的变化以外,还包括以全球尺度精密测定电磁场和全球大气层及电离层探测。这一技术的实施无疑对现代地球科学研究地球岩石圈、水圈和大气圈及其相互作用具有重大贡献。鉴于该技术所具有的重要科学和现实意义,利用新一代卫星重力数据恢复厘米级精度重力场,已成为当今物理大地测量研究的前沿和关注的热点。

精化全球和区域性的地球重力场参数一直是大地测量的基本任务,联合卫星重力、地球表面重力与卫星测高数据可以确定高精度高分辨率的全球重力场参数。高精度的全球一致性的地球重力场信息可以应用于建立全球统一的高程基准,区域性测绘垂直基准的统一,远距离高程控制,陆海、海洋与岛屿高程的高精度连接。高精度高分辨率的大地水准面的确定,使得用空间测量手段代替传统繁重的水准测量成为可能。

大地水准面是统一全球高程基准最适宜的参考面。由于高程基准不同,国与国之间的地形图或地面数字高程模型(DEM)将出现拼接差,世界屋脊珠峰的高程就会有多值性,我国公布的精确珠峰高程是以中国黄海平均海面起算的,而用印度洋或其他的海域平均海面起算,高程可能相差1~2m。地面点的海拔高程是人类社会经济活动所需要的重要信息,特别是水利资源的开发利用,预防洪水灾害,规划设计抗洪工程等。经济全球化趋势,我国加入世界贸易组织(WTO),必然要求包括地理信息在内的广泛的信息资源共享机制,这一趋势的发展,在有一个长期稳定的国际和平环境的条件下,将推动数字地球从概念走向实现,并进入世界网络社会。随着未来(可能需要10~20年)建立全球高分辨率高精度厘米级大地水准面目标的实现,统一全球高程基准的问题将水到渠成,进入国际议事日程。WGS84在某种意义上说实现了全球几何定位基准的统一,而与地球重力位相联系的垂向定位基准的统一,只有当一个全波段厘米级精度全球大地水准面模型的产生才有可能,这是世界各国大地测量学界共同努力的目标。地球重力场与大地测量学的关系见图1-1。

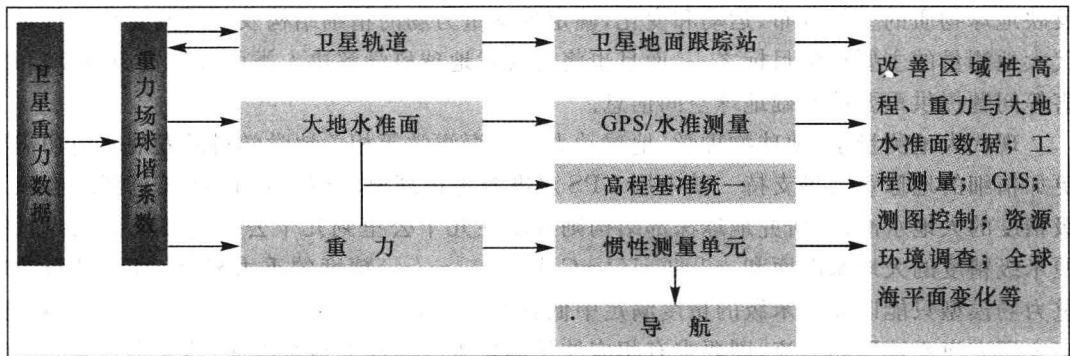


图 1-1 地球重力场在大地测量学中的作用

测定和研究精细地球重力场,包括确定厘米级大地水准面更重要的意义在于为相关地球学科(如地球物理学、大地构造学、地球动力学、地震学和海洋学)研究地球内部结构和动力学过程提供基础信息。重力场结构是地球质体密度分布的直接映像,重力测量数据是研究岩石圈及其深部构造和动力学的一种“样本”,精细的重力异常分布和大地水准面起伏对于弄清当前岩石圈和地幔动力学研究中的一系列问题有很重要的作用。例如,大地水准面的频谱结构是长波占优(相对幅度大于90%),反映地球深部或地幔的长波密度异常分布。大地水准面起伏的中、短波部分与岩石圈内部负荷及地形有很强的相关性;用卫星测高数据确定的高分辨率全球海洋大地水准面研究海底及其深部构造取得了瞩目的成果,发现滤去长波分量的海洋大地水准面起伏与海底地形起伏有很好的相似性。海山、海沟、海岭(洋脊)和断层等海底地形和构造单元,在海洋大地水准面起伏图像上清晰可辨,由此发现了许多过去未知的海底大山和海底断层等。重力数据和大地水准面起伏还用于研究岩石圈的热演化模型、弹性厚度以及小尺度地幔对流等动力学问题。利用重力数据研究地球内部结构和动力学的问题相当广泛,但已有的研究表明,这些问题的研究一般要求数据分辨率优于50km,重力异常应有毫伽(mGal)量级的精度,相应于短波大地水准面有厘米级精度水平,

长波则要求重力异常有更高的精度。

地球是个不断变化的动力系统,地球重力场是固体地球动力过程地质历史的再现。高精度的地球重力场及其时变信息对于地球动力学和地球内部物理的研究具有重要意义,特别是对岩石圈动力机制、地幔对流与岩石圈漂移、岩石圈异常质量分布、冰后反弹质量调整、冰后反弹引起的海平面变化以及对固体地球的影响、冰盖与冰河的质量平衡、大陆冰雪的变化、板块相互作用机制、板块内部构造、海底岩石圈与海山动力学、海平面变化的物理机制、地球自转、陆地地壳运动与海平面变化的分离等方面的研究可提供重要的依据。

地球重力场是稳态海洋环流探测重要的参考依据。海面动力地形的高度是以大地水准面为起算面的,建立准确的洋流动力模式更需要精密的大地水准面支持。在利用卫星测高监测海洋动力现象时,需要将测高海面高(相对于椭球面的高度)归算到以大地水准面为参考面的高度,才能对监测结果进行合理的利用和物理解释,例如海平面变化的物理解释、El Nino、La Nina 现象的监测、海洋热量输送模式的反演等。卫星重力计划特别适合测量和监测全球海底压力及其变化、全球海洋质量变化、全球海底资源调查、全球海深计算等一系列目前难以很好解决的问题。

地球重力场信息对相关地球学科研究的作用见图 1-2~图 1-4。由于重力数据日益丰富,特别是卫星重力技术提供了大量高质量的全球重力数据,推动了相关地学问题的研究,20 世纪 70 年代以来,国际上几个著名的地学杂志,如地球物理研究(J G R)、国际地球物理通讯(I G L)、地球动力学杂志(J G)等,有关地球重力数据地学解释的研究十分活跃,K. Lambeck1987 年的专著《地球物理大地测量》(中译本)第九章以及 A. J. Anderson 等 1986 年主编的《空间大地测量与地球动力学》(中译本)第 2 篇和第 5 篇则集中反映了这一领域的典型研究成果。

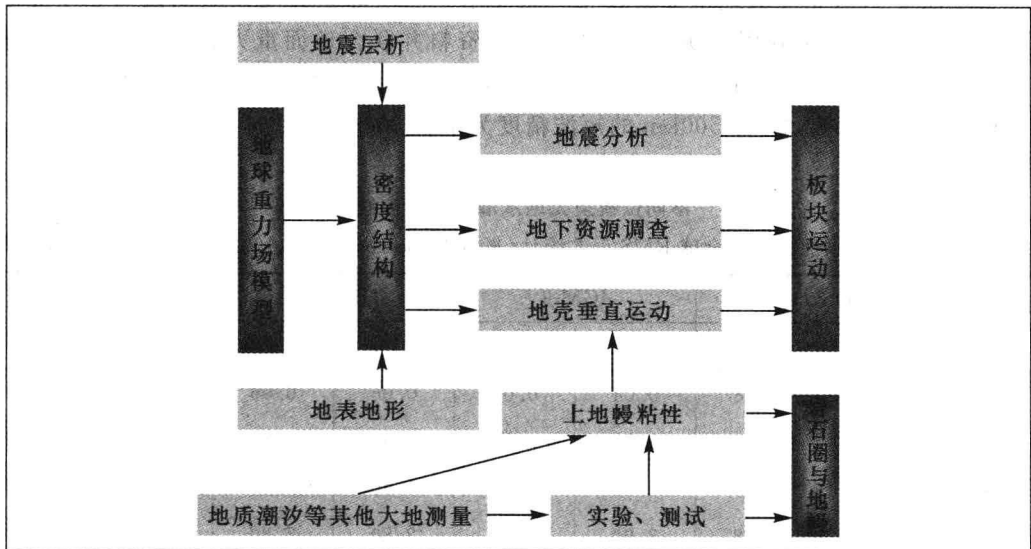


图 1-2 地球重力场在固体地球物理学中的作用

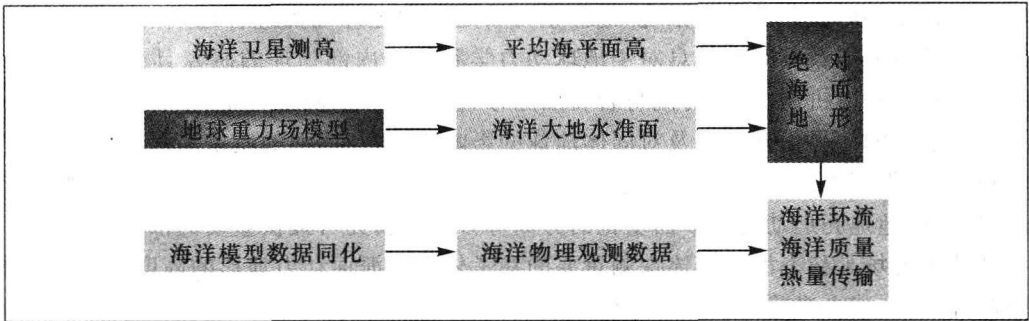


图 1-3 地球重力场在海洋物理学中的作用

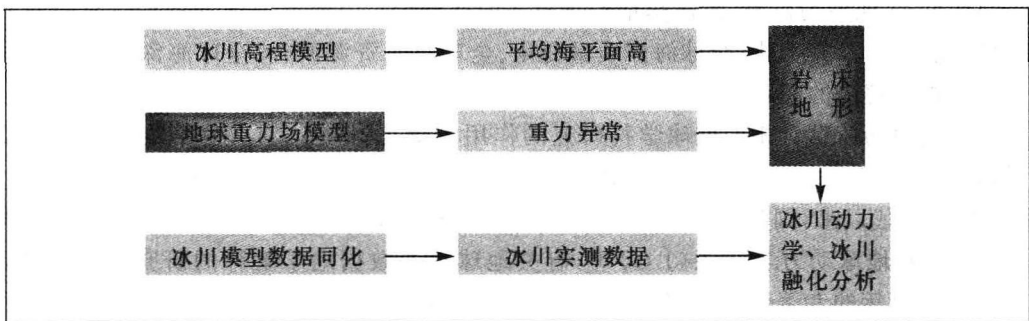


图 1-4 地球重力场对冰川研究的作用

实现恢复 1cm 精度大地水准面及相应精度水平的全球重力场模型仍是一个十分艰巨的任务。至 20 世纪末利用长期积累的卫星重力资料并联合地面重力数据建立的最好的重力场模型其各波段的大地水准面的精度分布如表 1-1, 其中半波长 $>500\text{km}$ (约 36 阶) 的中、长波精度为亚分米级, $100\sim 500\text{km}$ 的短波精度为 $15\sim 35\text{cm}$ 。

表 1-1 不同位模型大地水准面的精度统计

A 四种位模型大地水准面高的全球 RMS 误差统计(来自 Lemoines, et al., 1998)

(单位: cm)

Degree n	OSU91		JGM-3		HDM190		EGM96	
	$At\ n$	$To\ n$	$At\ n$	$To\ n$	$At\ n$	$To\ n$	$At\ n$	$To\ n$
2	0.18	0.18	0.04	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05
6	1.30	2.20	0.50	0.70	0.50	0.80	0.40	0.60
10	2.50	5.10	1.60	2.50	1.40	2.40	0.90	1.80
20	3.60	10.8	3.90	10.1	2.80	7.80	1.70	4.90
30	4.50	17.2	6.20	19.2	3.80	13.3	2.30	7.90
50	3.20	25.8	8.50	39.3	4.00	22.5	2.90	14.6

续表

Degree <i>n</i>	OSU91		JGM-3		HDM190		EGM96	
	<i>At n</i>	<i>To n</i>	<i>At n</i>	<i>To n</i>	<i>At n</i>	<i>To n</i>	<i>At n</i>	<i>To n</i>
70	4.20	32.7	6.80	53.8	3.50	28.1	2.00	19.0
75	4.00	34.0	—	—	3.40	29.2	3.40	20.6
100	3.50	38.8	—	—	3.00	33.2	3.00	26.0
120	3.30	41.7	—	—	2.70	35.6	2.70	29.0
180	2.60	47.3	—	—	2.20	40.4	2.20	34.7
360	1.20	54.7	—	—	1.30	46.9	1.30	42.1

B OSU91A 和 EGM96 位模型大地水准面高差全球 RMS 误差统计(来自 Lemoinis, et al., 1998)

Linear Separ. (km)	Angular Separ. (°)	Trunc. Error (cm)	OSU91A			EGM96		
			Comm. Error (cm)	Total. Error (cm)	Relative Error (ppm)	Comm. Error (cm)	Total. Error (cm)	Relative Error (ppm)
10	0.10	10.3	9.20	13.8	13.8	8.00	13.0	13.0
20	0.20	17.9	18.1	25.5	12.7	15.7	23.8	11.9
30	0.30	22.7	26.6	35.0	11.7	23.0	32.3	10.8
40	0.40	25.3	34.4	42.7	10.7	29.6	39.0	9.70
50	0.40	26.2	41.3	48.9	9.80	35.5	44.1	8.80
70	0.60	24.8	52.4	57.9	8.30	44.6	51.1	7.30
90	0.80	22.6	59.6	63.7	7.10	50.3	55.2	6.10
100	0.90	22.1	62.0	65.8	6.60	52.1	56.6	5.70
200	1.80	23.1	71.8	75.4	3.80	58.8	63.2	3.20
300	2.70	23.4	75.7	79.3	2.60	60.0	64.4	2.10
10000	89.9	23.5	77.4	80.9	0.08	59.5	64.0	0.06

21 世纪初开始实施新一代卫星重力计划,其中 CHAMP 和 GRACE 卫星已在运行中, GOCE 卫星也于 2009 年发射,该计划最终目标是恢复地面分辨率约为 100km 的近全波段的 1cm 精度重力场模型。这一设计精度,或者说期望精度在何种条件下才能真正达到,是一个需要进一步研究的问题。首先,仅由卫星跟踪数据恢复的“纯”卫星重力模型,理论上可收敛到包围地球的最小球面边界,在其之下和地表之间的空间则不能保证该模型应用的正确性,已发表的 CHAMP 重力模型用于计算地面重力异常与实测值之差达几十微伽(2003 年西安卫星重力会议),可能反映出这一问题的存在,这里还要考虑模型向下延拓由于衰减

因子 $\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \Rightarrow 1$ 产生的误差放大效应;其次,将卫星重力模型与地面重力数据(例如 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 平均重力异常)通过联合平差的方法改进卫星重力模型,或同时将模型扩展到360阶,此类联合重力模型相当于对卫星重力模型加入了地面重力数据的“约束”,则用联合模型计算地面重力场参数应与实测值相符合,其残差量级为平差结果精度估计反映的内符合精度水平,主要取决于地面实测值的精度。EGM96(360阶)就是这样的联合重力模型,用此模型计算全球不同地区的大地水准面,再与该地区由GPS水准测定的大地水准面比较,由于EGM96均未包含地面GPS水准数据,则比较的差值因地区不同可能差别很大,在北美为 $0.3 \sim 0.4\text{m}$,在我国青藏高原可达 $2 \sim 3\text{m}$,在所有那些重力数据稀少或空白地区差值均可达几米甚至几十米。因为所有类似EGM96这样的联合重力模型,其联合的地面 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 平均重力异常的精度分布很不均匀,相当多的重力测量空白区是用一个先验重力模型填充的,或用地球物理方法估算的,例如用地形均衡原理计算的重力异常。目前全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 平均重力异常的精度为 $\pm 1 \sim \pm 62\text{mGal}$,但有70%为 $\pm 5\text{mGal}$ (Lambeck, 1987; Rapp, 1986(A. J. Anderson 主编《空间大地测量与地球动力学》第二章);李建成等, 2003)。EGM96用于我国领土平均精度为 0.5m 左右,大致相当于用EGM96计算全球大地水准面的平均精度(晁定波, 2003)。上述两方面的问题表明,要实现恢复厘米级精度的全球大地水准面和相应地球重力场模型,就目前拥有的地面重力数据来说,即使是 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率,也没有条件实现这一目标。

这一目标实现的艰巨性,除了在重力场逼近的理论上还需进一步完善外,例如研究重力数据向下延拓的新理论和新方法(申文斌等, 2004),大地水准面的严格定义和实现以及用重力模型计算大地水准面如何处理其外部地形质量问题等,最困难和最具挑战性的问题是解决地球表面相当一部分地区无实测重力数据或数据点过稀的问题。就 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率而言,新一代卫星重力数据可望以略低的精度水平“填充”重力空白地区或提高重力点稀疏地区的分辨率,并可能比过去用低精度重力模型或地球物理方法填充的精度高一个量级,这将是一个重要进展,但要达到相当于厘米级精度的水平是困难的,采用现有的向下延拓法,产生分米级误差是完全可能的,这一问题已有一些理论和试验研究成果。最终解决这一难题,寄希望于两个方面的努力,一方面研究并提出更精密、更稳健的向下延拓方法,同时研究在人员甚至飞机难以到达的自然环境恶劣地区进行重力测量的新技术,现代高科技的发展使人类有能力在月球和火星表面进行各种环境参数的探测,在全球任何地区都可进行重力测量的时代应该为时不远,只要我们认识到发展这一技术的必要性和重要性,就目前已有的先进科技水平和经济发展水平,实现此设想并非一个不可行的难题。这里还要提到的是占地球面积70%的海洋地区,目前利用卫星测高技术,联合陆地和船测重力数据,已可确定分米级精度水平的海洋大地水准面,反演的海洋重力异常精度在 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率上,精度可优于 5mGal (高于陆地平均异常的精度),由于各种物理环境的影响,且难以有精确的校正模型,应用卫星测高技术确定海洋重力场已难以突破 1dm 的精度水平,联合新一代卫星重力数据,在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率上,可望将精度提高到亚分米级水平,能否提高到 1cm 的精度水平(这对研究海洋动力学问题,如平均环流有重要意义)还需要研究和基于实测数据的实验,保守的看法达到这一高精度水平将十分困难。

不同的科学目标对重力场精度和分辨率的需求不一样。表 1-2 分别从大地水准面和重力场的角度给出了固体地球、海洋物理、大地测量等其他领域对重力场精度、时间和空间分辨率的基本需求。

表 1-2 不同科学目标对重力场精度和分辨率的要求

应用对象		精度		空间分辨率 (半波长; km)	时间分辨率 (月)
		大地水准面 (cm)	重力异常 (mGal)		
固体地球物理	岩石圈和上地幔		1~2	100	
	密度结构		1~2	50~100	
	沉积物盆地		1~2	20~100	
	断层				
	构造运动		1~2	100~500	1~6
	地震灾害		1	100	1~6
	海底岩石圈及其与软流圈相互作用		0.5~1	100~200	12
海洋学	短尺度	1~2		100	1
	海盆尺度	0.2	1~5	200	1
		~0.1		1000	3
冰盖	岩床		1~5	50~100	
	冰盖垂直运动	2		100~1000	2~6
大地测量	GPS/水准			100~1000	
	高程基准统一	1	1~5	100~20000	
	惯性导航系统	1	1~3	100~1000	
	测高径向轨道 (误差<1cm)			100~1000	
水资源变化	地表水		0.5~1	100~500	1~6
	地下水		0.5~1	200~500	1~6
海平面变化	以上多数应用对重力场分辨率和精度的要求都适用于研究海平面变化				

§ 1.2 卫星重力探测技术与地球重力场模型的发展及展望

1957 年第一颗人造地球卫星发射成功拉开了人类进入卫星和航天技术时代的序幕, 卫星大地测量首先应运而生, 这是因为要测定和描述卫星运行轨道必须定义和建立一个地心坐标系及其地面框架, 最初的步骤是用传统地面大地测量的理论和方法进行近于全球范围的大地测量, 20 世纪 60 年代苏、美两国主要采用光电导线测量结合天文和重力测量方法各自建立了一个初步的框架式大地测量导线网, 主要分布于地球赤道两侧陆地和美洲、非洲大