

普通高等教育地震类专业规划教材

# 重力观测技术

赵晓燕 陈春生 编

257

地震出版社

普通高等教育地震类专业规划教材

# 重力观测技术

赵晓燕 陈春生 编

地震出版社

1997

## 内 容 提 要

本书共分五章,第一章:重力测量的理论基础,第一部分主要介绍重力场有关的概念及计算,讨论了空间域重力场的变化。第二部分介绍固体潮理论及计算,讨论了重力随时间的变化规律。第二章:重力测量仪器,较详细地介绍了各种重力仪的工作原理、结构特点及测读方式。第三章:重力仪的标定,主要介绍了一般重力仪的调试方法及常数(仪器格值,记录仪的格值)标定及仪器性能的实验。第四章:重力测量在地壳构造与地震预报中的应用,用传统的方法讨论了重力异常的求取和在勘探、地壳厚度及构造活动带上的应用。第五章:重力测量方法与地震预报,主要介绍台站重力观测和地震重复重力观测技术及资料的整理与分析方法。本书可作为地球物理专业大专班的教材,亦可作为相近专业的教学参考书。

## 重力观测技术

赵晓燕 陈春生 编

责任编辑:何寿欢

责任校对:王花芝

\*

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路9号 邮编:100081

中国地质大学轻印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

\*

787×1092 1/16 12.75 印张 326 千字

1997年5月第一版 1997年5月第一次印刷

印数 001—900

ISBN 7-5028-1413-2/P·879

(1860) 定价:16.00 元

## 前 言

《重力观测技术》是为了培养我国地震预测预报第一线大专层次的工程技术人员而编写的教材，它既不同于理论性较强的重力学和固体潮方面的教材和专著，又不同于地球物理勘探中的重力勘探方面的书籍。本书是在国家地震局防灾高等专科学校编写的《重力与固体潮讲义》、《重力学与重力测量》、《重力实验指导书》、《重力实验讲义》的基础上，结合多年的教学实践经验而编写的。书中用一章的篇幅简明扼要地介绍了重力与固体潮的基本理论，用四章的篇幅介绍了重力观测所用的仪器、重力观测方法、重力资料的分析处理方法及其在地壳构造与地震预报中的应用。各章后都配有小结和习题，这便于学生的学习及有关工作人员的自学。

本教材的特点是：理论基础以够用为度，力求深入浅出，多讲物理意义，尽量避免繁琐的数学推导；观测技术为本书的重点。为了获得地震孕育过程，以及震前震后重力场的变化信息，要求重力仪具有高灵敏度和稳定性，有较高的重力观测技术以及对观测资料的特殊分析方法，书中对上述要求都作了详细、全面的介绍。这些要求通常都比重力勘探高得多，因而本书除可作为地球物理专业大专学生教材外，对从事重力观测工作的人员也是一本实用的参考书。

国家地震局有关单位从事重力与固体潮研究工作的专家陈益慧、刘克人、郝钦文对本书大纲提出了宝贵的修改意见，对1995年3月完成的初稿进行了认真细致的审查，提出了中肯而又具体的修改意见，并提供了一部分珍贵的资料，使本书编写质量有较大的提高。在此向他们表示衷心的感谢！

本书第一章由陈春生编写，第二、三、四、五章由赵晓燕编写，全书由陈春生审校。由于编者经验不足，水平有限，难免有不妥之处，恳请读者提出批评指正。

编 者

1995年5月

# 目 录

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 第一章 重力测量的理论基础——地球的重力场与固体潮理论 ..... | (1)  |
| 第一节 地球的形状及内部结构 .....              | (1)  |
| 一、人类对地球形状的认识 .....                | (1)  |
| 二、大地水准面 .....                     | (2)  |
| 三、地球形状研究现状 .....                  | (2)  |
| 四、人类对地球内部结构研究的现状 .....            | (3)  |
| 第二节 地球的重力场 .....                  | (5)  |
| 一、地球的引力场 .....                    | (5)  |
| 二、地球的离心力场 .....                   | (11) |
| 三、地球重力场 .....                     | (13) |
| 第三节 重力位函数及各阶偏导数 .....             | (14) |
| 一、重力场、重力位及其性质 .....               | (14) |
| 二、重力位函数的二阶偏微分 .....               | (15) |
| 第四节 正常重力场 .....                   | (16) |
| 一、大地水准面, 正常重力位 .....              | (16) |
| 二、确定正常重力位的方法简介 .....              | (17) |
| 第五节 正常重力公式 .....                  | (17) |
| 一、正常重力公式的导出 .....                 | (17) |
| 二、常用的正常重力公式简介 .....               | (18) |
| 三、正常重力随纬度、高度的变化 .....             | (20) |
| 第六节 地球内部重力场 .....                 | (21) |
| 第七节 地球的固体潮 .....                  | (23) |
| 一、潮汐现象 .....                      | (23) |
| 二、固体潮 .....                       | (23) |
| 第八节 起潮力和起潮力位 .....                | (24) |
| 一、起潮力 .....                       | (24) |
| 二、起潮力位 .....                      | (27) |
| 三、外星对地球的起潮力介绍 .....               | (27) |
| 第九节 起潮力位的展开 .....                 | (28) |
| 一、天球和天球坐标系 .....                  | (28) |
| 二、起潮力位的拉普拉斯展开 .....               | (30) |
| 三、起潮力位的杜德逊展开 .....                | (32) |
| 第十节 重力固体潮理论值 .....                | (36) |
| 第十一节 重力固体潮的维尼迪科夫调和简介 .....        | (38) |

|                                          |      |
|------------------------------------------|------|
| 第十二节 与固体潮有关的地球物理现象简介 .....               | (43) |
| 小 结 .....                                | (45) |
| 习 题 .....                                | (46) |
| 第二章 重力测量仪器 .....                         | (48) |
| 第一节 重力仪发展概况 .....                        | (48) |
| 一、相对重力仪发展状况 .....                        | (48) |
| 二、绝对重力仪发展状况 .....                        | (49) |
| 三、我国重力仪发展状况 .....                        | (50) |
| 第二节 重力仪的基本构造和工作原理 .....                  | (50) |
| 一、重力仪构造的基本要求 .....                       | (51) |
| 二、重力仪的基本平衡方程 .....                       | (52) |
| 三、重力仪的灵敏度和提高灵敏度的原理 .....                 | (52) |
| 四、重力仪的测读机构和测读方法 .....                    | (53) |
| 第三节 影响重力仪测量精度的各种因素和消除影响的方法 .....         | (54) |
| 一、温度变化的影响及排除方法 .....                     | (54) |
| 二、气压变化的影响 .....                          | (55) |
| 三、静电力、磁力变化的影响 .....                      | (55) |
| 四、重力放置状态不一致的影响 .....                     | (55) |
| 五、重力仪的零点漂移的影响 .....                      | (56) |
| 第四节 GS 型金属重力仪 .....                      | (57) |
| 一、弹性系统的平衡方程及其灵敏度 .....                   | (58) |
| 二、仪器的结构及测量重力差的原理 .....                   | (58) |
| 三、GS-15 型重力仪的改进 .....                    | (60) |
| 第五节 拉科斯特-隆贝格 (Lacoste-Rombery) 重力仪 ..... | (63) |
| 一、仪器的工作原理 .....                          | (63) |
| 二、仪器的结构及测读方法 .....                       | (64) |
| 第六节 超导重力仪和海洋、航空重力仪简介 .....               | (65) |
| 一、超导重力仪 .....                            | (65) |
| 二、海洋及航空重力仪 .....                         | (67) |
| 第七节 绝对重力测量仪器 .....                       | (68) |
| 一、绝对重力测量原理 .....                         | (68) |
| 二、绝对重力仪 .....                            | (73) |
| 第八节 石英弹簧重力仪 .....                        | (74) |
| 一、ZSM 型石英弹簧重力仪结构 .....                   | (74) |
| 二、石英弹簧重力仪的灵敏度和提高灵敏度的方法 .....             | (75) |
| 第九节 DZW 型微伽重力仪 .....                     | (79) |
| 一、仪器的特点及技术指标 .....                       | (79) |
| 二、仪器的基本原理及结构 .....                       | (80) |
| 第十节 重力仪的换能和记录系统 .....                    | (80) |

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 小 结                     | ( 82 )  |
| 习 题                     | ( 82 )  |
| 第三章 重力仪的标定              | ( 84 )  |
| 第一节 重力仪格值常数 $K$ 的测定     | ( 84 )  |
| 一、野外基线法                 | ( 84 )  |
| 二、倾斜法                   | ( 85 )  |
| 三、移动质量法                 | ( 86 )  |
| 第二节 重力仪格值的线性问题          | ( 87 )  |
| 第三节 重力仪最小灵敏度的位置测定       | ( 88 )  |
| 第四节 气压补偿装置性能的检验和气压系数的标定 | ( 89 )  |
| 一、性能检验                  | ( 89 )  |
| 二、气压系数的标定               | ( 90 )  |
| 第五节 弹性系统温度变化的监测及温度系数的标定 | ( 90 )  |
| 一、弹性系统温度变化的监测           | ( 90 )  |
| 二、温度系数的标定               | ( 94 )  |
| 第六节 记录仪格值的测定            | ( 95 )  |
| 一、拉弹簧法测定记录格值            | ( 96 )  |
| 二、记录格值 $C$ 的电磁标定法       | ( 96 )  |
| 第七节 记录仪线性与滞后时间的测定       | ( 98 )  |
| 一、记录仪的线性度的标定            | ( 98 )  |
| 二、记录设备滞后的标定             | ( 99 )  |
| 第八节 拉科斯特重力仪零漂特征检验       | ( 100 ) |
| 一、静态零漂检验                | ( 100 ) |
| 二、动态零漂检验                | ( 100 ) |
| 三、混合零漂的检验               | ( 100 ) |
| 小 结                     | ( 101 ) |
| 习 题                     | ( 101 ) |
| 第四章 重力测量在地壳构造研究中的应用     | ( 102 ) |
| 第一节 重力异常值的计算            | ( 102 ) |
| 一、重力异常计算的基本公式           | ( 102 ) |
| 二、地形校正                  | ( 103 ) |
| 三、中间层校正                 | ( 104 ) |
| 四、自由空间 (高度) 校正          | ( 105 ) |
| 五、正常场 (纬度) 校正           | ( 105 ) |
| 第二节 各种重力异常的地质-地球物理含义    | ( 106 ) |
| 一、自由空间重力异常              | ( 106 ) |
| 二、布格重力异常                | ( 107 ) |
| 三、均衡异常                  | ( 107 ) |
| 四、异常的图示                 | ( 110 ) |

|     |                                |       |
|-----|--------------------------------|-------|
| 第三节 | 重力异常正反演问题                      | (111) |
| 一、  | 正反演的基本概念                       | (111) |
| 二、  | 定性解释与定量解释                      | (111) |
| 三、  | 反问题解的非唯一性                      | (111) |
| 四、  | 几种简单规则几何形体正反问题的解法简介            | (111) |
| 第四节 | 重力异常平滑与划分的方法简介                 | (115) |
| 一、  | 异常曲线的平滑                        | (116) |
| 二、  | 区域异常与局部异常的划分                   | (118) |
| 第五节 | 根据地面重力异常确定密度分界面深度              | (122) |
| 一、  | 求定深部密度界面在地面产生的重力异常             | (122) |
| 二、  | 用逐步趋近法求密度分界面深度                 | (123) |
| 第六节 | 重力资料在地壳深部构造及地壳均衡作用研究中的应用       | (124) |
| 第七节 | 我国布格重力异常的基本特征及其与深部构造和地震分布规律的关系 | (129) |
| 一、  | 我国布格重力异常的特征与深部构造的关系            | (129) |
| 二、  | 我国布格重力异常特征与地震的分布规律             | (130) |
| 小 结 |                                | (132) |
| 习 题 |                                | (132) |
| 第五章 | 重力观测方法与地震预报                    | (134) |
| 第一节 | 重力测量发展简史                       | (134) |
| 第二节 | 重力基准网与监测网                      | (136) |
| 一、  | 国际重力基准网                        | (136) |
| 二、  | 我国的重力标定基线网                     | (136) |
| 三、  | 地震重复重力测线(点)布设原则                | (137) |
| 第三节 | 地震重复重力测量方法                     | (138) |
| 第四节 | 重复重力测量资料的初步处理                  | (140) |
| 一、  | 仪器读数换算成毫伽值                     | (140) |
| 二、  | 固体潮改正                          | (141) |
| 三、  | 气压改正                           | (141) |
| 四、  | 仪器高度改正                         | (142) |
| 五、  | 地下水影响的改正                       | (142) |
| 六、  | 零漂改正                           | (142) |
| 第五节 | 重力资料的平差计算                      | (143) |
| 一、  | 自由网平差                          | (143) |
| 二、  | 非自由网平差                         | (144) |
| 第六节 | 重力观测异常识别                       | (147) |
| 一、  | 系统误差的分析                        | (147) |
| 二、  | 偶然误差分析                         | (148) |
| 三、  | 测点高程变化、地下水位变化与重力效应分析           | (148) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 四、异常识别及报告·····                | (149) |
| 第七节 重力资料管理·····               | (150) |
| 一、资料归档与报送·····                | (150) |
| 二、资料的检查验收·····                | (150) |
| 第八节 重力台址的选择和建台的基本原则·····      | (151) |
| 一、台址的选择·····                  | (151) |
| 二、重力台站的建设·····                | (151) |
| 三、台站重力观测任务及技术要求·····          | (151) |
| 第九节 重力台站设备和仪器组装·····          | (153) |
| 一、恒温箱·····                    | (153) |
| 二、密封罩·····                    | (154) |
| 三、其他附属设备·····                 | (154) |
| 四、计算机的数据采集系统·····             | (156) |
| 第十节 重力台站日常工作与观测成果的整理·····     | (156) |
| 一、台站日常工作·····                 | (156) |
| 二、重力测量资料的整理·····              | (159) |
| 第十一节 重力台站观测成果的质量评价·····       | (160) |
| 一、资料的连续性·····                 | (160) |
| 二、观测资料内符合精度·····              | (160) |
| 三、观测成果的质量检查验收及技术总结·····       | (162) |
| 第十二节 台站重力资料基本分析方法·····        | (163) |
| 一、干扰因素的进一步排除·····             | (163) |
| 二、曲线的滑动均值·····                | (163) |
| 三、作滑动均值的差值图·····              | (164) |
| 四、观测资料的相关分析·····              | (164) |
| 第十三节 绝对重力测量·····              | (165) |
| 一、绝对重力测量方法·····               | (166) |
| 二、绝对重力测量结果的各种干扰因素研究·····      | (166) |
| 三、我国绝对重力测量情况·····             | (167) |
| 第十四节 扩容过程伴随的重力变化·····         | (167) |
| 第十五节 重力场的非潮汐变化讨论·····         | (170) |
| 一、引力常数 $G$ 变化可能引起重力非潮汐变化····· | (170) |
| 二、地球的核幔边界变化可能引起的非潮汐变化·····    | (171) |
| 三、区域性的短期非潮汐变化·····            | (171) |
| 第十六节 我国重力台网概况及其分布特点·····      | (172) |
| 一、台网的基本情况·····                | (172) |
| 二、台站和测网布局·····                | (173) |
| 第十七节 重力场的变化与地震预报研究·····       | (174) |
| 一、重力场的时间变化与地震预报思路·····        | (174) |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 二、重力变化用于地震预报中的几个问题.....      | (175) |
| 三、台站重力方法预报地震的指南.....         | (177) |
| 四、重力地震预报所必须的技术措施.....        | (178) |
| 第十八节 大震前重力台站观测到的异常现象的讨论..... | (179) |
| 一、重力固体潮观测曲线的含义.....          | (179) |
| 二、日均值斜率变化及观测到的现象.....        | (180) |
| 三、重力潮汐因子的变化与观测到的现象.....      | (183) |
| 四、地震前重力仪记录到的其他异常现象.....      | (184) |
| 五、重力仪高频信息与地震前兆.....          | (185) |
| 第十九节 我国几个地震前后重力变化介绍.....     | (186) |
| 一、唐山地震前后的重力变化分析.....         | (186) |
| 二、海城地震.....                  | (189) |
| 小 结.....                     | (191) |
| 习 题.....                     | (192) |
| 附录 重力学重要常数.....              | (193) |
| 主要参考书目.....                  | (194) |

# 第一章 重力测量的理论基础——地球的 重力场与固体潮理论

## 第一节 地球的形状及内部结构

### 一、人类对地球形状的认识

地球是人类赖以生存和繁衍的母体，几千年的人类历史表明，在漫长的历史过程中人们通过观察、研究，在走过不少弯路之后，今天对她的形状的认识已经相当深刻和全面了。但是，要完全、准确地知道地球的真实形状仍有很大的距离。下面按照人类对地球形状的认识过程简要地进行回顾。

早在公元前 3000 年左右，在位于幼发拉底河和底格里斯河之间的美索不达米亚平原的南部建立了巴比伦国。当时，巴比伦人认为地球是一个巨大的圆屋顶，或者是一个从无底深渊中升起的空心的、底朝上的船。到了公元前 550 年，古希腊的学者安纳西曼德首先把地球画在平板上；此后在公元前 500 年海长塔士也完成了同样一幅地图。当时，希罗多德对这幅地图是这样描述的“大洋从四周环绕着陆地，地球像圆规画的一样圆，而亚洲则被画得像欧洲一样。”地球形状的这种认识，是因为人们所看到的地平线是一种圆形线。与此同时，意大利的巴门尼德根据球体是一个完美的形体提出了球形地体的概念。这一说法不是建立在观测资料的基础之上的，完全是臆测的。后来毕达哥拉斯也提出了球形地体的概念，他也没有足够的证据。亚里斯多德（公元前 384~322 年）对球形地体这一概念提出了确凿的证据：①月蚀时投在月面上的地球是圆的，因此地球是球形或几乎是球形；②当我们在地球上由南向北或是从北向南移动时，一些星体消失而另外一些星体出现。这一观测事实只能用弧形地面才能较好地解释。

我国远古时代就有了盘古氏开天辟地的传说，约在周初提出了“盖天说”，此学说认为天像一个半圆的球壳，罩在大地之上，“天圆如张盖”，“地方如棋局”，即认为地是方的。后来，到了汉朝落下闳和张衡建立了“浑天说”，它形象地把宇宙比作鸡蛋；“浑天如鸡子，天体圆如弹丸，地如鸡子中黄……”，此学说把地球比作蛋黄，认为地球具有近于球体的形状。

人类尽管很早就提出了地球为球形的认识，但真正接受是公元 1522 年麦哲伦及其伙伴完成绕地球一周之后。

关于地球的大小，最早是由亚里斯多德提出地球的周长约为 60000km，这一值比实际周长大了半倍。首先对地球大小进行观测的是古希腊学者埃拉托色尼（公元前 275~195 年）。他认为大地是圆球形，且太阳距地球相当远，于是可认为由太阳发出的光线到达地面时是平行光。他观测发现，6 月 22 日正午，太阳刚好在埃及阿斯旺城的天顶上，而该城以北的亚历山大港，太阳却在头顶偏南  $7^{\circ}2'$  的地方；然后，他利用两城之间的距离，计算出地球的周长为 39816km，和真实值很接近。

直到 17 世纪中叶，人们还是以上述事实为根据，认为地球是一个正圆球体。但后来却发

现了一些事实，使人们对这个概念的正确性产生了怀疑。这些事实是根据子午线每度弧长的测量及钟摆由中纬度到低纬度发生了变化。

1670 年法国进行了子午线  $1^\circ$  之长的测量工作，发现子午线  $1^\circ$  之长各处并不相等，越向北长度越大，要解释这一观测事实，只能认为地球的形状不是一个正球形，而是两极扁平的球体，或者说赤道附近曲率较大，而极地附近曲率较小。

1672 年法国天文学家里舍从巴黎到南美洲圭亚那的卡宴去观察火星，从巴黎出发时把记时的天文钟调准了，到南美洲后，他发现天文钟每天要慢  $2\text{min}28\text{s}$ ，只有把天文钟的秒摆缩短  $8.3\text{mm}$  后，钟的走时才正常。而返回巴黎后，又需把秒摆调到原来的长度，钟的走时才正常。

天文钟的原理是：秒摆的周期与摆长  $L$  和重力加速度  $g$  之间有下列的关系：

$$T = 2\pi \sqrt{L/g} \quad (1.1.1)$$

由式中可知当  $L$  固定后， $T$  决定于重力加速度  $g$ 。里舍的发现说明巴黎 ( $49^\circ\text{N}$ )、卡宴 ( $5^\circ\text{N}$ ) 两点间的重力加速度是不同的。由物理学可知重力的主要成分是地球的引力。由万有引力定律：

$$F = - GmM/r^2 \quad (1.1.2)$$

可知，地球质量  $M$ ，秒摆的质量  $m$  在两地是不会变化的， $G$  为万有引力常数，因而重力的变化可认为是两地到地球中心的距离  $r$  不同而产生的。换句话说，在赤道附近的卡宴的地球半径  $r$  较巴黎的地球半径  $r$  为大，这说明地球不是一个正球体。

后来，牛顿根据前人的工作和自己的理论推测指出，地球在不停的自转，在离心力长期作用下地球成为两极较扁平的旋转椭球体。

地球的真实情况是十分复杂的，它的大部分表面被海水包围着，而陆地部分有平原、高山、峡谷等，因此要直接研究地球的形状几乎是做不到的。为此，科学家们设想有一个几何形态比较简单，且与真实地球形状偏离极小的几何形体，把此形体称做参考椭球体。在实际工作中将平静海洋面自然延伸包围整个地球表面的大地水准面所构成的形状作为参考椭球体的形状。在陆地上可以想象为挖很多的沟，海水浸入后达到平衡的液面为大地水准面。如果知道了参考椭球体的形状，又观测到真实地球表面与它之间的差异，则可通过修正而确定地球的形状。

## 二、大地水准面

参考椭球体是一个与真实地球偏离非常小，而形状又比较规则的椭球；它的表面与平静的海洋面一致，这一海洋面就叫做大地水准面。常识告诉我们，海洋面是“无风三尺浪”，它从来就没有平静过。在实际工作中大地水准面是根据设在世界各地的海潮观测站，长期观测获得大量的资料，经过处理获得的海洋面的平均值来确定的。由上面的描述可知，大地水准面是一个几何面，它有一定的大小和形状；另一方面它又是一个物理面——重力位等位面，如果不是这样，则海水面就不平静而海水会发生流动。这后一点十分重要，因为它说明可以通过重力测量来确定重力位等位面的形状，进而来确定地球的形状。

## 三、地球形状研究现状

近几十年来，随着科学技术的飞速发展，特别是仪器设备的观测精度不断提高，人造地球卫星技术的不断完善，人类对地球形状的认识已经更加深刻和准确了。近年的观测研究指出：地球不是旋转椭球体，其赤道不是一个圆，而是一个椭圆，长轴位于  $15^\circ\text{E}$ ， $165^\circ\text{W}$ ，短轴位于  $105^\circ\text{E}$ ， $75^\circ\text{W}$ ，长、短轴相差  $430\text{m}$ ；地球的南、北两极也不是对称的，南极较北极距

地心近些，北极凸出 18.9m，南极凹进 25.8m；地球在 45°N 附近凹陷，在 45°S 附近隆起。因此，人们形象地把地球称为“梨形地球”。

应该指出的是：在不同科学研究中，由于其研究的目的和精度不同，因而对地球形状的要求各异。因此，有时可把地球近似为一个正球体，有时近似为一个旋转椭球体。

下面列出一组地球形状和大小的数据。

地球的赤道半径  $a$  为：6378.136km

地球的极半径  $b$  为：6356.751km

地球的平均半径  $(2a+b)/3$  为：6371.008km

地球的扁率  $(a-b)/a$  为：1/298.257

(上面的数据是 1992 年国际大地测量和地球物理协会的决议中所给出的地球参考数值)。

四、人类对地球内部结构研究的现状

前面简述了地球外部形状的研究情况，现在简述地球内部结构的研究情况。地球内部的结构到底是什么样的，现在还无法直接观察和研究。人类早期是完全凭想象来推测的。随着科学的发展，现在主要通过间接的方法来确定地球的内部结构。这间接的方法就是地球物理观测方法，其中最有说服力的是根据地震波速度在不同介质中会发生变化这一特性，通过对大量观测资料的分析解释后认为地球内部可分为地壳，上、下地幔和内、外地核。本世纪中，很多科学家对地球内部的结构提出了不少模型，这些模型大同小异。近年来的研究更加深入，但并未对地球内部结构的基本模型提出明显的修正，只是在横向变化、各向异性和非弹性方面有了更深刻的认识。下面介绍几种有代表性的影响较大的地球内部构造模型。

(1) 布伦的速度分层模型。这就是常说的布伦七层模型，该模型将地球内部分为 A, B, C, D, E, F, G 七层，后来根据新资料又把 D 分成 D' 和 D''，详细情况见表 1.1.1。

表 1.1.1 布伦速度模型的分层特征

| 符 号 | 分层名称              | 范围/km     | 深度/km                | 速 度 特 性             |
|-----|-------------------|-----------|----------------------|---------------------|
| A   | 地 壳<br>莫氏面<br>上地幔 | 0~33      | 33<br>410<br>1000    | 复 杂                 |
| B   |                   | 33~410    |                      | 变化梯度为正且稳定           |
| C   |                   | 410~1000  |                      | 变化梯度较大              |
| D'  | 下地幔<br><br>古登堡面   | 1000~2700 | 2700<br>2900<br>4980 | 变化梯度为正，稳定（组成均匀）     |
| D'' |                   | 2700~2900 |                      | 变化梯度接近于 0（组成不均）     |
| E   |                   | 2900~4980 |                      | P 波变化梯度为正，稳定；S 波不存在 |
| F   | 过渡区               | 4980~5120 | 5120<br>6371         | P 波变化梯度为负           |
| G   | 内 核               | 5120~6371 |                      | 变化梯度为正，但小           |

(2) 初步参考地球模型 (Preliminary Reference Earth Model)，简称 PREM 模型。这是 1980 年 5 月国际地球标准模型委员会推荐由多依旺斯基和安德森教授提出来的。并在 1981 年第 21 届国际大地测量与地球物理联合会上正式通过。这个模型作为当前国际上临时的地球参考模型，可供参考对比和使用，其参数见表 1.1.2。

(3) 安德森和哈特的地球模型。这一模型与布伦模型相比较可知，它将地球内部的分层

表 1.1.2 PREM 模型参数

| 分区  | 半径/km         | 密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$               | P 波速度 $V_P/(\text{km}/\text{s})$                     | S 波速度 $V_S/(\text{km}/\text{s})$                      | $Q_p$ | $Q_s$  | $\eta$            |
|-----|---------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|--------|-------------------|
| 内核  | 0~1221.5      | 13.0885-8.8381 $x^2$                           | 11.2622-6.3640 $x^2$                                 | 3.6678-4.4475 $x^2$                                   | 84.6  | 132.71 |                   |
| 外核  | 1221.5~3480.0 | 12.5845-1.2638 $x$ -3.6426 $x^2$ -5.5781 $x^3$ | 11.0847-4.0362 $x$ +4.8032 $x^2$ -13.5732 $x^3$      | 0                                                     | 0     | 5782.3 |                   |
| 下地核 | 3480.0~3630.0 | 7.9565-6.4761 $x$ +5.5283 $x^2$ -3.0807 $x^3$  | 15.3892-5.3181 $x$ +5.5242 $x^2$ -2.5514 $x^3$       | 6.9254+1.4672 $x$ -2.0834 $x^2$ +0.9783 $x^3$         | 312   | 5782.3 |                   |
|     | 3630.0~5600.0 | 7.9565-6.4761 $x$ +5.5283 $x^2$ -3.0807 $x^3$  | 24.9520-40.4673 $x$ +51.4832 $x^2$ -26.6419 $x^3$    | 11.1671-13.7818 $x$ +17.4575 $x^2$ -9.2777 $x^3$      | 312   | 5782.3 |                   |
|     | 5600.0~5701.0 | 7.9565-6.4761 $x$ +5.5283 $x^2$ -3.0807 $x^3$  | 29.2766-23.6027 $x$ +5.5242 $x^2$ -2.5514 $x^3$      | 22.3459-17.2473 $x$ -2.0834 $x^2$ +0.9783 $x^3$       | 312   | 5782.3 |                   |
|     | 5701.0~5771   | 5.3197-1.4836 $x$                              | 19.0957-9.6872 $x$                                   | 9.9839-4.9324 $x$                                     | 143   | 5782.3 |                   |
| 过渡层 | 5771~5971     | 11.2494-8.0298 $x$                             | 39.7027-32.6166 $x$                                  | 22.3512-18.5856 $x$                                   | 143   | 5782.3 |                   |
|     | 5971~6151     | 7.1089-3.8045 $x$                              | 20.3926-12.2569 $x$                                  | 8.9496-4.4597 $x$                                     | 143   | 5782.3 |                   |
| 低速层 | 6151~6291     | 2.6910+0.6924 $x$                              | $V_{PV}: 0.8317+7.2180x$<br>$V_{PH}: 3.5908+4.6172x$ | $V_{SV}: 5.8582-1.4678x$<br>$V_{SH}: -1.0839+5.7176x$ | 80    | 5782.3 | 3.3687-2.4778 $x$ |
|     | 6291~6346.6   | 2.6910+0.6924 $x$                              | $V_{PV}: 0.8317+7.2180x$<br>$V_{PH}: 3.5908+4.6172x$ | $V_{SV}: 5.8582-1.4678x$<br>$V_{SH}: -1.0839+5.7176x$ | 600   | 5782.3 | 3.3687-2.4778 $x$ |
| 地壳  | 6346.6~6356   | 2.900                                          | 6.800                                                | 3.900                                                 | 600   | 5782.3 |                   |
|     | 6356~6368     | 2.600                                          | 5.800                                                | 3.200                                                 | 600   | 5782.3 |                   |
| 海洋  | 6368~6371     | 1.020                                          | 1.450                                                | 0                                                     | 0     | 5782.3 |                   |

划分得更详细，见表 1.1.3。

表 1.1.3 安德林-哈特模型分层特征

| 区 域  | 深度 /km                 | 名 称  | 速度变化特征                 |
|------|------------------------|------|------------------------|
| A 层  | 0~40                   | 地 壳  | 横向变化大                  |
| B 层  | 40~375                 | 上地幔  | 横向变化很大<br>速度小<br>速度较均匀 |
| B'   |                        | 盖 层  |                        |
| B''  |                        | 低速层  |                        |
| B''' |                        | 均匀层  |                        |
| C 层  | 375~650                | 幔过渡层 | 速度梯度大                  |
| D 层  | 650~2550<br>2550~2885  | 下地幔  | 速度梯度变化小<br>速度较均匀       |
| D'   |                        |      |                        |
| D''  |                        |      |                        |
| E 层  | 2885~3170<br>3170~4170 | 外 核  | 速度不很均匀<br>速度较均匀，液态     |
| E'   |                        |      |                        |
| E''  |                        |      |                        |
| F 层  | 4170~5155              | 核过渡层 | 速度梯度小                  |
| G 层  | 5155~6371              | 内 核  | 固 态                    |

第二节 地球的重力场

一、地球的引力场

1. 万有引力定律

伟大的物理学家牛顿在总结前人工作的基础上，通过研究于 1687 年发现物体间相互作用的力学定律——万有引力定律。它可表述为：任何物体间都有相互作用的力存在，力的大小与物体的质量成正比，与物体间的距离的平方成反比，其方向指向建立场的物体。

如有两个质点，其质量分别为  $m_1, m_2$ ，它们间的距离为  $r$ （图 1.2.1），则  $m_1$  对  $m_2$  的作用可表达为：

$$f_{1,2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} r_{1,2} \tag{1.2.1}$$

式中， $r_{1,2}$  是由  $m_1$  指向  $m_2$  的矢径； $G$  为万有引力常数；负号表示  $m_1$  对  $m_2$  的引力的方向与  $f_{1,2}$  反向。而  $m_2$  对  $m_1$  的作用力  $f_{2,1}$  则可表示为：

$$f_{2,1} = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} r_{2,1} \tag{1.2.2}$$

比较式 (1.2.1)、(1.2.2) 可知：

$$f_{2,1} = -f_{1,2} \tag{1.2.3}$$

从上面的关系可知：两力的大小相等，方向相反。但作用在不同的质点上，故此二力不能平衡，而是作用力和反作用力。 $G$  可通过实验测定，在 MKS 单位制中  $G = 6.6732 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在通常情况下，万有引力是比较微小的力，但这是一种持续作用的力，因而在

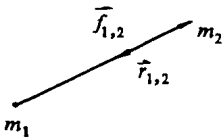


图 1.2.1 两质点之引力示意图

很多场合是不能忽略的,近年来的研究指出  $G$  并不是常数,而是随时间缓慢减少,这种变化在地球几十亿年寿命中减小约 1%,有人推测这种变化会产生许多后果,其中之一可能使地球半径随时间增大。

## 2. 引力场强度

从式 (1.2.1) 和 (1.2.2) 可知,位于空间同一点上不同质量的物体所受引力的大小不等而方向相同,为了描述引力场在空间的分布特征,以类似静电场中引入电场强度的办法引入引力场强度。

引力场强度:在引力场中,某点的引力场强度等于一单位质量的质点在该处所受的引力,用  $F$  表示,记为

$$F_{1,2} = \lim_{m_3 \rightarrow 0} f_{1,2}/m_3 = -Gm_1 r_{1,2}/r^3 \quad (1.2.4)$$

去掉脚标后式 (1.2.4) 可写作:

$$F = -G \frac{mr}{r^3} \quad (1.2.5)$$

由式 (1.2.5) 可知:在质点  $m$  建立的场中,任意点的场强度与场源点的质量  $m$  成正比,与该点到场源点的距离  $r$  的平方成反比,方向指向场源点,负号表明为吸引力。

## 3. 质体在某点产生的引力场强度

前面讨论了质点的场强度的描述方法,但通常情况下物体并不是质点,而是以一定的质量密度分布的。设某物体的质量连续地以体密度  $\rho(\xi, \eta, \zeta)$  分布在空间一体积  $\tau$  内,现计算空间任一点  $P(x, y, z)$  的场强度。显然,  $P$  点有两种情况,其一它在  $\tau$  之外,其二包在  $\tau$  之内,现在分别进行讨论。

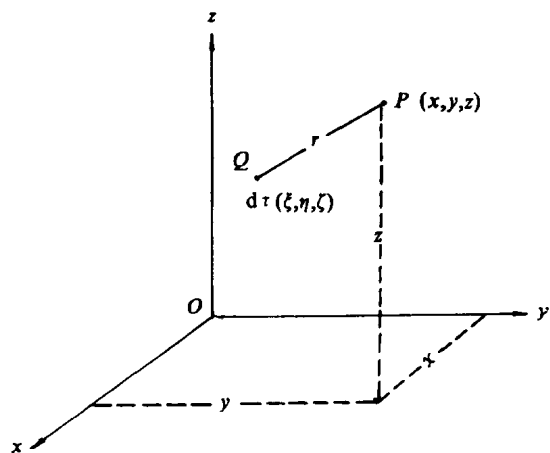


图 1.2.2 质体在某点产生的引力场强度计算用图

(1) 任意点  $P(x, y, z)$  位于质体的体积  $\tau$  之外时场强度的计算。万有引力定律在应用时一般只适用于质点的情况,或者当两质体间的距离  $r$  远大于质体本身的最大线径时,要满足上述条件可采用下面的方法,即将  $\tau$  分成很多体积元  $d\tau$ , 根据万有引力定律求出  $d\tau$  中的质量  $dm$  在  $P$  点的引力,然后将所有体积  $\tau$  中的  $dm$  在  $P$  点的引力用矢量加法相加而获得整个物体在  $P$  点的引力场强度。

在图 1.2.2 中,过  $Q$  点作一小体积元  $d\tau$ , 其中的质量为  $dm$ , 显然

$$dm = \rho(\xi, \eta, \zeta) d\tau(\xi, \eta, \zeta) = \rho d\tau \quad (1.2.6)$$

$dm$  在  $P$  点产生的引力场强度  $dF$  为

$$dF = -G \frac{r}{r^3} dm = -G \frac{\rho r}{r^3} d\tau \quad (1.2.7)$$

式中,  $r = r_2 - r_1$ , 其中  $r_1$ 、 $r_2$  分别是  $\theta$ 、 $P$  点的矢径。

整个  $\tau$  中的质量在  $P$  点的场强度为:

$$\mathbf{F} = -G \int_{\tau} \frac{\rho \mathbf{r}}{r^3} d\tau \quad (1.2.8)$$

式中,  $\mathbf{r} = (x-\xi)\mathbf{i} + (y-\eta)\mathbf{j} + (z-\zeta)\mathbf{k}$ , 其中  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  分别为  $x, y, z$  方向上的单位矢量;  $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$ ;  $d\tau = d\xi d\eta d\zeta$ 。

式(1.2.8)是一矢量体积分, 在具体计算中可先分别算出  $\mathbf{F}$  在三坐标轴上的分量  $F_x, F_y, F_z$ , 然后按矢量加法相加而求得

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k} \quad (1.2.9)$$

由式(1.2.8)和式(1.2.9)可得出:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= -G \int_{\tau} \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta)(x-\xi)d\xi d\eta d\zeta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}} = -G \int_{\tau} \frac{(x-\xi)}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \\ F_y &= -G \int_{\tau} \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta)(y-\eta)d\xi d\eta d\zeta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}} = -G \int_{\tau} \frac{(y-\eta)}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \\ F_z &= -G \int_{\tau} \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta)(z-\zeta)d\xi d\eta d\zeta}{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2]^{3/2}} = -G \int_{\tau} \frac{(z-\zeta)}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \right\} \quad (1.2.10)$$

由矢量代数知

$$|\mathbf{F}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1.2.11)$$

$$\cos\alpha = \frac{F_x}{|\mathbf{F}|}, \quad \cos\beta = \frac{F_y}{|\mathbf{F}|}, \quad \cos\gamma = \frac{F_z}{|\mathbf{F}|} \quad (1.2.12)$$

式中,  $|\mathbf{F}|$  是  $P$  点场强度  $\mathbf{F}$  的大小, 而  $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$  是矢量  $\mathbf{F}$  的方向余弦,  $\mathbf{F}$  的大小和方向确定后  $\mathbf{F}$  就可求得。

(2) 当  $P$  点位于物体体积  $\tau$  之内时  $\mathbf{F}$  的计算。由图 1.2.2 可知, 当  $P$  点位于  $\tau$  之内或边界上时, 则会出现  $r \leq 0$  的情况, 这时就可能使积分失去意义。为了解决这一问题可采用下面的方法来处理, 在  $P$  点的周围取一包围  $P$  点的变域  $\tau_0$ , 令其最大线径为  $\delta$ , 设想  $\tau_0$  内无质量存在, 于是  $P$  变成质体外一点, 就可用前述的方法来计算  $P$  点的场强度, 最后再令  $\delta \rightarrow 0$  求积分的极限

$$\mathbf{F} = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \int_{\tau - \tau_0} \frac{G\rho \mathbf{r}}{r^3} d\tau \quad (1.2.13)$$

可以证明, 当  $\rho(\xi, \eta, \zeta)$  为一连续函数, 则上面的积分是收敛的, 其极限为:

$$\mathbf{F} = -\int_{\tau} \frac{G\rho \mathbf{r}}{r^3} d\tau \quad (1.2.14)$$

应该指出式(1.2.8)和(1.2.14)在数学表达上是相同的, 但当观测点位于质体内部时, 则要求质体的体密度函数  $\rho(\xi, \eta, \zeta)$  为一连续函数, 在实际应用中上两式为矢量积分, 计算起来很复杂。

#### 4. 引力场的重要性质

(1) 引力场是有源场。类似静电学讨论中引入电力线的概念, 在引力场讨论中引入引力线的概念。

引力线: 在引力场中存在这样的曲线, 曲线上任一点的切线方向就是该点引力场强度的方向, 场中某点附近引力线的疏密程度, 反映该点引力场强度的大小。显然, 点质量的引力