

普通高等教育地震类专业“九五”省部级重点教材

地球物理学简明教程

刘运生 毛春长 等 编

地震出版社

普通高等教育地震类专业“九五”省部级重点教材

地球物理学简明教程

刘运生 毛春长 等 编

地震出版社

1996

内 容 提 要

本书为专科学校应用地球物理专业教材。全书共 10 章, 第一章绪论, 介绍地球物理学研究对象、方法及史略; 第二~七章介绍地球的起源、年龄、运动及形状等整体特性, 着重讲述固体地球内部的各种物理性质(如物质密度分布、地震波的传播、电磁性质和热状态)、观测方法及其成果应用。第八~十章介绍近代地球物理的进展, 包括实验地球物理、计算地球物理、地震预报和新地球观等。

本书为应用地球物理、地震、地质、地理、天文等专业大专教材, 也可供从事地震监测、地质及相关专业的技术人员作培训教材和自学参考书。

地球物理学简明教程 刘运生 毛春长 等 编

责任编辑: 俸苏华

责任校对: 王花芝

*

地 震 出 版 社 出 版

北京民族学院南路 9 号

北京丰华印刷厂印刷

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 15.625 印张 400 千字

1996 年 8 月第一版 1996 年 8 月第一次印刷

印数 0001~1500

ISBN 7-5028-1344-6/P·829

(1760) 定价: 20.00 元

序

这本《地球物理学简明教程》(以下简称《教程》)的编写,可以追溯到1978年。当年,在成都召开了国家地震局首次教材工作会议。在会上,为地震学校(今防灾技术高等专科学校前身)编写《地球物理学概论》(以下简称《概论》)一书的任务已列入规划,并讨论和通过了编写大纲。

1982年,中国科学院研究生院何涛文教授希望开一门专为外专业研读的地球物理课。于是利用《概论》的编写大纲,为研究生写一章、讲一章,遂成初稿。

1984年,国家地震局教育处推荐这份讲稿作为地震局在职高、中级技术干部的进修教材,并在杭州、北京等处试讲。1986年该书正式由地震出版社出版,1987年再版。1989年开始在防灾技术高等专科学校办《概论》学习班已逾30期,学员千人以上,在培养地震专业人才方面发挥了一定作用。但是,在防灾技术高等专科学校为学生讲课和为职工办班中,普遍感到该教材的内容偏深、篇幅偏大。迫切需要一本适合大专水平的教材。

为此,1993年,在国家地震局人事教育司主持下,经国家地震局全国高等学校地震类专业教材建设委员会专家的审查,决定在原《概论》的基础上,聘请防灾技术高等专科学校刘运生副教授和山西省地震局毛春长高级工程师,负责组织人员进行改编,本着深入浅出、循序渐进和实用的原则,对章节进行调整,章后增加思考题或习题,并改名为《地球物理学简明教程》。

现在呈现给读者的是经过重新改编的《教程》,它既保持了《概论》的原书风貌,并且又在体例和取材上作了较大的变动。

这本《教程》,由于是富有教学经验的教员和富有地震监测经验的工程技术人员合作、共同执笔编写的着重为监测第一线服务的教材,因而取得很好的效果。这是一个新的尝试。

我衷心祝贺此书改编完成,并祝贺此书在教学实践中取得成功!

应当看到,地球物理学是一门跨学科的应用物理学,是地球科学的基础学科。在全球面临资源匮乏、灾害频发和环境恶化的情况下,地球物理学以其特有的探测、监测和预测能力,引起全世界各方面的关注,目前正处于前所未有的大发展时期。

最近,我收到国家自然科学基金委主持撰写的《地球物理学战略与发展报告》(1994年8月,科学出版社),报告中提出本世纪最后几年面对全球地学挑战和全国经济发展需求的一系列对策和政策。无独有偶,最近,又有幸拜读了年逾古稀的国际知名地球物理学家傅承义院士撰写的《地球物理学探索与其它》一书(1993年10月,科学技术文献出版社),老人在书中回忆了近半个世纪的科学生涯,就做学问的入门之道、学术思想、科研道路以及人才培养、科研与教育机构等问题,发表了许多独到的见解。

案头放着这两本文字,我久久凝视。一本是宏伟规划,气势磅礴,读后令人振奋,愿

意为之一搏；一本是微邈思绪，情之所至，感人肺腑，愿意步先生后尘为之努力。这两本书有一个共同点：它们都是在提示我们，地球物理学是一门大有前途的地球基础学科。它的前途就是在于极大的社会需求。地球物理学目前正处于大发展的新起点上，并似已瞄准每个新的突破口，众矢待发。因此，我们这些肩负过去与未来的教书匠或（和）学科带头人，在讲授这门《教程》课或《概论》课时，务必首先拓宽我们自己的视野、思路和概念，只有这样，才得以引导学员正确步入地球物理学的大门。

张 少 泉

1994 年 12 月

编 者 的 话

目前,我们还未曾读到过适合于专科层次学生学习的有关地球物理学基础方面的书籍,因此,为专科学校应用地球物理系学生编写一本专业基础课教材是很有必要的。从1977年开始,防灾技术高等专科学校(以下简称“防专”学校)曾先后开设过“普通地球物理”、“地球概论”、“地球物理基础”、“地球物理学概论”等课程,并编写了相应的讲义;1978年,国家地震局地球物理研究所张少泉教授,应国家地震局教材规划部门的邀请开始编写高等教育中较低层次学生适用的《地球物理学概论》教材,尔后又考虑了更广泛的应用目的,1986年这本书正式出版。1989年张少泉应邀到“防专”学校主讲该课程,历经七载。1993年受国家地震局的委托,“防专”学校重新编写这本教材。现在呈现给读者的《地球物理学简明教程》(以下简称《教程》)就是以张少泉教授编著的《地球物理学概论》为基础,注重吸收“防专”学校近20年中开设的相应课程的教学经验;在内容取舍上,充分考虑专科学生层次的特点和与前面基础课的衔接及与后续专业课程的分工配合,并结合目前地震工作第一线的实际需要编写的。

本《教程》是应用地球物理专业的专业基础课教材,根据教委规定的“高等专科教育的基础理论课教学要以应用为目的,以必需、够用为度,以掌握概念、强化应用为教学的重点”原则,编写时尽量避开公式的繁琐推导和高深理论的研讨,而致力于对地球物理学中的物理概念和基本原理的阐述,简明扼要、深入浅出地介绍地球物理学的基础知识、观测方法,以培养学生对地球科学的兴趣,建立正确的物理概念,为学生学习地震观测技术、地磁观测技术、地电观测技术、重力观测技术、地壳形变观测技术,地震地下水观测技术等专业课打好基础;同时适当展示地球物理学应用领域和发展前景以拓宽学生的科学思路和视野。为增强实用性和实践性教学,本教程各章中都选编了一些典型的实际工作成果、图例。为了帮助学生掌握主要内容,各章都附有内容小结及习题。

本教材经全国高等学校地震类专业教材建设委员会专家审查定稿,全书共10章。第一章是概述地球物理学研究的对象、研究方法及研究史略。其余9章分为三个层次予以展开:第二、三章为第一层次,介绍地球的整体特征,包括地球起源、地球年龄、地球形状和地球自转,以及行星地球、天球坐标、地球公转等基础知识;第四至七章为第二个层次,是本书的重点篇章,介绍固体地球内部的各种物理性质、观测方法及成果应用。地球内部的物理性质包括:物质密度分布、地震波速分布、电磁性质和热学性质;第八至十章为第三个层次,简要介绍了近代地球物理学中几个重要领域,包括实验地球物理学、计算地球物理学、地震预报与地球物理学、构造与地球物理学等的进展,以拓宽科学思路和视野。

本书的第一章由张少泉编写,第二章由毛春长编写,第三、六、七章由刘运生编写,第四章由丰继林编写,第五章由盛浩良编写,第八章由徐杨编写,第九、十章由赵葆钧编

写，全书由刘运生统稿汇总。

高等专科学校地震类专业教材首次出版，得到了国家地震局教育处和地震出版社的领导 and 编辑人员的大力支持，我们表示衷心感谢。《教程》编写过程中，张少泉教授给予了热情的帮助和指导，并为本书写了序；书稿完成后，承蒙全国高等学校地震类专业教材建设委员会委员纪英楠教授，国家地震局地球物理研究所琴朝智研究员和北京大学刘宝成教授对全文进行了细致的审阅，为本书的修改提出了宝贵的意见；在此表示最诚挚的谢意。

编写专科层次的地球物理学基础教材尚属尝试，由于水平有限，书中存在疏漏和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

1995 年 3 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 研究对象	(1)
第二节 研究史略	(3)
第三节 研究方法	(7)
第四节 国内进展	(11)
本章小结	(14)
思考题与练习题	(14)
第二章 地球的起源与演化	(15)
第一节 新星云假说	(15)
第二节 地球的早期演化	(21)
第三节 地球年龄的测定	(25)
本章小结	(32)
思考题与练习题	(33)
第三章 地球的转动与形状	(34)
第一节 天球坐标系	(34)
第二节 地球的自转	(38)
第三节 地球自转速度的变化	(42)
第四节 地球自转轴的运动	(46)
第五节 地球的公转	(51)
第六节 地球的形状	(56)
本章小结	(62)
思考题与练习题	(63)
第四章 地球的重力场	(65)
第一节 地球重力场的基本特征	(65)
第二节 重力观测	(70)
第三节 重力均衡和均衡异常	(75)
第四节 重力固体潮	(81)
第五节 重力观测的应用	(85)
本章小结	(91)
思考题与练习题	(91)
第五章 地震波传播与地球内部结构	(93)
第一节 地震波传播	(93)
第二节 地震波速度与地球物理参数的计算方法	(102)
第三节 地震波速度与地球内部结构	(106)

第四节 地震波观测及应用	(109)
本章小结	(111)
思考题与练习题	(111)
第六章 地球的电磁场	(112)
第一节 磁场的基础知识	(112)
第二节 行星际磁场与地球磁场	(117)
第三节 地球磁场的分析	(125)
第四节 地球主磁场的变化与起源	(139)
第五节 古地磁学简介	(145)
第六节 地球电场及电性分布	(153)
本章小结	(157)
思考题与练习题	(157)
第七章 地球的温度场	(159)
第一节 有关地球温度场的一些基本知识	(159)
第二节 地球的热流分布	(163)
第三节 地球内部的温度分布	(174)
第四节 地热观测及其应用	(181)
本章小结	(187)
思考题与练习题	(188)
第八章 地球物理学研究方法	(190)
第一节 地球介质破裂的实验研究	(190)
第二节 地震波激发和传播的实验研究	(195)
第三节 大尺度实验以及原地实验	(198)
第四节 计算地球物理学的形成与研究领域	(202)
第五节 计算地球物理学的主要方法和应用	(205)
本章小结	(210)
思考题与练习题	(211)
第九章 地球物理学与地震预报	(212)
第一节 地震参数的概念	(212)
第二节 地震预报的物理基础	(216)
第三节 地震预报方法的探索	(218)
本章小结	(222)
思考题与练习题	(222)
第十章 地球物理学与全球构造	(223)
第一节 新地球观	(223)
第二节 地球物理学提供的证据	(227)
本章小结	(235)
思考题与练习题	(236)
附录 A 球面三角定律	(237)

附录 B 常用地球参数 (238)

附录 C SI 制与 CGSM 制的单位换算 (238)

主要参考书 (239)

参考文献 (240)

第一章 绪 论

地球物理学，是一门以地球为研究对象的应用物理学。其中，对固体地球的研究，在本世纪 60 年代以来，获得极大发展。它已成为地学，即地球科学的重要组成部分，并且渗透到地学中的许多分支；是与地球活动、地球性质有关的许多技术如地震监测、地球物理勘探等的理论基础。

第一节 研究 对 象

一、地球与人类

地球——人类的摇篮。地球上的各种物理条件，与人类的生存、生活和生产活动密切相关。

谁都知道，地球表层的沉积沃土，供人类生产粮食；地底下的石油、煤田、矿物，为人类现代文明的发展提供物质基础；接近地面的大气层，为人类提供空气；而远离地面的高空磁场，像一道天然防线，屏蔽着射向地球的高能带电粒子，以保护人类的安全。

然而，地球在给人类以恩惠的同时，也给人类带来种种灾难：火山熔流，使意大利古城化为灰烬；台风扫过，使智利沿海村镇荡然无存；而强烈地震，像 1976 年 7 月 28 日发生在我国唐山的 7.8 级地震，不过几秒钟，使 99% 的房屋倒塌，使 24 万余人丧生，16 万余人受伤！在大自然面前，人类还不能取得完全“自由”！

但是，总的看来，在对地球的不断斗争中，人类总是以智慧和勇气不断取得进步。古今中外概莫能外。我国伟大的爱国诗人屈原曾留下千古不朽的名篇《天问》。他思潮如涌，一口气提出 172 个问题。屈原所问的“天”，实际上已包括“地”而且包括人类社会，涉及天文地理、博物神话。“天”，是人类急欲探求的未知领域的总称。

从《天问》问世，至今已逾 2000 年。随着社会进步和科学发展，《天问》所提到的不少问题已在不同程度上获得解决。但是，《天问》所体现出来的那种敢于发问、勇于探索、绝不随波逐流的精神，将给予后来者以深刻的启示：“人生在勤，不索何获？”（张衡语）这就是我们应持的态度。

二、地球物理学的产生

人类在长期的生活和生产活动中，逐渐产生一系列有关地球科学的学科，如地质学、地理学、古生物学、气象学、海洋学……。其中，地质学若以赖尔（C. Lyell）1831 年出版的《地质学原理》为标志，至今不足 200 年。地球物理学成为一门以物理学为基础的地球科学，年代就更晚了。

大体在本世纪之初，地球物理学已初具规模，并自成体系。它的代表性著作之一，是杰弗里斯（H. Jeffreys）的《地球及其起源、历史和物理状态》。该书自 1924 年第一版问世，至今已四次再版（1929、1953、1962、1970 年）。如果以这本书为标志，地球物理学的产生仅五六十年，充其量不过 100 年。因此，地球物理学在地球科学中是一门很年轻的

学科。

什么是地球物理学呢？傅承义教授曾下过这样一个精辟的定义：“地球物理学，顾名思义，就是以地球为研究对象的一门应用物理学”。由此可知，地球是这门学科的研究对象，物理学是研究这门学科的理论基础。利用物理学的电学、磁学、热学、运动学和动力学等方面的原理和方法，研究地球各部分的物理条件、物理性质、物理状态，从空间和时间两个方面找出以上各方面的发展和联系，以寻求其变化规律，这就构成了地球物理学的内容。

地球物理学，若从广义上理解，除固体部分还应包括研究地面形状的大地测量学，研究海洋运动的海洋物理学，以及研究高空和星际空间的空间物理学。不过，一般谈地球物理学是指固体地球部分，故称为固体地球物理学，又称地体学或大地物理学。

三、固体地球物理学的组成

固体地球物理学可分为两个大的方面：研究大尺度和一般原理的，叫普通地球物理学；勘察石油、金属、非金属矿或其他地质体的，叫勘探地球物理学，又称物理探矿学。

普通地球物理学依研究领域和手段，又分为重力学、地磁学、地震学、地热学等传统分支，以及深部探测、地球动力学等新的十分活跃的分支。

图 1.1.1 给出了地球物理学的形成和发展的轮廓。其中，还重点给出了地球物理学与邻近学科的关系。

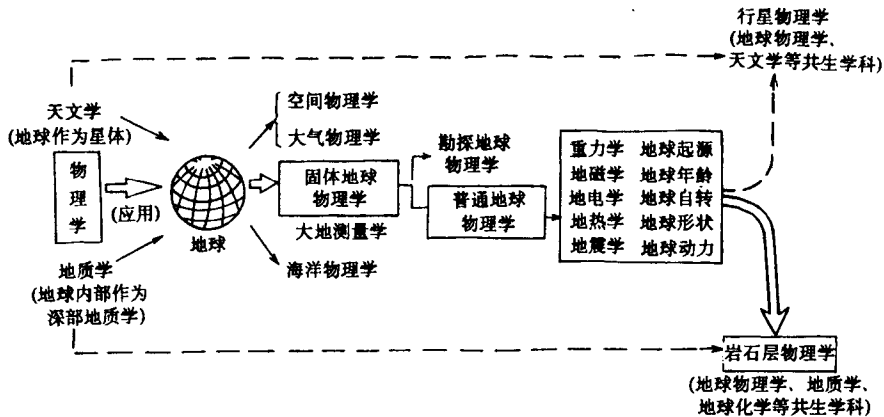


图 1.1.1 地球物理学的形成和发展

在地球物理学迅速发展的今天，勘探地球物理学采用新技术、新方法和新理论的程度，远远超过普通地球物理学。本世纪来，地面上容易找到的矿藏除未开发的地区，均已探测清楚，迫使人们向深部和向海洋寻找新资源。在这种情况下，传统的物理探矿方法受到挑战，需要加强深部的和海洋的地球物理学研究。

在固体地球物理学中，尤其值得一提的是地震学的迅速发展。由于地震观测仪器的改善、计算技术的引进、世界标准台网的建立，促进定量地震学的发展。特别是由于地震灾害引起人们关注、更促进震源物理学和地震预报科学的崛起。

第二节 研究史略

地球物理学虽然在上个世纪末、本世纪初才成体系，但对地球物理现象的观察和探讨，从古代就开始了。早在我国东汉时期，张衡就进行了地震观测研究；唐代的张遂（僧一行）组织了大地测量研究工作。他们在我国早期的自然科学发展中有着举世公认的地位和功绩。如上节所述，物理学是地球物理学的基础。但是人人皆知，做为物理学重要组成的牛顿力学，正是从研究地球物理问题（如落体运动）开始的。

学习一门学科的发展史，可以更好地掌握这门学科的真谛并预测其发展方向。在这里，按照该学科的发展过程，分七个时期加以介绍。

一、公元 14 世纪以前的情况

地球物理这门学科是由于人们要确定地球的形状和大小而发展起来的。

公元前 6 世纪，希腊人从亚那萨哥拉时代已把大地看成球体。公元前 4 世纪，阿里士多德（Aristotle）在他的名著《De Caelo》中明确指出大地是球形，并且估计了地面上纬度变化 1° 所对应的地面长度，即一度弧长。在公元前 3 世纪，伊拉多·生斯（Eratosthenes）提出估计该值的方法：在夏天，他在阿斯旺和亚历山大两处测量了太阳顶点的高度差，其数值为 360° 的 $1/50$ ，并测量了两处的地面距离，最后由这两个数值算出了地面上纬度变化 1° 所对应的地面长度。

公元 8 世纪，我国唐代的天文学家张遂曾独立得出一度弧长值，其误差约小于 20%。

公元 9 世纪，阿拉伯人派出两组学者，从美索不达米亚出发，一组往北，一组往南，每组都配有测量杆和天文仪器，分别测量北极星高度改变 1° 时的地面距离。他们得出，纬度改变 1° 的地面长度约为 90km。该值虽然偏差大，但地面为球面的观念已经萌生。

二、公元 15~17 世纪的情况

与希腊、中国和阿拉伯相比，欧洲人的地球物理工作开始较晚，大概在环球航行证实大地是球形以后开始的。公元 1527 年，菲涅耳（Fresnel）在巴黎通过计算四轮马车车轮的旋转计算圆周值。1617 年，斯内尔（Snell）提出三角测量的概念。1637 年，诺伍德（Nolwood）步测了从伦敦到约克的距离，以确定一度弧长值。1669 年，法国人比卡（Picard）用望远镜测量角度，所得圆周值的误差达到 0.1%。

在此阶段，地球扁率和地球旋转的效应，随着大地测量精度的提高而开始表现出来。在此应着重谈谈牛顿的杰出贡献。在牛顿以前，对地球的研究基本是静态的三角几何问题。牛顿提出的运动定律和万有引力定律，给地球形状和构造的动力学研究奠定了理论基础。从这个意义上来看，牛顿无疑应被认为是理论固体地球物理学的先驱。归纳起来，牛顿对地球物理学有两大贡献：

牛顿的第一大贡献 牛顿第一个估计了地球的质量。根据万有引力定律，可得出在一级近似情况下的公式 $g = GM/R^2$ ，其中 g 为重力测量值， G 为万有引力常数， M 为地球质量， R 为地球半径。因为 g 和 R 的数值可得，所以由此式可得 GM 值。牛顿为分别求得 G 和 M 值，提出许多实验原则和途径，这些途径已为后人采用。虽然牛顿在世时，还没有完成这些实验，未能得到地球质量的确切数值，但是，他对地球、太阳和其他行星的

平均密度之比，做出了天才的估计。当时，他做出了以下著名推测：“地球的整体质量，比假定它全是由水组成的地球要大五至六倍。”

牛顿的第二大贡献 牛顿第一个估计了地球的扁率 α 的数值。为了得到数学模式，他把地球看成密度恒定的旋转流体，由此推导出 $\alpha = (a-b)/a = 1/230$ ， a 、 b 分别为地球的赤道长轴和极短轴。同时，牛顿还认识到地球密度不是恒定的，所得 α 值应该进行修正。

牛顿关于地球是扁球的推论，后来被法国天文学家所证实。他们发现：能在巴黎给出准确时间的摆钟，放在赤道附近的卡宴，却慢了 2.5s，这与地球形状在赤道凸起有关。应该指出，惠更斯（Huygens）在不知道牛顿这一推论的情况下，采用另一个不同的密度模式，得到 α 值为 $1/577$ 。当时，人们试图从理论上和观测上解释牛顿所得 α 为 $1/230$ 与惠更斯所得 α 为 $1/577$ 之间的差异。但没有结果。然而，他们所给的两个数值，可作为真实 α 值的上下限。

三、18 世纪的工作

在牛顿于 1727 年去世以后的一个相当长时间内，绝大多数的地球物理研究者为英国人和法国人。在英法之间展开了竞争，结果使这两个国家的地球物理工作获得极其光辉的成就，从而使地球知识大大跃进一步。

在英国方面，约翰·米歇尔（John Michell）设计了一套仪器，可以测定实验室内两个物体之间的引力，从而确定常数 G 。牛顿确定了 GM 的数值，现在有了 G ，就可以确定 M 的数值。可惜的是，米歇尔只是设计和安装了这套仪器，并未得到最后结果就逝世了。他的学生卡文迪什（Cavendish）接替进行实验，于 1798 年对 G 进行了很成功的测定，从而得到准确的值。再由公式 $\rho = M/V$ （ V 为地球体积），算出地球的平均密度（ ρ ）为 5.5g/cm^3 ，由此证实了牛顿的早期推断。

在法国方面，大约 1736 年对拉普拉兰和秘鲁进行了一次成功的探测。参加的包括克莱罗（Clairaut）和布格（Bouguer）这样的著名人士。由于两地相隔纬度 60° ，通过测量足以得出地球是扁球的结论。他们的工作为这一结论的成立第一次提供无可怀疑的证据。在观测中，布格开创了重力测量学，从而奠定现代大地测量学的基础。在理论方面，克莱罗提出重力加速度 g 与扁度 α 有关的重要公式，导出一个地球内部密度随扁度 α 而改变的二阶微分方程。在那以后的一个半世纪里，许多地球物理问题是在牛顿和克莱罗的工作基础上展开的。

应该指出，在那个时期几乎所有法国大数学家都写过有关固体地球物理学的论文。其中包括达朗贝尔（Dalembert）、库仑（Coulomb）、拉格朗日（Lagrange）、拉普拉斯（Laplace）、勒让德（Legendre）、泊松（Poisson）和柯西（Cauchy）等。他们把数学与物理学结合起来解释地球现象，从而使这门学科建立在严格的数理基础上。

四、19 世纪的工作

到 19 世纪初，引力理论已经以精炼的数学形式出现，并且成功地应用于旋转地球的大量问题。这时求得的地球质量的精度已在 1% 以内，地表的扁率测定已精确在百分之几之内。

这个世纪，十分重要的成就是运用数学工具，把地球质量、地球半径、地表 g 值和关于岁差的天文数据，巧妙地结合在一起，得到地球的转动惯量（或惯性矩） I 。1855 年法国人勒道（Radau）引进特殊函数，使得确定转动惯量 I 成为可能。通过计算给出

$\alpha = 1/297$, $I = YMR^2$, $Y = 0.3335$ 。对于一个常密度的球体而言, $Y = 0.4$ 。既然所得 Y 值(0.3335)比 0.4 小, 表明地球内部一定存在一个可观的高密度中心。我们从卡文迪什实验得知, 地球的平均密度为 $5.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 而地表岩石密度仅 $2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 因此地球深处的密度必定为地表岩石密度的若干倍。这样, 从转动惯量 I 和密度 ρ 同时得出地球内部密度大或质量集中的结论, 这为研究地球内部的密度分布提供了一个重要的边界值。

在当时提出两个地球内部密度分布的数学模式, 一个是勒让德-拉普拉斯模式, 另一个是罗歇 (Roche) 模式。这两个模式所给出的密度值的变动范围为: 地表处约为 $3.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 地心处约为 $11.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。19 世纪为探索地球内部密度分布花费了极大精力, 但尚未达到成熟可信的程度。直到后一个世纪, 地震学研究得到地球内部的分层结构, 才从根本上解决了地球内部的密度分布问题。

五、20 世纪前半世纪的工作

20 世纪, 地震学得到广泛应用, 地球内部的力学性质才被揭示。

地震是人们早已觉察的现象。中国有世界瞩目的长达 2000 多年的地震记载 (已整理成大地震目录和资料汇编)。在地震观测方面, 远在东汉, 文学家和科学家张衡, 曾制造出世界上第一架地震仪——候风地动仪, 实际上它是一台验震器。

1755 年里斯本地震之后, 欧洲的地震工作才冲破神学和官方的桎梏, 真正地开展起来。约翰·米尔恩 (John Milne) 制成一种操作简便的地震仪, 投入应用, 使地震学走上定量阶段。地震观测定量化, 才引起人们的重视。在此之前, 1830 年泊松虽然从理论上给出地震波包括纵波 (P 波) 和横波 (S 波) 的概念和两种波速的表达式, 但还没有证实它们的存在。直到 1897 年, 英国人奥尔德姆 (Oldham) 在地震图上识别出 P 波和 S 波, 从而提供了第一个证实地球可以采用完全弹性模型的证据; 从此开始了用地震波研究地球分层结构的历史。

1906 年, 奥尔德姆从地震图上得到地球有一个致密的液态地核的证据。这个证据对于长久以来地球内部有高密度或质量集中的假说, 是一个有力支持。

1909 年, 南斯拉夫地震学家莫霍洛维奇 (A. Mohorovičić) 发现, 在巴尔干地表以下数十公里处的波和波速度急剧增加; 这个速度急剧变化的界面, 称为莫氏面。后来许多人做了大量工作, 表明这个面是全球性的。这个面就是地壳与地幔的分界面。

1914 年, 德国人古登堡 (B. Gutenberg) 在确定地壳和地核之间存在地幔的前提下, 公布了一个著名的计算结果, 他得出幔核界面的深度为 2900km。

1936 年, 丹麦莱曼 (L. Lehmann) 女士根据两个新西兰地震的欧洲记录指出, 地球的核有明显的外部与内部之分, 现在分别称为外核与内核。

1946~1950 年, 澳大利亚的布伦 (K. E. Bullen) 根据地震学分析, 得出内核为固态的结论。后来, 这个结论又得到热力学和理论物理学的支持。

以上仅粗略地勾划了一下从地震学得到地球分层的研究历史。实际上, 由地球的速度分层还可以得到地球内部的更多信息。

1923 年, 美国人威廉森 (Williamson) 和亚当斯 (Adams) 用 $\kappa/\rho = \alpha^2 - 4\beta^2/3$ 公式 (α 、 β 分别为 P 波和 S 波速度), 估计地球内部的密度分布, ρ 、 κ 分别为密度和体变模量。后来发现, 所得结果只适用于地幔的上部。

1940年,杰弗里斯和布伦经过多次试验给出一个地震走时表,即著名的J-B走时表。由这个表可以得到P波速度和S波速度随深度的变化。进而得到 κ/ρ 和 μ/ρ 随深度的变化。 μ 为切变模量。然后,在一定的假定下,进一步确定弹性状态、压力和重力加速度。由此得出,地幔底部的密度为 $5.5\text{g}/\text{cm}^3$,地心的密度不超过 $13\text{g}/\text{cm}^3$;地幔底部的压力为 $1.3 \times 10^{11}\text{Pa}$,地心的压力接近 $3.67 \times 10^{11}\text{Pa}$;地幔顶部的重力加速度为 $10.5\text{m}/\text{s}^2$,地心的重力加速度为零;体变模量在地幔顶部为 $6.5 \times 10^{11}\text{Pa}$,在地心为 $15 \times 10^{11}\text{Pa}$;切变模量在地幔底部为 $3.0 \times 10^{11}\text{Pa}$,在地心超过 $1.1 \times 10^{11}\text{Pa}$ 。应该指出,这些数值带有很大的不确定性,与某些假定条件有关。

六、20世纪后半世纪的工作

第二次大战以后,由于军事需要(如地下核爆炸的侦察、人造地球卫星轨道的控制)和经济的发展(如地下资源和海底资源开发、核电站和其他大型工程设施的场地条件),向地球物理学提出许多新的要求,在客观上为地球物理学的发展提供十分有利的人力和物力条件。在地质学方面,增加了许多新的观测资料,其中地震台阵记录、长周期地震面波和地球振荡记录、长剖面地震测深记录等,进一步完善了地球的分层模型,并且发现地球结构的横向变化。

在最近20多年,国际上连续组织四次大协作,使地球物理学获得巨大进展,在地球物理研究的广度和深度上,远远超过以往的年代。这四次大协作是:

1957~1958年的国际地球物理年(International Geophysical Year 简称IGY);

1960~1970年的国际上地幔计划(International Upper Mantle Program 简称IUP);

1974~1980年的国际地球动力学计划(International Geodynamic Program 简称IGP);

1981~1989年的国际岩石层(圈)计划(International Lithosphere Program 简称ILP)。

这四次协作计划的实施,在地球物理学以至整个地学界产生了深刻影响。第一次协作完成后,在全球范围建立了规范化的、布局合理的地震、重力、地磁、地热等观测台网,为大规模研究提供了资料基础。第二次协作完成后,提出了“板块构造学说”,这是一次地球表层动态概念上的革命。第三次协作完成后,对板块运动的驱动力问题,从多方面进行了探讨。第四次协作的中心课题是:岩石层(圈)的现状、形成、演化和动力过程。重点研究大陆板内的地球物理现象,其中,板内地震居于重要地位;中国也参加了这次协作。

当前,研究主要集中在地球动力学这个问题上。在当前的国际合作中,地球动力学是指板块的动力学研究。但此词的含义并不限于此,也包括地球内部的物理过程和地球的空间运动。所以,除地球表层的动力学之外,还应有天文方面的地球动力问题,以及下地幔和地核的动力学问题。广义地讲,地球动力学几乎涉及全部的固体地球物理学。在当代文献中,广义和狭义的理解都存在。

应指出,地球动力学的研究在某种意义上是建立在地球各种物性结构的“静态”研究基础上。随着新的观测技术和计算技术的引入,以及资料的日益丰富,所得地球结构更加细致和更加全面。其中用地震反射技术所得的细结构(fine structure)和用全球标准台网所得的参考模型(Reference Earth Model),更引起人们的关注。1981年济旺斯基(A. M.

Dziewonski) 和安德森 (D. L. Anderson) 提出一个全球参考模型 PREM, 这个模型比布伦模型要大大前进一步, 它以参量形式给出 P 波和 S 波的速度分布, 并给出品质因数 Q 值分布, 以及地球的滞弹性和各向异性。

七、21 世纪的展望

人类社会正面临世纪之交的时代更迭, 从现在起到下个世纪的头一二十年, 将是人类社会发展史上的一个巨大变革时期。地球物理学经过了以活动论为内涵的板块构造和行星际探测双重革命的重大发展时期以后, 现在正处在一个新起点上。当前地球物理学学科研究的任务是: 资源勘查、生态环境保护、地质灾害预防和认识地球。其中认识地球是地球物理学的基本任务, 而前三者则是地球物理学的主要应用领域。

以我国经济建设, 尤其是资源勘探开发的进程为依托, 针对我国地理坐标特殊、地质-地球物理条件复杂、资源分布不平衡、综合国力有限、地质灾害频繁的现实, 在资源勘探、地震预测、中国大陆岩石层结构和演化等前沿研究作出开拓性工作。

在可预测的 5~10a 内, 地球物理学学科发展战略的总目标是: 开拓应用地球物理学的理论、方法, 以促进能源、资源开发技术的更新换代; 发展震源物理、地震预测的理论和方法, 为减轻地震等自然灾害服务; 开展环境地球物理研究, 为环境污染治理及保护生态环境作出贡献; 加强岩石层综合地球物理调查和实验地球物理研究, 建立中国大陆岩石层结构演化的定量模型。

第三节 研究方法

地球物理学虽然与其他学科有着密切联系, 但由于它们所研究的规律不同, 所以存在着“质”的区别; 地球物理学虽然包括许多分支, 内容复杂, 但由于所研究的现象都集中于地球一体, 所以各分支又存在着若干共同点。不同的学科有不同的规律, 因而有不同的研究方法。掌握一门学科的研究方法, 等于掌握了一把登堂入室的“金钥匙”。

一、地球物理反演计算的多解性

地球物理学以观测为基础, 有着多得惊人的地球物理观测资料。但是这些资料绝大部分是在地面或者局部得到的。如何得到深部和整体的某些地球物理规律呢? 一个重要方法, 就是反演计算。它属于计算地球物理学内容。

初次接触到地球物理问题, 例如, 由地震波记录得到的地震震源力学参数 (断裂长度等), 总感到不像由地表岩石和构造形迹等出露现象得出一些结论那么“踏实”。而初次接触到某些地球反演问题 (不包括地震波理论、地磁理论) 时, 对于这些问题的表述方式和研究方法, 总感到不那么“精确”。造成这些错觉的原因, 在很大程度上是与对地球物理学研究方法的特点不甚了解有关。固体地球物理学的观测条件, 远不如气象学和高空物理学。后者, 可以放气球、火箭和卫星, 直接获取资料。而对地球的深部, 目前只能钻取十几公里处的岩芯, 人们称之为“上天有路, 入地无门”。这种不可入性, 使我们失去直接进行验证的机会。

不可入, 不等于不可知。固体地球虽然难于入内, 但可以根据地面或者高空的观测资料 (如来自深部的地震波、电磁场、热流、重力场等), 推断地下的情况。这在地球物理学上叫反演或反问题 (inversion problem)。在各种地球物理场 (重、磁、电、热) 给出