

地球物理学概论

张少泉 编著



地震出版社

地球物理学概论

张少泉 编著

地震出版社

1987

内 容 简 介

地球物理学是近年来国内外研究进展十分迅速的学科。本书系统介绍了有关固体地球物理学的内容和研究方法,并尽可能介绍了我国地球物理工作的研究成果。

全书共分十三章:第一章引言,概略介绍地球物理学的研究对象、研究史略和研究方法;第二章至第五章,分别介绍地球起源、地球年龄、地球自转和地球形状等专题;第六章至第九章,重点介绍地球的速度分层、密度分层、电磁性质、热学性质以及它们的研究方法;第十章和第十一章,集中介绍实验地球物理学和计算地球物理学;第十二章和第十三章,扼要介绍地球物理学与地震预报研究和新地球观形成的关系。

本书叙述简明扼要,深入浅出,且取材广泛又具有一定代表性。同时,可以作为地震、地质、地理、天文等非地球物理专业学生的地球物理学教材;或者作为地球物理专业的学生,在分科学习地震学、地磁学、重力学、地热学等专业课之前的专业基础课教材。可供从事与地球物理学有关的科研人员和教学人员参考使用。

地球物理学概论

张少泉 编著

责任编辑:单心福

地震出版社 出版

北京复兴路63号

山东电子印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店 经售

850×1168 1/32 16印张 412千字

1986年6月第一版 1986年12月第一次印刷

印 数 0001—3000

统一书号:13180·354 定价:4.50元

序

六十年代以来，人们对于地球的认识有了很大改变，这要归功于地球物理学、地球化学和地质学的新成就。

在解决地球科学的许多问题中，不同学科的相互合作和相互渗透发挥了重要作用，从而使许多不是地球物理专业的地学工作者，越来越迫切地需要了解地球物理学的基础知识和研究内容。在这种情况下，地震出版社出版张少泉编写的《地球物理学概论》一书，无疑是十分及时的。我表示庆贺。

该书以深入浅出的方式，来阐述地球物理学中比较复杂的概念和原理，是一次很好的尝试。因此，这对于非地球物理专业的科技人员，如从事地质学、天体物理学、地球化学等学科的研究人员和教学人员，全面了解地球物理学内容，提供了方便条件。这为不同学科的相互交流，做了一件有益的工作。

该书在取材上，除了介绍传统的地球物理学内容（如重力、地磁、地震、地热等），还增加了实验地球物理学和计算地球物理学这两个重要内容，并且就地球的起源、年龄、形状和自转以及板块运动和地震预报等专题，从地球物理学角度作了概要介绍。因此，该书对于地球物理专业的科技人员，也有一定参考价值。

当然，有些问题，例如地球起源和地球演化这样复杂的问题，书中不可能叙述得很全面，读者需要从其他有关学科的著作中找到补充。

中国科学院学部委员 曾融生

1985年2月

前 言

现在,正处于地球科学迅速发展的时代。地球物理学的进展和它在地球科学中的作用,越来越引起人们的关注。

笔者曾在中国科学院研究生院为非地球物理专业的研究生(1981级至1985级)开设《地球物理学概论》课。本书就是在所用讲义的基础上,根据读者对象扩大为一般地球科学工作者的要求,经修改而成的。

本书在编写中,主要参考了傅承义主编的《地球物理学基础》、曾融生著的《固体地球物理学导论》和其它一些国内外专著(见第一章的参考文献〔2, 4, 9—13〕)。同时,还考虑到外专业读者实际需要,没有采取理论地球物理学教材或者应用地球物理教材的编写体例,而是有意将一些冗长繁复的数学推导加以简化、以至省略,并有意将一些技术细节删去,从而达到突出物理概念和物理图象的目的。这是一个尝试。希望这本书能在本专业与外专业之间,搭起一座“桥”,请外专业的同志能顺利地走过来,尽快地了解 and 掌握地球物理学的基本内容。

全书共分十三章。除第一章对整个学科的研究对象、研究方法和研究史略加以简要介绍外,以下十二章分为四个层次予以展开:

第一层次,包括第二章至第五章,介绍地球的整体特征,即从地球起源、地球年龄、地球自转和地球形状四个方面,给读者一个有关地球的完整的时空概念。

第二层次,包括第六章至第九章,介绍地球的各种物理性质及其研究方法。这些物理性质包括地震波速分布、物质密度分布、电磁性质和热学性质。获得这些物理性质的相应方法是地震方法、

重力方法、电磁方法和地热方法。

第三层次，包括第十章和第十一章，介绍地球物理学的两个重要研究手段，即模拟实验和模拟计算。这是地球物理学的两个重要分支，它们又可以称为实验地球物理学和计算地球物理学。这两项研究手段，与第二层次中的震、磁、重、热四种观测手段，互为补充，相辅相成。

第四层次，包括第十二章和第十三章，作为全书的两章应用篇，概略介绍地球物理学在地震预报研究和在新地球观形成中的重要作用。

本书在编写中，还考虑到在职职工的自学要求，为了使读者不必通读全书而直接查阅到所需的章节，因而，在内容编排上，各章既有一定联系，同时又相对独立，各自成篇。此外，本书根据1984年国务院发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，所有物理量都采用国际单位制(SI)。

在本书编写过程中，承蒙国家地震局地球物理研究所曾融生教授、陈运泰教授，北京大学地球物理系刘宝诚副教授和中国科学院研究生院地学教研室何铸文副教授的关心和指导，在此表示感谢。同时，要感谢在修改原稿的过程中，提出宝贵意见的朱传镇、时振梁、赵玉林、张以勤、焦文强、欧阳珽、华昌才、吴明熙等同志。宋志敏同志承担本书插图的清绘工作。

应当指出，由于笔者水平有限，书中定有不少错误和不足之处，同时，有些个人观点，更可能是管窥之见。希望读者和同行予以指正。

张少泉

1985年2月 北京

目 录

第一章 引言	(1)
第一节 研究对象	(1)
第二节 研究史略	(4)
第三节 研究方法	(12)
第四节 国内进展	(18)
第二章 地球的起源	(23)
第一节 历史回顾和主要进展	(23)
第二节 戴文赛的新星云假说	(29)
第三节 若干观测事实的解释	(36)
第四节 地球早期的演化轮廓	(42)
第三章 地球的年龄	(49)
第一节 历史回顾	(49)
第二节 放射性衰变原理	(54)
第三节 样品年龄的测定	(65)
第四节 地球年龄的估计	(75)
第四章 地球的自转	(83)
第一节 历史回顾和主要进展	(83)
第二节 地球自转速度的变化	(89)
第三节 自转轴在空间的运动	(96)
第四节 自转轴在地面的运动	(104)
第五章 地球的形 状	(116)
第一节 基本概念	(116)
第二节 马古拉公式和克莱罗方程	(120)
第三节 地球扁率的测定方法	(133)
第四节 地球形状的精确研究	(140)
第五节 固体潮汐和负荷潮汐	(144)
第六章 地球的速度分层及其研究方法	(156)
第一节 基本概念	(156)

第二节	确定速度分布的方法	(165)
第三节	计算密度和弹性参数的方法	(174)
第四节	全球速度结构的地震学研究	(180)
第五节	地壳速度结构的地震学研究	(190)
第七章	地球的电磁性质及其研究方法	(203)
第一节	历史回顾和基本概念	(203)
第二节	地球磁场的球谐分析	(210)
第三节	地球磁场的长期变化	(223)
第四节	地球磁场的成因解释	(230)
第五节	地球电性的研究方法	(235)
第八章	地球的密度分布及其研究方法	(248)
第一节	基本概念	(248)
第二节	重力均衡及均衡异常	(256)
第三节	重力测深的解释方法	(268)
第四节	重力的有效探测深度	(274)
第九章	地球的热学性质及其研究方法	(281)
第一节	热流测量和热流分布	(281)
第二节	热源分布和传热机制	(292)
第三节	地球温度分布	(306)
第四节	地球的热历史	(318)
第十章	实验地球物理学	(326)
第一节	相似性原理	(326)
第二节	地球介质的破裂实验研究	(336)
第三节	地震波的激发和传播实验	(344)
第四节	地球深部的对流实验研究	(351)
第五节	大尺度实验以及原地实验	(360)
第十一章	计算地球物理学	(369)
第一节	历史发展和主要研究领域	(369)
第二节	反演计算方法	(374)
第三节	模拟计算方法	(389)
第四节	数据处理系统	(402)

第十二章	地球物理学与地震预报研究	(410)
第一节	地震成因	(410)
第二节	震源机制	(420)
第三节	地震预报的物理基础	(433)
第四节	地震预报方法的探索	(440)
第十三章	地球物理学与新地球观形成	(452)
第一节	历史回顾	(452)
第二节	地震学证据	(457)
第三节	地磁学证据	(464)
第四节	重力学证据	(471)
第五节	地热学证据	(475)
第六节	评价、问题与展望	(481)
参考文献		(491)

第一章 引言

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，在本世纪六十年代以来，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。

为使读者对地球物理学有一个完整的认识，本章首先就地球物理学的研究对象、研究方法、研究史略等方面予以扼要介绍。

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，向人类提供粮食；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，象一道天然防线，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，象 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！大地有情亦无情，生生死死问苍穹。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，一口气提出一百七十二个问题。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，至今已逾两千年。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、决不随波逐流的精神，将给予后来者以深刻启示：“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。然而，地球物理学成为一门以物理学为基础的地球科学，则其产生的年代就更晚了。

依笔者管见，根据本章第二节将介绍的发展史略可知，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，是杰弗瑞斯（H.Jeffreys）的《地球及其起源、历史和物理状态》^[1]。该书自1924年第一版问世，至今已四次再版（1929年、1953年、1962年、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”^[2]。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，研究海洋运动规律的海洋物理学，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。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、非金属矿或其它地质体的，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、地球动力等新的十分活跃的分支。

图 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。图中，值得读者注意的是，作为地球物理学引伸的行星物理学和作为地球物理学一部分（地球上部）的岩石层物理学。

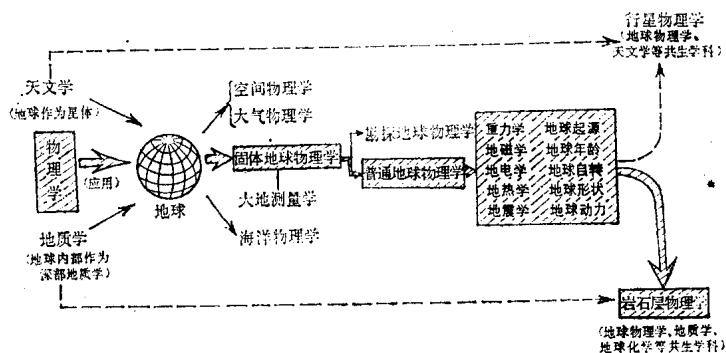


图1-1 地球物理学的形成和发展

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又受到挑战,需要加强深部的和海洋的地球物理研究。

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。特别是由于地震公害引起人们关注,更促进震源物理学和地震预报科学的崛起。

本书仅限于介绍固体地球物理学中的普通地球物理内容。以后书中凡提到地球物理学,均指此含义。

第二节 研究史略

地球物理学虽然在上个世纪末、本世纪初已成体系,但对地球物理现象的观察和探讨,从远古就开始了。我国东汉的张衡,是一位从事地震观测研究的地球物理学家。唐代的张遂(僧一行),是一位从事大地测量研究的地球物理学家。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,分六个时期加以介绍^[3]。

一、公元十四世纪以前的情况

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。

公元前六世纪,希腊人从亚那萨哥拉时代已把大地看成球体。公元前四世纪,阿里士多德(Artistotle)在他的名著《De

Caelo》中明确指出大地是球形，并且估计了地球的圆周值（请不要误解为圆周率。圆周值是指纬度变化 1° 所对应的地面长度）。在公元前三世纪，伊拉多生斯（Erato Sthenes）留下有名的估计圆周值的方法：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地球的圆周值。

公元前八世纪，我国唐代的天文学家张遂（僧一行）独立得出圆周值，其误差约小于20%。

公元前九世纪，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、牛顿时代欧洲的工作

与希腊、中国和阿拉伯相比，欧洲人的地球物理工作开始较迟，大概在环球航行证实大地是球形以后开始的。

公元1527年，菲涅尔（Fernel）在巴黎通过计算四轮马车车轮的旋转计算圆周值。1617年，斯涅尔（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，以确定圆周值。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，在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，对地球的研究基本上是静态的三角几何问题。牛顿提出的运动和万有引力定律，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：

1. 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。牛顿为分别取得 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、太阳和其它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:

“地球的整个质量,比假定它全是由水组成的地球要大五至六倍。”

2. 牛顿的第二大贡献 牛顿第一个估计了地球的扁率 ε 的数值。为了归算成数学模式,他把地球看成密度恒定的旋转流体,由此推导出 $\varepsilon = (a - b)/a = 1/230$, 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 ε 值应该进行修正。他认为,所得 $1/230$ 是 ε 的下限值。但应指出,牛顿在论证中犯了一个错误。他所得数值不是下限,而应是上限。无论如何,牛顿所得地球是扁球的推论是正确的。

牛顿关于地球是扁球的推论,后来被法国天文学所证实。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 $2.5s$,这与地球形状的赤道凸起有关。在这里引为教训的是,巴黎科学院的卡西尼(Cassinis)父子根据他们在法国的局部观测,坚持认为地球不是扁球(赤道凸起),而是长球(两极凸起)。使得牛顿的正确思想在几十年时间得不到承认,造成一个时期的混乱。

应该指出,在牛顿计算地球扁率之后几年,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 ε 值为 $1/577$ 。当时,人们试图从理论上和观测上解释牛顿所得 ε 为 $1/230$ 与惠更斯所得 ε 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 ε 值的上下限。

三、十八世纪的工作

在牛顿于1727年去世以后的一个相当长的时间内,绝大多数

的地球物理研究者为英国人和法国人。在英法之间展开了巨大的竞争，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。这种情况有点类似于今日苏联人和美国人在空间科学所展开的竞争。

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 。确定 GM 的数值，是牛顿发现的。现在有了 G ，则可以确定 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 M 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 5.5 g/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 ε 有关的重要公式，导出一个地球内部密度随扁度 ε 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(d'Alembert)、库伦(Coulomb)、拉格朗日(Lagrange)、拉普拉斯(Laplace)、勒让德(Legendre)、泊松(Poisson)和勾犀(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、十九世纪的工作

到十九世纪初，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 $\varepsilon = 1/297$, $I = Y \cdot MR^2$, $Y = 0.3335$ 。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 g/cm^3 而地表岩石密度仅 2.0 g/cm^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。这两个模式所给的密度值变动范围为: 地表处约为 3 g/cm^3 , 地心处约为 11 g/cm^3 。

十九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、二十世纪的工作

二十世纪,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两千多年的地震记载(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,文学家和科学家南阳人张衡,曾制造出世界上第一架地震仪——候风地动仪。

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)制成了一种操作简便的地震仪,并投入应用,使地震学走上定量阶段。地