

高等学校试用教材

地球物理学 导论

■ 王卫东 编著

DIQIU WULIXUE DAOLUN



陕西科学技术出版社

高等学校试用教材
长安大学出版基金资助

地球物理学导论

王卫东 编著

陕西科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

地球物理学导论/王卫东编著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2005. 6

ISBN 7-5369-3965-5

I. 地... II. 王... III. 地球物理学 IV. P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 059521 号

出版者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话(029)87211894 传真(029)87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社
电话(029)87212206 87260001

印刷 陕西航天通力彩印有限责任公司

规格 787mm×1092mm 16 开本

印张 12.5

字数 300 千字

印数 1-1000

版次 2005 年 8 月第 1 版
2005 年 8 月第 1 次印刷

定价 20.00 元

版权所有 翻印必究

(如有印装质量问题,请与我社发行部联系调换)

前 言

随着科学技术的发展,地学各学科之间的横向渗透已日益深入,地球物理学在地球科学领域里越来越引起人们的关注。我们在近年教学的基础上,编写了这本《地球物理学导论》教材,作为长安大学地球物理学专业的地球物理基础教程,也可作为地质专业和其他相关专业的教材。

本教材在编写中,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》、张少泉编著的《地球物理学概论》、滕吉文编著的《地球物理学概论》和其他一些国内外专著(见参考文献)。本书在编写过程中强调基础理论和基本概念的建立,尽量简化冗长的数学推导,使学生获得明晰的物理图像。

本教材根据现行教学大纲的要求适合 50~60 课时讲授,也可根据不同专业大纲要求对讲授内容进行调整。

本教材共分十章。第一章对整个学科的研究对象、研究历史、组成及与其他学科的关系、研究方法和特点加以简要介绍;第二章至第四章,介绍地球的整体特征,即地球起源与早期演化、地球的年龄、地球的转动;第五章至第九章,介绍地球的各种物理性质及其研究方法,包括地球的形状及重力场、地震波和地球内部构造、地震活动性和地震机制、地球的电磁场、地球热流与温度场。第十章作为地球物理学的应用,介绍了地球物理学在板块构造学说形成中的重要作用。

本教材是在长安大学教材出版基金的资助下编写完成的,在编写过程中,谢家树研究员、王万银副教授、李貅副教授对本书提出了宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于本教材涉及的内容十分广泛,书中难免有错误和不足之处,恳请读者予以指正。

编 者

2005 年 3 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 地球物理学的研究对象	(1)
第二节 地球物理学的起源与发展	(2)
第三节 地球物理学的组成及其与其他学科的关系	(8)
第四节 地球物理学的研究方法和特点	(9)
第二章 地球的起源与早期演化	(17)
第一节 行星形成的理论	(17)
第二节 新星云假说	(20)
第三节 新星云假说对某些观测事实的解释	(25)
第四节 地球的早期演化	(28)
第三章 地球的年龄	(33)
第一节 放射性未发现前的年龄估计	(33)
第二节 放射性元素和放射性测年原理	(35)
第三节 地球的年龄	(43)
第四节 地质年代划分与地质年表	(45)
第四章 地球的转动	(47)
第一节 天球坐标系	(47)
第二节 地球在空间的运动状态	(49)
第三节 地球自转轴在空间的运动	(59)
第四节 地球自转轴在地面的运动	(63)
第五章 地球的形状及重力场	(69)
第一节 地球的形状	(70)
第二节 地球的重力位	(72)
第三节 地球扁率的测定和地球形状的研究	(75)
第四节 地球重力场的基本特征	(79)
第五节 重力校正与重力异常	(82)
第六节 重力均衡和均衡异常	(86)
第七节 固体潮	(88)
第八节 重力测量及应用	(91)

第六章 地震波和地球内部构造	(95)
第一节 地震波及传播基本规律	(95)
第二节 地球内部地震波速度和其他地球物理参数的计算	(103)
第三节 地球内部结构	(109)
第七章 地震活动性和地震机制	(113)
第一节 地震活动性	(113)
第二节 地震机制	(117)
第三节 地震预报	(121)
第八章 地球的电磁场	(127)
第一节 地磁场的构成与特点	(127)
第二节 地磁场的高斯理论	(129)
第三节 地球主磁场与国际地磁参考场	(133)
第四节 地心偶极子场	(137)
第五节 地球主磁场的变化与成因	(139)
第六节 古地磁学简介	(144)
第七节 地球电场及电性分布	(153)
第九章 地球热流与温度场	(161)
第一节 地球内部的热源	(161)
第二节 地球内部热的传输	(164)
第三节 地面热流	(167)
第四节 地球内部温度分布	(174)
第十章 新地球观的形成与地球物理学的发展	(179)
第一节 大陆漂移	(179)
第二节 海底扩张	(183)
第三节 板块构造	(185)
第四节 地球物理学的进展与展望	(189)
附录 A 球面三角定理	(191)
附录 B 行星参数	(191)
附录 C 地球物理学常用参数及相关资料	(192)
参考文献	(193)

第一章 绪 论

地球物理学是以地球为研究对象的一门应用物理学。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，寻求其变化规律，就构成了地球物理学的内容。地球物理学的主体是固体地球物理学，这门学科自 20 世纪初就已自成体系。到了 20 世纪 60 年代以后，发展极为迅速。固体地球物理学包含许多分支学科，涉及海、陆、空三域，是天文、物理、力学、数学、计算数学、化学和地质学之间的一门边缘科学。它在地球科学领域里占有极为重要的地位。将地球作为一个天体来研究，这便确定了固体地球物理学和天体物理学之间的关系；在研究地球本身的结构和发展时，固体地球物理学又和地质学及地球化学有着很密切的联系。

为了人们对固体地球物理学有一个比较完整的认识，在这一章里首先对固体地球物理学研究的对象、起源与发展、研究方法与特点、与其他学科的关系等方面作一简要阐述。

第一节 地球物理学的研究对象

一、地球与人类

地球是人类的母亲。她是人类社会与经济生活的源泉。我们世代代在她的怀抱里生活和成长，然而我们对地球的本体却了解甚少。为了对地球，特别是对地球内部物质运移、组成、结构、深层过程与动力学机制有一个比较全面的了解，我们就必须“钻”进地球深处去探索其奥秘，为人类进步与可持续发展作出贡献（滕吉文，2003）。

地球上的各种物理条件与人类生存、生活和生产活动密切相关。地球表层的沉积沃土，向人类提供粮食；地下的石油、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，保护着人类的安全。

然而，地球在给人类以恩惠的同时，也给人类带来种种灾难，地震的发生、火山的喷发均来自地球深部。一次火山熔流，使意大利一座古城化为灰烬；台风扫过，使智利沿海村镇荡然无存；我国云南禄劝的一次山体滑坡毁灭了几个村镇；1976 年 7 月 28 日发生在我国唐山的 7.8 级地震，不过几秒钟，就使 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，在与自然的不断斗争中，人类总是以智慧和勇气不断取得进步。我国伟大的爱国诗人屈原留下千古不朽的名篇《天问》。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，将给后来者以深刻启示。

二、地球物理学的研究应面向全球

由于地球很大，其内部的结构与物理状态又十分复杂。地球深部地球物理研究与发展涉及不少全球性和规律性的科学问题，因而在这个领域里国际协作和交流与日俱增。在地球内部的研究方面，国际会议之繁忙，讨论问题之广泛，也是空前的。中国是国际岩石圈委员会的成员国，并参加了第四次国际协作计划（ILP）。我国于1977年开始参加了国际大地测量与地球物理协会（IUGG），它下面设有七个分会，四年一次全会，两年一次分会。从历次IUGG大会来看，国际间协作发展很快，提出了不少新的问题，例如地球整体行为的研究与参数测定，岩石圈结构及演化，地球表层系统动力学中的大气圈—水圈—岩石圈—生物圈耦合及其正负反馈过程中的物理、化学与生物过程和生物的地球化学循环；又如地球物理与环境，地球介质与构造的横向不均匀性和各向异性以及大陆动力学等。

如今，自从地球动力学计划以来，一系列的国际合作中都在进行着地壳与上地幔物理的研究和探索（包括海洋与大陆）。并进行着广泛的国际间的科学交流。在我国东南海域、美国以及韩国、日本等国均进行了大量的重、磁、地热和地震等项测量。此外，海洋地壳与上地幔的研究，还涉及大陆自由延伸和国家海域边界的划分等问题。为此，我们一方面要迅速发展这一领域的研究，另一方面则必须采取广泛国际合作，利用外资与先进技术进行我国陆、海地区的地球物理研究。

国际协作与交往是地球物理学发展的自然趋势。例如，50多个国家参加、1960—1970年的国际上地幔计划（IUP）的重要成果，就是提出了板块构造学说，这在地球科学中是一个完全崭新的概念，它对地球科学产生了极其深远的影响。但是，这些研究工作都是在海洋地区和海洋与大陆交界地带进行的。因此在这个特殊的大陆——板内构造运动的研究与探索就历史地落在中国地球物理科学工作者的肩上了。继国际上地幔计划以来，地球动力学计划，岩石圈计划，全球地学大断面计划和大陆动力学计划等，我国地球物理学家均作出了卓越的贡献。同时，也必须承认，世界各国的地球物理学家们做出了许多富有创见的新成果。对中国地球深部的研究，国际上不仅普遍有着极大的兴趣，而且在不断深化。为此，竞争是必然的。然而历史在前进，科学在进步，国际协作与交流使地球物理的研究从特殊的区域出发，取得全球性的概念。向地球的整体、深部、海洋和宇宙空间挺进，已是地球物理学研究和发展的大趋势。

第二节 地球物理学的起源与发展

人类在长期的生活和生产活动中，逐渐产生了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、海洋学和空间物理学等。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200a。而地球物理学成为一门以物理学为基础的地球科学，则产生的年代就更晚了，大体在19世纪末、20世纪初，

地球物理学已初具规模并自成体系。若以杰弗瑞斯 (H. Jeffreys) 的《地球及其起源、历史和物理状态》在 1924 年第一版问世作为标志, 地球物理学的产生仅 80a。因此, 地球物理学在地球科学中是一门很年轻的学科。

地球物理学于 19 世纪末、20 世纪初已初具规模, 并自成体系, 可是对地球物理现象的观察和探索却始于远古时期。我国东汉时期的张衡就是一位杰出的从事地震研究的地球物理学家, 并发明了候风地动仪。我国唐朝的僧一行 (张遂) 是一位从事大地测量研究的地球物理学家。可以这样说, 现代物理学的进程, 是从研究地球物理学开始的。由于研究地球和月球的运动, 牛顿才发现了万有引力定律, 牛顿以后的许多数学家和物理学家均通过对地球物理问题的研究而取得了重要成就。

为此, 学习与了解和认识地球物理学的发展历史, 不仅可以更好地掌握该领域的科学真谛并得到启迪, 更重要的是通过其发展, 研究和分析其起伏进程, 生产实践的需求, 科学发展的背景与条件, 并预测其发展动向。张少泉教授等基于学科发展的阶段性和时代背景, 按照科学本身发展的规律大体上将其划分为六个时期, 并进行了系统阐述 (张少泉, 1987)。

一、公元 14 世纪以前的地球物理学

地球物理学的产生和发展与人们要确定地球的形状和大小密切相关。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, 亚里士多德 (Aristotle) 在他的名著《De Caelo》中明确指出大地是球形, 并且估计了地球的圆周值 (圆周值是指纬度变化 1° 所对应的地面长度)。在公元前 3 世纪, 伊拉多生斯 (Eratosthenes) 提出了著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 $1/50$, 并测量了这两处的地面距离, 最后由这两个数值计算出地球的圆周值。

公元 8 世纪, 我国唐代的天文学家张遂独立得出的圆周值, 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, 并得出纬度改变 1° 时的地面长度约为 90 km 的结果。该值虽然偏差很大, 但却表明地面为球面的观念已经萌生。

二、牛顿时代欧洲的地球物理学

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了大地是球形以后才开始。公元 1527 年, 菲涅尔 (Fernel) 在巴黎通过计算四轮马车车轮的旋转来计算圆周值。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, 法国人皮卡德 (Picard) 用望远镜测量角度, 所得圆周值的误差达到 0.1 %。

随着圆周值测定的发展, 地球扁率、地球旋转的效应也随着大地测量精度的提高而开始呈现。应当看到牛顿的贡献是很杰出的。在牛顿以前, 对地球的研究基本上是以静态的三角几何为基础, 牛顿提出的物质运动和万有引力定律, 给地球形态和构造的动力学研究奠定了理论基础。从这个意义上讲, 牛顿应被认为是理论地球物理学的先驱。归纳起来,

牛顿对地球物理学有以下两大贡献：

1) 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重力公式 $g = GM/R^2$ ，其中 g 为重力加速度测量值， G 为万有引力常数， M 为地球质量， R 为地球半径。基于 g 和 R 值为已知，则可求得 GM 值。牛顿为了分别求得 G 值和 M 值，提出了一系列的实验原则和方法，这些方法已为后人所采用。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，但他对地球、太阳和其他行星的平均密度比值，做出了天才的估计。当时，牛顿提出的著名推断为：“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。”

2) 牛顿第一个估计了地球的扁率 ϵ 值。他把地球看成为密度恒定的旋转流体，由此推导出 $\epsilon = (a - b)/a = 1/230$ ， 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，并认为 $1/230$ 是 ϵ 的下限值。但应指出，牛顿在论证中犯了一个错误，他得到的 ϵ 值不是下限，而是上限。无论如何应当十分清晰地认识到，牛顿对地球是扁球的推论是完全正确的。

这一推论后来为法国天文学家所证实，他们发现：在巴黎能给出准确时间的摆钟，当放在赤道附近时却慢了 2.5 s，这与地球形状在赤道附近凸起有关。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)。为此，使得牛顿的正确思想在几十年时间里得不到公认，造成了一个时期内对地球形状概念上的混乱。

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，却得到 ϵ 值为 $1/577$ 。当时，人们试图从理论上和观测上来解释牛顿所得 ϵ 为 $1/230$ 与惠更斯所得 ϵ 为 $1/577$ 之间的差异，但没有得到什么结果。然而，他们两人所给出的两个 ϵ 数值，可作为真实 ϵ 值的上下限。

三、18 世纪地球物理学的进展

1727 年牛顿去世，在这以后的一个相当长的时间内，绝大多数从事地球物理学研究的科学家都是英国人和法国人。这两国之间在该领域的研究中展开了激烈的竞争，结果使得这两个国家的地球物理研究工作均取得了极其光辉的成就。

英国的约翰·米歇尔 (John Michell) 设计了一套仪器，可以在实验室内测定两个物体之间的引力，以确定常数 G 。牛顿当时只发现了对 GM 值的确定，现在有了 G 值，则可以确定 M 值。可惜的是，米歇尔只是设计和安装了这套仪器，并未得到最后的测定结果就逝世了。他的学生卡文迪什 (Cavendish) 代替他进行这一实验，并于 1798 年对 G 值进行了成功的测定，从而得到了准确的 M 值。由公式 $\rho = M/V$ (V 为地球体积)，计算出地球的平均密度 ρ 为 5.5 g/cm^3 ，证实了牛顿的早期推断。

法国约于 1736 年对拉普兰和秘鲁进行了一次成功的探测，参加者包括克莱罗 (Clairaut) 和布格 (Bouguer)。由于两地相隔纬度为 60° ，通过测量足以得出地球是扁球的结论，他们的工作第一次提供了这一结论成立的证据。在观测中，布格开创了重力测量学，从而奠定了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 的重要公式，并导出一个地球内部密度随扁度 ϵ 变化的二阶微分方程。在那以后的一个半世纪里，许多地球物理学问题的研究都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）和柯西（Cauchy）等。他们把数学与物理学有机地结合起来用以解释地球现象，从而使这门科学不断发展，并使之建立在严格的数学与物理学的基础之上。

四、19世纪地球物理学的进展

19世纪初叶，引力理论已经以精炼的数学形式表征，并在旋转地球的大量问题中得以应用，求得的地球质量精度在1%以内，地表的扁率测定已精确到百分之几以内。

在这一世纪里，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，得到了地球的转动惯量（或惯性矩） I 。1855年法国人勒道（Radau）引入特殊函数，使得确定转动惯量 I 成为可能。通过计算给出 $\epsilon = 1/297$ ， $I = Y \cdot MR^2$ ， $Y = 0.3335$ 。对于一个常密度的球体而言， $Y = 0.4$ 。既然所得 Y 值比 0.4 小，表明地球内部一定存在一个可观的高密度内心。从卡文迪什实验得知，地球的平均密度为 5.5 g/cm^3 ，而地表岩石的平均密度仅 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。为此，从转动惯量 I 和密度 ρ 同时得出地球内部为密度大或质量集中物质的结论，这便为研究地球内部的密度分布提供了一个重要的边界值。在当时提出了两个关于地球内部密度分布的数学模式，这两个模式所给出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 。

19世纪时许多科学家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20世纪，地震学研究迅速发展，并通过震相分析得到了地球内部的分层结构后，才从根本上解决了地球内部的密度分布问题。

五、20世纪地球物理学进展

一门科学必须在概念或技术上有一定的突破才能得到优先发展。20世纪初叶在物理学领域里接连出现了许多引人注目的新发现。应当说20世纪是地震学得到广泛应用的时期，地球内部的力学性质亦逐渐被揭示。

地震是人们早已注视的灾害。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）。李善邦先生于1956年主编了我国第一部《中国古地震目录》。在地震观测仪器方面，东汉地球物理学家张衡曾制造出世界上第一架地震仪——候风地动仪，他的这一地震仪的设计原理和指导思想，至今还为广大地震仪器设计者所应用。

1755年里斯本地震发生之后，欧洲的地震工作才冲破了神学和官方的桎梏，真正科学地开展起来。约翰·米尔恩（John Milne）制作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，引起了人们的重视。1830年泊松虽然从理论上给出地震波（包括 P 波和 S 波）的概念和两种波传播速度的表达式，但还没有证实它们的存在。直到1897年，英国人奥尔德姆（Oldham）首先在地震图上识别出 P 波和 S 波，这才提供了第一个证实地球可以采用完全弹性模型近似的证据。从此开始了用地震波研究地球内部分层结构的历史。

1906年，奥尔德姆从地震记录的震相研究中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，原南斯拉夫地震学家莫霍洛维契（A. Mohorovicic）在研究阿尔卑斯地区的近震时，发现在巴尔干地区地表以下数十公里处的P波和S波速度由6.3 km/s急剧增加到7.9 km/s，这是一个速度急剧变化的一级间断面。为了纪念他，称其为莫霍（Moho）界面。后来世界各地许多人做了大量工作，表明这个界面是全球性的，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2900 km。

1936年，丹麦人莱曼（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，现在分别称为内核与外核。

1946-1950年，澳大利亚人布伦（K. E. Bullen）根据地震学分析，特别是S波与P波的传播特征，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。

以上仅从这一学科领域发展的沿革出发，概略地阐述了基于地震学研究得到有关地球内部结构的发展过程。当然，依据地球内部的速度分布还可以得到地球内部更多的信息。

1923年，美国人威廉逊（Williamson）和亚当斯（Adams）用 $K/\rho = \alpha^2 - 4\beta^2/3$ 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。但这一结果只适用于地幔的上部。

1940年，杰弗瑞斯和布伦经过多次试验给出了一个地震走时表，即著名的J-B走时表。由这一走时表可以得到P波和S波速度随深度的变化，进而得到 K/ρ 和 μ/ρ 随深度的变化， ρ 、 K 、 μ 分别为密度、体变模量和切变模量。然后，在一定的假设条件下进一步确定了弹性状态、压力和重力加速度。由此得出，地幔底部的密度为 5.5 g/cm^3 ，地心的密度不超过 13 g/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 m/s^2 ，地心的重力加速度为0，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 $3 \times 10^{11} \text{ Pa}$ ，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，与当时给出的某些假定条件及分辨程度有关。

六、第二次大战以后地球物理学的进展

在第二次大战期间，由于军事科学的发展，科学技术也迅速发展。在第二次大战结束以后，基于军事需要（如地下核爆炸的侦察、人造地球卫星轨道的控制）和经济建设的发展（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要求，在客观上为地球物理学的发展提供了十分有利的人力和物力条件。地震学的研究在这一时期发展是非常快的，在全球范围内布设了许多地震观测台站，增加了许多新的观测资料；如地震台阵记录、长周期地震面波和地球自由振荡记录、长剖面人工源地震探测剖面等，进一步完善了地球的详细分层模型，并且发现地球内部结构存在横向变化。

近几十年来，国际上连续组织了四次全球大协作计划，每次均有50多个国家参加，使地球物理学获得了空前的巨大进展，在地球物理研究的广度和深度上，远远超过以往的

任何年代。这四次大协作计划是：

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年的国际岩石圈计划 (International Lithosphere Program, 简称 ILP)。

1990年至今, 国际上的计划频出, 如地学大断面计划 (Global Geoscience Transect Project, 即 GGT)、大陆动力学计划 (Continental Geodynamics Project) 等等。

这四次国际间大协作计划的实施, 在地球物理学乃至整个地球科学界产生了深刻影响。第一次协作计划完成后, 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, 为全球性或局部地区的大规模研究提供了基础资料。第二次大协作计划主体为研究上地幔。地球物理学发展到这一时期, 人们逐渐认识到许多地学现象, 特别是地下资源分布问题, 若不研究地壳深处以至地幔上部是不能得到圆满解释的。由于问题是全球性的, 所以在20世纪60年代初, 国际间组织了一个有50多个国家参加的“上地幔计划”, 主要研究内容包括: ①全球性的地壳断裂系统; ②大陆边缘地带及岛弧的构造; ③地幔的物质组成及地球化学过程; ④地壳与地幔的结构及其横向不均匀性。所用的手段包括: 地震、地磁、古地磁、重力、海上地球物理测量、地热、地质、深钻等。计划延续了约10a, 其重要成果之一就是提出了一个“板块大地构造假说”。这个假说是根据多年积累的大量观测资料提出来的, 这个假说的出现是地学发展史上的一个里程碑, 也可谓地学发展动态观念上的一次革命。它的意义之重大、影响之深远可以与近代科学的任何重大发现相媲美。板块假说认为地球最上层(岩石圈)是由几个大的板块所组成的。这些板块不是固定不动的, 而是相对地运动着。地球上各种大地构造活动就是这些大板块互相作用的结果。这个假说是1967年才提出来的, 时间不久, 也还远远不够完善。它来源于实践, 还需要经过更多的实践来检验和修正。

国际上地幔计划到1970年就结束了, 但问题并未结束。板块构造是一个新的概念, 它虽然可以解释许多地学现象, 但也存在不少缺陷和困难, 需要补充和改进。例如, 板块的边界大部分在海洋, 关于这部分边界的情况研究得比较多, 但在大陆上的情况就研究得比较少。板块运动的动力来源还没有一致公认的解释。板块的活动除在其边缘外, 在其内部也有很多构造现象的呈现, 而这种活动对地震成因和矿产富集都极为重要。还有一系列的问题都是上地幔计划期间尚来不及解决的。针对这种情况, 国际间又组织了一个“地球动力学计划”作为以前计划的继续, 也约有50个左右的国家参加, 期限为1974-1980年。很显然, 这个计划和板块构造假说是密切相关的, 其主要目的之一是要解决这个假说所遗留下来的问题, 特别是板块运动的驱动力问题。20a过去了, 关于动力机制的问题并未得到解决。显然, 地球动力学计划的提出并不意味着地壳上地幔研究的终结, 它只是地球物理长远协作计划的一个阶段。第四次大协作计划, 即20世纪80年代的岩石圈研究计划, 其中心课题是岩石圈的现状、形成、演化和动力学, 重点在于研究各大陆和陆缘, 也包括洋底岩石圈的进一步探索。在以上这些全球性地球物理学研究计划的实施进程中, 还应当指出, 20世纪60年代推动地球物理学研究发展的另一重要事件是利用地震方法监视地下核爆炸的问题。为了提高这个方法的水平, 美国拟定了“维拉-U计划”。这个计划

除了要改进美国国内的地震观测系统外，还在全球建立了一系列标准地震台网。“维拉—U计划”的出发点是要通过提高固体地球物理学的全面水平来找到监视地下核爆炸的可靠方法，所以这个计划中的研究项目是极其广泛的，不但有地震学，而且也涉及到地球物理学的许多其他领域。这个计划对推动地球物理学的发展起到了积极的作用。

地震学是固体地球物理学的一个重要分支。原来的目的是为了研究和防御自然灾害，但后来却主要沿着地震波物理学这个方向大大发展起来，而对于天然地震本身的研究反而进展不大。到了20世纪60年代，情况才有了很大的变化。我国在1971年成立了国家地震局，专门进行地震预测和预防方面的研究。但地震不是一个孤立的现象，它和许多其他的地学现象，特别是其他的地球物理现象有着内在的联系。脱离了一般的地球物理背景而去单独地解决地震预报问题是不可能的。地球物理工作者也必须将地震预测问题作为自己的科学问题来探讨。20世纪90年代以来，通过全球地学大断面的研究，对全球构造系统及其相互关系进行了一次综合性的研究，使得对全球地学对比研究有了一个良好的开端。

当前在国际上的研究，主要集中在地球动力学研究这个主题上。它的内涵包括地球内部的物理过程、化学演化和地球的空间运动。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学问题，以及下地幔和地核的动力学问题。实际上，地球动力学几乎涉及全部的地球物理学。

应当指出，地球动力学的研究在某种意义上讲是建立在地球各种物性结构的“静态”研究基础上的。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，所得地球内部，特别是岩石圈结构更加细致、更加全面。用人工源地震宽角反射和折射及与近垂直地震反射技术的联合应用及其所得到的精细结构和用全球标准台网资料所得到的参考模型(Reference Earth Model)等，更引起人们的关注。1981年，杰旺斯基(A. M. Dziewonski)和安德森(D. L. Anderson)提出了一个PREM全球参考模型。这个模型比布伦模型大大前进一步，它以参量形式给出P波和S波的速度分布，并给出品质因子Q值分布，以及地球的滞弹性和各向异性。

第三节 地球物理学的组成及其与其他学科的关系

一、地球物理学的分类

固体地球物理学的研究，在地球科学领域里起着重要作用，特别是在现代地球科学发展与深化研究中，地球物理学的研究则更为突出。它的研究内容在总体上可以分为两大类：

第一类：主体是研究大、中尺度和深化对地球本体认识的理论与方法，如研究地球起源，内部圈层，地球年龄，地球自转与形状，海陆耦合，地气耦合，地球深部物质与能量的交换和深层动力过程。通常称为普通地球物理学（亦称地球物理学）。

第二类：主体是研究小尺度或极小尺度地质体为对象的应用科学，如研究石油与天然气，金属与非金属矿床，地上与地下工程建设及地基稳定性等。通常称为勘探地球物理学（或称地球物理探矿）。

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。

二、地球物理学与其他学科的关系

固体地球物理学领域宽广, 它是以现代物理学, 力学和数学为基础, 其观测技术方向必须以现代电子学、计算技术、空间观测等高科技成就的应用为先导, 同时它又必然涉及大陆与海洋及空间科学的发展和相互作用。由于它是用物理的方法解决或解释地学问题, 故又与地质构造, 地球化学有着密切的关系。在地球的运动和内部物质的迁移中, 大气物理、空间物理、天文物理和海洋物理学均对地球科学的发展有着重要的影响。

固体地球物理学研究中的地面观测数据, 一部分来自地质调查, 所以地球物理工作者必须能正确理解地质学的语言。地球内部物质所处的温、压环境与地面物质不同。在短暂力的作用下, 它基本上是弹性的, 在长期力的作用下, 它又可以发生流动。所以弹性力学和流变力学的知识对于地球内部物理现象的研究是需要的。地球物理现象的研究不仅涉及力学问题, 而且也涉及所有其他物理部门和某些化学部门。

人们在解决地球物理的理论问题时, 不能忽视空间和时间的条件(即数学上所谓的边值问题和初值问题)。任何地球内部结构、构造或地球演化的假说都必须使其所得到的结论与现今所观测到的地球本体相符合; 即是说: 现在的地球状态为地球演化假说提供一个时间条件, 地面观测则为地球内部物理过程提供一个边界条件。这些条件虽不能确定一个假说, 但却可大大限制一些无边际的幻想。

地球物理学在某些研究领域内和地质学是有密切关系的, 但并不相同。地质学是利用地面上直接观测到的数据来对地下浅层构造、变化过程和资源情况作出推断。百余年来, 地质学对人类的经济生活所起的作用是很大的, 并将起重要的作用, 但人类对地下能直接观测的范围究竟有限(最深的油井不过9 km左右), 而出露的矿床也越来越少。地下情况在地面上没有直接的显示时, 传统的地质方法就很难奏效, 必须借助于物理的方法, 如利用地震波、放射性或各种物理场(电、磁、重、热)。但物理方法所给的数据是间接性质的, 还必须对它们作理论解释才能换成地质构造或矿藏, 而这种解释时常是不够肯定的。间接数据比不上直接数据那样明确, 但是没有什么可以选择的, 不能不用, 因为能直接观测的范围太小了。由地面上的物理观测来推导地下的情况, 在地球物理学上叫做反演问题。反演问题的答案一般是不单一的, 但通过多种观测可以将这种不确定性缩小。可以想见, 反演问题是地球物理学中一个核心的理论问题。

第四节 地球物理学的研究方法和特点

地球物理学在本质上是一门观测的科学, 以观测为基础。这是因为“可靠信息与信息量的缺乏, 是任何数学技巧所无法弥补的”(滕吉文, 2003)。为此, 在地震波场、重力场、磁力场、电磁场、温度场以及地球自由振荡的观测中, 首先要取得可靠的、大量的有效信息。

一、地球物理学中的模拟实验

地球内部的介质、结构和物理、力学性质错综复杂。地球深部状态和过程, 目前尚无

法进行直接观测，为此除对地面的观测资料采用数值计算进行反演外，另一个重要途径就是进行实验室或野外大尺度的模拟实验。

1. 相似性原理

实验地球物理学，比一般的实验科学难度更大。因为这里要进行实验或模拟的对象是地球，它不仅尺度大、时间长，而且很多变化规律还没有掌握。实验方法不同于野外直接进行观测的地震、电磁、重力和地热等方法，它不仅要遵从物理定律，而且要遵守实验工作的基本理论——相似性原理。

相似理论已广泛用于物理研究和许多工程领域，用来研究复杂的巨大客体与简单的有限的样品之间存在的矛盾。相似理论是指导实验和处理实验数据的有效方法。尤其在地球物理的实验研究中，涉及弹性力学、流体力学、破裂力学、电学、磁学、热学等问题，无论从时间的长短和空间的大小，都存在着地球与样品之间的巨大差异。地球现象如何抽象或提炼成实验室内的某种过程，实验结果又如何推广用来解释地球物理问题，都需要借助于相似性原理。

关于相似的概念，最初产生于几何学中，以后又推广到物理学和其他学科之中。两个几何上相似的图形或物体，其对应部分的比值，必等于同一个常数，这就是几何相似。例如相似三角形对应边的比值为常数，称为相似常数。相似常数的意义在于：若以三角形 A 为标准，它的任意边长乘以相似常数，则得到与之相似的三角形 B 的对应边长。

上述有关几何相似的概念可以推广到物理现象中。在进行着物理过程的两个系统中，若两个系统的几何相似（包括形状相似、路径相似），且各个对应点或对应段的各个物理量也互成常数比例，则这种现象称为物理相似。两个相似系统在各对应点上的物理量的比值为常数，称为关于此物理量的相似常数。这个物理量，可以是力、速度、温度、压力、磁场强度、磁导率、体变模量、切变模量等。根据现象特点，又可分为力学相似、热力学相似、电相似、磁相似、破裂相似、震源相似等。力学相似，又可分为运动学相似和动力学相似。

因为任何物理过程总是随时间而发展的。因此，两个现象相似也应包括时间上的相似。所谓时间相似，就是指在两个几何相似的系统中，其对应点或对应部分沿着相似的路径运动，而且在成一定比例关系的时间间隔内，所通过的几何路径相同。这里的时间间隔比例，也等于同一数值（时间相似常数）。应当指出，这里所说的相似“路径”，不应狭义地理解为几何路径，而应该广义地理解为某一物理量随时间的变化过程（如加卸载过程）。

任何一个物理过程，总是在一定时间和空间里进行的，因此时间和空间的相似性是必要条件。作为一个物理过程的进行，还与初始条件、边界条件有关。例如，为模拟地球的热历史，必须保证地球形成时的温度分布与实验开始时的温度分布相似，以及地心温度和样品中心温度的相似。包括初始条件和边界条件在内的时间、空间和物理量的相似，总称为广义相似。

在研究地球物理问题时，应用相似理论必须十分小心。因为地球具有高温（ $10^3 \sim 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ）、高压（ $10^{11} \sim 10^{12} \text{ Pa}$ ）的特点，实验时尽管创造了一定范围内的高温高压条件，但毕竟尚未达到实际地球的温压条件。此外，样品与地球介质的物质成分也很难满足相似性。条件不同、物质不同，其物理规律有可能不同。这样就可能从根本上动摇了相似原理的应用基础，即相似系统遵从相同的物理规律。对这一点，必须有足够的思想准备。

从严格的相似性原理来说,要保证实验与其所模拟的实际完全相似,有时是困难的,甚至是相互矛盾的。对于一个实际过程而言,常常是一两个主要因素在起作用,在进行模拟实验时,若能保证这些主要因素的相似性,即可基本达到实验要求。

2. 物理模拟实验

对于地球内部的属性和分层结构,边界效应和深层动力过程,可以通过常温常压下和在一定的温度和压力条件下的地震波传播、岩石的破裂和黏滑、应力场变化,地震波在固体与液体介质中传播的波场效应实验,并在相似理论指导下得到某些仿真结果,然后推广到逼近于真实情况条件下的应用。对于地球深部地幔对流、深源地震的激发、地核发电机等,由于实际过程发生在地球深处,需要几千度的高温和量级 $10^9 \sim 10^{11}$ Pa 的高压条件才能进行近似模拟。

事实表明,由模拟实验所得结论,对于解释一些观察现象和观测数据,建立新观点是有参考意义的。例如,围压下的岩石破裂实验对解释地震发生过程,高温高压下黏滞体流动的热对流实验对形成地幔对流观点是十分有益的。在地震波动的绕射波场研究中,通过固体—固体,或固体—液体的成层结构和错断的物理模拟,可以给出在低速层,高速夹层,直角断层(正断层),锐角断层(逆断层)和钝角断层的不同波场效应和分辨标志,这一结果对于在构造活动和复杂地区观测资料的分析 and 解释,以及断层类型的识别有着极为重要的作用。超声波实验、大尺度和原地实验(包括水压致裂、注水引震和大陆超深钻)也是地球物理实验的重要组成部分。

3. 数值(数字)模拟

数值模拟,就是采用计算机进行模拟计算。这是一种与实验室物理模拟完全独立的试验方法。它以计算机为数学实验室,广泛利用各种数学方法,对地球物理现象进行定量研究。随着电子计算机的快速发展与在地球物理学领域中的广泛应用,对地球内部不同构造、物质属性、力学状态及其深层过程的数值模拟,在现代地球物理学领域中占有重要地位。因为它可以将理论模型设计得比较复杂,考虑的影响因素也可以比较周密。例如板块俯冲过程和地幔对流过程,区域构造应力场的特征,地震的孕育、发生和发展的深部介质和构造环境等数值模拟计算等。可以为人们对观测资料的认识、解释及综合研究提供概念性的要素。

基于数值模拟可以随意改变参量,并可进行人机联作,故对地球物理现象和计算结果的地质解释提供了一个极为重要的场所和途径。当今利用有限元、边界元和流变数值模拟等方法对大陆动力学的研究及在综合研究条件下的动力学模型的建立均是十分重要的。

要把模拟计算结果放到实际过程中,尤其是将一些计算出来的“引深”物理量和物理现象,与实际资料相比较,若发现有不符合之处,则应全面分析原因,就模拟系统、数学模型和计算方法,进行逐个检查。若忽视物理前提、片面追求数学完美,是不可取的。钱伯林(Chamberlin)在1899年指出:“数学分析的严密性给人以深刻的印象,产生一种精确而细致的感觉。不过,不要让这种感觉蒙住眼睛,以致看不到制约整个计算过程的前提上的缺陷。可以这样说,建立在不可靠的前提上的苦心完成的数学分析过程,恐怕比任何别的欺骗手段都更为隐蔽和更为危险。”