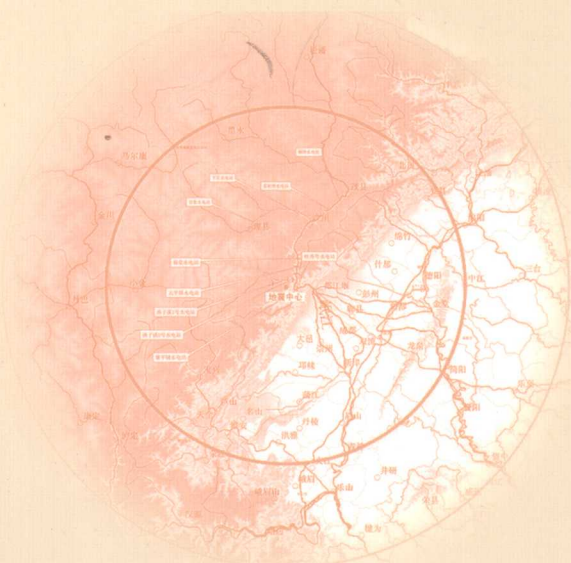


“十一五”国家重点图书
国家精品课程教材

中国科学技术大学 **精品** 教材

地震学原理与应用

刘 斌 编著



中国科学技术大学出版社

“十一五”国家重点图书
教育部国家精品课程教材

中国科学技术大学精品教材



地震学原理与应用

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF SEISMOLOGY

刘 斌 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

这是一本以地震学的基本原理为主,兼顾应用的基础理论教材;系统介绍了与天然地震有关的基本概念与定量研究天然地震的基本方法;根据连续介质中弹性波传播理论,着重讨论利用地震波研究地球内部构造的基本理论和方法,以及目前人们对地球内部构造的了解;对天然地震产生的机制和地震活动的主要特征以及地震预测等问题做适当介绍;特别注意在物理概念的引入以及数学模型建立方面的介绍,充分强调基本模型、概念与严格、系统的数学理论之间的结合,使读者了解数学与地球科学中物理模型之间的关系,初步掌握运用数学理论定量描述、处理地震学中相关问题的方法。

本书可供高等学校地球物理专业师生,以及从事地球物理学、地震学研究的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震学原理与应用/刘斌编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.6

(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

教育部国家精品课程教材

安徽省高等学校“十一五”省级规划教材

ISBN 978-7-312-02305-7

I. 地… II. 刘… III. 地震学—高等学校—教材 IV. P315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 099910 号

中国科学技术大学出版社出版发行

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710 mm×960 mm 1/16 印张:14 插页:2 字数:261 千

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

总 序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题 281 种,经过多轮、严格的评审,最后确定 50 种入选精品教材系列。

1958 年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校 50 周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。

侯建國

2008 年 8 月

序

地震波是惟一能穿透地球深部的一种波动。迄今为止,人们关于地球内部的结构和组成的知识,几乎全部来源于地震波。

地震学是研究地震和地震波的一门学科,它对于认识、了解和研究地球科学的人来说,是一门非常重要的基础课。

在中国科学技术大学成立之初,傅承义学部委员开设的第一门课程,就是地震学。半个世纪以来,中国科学院和中国地震局的地震学家,一直延续老一辈科学家的传统,中国科技大学地震学课程的讲授,从未间断,在教学内容、课程设计、教学经验等方面都得到了非常好的传承和改进。

刘斌教授在中国科大讲授地震学课程多年,总结、吸收、发展了前辈的教学经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与学科最新发展相结合,课堂教学与课外文献调研相结合,编写了《地震学原理与应用》讲义,特色鲜明、要义明晰、深入浅出、联系实际,多年来,一直受到学生们广泛好评。2007年刘斌教授为本科生开设的“地震学原理与应用”课程被教育部评定为国家级精品课程。

在多年授课讲义基础上精炼而成的《地震学原理与应用》一书即将出版,这是一件大好的事情。教材的现代化是教育现代化的重要内容,我热烈祝贺这本书的出版。同时,我相信,该书的出版,不仅对于大学地学专业学生学习地震学有益,而且对于提高全民族的地学知识水平也大有益处。

陳 颢

2008年9月20日

前 言

地震是一种自然现象.顾名思义,地震学是研究地震现象的一门科学.实际上,地震学除了研究天然地震的发生过程以及活动规律,人们还利用由地震激发并在地球内部传播的机械波(地震波)研究地球内部的结构及动力学过程.自19世纪末20世纪初以来,这门学科迅速发展成为一门独立而完整的现代科学,在地震活动规律研究、地震波理论、震源物理、地球内部结构、地震预测等许多方面都开展了很多深入的探索,并已取得很大的进展.

地震学是地球物理专业本科生必修的专业基础课.随着科学技术的进步,地震学的研究方法 with 理论发展也出现了日新月异的变化,对理论与实际相结合、科学与技术相结合,提出了更多的要求.用人单位以及学生本人,既需要对地震学的相关理论有深入的理解,也要掌握地震学的应用技术.因此我们在地震学的教学中在全面介绍地震学基本理论与研究方法的同时,更加注重对地震波传播特性以及利用地震波传播研究地球内部结构方面的讲授,让学生掌握基于数学方法的理论推导,了解基本的实际应用,以便他们能很快进入到相关领域的科研前沿.该门课程2007年被教育部评定为国家级精品课程.

地球物理属于小学科,学生人数较少,所以国内相关的地震学教材多年来更新很少.国外的教材可以简单地分为两类:本科生用的主要介绍基本概念,系统的数学推导等理论介绍较少;研究生用的则比较强调理论推导,基本概念的介绍较少.我们在中国科学技术大学讲授地震学课程时感觉到,学生使用国外的本科教材感觉深度不够;使用国外的研究生教材又觉得缺少基本模型的介绍,数学理论太深;尤其是近年来高等教育要求精简课内学时,课程普遍受到压缩.针对这种情况,多年来我们一直根据实际教学需要,使用自编的讲义,充分强调基本模型、概念与严格、系统的数学理论之间的结合,并随时调整、补充,可以非常灵活地组织内容,使学生尽可能多地接触到第一手的地震学资料及科研前沿、进展,学生反映良好.

目 次

总序	(i)
序	(iii)
前言	(v)
第 1 章 地震学简介	(1)
1.1 天然地震和地震学	(1)
1.2 地震学的主要内容	(6)
1.3 地震学的主要应用	(9)
第 2 章 宏观地震调查	(12)
2.1 伴随地震发生的自然现象	(12)
2.2 地震强度	(12)
2.3 地震的宏观调查	(23)
第 3 章 地震波传播	(30)
3.1 主要简化假设和基本理论内容	(30)
3.2 平面波在平界面上的反射、折射	(33)
第 4 章 地震面波	(53)
4.1 基本模型	(53)
4.2 Rayleigh 面波	(54)
4.3 Love 面波	(57)
4.4 频散方程的相长干涉解释	(60)
4.5 面波的频散	(62)
4.6 地球上的面波和导波	(71)
4.7 面波与地壳、上地幔构造的研究	(74)
第 5 章 地球自由振荡	(76)
5.1 基本方程	(76)

第1章 地震学简介

地震学一词是由希腊语 seismos(地震)和 logos(科学)两词构成的,所以有人把地震学定义为关于地震的科学,其实不完全准确.在过去的一个世纪里,100 多万人死于地震灾害,还有数百万人承受着财产损失与生活来源断绝的痛苦.对于日益增长的人口来说,灾难性的大地震已成为大家非常关注的重要问题之一,驱动着科学家们去研究它.另外,地震已被证明不仅是破坏之源,也是人们认识地球、了解地球的知识来源.通过对地震波的研究分析,人们获得了很多关于地球内部结构及演化过程的信息.到现在为止,人们对于地球内部的了解主要来自地震学.研究天然地震的特性与活动规律和探索地球的结构及动力学过程两者齐头并进.所以,同其他许多学科一样,地震学的发展已经超出了最初的范围.

1.1 天然地震和地震学

1.1.1 大地震是严重的自然灾害

地震是地球介质运动引起的激烈事变;大地震在短时间里释放出大量的能量.在极震区里,一二十秒,甚至几秒钟就完成了毁灭性的破坏.据估计,能够使整个地球震颤的地震波动,仅占大地震所释放的总能量的 0.1%~1%.

大地震是严重的自然灾害.比如,智利是地震多发的地区,在 1960 年 5 月 22 日到 23 日约一天半的时间内,就发生了 7 级以上的强震 5 次,其中 3 次达到 8 级以上.1976 年 7 月 28 日凌晨 3 点 42 分和 18 点 43 分在唐山地区接连发生 7.8 和 7.1 级两个大地震,造成 24 万多人死亡.1995 年 1 月 17 日清晨 5 点 46 分在日本

现代地震学已经发展成为研究地震的孕育、发生和震后的全过程及其有关现象的一门科学了。

(2) 地震学是一门应用物理学

地震学是一门涉及面极为广泛的科学——地球物理学的重要组成部分。傅承义先生说过：“地球物理学，顾名思义，就是以地球为对象的一门应用物理学。”“固体地球物理学是通过观测地面上的物理效应来推断地下不可直达地点的物质分布和运动的。它与地质学是密切相关的学科，但二者的观点和方法却截然不同，不能混为一谈。”

地质学也研究地震现象。的确,在地震学成为独立学科之前,人类关于地震的知识,大多见诸地质学中的动力地质和构造地质部分。近代,这些方面的知识已发展成为地质学的一个分支——地震地质学。地震地质学运用地质学的方法,主要研究与地震有关的地质构造、构造活动和地壳应力状态等。

随着科学技术的进步,用物理学的方法研究地震现象有了可能.自从发明了地震仪,地震的定量观测与物理理论(主要是固体力学,特别是弹性力学部分)联系起来了.从此,对于地震的研究超越了记载、描述和初级统计的阶段,加入了以物理学为理论基础、数学为处理工具的应用物理学的行列,成了地球物理学中最重要的分支.地震学主要利用地震波穿透地球来了解地球内部介质的构造(包括结构和组成两重意思)和运动(震源区介质的相对运动、大地构造运动和地球内部的对流运动、地球内核相对外核的差异转动等).我们知道,目前人类掌握的、利用穿透物质来研究物质内部性质的3种主要技术手段是:观测电磁波和机械波在物质中的传播,以及观测基本粒子穿透物质时与物质的相互作用.穿透庞大的地球,不像X光透视人体或者 α 粒子穿透金属薄膜那样容易.电磁波和 α 粒子的穿透能力太弱,而中微子又显得太强.对于中微子而言,地球显得太空疏,它在穿过地球时几乎没有与地球介质相互作用,因此得不到地球内部的信息.1994年,美国建成置于海水中的、接收来自太空的低能量中微子的记录器,预计利用长期积累的大量资料,有可能用于研究地球内部的构造.但是,利用地震波进行研究却有两个有利条件:其一,地震波在地球介质中传播时衰减很小,穿透能力很强;其二,天然地震免费提供了在地球上分布相当广泛、强度范围又极大的许许多多机械波辐射源.因此,只要在地球上建立许多地震台,架设起地震仪,就能以逸待劳地接收到穿过地球各个部位的地震波,从而获得地球内部的各种信息.事实上,关于地球内部构造和运动的许多重要知识,就是从地震学研究得到的.在观测地球深部的各种地球物理方法中,地震方法的分辨率最高,“地震学是固体地球物理学的核心”.

为了查明矿藏和某些工程地质问题,确定地球浅部构造的地球物理方法迅速地

这里的接收器是广义的,可以是各种各样的仪器(主要是地震仪)、形形色色的建筑物、天然自成的山川岛屿、湖海河泉、人和动物等等.公元132年,中国天文学家张衡制成候风地动仪.它是世界上最早的验震器(Seismoscope),能指示地震的发生.它比西方同类的验震器早出现1650年!公元138年,洛阳的候风地动仪记录到远在千里之外的陇西大地震.1879年,英国工程师米尔恩(J. A. Milne)、尤因(J. B. Ewing)和格雷(T. Gray)制成第一架可供科学分析、能够记录地面运动过程的水平摆地震仪.德国人冯·利皮尔-伯什维茨(Von Rebeur-Paschwitz)在波茨坦用水平摆倾斜仪($T_0 \approx 18.5\text{ s}$, $V \approx 48.5$)观测铅垂线的变化时,意外地记录到一串摆动信号.后来发现,它是1889年4月17日东京大地震引起的波动,这是世界上第一张远震记录图(图1.3).1906~1910年,俄罗斯科学院院士、俄国皇太子伽利津发明了基于电磁感应原理的电动式地震仪,随着电子技术的飞速发展,经过不断改进,沿用至今.

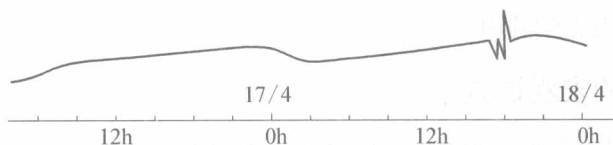


图 1.3 1889 年 4 月 17 日在波茨坦记录到的
东京大地震引起的波动

电磁波通讯的理论和技術,绝大部分可以用于地震信息的接收(也广泛用于分析).地震台阵或称调相拾震仪阵列与十分先进的相控阵雷达的原理是相同的.地震台阵是监测地下核试验的有力武器,也是记录和提取多种天然地震信息、进行精细研究的有效工具.

地震信息同样也是多种多样的,它可以是物理的(力、声、光、电、磁、热、放射性等)、化学的,甚至是人的感觉和动物的反应等等.

事实上,不管地震发生在什么地点,只要震源深度和震中距相同,则各个震相到达的时刻基本上是相同的,反映了地震波在地球中的传播具有很强的规律性.探索地震波传播的规律性及其物理含意是地震学的重要内容.1828年,柯西和泊松就已导出弹性体运动方程,并指出存在两种波动:纵波和横波(地震学中称为P波和S波);但是直到1900年才由英国地震学家奥尔达姆(R. D. Oldham)从地震记录图上识别出3种主要的地震波:P波、S波和面波.从此,在地震图上识别和解释震相的研究蓬勃开展,人类终于了解了自已居住的星球的基本构造.随着地震学的进一步发展,还从地震记录中提取了与震源、孕震有关的许多信息.

1.2 地震学的主要内容

人类研究地震的历史相当久远了;地震仪发明后,对于地震及其有关现象的研究,在深度和广度两方面都有了长足的进步.目前,对地震的本质、活动规律及其产

1.2.1 地震的宏观调查

宏观地震调查主要在地震破坏区考察自然景观的改变、各类建筑物受破坏的情况,并在广阔的范围内收集人和动物的感受和反应,等等;再结合当地的地质、地貌、地下水和地震发生的历史进行各种分析,从中提取有用的信息。地震现象十分复杂,目前的科技和生产水平还无法单凭仪器收集全部有用的信息(无论仪器的数量还是类别均不足)。地震的宏观调查是研究地震特别是地震灾害的重要方法,对抗震、防震和灾后重建家园有重要作用,对于发现某些新现象也有独特的作用。

1.2.2 测震学

测震学的基本课题是如何记录好地动和利用这些记录测定地震参数,内容涉及仪器(理论、制作、安装、调试、维护、标定)、台站(选址、布局、建筑)、数据传输保存、计算处理、编辑出版,等等。原始记录结果(模拟或数字地震图)和许多地震的基本参数汇编成册的地震目录是地震学研究的基础资料;而地震学研究的新进展,不仅对测震学提出更高、更新的要求,也为测震学提供新的原理和方法。地震学发展的历史生动地反映了这种相互促进的事实。地球自由振荡的发现,促进了超长周期地震仪的研制;超长周期地震仪的发明,又使地球自由振荡的研究进一步扩展和深化。地震台阵的问世,开拓了不少地震学研究的新领域,其中之一,就是推动了近代地震学中具有突破性意义的地震波散射的研究。随着技术科学和工业水平的提高,

特别是电子、无线电技术和计算机技术的进步,无论是地震仪器、观测台网、标定装置、传输保存和计算处理的设备,还是数据处理、编辑检索的方法,都发生了深刻的变化.由于数字地震记录频带宽、动态范围大,大大地提高了地震观测的分辨能力,也便于直接上计算机做各种处理(特别是对模拟地震记录很麻烦的频谱分析).运用数字地震记录发展了“数字地震学(也称宽频带地震学)”,它不只是简单地把“经典”地震理论程序化,也不只是把模拟地震记录数字化.

地震学是一门观测性很强的科学.无论对震源特性和地球介质特性的研究,还是对孕震、发震和震后过程的研究,都离不开实际的观测.地震的运动过程一去不复返,记录好、保存好原始数据是百年大计.随着地震学的进步,可以用新的研究方法处理分析所保存的原始数据,从中进一步挖掘有用信息,得到更完善的地震知识.

测震学与地震学和技术科学有密切关系,相互促进.测震是基础性的工作,它是地震学的重要分支.

1.2.3 地震活动性

地震是地球内部物质运动的反映,它的活动规律相当复杂.但是,利用历史上有关地震的文字记载和近百年来地震仪器的记录,经过统计研究可以看出:虽然每个地震出现的时间、地点、强度具有一定的随机性,但大量地震在发生的时间、地区、强度和频度等方面,都有一定的特点.地震频度是指定地区、指定时期内所发生的、震级为($M \pm \Delta M$)的地震次数.它是 Gutenberg-Richter 引进的、定量地描述地震活动特性的参数.

地震活动性主要研究指定地区、指定时期内所发生的地震在时间、空间、强度、频度等方面的特点.近代也有人以大地震为中心,研究与该大震有关的地区在大震发生前后一段时间内地震活动的规律性.

1.2.4 地震波传播理论、地球和行星内部构造

地震时,最突出的现象是大地的震动.东汉张衡在近两千年前已正确认识到,地面的震动是沿一定的方向由远处传来的.1760年,英国的 J. Michell 在他编著的地震实录中,把地震和地球的波动联系起来,这一概念被西方学者称为地震学发展的里程碑.前面提到的德国人冯·利皮尔-伯什维茨,根据 1889年4月17日记录到的东京大地震引起的波动,于 1895年在伦敦第六次国际地球物理会议上指出:“可以肯定地说,由震源发出的弹性运动能够通过地球本身传播”,“地震观测资料提供了一个间接获取有关地球内部状况信息的方法.”