

普通高等教育
勘查技术类教材

环境地球物理教程

HUANJIING DIQIU WULI JIAOCHENG

● 田 钢 刘菁华 曾绍发 主编



地质出版社

环境地球物理教程

田 钢 刘菁华 曾绍发 主编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书为吉林大学“十五”规划教材,供高等院校勘查技术专业及固体地球物理专业本科生用。本书介绍了学习环境地球物理学所必备的基础理论和基本工作方法,并结合实例进行了分析,在参考了大量国内外文献资料的前提下,介绍了国际和国内环境地球物理学最新的进展和动态。本书也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境地球物理教程/田钢,刘菁华,曾绍发主编.
北京:地质出版社,2005.4
ISBN 7-116-04443-4

I. 环... II. ①田... ②刘... ③曾... III. 环境物理学:地球物理学-高等学校-教材 IV. X14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 042943 号

责任编辑:林清溪 王 璞 陈 磊
责任校对:李国红
出版发行:地质出版社
社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083
电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324572 (编辑室)
网 址:<http://www.gph.com.cn>
电子邮箱:zbs@gph.com.cn
传 真:(010) 82310759
印 刷:北京智力达印刷有限公司
开 本:787 mm × 1092 mm^{1/16}
印 张:17.25
字 数:408 千字
印 数:1—2000 册
版 次:2005 年 4 月北京第一版·第一次印刷
定 价:21.00 元

ISBN 7-116-04443-4/P · 2575

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

本书为吉林大学“十五”规划教材,主要为满足高等院校勘查技术专业以及固体地球物理专业的本科生教学而编写,同时也可供相关专业的研究生以及从事工程与环境地球物理工作的专业人员参考。

环境问题是当今举世瞩目的大问题,而环境地球物理学则是随着对环境的重视和研究工作的进展,在近十几年提出并发展起来的一门交叉学科。1988年美国的S. H. Ward教授率先在犹他大学开设了环境地球物理课程;在以后的十几年中先后出版有《Environmental Geophysics—A Practical Guide》(1995, D. Vogelsang)、《Environmental and engineering geophysics》(1997, Prem V. Sharma)、《Near-Surface Seismology》(1998, Don Steeples)。国内在近几年也相继出版了几本有关教材和参考书,如《工程与环境物探教程》(1993, 陈仲候、王兴泰主编)、《工程与环境物探新方法新技术》(1995, 王兴泰主编)、《环境地球物理方法及其应用》(1997, 崔霖沛、吴其斌编著)、《环境地球物理学》(2002, 楚泽涵、任平编著)。

本教材的编写本着拓宽专业领域及辐射范围,提高教材的共享性,吸收最近的科研成果,博采众家之长,为教学提供一本实用教材和该领域的重要参考书。在编写过程中收集了大量的国内外资料,系统总结环境地球物理的学科内容,同时结合吉林大学地球探测科学与技术学院最近教研成果和工作实践,具有一定的特色性。

本书共分为六章,第一章主要对环境地球物理的概念、研究内容及方法特点作了界定;第二章介绍了以弹性波理论为基础的一类探测方法;第三章介绍了以电磁波理论为基础的一类探测环境地球物理问题的方法;第四章为除测震类和电磁波类以外的其他地球物理方法在探测环境地球物理问题的方法;第五章介绍了以应用领域为对象的实际应用实例;第六章为从全球环境变化来讨论环境地球物理。

本书第一章由田钢编写,第二章的第一、二、三、四节由田钢编写,第四、五节由易兵编写,第三章第三节由曾绍发,易兵合编。其余节由曾绍发编写,第四章由刘菁华编写,第五章第一、四节由薛建编写,第二、三节由易兵编写;第六章由康国军编写。全书由田钢、刘菁华统稿。本教材在编写过程中参考了大量的国内外同行专家的研究成果及实际工作经验,同时引用了大量的参考书的内容,所以在此对本书所引用参考文献的作者表示诚挚地谢意。

本书在编写过程中得到吉林大学教材发行中心及吉林大学地球探测科学与技术学院领导的关心和帮助,在此表示深深地感谢!

由于编者水平及工作经验所限,书中不足之处及疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2003年12月

序 言

自然环境是人类赖以生活和繁衍的基础，同人类的生存和发展息息相关。

环境问题是一种历史现象，一种社会现象，也是一种经济现象。自地球上出现人类以来，环境问题就和人类相伴随。由于人类的活动空间加大，需求增加，对环境影响的范围和程度也就越来越大。环境问题给人类带来了无穷无尽的灾难，人类开始在痛苦中反思，一些有识之士已开始觉醒，初步认识到人类正面临着环境的挑战。

环境科学所研究的环境实际是指人类生存和发展的物质条件的总体，包括自然环境和社会环境。自然环境是直接或间接影响人类的一切天然形成的物质及其能量的总和，迄今地球表层大都受到人类活动的影响，原生的自然环境已所剩无几；社会环境则指人类在自然环境的基础上，通过长期有意识的社会劳动所创造的人工环境。人工环境又可以划分为农业环境、工业环境、城市环境、交通运输环境等。《中华人民共和国环境保护法》对环境的概念表述为：“本法所称环境，是指影响人类生存和发展的各种天然的和经过人工改造的自然因素的总体，包括大气、水、海洋、土地、矿藏、森林、草原、野生生物、自然遗迹、人文遗迹、自然保护区、风景名胜区、城市和乡村等。”

环境科学从广义上讲是研究人类周围环境因素及其与人类的关系，以及环境质量和环境保护的科学；从狭义上讲，它主要研究由人类活动所引起的环境质量的变化，以及保护和改进环境质量问题。环境科学所研究的问题十分复杂，它涉及了几乎所有自然科学和社会科学的各个领域。其中地球科学，特别是地球物理学是其中的一个重要学科领域。环境科学包括环境数学、环境物理学、环境化学、环境地学、环境生物学、环境医学、环境经济学、环境管理学、环境法学、环境教育学、环境情报学、环境心理学、环境统计学、环境史学、环境水利工程、环境化学工程、环境卫生工程、环境工程学等。环境地球物理学属于环境地学的范畴。

地球物理学本身，从广义上讲，就是研究地球这个人类生存环境的科学。固体地球物理学、海洋物理学、大气物理学和空间物理学就是研究发生在固体地球、水圈、气圈和空间的物理过程，特别是与人类生存关系密切的地震、潮汐、气流、天气、气候、磁暴等的科学，而地球物理的一些理论和方法也正在环境监测与灾害预测，特别是环境污染研究中得到越来越广泛的应用和发展。例如，在大气的调查研究方面：地面和卫星微米波、毫米波遥感已成功的应用于探测降水、气象要素状态和痕量气体，并正在研究利用微波遥感对大气污染进行动态监测，而激光探测技术用于大气污染探测则是最新的进展。在海洋环境调查方面：声纳、地震、磁法、重力等方法已广泛地应用于探测海洋深度、海底地形、海洋沉积和海洋地壳结构；遥感成功地应用于监测海洋污染；多普勒声纳已成为研究海流剖面、波浪的重要手段；声层析技术在探测大范围海水的各层次声速、流速等海洋要素分布，特别是分辨率较高的三维声速场的绝对流速方面也取得了重要的成果。在地面和地下环境研究和调查方面，地球物理更是一种应用广泛的有效手段。用磁法、重力、电法、地

震等方法探测岩石圈结构及地下水,用航天、航空遥感探测地面植被、农作物、沙漠、地面水等地表状态的变化,早已是众所周知的事实。近年来,地球物理方法在探测地下介质的污染状况,特别是在污染的动态监测方面取得了令人瞩目的成就。如用电阻率法、激发极化法等方法探测土壤的渗透率和湿度;用航空以及地面电法监测土壤的盐碱化面积变化;用地震和电法以及高精度全球定位系统(GPS)预测滑坡;用电测深、多极距剖面法、井中电法监测地下水动态;用地震、重力、电法探测岩溶、空洞及地下介质对工程的影响等。

环境地球物理虽然在过去已经开展了相当数量的实际工作,但总体上当前还是处在发展的初级阶段,需要更多的实践和探索,不断提高技术水平,扩大应用范围,提高质量和效益,扎扎实实地为国家的环境目标作出应有的贡献。在此基础上,通过百家争鸣,逐渐完善其学科建设。

本书是在吉林大学地球探测科学与技术学院近年来的最新教研成果和工作实践的基础上,参考了国内外大量的文献(包括著作和教材)资料的前提下,介绍了国际国内的环境地球物理学最新进展和动态,从环境地球物理学必备的理论系统出发,结合丰富详实的实例分析,所编写的一本环境地球物理学教材。该书也可供从事该领域工作的工程技术人员参考。

目 录

前 言

序 言

第一章 绪论	(1)
第二章 环境地球物理测震类方法	(5)
第一节 地震勘探的基础知识	(5)
第二节 浅层地震勘探	(16)
第三节 面波技术	(42)
第四节 桩基动态无损检测法	(55)
第五节 地微动技术	(67)
参考文献	(72)
第三章 环境地球物理电法类方法	(75)
第一节 电阻率剖面法和测深法	(75)
第二节 高密度电阻率技术	(93)
第三节 电磁法	(109)
第四节 探地雷达	(131)
参考文献	(142)
第四章 环境地球物理其他方法	(143)
第一节 地球物理测井	(143)
第二节 环境核地球物理方法	(161)
第三节 磁法测量	(180)
第四节 微重力测量	(188)
第五节 地温测量	(197)
参考文献	(209)
第五章 环境地球物理的应用	(211)
第一节 在工程地质调查中的应用	(211)
第二节 在环境地质调查中的应用	(221)
第三节 在城市建设与规划工程中的应用	(226)

第四节 在地质灾害评价与其他地质调查中的应用	(234)
参考文献	(247)
第六章 全球环境变化与地球物理	(248)
第一节 全球环境变化及其研究现状与发展趋势	(248)
第二节 生态环境问题	(249)
第三节 城市的主要环境地球物理问题	(257)
第四节 自然灾害与环境地球物理问题	(259)
第五节 地球物理与环境地质调查	(264)
参考文献	(268)

第一章 绪 论

20 世纪 80 年代中期,环境地球物理开始形成一门单独的学科。随着全世界的人们环境保护意识的加强和环境保护工作的快速发展,环境地球物理的研究和应用正处在一个蓬勃兴起的阶段。地球物理方法在环境监测和治理中可以发挥重要作用,但过去由于学科和部门之间相互不了解,因此从事环境保护工作和从事地球物理勘查工作的人员对地球物理方法在环境保护与监测工作中可以发挥什么作用尚缺乏足够的认识。本书试图在环保人员和地球物理人员之间架起一座桥梁,为环保人员增加一件得力的工具,为地球物理人员开辟一个新的领域。

关于环境地球物理学,目前未见到公认严格定义。澳大利亚的 R. J. Whiteley 认为:“环境地球物理学是有关寻找、圈定和监测任何成因的地下灾害的学科”。这里的任何成因是指既包括天然成因,也包括人工成因。前苏联地质部的一位专家则指出:“环境地球物理学是研究地球物理场(重力场、地震波场、电磁场、核辐射场等)与天然环境的要素(首先是人)的关系的学科”。我国的一些学者认为,环境地球物理学是利用地球物理学的理论和方法来研究地球物理场和地球物质的物理性质与人类生存环境(包括天然和人工环境)之间的学科。这种关系具有双重的含义,一方面地球物理场对人类的生存环境,对人体的健康有着重要的影响;反过来人类的工程——经济活动又使地球物理场和地球物质的物理性质发生明显的变化;另一方面,由于人类所处的天然和人工环境的变化会导致地球物质物理性质和地球物理场的变化,所以人们可以利用地球物理方法来监测环境的变化,并为制定环境保护措施提供依据。

环境问题是一个十分复杂的问题,必须集中几乎所有自然科学和社会科学各个学科的科技工作者为之努力研究,才有可能取得真正的成效,其中地球科学工作者,特别是地球物理科学工作者,更是不可缺少的重要力量。

一、环境地球物理的研究内容

环境地球物理的研究与应用大体有以下 3 个方面:①研究地球物理场对人类生存环境和人体健康的影响;②用地球物理方法监测环境污染(包括水、固体废弃物、大气和放射性物质的污染及其治理过程);③用地球物理方法对生态环境恶化以及环境灾害(包括自然灾害和人为所致)进行监测、预报和治理。

环境地球物理工作按其规模和范围又可分为区域调查和场地调查两大类。区域环境地球物理调查主要是进行全国性或大区性的环境评价,为国民经济的总体布局及生态环境恶化和环境污染的总体治理方案提供依据。场地调查则为解决具体地区、厂矿企业、工程项目等的环境问题服务。

大多数的区域性环境调查,都是多学科的,包括环境地球物理在内,其目的往往也是综合性的。例如,所有环境地质调查的基础是环境地质填图,它是一项涉及全部国土的系统性工程,分为小比例尺(1:1000000 ~ 1:500000)——用于查明地质环境的总况和动态;

中比例尺 (1:200000) ——用于对比研究重要地区地质环境在几十年中的变化;大比例尺 (1:50000 或更大) ——用于详细研究中心工业区和大城市的生态地质环境。这类填图的目的是长期预测地质环境的变化及其对生态环境的危害程度,以便实现对地区的合理开发、规划人类经济活动的远景和保护人类健康。环境地质填图是一个新的研究方向,在环境地质图上要能反映出地质环境与人类经济活动的相互关系,一方面反映出人类活动对地质、地球物理、地球化学和水文地质状况产生的不良后果;另一方面反映出地球物理场的变化和地质作用对人类及其劳动产品造成的负面影响。目前也有一种更为广泛的提法,把环境地质填图作为城市地质填图的一部分。

场地环境地球物理调查指的是为解决具体场地的环境问题而开展的数据采集、处理、解释和模拟的综合工作。在环境治理工作开始之后,场地调查工作仍然不能停止,因为需要进一步监测和了解治理过程的进展和效果。不论场地指的是加油站、垃圾场、有毒有害废料堆积场或任何需要解决环境问题的场地,只要探测的目标与背景具有明显不同的地球物理特征,地球物理方法都可以作为一种遥测手段,以获得场地调查所需的信息。

二、环境地球物理的特点

早在 20 世纪 70 年代,国外便已出现环境地球物理工作的文献,只是当时工作量较小,尚未形成独立的学科。1985 年美国勘探地球物理学家协会 (SEG) 在统计年度工作量时,第一次把环境地球物理作为一个单独科目划分出来。因此,可以把 1985 年看作是环境地球物理的奠基年。1988 年美国的 S. H. Ward 教授在犹他大学率先开设了环境地球物理课程,1990 年由他主编的三卷本《土木和环境地球物理》出版,被加拿大滑铁卢大学的 J. B. Greenhouse 教授称为是里程碑式的著作。

从 1988 年起美国每年召开一次“地球物理用于工程与环境问题讨论会”(SAGEEP),并在 1992 年年会上宣布成立“环境和工程地球物理协会”(EEGS)。1993 年秋 SEG 成立了“近地表地球物理委员会”(NSG),其活动范围既包括水文、工程、环境,又包括固体矿产地球物理。同年,在瑞士洛桑召开了国际性的“地球物理与环境”会议。

我国的环境地球物理工作兴起于 20 世纪 80 年代中期,工作量较少,也比较分散,与西方的环境地球物理热点在固体废弃物探测和地下水污染监测不同,我国的环境地球物理工作偏重于地质灾害的监测方面。中国地球物理学会在 1993 年以后相继成立了环境地球物理专业委员会,工程地球物理专业委员会以及环境与工程地球物理协会。中国地质学会也成立了环境地质专业委员会。

在解决环境问题时,地球物理方法具体独特的优点,是其他方法无法代替的。与传统的打钻取样分析的方法相比,它能从地面遥测地下介质特性的三维变化,所以它的效率较高、成本较低。此外,它的探测范围比钻孔的直径要大得多,因此更具有代表性。钻孔不可能布置得太密,尤其在研究地下液态污染物时,要尽可能少打钻,以免造成层间的交叉污染。利用地球物理方法可以在很大的程度上减少钻探的工作量,降低调查的成本,缩短调查的周期。

表 1-1 是一个应用实例的成本-效益分析资料,它表明使用地球物理方法减少了钻探、取样工作量,使工作的总成本降低了 73%。其中 A 项中列出的为计划数据,B 项列出的为实际费用。

表 1-1

A. 不使用地球物理方法的调查成本	
330 个冲击钻孔, 深 6m, 网度 6m×6m, 成本 20 美元/m	39600 美元
18 个取心钻孔, 深 25m, 网度 25m×25m, 成本 150 美元/m	67500 美元
总计	107100 美元
B. 使用地球物理方法的调查成本	
磁测: 1200 点, 网度 5m×5m, 成本 3 美元/点	3600 美元
电剖面, 300 点, 网度 10m×10m, 成本 3 美元/点	700 美元
电测深, 48 点, $L=100\text{m}$, 成本 120 美元/测深点	5760 美元
地震折射, 500m 测线, 成本 8 美元/m	4000 美元
冲击浅孔, 30 个, 深 6m, 成本 20 美元/m	3600 美元
取心钻孔, 3 个, 深 25m, 成本 150 美元/m	11250 美元
总计	29110 美元

环境地球物理与以往的金属矿地球物理和石油地球物理方法相比, 具有其自身的特点, 主要表现为:

a. 由于矿产勘查与环境调查的驱动力不同, 前者是获取经济效益, 而后者是保证人身安全和健康, 故对它们的要求是不尽相同的, 实际上对环境物探的要求要高得多。例如, 在一个地区进行矿产勘查时, 即使不能找到全部矿藏, 只发现其中的一部分, 其成绩也是很可观的; 而在寻找埋藏的有毒废料容器时, 如果只发现了一半, 而另一半被漏掉, 那么后果会是严重的, 此项调查只能认为是失败的。

b. 环境地球物理调查所涉及的方法技术问题以解决地表下浅层问题居多, 它所要求的探测深度一般为几米至几十米, 而要求达到的垂向和横向分辨率却相当高, 有时要求达到厘米级。例如, 探测地下埋藏的有毒废料容器和未爆炸的炸弹等。

c. 因为要解决的环境问题较多地集中在工业中心和大城市, 所以往往受到人为噪声的干扰, 如地下管道(线)、电缆线、高压线、铁路等引起的磁干扰、电磁干扰、工业交通振动的干扰, 因此需要采取相应的有效措施压制各种干扰。另外, 环境调查中野外作业空间(范围)通常较小, 这就要求物探方法具有抗干扰性和灵活性。

d. 环境调查的任务往往要求开展不同时间的动态地球物理测量, 例如, 监测污染流随时间的扩展, 了解治理过程中的进展及其效果, 监测灾害的发展以及预测其发生的时间等, 有时甚至要求建立长期的监测站网。

e. 环境调查所涉及的问题各式各样, 要求所获得的信息不仅包括地下探测目标的形态特征, 而且还要求了解其力学和结构性质。例如, 进行地下水污染调查时需要了解岩石(土)的孔隙度; 灾害调查时需要查明岩体的稳定性和土质地基的刚度系数等。

以上情况表明, 尽管环境调查中采用的物探方法大多数仍然是在资源勘查中采用的传统方法, 但在具体的工作方法和技术上还是有很大差别, 尤其是有些任务是传统物探方法无力完成的。近 10 年发展起一些独具特色的、专用于环境和工程勘察的新方法, 如地震面波方法、高密度电阻率法、地质雷达、核磁共振方法、天然声辐射测量和天然电磁辐射测量等。

另外, 为适应浅层勘查、提高分辨率和抗干扰能力以及某些特殊需求, 一些环境物探方法在仪器设计、数据采集和处理方面也做了改进, 并研制出某些专用的仪器设备。如美

国 Geometrics 公司研制的用于超浅反射和多道面波分析的系列浅层地震仪、用于平面磁成像的 G-858 磁光泵仪、Geophex 公司推出的 Gem 系列多频段平面电磁成像仪、Kansas 大学研制的 Autojuggie 自动检波器埋置系统等,主要用于解决环境和工程问题。同时,仪器设备的自动化、智能化和轻便化以及数据采集、记录、存储、处理、解释和显示等的一体化大大提高了工作效率。

与金属物探、石油物探一样,环境物探方法的使用也必须具备一定的地质和地球物理前提,也同样存在着多解性的问题。因此,在方法的选择上,应根据任务和条件的不同,选用不同的方法和方法组合,强调综合原则,通过各种物探方法与地质、化探和水文等的有机结合,使地质解释更符合实际,从而提高物探方法的应用效果。同时,还必须考虑方法的有效性、使用的简便性和成本的经济性。有些传统的方法,如直流电阻率法、电磁法、自电法、放射性方法,由于使用简单、成本低且具有一定的效果,因此往往也得到较多的应用。

环境物探方法的使用也必须具备一定的地质和地球物理前提,也同样存在着多解性的问题。因此,在方法的选择上,应根据任务和条件的不同,选用不同的方法和方法组合,强调综合原则,通过各种物探方法与地质、化探和水文等的有机结合,使地质解释更符合实际,从而提高物探方法的应用效果。同时,还必须考虑方法的有效性、使用的简便性和成本的经济性。有些传统的方法,如直流电阻率法、电磁法、自电法、放射性方法,由于使用简单、成本低且具有一定的效果,因此往往也得到较多的应用。

第二章 环境地球物理测震类方法

地震反射技术在石油勘探领域以及折射相遇时间技术在工程与地下水研究领域的应用已有 70 多年的历史。随着计算机技术的发展、数字仪器接收精度的提高以及工程与环境领域中不断增长的需求,浅层地震反射技术、折射技术以及面波勘探技术等都有了新的发展并日益成熟。

第一节 地震勘探的基础知识

一、波动物理学基本概念

在我们开始讨论地震波之前,有必要了解波动物理学的一些基本概念。一是波的传播速度,另一是波动所引起的位移的频率和大小度量。地震波形上的波峰与波谷与零点间的高度称之为振幅(图 2-1-1),通常用 A 表示。一个地震波的能量 E 正比于振幅的平方。

下面的几个重要方程可将地震波的频率与距离和时间联系起来。波长 λ 通常用来描述地下或其他介质中传播的波上两个连续波峰或者波谷之间的空间距离,频率 f 为两个连续波峰或者波谷之间的时间周期 T 的倒数,而波的传播速度 v 是频率和波长的乘积。

$$E \propto A^2, v = f\lambda, f = 1/T, \quad (2.1.1)$$

根据这些基本的关系,我们能够对一个地震记录进行有意义的分析和计算,特别是当地震记录由多道数据组成且检波器到震源的距离为已知的时候。

求取地震波动问题的完整解需要用到波动方程,其一维形式如式(2.1.2)所示,其中 u 是波动所引起的位移, x 是横向坐标:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.1.2)$$

通过对其微分可以验证该方程一个特殊而有用的解的形式为: $u = A \sin k(vt - x)$ 。这里 A 为振幅, kvt 是频率, $-kx$ 为相位。

根据费马的最小时间原理,地震波从一点传播到另一点是沿着某一路径进行的,在该路径上波的传播时间最短。

近地表地震技术通常研究的是离震源几米或更远一点地方的弹性变化情况,至少在实

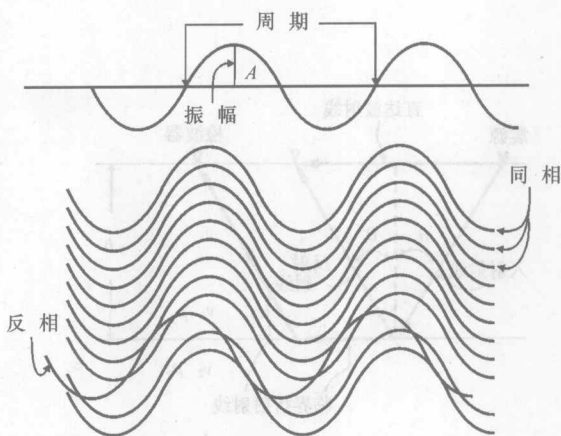


图 2-1-1 波动中名词概念与波形同相和反相示意图

实际应用中是这样。在离震源更近的地方，常常会发生塑性形变或者断裂，因此常规的地震分析方法并不总是适用。

在弹性情况下，一个物体能够承受多次的变形而不发生永久的破损。当变形超过弹性限制时，损坏就会发生，或者是发生破裂（由断裂造成的破损），或者是渐渐地由塑性形变引起的不可恢复的损坏。为了我们研究地震波的目的，我们将假设除了离地震震源非常近的地方以外，其余处为弹性形变。

二、地震波的种类

地震波被分为两类：一类是体波，它是在地球内部沿着所有方向传播并可达到所有深度的波；另一类为面波，它的传播往往局限于地球表面下数个地震波长的范围内。因此两类波的应用和分析方法都不尽相同，其中体波通常用于资源勘探和地震观测的目的，而面波一般被认为是体波研究中的噪声，但有时也被用来进行层状地球性质的研究。

1. 体波（P 和 S 波）

图 2-1-2 显示了体波的传播路径，图 2-1-3 给出了体波在两层介质传播时间与距离关系的示意图。

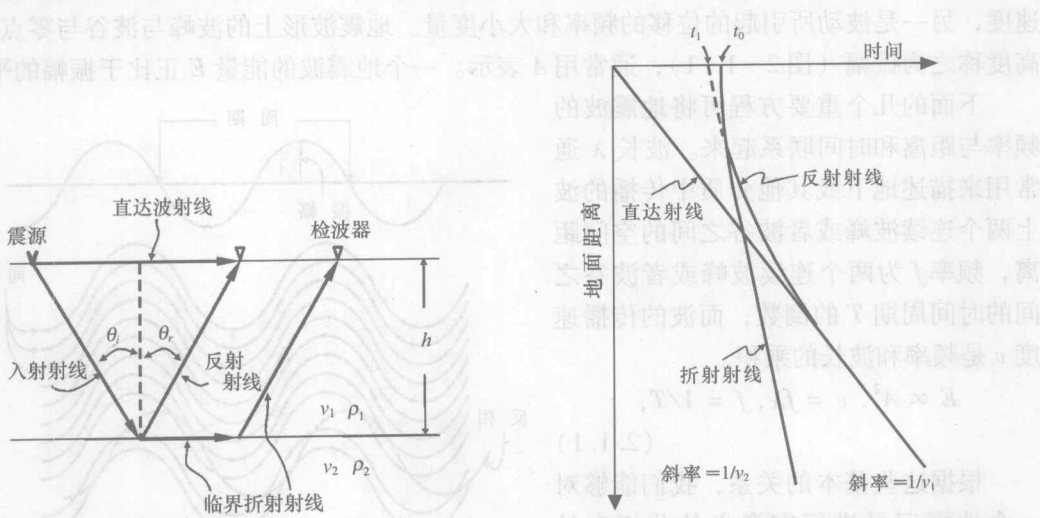


图 2-1-2 体波传播路径示意图

图 2-1-3 体波在两层介质传播时-距示意图

体波的两种形式是：压缩波（P）和剪切波（S）。P 波在反射和折射地震勘探以及地震研究中有着广泛的应用。P 波属于声波，因此它满足声学中一切物理定律，其在传播介质中的粒子振动方向与波的传播方向相同。P 波的传播速度为：

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1.3)$$

式中： K 是体积模量； μ 是剪切模量； ρ 是波所传播介质的密度。

要注意方程中的 v 是波的传播速度，它是一个标量，而不是物理学中通常的矢量。P 波将引起波所通过介质的物质的瞬时体积发生变化，而不会引起物质的瞬时形状发生变化。

常用介质的 P 波速度情况如表 2-1-1 所示。

表 2-1-1 常用介质的 P 波速度

介质	速度/(m·s ⁻¹)	介质	速度/(m·s ⁻¹)
空气	340	水	1420~1670
土壤	180~455	砂岩	1520~4550
沙	455~910	页岩	2120~3940
湿沙	605~1820	花岗岩	5150~6060
粘土	910~2120	石灰岩	3640~6060
砾石	1520~2120	盐岩	6060~6670

S 波通常用于浅层工程项目，特别是在井间观测以获得土壤和地基的剪切模量时。在 地震勘探领域，横波比纵波的应用要少得多。但是由于某种原因，人们对面波的应用有着 较强的兴趣，包括岩性确定、断裂探测以及流体含量的现场确定。S 波速度的公式如下：

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.1.4)$$

由于流体没有剪切力，故其剪切模量为零。也就是说，横波在流体中不能传播。这个 结果曾在 1900 年导致了地球内部液态核的发现。横波在流体内无法传播的事实使得人们 有可能应用它（或缺少它）的情况来探测地下溶洞，但是到目前为止该领域的研究还没有 出现令人满意的结果。

横波同光非常相像，在发生反射或折射时会表现出极化的特点。特别是当它在含有断 裂的岩石中传播时，在某一优势方向上通常会产生这种情况。这种情况是由于不同极化方 向上的能量在介质中有不同的传播路径。

在用来显示波不同种类的图 2-1-4 中，左边是在美国堪萨斯大学一个专门用于浅层 地震实验的场地上用来福枪作为震源，100Hz 检波器接收所获得的地震记录，可以看到 P 波和瑞雷面波比较明显；右边为在相同的场地上，利用楔形震源和水平检波器所获得的记 录，可以看到 S 波和勒夫面波主导整张记录。

P 波与 S 波速度的比值在确定震源与接收器之间的岩性以及求取介质的物性常数方面 有着重要的意义，包括在地震灾害研究和建筑地基的研究中都有应用实例。该比值有时也 会在石油工业领域被用来区分砂岩和页岩。孔隙介质中的水对横波的速度影响很小，但对 P 波的速度影响却很大，这使得该比值在地下水的研究 中十分重要。

利用前面所分别给出的 P 波和 S 波的速度公式，我 们可以得到：

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\left(\frac{K}{\mu} + \frac{4}{3}\right)} \quad (2.1.5)$$

v_p/v_s 值对于火成岩、变质岩以及大多数的硬质沉 积岩，例如致密石灰岩和胶结紧密的砂岩来说通常为 1.7 左右。而对一些较软的岩石，比如页岩以及胶结差 的砂岩，其比值可以达到 2.0 左右。对于未固结的沉积 物来说，比如河流三角洲以及漂砾石等，其比值在 2.0 到 7.0 之间变化。

横波（S 波）或者称为剪切波，其传播 方向垂直于粒子运动的振动方向。由于其在 相同的介质中的传播速度低于纵波的速度， 有时也被称为次波。由于纵波与横波的传播 路径相同，它们的速度的差异就使得可以利 用纵横波的时差用来计算震源到观测站或记 录站的距离。横波通过介质时并不改变介质 的瞬时体积，而只改变介质的瞬时形状。

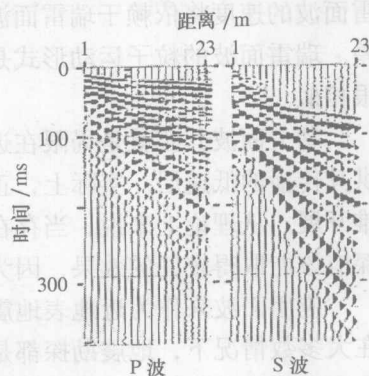


图 2-1-4 波的不同类型示意图
取自劳伦斯实验场地，Don Steeples

对于土木工程和地质工程来说,泊松比(σ)是一个非常重要的参数,它同 v_p/v_s 比值的
关系为:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\left(\frac{1-\sigma}{0.5-\sigma}\right)} \quad (2.1.6)$$

泊松比对石灰岩、硬质砂岩和很多火成岩和变质岩来说,其值大约为0.25左右,对未固结的沉积物来说,其值可高达0.45。有些地区的地震波的场地放大效应可以用近地表地质层的泊松比平面等值线图来预测。

2. 面波

当人们要利用体波进行地球内部勘探时,面波在大多数情况都被认为是一种噪声。在某些情况下,它甚至使体波方法实验不能被有效地开展,特别是当使用老式地震仪器时。由于地震面波大部分是在地球表面下一个波长的范围内传播的,因此当在地表进行记录时,地震记录上的最大振幅往往就是地震面波。地震面波在地震勘探领域的另一个名称叫做“地滚波”,这是因为在地震爆炸震源的附近人们可以有其在地面滚动的感觉。

瑞雷波和勒夫波是大多数物理情况下产生的面波。根据科学文献,我们通常所见到的面波速度约为其横波速度的92%,这只有在泊松比为0.25时(这在一些硬的岩石中,比如花岗岩、盐岩、石灰岩等岩石中是很典型的)才真正成立。对于泊松比为零的情况,面波的速度为横波的87.4%,而对于泊松比为0.5时,面波的速度则等于横波速度的95.5%(Grant and West, 1965)。对于未固结的物质来说,泊松比的范围一般在0.40到0.45之间,瑞雷面波的速度是未固结物质横波速度的94%的假设是正确的,其误差不会超过1%。

上述两类面波传播时往往局限在浅于一个面波波长的体积范围内。因为长波长的面波传播深度较大,而那里的传播速度通常也比较大,因此可以说波长越长的面波其传播速度也越大,或者至少说它以同短波长面波不同的速度传播。由于不同波长的面波以不同的速度传播,它们从震源向外扩散趋向于随着时间变化,其传播距离越来越远。这种扩散方式通常被称为频散现象,面波在大多数情况下其实就是一种典型的频散波。

对于最简单的瑞雷面波,当在一个半无限的各向同性空间的表面上观测时,其传播速度只同介质的物性有关,也就是说是无频散的。当遇到层状介质或者速度梯度介质时,瑞雷面波的速度将依赖于瑞雷面波的波长。因此,面波的频散比较弱就表明地下的成层性较差。瑞雷面波的粒子运动形式是一个逆向的椭圆轨迹,它同湖面上微波泛泛时鱼漂的运动很相似。

勒夫面波其实就是局限在近地表地层内的多次反射的横波。它们需要在地表下有一个供其传播的低速层。实际上,正是这个勒夫面波的干涉,才使得近地表的横波勘探工作很难开展。从理论上来说,当存在一个近地表高速层覆盖在一个低速层的情况下浅层横波勘探应该能取得较好的效果,因为这时勒夫面波的干涉将不会存在。

应用面波来作为近地表地震勘探分析的信息来源的潜力应该说还是很大的。这是因为在大多数情况下,地震勘探都是把面波作为噪声来处理,因此很少来分析面波中到底都包含了那些地学信息。从这个意义上来说,在这个领域是有可能作出一些创新性工作的。

在过去的十年里,该领域的工作主要集中于发展了一种被称为“面波谱分析”(SASW)的技术,它主要是由美国得克萨斯大学和密执根大学的土木工程师提出来的。

应用这种 SASW 技术,人们可以通过正演模型或者通过对面波速度的反演来获得近地表地下物质的刚度系数剖面。对不同频率范围的瑞雷面波进行分析,就可以得到深度信息。最近美国堪萨斯大学的地球物理学家也提出一种被称为“多道面波分析”(MASW)的技术(Park J., Xia J., 1999),它与 SASW 所不同的地方在于应用了多道地震记录,一方面提高了用于获取频散曲线的频率扫描精度;另一方面由于其观测系统与地震反射方法一样,还可以同地震反射勘探同时进行。

三、层状介质中的地震波

上面的讨论中,大多数情况是假设地下介质是一个半无限弹性空间,这种情况下的波的传播是比较简单的。层状介质中的地震波传播情况是不同的,而且相对于非层状介质来说是比较复杂的。比如说,勒夫面波需要层状介质的存在,瑞雷面波只有当某种层状特性存在时才会有频散特性。另外地震反射只有当遇到地层界面时才会发生。

当界面存在时,我们就会遇到频散现象、地震折射、地震反射和勒夫面波。另外,有时还可以看到不同类型的波在地质界面上发生转换。

在理想的情况下,我们希望通过地震方法能够像图 2-1-5 所描绘的那样揭示地下的地质情况。但实际上,我们借助于解释模型只能近似的得到地下介质的部分物理性质。

1. 近法线入射时的反射

为了方便起见,我们将假设在下面的讨论中,地震波在地下某个深度的水平界面上发生垂直反射。这种假设对于入射角或反射角为 15° 以内的地震反射射线来说并不太坏。对于较大入射角的情况,可以利用反射矩阵的托布尼兹方程求解来获得反射波、透射波以及转换波的相对振幅。

通过界面的地震波能量将取决于界面的声学性质差异。一个特定地层的速度和密度的乘积被称为该地层的声阻抗 Z

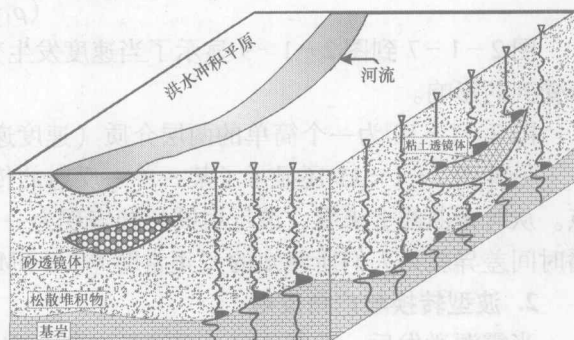


图 2-1-5 地质模型与所对应的地震记录响应示意图

$$Z = \rho v \quad (2.1.7)$$

一个声学界面的法线入射反射波的强度取决于其同界面声阻抗有关的反射系数 R :

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (2.1.8)$$

这里 ρ_1 和 v_1 分别是第一层(界面上方)的密度和层速度,而 ρ_2 和 v_2 分别是第二层(界面下方)的密度和层速度。

法线入射时的反射波极性和振幅可以从反射系数中看出。如果第一层的声阻抗比第二层的声阻抗大,那么返回到地表的地震反射将发生极性反转,比如石灰岩覆盖在页岩之上的情况。由于极性的反转使得地震反射数据的解释变得更加困难。从图 2-1-6 可以看出,一个典型的地震记录上的波峰数目并不等于地下反射层的数目。