

普通高等教育  
勘查技术类教材

# 工程与环境地球物理

GONGCHENG YU HUANJING DIQIU WULI

● 曾昭发 刘四新 等编

地质出版社

# 工程与环境地球物理

曾昭发 刘四新 等编

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

工程与环境地球物理经过几十年的发展,成为地球物理领域的一个重要分支。本教程是在我国前辈工作基础上,总结了工程与环境地球物理国内外最新的研究成果,结合教学科研生产最新研究成果编写而成的。本教程介绍了工程与环境地球物理概念和范畴、特点、方法以及在工程地质、地热与地下水、环境地质、地下管线、地质灾害和考古等等方面的应用。本教程可作为工程与环境物探方向的本科教材,也可作为相关专业研究生及从事工程与环境地球物理工作的专业技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程与环境地球物理/曾昭发等编. —北京:地质出版社, 2009. 12

ISBN 978-7-116-06451-5

I. ①工… II. ①曾… III. ①地球物理勘探-研究②环境物理学:地球物理学-研究 IV. ①P631②X14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 244477 号

---

责任编辑:李丛蔚 陈 磊 祁向雷

责任校对:李 玫

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) 82324577 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:[zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地质印刷厂

开 本:787 mm × 1092 mm <sup>1</sup>/<sub>16</sub>

印 张:17.75

字 数:430 千字

印 数:1—3000 册

版 次:2009 年 12 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:28.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06451-5

---

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

# 前 言

工程与环境地球物理经过几十年的发展,成为应用地球物理的一个重要分支。研究领域涉及国家经济和人民生活的各个方面。原长春地质学院于1988年成立工程环境地球物理教研中心。20年来,我中心在教学、科研生产方面不断发展,形成了自己的特色。1993年出版了由王兴泰作为主要编者的《工程与环境物探教程》,1995年出版了由王兴泰主编的《工程与环境物探新方法新技术》,2005年,出版了由田钢、刘菁华和曾昭发教授主编的《环境地球物理教程》。2009年,吉林大学地球探测科学与技术学院工程环境地球物理教研中心在前辈工作基础上,总结了工程与环境地球物理国内外最新的研究成果,结合教学科研生产最新研究成果,编写了本教程。

本教程共分为5章。绪论主要介绍了工程与环境地球物理概念和范畴、特点、方法选择和发展趋势;第1章为测震技术方法;第2章为电法及电磁法;第3章为地球物理测井和放射性、重磁、地热方法;第4章为工程与环境地球物理的应用,介绍地球物理方法在工程地质、地热与地下水、环境地质、地下管线、地质灾害和考古等方面的应用。

曾昭发、刘四新教授负责统编、修改补充和校核本书全稿,其中绪论由曾昭发教授编写;第1章由浙江大学田钢教授和吉林大学王者江副教授编写;第2章由曾昭发教授编写;第3章由刘四新教授和刘菁华教授编写;第4章由易兵教授、刘菁华教授、鹿琪副教授、李宏卿副教授、薛建高级工程师和王元新老师编写。

本教程可作为工程与环境物探方向的本科教材,也可作为相关专业研究生及从事工程与环境地球物理工作的专业技术人员的参考书。

本书在编写的过程中得到吉林大学教务处和地球探测科学与技术学院领导的关心与帮助,在此表示深深的感谢。

本书在编写过程中,引用国内外很多学者、专家的研究成果、图件和文字资料,在这里表示衷心感谢。由于我们经验不足,水平有限,书中疏漏错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2009年6月

# 目次

## 前 言

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 绪 论                   | (1)  |
| 工程与环境地球物理的概念和范畴       | (1)  |
| 工程与环境地球物理特点           | (2)  |
| 工程与环境地球物理方法选择         | (4)  |
| 工程与环境地球物理发展趋势         | (5)  |
| 1 测震技术方法              | (7)  |
| 1.1 地震波基础知识           | (7)  |
| 1.1.1 波动物理学基本概念       | (7)  |
| 1.1.2 地震波的种类          | (8)  |
| 1.1.3 层状介质中的地震波       | (10) |
| 1.1.4 地震波能量损耗的机制      | (13) |
| 1.1.5 地震探测分辨率         | (15) |
| 1.2 浅层地震勘探            | (17) |
| 1.2.1 浅层地震折射技术        | (17) |
| 1.2.2 浅层地震反射技术        | (28) |
| 1.3 工程地震波层析技术         | (39) |
| 1.3.1 透射波层析成像         | (40) |
| 1.3.2 折射波层析成像         | (41) |
| 1.3.3 反射波层析成像         | (43) |
| 1.4 面波技术              | (44) |
| 1.4.1 面波类型            | (46) |
| 1.4.2 频散曲线            | (48) |
| 1.4.3 面波谱分析方法 (SASW)  | (52) |
| 1.4.4 多道面波分析技术 (MASW) | (53) |
| 1.5 桩基动态无损检测法         | (56) |
| 1.5.1 桩基的类型           | (57) |
| 1.5.2 桩基无损检测方法        | (57) |
| 1.6 地微动技术             | (66) |
| 1.6.1 常时微动的基本性质       | (66) |

|       |                    |       |
|-------|--------------------|-------|
| 1.6.2 | 常时微动的测量方法与数据处理     | (67)  |
| 1.6.3 | 常时微动的应用            | (69)  |
| 1.7   | 岩体声波探测             | (71)  |
| 1.7.1 | 岩体声波探测概述           | (71)  |
| 1.7.2 | 声波仪的基本原理           | (72)  |
| 1.7.3 | 岩体声波探测的工作方法        | (73)  |
| 1.7.4 | 声波探测在工程地质中的应用      | (74)  |
| 参考文献  |                    | (77)  |
| 2     | 电法及电磁法             | (79)  |
| 2.1   | 直流电阻率剖面法和测深法       | (79)  |
| 2.1.1 | 电剖面法               | (79)  |
| 2.1.2 | 电阻率测深法             | (88)  |
| 2.1.3 | 电测深曲线的定量解释         | (94)  |
| 2.1.4 | 其他类型的电测深法          | (94)  |
| 2.2   | 高密度电阻率技术           | (96)  |
| 2.2.1 | 高密度电阻率法的基本原理及系统结构  | (96)  |
| 2.2.2 | 野外工作方法技术           | (101) |
| 2.2.3 | 高密度电阻率法资料处理及解释     | (102) |
| 2.3   | 激发极化法              | (106) |
| 2.3.1 | 激发极化效应及其形成原因       | (106) |
| 2.3.2 | 激发极化特性及测量参数        | (108) |
| 2.3.3 | 几种规则形体的激电异常曲线      | (110) |
| 2.4   | 电磁法                | (112) |
| 2.4.1 | 瞬变电磁法              | (112) |
| 2.4.2 | 瞬变电磁法的野外工作方法       | (123) |
| 2.4.3 | 瞬变电磁法的资料整理和解释      | (126) |
| 2.4.4 | 甚低频电磁法             | (130) |
| 2.5   | 探地雷达方法             | (132) |
| 2.5.1 | 探地雷达的基本原理          | (132) |
| 2.5.2 | 探地雷达的野外工作方式        | (136) |
| 2.5.3 | 探地雷达的数据处理与资料解释     | (141) |
| 参考文献  |                    | (142) |
| 3     | 地球物理测井和放射性、重磁、地热方法 | (144) |
| 3.1   | 工程环境地球物理测井         | (144) |
| 3.1.1 | P-S 测井             | (144) |

|            |                            |       |
|------------|----------------------------|-------|
| 3.1.2      | 井径、井斜及井下电视 .....           | (147) |
| 3.1.3      | 井液电阻率测井及其应用 .....          | (153) |
| 3.1.4      | 放射性同位素示踪测井 .....           | (166) |
| 3.1.5      | 流量测井 .....                 | (169) |
| 3.2        | 核地球物理方法 .....              | (175) |
| 3.2.1      | 地面 $\gamma$ 辐射测量 .....     | (175) |
| 3.2.2      | 地表 $\gamma$ 辐射剂量测量 .....   | (175) |
| 3.2.3      | $\gamma$ 能谱测量方法 .....      | (176) |
| 3.2.4      | 空气中氡测量 .....               | (177) |
| 3.2.5      | 土壤氡气测量 .....               | (179) |
| 3.2.6      | X 荧光测量 .....               | (184) |
| 3.2.7      | 中子活化分析方法 .....             | (186) |
| 3.3        | 高精度磁力测量 .....              | (188) |
| 3.3.1      | 磁力仪 .....                  | (189) |
| 3.3.2      | 磁场梯度测量及微磁测量 .....          | (190) |
| 3.3.3      | 高精磁测数据的处理与解释 .....         | (195) |
| 3.4        | 微重力测量 .....                | (199) |
| 3.4.1      | 基本理论和概念 .....              | (200) |
| 3.4.2      | 微重力仪 .....                 | (202) |
| 3.4.3      | 野外工作方法 .....               | (203) |
| 3.4.4      | 微重力观测数据整理和资料的解释 .....      | (204) |
| 3.5        | 地温测量 .....                 | (209) |
| 3.5.1      | 地热异常 .....                 | (210) |
| 3.5.2      | 地温测量方法 .....               | (210) |
| 参考文献 ..... |                            | (214) |
| 4          | 工程与环境地球物理的应用 .....         | (216) |
| 4.1        | 地球物理方法在工程地质调查中的应用 .....    | (216) |
| 4.1.1      | 在水利工程中的应用 .....            | (216) |
| 4.1.2      | 在交通建设和维护中的应用 .....         | (219) |
| 4.2        | 地球物理方法地热与地下水调查综合方法应用 ..... | (225) |
| 4.2.1      | 地热调查综合方法应用 .....           | (225) |
| 4.2.2      | 地下水调查中综合方法应用 .....         | (228) |
| 4.3        | 地球物理方法在环境地质调查中的应用 .....    | (233) |
| 4.3.1      | 地下固体废料污染的监测 .....          | (233) |
| 4.3.2      | 地下水和地表水污染的监测 .....         | (235) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 4.3.3 核辐射污染与监测 .....        | (238) |
| 4.4 地下管线地球物理探测 .....        | (241) |
| 4.4.1 地下管线的分类和探测方法 .....    | (241) |
| 4.4.2 频率域电磁法探测地下管线 .....    | (242) |
| 4.4.3 探地雷达探测地下管线 .....      | (253) |
| 4.4.4 其他探测方法 .....          | (253) |
| 4.5 地球物理方法在地质灾害勘查中的应用 ..... | (255) |
| 4.5.1 崩塌滑坡地质灾害勘查 .....      | (255) |
| 4.5.2 地面塌陷勘查 .....          | (260) |
| 4.5.3 西安市地裂缝勘查 .....        | (261) |
| 4.5.4 其他地质灾害勘查 .....        | (263) |
| 4.6 地球物理方法在考古中应用 .....      | (265) |
| 4.6.1 地球物理方法遗址勘查 .....      | (265) |
| 4.6.2 地球物理方法古墓勘查 .....      | (265) |
| 4.6.3 地球物理方法水下考古 .....      | (269) |
| 4.6.4 地球物理方法与文物保护 .....     | (271) |
| 参考文献 .....                  | (273) |

# 绪 论

## 工程与环境地球物理的概念和范畴

工程与环境地球物理是应用地球物理的一个重要分支,是利用介质的物理性质差异来实现对工程与环境领域目标体的探测、检测和监测。进入 21 世纪,随着经济的发展以及人们对生活环境的质量和安全的重视,环境与工程领域的研究也越来越受到重视,促进了环境与工程地球物理的进一步发展和提高。环境与工程地球物理成果应用于环境与工程领域,发挥了越来越重要的作用。从世界发展的角度,工程与环境地球物理更加紧密地融入世界各国的城市建设、基础设施建设、环境保护与治理和国家安全等各方面。

应用地球物理是通过观测和研究各种地球物理场的变化来解决地质问题的勘查方法技术。在自然界,不同的物理作用具有不同的物理场,例如,在重力作用的空间有重力场;在天然或人工建立的电(磁)力作用的空间有电(磁)场;在波动传播的空间有波场等等。组成地球的不同的岩土介质往往在密度、弹性、电性、磁性、放射性以及导热性等方面会存在差异,这些差异将引起相应地球物理场的变化。这种与地下岩土介质局部变化有关的地球物理场变化,通常被称为异常场。应用地球物理勘探就是通过专门的仪器观测这些地球物理异常场的分布和变化特征,结合已知地质资料进行分析研究,推断出地下岩土介质的性质和环境资源等状况,从而达到解决地质问题的目的。

由于应用地球物理方法可以根据地面上地球物理场的观测结果来推断地下介质的变化,因此比钻探等其他地质勘查手段具有快速、经济的优点,已被各系统各部门广泛地采用,并成为一种不可缺少的重要手段。在各种应用地球物理方法中,根据所研究的地球物理场的不同,通常可分为以下几大类:①以地下介质密度差异为基础,研究重力场变化的方法称为重力勘探;②以介质磁性差异为基础,研究地磁场变化规律的方法称为磁法勘探;③以介质电性差异为基础,研究天然或人工电场(或电磁场)的变化规律的方法称为电法勘探(或电磁法勘探);④以介质弹性差异为基础,研究地震波场变化规律的方法称为地震勘探;⑤以介质放射性差异为基础,研究辐射场变化特征的方法称为放射性勘探;⑥以地下热能分布和介质导热性为基础,研究地温场变化的方法称为地热测量方法等。

工程与环境地球物理是与工程地质勘探和环境、水文等调查有关的探测方法技术。与探测金属矿(及非金属矿)有关的金属(及非金属)地球物理及探测石油及天然气有关的石油地球物理并列。工程与环境地球物理是以观测各种地球物理场的变化规律为基础开展研究的,因此,当采用应用地球物理方法来解决各种地质问题时,它必须具有一定的地质及地球物理条件,才能取得满意的效果。这些条件主要有:①探测对象与周围介质之间必须有明显的物性差异;②探测对象必须具有一定的规模(即其大小相对于埋藏深度必

须有相应的规模),能产生可观测的地球物理异常;③各种干扰因素产生的干扰场相对于有效异常场必须足够小,或具有不同的特征,以便能进行异常的识别。这些条件是应用地球物理工作能取得良好效果的前提。此外,在应用地球物理资料的解释中还存在多解性的问题,即对于同一异常场有时可得出不同的地质解释,这种情况往往是由于地质条件的复杂性和地球物理场理论自身的局限性造成的。为了克服这种多解性的影响,应尽可能地利用多种应用地球物理方法的成果,尤其是已知的地质资料,进行综合分析解释,以便得到可靠的地质结果。

由于工程与环境地球物理方法具有工作效率高、成本低等特点,被各领域广泛应用的重要勘查手段。在工程与环境调查中可用来解决很多问题,例如:

- (1) 测定覆盖层、风化带的厚度及基岩面的起伏形态;
- (2) 探测断层、裂隙破碎带及地下溶洞等地质体的空间分布;
- (3) 岩石动弹性参数(杨氏模量,剪切模量,泊松比等)的测定及岩体的波速分类和稳定性评价;
- (4) 大型建筑地基场地岩土分层和评价;
- (5) 滑坡、陷落柱、洞穴等的探测以及各类路基、水坝等病害的探测;
- (6) 灌浆质量和混凝土工程(如桩基)质量的检测评价与工程质量监测;
- (7) 地基及建筑物的常时微动观测;
- (8) 探测地下电缆、管道的分布及检查其有关腐蚀、渗漏等情况;
- (9) 地下水资源的勘查与评价;
- (10) 环境污染的探测与监测及有关地质灾害的监测等;
- (11) 考古探测和文物的保护与评价。

## 工程与环境地球物理特点

地球物理技术方法在工程与环境领域的应用具有非常悠久的历史,但一直没有形成具有系统性的学科。在20世纪60年代,工程与环境地球物理领域的论文开始较大量地出现在有关杂志上。1985年美国勘探地球物理学家协会(SEG)在统计年度工作量时,第一次把工程与环境地球物理作为一个单独科目划分出来。因此,可以把1985年作为工程与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工程与环境地球物理课程,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“地球物理应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)”,其研究范围既包括水文、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。

我国在20世纪50年代成立了水工环物探的有关部门,经过几十年的发展,相关部门还保留了相应的机构。但作为学术组织和学科的建设,水、工、环物探逐渐融合成为工程与环境地球物理学科,研究的内容也具有较大的扩展和增加。中国地球物理学会在1993

年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。对于传统的三个方向,在我国占主导地位的是工程地球物理,主要表现在大型和特大型工程的开工建设,需要进行大量的探测和质量检测工作,在工程地球物理方面的投资也较大。由于我国的干旱和半干旱国土面积达到 52%,水文地球物理方向的主要目标是找水。在西部大开发战略中,要建设和开发西部,找水和评价水资源是非常重要和关键的一环。环境地球物理是一个越来越受到重视的研究方向,具有巨大的发展潜力。我国改革开放以来,经济得到了巨大的发展,但同时环境也遭受了破坏。国家和地方政府已注意到这个问题,在经济发展的同时也注重环境的保护和灾害的治理,实现社会可持续发展。然而许多地方的污染仍十分严重,需要投入大量的资金进行评价和治理,这将成为环境地球物理发展的一个重要契机,同时也是地球物理人员为国家服务的最好的时机。我国是世界的文明古国,地球物理技术在考古研究中作用也越来越明显,取得了许多重要的成果。目前还有许多重要的古迹需要探测和寻找,需要开展大量的地球物理探测。

我国的工程与环境地球物理研究方兴未艾,生气勃勃,不仅服务于国家的建设、人民生活水平的提高,将来还要服务于国家安全。从环境与工程地球物理方法技术来讲,我国与世界发达国家的差距不大,具有雄厚的实力,我们应该有信心使我国环境与工程地球物理界走出国门,为世界服务。

在解决工程与环境问题时,地球物理方法具有独特的优点,是其他方法无法取代的。与传统的打钻取样分析相比,它能从地面遥测地下介质特性的三维变化,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,更具有代表性。钻孔不可能分布太密,例如在探测地下液态污染物时,要尽可能少打钻,以免造成层间的交叉污染,而利用地球物理方法则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。

经过多年的发展,工程与环境地球物理逐渐形成了如下的特点:

(1) 应用领域不断扩大,探测目标越来越多 大量环境与工程地球物理的应用实例和解决问题的方法,说明了环境与工程地球物理的应用领域在不断地扩大,内容涵盖了包括工程建设、水资源和地热资源勘查、灾害评价与预测、环境污染检测和监测、施工质量检测、考古研究等,并且其应用领域向生态农业、生物生长监测等方面发展,更加紧密地与人们日常生活和国家发展相结合。对于工程与环境地球物理勘查中存在的疑难问题,其中许多问题得到了较好的解决或获得了解决的具体思路和方法,如水库水坝的渗漏问题、夹心墙的检测问题、隧道的超前预报问题、活断层探测等。

目前国际上非常重视的 UXO (Unexploded Ordnance) 探测研究,成为环境地球物理的一个重要研究和应用方向,采用的方法包括电磁法、探地雷达、磁法、遥感方法等地球物理方法。

从应用目标看,工程与环境地球物理探测的主要目标也在发生变化,其变化的趋势是从常规的地层界面探测或目标物定位等逐渐向确定地层和目标物的属性方向发展,例如 Pullan et al. (2004) 采用高分辨率浅层地震方法配合井中地球物理资料,不仅应用于沉积物的界面划分,还分析沉积物的属性,提供地层的水文地质信息,推算含水量、孔隙度等参数,极大提高了地球物理方法在水文地质调查中的作用。

(2) 方法技术不断发展,探测的质量不断提高 以浅层地震方法为例,其主要是以

石油地震技术为基础而发展起来的,大部分技术都是借鉴石油地震勘探中的方法技术,在解决浅部问题时可能出现很大的误差。美国的 Don Steeples 曾于 1985 年和 1995 年在美国堪萨斯 Manhattan 以东 2 km 的蓝河河谷进行了两次实验,实验结果表明:在确定不同深度的地质界线中具有不同的效果。实验场地的钻探结果表明基岩的埋深在 15 ~ 18 m,其中一个钻孔的钻探获得基岩埋深为 35 m。1985 年的实验在确定 55 ms 的反射层,对应深度为 15 ~ 18 m 的基岩反射层,取得了很好的效果;但在确定 35 m 深的位置时,没有获得反射层。根据物性条件,该界面应具有较强的反射,由于仪器的动态范围和处理方法问题,没有取得较好的结果。1995 年的实验数据质量获得了改善和提高,通过对地震剖面不同的时间反射信号进行分别处理,获得了清晰的信号,有助于河谷形态的分析。这种实验和研究促进了浅部目标探测的方法技术和处理方法的发展。目前探地雷达的发展也从通用型向单一目标探测型的方向发展,形成了一套具有应用特色的方法技术。

(3) 工程与环境地球物理探测质量要求高 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,故对它们对工程与环境物探的要求是不尽相同的,对工程与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,那么后果是严重的,此项调查只能认为是失败的。

(4) 工程与环境地球物理探测分辨率要求高 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。

(5) 方法要求的灵活性与抗干扰特性 因为要解决的工程与环境问题较多地集中在工业中心和大城市,所以施工中往往受到人文噪音的干扰,如因地下管道(线)、电缆线、高压线、铁路等引起的磁干扰等、电磁干扰、工业交通振动的干扰等,因此需要采取相应的有效措施压制各种干扰。另外,工程与环境调查中野外作业空间(范围)通常较小,这都要求物探方法具有灵活性。

(6) 实时探测与信息多样化 工程与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。工程与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。

## 工程与环境地球物理方法选择

在石油地球物理勘探和金属矿地球物理勘探中,对目标的探测方法选择相对简单;而工程与环境地球物理中,目标与任务千差万别,目标物物理性质也有较大的差别。如何进行方法选择,是学生或准备从事该领域的工程技术人员必须解决的问题。我们列举以下几个领域中不同地球物理方法的应用适用性供参考(表 1-1)。

表 1-1 不同地球物理方法的应用适用性参考表

|                |            | 地震勘探 | 电阻率法 | 电磁法 | 探地雷达 | 磁法 | 重力 | 核方法 | 测井 |
|----------------|------------|------|------|-----|------|----|----|-----|----|
| 工程<br>勘察       | 岩土工程       | 1    | 1    | 3   | 2    | —  | —  | —   | 2  |
|                | 地下挖掘       | 1    | 2    | 3   | 1    | —  | —  | —   | 1  |
|                | 地基勘察       | 1    | 2    | 2   | 1    | —  | —  | —   | 1  |
|                | 地下管线和钢筋混凝土 | 3    | 2    | 1   | 2    | —  | —  | —   | —  |
|                | 路面评价       | 3    | 3    | 2   | 1    | —  | —  | —   | —  |
| 地质<br>调查       | 基岩界面       | 1    | 2    | 2   | 2    | —  | 3  | —   | 1  |
|                | 断层与裂隙      | 1    | 1    | 2   | 2    | 2  | 2  | 2   | 1  |
|                | 沉陷与采空区     | 2    | 1    | 2   | 2    | —  | 3  | 3   | 2  |
|                | 岩溶         | 2    | 1    | 2   | 2    | —  | 3  | 3   | 2  |
|                | 地质填图       | 3    | 2    | 3   | 3    | 2  | 1  | —   | —  |
| 水文<br>地质<br>调查 | 地下水填图      | 2    | 1    | 2   | 1    | —  | —  | 2   | 3  |
|                | 水井定位       | 2    | 1    | 1   | 2    | —  | 3  | —   | 2  |
|                | 渗漏探测       | 3    | 1    | 2   | 2    | —  | —  | 2   | —  |
|                | 含水层厚度调查    | 1    | 2    | 1   | 2    | —  | —  | 3   | 1  |
|                | 海水或咸水入侵调查  | 3    | 1    | 1   | —    | —  | —  | 2   | 1  |
|                | 含水层连续性评价   | 1    | 3    | 2   | 1    | —  | —  | 2   | 1  |
| 环境<br>地球<br>物理 | 废弃物、UXO、地雷 | 3    | 1    | 1   | 1    | 2  | —  | 1   | —  |
|                | 垃圾场和埋藏物探测  | 2    | 2    | 1   | 2    | 2  | —  | 2   | 2  |
|                | 土壤、地下水污染调查 | 3    | 2    | 1   | 2    | 2  | —  | 2   | 2  |
|                | 羽状物探测与研究   | 2    | 1    | 2   | 1    | —  | —  | —   | 3  |
| 矿产<br>区域<br>探测 | 表面覆盖物厚度探测  | 1    | 2    | 2   | 2    | —  | —  | —   | 2  |
|                | 砂砾石层探测与评价  | 2    | 1    | 2   | 2    | —  | —  | —   | 2  |
|                | 粘土层探测与评价   | 3    | 2    | 1   | 2    | —  | —  | —   | 2  |
| 考古<br>勘察       | 古墓勘察       | 3    | 1    | 2   | 1    | 1  | 3  | 1   | 2  |
|                | 历史考古       | —    | 2    | 2   | 1    | 1  | —  | —   | —  |
|                | 文物评价       | 3    | 3    | 2   | 1    | —  | —  | —   | —  |

表中：1 为非常适合；2 为较适合；3 为有一些应用；—为很少应用。

## 工程与环境地球物理发展趋势

根据工程与环境地球物理发展的现状和研究成果，表现出几个重要的趋势。

(1) 在工程与环境领域的应用中，提出了许多要求很高或是目前地球物理方法很难解决的问题，这就要求工程与环境地球物理的探测精度逐步提高、对传统方法进行更新或提出一些新的方法以满足实际需要。准确的地球物理信息，可服务于精确农业的生产和管理。在公共卫生和安全方面，如污染治理、地震减灾、全球气候变暖带来的其他灾害防治

等都需要环境与工程地球物理进行大量工作。

(2) 工程与环境地球物理的一个重要发展趋势是科学化,即根据一个探测实例提取一个科学问题进行研究,其研究成果反馈于工程与环境地球物理的应用,甚至是勘探地球物理问题的研究和解决。

(3) 在许多地球物理研究人员和工程技术人员的传统思维中,认为工程与环境地球物理相对简单、深度浅、容易取得较好的效果,然而目前这种认识在逐渐改变。因为工程与环境的探测深度通常不大,但其要求却非常高,而且方法技术的研究要求与油气地球物理勘探技术一样,难度越来越大。这对地理信息采集、施工质量、精细处理和解释都提出了新的要求。以反射地震勘探为例,在油气勘探中,勘探深度为 3000 m,地表 30 m 的起伏将采用各种方法进行校正和处理。在工程勘察中,勘探深度为 30 m,地表的 0.5 ~ 1 m 的起伏很少有人进行处理,可见资料相对误差较油气勘探大。

(4) 集团化与国际化的发展趋势。油气的勘探是集团化的施工,以前工程与环境地球物理工作一直被认为是单兵作战。几个人,并配备几台仪器就可以进行施工。受人为因素影响较大,施工质量和施工标准一直得不到保证,这种状况势必促进建立具有良好训练的高素质队伍进行施工,提高探测精度、取得好的探测结果。另一方面,伴随工程与环境地球物理的科学化发展趋势,需要进行人员的分工与合作。

# 1 测震技术方法

由于地震波具有较强的穿透能力，以及勘探中较高的分辨率，在工程与环境地球物理勘探中具有重要的地位。地震反射技术在石油勘探领域以及折射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的应用需求不断增长，更由于机械波的性质直接与工程质量密切相关，在工程勘探中具有不可替代的作用。测震技术如浅层地震反射技术、折射技术、工程测震以及面波技术等日益成熟，成为最重要的技术之一。

## 1.1 地震波基础知识

### 1.1.1 波动物理学基本概念

了解地震波有必要了解波动物理学的一些基本概念。一个是波的传播速度，另一个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之间的高度称之为振幅（图 1.1.1），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  $\lambda$  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。

$$E \propto A^2, \quad v = f\lambda, \quad f = 1/T \quad (1.1.1)$$

根据这些基本的关系，能够对一个地震记录进行分析。

求地震波动问题的解需要用到波动方程，其一维形式如式 (1.1.2) 所示，其中  $u$  是波动所引起的位移， $x$  是横向坐标：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.1.2)$$

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， $k$  是角频率， $-kx$  为相位。

根据费马最小时间原理，即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。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），

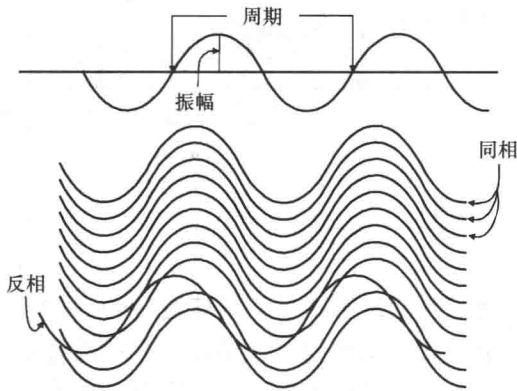


图 1.1.1 波动中的名词概念与  
波形同相、反相示意图

或者是渐渐地由塑性形变引起的不可恢复的损坏。

近地表地震技术通常研究的是离震源几米到几十米地方的弹性变化情况。在离震源较近的地方，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。

为便于研究地震波的目的，常假设除了离地震震源非常近的地方以外，其余处处为弹性形变。

### 1.1.2 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的波；另一类为面波，它的传播往往局限于介质表面下数个地震波长的范围内。

#### 1.1.2.1 体波（P波和S波）

图 1.1.2 显示了体波的传播路径，图 1.1.3 给出了体波在两层介质间传播的时间-距离示意图。

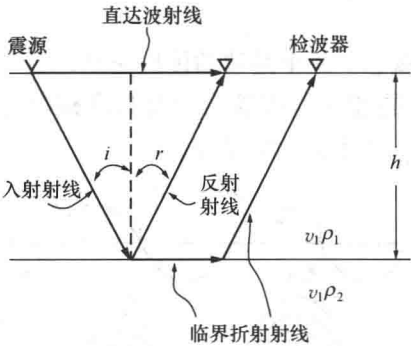


图 1.1.2 体波传播路径示意图

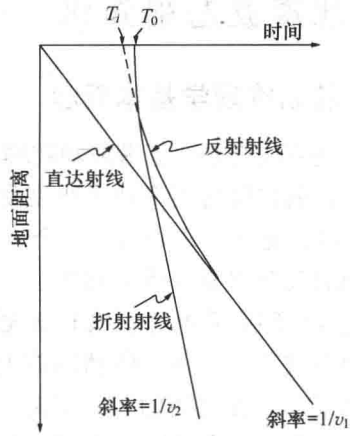


图 1.1.3 体波在两层介质间传播的时-距示意图

体波的两种形式是：压缩波（P）和剪切波（S）。P波是体积形变（即拉伸与挤压形变）在介质中的传递，该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波满足声学中一切物理定律，其传播方向和质点振动方向一致，它是同一介质中传播速度最快的波。P波的传播速度为：

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1.1.3)$$

式中： $K$ 为体积模量； $\mu$ 为剪切模量； $\rho$ 为波的传播介质的密度。

常见介质的P波速度情况如表 1.1.1 所示。

横波（S波）又称为剪切波，它的传播方向垂直于质点的振动方向，其在相同的介质中的传播速度低于纵波的速度。

S波通常用于浅层工程探测中，如在井间观测以获得土壤和地基的剪切模量。S波地震勘探常用于岩性确定、断裂探测以及流体含量的现场确定。S波速度的公式如下：

表 1.1.1 常见介质的 P 波速度

| 介质 | 速度/ (m · s <sup>-1</sup> ) | 介质  | 速度/ (m · s <sup>-1</sup> ) |
|----|----------------------------|-----|----------------------------|
| 空气 | 340                        | 水   | 1420 ~ 1670                |
| 土壤 | 180 ~ 455                  | 砂岩  | 1520 ~ 4550                |
| 砂  | 455 ~ 910                  | 页岩  | 2120 ~ 3940                |
| 湿砂 | 605 ~ 1820                 | 花岗岩 | 5150 ~ 6060                |
| 粘土 | 910 ~ 2120                 | 石灰岩 | 3640 ~ 6060                |
| 砾石 | 1520 ~ 2120                | 盐岩  | 6060 ~ 6670                |

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.1.4)$$

由于流体没有剪切力，其剪切模量为零，即横波在流体中不能传播。因而可以利用横波在流体中无法传播的现象来探测地下溶洞。

横波与光的传播非常相似，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不同极化现象，这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。

图 1.1.4 用来表达不同种类波。

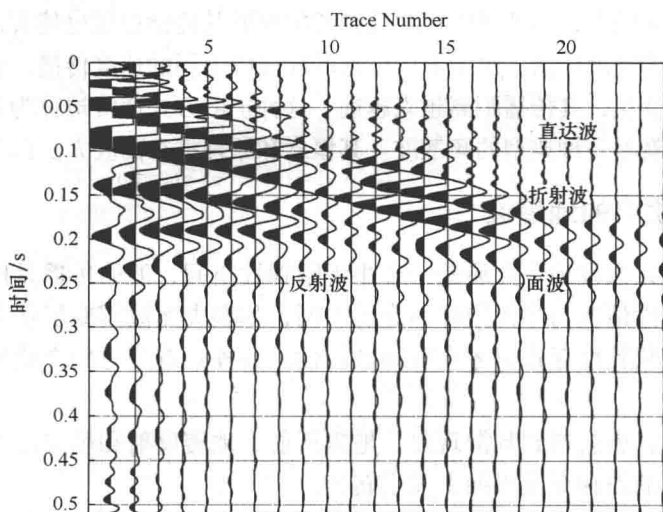


图 1.1.4 波的不同类型示意图

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。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，可以得到：

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\left(\frac{k}{\mu} + \frac{4}{3}\right)} \quad (1.1.5)$$