



陆地声纳法

Landsonar

钟世航 孙宏志 王 荣 著

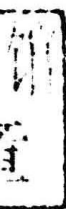


中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

陆地声纳法

Landsonar

钟世航 孙宏志 王 荣 著



中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

陆地声纳法/钟世航,孙宏志,王荣著. —北京:中国科学技术出版社,2012. 4

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6074 - 9

I. ①陆… II. ①钟…②孙…③王… III. ①陆地 - 声纳
IV. ①U666. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 071091 号

责任编辑 鲍黎钧

封面设计 李 丽

责任校对 刘洪岩

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010 - 62173865

传 真 010 - 62179148

投稿电话 010 - 62176522

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16

字 数 200 千字

印 张 11.5

版 次 2012 年 4 月第 1 版

印 次 2012 年 4 月第 1 次印刷

印 刷 北京长宁印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6074 - 9/U · 82

定 价 78.00 元

(凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

前 言

陆地声纳法作为弹性波反射一种新的技术方法推出和应用已有 20 余年,多项技术创新填补了国内外浅层勘探领域中的技术空白,并于 2010 年通过了由中国岩石力学与工程学会严格规范的技术成果鉴定。该技术成果在预警预报、防灾减灾、岩溶探查、城市物探、工程质量检测等多个建设领域中被推广应用,2008 年已被列入《铁路隧道超前地质预报技术指南》(铁建设[2008]105 号行业标准规范)使用的技术方法之一。是具有我国自主知识产权的技术成果。作者和一些推广应用者写了不少介绍的文章,但缺少较全面介绍的材料。不少同行和学生希望能有一部教材型的专著,以便于对此方法作深入的学习和研究。为此,笔者在长期的技术研究及应用之余对资料进行整理提炼编写了本书。

本书由钟世航、孙宏志和王荣合著,其中第三章陆地声纳方法的特点及正演理论、第六章数据资料解释、第七章陆地声纳法的应用等章由钟世航执笔;第二章地震勘探的基本理论、第四章仪器设备及软件由钟世航和孙宏志联合编写;第五章陆地声纳法的补业工作由王荣执笔;第一章绪论由钟世航和王荣合写;结语由钟世航和王荣合写。此方法是一项实践性很强的技术方法,许多创新围绕着解决方法在应用中的问题发展而来。

本书按照理论、仪器设备、软件、现场数据采集、数据处理和资料解释、工程应用的顺序编写。读者可以在读完绪论,阅读第一、二章同时可参照后面章节的实例,再回过来读仪器、设备、软件、其他技术,可有更深的理解,然后再在阅读实例中去体验。对于已经习惯了

传统地震反射法工作理念的同仁们应先放下已有的一些思维方式，才能更好地接受新方法的理论和有关技术和特点。

本书编写过程中王泽峰在文整制图方面下了大工夫，并对其内容提出了好的意见。王荣在图文的校对和文本的整理及完善上发挥了好的作用。

由于水平有限、本书难免会出现错、漏的地方，希望得到各位专家、读者的指正和批评，以利于再版中得到修正。

作 者

2012年3月7日

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 陆地声纳法简述	(1)
1.2 回顾	(2)
第二章 弹性波勘探的基本理论	(8)
2.1 弹性波勘探的理论基础	(8)
2.1.1 弹性介质及其物理模型	(8)
2.1.2 三维波动方程、叠加原理和初始条件	(9)
2.1.3 弹性波在无限理想弹性介质中传播的特点	(11)
2.1.4 弹性波运动学的基本理论和概念	(15)
2.1.5 弹性波在两种不同均匀介质分界面上的反射和透射	(19)
2.1.6 弹性波在多层岩层中的传播	(30)
2.1.7 弹性波在岩石中的传播速度及其影响因素	(35)
2.2 弹性波的运动学	(36)
2.2.1 反射弹性波的运动学	(37)
2.2.2 弹性折射波的运动学	(44)
第三章 陆地声纳方法的特点及正演理论	(49)
3.1 陆地声纳方法的优点	(49)
3.2 方法本身带来的难题	(50)
3.3 正演模拟	(50)
3.2.1 数值模拟	(51)
3.2.2 物理模拟	(53)
第四章 仪器、设备及软件	(57)
4.1 概述	(57)
4.2 LDS—4 陆地声纳仪及检波器	(58)

4.2.1	主机	(58)
4.2.2	超宽带检波器	(60)
4.2.3	三分量检波器	(62)
4.3	激震设备	(63)
4.3.1	激震杆	(63)
4.3.2	磁致伸缩激振器	(63)
4.4	采集软件	(64)
4.5	数据、资料处理软件	(66)
4.6	辅助软件	(68)
4.6.1	在隧道地质预报时计算反射面三维空间参数定位方法	(68)
4.6.2	在地面地质勘查时计算反射面三维空间参数定位方法	(70)
4.7	波速测定	(70)
4.7.1	隧道施工地质预报测定方法之一	(70)
4.7.2	三维建模计算法	(72)
4.7.3	用微分电测深与陆地声纳法结合测取波速	(73)
第五章	陆地声纳法的外业工作	(77)
5.1	概述	(77)
5.2	仪器及设备的检查及参数的设置	(78)
5.2.1	仪器及设备的检查	(78)
5.2.2	采集程序中参数的设置	(79)
5.3	地质资料及设计资料的搜索及分析	(79)
5.4	测线、测点放样	(80)
5.5	隧道施工地质预报	(80)
5.5.1	现场工作的基本要求	(80)
5.5.2	测线布置	(81)
5.5.3	数据采集	(81)
5.5.4	波速的测取	(83)
5.5.5	现场情况的记录	(84)
5.6	地面勘查	(85)
5.6.1	现场工作的基本要求	(85)

5.6.2	现场踏勘	(86)
5.6.3	测区范围的确定	(86)
5.6.4	测网、测线、测点距的设计	(86)
5.6.5	测网、测线放样及地形测量	(86)
5.6.6	数据采集	(87)
5.6.7	地面勘查时波速的测取	(92)
第六章	资料解释	(93)
6.1	概述	(93)
6.2	时间剖面的分析	(94)
6.2.1	同相轴的概念及反射波对比	(94)
6.2.2	时间剖面的定性解释	(94)
6.2.3	波速确定、选择和调整	(94)
6.2.4	层面及断层位置的偏移处理	(95)
6.2.5	静校正	(96)
6.2.6	频谱分析	(97)
6.3	隧道施工地质预报	(98)
6.3.1	数据处理及资料解释流程	(98)
6.3.2	定性解释	(98)
6.3.3	定量解释	(102)
6.4	地面地质探查	(107)
6.4.1	数据处理及资料解释流程	(107)
6.4.2	定性解释	(107)
6.4.3	定量解释	(109)
6.4.4	成果表达	(111)
第七章	陆地声纳法的应用	(114)
7.1	在地面探查中的应用	(114)
7.1.1	陆地声纳法在地面浅层勘查方面的特点和优势	(114)
7.1.2	浅层高分辨率探查	(115)
7.1.3	山区、山地复杂地形地质条件下的探查	(119)
7.1.4	城市闹市区浅层勘查	(124)

7.1.5 岩溶探查	(130)
7.2 在隧道施工地质预报方面的应用	(137)
7.2.1 隧道中发生的主要地质灾害	(137)
7.2.2 陆地声纳法在隧道施工地质预报方面的优点	(140)
7.2.3 创新点	(141)
7.2.4 断层、岩脉、溶槽等的预报实例	(141)
7.2.5 溶洞、溶隙、暗河及岩溶裂隙水	(149)
7.3 其他防灾预警方面的实例	(154)
结语	(162)
致谢	(163)
参考文献	(164)

第一章 绪 论

1.1 陆地声纳法简述

陆地声纳法是“陆上极小偏移距(震-检距)超宽频带弹性波反射连续剖面法”的简称,加上其采集系统具有的超短余振的特点,构成了此方法的基础,并形成了一套完整的方法和配套的专用仪器及设备。其精华在于超宽频带的激发和接收(带宽可达 2000 ~ 3000Hz)和近于零的极小震-检距。它是弹性波反射法的一个新品种,是由地震反射法、水声勘探法、探地雷达、声波法杂交而成,并吸收了计算数学、测振技术等形成的新方法,因此具有跨学科技术的杂交优势,并引出它的一系列优点和要突破的难点,使其在浅层勘探领域中和 0 ~ 200m 的横向探查(如隧道、巷道中向前方探查)取得了前所未有的应用效果,解决了城市物探中的抗常规干扰、精细探查、精细定位的理想要求。

陆地声纳法是弹性波反射法的一个新方法,它是以弹性波勘探的基本理论为基础的。地震勘探是从探查石油的需要而产生的,经过几十年的发展已很成熟。但在 20 世纪 80 年代将它应用到浅层探查中却遇到了诸多难题,这就出现了创造新方法的需要。在克服了若干难点之后方法应运而生。

陆地声纳法的基本特点是:

1) 它采用接近于零震-检距的方式工作,在做隧道施工地质预报时震-检距可小到 30cm 左右,在挡墙质量和测隧道岩体松弛带检测时更可小至 5 ~ 10cm,在地面勘探时震-检距可小到 1 ~ 2m,因实际上无法实现零震-检距工作,所以常称为极小震-检距、极小偏移距,实际上可以在激发点两侧各放一个检波器,作两道排列。

2) 它采用锤击作震源,检波器可以不必固着,与接触面接触按紧即可,在岩石面、混凝土表面上则用凡士林耦合按紧。

3) 它的接收系统具有极宽的频带,并在 10Hz ~ 4kHz 宽的频带范围内,接收系统不放大也不压制任何频率的波,而锤击和爆炸震源激发的子波也有很宽的频带。这样就可以使用很宽的频带工作。

4) 通常用垂直叠加来提高信噪比。

5) 接收系统具超短余振的特性。在激震子波仅有一个周期的情况下,通常接收到的反射波也仅有一个周期;同时,检波器的接收方向性很强,使得接收角小。

6) 采用分窗口带通滤波的方法,提取不同频段的信号的时间剖面,并将不同频段的时间剖面作对比;10Hz ~ 4kHz 宽频带的接收在城市物探工作中可不受人行、车流等常规干扰,可自由分离提取工作频段。

7) 在作隧道掌子面向前方探查或地面测波速时,采用十字形两条交叉测线排列,此两条测线作被测物体的空间定位坐标。

陆地声纳法作为弹性波反射法的一个新方法,其理论基础与地震勘探的基本理论是一样的。

1.2 回顾

地震勘探是利用人工方法激发弹性波来进行勘探的方法,近 20 年来也发展出利用天然的地震动作勘探的方法。1914 年在泰坦尼克号悲剧之后,Reginald A. Fessenden 申请了“水声定位矿体的方法及仪器”专利(美国),1914 年 Ludger Mintrop 在德国设计了一种地震仪,1919 年 Mintrop 申请了“探测岩石构造的方法”德国专利,提出了人工(炸药)激震、接收弹性波作勘探的方法,1920 年 John William Evans 和 Willis B. Whitney 申请了英国专利“探测地壳内部特征的方法及其改进”,提出了地震反射波法。

1921 ~ 1926 年间开始了用地震反射法进行石油勘探的试验和生产活动,检波器由 3 道增加至 4 道、6 道至 24 道,60 年代末被 48 道取代,以后更发展出 240 道,至今使用 1000 道或更多道数。海上勘探甚至有用到万道以上的。这是由于石油勘探的深度大,需要钻孔,在钻孔中放置炸药爆炸激震。采用一点激发,多道接收,经济上较合理。多道的采集必然使震 - 检距大,与地震反射法的自激自收(震 - 检距接近于零)的理论要求已是很远了。为此,发展出一系列处理技术,如叠前偏移、叠后偏移,反褶积等,以及研究转换波等的一系列成果。

20 世纪 80 年代,浅层地震反射法应用到工程物探领域时遇到了诸多困

难。第一个困难,是为勘探浅层,偏移距(震源至第一个检波器距离)小,直达波、面波、转换波的干扰比石油地震反射更突出,先至的直达纵波、直达横波、声波、折射波、面波等造成对反射波的极大干扰;若偏移距加大,则会使入射波和反射波角度很大,形成宽角反射。宽角反射有它的一系列问题,而且对浅层反射法来说,宽角的入射及反射波路径上穿过地表不均匀的第四系层距离长,波速不均匀,干扰很大;第二个困难,是分辨率不够,环境与工程需要浅层勘查,要查找的是较浅、较小的物体,分辨较薄的层,常规地震反射法的频率偏低,例如,石油地震可使用约 40Hz 的反射波,浅层地震的反射法可激发、接收达 200 ~ 250Hz 的波,但这还不够高,要分辨 1m 大小或 1m 薄的层需要更高的频率;第三个困难,是浅层勘探往往是工作场地狭小,如隧道地质预报,掌子面仅宽几米到十余米,不能采用较长测线排列,也不能利用常规地震反射法的水平叠加,叠前偏移等处理方法;在房屋集中地区或地形很差的山区,也不能采用直线的排列。80 年代就有不少同行设想过零震—检距单点连续剖面,但首先遇到在采用单道连续剖面排列时,各测点(道)的激发强度和检波器与地面、岩面的耦合极不一致的困难,各道接收到的同一反射面的反射波振幅相差极大,无法汇成可用的时间剖面。其次是难以突破采集高、宽频带的理论和实现的困难。陆地声纳法的设计和实现是国民经济建设的需要而促成,是直接源于隧道施工时在掌子面上做前方不良地质的预警防灾的预报需要。因为隧道地质预报要在狭小的掌子面上布置测线和排列,要探查溶洞,既要探较厚层的岩层,又要探 1 ~ 2m 宽的断层并定出厚度,还要求更高的频率和分辨率分辨薄层和小的地质体,因此迫切需要解决超宽带的激发和接收的问题,以此来满足工程施工中对地质小尺度精细探查的迫切需要和地质体的细观研究。80 年代中期,钟世航在设法突破隧道施工地质预报技术时,首先要解决的第一个难题是,在采用单点激发—接收的排列方式时,各点的激发能量与检波器耦合不一致,各测点接收到的同一反射面的反射波能量相差很远,各道的时间曲线如何汇成一张时间剖面图;钟世航于 1989 年,提出了用道间均衡、振幅归一化的设想,1991 年孙宏志编程在“286”笔记本计算机上实现了。第二个难题是本方法的精髓所在——超宽频带接收的问题。笔者首先在理论上阐明,尽管探查到几百米远(深),高频成分被大地吸收强烈,但高频反射波并没有全部被吸收掉,只要在检波器和仪器方面下工夫,是能够把它们捕捉得到的。1989 年设计时突破了第一个难点后,于 1989 年三季度、1990 年四季度,分别由铁道科学研究院通过可行性研究评审。1991 年陆地声纳法的研究被列为 1991 ~ 1995 年

铁道部重点研究项目“隧道开挖工作面前方不良地质预报”的子课题,并作为 1992 ~ 1995 年国家自然科学基金项目“陆地声纳方法的理论和实际应用的研究”(No. 49274215)。

1991 年开始研制接收仪器、检波器,制定现场采集方案,编制采集和数据处理软件,同时在理论和现场试验中证明了在做 200m 以内深度或超前距离的浅层勘探时,高频的反射波是存在的这个认识之后,研制了特殊的检波器和接收仪器,突破了第二个难点。1991 年 5 月进行第一次现场试验:在北京西单闹市区的路口马路边人行道上、10:00 ~ 14:00 时车流密度大的时间,探查正在开挖施工的地铁西单车站,并获得了成功,方法基本实现、成型。

作为部科研项目的第一次现场工作,1991 年 10 月进行了侯月铁路的云台山隧道 1#截煤点的预报。云台山隧道穿过煤系地层,附近的煤矿在这个煤系地层中遇到高含量的瓦斯。为保证施工安全,需要预报隧道遇到煤层的位置(截煤点),之后在合适的距离外钻孔抽排瓦斯。在隧道底铺碎石的路面上布置了纵向剖面向下探查,并与掌子面上做前方探查相结合,探查了在掌子面 60m 外的截煤点的里程并做了预报。钻孔钻探及隧道开挖结果证实预报的里程与实际截煤点里程仅差 1m 左右,取得了第一次预报的成功。

在云台山隧道做第一次地质预报后,为取得更多资料并对预报结果更有把握。作者立即带领队伍到太原附近的古交矿务局西曲矿的矿井中寻找已知条件做探索。对断层和陷落柱的实测,取得了已知条件下的实例数据及对方法本身更深的了解和经验积累,对云台山隧道截煤点的预报结果更有信心。特别是对已知陷落柱的实测(陷落柱是煤层底板下方有岩溶发育,形成降落漏斗状,使上方的岩体坍塌,在陷落柱中充填的破碎岩块,泥水等),由于陷落柱充填的多是碎块,对宽频带的弹性波的反射和散射规律与岩体破碎带很相似,这就给了我们在探查预报断层影响破碎带和剪切破碎带及其他破碎岩体方面提供了有益的已知条件。

在 1992 年 6 ~ 7 月间,课题组全部 6 个课题,5 种方法,十多个单位,近 50 人的队伍云集云台山隧道,做“关门”断层的预报。依据一年多的研究与包括煤矿矿井等多个工程的实践经验,“陆地声纳法”先做了预报,其中包括 60m 内未见主干断层,60m 内有三条小断层,并定出了其大致出现里程。但其他几个项目组在作出预报之后,即离开了现场。他们的预报开挖发现发生了错误。陆地声纳组则坚持留在了工地,并做了第三次探查,预报了主干断层的位置、产状,开挖结果证实第一次预报的 3 条小断层实际是一条断层和两条大节理,位置与预报相差仅 1m,这些地段开挖时隧道拱部坍塌,设计

方变更了围岩分类并加强了支护。破碎带出现的里程也与预报一致。主干断层出露里程与预报差1~2m,宽度为2m,比预报的4m要窄。由于大多数课题撤离了现场,施工单位极为不满,有关领导表示,科研允许失误,即使预报错了也不是严重问题。但预报后撤离而不去观察实际情况,预报对了也无法总结提高,错了也无法总结经验并作出改进和再作一次探查预报,这不是严肃的态度,于是宣布,除陆地声纳组外其他子课题一律不欢迎再进工地。这确实是一个教训。由于这个事件,整个课题几乎被撤销,只是由于陆地声纳预报的基本正确,陆地声纳组在现场坚持到底,后来才改变撤销课题的意见,课题继续进行。

此后,作者又在开滦矿务局的马家沟矿和荆各庄矿和淮北矿务局的朔里矿、海孜矿,进行多次试验研究,开展了物理模拟试验和数值模拟试验。并进行了地面勘察方面的应用或试验。

1994年在南昆铁路的铝厂隧道、羊寨隧道、干桥隧道,配合施工作地质预报,主要目标是断层,岩溶的探查预报。由于预报正确,及时指导了施工,加上铁道部第一设计院用地震反射负速度波法(隧道VSP)在米花岑隧道、康华隧道的工作,被授予南昆铁路优秀科技成果奖一等奖。

1995年5月,作为隧道地质预报的课题之一“高频反射法(陆地声纳)在隧道掌子面前方不良地质预报”通过了铁道科学研究院组织的成果鉴定,1995年底,作为铁道部“隧道施工工作面前方不良地质预报”总课题的一部分,通过了部级鉴定。

1995~2000年,陆地声纳法作为当时最长的铁路隧道(长18km并行的两条隧道)秦岭隧道的攻关课题的重要方法,投入“从II线(平行导坑)探I线(TBM全断面掘进的正洞)中断层等不良地质”的科研工作,并取得了成功。

从1994年以来,作为生产工作陆地声纳法投入了多个隧道地质预报工作。与此同时,陆地声纳法在地面上做浅层地质勘查的岩溶探查、工程质量检测等方面也做了大量工作,使它的优点在更广的范围内得以发挥。

2000年之后,陆地声纳的发展基本上通过发明人钟世航及志同者(王荣、孙宏志等)以个人力量和资金投入系统的研发,在长期努力中得到社会许多单位和个人的支持与协助,并通过承接生产任务的有利条件进行各种试验、实践和提高,并下力量突破一些关键性的技术,如波速测量、反射面偏移等,取得长足的进展。

2001年起集中力量在浅层高分辨率勘查进行了开发:2002年,首先在

广州白云新国际机场进行探查溶洞的试验,安排了 11 个钻孔的验证。2002 年在陆地声纳原理基础上发明了新型的水声勘探仪,2002 年在长江武汉阳逻段、2003 年在(南通)苏通大桥做了实测,同年申报了发明专利,2004 年 11 月 17 日授权(专利号:ZL021208131,发明专利证书号 108017)。2004 年在舟山海岛上用陆地声纳做跨海大桥桥址勘查,这是继 1999 年在贵州册亨石油勘探区做较长陆地声纳法剖面探查浅层地层结构和波速,为石油地震静校正提供参数之后的又一次工作量较大的山地探查工作;2006~2008 年在四川锦屏二级电站隧道做侧壁和隧道底下小溶洞探查;2006 年在沪蓉西高速公路十里排路段探查浅层溶洞;2009 年承接了济南泉区地铁前期地质探查,探查是在交通繁忙的闹市区进行的,测线长度超过 25km。

2010 年承接了广州花都广深高速公路扩建工程试验区查找单个溶洞、溶蚀断裂和基岩面溶槽的物探工作,以陆地声纳法为主,微分电测深和孔间电阻率成像和充电法测地下水流向等方法配合,打了 19 个钻孔验证。2011 年、2012 年又承接了广西岑溪—水高速公路岭脚隧道突水涌泥原因地质探查和湖北鄂州地面下陷区岩溶探查等任务。

与此同时,在推广用陆地声纳法做隧道施工地质预报的工作中,又做了大量的工作。先后在宜—万铁路、沪蓉西高速公路、莱芜高速公路、云南富广及广砚高速公路等的隧道中做地质预报,特别是 2006~2009 年围绕北京的京平高速公路大岭后隧道、京包高速公路德胜口隧道、北京六环线卧龙岗隧道等的 100 余次施工地质预报实践作为重点,由发明人带领技术队伍并亲自操作各个工序环节中实际工作,进一步研究和深化有关技术,使陆地声纳法又上了一个台阶;2006 年和 2008 年解决了实测各层波速的理论和

技术。

这几项工作的成功及技术的进展,反映了陆地声纳法在浅层高分辨勘查中已趋于成熟。

在 2006 年由山东大学岩土中心组织申请的国家自然科学基金重点项目“高压大流量岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报和治理”(50539080)、2007 年国家“863”项目重大交通基础设施核心技术“隧道施工期大涌水等地质灾害超前实时预报系统与装备”(49274215)的支持下,陆地声纳法也在隧道施工地质预报方面得到进一步的发展。

此方法的数据处理软件,从 1991 年的 1.0 版本不断发展,推出了 2.0、3.0、3.2 版本,2002 年由以前采用 DOS 系统改为 Windows 系统,推出了 4.0、5.0、5.2 版本,2005 年推出了 6.0 版本,2006 年推出 7.0 版本。目前,随着

方法、技术的发展和工作的需要还在不断地升级提高。

数据采集的第一代仪器由铁道部科学研究院与中国矿业大学北京研究生部联合,1991年初研制成功型号为FY-20的浅层地震仪(陆地声的仪),1991年5月通过了煤炭地质总局鉴定并由北京计算机五厂生产出售。2000年年底,由发明人出资以全新的仪器构想研制了第二代陆地声纳仪样机。2001年初研制了第三代陆地声纳仪LDS-1(16位)并定型,2003年年初研制了第三代陆地声纳仪LDS-1A(16位)并定型。

2007年发展为新研制的LDS-3(三代B型,16位)并定型;LDS-1于2005年开始推广,进入市场。2009年研制成功第四代陆地声纳仪LDS-4(18位)。

方法不断改进、发展,作者对此方法的认识、掌握上也不断提高。在综合物探方法方面、物探与地质结合等方面是也取得了大进展,使技术迈进精细探查阶段。

作为一种新的物探方法,需要经过20年左右的发展,经过大量工程和多个推广单位的实践应用,不断积累经验,不断改进发展才能成熟起来,也需要有国家建设和生产安全、预警报警、防灾减灾等方面的需求为动力。长期以来,陆地声纳法的发展得到了与其学科相关学会的高度关心和支持,并于2010年通过了由中国岩石力学与工程学会严格规范的技术鉴定,鉴定认为:陆地声纳法的技术属于国内外首创,它在隧道施工中探查断层破碎带、溶洞等方面,以及在城市地面浅层勘查方面达到国际领先水平,有很好的推广价值和广阔的应用前景。

本书就是希望对此方法做一个较全面的介绍,使更多的物探或地质工作者能掌握和应用陆地声纳法,使浅层物探和隧道地质预报多一个好武器,使探查技术迈进到精细探查的新阶段,为我国国民经济服务,为工程物探和弹性波勘探技术的发展贡献一份力量。

陆地声纳法及仪器,从1989年开始研发(包括方法和仪器),钟世航与孙宏志紧密合作,王荣也倾注了几乎全部精力投入到长期而艰苦的工作中。在研究过程的前期,中国矿业大学北京研究生部的宁书年教授(钟世航的同班同学)、吕松棠教授、苏红旗副教授,以及铁道科学研究院铁建所当年课题组成员杨峰、高金喜、高杰、李少新等都参与了很多工作,后期工作中,张大洲、王香岚、吴德胜、陈国立、闫亚丽和王泽峰、李勤、王筱筱等都作出了贡献。在此一并致谢。

第二章 弹性波勘探的基本理论

2.1 弹性波勘探的理论基础

陆地声纳技术通过自激自收方式采集地震反射波信号。信号波扰动依据弹性波传播理论规律在地下岩石介质中传播。弹性波传播理论规律主要通过波动方程进行描述,介质中传播的各种弹性波都是波动方程的特定的解。

2.1.1 弹性介质及其物理模型

根据力学性质可以将固体分成弹性体和塑性体两类不同性质的物体。任何一种固体,受外力作用后它的质点就会产生相互位置的变化,使固体体积大小和形状发生变化(统称形变)。外力取消后,由于内力起作用,其结果使固体恢复到原来的状态,这就是所谓的弹性。如果外力取消后能够立即完全地恢复为原来状态的物体,我们称它为理想弹性体,又称为完全弹性体。反之,若外力去掉后,固体还保持其受外力作用时的形态,我们称这种固体为塑性体。地震勘探所工作的对象都可近似的当做理想弹性体来研究。

当外力很小且作用时间很短时,大部分固体可以近似地看成理想弹性体。反之,在很大的作用力下或力的延续时间很长,则多数固体都显示为塑性,甚至被破碎。

层状介质物理模型(包括界面是水平面、倾斜面、曲界面以及地层是厚层或薄层)是陆地声纳勘探中最常用的物理模型,但是它们仍然是实际介质的一种近似。大多数情况下,在自然界,特别是考虑浅层勘探时,介质不是均匀的。例如,沿层面方向的物理性质和垂直层面方向的物理性质不同,这种现象称为介质的各向异性。又如,第四系层由于沉积和冲积时的环境,泥土、泥层沿层的水平不同方向也有各向异性。