

博士学位论文

隧道地质灾害超前探测方法研究

作者姓名：王齐仁
学科专业：地球探测与信息技术
学院(系、所)：信息物理工程学院
指导教师：何继善 院士

中南大学
2007年12月

分类号 VDC_____

密级_____

博士学位论文

隧道地质灾害超前探测方法研究

The Study of Advanced Detecting Methods
on Tunnel Geological Hazards

作者姓名：王齐仁
学科专业：地球探测与信息技术
学院(系、所)：信息物理工程学院
指导教师：何继善 院士

论文答辩日期_____ 答辩委员会主席_____

中 南 大 学
2007 年 12 月

摘要

隧道属于地下建筑工程,施工中常遇到各种不良地质地段,突泥、突水、瓦斯突出、岩爆等灾害性地质现象(即隧道地质灾害)时有发生。随着我国隧道工程数量、规模不断扩大,深、大、长隧道增加,施工过程中遇到的工程地质、水文地质条件越来越复杂,隧道地质灾害超前探测的理论和实践研究意义重大。

超前探测以介质物理性质及结构差异为基础,是地球物理探测方法在隧道、地下井巷、采场等工作面上的运用,通过观测地下物理场的分布及其变化规律来研究工作面前方是否存在地质异常以及地质体赋存状况及规模。

论文以隧道地震预报(Tunnel Seismic Predication)和探地雷达(Ground Penetrating Radar)的基本理论、技术方法为基础,结合其在超前地质预报中的实践应用开展研究。阐明了隧道地质灾害体的主要类型、成因、地质与构造特征及物理力学性质;基于层状地质模型和隧道地震反射法的基本原理,推导并研究了多层介质反射波时距曲线的特点;用Richer子波和正弦指数衰减子波模拟了多层介质模型的合成记录,从调谐厚度与调谐厚度差出发,讨论了地震波对薄层结构的分辨能力,剖析了入射角和界面“空间角”对反射系数的影响。在此基础上,总结提出了资料分析解释的基本准则,介绍了TSP203超前地质预报系统的特点,结合工程实例讨论了影响探测效果的主要因素;设计了一种“赤道组合检波观测系统”,阐述了其基本原理和实践方法,为后续反演叠代提供了精确的初始速度参数。

以探地雷达法的基本原理为基础,利用时域有限差分(FDTD)理论,把带时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为差分格式,采用中心差近似代替 Maxwell 方程组中的微分算符,得到二阶精度的场值抽样,以时间递推的方式直接模拟电磁作用过程;运用梅-方超吸收边

界条件对二层介质、圆柱体介质及其组合进行多种模型的正演模拟；黔桂铁路新线隧道的探测成果证明了这种模拟方法的合理性和正确性；在此基础上，总结了各种不同岩层、岩溶雷达图像的一般规律，讨论了影响 GPR 探测效果的主要因素和关键技术。

理论研究和实践表明，TSP 方法主要反映岩石的力学性质，属长距离地质预报，对层状介质的探测效果较好，对小型溶洞探测效果不够理想，对远距离解译的精度不够高；GPR 法主要反映介质的电性和介电性质，具有较高的分辨能力，对洞穴、夹层和断裂带具有较高的识别能力，但探测距离有限。长期超前地质预报宜采用 TSP 方法，对 TSP 探测成果有怀疑的地段或岩溶较发育区段选用 GPR 方法，结合地质构造特点进行综合分析解释，相互验证补充，以提高超前预报的可靠程度。

关键词：隧道地质灾害，超前探测，组合检波，隧道地震预报（TSP），探地雷达(GPR),时域有限差分(FDTD)

ABSTRACT

Tunnel belongs to the underground construction engineering, during the construction, we often meet multifarious geological hazard, such as dashing out the mud, water, gas and the rock outbursts. With the increasing of tunnel engineering in our country, they become into deeper, bigger, longer, the engineering geological and hydrological geology problem being more complex, the theory study and practice on the ahead detecting and predicting are becoming more significant.

Ahead detecting is basic on the difference of the medium's geophysical property. Its is the application of the geophysical exploring methods in the tunnel, underground well, stope. Through the observing distributions and the mutative rules of underground physical field, we can find the geological abnormality and make certain their scale and state.

Base on principal and prediction law of TSP(Tunnel Seismic Predication) and GPR (Ground Penetrating Radar),combining their application in the ahead prediction, the author develops research. The paper have elucidate the main types, reasons, geological features and the physical mechanical properties of the tunnel geological hazard. Base on samdwich model and the principal of seismic reflection method, author deduces the equation of the time-distance curve, discusses features. The composed record of multilayer modles are simulated using Ricker subsidiary wave and minimal phase subsidiary wave. The resolaving power of seismic wave on folium was discussed from tune thickness. The relation was take apated between the reflectance and an incidence angle and stratum "space angle". The author also presents the characteristics, data processing procedures of TSP203 system, and discusses the main influencing factors . The author has design an "equator combined demodulation observation system". An accurate first velocity has been afford for after reveision.

On the ather hand, basic on the principal of the GPR, the author simulates some models of dual layers horizontal medium and combined cylinder using Finite-Difference Time-Domain Method and exceed absorb bound condition. The rationality and validity of this kind of

simulation are proved by Qian-Gui railroad' radar detacting. The general principal of radar images of different rock strata and karst are summarized. The main influencing fators and key technology of GPR were discussed in this paper.

Theory and pratice have make know, that TSP method mainly reflects the rock's mechanical property so belongs to the long distance geological forecast, and its detecting effects is better to the layered media, but detacting effect is unperfect on minitype karst, its interpret to the long distance is not enough accurate. GPR mostly reflects the electric property and dielectric properties of the media, its resolving power is upper. It has a higher resolution so the capacity of discernment of the karst, interlining, fault zone is rather high. But its detating distance is not enough long. TSP shoud be adopt on long distance ahead forecast. GPR shoud be adopt on witch there is dubitable by TSP or there is a karst. Combined with the geology structural properties, we have to comprehensively analyze and explain the observing data to test, verify, supplement each other, to advance the reliability of the ahead forecast.

KEY WORDS: tunnel geological hazard, ahead detecting , compounding demodulation, tunnel seismic predication, Ground Penetrating Radar, Finite-Difference Time-Domain Method

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 隧道地质灾害超前预报研究进展	3
1.2.1 国外研究及应用概况	3
1.2.2 国内研究及应用现状	5
1.3 超前探测的难点及存在的主要问题	7
1.4 研究思路	8
1.4.1 关于探测方法	8
1.4.2 关于正、反演理论和试验研究	9
1.4.3 关于观测系统	10
1.5 主要研究内容	10
第二章 隧道地质灾害的地质地球物理特征	12
2.1 地质灾害体的地质及构造特征	12
2.1.1 引起大塌方的工程地质条件	12
2.1.2 引起突水灾害的地质条件	13
2.1.3 特殊岩性地层	14
2.2 地球物理特征	14
2.2.1 密度与波速	15
2.2.2 电阻率	18
2.2.3 介电常数	19
2.2.4 岩石的红外辐射特性	21
2.3 隧道围岩分类和工程岩体分级	22
2.3.1 分类方法	22
2.3.2 分级依据	23
2.4 本章小结	26
第三章 隧道地震反射法基本理论与记录合成	27
3.1 均匀介质中的波动方程	27
3.1.1 应力与应变	27
3.1.2 应力与应变的关系	29
3.1.3 波动方程	30
3.2 地震反射法基本原理	33
3.2.1 TSP 法	33
3.2.2 TVSP 法	34
3.3 时距曲线方程	34
3.3.1 一个平界面	34

3.3.2 多个平界面	36
3.3.3 时距曲线特点	39
3.4 弹性纵波在界面上的反射和透射	40
3.4.1 波函数	40
3.4.2 边界条件	41
3.4.3 反射系数和透射系数	41
3.4.4 垂直入射反射系数	43
3.5 地震记录的人工合成	45
3.5.1 地震子波及二层介质模型地震记录合成	45
3.5.2 多层介质模型地震记录合成	47
3.5.3 垂向分辨能力	48
3.6 入射角及界面“空间角”对反射系数的影响	49
3.6.1 入射角对反射系数的影响	49
3.6.2 “空间角”的影响	51
3.7 本章小结	52
第四章 赤道组合检波与资料处理解释	53
4.1 TSP203 超前预报系统	53
4.1.1 系统工作原理	53
4.1.2 系统主要组成和技术性能	54
4.1.3 TSPwin 资料处理流程	54
4.2 赤道组合检波观测系统	54
4.2.1 赤道组合检波观测系统设计	54
4.2.2 赤道组合检波观测系统的优点	55
4.3 数据处理	56
4.3.1 通带滤波与初至前归零	56
4.3.2 直达波的拾取	58
4.3.3 Q 值估计	59
4.3.4 反射波提取	59
4.3.5 P-S 波分离与速率分析	60
4.3.6 深度偏移和反射面提取	60
4.4 资料解释原则与工程实例	61
4.4.1 资料解释的一般原则	61
4.4.2 雪峰山隧道 (YK96+761~YK96+861) 超前探测成果分析	63
4.4.3 朱家岩隧道 (YK53+032~YK52+890) 超前探测成果分析	65
4.4.4 不良地质体的基本特征	67
4.5 主要影响因素	69
4.5.1 激发条件	69

4.5.2 接收传感器的安放	71
4.5.3 仪器参数的选择	71
4.5.4 观测系统的布置	73
4.6 关于 TSP 的讨论	73
4.6.1 TSP 法应用条件	73
4.6.2 TSP 反演计算的速度	74
4.6.3 物探和地质综合解译	75
4.7 本章小结	76
第五章 隧道地质灾害超前预报雷达探测法	77
5.1 探地雷达基本理论	77
5.1.1 雷达探测原理	77
5.1.2 电磁波速度估计	78
5.1.3 岩石的介电常数与反射系数	80
5.2 时域有限差分法雷达波正演	81
5.2.1 时域有限差分法的基本原理	82
5.2.2 吸收边界条件与梅-方超吸收边界条件	84
5.2.3 水平层状模型数值模拟	85
5.2.4 圆柱体模型数值模拟	86
5.2.5 复杂模型数值模拟	90
5.3 雷达探测实例	92
5.3.1 工程概况	92
5.3.2 溶洞类地质体雷达图像特征	93
5.3.3 断层破碎及夹层类地质体雷达图像特征	95
5.3.4 裂隙类地质体雷达图像特征	96
5.3.5 多个异常体雷达图像特征	97
5.3.6 综合成果分析	97
5.4 本章小结	100
第六章 结论与展望	101
6.1 本文结论	101
6.2 工作展望	102
参考文献	103
致 谢	111
攻读博士学位期间主要研究成果	112

第一章 绪论

我国是多山而且地质条件十分复杂的国家，山区及高原约占全国总面积的60%，公路、铁路经常在崇山峻岭中穿过，隧道在道路工程中所占的比例相当大。例如，在湘黔、襄渝、京原铁路上，隧道的长度占总线长度的百分之十几；宝天铁路差不多平均一公里一座隧道；成昆铁路沿大渡河岸一段线路长26km，有隧道13座，总长达21km，占80%以上，被称为“地下铁道”。随着国家经济的发展，交通土建工程不断增加，在山岭重丘地区修建高等级公路，过去“逢山尽量绕着走”的设计思路已被隧道所代替，既缩短了里程，提高了行车安全性，又协调和保护了沿线的自然环境和人文景观。交通部和国家统计局公布的第二次公路普查显示，2000年底，全国公路隧道达1684座、62.8万延米，其中3000m以上的特长隧道达15处，3000m和1000m之间的长隧道135处。2001年底，全国共有公路隧道1782处、70.5万延米，其中特长隧道18处，长隧道155处。2002年年底，全国公路隧道达1972处、83.5万延米，其中特长隧道21处、7.59万延米，长隧道194处、30.52万延米，中隧道657处、33.02万延米，短隧道1100处、12.38万延米。王梦恕院士说“廿一世纪是隧道及地下空间大发展的年代”，不仅公路隧道的总里程继续大幅度增长，而且单座隧道具有向里程长、埋深大发展的趋势^[1-6]。

1.1 研究意义

地质灾害是指以地质营力为主要原因引起的、造成人类生命财产损失或使人类赖以生存和发展的环境、资源发生严重破坏的现象或过程。其中地质营力包括内动力地质作用、外动力地质作用和人类地质作用三大类^[7]。隧道属于地下建筑工程，其围岩地质情况复杂多变，常遇到滑坡、崩坍、岩堆、偏压地层、岩洞、高应力、高强度地层、松散地层、软土等不良地质地段，和膨胀地层、含水未固结围岩、溶洞、断层、岩爆、流沙以及瓦斯溢出地层等特殊地质地段，它们具有不同的性质、形状和规模，且成因和变异条件非常复杂，地质条件具有突发性。如华蓥山公路隧道地质复杂，集溶洞、涌泥、突水、岩爆、高瓦斯和石油天然气于一身。设计和勘察文件所提供的地质资料，不可能自始至终符合实际情况，其详细程度也不能完全达到隧道施工的具体要求，因而常会出现

突泥、突水、瓦斯突出、岩爆、冒顶与底鼓等灾害性地质现象，即隧道地质灾害。这些现象可能是由于岩层的物理和工程特性的变化所致，也可能因为开采、掘进等人类工程活动改变了地下岩体的自然平衡状态，当应力超过岩体强度时就会产生变形、破坏。如果没有可靠的超前地质预报，潜在的地质隐患就可能变成灾难；施工中必将采取保守的安全支护，造成建设资金大量浪费、工期延长等不利影响。隧道施工中安全和工程事故时有发生，轻则延长工期、增加投资，重则毁坏机械设备，甚至造成人员伤亡，而且事故处理难度大。因地质灾害使得隧道修建严重受挫的实例在国内外不乏其例，如靠椅山隧道于 1999 年 9 月 6 日在 YK145+013~145+028 段，发生大“通天”塌方，使地表出现一个长 71m、宽 51m、深 21m 的大坑，估计塌方量约为两万多立方，在隧道内形成长达 188m 的塌体。塌方向进口端推移了约 60 多米、向出口端推移了约 100 余米，其中约有 60 余米全被塌方体阻塞，隧道被迫停工^[8]；衡广线上的大瑶山隧道中部两公里处突发涌水涌砂，最大涌出量达 50000t/d，淹没坑道，被迫停止施工；南岭隧道，施工中在+745~+920 出现突发性碎屑流，仅 1984 年 11 月 26 日 27 日两天就涌出流塑状泥 7986m³，堵塞导洞 177m，淹没多台大型机械设备；辛普伦隧道在 42m 大变形洞段的施工中耗费了 18 个月；艾那山 I 线 400m 大变形路段用了 36 个月才得以通过；阿尔卑斯山地区规划中的深埋特长隧道所面临的主要问题是高地温问题，而水力资源丰富的印度喜马拉雅地区规划的大量特长水工隧道所面临的主要问题是大变形和涌水问题^[9]。随着隧道工程数量、规模不断扩大，深、大、长隧道增加，遇到的工程地质、水文地质条件越来越复杂，使得这一问题更加突出。因此，对隧道地质灾害的超前探测和预报倍受各国岩土工程、地质工程和地球物理专家、技术人员的关注。

采用钻探方法进行预报不仅成本高、效率低，而且这种接触式方法在钻进过程中有可能诱发水害和瓦斯爆炸。超前探测是地球物理探测方法在隧道、地下井巷、采场等工作面上的运用，它以介质物理性质差异为基础，通过观测地下物理场的分布及其变化规律来研究工作面前方是否存在地质异常体等问题。其目的是：（1）超前探测地层岩性、软弱层位置、岩体完整程度、断裂带位置及宽度、破碎程度、突泥突水性，为围岩的开挖、支护提供依据，使因地质条件引起的变更设计更加安全及时、经济合理。（2）超前探测岩溶洞穴、岩溶管道、地下暗河的位置、大小、规模、充填情况，预测预报突水突泥具体位置及可能带来的灾害程度。（3）为修改设计提供必要的地质参数。（4）根据超前预报成果，研究制定确保工程地质体稳定性的工程措施及合理的施工方法，降低地质灾害发生的几率，保证施工人员和机械设备的安全^[10-15]。运用地质学和地球物理的基本原理，研究科学的超前探测理论，采用有效的探测方法和可靠的

超前预报系统进行准确的灾害预报，对隧道施工意义重大，同时在矿山开采、地下工程建设等方面有着广阔的应用前景。因此，本研究不仅具有深远的理论价值，而且对于保护生命、财产安全具有十分重要的实际意义，以及显著的社会效益和经济效益。

1.2 隧道地质灾害超前预报研究进展

超前探测和地质预报在煤矿生产中应用较早，随着铁路、公路、水利、军事和城市地下工程建设的飞速发展，地下地质灾害超前预报在隧道和隧洞施工中的应用也越来越广泛。长期以来，广大地球物理工作者进行了大量的试验研究和实际探测，针对地下安全、生产中的各种地质问题，各国相继开展了红外测温法、井下直流电法、地震波反射法、瑞雷波法、电磁波法（包括无线电波透视法、地质雷达法瞬变电磁波法）等方法用于井下的研究，取得了较好的地质效果，一些方法和仪器在矿区得到推广和应用，解决了生产中不少实际问题，为探测和预报井下地质灾害做出了重大的贡献。超前探测研究的发展趋势是探测方法综合化，仪器设备安全、轻便化，理论模拟三维化，资料处理可视化，在不断提高超前探测精度和准确性的前提下，试图增大超前预报的距离，为地下工程防灾、减灾提供科学依据。

1.2.1 国外研究及应用概况

早在 20 世纪 50 年代，前苏联学者就开始研究将直流电法用于煤矿井下探测，经过多年的探索，积累了丰富的经验，成功解决了与矿山安全、生产有关的多种地质问题，包括煤层小构造和冲刷带探测、矿井水文地质条件调查、顶板稳定性评价、岩煤突出预报、以及矿压和巷道变形监测等；1990 年以来，莫斯科大学地球物理研究室开展了井下矢量电阻率法的研究工作，为判定地电异常体的空间位置探索了一条有效途径，并在非接触式电法测量技术、总场探测技术（TES）、电各向异性特征研究等方面做了大量工作。70 年代末联邦德国、英国提取与利用槽波的埃里震相探测巷道工作面前方的地质构造^[16,20]。

瑞士、日本等国家十分重视隧道施工超前地质预报工作，许多施工单位配有专门的隧道施工地质技术人员，或由业主提供施工地质队伍^[21,22,23]。由于隧道施工地质工作和高水平的地质预报能极大地减少或避免塌方、突水突泥、瓦斯爆炸、岩爆等地质灾害，保证施工顺利进行，又能大大降低成本，使得业主和施工单位都十分重视。

世界各国在上世纪 70 年代就开始了隧道施工地质预报工作，方法多为通过道坑先行或平行道坑先行来了解前方不良地质和严重涌水段，有的则通过超前水平钻进行预报，但目前多以物探为主。自 1972 年 8 月在美国芝加哥召开了快速掘进与隧道工程会议以来，隧道施工中的地质条件超前预报日益受到重视；80 年代许多国家都将这类问题列为重点研究课题。如澳大利亚研究隧道施工前方地层状况预报，前西德研究掌子面附近地层动态的详细调查，法国则把不降低掘进速度的勘探方法作为主要研究课题，但都未能取得可供推广的成果。日本主要研究开挖前方地质预报，在青函海底隧道施工过程中，一方面开挖导洞，另一方面在导洞中沿隧道轴线打超前水平钻孔进行地质预报，取得一定的成效，接着又开始了应用地球物理勘探方法（如地震折射法、声波反射法等）进行地质预报的研究^[10,24-27]。

20世纪90年代初，瑞士Amberg测量技术有限公司开发研制的一套超前预报系统设备——TSP隧道地震预报系统，该系统采用地震波反射原理，预测即将开挖隧道施工前方的地质结构及其围岩地质状况，同时也可对其力学参数进行评估，其最大特点是探测距离远（可达掌子面前方300-500m）、分辨率高（最高分辨率为1m）、抗干扰能力强、资料解释快、对施工影响小等，并向社会推广应用，是目前隧道超前预报无损探测领域中最先进的技术。如探测和预报围岩软硬变化、断层、破碎带、节理裂隙发育情况、含水、溶洞及围岩类别等，其准确预报范围为掌子面前方100-150m。90年代初，瑞士的特长铁路隧道——长20km的费尔艾那隧道采用TBM（Tunnel Boring Machine，隧道掘进机）施工技术，该隧道最大埋深达1600m，穿过的岩层为沉积岩和火成岩，受阿尔卑斯山造山运动的影响，隧道所穿过的地层被严重切割，存在大量构造破碎带。由于该隧道埋深大、岩石强度高以及存在破碎带等诸多因素，在原岩应力大、岩石稳定性差的情况下存在掘进机由于变形过大或发生冒落被卡死的危险，应用TSP探测技术来预报隧道施工前方的地质情况，避免了隧道塌方和冒顶等事故，对保证TBM施工安全起到了积极的作用。随后，TSP测量技术被世界各地的隧道工程界广泛接受并得到广泛应用。TSP探测技术已经开发了TSP202和TSP203两代产品，大约花费了6年的时间研制TSP203测量系统。与第一代产品相比，TSP203在硬件设计和软件设计等方面都作了较大改进，其软件编程除了考虑与WINDOS视窗的兼容性之外，还特别强调了软件的智能化和评估结果输出的灵活性^[21,28,29]。TSP在瑞士、德国、法国、意大利、奥地利、日本等发达国家的隧道施工中，得到了广泛的应用，尤其是在采用TBM施工时，利用TSP进行超前探测地质情况，更是在施工决策过程中不可缺少的工序。

Nishimastu 将 TSP 用于日本的多条隧道，并且开发了 C-TSP（Continuous

TSP) 系统, 该系统利用隧道开挖时的每一次爆破, 对前方地质情况进行分析, 探测的最长距离为 150m。

地质雷达探测方法是目前分辨率最高的工程地球物理方法, 源于欧美的航天探空雷达技术, 虽然早在 1910 年德国的 GLeimbach 和 H.Löwy 就提出了利用雷达原理探地, 但上世纪 70 年代以后, 探地雷达的实际应用范围才得以扩大。地质雷达在工程质量检测、场地勘察中被广泛采用, 近年来也被用于隧道超前预报工作, 该方法能发现掌子面前方地层的变化, 对于断裂带特别是含水带、破碎带有较高的识别能力, 在深埋隧道和富水地层以及溶洞发育地区, 地质雷达是一个很好的预报手段^[10,21,29-33]。但是地质雷达目前探测的距离较短, 大约在 20-30m 以内, 对于长距离隧道的预报只能分段进行, 同时雷达记录易受洞内机电设备干扰。

计算机技术的迅速发展和广泛应用, 各种以计算机为辅助工具的隧道施工地质超前探测仪器和预报系统到了迅速的改善和更新。

1.2.2 国内研究及应用现状

我国的超前探测和地质预报最早也是应用于煤矿生产中, 自 1958 年我国首次开展井下电法试验以来, 到 80 年代后期, 由于矿井突水问题日益严重, 煤炭科研总院相关分院、各大矿务局、部分大专院校相继开展了大量的矿井直流电法试验研究和实际应用工作, 在模拟实验、现场探测、仪器开发、理论研究等方面取得了许多经验和成果^[34-43]。上世纪 70 年代初我国开始研制探地雷达, 1987 年从德国引进槽波地震勘探技术, 1988 年由日本引进瑞雷波法, 1991 年成功研制了瞬态震源 MRD- I 型瑞雷波探测仪。这些方法常用于探测巷道顶底板隔水层厚度及埋深、含水层富水段、含水溶洞和断层破碎带等低阻地质体, 对独头巷道超前探测含水体有明显的地质效果, 最大探测距离可达 80m, 因其对含水、导水构造的判断较准确, 在煤矿井巷、隧道工程的超前探测得到广泛应用, 成为目前井下物探的主要方法。以矿井突水预测为例, 在长期生产实践中形成了“以矿井直流电法勘探为主, 辅以矿井高分辨率地震勘探、无线电波透视法、井下微重力测量、放射性测量和红外测温等技术”的综合物探技术体系, 在矿山防治水工作中取得了较好的应用效果^[16,17,44-52]。

上世纪 80 年代在大瑶山、南岭、军都山隧道和其它一些隧道的施工中开始进行超前预报的研究和试验工作, 如在大瑶山隧道成功地采用了浅层地震反射波超前探测、超前 15m 的声波探测和显微结构分析等方法, 并首先引进水平超前钻探, 同时结合超前导坑及洞内素描和赤平投影等方法进行隧道地质超前预报;

在军都山隧道施工过程中,由中科院地质研究所和铁道部隧道工程局组成的“军都山隧道快速施工超前预报课题组”采用以地质素描为基础、钻速测试和声波测试进行掌子面前方短距离的地质超前预报,取得了显著的效果^[9,53-57]。

我国是较早的开展反射地震隧道超前预报方法的国家之一,铁道系统在上世纪90年代初就开始进行专门研究工作,铁道部第一勘测设计院曾昭璜等1994年在地球物理学报上发表了他们的研究成果,文章的题目为“隧道地震反射法超前预报”,何振起等人在铁道工程学报上也发表了类似的工作成果,这种方法在国内被称为“负视速度法”,该方法的观测是在隧道侧壁打孔布置检波器和炮点,检波器和炮点在一条平行隧道轴的直线上,利用直达波估计岩体波速,利用反射波走时曲线与直达波走时曲线的交点推测前方反射界面的位置。其观测与分析方法与垂直地震测井方法有很多相似之处,所以有时也称“垂直剖面法”。反射地震方法在宝中线颉河隧道、老爷岭隧道和侯月线云台山隧道、朔黄铁路的长梁山隧道以及福州飞弯岭公路隧道等得到成功地应用^[58-62]。

北京市水电物探研究所根据隧道地质超前预报和隧道地质检测两个方面的需要,通过多年的研究,开发出TGP12多功能隧道地质超前预报与检测仪和TGPWin软件处理系统,于2005年8月25日通过鉴定。该系统可以进行隧道地质超前预报,扩展配置后还可以检测施工未发现的隧道病害(如隧底岩溶)、检测围岩的弹性波速度、划分围岩类别、检测混凝土衬砌与围岩之间是否存在脱空缺陷等。功能设计既适应非物探人员,又适应物探或专业人员利用弹性波传播特性对隧道复杂地质条件进行深入的研究。在中等硬度级别的隧道围岩中对掌子面前方150~200m范围内的岩性变化、断层、破碎带、岩溶发育带以及它们的产状、规模和前方岩层的含水特性作出预测预报,并能计算出上述范围内岩层的纵波、横波速度、波速比、泊松比及相应岩体的动弹模量和剪切模量等岩石力学参数。TGP12系统样机已经在铁路和高速公路多个工程项目中进行了试验和应用,与TSP203系统在同工点、同测段、同震源激发条件下对比表明,二者处理结果、地质判断基本一致。

近年来,TSP技术也得到中国的工程技术人员广泛认同,1996年我国铁道部隧道工程局首次引进TSP202,应用于深圳中东部供水水源隧道、梅坎铁路松南隧道、内昆线闸上隧道、朱嘎隧道等。近些年一些公路、勘测部门和高等院校也先后引进了TSP202、203系统,并成功地应用于秦岭铁路隧道、株六铁路复线、治怀铁路部分隧道工程、青海公伯峡水电站导流洞、云南元墨高速公路、山西雁门关、甘肃乌鞘岭、福建京源口公路隧道以及上瑞高速公路邵怀段、沪渝高速公路宜万段等几十个工程中。

目前隧道地质超前预报工作主要采用工程地质调查与推断法、反射地震法、

TSP、地质雷达探测法和地震 CT 法等方法，多采用物探和钻探相结合、长距离和近距离相结合的方式，取得了较好的效果。

准确预报施工前方的地质条件是隧道建设者们的迫切要求，也是上世纪 80 年代各国的重点研究课题，国内外专家学者们做了大量的工作，为其发展和应用奠定了基础。由于隧道内可供观测的空间位置有限、干扰因素多、观测方案受到限制，要准确的达到预报的要求难度很大，多年来国内外的工程地球物理工作者在不断地改进探测技术和分析方法，试图提高预报的可靠性和精度，取得了许多成功的经验，但目前的技术水平在预报准确性和可靠性方面还有待提高。同时由于现场工作条件差、也存在安全隐患、先进的仪器设备又十分昂贵，令人望而生畏，真正从事这项研究和应用的工程技术人员并不多，因此，要做好隧道地质灾害超前预报工作依然任重道远。

1.3 超前探测的难点及存在的主要问题

超前探测和预报的内容主要包括：①不良地质体及灾害地质体的探测和预报，如掌子面前方一定范围内有无突水、突泥、岩爆及有害气体等，并查明其范围、规模、性质；②不良水文地质条件预报；③断层及其破碎带的探测和预报，如断层位置、性质、宽度、产状、充填物状态，是否充（含）水；④围岩类别及其稳定性预报。相对于地面物探而言，隧道超前探测一般距离目标体较近，有利于探测精度和准确性的提高。但是由于隧道空间的限制和许多干扰因素的存在，使得很多物探方法不能得到有效应用，因此，探测方法的选择、现场观测方式的布置、以及信号最佳激发方式和接收方式的确定等方面成了超前探测和超前预报的难点。多年的应用实践表明，合理运用地震反射波法、电磁波透视法、探地雷达法、直流电法、瑞雷波法等探测方法^[63-72]，可以有针对性地解决一些具体的地质问题，但在探测精度、准确性和探测距离等方面仍然存在许多问题，主要表现在以下几个方面：

- (1) 理论上隧道内所建立的人工物理场是“似全空间而非全空间”物理场，而实测中大多数方法都“假定地下场为全空间分布”，或“当极距较小时，电流场是半空间分布的”；当采用地震波法探测时，隧道的各个临空面又成了强干扰反射波的来源；若反演时忽略巷道的影响，则客观上存在理论与实际的不相符，探测结果必然存在偏差。事实上，隧道内观测系统的布置受到场地条件的限制（通常极距或源距较小，或采用单边布极），不可避免地受到全空间的影响，“多解性”将更加突显，探测的准确性和

精度难以保证。

- (2) 如何在隧道工作面小的不利前提下合理地选择物探方法和观测方案将直接影响到探测效果, 而目前超前探测方法大多是地面物探方法的移植, 针对隧道应用条件的研究还不够深入, 方法试验多, 理论研究少, 对不同方法的使用没有形成相应的技术规程。
- (3) 隧道内干扰因素多(生产、运输的爆破、振动、大功率用电等形成复杂的干扰源, 即使同一场源也存在多种路径), 不利于有效信号的激发和采集, 采用常规的传感器(或电极)和接地条件难以确保可靠、有用信息的获取和分离。
- (4) 在数据处理方面, 对巷道条件下二维、三维数学物理模型的研究还处于探索阶段, 适用于地下井巷、隧道条件的正、反演三维数值模拟技术还远未达到实际应用的要求。尚未开发出适合井下探测的资料解释系统和软件, 使隧道地球物理探测仍处于定性或半定量阶段。

1.4 研究思路

目前常用的井下探测方法各有其优缺点, 要进一步提高地质灾害的探测及超前预报的准确性和精度, 就必须加强对地下地质灾害物理性质和井巷条件各种空间响应进行全面、深入的研究, 充分发挥现代数学分析方法、信号采集与数据处理技术和计算工具的作用, 结合井巷条件从理论上进行相应的数学模拟和正反演计算, 在室内或已知井巷进行各种方法的试验研究, 获得各种观测方法的应用条件和最佳观测系统, 以找出针对不同地质—地球物理模型的有效、快速的综合观测方法。

1.4.1 关于探测方法

通常地下水体、瓦斯、陷落柱等地质灾害体的物理性质(如导电性、密度)与其围岩之间存在较明显的差异, 井下探测的观测系统距离目标体也相对较近, 客观上具备良好的工作前提。但实际应用和研究中, 井下物理场(如直流电场、电磁波场、弹性波时间场等)的分布规律较为复杂, 巷道、采空区等不导电空间和超低速区的综合影响相互迭加, 困扰着井下地球物理探测的资料处理与解释; 井下观测结果是三维空间内任意方位地质体异常响应的迭加场, 在大多数情况下, 单一方法无法准确地确定异常体的空间位置。因此, 要取得良好的地质效果, 不能简单地照搬地面物探方法, 必须加强适合井下特点的方法研究,

并进行方法技术的优化组合。观测电场、电磁场、温度场、辐射场有利于定性评价,研究时间场有利于定量计算探测目标的空间形态和位置,联合运用定性、定量的方法可以提高井下超前探测的准确性和精度。例如,激电法在探测含水体和瓦斯突出体方面具有独特的效果,双频激电仪可以克服井下因接地电阻过大、信号太弱带来的观测误差,使探测结果的更可靠;如果将天线进行合理的改造,瞬变电磁法(TEM)和可控源音频电磁法(CSAMT)法在井下也会有其优势(可避免直接接地、通过改变频率来增大探测距离);矿井矢量电阻率法技术能更全面地反映地下各向异性介质中电流场的分布及其变化规律,有利于判定地质异常体的空间位置。值得一提的是,“震电效应”的研究为多孔介质波动理论奠定了基础,在地震预报、油气和水资源的勘探中逐渐受到重视,若将其理论和观测方法引入井下地质灾害体的探测,联合运用弹性波场和电场这两种不同性质的物理场的特点,有利于提高探测灾害体的地质效果,为井下勘探和超前探测提供一种新的理论和方法。

1.4.2 关于正、反演理论和试验研究

目前,针对井下勘探和超前探测的方法试验开展较多,如近年出现的三维地震勘探、电阻率成像技术,是从全空间时间场、电流场的基本理论出发,通过变测点、变深度、变方位的三维勘探,复原和重建地下岩层的三维弹性、电性结构,极具发展前途^[16,17,73-75]。在井下如何合理地布置观测系统,充分利用井下有限的施工空间,有效地组织井下施工,依赖于对巷道周围物理场及其异常规律的认识,而研究地下异常反映规律的手段就是三维数值模拟技术。如要实现井下电法资料由一维、二维反演解释向三维反演解释,由定性、半定量解释向定量解释的跨越,提高电法勘探的应用水平和效果,就必须进行井下三维地电模型的三维正、反演模拟,了解顺层和垂直层面方向的勘探深度,才能分开巷道影响和全空间效应,唯一地确定地电异常的空间位置。因此、必须加强数值模拟及正、反演理论的研究,研究不同的地质—地球物理模型、不同井巷条件、不同观测技术的资料处理和分析方法,利用有效的数学方法(如边界元、有限元、角域法等数值模拟方法及其组合)和先进的计算机手段(如 MATLAB、ANSYS 等功能强大的分析软件)进行理论模拟,通过联合反演找出定性、定量规律,推导和建立理想条件下典型模型的理论和实验曲线,以指导实测资料的分析和解释。

例如,在室内可以进行大型水槽电探方法的模拟试验,根据工作面和巷道尺寸拟定模型长度和截面尺寸,利用透明的(有利于观察各种实验现象)有机

玻璃等材料，制成一端封闭、另一端开口的空心长方体或圆柱体，各侧面根据不同观测方法布置测线。以电探方法为例，在测线上钻若干小孔，用细铜丝插入小孔并密封，另一端由导线从空心柱体内引出；异常体用良导金属球体、铜板和绝缘橡胶（塑料）皮球、塑料板制成。将封闭的一端向下插入水中（水池尺寸尽可能大）就能进行各种装置的观测，通过移动异常体位置或旋转空心柱体便可以观测到不同异常体位置组合的综合影响，还可以模拟复杂探测对象（探测体内部介质结构复杂或外部边界条件复杂）的空间响应。

1.4.3 关于观测系统

探测方法确定以后，观测系统（即场源和观测装置的布置方式，包括源的性质、能量，传感器的性能、安装方式、接地方式和源距等）是否合理将直接影响观测结果，可靠有用信息的获取、信噪比的高低取决于激发方式和接收方式。因此，必须对理论计算和试验结果进行细致的分析、研究，确定各种观测方法的应用条件，针对不同地质—地球物理模型，设计相应的最佳观测系统。

1.5 主要研究内容

本文主要研究隧道地质灾害超前探测的有关理论和应用技术，研究隧道地震波反射法（TSP 法）、探地雷达法（GPR 法）的工作原理、观测方式和资料解译方法，全文包括六章。

第一章对国内外研究和应用的进展与现状进行了简要评述，论述了隧道隧洞地质灾害超前探测和预报的重要意义和工程价值，指出了存在的主要问题，介绍了本文的主要研究内容和研究思路。

第二章介绍隧道地质灾害体主要类型、成因、地质与构造特征、物理力学性质、以及围岩分类方法，论述灾害预报方法和主要技术参数选择的依据。

第三章主要论述隧道超前探测和地质灾害预报中地震反射法的基本理论、TSP 法和 TVSP 法的基本原理，推导了多界面时距曲线的方程，用 Richer 子波和正弦指数衰减子波模拟了多层介质模型的合成记录，从调谐厚度与调谐厚度差出发讨论了地震波对薄层的分辨能力，分析了入射角和地层倾角对反射系数的影响。

第四章针对 TSP 技术特点，设计了一种适合隧道超前预报的赤道组合检波观测系统，可利用增加的偏移距准确地求取直达波速度；对 TSP 实测原始数据进行了分析和处理，结合工程实例提出了资料解释的原则，对其主要影响因素

和关键技术进行了详细的讨论。

第五章主要介绍探地雷达法的基本原理，利用有限差分理论对二层介质、圆柱体介质和圆柱体组合进行多种模型的正演模拟，结合大量工程实例讨论了GPR在隧道地质灾害超前预报中的应用效果，总结了各种不良地质体在GPR图像中的特点和解释原则，讨论了探地雷达法的优缺点。

第六章对本文研究工作所取得的成果进行了简要的概括和总结，对隧道地质灾害超前预报的前景进行了展望。

第二章 隧道地质灾害的地质地球物理特征

本章主要研究隧道地质灾害体主要类型、成因、地质与构造特征、以及物理力学性质，以获得不同探测方法的客观前提，指导灾害预报方法和有关技术参数的选择。

隧道地质灾害是指隧道施工过程中出现的塌方、突泥、突水、瓦斯突出、岩爆、冒顶与底鼓等灾害性地质现象，施工掘进时遇到的围岩不良地质地段（如滑坡、崩坍、岩堆、偏压地层、岩洞、高应力、高强度地层、松散地层、软土等）和特殊地质地段（如膨胀地层、含水未固结围岩、溶洞、断层、岩爆、流沙以及瓦斯溢出地层等），不仅具有不同的形状、规模以及地质成因和变异条件，同样也具有不同的地球物理性质（如电性、弹性、放射性、热学性质、声学性质等），与其周围岩石之间具有较明显的物性差异，为物探方法的应用提供了良好的地质—地球物理基础。

2.1 地质灾害体的地质及构造特征

2.1.1 引起大塌方的工程地质条件

（1）断层、断层破碎带及岩溶陷落柱

断层是隧道开挖过程中最常见的不良地质现象，是一种十分普遍的构造形式，它不同程度地破坏了岩体的完整性和连续性，大大降低了围岩的强度；断层破碎带分布区段是隧道围岩最不稳定的区段。断层及其破碎带是岩溶发育的地带，它增强了围岩的导水性和富水性，是溶洞水、地下暗河最主要的储存场所，是隧道施工地质灾害最主要的“祸根”。工程实践表明，塌方、突水和洞内泥石流多与断层有关：由断层及其破碎带引起的隧道塌方约占塌方总数的 90% 以上，赋存于断层及其破碎带中的溶洞、暗河、淤泥带常导致隧道突泥突水，断层破碎带还是诱发瓦斯爆炸和瓦斯突出的主要地质因素之一。同时断层的存在也意味着支护受力增大和不均匀受力，并引起衬砌破坏，对施工和营运构成极大的威胁，是灾害预报的重要内容。断层破碎带塌方可能性的判断依据是：上下盘岩性和岩石力学性质、断层复合与复合特征、破碎带的厚度及其物质组成和胶结程度、围岩结构、断层破碎带的产状及其与隧道的空间关系、地下水和地应力的影响。断层破碎带的临近前兆是：节理组数的急剧增加、出现牵引褶

曲和牵引褶皱、岩石强度明显降低，逆断层为主的断层破碎带附近会出现压裂岩和破碎岩，多数情况下，特别是上盘会出现夹泥裂岩。岩溶陷落柱塌方可能性的判断依据是：岩溶陷落柱的规模大小、干湿性、含泥量和物质组成、及其边缘的地下水特征^[76-80]。

（2）接触破碎变质带和岩脉

岩浆侵入形成的挤压破碎带、冷却节理、接触变质带，易软化，工程地质条件差，并常常经后期构造作用而进一步恶化，特别是基性岩脉，易风化、强度低。如军都山隧道、陆浑水库泄洪洞和瑞士弗卡隧道，遇到煌斑岩脉时发生了大塌方。

（3）软硬相间、薄-中厚层的层状岩体

如砂页岩互层和煤系地层等，多有层间错动，在产状不利时易产生塌方、顺层滑动和偏压，如成昆线多条隧道发生顺层滑动和偏压，衬砌严重破坏，碧口电站发生的弯折、溃屈等破坏现象。

（4）强烈褶皱带

该部位岩体一般都很破碎，向斜轴部的次生张裂隙向上会聚，形成上小、下大的碟形体，对稳定十分不利。如达开水库输水隧道 K₁₊₉₂₅-K₂₊₃₁₀ 段的 9 处塌方均发生在较缓的向斜轴部。

（5）严重风化破碎带及各种堆积物

它们属散体结构，是地下水富集和产生连续塌方的重要地质条件。如受断裂、岩脉控制且风化很深的沟、槽和囊，深切河谷、古河槽及溶洞中的堆积物，常常出现在掌子面上，大量水、泥砂和块石突然塌下，造成塌方、冒顶事故。如宝成向坛子湾隧道 K₂₂₁₆₊₂₈ 处突遇砂卵石层，导致 360t/h 的突水和地面塌陷，就是由深切古河床造成的。

（6）高、低地应力地带

地应力的存在并不一定是坏事，但高地应力、低地应力对隧道围岩的稳定具有十分不利的影响。塌方和涌水常发生在低地应力地带，而岩爆和突水则常发生在高地应力地带，在勘察和施工中都要重视对地应力的观测和分析。

2.1.2 引起突水灾害的地质条件

（1）含水、储水构造

长、大隧道的大量涌水多与向斜盆地的含水性、岩性、含水层和相对隔水层的分布、类型、厚度地下水位和补给来源等有关。如成昆线穿越米市向斜的沙木拉达等五条隧道都发生了每天万吨以上的涌水，大瑶山 DK1994+213 处平

导涌水和竖井淹没事故也发生在向斜构造中。

断层破碎带、不整合面和侵入岩接触带常为含水构造，特别是活动性断层、逆掩断层、张性和扭性断层，其未胶结构造岩与次生构造一般含水性较强。如大巴山隧道 324m 处，施工中最大涌水达 3000t/d，比预计水量大 6 倍。

(2) 岩溶水和地下暗河

石灰岩地区碳酸盐岩分布广泛，通常其单层厚度及连续厚度较大，且多为中至巨厚层状，受地下水长期作用，岩溶广泛发育，形态各异，甚至形成地下暗河。地下水交替作用使岩溶发育程度在水平和垂直方向上存在明显差异，受断层和褶皱的共同影响，裂隙更密集、岩溶更发育更复杂。地下暗河的临近前兆是含泥砂的小溶洞大量出现、钻孔涌水剧增且夹泥砂和小砾石。隧道突水突泥的可能性用“独孔喷射距离 (d_p)”来判断： $d_p < 5$ m，相当于涌水量小于 100 m^3 / h ，为较小型涌水； $d_p = 5 \sim 9$ m，相当于涌水量 100~300 m^3 / h ，为小型突水； $d_p = 9 \sim 12$ m，相当于涌水量为 300~400 m^3 / h ，为中型突水； $d_p > 12$ m，相当于涌水量大于 400 m^3 / h ，为大型、特大型涌水^[53, 71, 81-84]。

隧道涌突水具有水量大，突发性强，突水点集中等特征，许多地区还具暴雨（雨季）涌突水的特征。含水含泥的溶洞、裂隙及地下暗河是突水、突泥、泥石流主要成灾因素。因此，隧道施工中（特别在雨季）应加强超前探水和预报工作。

2.1.3 特殊岩性地层

对软岩和具有泥化、膨胀、崩解、易溶和含瓦斯地层，如泥岩、煤系地层、含油层和石膏、盐岩、芒硝、蒙脱石地层必须引起高度注意。这些特殊地层常常导致岩溶、大变形、膨胀、腐蚀等物理化学灾变和事故。如成昆线百家岭隧道，奥地利 Tauern 公路隧道，在石墨千枚岩段的道床产生大变形，最大达 2m 和 200mm/d，导致支护被破坏^[85, 86]。

2.2 地球物理特征

隧道地质灾害形成的地质体或可能产生地质灾害的地质体称为“灾害地质体”，从物理意义上可以理解为：弹性异常体、电性与电化学性质异常体、应力异常体和有害物质含量异常体等。如塌方、崩坍、岩堆、高强度地层、断层破碎带、陷落柱、松散地层、软土等可视为弹性异常体；充水或充泥溶洞、含水断层和裂隙带、流沙层等可视为电性与电化学性质异常体；岩爆、冒顶与底鼓、

高低应力区可视为应力异常体；瓦斯突出、放射性辐射强的地段可视为有害物质含量异常体。通常不同成因、不同规模的灾害地质体，具有不同的物理性质，包括密度、弹性模量、载波速度、导电性、磁性、声学性质、热学性质和放射性等。如含水破碎带既具有低密度、低波速的弹性异常体的特征，又具有低电阻率、高介电常数的电磁异常体的特征。软弱岩带、断层带、破碎带、溶洞、含水地层等灾害地质体与其围岩之间存在较明显的物性差异，为地球物理探测方法的应用提供了良好的地质地球物理基础。

2.2.1 密度与波速

(1) 岩石密度和波速取决于其组成矿物的密度和空隙度

大多数火成岩和变质岩只有很少或几乎没有孔隙，其密度和地震波速度主要取决于它们的组成矿物。火成岩中，超基性岩密度最大，由基性向酸性过渡，密度逐渐减小；变质岩的密度变化较大，变质程度不同，密度也不同；通常，火成岩的地震波速度比其它类型岩石的要高。

沉积岩的密度和波速除取决于组成矿物的密度外，还受其压实和胶结程度的很大影响。对同一种沉积岩而言，密度变化最显著的是砂质岩系，灰岩的密度基本取决于它的裂隙和胶结矿物，水化学沉积的岩石密度最稳定。成分相同，压实和胶结程度越高，其密度越大；泥质含量越多，密度越低；喀斯特和裂隙越发育的岩石密度越低。同一种岩性的岩石，埋藏越深、地质年代越老，其密度越大^[87]。表 2-1 为常见岩石的密度和波速。

地震波在介质中传播的纵波速度和横波速度与介质的密度、弹性模量密切相关，其定量关系为：

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}} \quad , \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\gamma)}}$$

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\gamma)}{1-2\gamma}}$$

式中 v_p 为纵波速度， v_s 为横波速度， ρ 为介质密度， E 为杨氏模量， γ 为泊松比。大多数情况下， $\gamma \approx 0.25$ ，所以，纵横波速度比值 $v_p/v_s \approx 1.73$ 。

通常，基岩： $v_p > 2.2 \text{ km/s}$ ， $2.0 > \frac{v_p}{v_s} > 1.7$ ， $0.33 > \gamma > 0.25$ ；

未固结松散层： $10 > \frac{v_p}{v_s} > 2.5$ ， $0.5 > \gamma > 0.4$ ，与基岩存在较大差异。

表 2-1 常见岩石的密度和波速

类 别	名 称	密 度 ρ (g/cm^3)	纵波速度 V_p (km/s)	横波速度 V_s (km/s)
松 散 层	粘土	1.60~2.04	1.2~2.5	—
	砂质粘土	—	0.3~0.9	—
	干砂、砾石	—	0.2~0.8	—
	饱水砂、砾石	—	1.5~2.8	—
沉 积 岩	砾岩	1.60~4.20	1.6~4.2	0.9~2.2
	泥质灰岩	2.45~2.65	2.0~4.4	1.2~2.4
	硅质石灰岩	2.80~2.90	4.4~4.8	2.6~3.0
	致密石灰岩	2.60~2.77	2.5~6.1	1.4~3.5
	页岩	2.30~2.70	1.3~4.0	0.8~2.3
	砂岩	2.42~2.77	2.4~4.2	0.9~2.4
	致密白云岩	2.80~3.00	2.5~5.0	1.5~3.0
	石膏	2.41~2.58	3.5~4.5	1.8~2.3
变 质 岩	片麻岩	2.65~2.79	6.0~6.7	3.5~4.0
	大理岩	2.68~2.72	5.8~7.3	3.5~4.7
	石英岩	2.65~2.75	3.0~6.6	2.8~3.2
	片岩	2.68~2.92	5.8~6.1	3.5~3.8
	板岩	2.31~2.75	3.6~4.5	2.1~2.8
岩 浆 岩	花岗岩	2.30~2.80	4.5~6.5	2.3~3.8
	玄武岩	2.53~3.10	4.5~8.0	3.0~4.5
	凝灰岩	1.60~1.95	2.6~4.3	1.6~2.6
其 它	水	1.0	1.4~1.6	—
	冰	0.8~0.9	3.1~3.6	—
	混凝土	2.40~2.50	2.0~4.5	1.2~2.7

大量实验表明, 对于某些石灰岩和砂页岩来说, 速度与密度的关系可近似表示为:

$$v = 6\rho - 11$$

而对于完全充水饱和的岩石来说, 速度与密度(饱和密度)的关系可由 Gardner 公式表示为:

$$\rho = 0.31v^{0.25}$$

因此, 一般情况下, 介质密度越大, 弹性波在其中的传播速度也越快。

(2) 岩体完整性与岩体弹性波速度

根据国标《工程岩体分级标准》^[88], 岩体基本质量由岩石坚硬程度和岩体完整程度两个因素确定。岩石的坚硬程度评价以岩块饱和单轴抗压强度 R_c 作为质量优劣的评定标准; 岩体完整程度的定量指标, 用岩体完整性系数 K_v 表示, 岩体的基本质量指标 B_Q 可由下式得出:

$$B_Q = 90 + 3R_c + 250K_v$$

同一岩性的岩石其坚硬程度即单轴抗压强度是确定的，即某一特定范围内工程岩体的质量，主要取决于完整性系数 K_v ，因此在同一岩性的情况下，对工程岩体质量的划分可以由完整性系数 K_v 确定。岩体完整性系数 K_v 由岩体的弹性波速度和岩块的弹性波速度确定：

$$K_v = \left(\frac{V_{mP}}{V_{nP}} \right)^2$$

其中： V_{mP} 为岩体纵波速度， V_{nP} 为完整岩石纵波速度。

岩体裂隙发育程度，对隧道围岩的稳定性起着重要作用，裂隙系数越小，岩体完整性越好。

$$\text{裂隙系数} = 1 - K_v = 1 - \left(\frac{V_{mP}}{V_{nP}} \right)^2$$

根据《工程岩体分级标准》(GB50218—94)，岩体的完整程度与完整系数的对应关系如表 2-2 所示：

表 2-2 岩体完整程度与完整性系数对应关系

K_v	>0.75	$0.45 \sim 0.75$	$0.2 \sim 0.45$	<0.2
完整程度	完整	中等完整	完整性差	破碎

根据表中的对应关系，可以对岩体质量进行定性与定量评价。

岩体弹性波速度是岩体质量的一个重要表征参数，速度的高低可以直接反映岩体的质量与完整程度；利用岩体波速和完整性系数，结合工程地质分析，对工程岩体结构进行分类，可以较客观、准确地评价岩体质量。

(3) 含水饱和度与弹性波特性

岩石中的纵波首波幅度和速度的变化不仅与岩性、孔隙度、渗透率等因素有关，还与岩石孔隙中的流体类型及其饱和条件有着非常密切的关系，而且含水饱和度对波幅非常敏感。干燥岩石，因气体粘滞性小，衰减主要是由颗粒间的滑动摩擦产生，而这一机制产生的衰减很小，所以波幅较大；完全饱和岩石中各个孔隙中没有流体明显的位移，纵波的衰减较小，其幅度也较大。即岩石在干燥和完全饱和状态下幅度较大，而在部分饱和状态下幅度较小。这一特性对弹性波法探测的资料解释有重要意义，可以根据波速和波幅的变化规律来推测前方岩体的含水性。

2.2.2 电阻率

(1) 岩石电阻率

岩石的电阻率取决于其组成矿物的电阻率、矿物含量以及矿物晶体和颗粒之间互相联系的特性^[16]。岩石、矿物的电阻率差别很大，大多数金属硫化物具有最低的电阻率，而造岩矿物的电阻率很高，一般为 10^6 - $10^{15} \Omega \cdot m$ ，所以，大多数岩石的导电性基本上取决于岩石的孔隙率及其孔隙中溶液的性质。表 2-3 为常见岩石的电阻率。

表 2-3 常见岩石的电阻率

岩 石 名 称	电 阻 率 值 ($\Omega \cdot m$)	岩 石 名 称	电 阻 率 值 ($\Omega \cdot m$)
泥 岩	10^0 - 3×10^2	无烟煤	10^{-3} - 10^0
粘 土	2 - 10	烟 煤	5×10^2 - 6×10^3
白云岩	5×10^1 - 5×10^3	褐 煤	10^1 - 2×10^2
石灰岩	6×10^2 - 6×10^3	玄武岩	6×10^2 - 6×10^3
砾 岩	2×10^1 - 2×10^3	片麻岩	6×10^2 - 6×10^4
砂 岩	2×10^0 - 3×10^3	花岗岩	6×10^2 - 6×10^5
页 岩	10^1 - 10^3	辉绿岩	6×10^2 - 6×10^4

一般情况下，火成岩的电阻率最高，变质岩次之，沉积岩最低。

(2) 主要影响因素

影响岩石电阻率的主要因素有：组成岩石的矿物成分，组成岩石的矿物颗粒的结构状态，岩石的孔隙裂隙发育情况和含水性，以及温度、湿度等，阿尔奇公式表达了它们之间的关系：

$$\rho = a\Phi^{-m}S^{-n}\rho_0$$

式中 ρ 为电阻率， Φ 为孔隙度， S 为含水饱和度， ρ_0 为孔隙中溶液的电阻率， a 为比例系数（在 0.6-1.5 之间变化）， m 空隙度指数（或称胶结系数，通常在 1.5-3.0 之间变化）， n 为饱和度指数。

多数造岩矿物基本不导电，一般岩石之所以导电，是因为岩石的空隙或裂隙中的水导电。水的电阻率与其矿化度和温度密切相关，通常在岩性条件变化不大的情况下，矿化度越大，水溶液中导电离子就越多，电阻率越低；温度越高，水溶液中离子的活动性越好，电阻率越低。

岩层越破碎松散、裂隙越发育，孔隙度越大，越有利于含水，电阻率越低。

断层、断层破碎带、裂隙发育带、陷落柱不仅密度低，而且电阻率也低（介电常数高），在弹性波法探测、电法和电磁探测中都有明显的异常反映。

大部分沉积岩具有层理结构，其电阻率与通过电流的方向有关，呈各向异性。可用各向异性系数 λ 来描述：

$$\lambda = \sqrt{\rho_n / \rho_t}$$

由于 $\rho_n > \rho_t$ ，所以各向异性系数 λ 总是大于 1。在进行电阻率法勘探时，要充分考虑岩石导电性的各向异性，常见岩石的各向异性系数如表 2-4 所示。

表 2-4 几种常见沉积岩的各向异性系数

岩石名称	层状粘土	层状砂岩	石灰岩	泥质板岩	泥质页岩
λ	1.02~1.05	1.1~1.6	1~1.3	1.1~1.59	1.41~2.25

2.2.3 介电常数

各种岩石矿物的介电常数都大于 1，而水的介电常数达 81，较常见的各种造岩矿物都大得多，所以，介质中水的含量是影响其介电常数的主要因素之一。表 2-5 为常见介质的介电常数与电磁波传播速度^[31,89-93]。

表 2-5 常见介质的介电常数与电磁波传播速度

介 质	导 电 率 (Sm)	介电常数 (相对值)	电磁波传播速度 (m/ns)	衰减系数 (dB/m)
空气	0	1	0.3	0
纯水	10^4 — 3×10^{-2}	81	0.033	0.1
新鲜水	5×10^{-4}	81	0.033	0.1
花岗岩(干)	10^{-8}	5	0.15	10^{-3}
花岗岩(湿)	10^{-3}	7	0.1	0.01-1
玄武岩(湿)	10^{-2}	8-9	0.15(干)	—
灰岩(干)	10^{-9}	7	0.11	0.4-1
灰岩(湿)	2.5×10^{-2}	8	—	0.4-1
砂(干)	10^{-7} — 10^{-3}	4-6	0.15	0.01
砂(湿)	10^{-4} — 10^{-2}	30	0.06	0.03-0.3
淤泥	10^{-3} —0.1	5-30	0.07	1-100
粘土(湿)	0.1—1	8-12	0.06	1-300
页岩(湿)	0.1	7	0.09	1-100
砂岩(湿)	4×10^{-2}	6	—	—
沥青		3-5		
混凝土		4-11		

岩石的介电常数主要决定于矿物成分、湿度及结构特征，并与温度和频率有关。随温度的增高，极性溶液（如水）的介电常数减小；岩石湿度增大，其介电常数也增大；随着外电场频率的增高，介质的介电常数减小。介电常数与含水量、孔隙率的关系如图 2-1 所示。

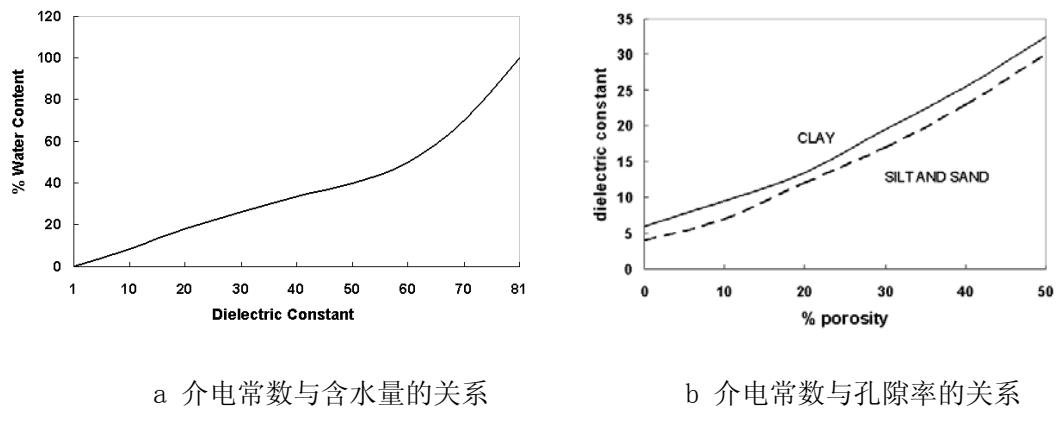


图 2-1 介电常数与含水量、孔隙率的关系

此外，介质电阻率增大，介电常数减小，其相互关系可由下式表示：

$$\epsilon = \frac{K}{\sqrt[4]{\rho}}$$

式中 ϵ 为介电常数， K 为与介质性质有关的常数， ρ 为岩石电阻率。

导电介质中，电磁波随传播距离的增加而衰减：

$$E = E_0 e^{-bz} e^{i(\omega t + az)}$$

$$H = H_0 e^{-bz} e^{i(\omega t + az)}$$

$$b = \omega \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \epsilon \rho} \right)^2} - 1 \right)$$

$$a = \omega \sqrt{\frac{\epsilon \mu}{2}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \epsilon \rho} \right)^2} + 1 \right)$$

式中： z 为传播距离， $\omega = 2\pi f$ 为圆频率， f 为频率， t 为时间， q 为自由电荷体密度（与 t 有关，均匀介质中 q 随时间增长而逐渐趋于零）。 b 为介质对电磁波的吸收系数（或衰减因子）， a 为相移常数，它们与介质的导磁系数 μ 、介电常数 ϵ 、电阻率 ρ 、及电磁波的频率 f 有着密切的关系。

显然，电场强度 E 、磁场强度 H 呈负指数规律衰减，其穿透深度随介质电阻率增大而增大，随频率增高而减小；其能量随传播距离增大而减小。介电常数直接影响到电磁波在介质中的不同的传播、吸收和衰减。即当电磁波频率一

定时,介质电阻率越高、介电常数越低,电磁波传播越远,衰减越慢。而常见的地质灾害体多呈松散、低密、含水状态,具有相对较高的介电常数,使电磁波衰减较快,在探地雷达、无线电波透视法、瞬变电磁法的探测结果中表现出明显的异常特征^[94-96]。

2.2.4 岩石的红外辐射特性

物质分子或原子的热运动变化伴随着电磁波的辐射或吸收,自然界温度高于绝对零度的物体都具有向外辐射能量的特性(即热辐射),热辐射的波长由该物体的绝对温度决定。温度越高,热辐射的强度越大,短波所占的比重越大;温度越低,热辐射的强度越低,长波所占的比例越大。地球表面的温度约为288K,地表热辐射的最强波段位于红外区(红外辐射)。地壳浅层岩体的温度主要受地球地热场的影响,在一定深度范围内,地热场平均变化为公里每深度增加30℃,而在水平方向,地热场的平均变化远远小于该量,可近似视为均匀温度场,温度变化为零(正常场)。当开挖掌子面前方存在含水地层(溶洞、裂隙水等),且该含水层与岩体存在温差时,岩体中将产生热传导和对流作用,将产生温度异常场。在一定的距离和观测精度条件下,掌子面上存在着温度差异,利用红外辐射测温方法测定这种温度变化差异,可为含水层的超前预报提供依据。红外线测温对构造的含水性探测效果比较好,对各种巷道条件都适用^[47,69]。

不同岩石具有不同的热学性质,通常用导热率、比热、导温系数等参数来描述,表2-6为几种常见岩石的热参数:

表2-6 几种常见岩石的热参数

矿物岩石名称	导热率 (kK/m·h·℃)	比热 (kK/kg·℃)	导温系数 (m ² ·10 ³ /h)
玄武岩	1.5~1.7	0.203	2.7~3.01
粘土	0.86	0.18	3.5
粘土质页岩	1.33~1.88	0.184	3.5
花岗岩	2.09~3.10	0.155~0.190	2.2~2.7
白云岩	4.30~0.93	/	3.1
多孔灰岩	1.88	2.24	1.80~4.33
泥灰岩	0.792~1.88	/	/
大理岩	2.6~3.2	0.189	5.5
致密砂岩	1.1~2.6	0.20	5.0
水(0℃)	0.474	1.006	0.471
水(10℃)	0.49	1.001	0.494
水(20℃)	0.515	0.999	0.516

2.3 隧道围岩分类和工程岩体分级

2.3.1 分类方法

在以往工程实践经验和大量岩石力学试验基础上的，进行少量简易的地质勘察和岩石力学试验，针对不同类型岩石工程的特点，根据影响岩体稳定性的各种地质条件和岩石物理力学特性，将工程岩体分成稳定程度不同的若干级别（一般称之为岩石分类或工程岩体分级），以此为作为评价岩体稳定的依据，为围岩加固方案的设计和实施提供参考数据。进而获得工程建设的勘察、设计和施工不可少的基本依据，并可为制定各种岩石工程施工定额提供依据。“分类”常指属性不同的类型的区分，如按地质成因岩石可分为岩浆岩、沉积岩、变质岩等，是无序的；而“分级”是“等级划分”的意思，有量的概念，是有序的。

国内外现有的各种岩体分级方法，或是定性或是定量，或是定性与定量相结合的方法。定性分级是在现场对影响岩体质量的诸因素进行鉴别、判断，充分利用工程实践经验，但人为因素和不确定性较大。定量分级是依据对岩体（或岩石）性质进行测试的数据，经计算获得岩体质量指标，建立确定的量的概念。但由于岩体性质和存在条件十分复杂，少数参数和某个数学公式难于全面、准确地概括所有情况，抽样的代表性同样与操作者的经验有关。采用定性与定量相结合、对比检验、综合评定级别的方法，有利于克服各方面的不足，提高分级的准确性和可靠性。首先根据岩石坚硬程度（作为材料时的属性）和岩体完整性（作为地质体而存在的属性）这两个因素所决定的工程岩体性质（即“岩体基本质量”），对工程岩体进行初步定级；然后针对各类型工程岩体的特点，分别考虑其它影响因素，对岩体基本质量进行修正、详细定级。

岩石坚硬程度的定性划分，主要考虑岩石的成分、结构及其成因和岩石受风化作用的程度，以及岩石受水作用后的软化、吸水反应情况。表现为岩石在外荷载作用下，抵抗变形直至破坏的能力。表示这一性质的定量指标，有岩石单轴抗压强度（ R_c ）、弹性（变形）模量（ E_r ）、回弹值（ r ）等。通常采用锤击难易、回弹程度、手触感觉和吸水反应等方法来测定。先将岩石划分为硬质岩和软质岩二个大档次，再进一步划分为坚硬岩、软坚硬岩、较软岩、软岩和极软岩五个档次。岩石长期受物理、化学等自然营力的风化作用，致使岩石疏松以至松散，物理力学性质变坏，根据裂隙密度、裂隙分布及发育情况、弹性

纵波速度以及岩石结构被破坏、矿物变异等多种因素，将岩石风化程度划分为未风化、微风化、弱风化、强风化和全风化五种情况。

岩体完整程度以结构面发育程度、主要结构面的结合程度和主要结构面类型作为的划分依据。所谓“主要结构面”是指相对发育的结构面，即张开度较大、充填物较差、成组性好的结构面。结构面发育程度包括结构面组数和平均间距，它们是影响岩体完整性的重要方面；结构面结合程度包括各种结构面特征，即张开度、粗糙状况、充填物性质及其性状等方面进行综合评价。

2.3.2 分级依据

定量化围岩分类定量化包括两个方面：一是分类因素的定量化；二是总体判别准则的定量化。定量化是高速公路隧道围岩分类成熟的标志。分类因素的确定影响隧道围岩稳定性的因素很多：一方面是地质因素,包括岩体完整性程度、岩块坚硬程度、结构面抗剪特性、地下水、岩体初始应力、主要结构面与工程轴线组合关系等；另一方面是工程因素,包括工程结构因素,如断面大小、形状、高跨比等，还包括施工因素,如开挖手段、开挖方法、支护时间、支护方式等。岩体工程地质力学研究和国内外工程实践经验表明，岩体完整性程度、岩块坚硬程度和结构面抗剪特性是最能反映岩体特征的因素，是确定岩体基本质量、围岩类别、控制围岩稳定性的主要因素；地下水、初始应力、主要结构面方位是次要因素；工程因素是建立隧道围岩质量评价系统专门化的依据，而不是分类的因素。表 2-7 反映了国内外各方面对地下工程岩体分级研究成果，从中可以看出，所有这些分级方法所考虑的因素是比较一致的。将最基本的岩石坚硬程度（含强度）和岩体完整程度作为岩体基本质量的主要参数，把地下水、主要软弱结构面与洞轴线的组合关系、高初始应力现象作为修正因素。

岩体的物理力学参数反映了岩体的稳定性和质量的高低，它们与决定岩体基本质量的岩石坚硬程度和岩体完整程度密切相关。国内许多单位通过大量的现场岩体原位试验研究工作，特别是近十几年岩石力学和测试技术的发展，对岩体的物理力学性质有了较深入的认识。例如，总参工程兵第四设计研究院(表 2-8)，杨子文、刘承旺、严克强(表 2-9)等，给出的这些物理力学参数，均是设计采用参考值。

表 2-7 国内外部分岩体分级考虑因素情况

代 表 性 岩 体 分 级	考虑的主要因素							
	岩 石 强 度	岩 体 完 整 程 度	地 下 水	初 始 应 力 状 态	结 构 面 与 洞 轴 组 合 关 系	结 构 面 状 态	声 波 速 度	其 它
地下岩石洞室技术措施 (建委, 1972 年)	√	√	√					
隧道围岩强度分类 ((日) 国铁研究所 1972 年)	√	√	√				√	
岩石结构评价 (G.E.Wickham1972 年)	√ (A)	√ (B)	√(C)		√ (B)			
节理化岩体地质力学分类 (Z.T.Bieniawskil1973 年)	√	√ 节理 间距	√		√	√		
工程岩体分类 (Q 值) (N.Barton 等 1974 年)	√ SRF	√ RQD J_a	√ J_w	√ (SRF)		√ $(J_r$ $J_a)$		
《岩体工程地质力学基础》 谷德振, 科学出版社, 1979 年	√	√				√ 抗剪 强度		
围岩稳定性动态分级 (东北工学院 1984 年 部级鉴定)	√	√ 节理 间距					√	√ 稳定 时间
国防工程锚喷支护技术暂 行规定 (总参, 1984 年)	√	√	√	√	√	√ 辅助	√ 辅助	
坑道工程围岩分类 (总参工 程兵第四设计研究所 1985 年部级鉴定)	√	√	√	√	√	√ 辅助	√ 辅助	
铁道隧道设计规范 (TBJ3 1985 年)	√	√	√			√		
铁路隧洞工程岩体围岩分 级方法 (铁道部科学研究院 西南所, 1986 年院级鉴定)	√	√	√	√	√	√	√	
锚杆喷射混凝土技术规范 (GBJ86-85)	√	√		√			√	
水工隧洞设计规范 (SD134-84)	√	√	√		√	√		
大型水电站地下洞室围岩 分类 (水电部昆明勘测设计 院, 1988 年部级鉴定)	√	√	√	√	√	√		
工程岩体分级标准 (GB 50218-94)	√	√	√	√	√	√		

表 2-8 设计参考用岩体物理力学参数

级别	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	粘聚力 $C(\text{MPa})$	弹性模量 $E_0(\text{GPa})$	重力密度 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	泊松比 ν
I	>55	$3\sim8$	>25	$27\sim30$	<0.2
II	$45\sim55$	$1.2\sim3$	$15\sim25$	$25\sim28$	$0.2\sim0.25$
III	$35\sim45$	$0.4\sim1.2$	$4\sim15$	$23\sim26$	$0.25\sim0.3$
IV	$25\sim35$	$0.1\sim0.4$	$0.8\sim3$	$21\sim25$	$0.3\sim0.4$
V	<30	<0.1	<1	$20\sim24$	>0.4

表 2-9 岩体设计指标

级 别	质量指标 (M)	内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	粘聚力 $C(\text{MPa})$	变形模量 $E(\text{GPa})$	纵波速度 (km/s)	泊松比 ν
I(优)	>3	>70	>4	>20	>5.5	0.2
II(良)	$1\sim3$	$45\sim70$	$1.5\sim4$	$10\sim20$	$4.5\sim5.5$	0.25
III(中等)	$0.1\sim1$	$30\sim45$	$0.5\sim1.5$	$2\sim10$	$3.5\sim4.5$	0.3
IV(差)	$0.01\sim0.1$	$20\sim30$	$0.1\sim0.5$	$0.3\sim2$	$2.5\sim3.5$	0.35
V(坏)	<0.01	<20	<0.1	<0.3	<2.5	<0.4

弹性波分类法以围岩的弹性波速度来判断岩性和岩体结构的破碎程度, 它既可反映岩石的软、硬, 又可表达围岩的破碎程度, 是一个综合的指标, 但它是半定量的。其缺点是把很多复杂的因素, 用一个指标来表示, 难免给判断带来一定的片面性。比如: 某介质弹性波速度低, 可能是岩体完整、而岩质松软; 或岩质坚硬、但岩体破碎。由于任何物探方法都具有多解性, 因此, 在判断围岩类别时, 必须要进行多参数的测试, 或借助其它条件。公路隧道中采用多因素围岩分类, 既考虑地质构造、岩性, 又考虑岩石的物理力学性质, 还考虑了施工方法等因素, 并引入模糊理论, 对围岩进行多因素模糊分类。它主要考虑了岩体质量(RQD)、围岩弹性波速(V_p)和锤击值(I), 将公路隧道中的围岩分成 6 类(I~VI), 如表 2-10。这种方法是当前围岩分类的发展方向, 具有许多优点, 但其中部分定量指标仍需凭经验确定。

表 2-10 公路隧道多因素围岩分类表

测试参数 指 标	围 岩 类 别					
	VI	V	IV	III	II	I
RQD/%	>95	$85\sim95$	$75\sim85$	$50\sim75$	$25\sim50$	<25
$V_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	>4.5	$3.5\sim4.5$	$2.5\sim4.0$	$1.5\sim3.0$	$1.0\sim2.0$	<1.0
I	$0.8\sim1.0$		$0.6\sim0.8$	$0.4\sim0.6$	$0.2\sim0.4$	<0.2

2.4 本章小结

本章主要阐述了几种主要地质灾害体的地质构造特征和它们的弹性、电性、介电性质和热学性质等地球物理性质，以及隧道围岩分类的基本方法和工程岩体的分级依据。

由于地质和工程成因的不同，可能产生地质灾害的地质体或隧道地质灾害形成的地质体，不仅其形状、规模不同，而且与其围岩之间也存在较明显的物性差异。从物理意义上可以理解为：弹性异常体、电性与电化学性质异常体、应力异常体和有害物质含量异常体等。如塌方、崩坍、岩堆、高强度地层、断层破碎带、陷落柱、松散地层、软土等可视为弹性异常体；充水或充泥溶洞、含水断层和裂隙带、流沙层等可视为电性与电化学性质异常体；岩爆、冒顶与底鼓、高低应力区可视为应力异常体；瓦斯突出、放射性辐射强的地段可视为有害物质含量异常体。通常不同成因、不同规模的灾害地质体，具有不同的物理性质，包括密度、弹性模量、载波速度、导电性、磁性、声学性质、热学性质和放射性等。如含水破碎带既具有低密度、低波速的弹性异常体的特征，又具有低电阻率、高介电常数的电磁异常体的特征。软弱岩带、断层带、破碎带、溶洞、含水地层等灾害地质体与其围岩之间存在较明显的物性差异，为地球物理探测方法的应用提供了良好的地质地球物理基础。根据探测结果反映的围岩物理力学性质，结合地质及构造特征，对围岩进行科学合理的分类，为隧道施工提供依据。

第三章 隧道地震反射法基本理论与记录合成

本章从地震波传播的基本理论出发,介绍了用隧道地震反射法对掌子面前方地质灾害体进行超前探测的基本原理,推导了反射波时距曲线的方程,讨论了其形态、特点及 TSP 超前预报系统及其主要影响因素,用 Richer 子波和正弦指数衰减子波模拟了多层介质模型的合成记录,从调谐厚度与调谐厚度差出发讨论了地震波对薄层的分辨能力,分析了入射角和地层倾角对反射系数的影响。

3.1 均匀介质中的波动方程

地震勘探是研究人工激发的地震波在地下介质中的传播规律,从运动学和动力学的角度分析波动的时空关系、能量随传播距离和时间的衰减规律、以及频散特性等,从而识别和分辨介质的属性和空间位置。其工作前提是地下介质与围岩之间存在弹性差异,以弹性波理论为基础^[97-101],通过建立均匀介质中波动方程求得时间域中三个位移势的解,获得质点振动和波动传播规律。

3.1.1 应力与应变

物体在外力作用下发生弹性形变,抵抗这种变形的内力称为应力;应变则是指某一物体受到应力时,其大小和形状的相对改变量。弹性介质内部各质点在应力作用下发生位移,其大小、方向是空间和时间的函数。令 $\vec{S}(x, y, z, t)$ 表示质点 (x, y, z) 处 t 时刻的位移,则:

$$\vec{S}(x, y, z, t) = u_1(x, y, z, t) \vec{i} + u_2(x, y, z, t) \vec{j} + u_3(x, y, z, t) \vec{k} \quad (3-1)$$

上式中 \vec{i} 、 \vec{j} 、 \vec{k} 分别表示 x 、 y 和 z 轴的单位矢量。

质点 A 和 B 的初始位置分别为 (x, y, z) 和 $(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$, 产生应变后, t 时刻它们各自的位移为 $\vec{S}(x, y, z, t)$ 和 $\vec{S}(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t)$, 如图 3-1 所示,即在 t 时刻 A 点移动到 A', B 点移动到 B' 处。

于是, B 点相对于 A 的位移 $\vec{\Delta S}$ 可写成:

$$\vec{\Delta S} = \Delta u_1 \vec{i} + \Delta u_2 \vec{j} + \Delta u_3 \vec{k} \quad (3-2)$$

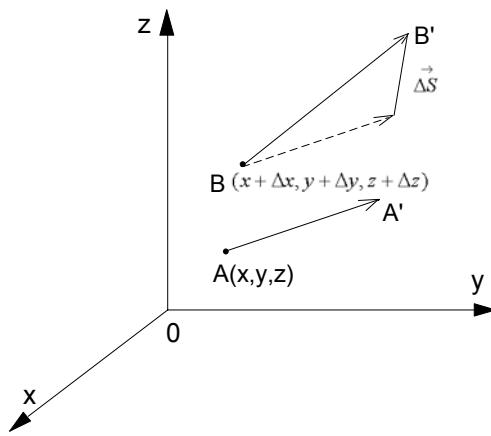


图 3-1 质点位移示意图

由于 Δx 、 Δy 和 Δz 都是微小量，则可用微分表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} dU_1 = \frac{\partial u_1}{\partial x} dx + \frac{\partial u_1}{\partial y} dy + \frac{\partial u_1}{\partial z} dz \\ dU_2 = \frac{\partial u_2}{\partial x} dx + \frac{\partial u_2}{\partial y} dy + \frac{\partial u_2}{\partial z} dz \\ dU_3 = \frac{\partial u_3}{\partial x} dx + \frac{\partial u_3}{\partial y} dy + \frac{\partial u_3}{\partial z} dz \end{array} \right. \quad (3-3)$$

或

$$\left\{ \begin{array}{l} dU_1 = \varepsilon_{xx} dx + \varepsilon_{xy} dy + \varepsilon_{xz} dz + (\Omega_y dz - \Omega_z dy) \\ dU_2 = \varepsilon_{yx} dx + \varepsilon_{yy} dy + \varepsilon_{yz} dz + (\Omega_z dx - \Omega_x dz) \\ dU_3 = \varepsilon_{zx} dx + \varepsilon_{zy} dy + \varepsilon_{zz} dz + (\Omega_x dy - \Omega_y dz) \end{array} \right. \quad (3-4)$$

式中：

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_1}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_2}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_3}{\partial z} \quad (3-5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial z} \right) \end{array} \right. \quad (3-6)$$

$$\Omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial y} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right), \quad \Omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial z} - \frac{\partial u_3}{\partial x} \right), \quad \Omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) \quad (3-7)$$

Ω_i ($i = x, y, z$) 表示旋转张量, 它们代表弹性介质围绕 A 点作整体转动, 它们与形变无关, 在形变问题中可不加以考虑。

$$\text{矩阵} \quad \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

即为应变张量, 其中每个元素 ϵ_{ij} ($i, j = x, y, z$) 称为应变张量的分量, 求得每个分量即可确定弹性介质中各质点的变形。

非对角元素 ϵ_{ij} ($i \neq j$) 为线元因形变而引起的角度变化, 表示物体的切变量; 对角元素 ϵ_{ii} 表示线元在 i 方向的相对伸长, 即张应变。通常, 形变体内任一点, 沿任一面的形变, 既有长度变化, 也有切变。

3.1.2 应力与应变的关系

在地震勘探中, 震源(爆炸或锤击)附近, 由于外力超过岩石的抗压强度而形成破坏圈; 离震源一定距离时, 外力能量小于岩石的抗压强度, 但还大于岩石的弹性限度, 形成塑性变形带; 随着离震源距离的增大, 能量变得很小, 且作用时间很短, 岩石处于弹性变形区内, 可以视为完全弹性体。弹性体变形后企图恢复原状, 在体内部各相邻区域存在相互作用力。若在弹性变形体内部取一个区域 V , 在其表面任取一微小面积元 ΔS , 则作用于 ΔS 上应力的法向分量称为法向应力, 切向分量称为切向应力(可分解为两个互相垂直的分量)。如果物体中任意一点都用三个互相垂直的平面来确定其法向应力和切向应力, 该物体的应力系统就被确定。若要确定一个点的应力, 需要 9 个应力分量, 可见, 应力为二阶张量, 写成 $\tau = \tau_{ij} e_i e_j$; 对于一个无旋的均衡应力体(如各向同性介质), $\tau_{ij} = \tau_{ji}$, 既需要 6 个独立的应力分量, 如图 3-2 所示。

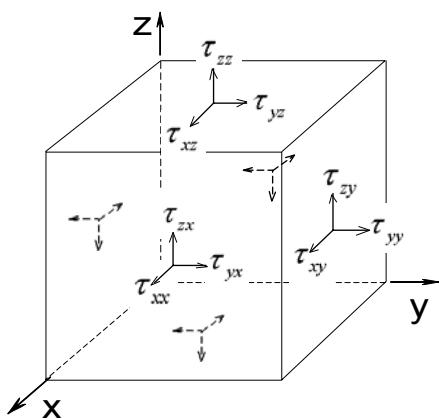


图 3-2 应力分量

由于物体变形十分微小（在弹性范围内），应力与应变满足虎克定律：

$$\tau_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3-9)$$

式中， θ 为体胀系数 ($\theta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$)， λ 和 μ 也被称为拉梅常数。

五个弹性模量—— E （杨氏模量）、 σ （泊松比）、 K （体变模量）、 λ （拉梅常数）和 μ （剪切模量）之间的关系为：^[157]

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}, & E &= \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}, & K &= \lambda + \frac{2}{3}\mu, \\ \lambda &= \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}, & \mu &= \frac{E}{2(1+\sigma)} \end{aligned}$$

3.1.3 波动方程

弹性体处于平衡状态时，位移函数 \vec{S} 处处为零；外界作用下弹性体某处产生形变，并以有限速度向周围扩展，从而形成弹性波。若介质自由振动（无体力作用），根据牛顿运动定律有：

$$\nabla \cdot \tau = \rho \frac{\partial^2 \vec{S}}{\partial t^2} \quad (3-10)$$

式中 ρ 为介质密度。

由应力与应变关系式 (3-9) 和应变位移关系式 (3-5) 得：

$$\nabla \cdot \tau = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{S}) + \mu \nabla^2 \vec{S} \quad (3-11)$$

可将 (3-10) 式改写为：

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{S}) + \mu \nabla^2 \vec{S} = \rho \frac{\partial^2 \vec{S}}{\partial t^2} \quad (3-12)$$

此式即为各向同性弹性固体介质中的矢量波动方程，常称为弹性波方程。

对 (3-12) 式两边取散度，

$$\nabla \cdot (\nabla^2 \vec{S}) = \nabla^2 (\nabla \cdot \vec{S}) = \nabla^2 \theta, \quad \rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \theta$$

或

$$\nabla^2 \theta - \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = 0 \quad (3-13)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

(3-13) 式为纵波波动方程, 波的传播速度为 V_p 。由于体胀系数 $\theta = \nabla \cdot \vec{S}$ 表示体积的相对变化, 说明弹性体内体积变化的扰动以疏密相间的球层状波动形式向四周传播, 故称这种波为胀缩波。这种波只有体积的胀缩变化, 而没有旋转 (也称无旋波), 质点振动方向与波的传播方向一致, 如图 3-3a 所示。

对 (3-12) 式两边取旋度,

$$\nabla \times (\nabla \theta) = 0, \quad \nabla \times (\nabla^2 \vec{S}) = \nabla^2 (\nabla \times \vec{S}), \quad \rho \frac{\partial^2 (\nabla \times \vec{S})}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 (\nabla \times \vec{S})$$

令 $\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{S}$, 则上式可写为:

$$\nabla^2 \vec{\Omega} - \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \vec{\Omega}}{\partial t^2} = 0, \quad (3-14)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

方程 (3-14) 是横波的波动方程, 其传播速度为 V_s 。由于 $\vec{\Omega} = (1/2) \cdot (\nabla \times \vec{S})$ 表示弹性体内的旋转运动, 说明弹性体内的扰动是以旋转球层状的波动形式向外传播, 故这种波也称为旋转波。因为横波只有剪切变化, 故又称剪切波, 质点振动方向与波的传播方向垂直, 如图 3-3b 所示。

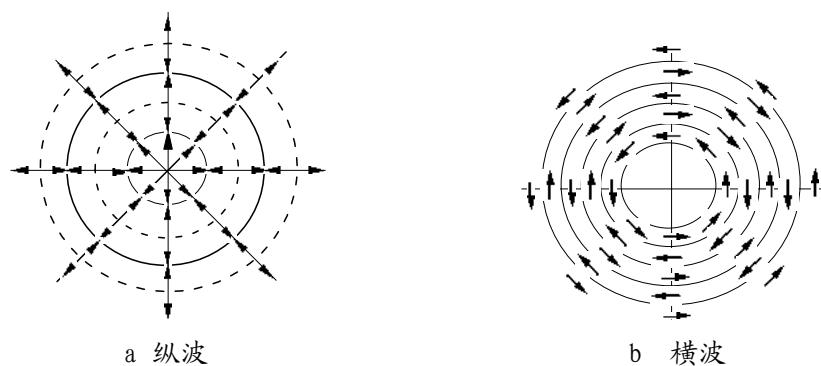


图 3-3 纵波和横波质点振动方向与波传播方向的关系

若将位移用如下的势函数来表示

$$\vec{S} = \nabla \varphi + \nabla \times (\chi \mathbf{e}_z) + \nabla \times \nabla \times (\psi \mathbf{e}_z) \quad (3-15)$$

将上式代入 (3-12) 式的波动方程后整理可得

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla^2 \varphi - \rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}] + \nabla \times [(\mu \nabla^2 \chi - \rho \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2}) \mathbf{e}_z] + \nabla \times \nabla \times [(\mu \nabla^2 \psi - \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}) \mathbf{e}_z] = 0 \quad (3-16)$$

由 (3-16)、(3-13) 和 (3-14) 可知, 位移表达式中含有梯度项的势函数 φ 代表纵波位移项, 含有旋度项的势函数 χ 和 ψ 则代表横波位移项 (分别对应横波的 SH 和 SV 波型)。故有:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \chi = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \psi = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{cases}, \quad (3-17)$$

矢量波动方程 (3-12) 就被转换成标量波动方程 (3-17)。 φ 、 χ 、 ψ 分别对应着时域中 P 波、 SH 波和 SV 波的三个位移势函数。(3-17) 在柱坐标系中的通解为:

$$\begin{cases} \varphi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \varphi(k, z, \omega) J_n(kr) \cos(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \\ \chi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \chi(k, z, \omega) J_n(kr) \sin(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \\ \psi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \psi(k, z, \omega) J_n(kr) \cos(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \end{cases} \quad (3-18)$$

式中 $J_n(x)$ 为第一类 n 阶贝塞尔 (Bessel) 函数。

将 (3-18) 式中的位移势代入 (3-17) 中, 可得:

$$(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + a^2) \varphi = 0, \quad (\frac{\partial^2}{\partial z^2} + b^2) \chi = 0, \quad (\frac{\partial^2}{\partial z^2} + b^2) \psi = 0 \quad (3-19)$$

式中 $a^2 = k_p^2 - k^2$, $b^2 = k_s^2 - k^2$, $k_p^2 = \frac{\omega^2}{V_p^2}$, $k_s^2 = \frac{\omega^2}{V_s^2}$ 。

φ 、 χ 、 ψ 分别为频率波数域中的位移势, 其通解为:

$$\begin{cases} \varphi = Ae^{iaz} + Be^{-iaz} \\ \psi = Ce^{ibz} + De^{-ibz} \\ \chi = Ee^{ibz} + Fe^{-ibz} \end{cases} \quad (3-20)$$

因此，在时间域中，三个位移势具有如下形式的解

$$\begin{cases} \varphi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (Ae^{iaz} + Be^{-iaz}) J_n(kr) \cos(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \\ \psi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (Ce^{ibz} + De^{-ibz}) J_n(kr) \cos(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \\ \chi(r, \theta, z; t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} (Ee^{ibz} + Fe^{-ibz}) J_n(kr) \sin(n\theta) e^{-i\omega t} k dk d\omega \end{cases} \quad (3-21)$$

3.2 地震反射法基本原理

地震反射法以研究介质的弹性（波速、密度、泊松比、波阻抗、弹性模量等）为基础，从运动学（时空关系）和动力学（能量）的角度研究人工激发的应力波在介质中的传播规律，通过观测、分析地震反射波的旅行时间、振幅、相位、频率等特性来判断介质中弹性分界面的性质和位置。在隧道地质灾害超前预报中一般采用 TSP 法（TVSP 法少用），国内一般称之为负视速度法。

3.2.1 TSP 法

TSP 法（Tunnel Seismic Predication，隧道地震预报）是在隧道掌子面后方沿隧道边墙布置多个浅钻孔作为炮点，激发地震波，利用三分量传感器在远离掌子面的某测点接收来自前方界面的反射波，通过对所接收的地震信号进行处理，提取有效信号和反射界面，其工作原理如图 3-4 所示。

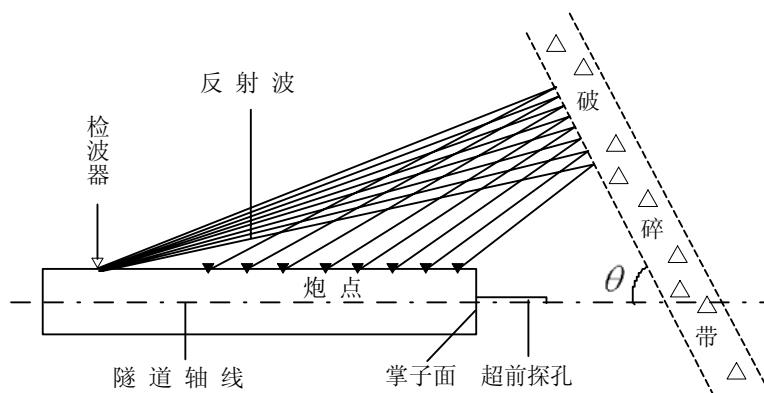


图 3-4 TSP 法工作原理示意图

3.2.2 TVSP 法

TVSP 法 (Tunnel Vertical Seismic Profiling, 隧道垂向地震剖面法) 起源于前苏联的垂直地震剖面法, 其工作方法是在隧道工作面选一个点作震源, 在工作面后方一定距离垂直隧道走向打一个钻孔, 在钻孔中安设若干个检波器 (单分量或三分量) 接收来自前方界面的反射波, 如图 3-5 所示。

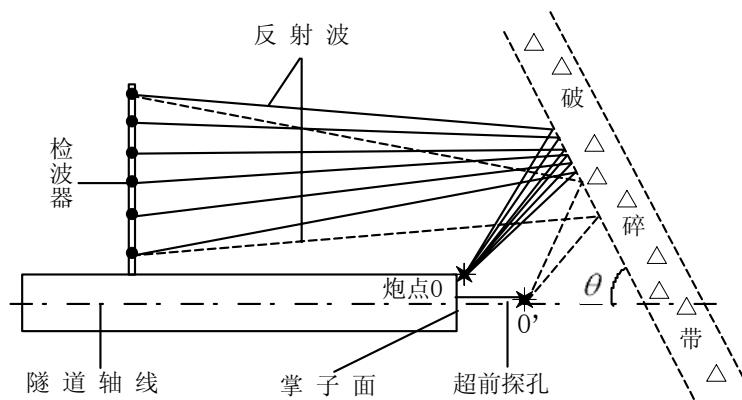


图 3-5 TVSP 法工作原理示意图

TSP 法和 TVSP 法都是通过观测和分析反射波的旅行时间、波形、相位和振幅特征来推断前方介质的性质 (如岩石的密度、杨氏模量和泊松比率和地震波速率), 利用时距曲线来计算前方结构面的位置和产状 (如反射界面的空间位置及其与隧道轴线的夹角等), 以此推断掌子面前方岩石致密程度、含水性等划分围岩类别的基本参数。理论上, TVSP 法比 TSP 法效果更好, 但实际施工中具有较大的困难, 故目前多采用 TSP 法。

3.3 时距曲线方程

3.3.1 一个平界面

时距曲线从运动学角度描述了地震波在传播过程中的时—空关系, 以 TSP 工作方法为例, 当反射界面走向与隧道轴相交于 C 点时, 地震入射波和反射波传播路径如图 3-6 所示。

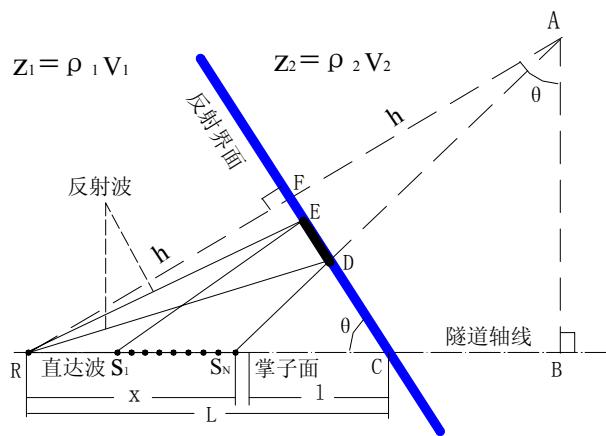


图 3-6 地震波传播路径示意图

在 S_1, S_2, \dots, S_N 各点分别激发，地震波从炮点 S_i 出发，以某一角度 α_i 入射到弹性分界面（波阻抗不同），反射到检波点 R 。第 i 个炮点激发的地震波所走的实际路径为折线 S_iDR ，根据反射定理和镜像原理（ A 为 R 的像点）求得反射波时距曲线方程为：

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{v_1} \sqrt{(2h \cos \theta)^2 + (x - 2h \sin \theta)^2} \\ &= \frac{1}{v_1} \sqrt{(2L \sin \theta \cos \theta)^2 + (x - 2L \sin^2 \theta)^2} \end{aligned} \quad (3-22)$$

直达波时距曲线方程为：

$$t = \frac{x}{v_1} \quad (3-23)$$

其中： x 为各炮点 S_i 到检波点 R 的距离，

v_1 为第 1 层介质中的地震纵波速度，

$h = L \sin \theta$, 为检波点 R 到反射界面的距离，

L 为反射界面与隧道轴线交点到检波点 R 的距离，

θ 为反射界面与隧道轴线的夹角，称为“空间角”或“走向调谐角”。

将反射波时距曲线方程 (3-22) 变换成下式：

$$\frac{t^2}{\left(\frac{2h \cos \theta}{v_1}\right)^2} - \frac{(x - 2h \sin \theta)^2}{(2h \cos \theta)^2} = 1 \quad (3-24)$$

不难看出，(3-24) 式为双曲线方程，因此一个平界面的反射波时距曲线是双曲线 ($t > 0$)，其对称轴为 $x = x_m = 2h \sin \theta = 2L \sin^2 \theta$ ，

极小点为 (x_m, t_m) ,

$$\begin{cases} x_m = 2h \sin \theta \\ t_m = 2h \cos \theta / v_1 \end{cases}$$

直达波的时距曲线方程 (3-23) 是直线方程, 斜率为 $k = \frac{1}{v_1}$ 。

图 3-7a 表明了同一界面、不同“空间角”反射波理论时距曲线的形态和特点及其与直达波的关系 ($L = 200m$, $v_1 = 3500m/s$, $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$); 在 TSP 法实际观测中, 炮点只布置在掌子面和接收器之间的一段距离内 ($S_1 \sim S_N$ 一般为 16~55m, 如图 3-6 所示), 因此, 只能观测到双曲线的一部分, 图 3-7b 即为观测范围内的时距曲线 ($L = 100, 200m$, $v_1 = 3500m/s$, $\theta = 45^\circ, 80^\circ$)。

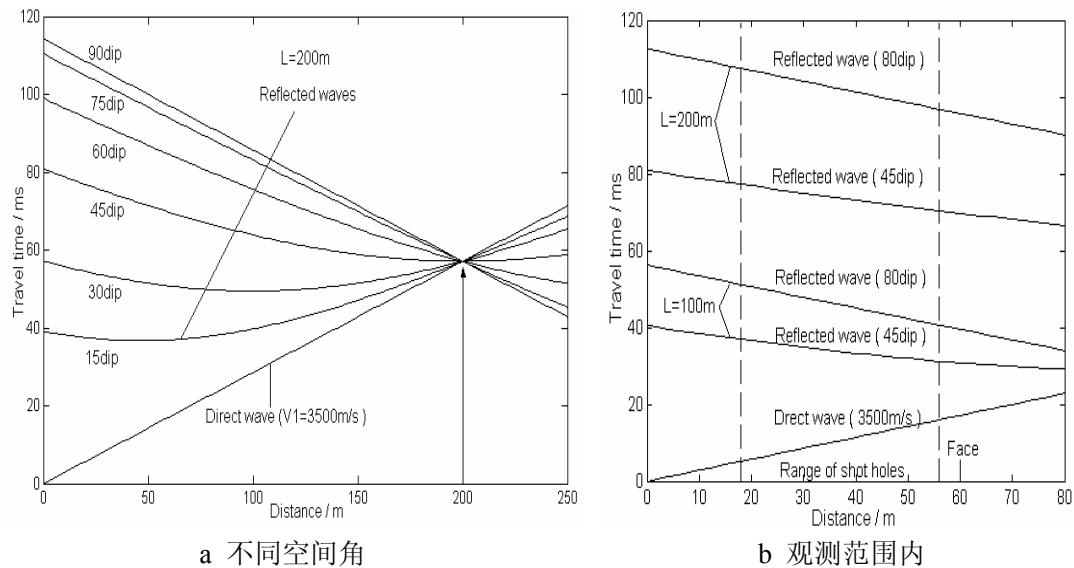


图 3-7 反射波、直达波时距曲线

3.3.2 多个平界面

设某剖面有 $n+1$ 层介质、 n 个弹性分界面 R_1, R_2, \dots, R_n , 各层的地震波速度分别为 $v_1, v_2 \dots v_i \dots, v_n, v_{n+1}$, 各界面互相平行, 与隧道轴线夹角均为 θ , 各界面与隧道轴线交点距接收点 R 的距离分别为 $L_1, L_2 \dots L_i \dots, L_n$, 如图 3-8 所示。

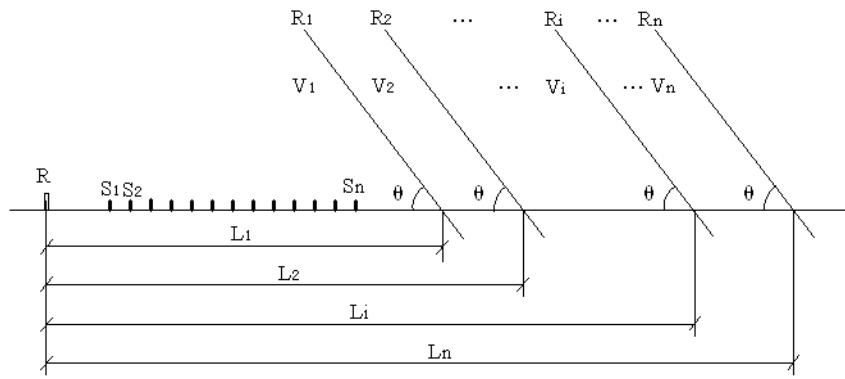


图 3-8 多个界面模型

第 i 个界面 ($i > 1$) 的反射波时距曲线方程可由下列参数方程表示:

$$\begin{cases} x_i = \frac{2 \sum_{j=1}^i (L_j - L_{j-1}) \tan \alpha_{j(j+1)}}{1 + \sin \theta \tan \alpha_{12}} \\ t_i = 2 \sum_{j=1}^i \frac{L_j - L_{j-1}}{V_j \cos \alpha_{j(j+1)}} - \frac{x \sin \theta}{V_1 \cos \alpha_{12}} \end{cases} \quad (3-25)$$

由斯奈尔定理:

$$\frac{\sin \alpha_{12}}{V_1} = \frac{\sin \alpha_{23}}{V_2} = \dots = \frac{\sin \alpha_{j(j+1)}}{V_j} = \dots = \frac{\sin \alpha_{n(n+1)}}{V_n} = p \quad (3-26)$$

$$\text{得 } \cos \alpha_{j(j+1)} = \sqrt{1 - V_j^2 p^2}, \quad \tan \alpha_{j(j+1)} = \frac{V_j p}{\sqrt{1 - V_j^2 p^2}}$$

其中 $\alpha_{j(j+1)}$ 为地震波从第 j 层介质入射到第 $j+1$ 层介质时的入射角:

$$0 \leq \alpha_{j(j+1)} < \frac{\pi}{2} - \theta$$

以三层介质为例, 第一个界面 R_1 的时距曲线方程为:

$$t_1 = \frac{1}{V_1} \sqrt{(2L_1 \sin \theta \cos \theta)^2 + (x - 2L_1 \sin^2 \theta)^2} \quad (3-27)$$

第二个界面 R_2 的时距曲线参数方程为:

$$\begin{cases} x_2 = 2 \frac{L_1 \tan \alpha_{12} + (L_2 - L_1) \tan \alpha_{23}}{1 + \sin \theta \tan \alpha_{12}} \\ t_2 = 2 \left(\frac{L_1}{V_1 \cos \alpha_{12}} + \frac{L_2 - L_1}{V_2 \cos \alpha_{23}} \right) - \frac{x \sin \theta}{V_1 \cos \alpha_{12}} \end{cases} \quad (3-28)$$

图 3-9 为两个平行界面 ($\theta = \pi/3$ 、 $L_1 = 100m$ 、 $L_2 = 150m$ 、 $v_1 = 3200m/s$ 、 $v_2 = 3600m/s$) 的反射波时距理论曲线, R_1 界面的时距曲线为双曲线, R_2 界面的时距曲线不是双曲线; 其中图 3-9a 反映了理论时距曲线形态, 图 3-9b 反映了观测范围内的时距曲线形态。

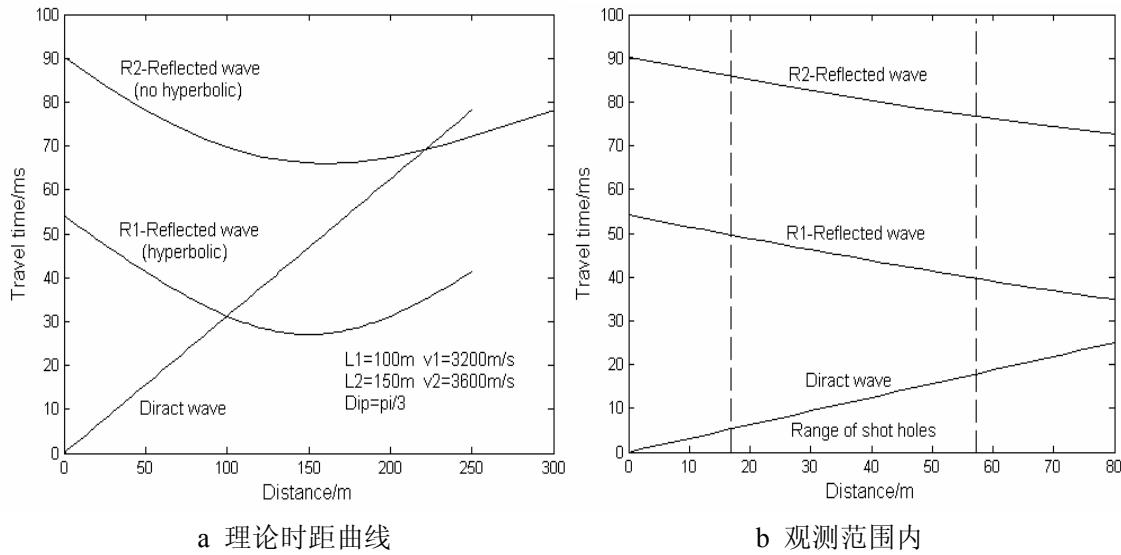


图 3-9 两个平行界面反射波时距曲线

同理, 对于多个界面而言, 第一个界面的反射波时距曲线为双曲线, 其它为参数方程曲线, 时距曲线形态如图 3-10 所示。

第一个界面反射波时距曲线方程:

$$t_1 = \frac{1}{v_1} \sqrt{(2L_1 \sin \theta \cos \theta)^2 + (x - 2L_1 \sin^2 \theta)^2} \quad (3-29)$$

第 i 个界面时距曲线参数方程为:

$$\begin{cases} x_i = \frac{2 \sum_{j=1}^i (L_j - L_{j-1}) \tan \alpha_{j(j+1)}}{1 + \sin \theta \tan \alpha_{12}} \\ t_i = 2 \sum_{j=1}^i \frac{L_j - L_{j-1}}{v_j \cos \alpha_{j(j+1)}} - \frac{x \sin \theta}{v_1 \cos \alpha_{12}} \end{cases} \quad (3-30)$$

图 3-10 为前方存在 5 个平行界面时的反射波时距理论曲线, R_1 界面对应的时距曲线为双曲线, R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 界面对应的时距曲线不是双曲线; 反射界面距离接收点越远 (L 越大), 反射波时程越长、时距曲线越平缓。图 3-10a 反映了理论时距曲线形态, 图 3-10b 反映了观测范围内的理论时距曲线形态。

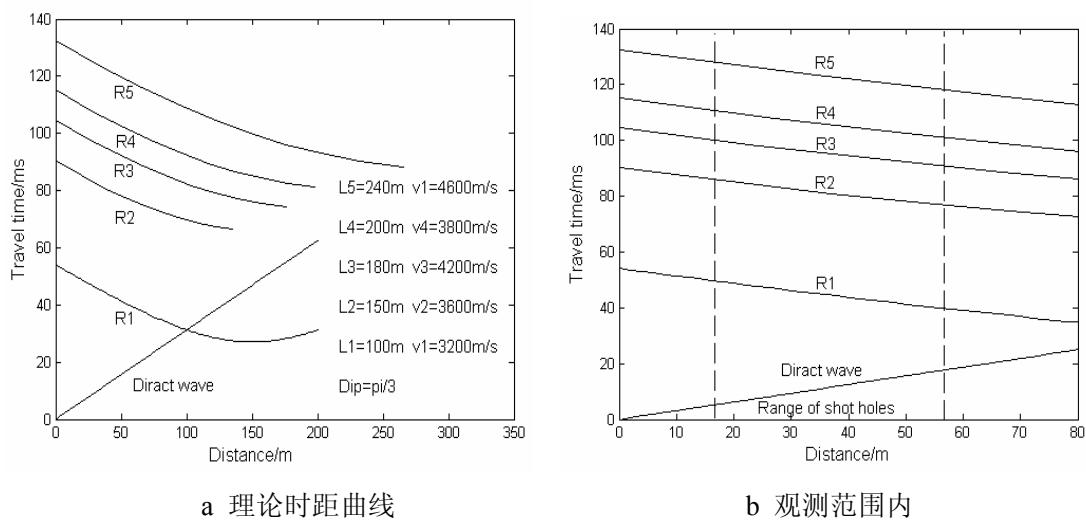


图 3-10 多个平行界面反射波时距曲线

3.3.3 时距曲线特点

图 3-7、图 3-9 和图 3-10 表明了反射波时距曲线的特点及其与直达波的关系：

- 1、直达波时距曲线为直线，过原点。
- 2、一个平界面的反射波时距曲线为双曲线，存在多个界面时除第一个界面为双曲线外，其它界面均不是双曲线。
- 3、当反射界面与隧道轴线交点到检波点的距离 L 一定时，不同“空间角”的时距曲线都与直达波时距曲线相交于同一点，即 $x = L$ 。根据“反射波时距曲线与直达波时距曲线交点横坐标 $x = L$ ”可判断隧道掌子面前方界面的位置，超前探测的距离 δ （从掌子面起）为：

$$\delta = L - x_0$$

式中 x_0 为检波点 R 到掌子面的距离。

- 4、空间角 θ 越大，能观测到的反射界面越短（图 3-6 中 DE 段的长度越小）， $\theta = 90^\circ$ 时，多点激发也只能接收到各界面同一点的反射波； θ 越小，视速度越大，斜率越小，反射波时距曲线越平缓。
- 5、观测范围内，随着炮检距 x 的增大，直达波旅行时间越来越长，而反射波旅行时间却越来越短（实测范围内不会出现极小点）；反射波与直达波时距曲线的斜率（视速度的倒数）符号相反，即所谓“负视速度”，二者呈“剪刀叉”相交。
- 6、 L 越大，时距曲线越平缓。

3.4 弹性纵波在界面上的反射和透射

3.4.1 波函数

地震纵波入射到弹性介质的分界面时,不仅会在第一种介质中产生反射,而且在第二种介质中产生透射,反射波和透射波中都包含纵波和横波两种成分,如图 3-11 所示^[97]。

入射 P 波、反射 P 波、反射 SV 波、透射 P 波和透射 SV 波的位函数可表示为:

$$\varphi^{(1)} = A_1 e^{j(k_x^{(1)}x + k_z^{(1)}z - \omega t)}$$

$$\varphi^{(2)} = A_2 e^{j(k_x^{(2)}x + k_z^{(2)}z - \omega t)}$$

$$\psi^{(3)} = A_3 e^{j(k_x^{(3)}x + k_z^{(3)}z - \omega t)}$$

$$\varphi^{(4)} = A_4 e^{j(k_x^{(4)}x + k_z^{(4)}z - \omega t)}$$

$$\psi^{(5)} = A_5 e^{j(k_x^{(5)}x + k_z^{(5)}z - \omega t)}$$

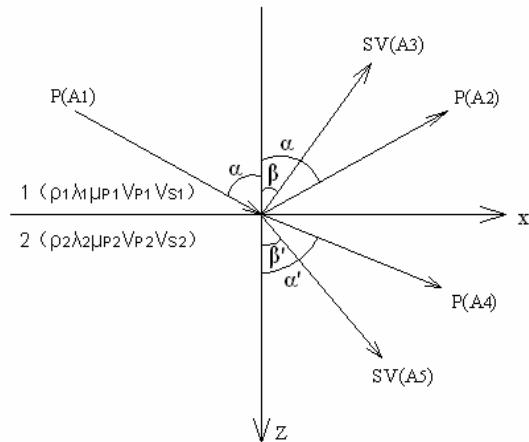


图 3-11 P 波在界面上的反射和透射

在上述式中,

$$k_x^{(1)} = k_x^{(2)} = \frac{\omega}{V_{P1}} \sin \alpha, \quad k_x^{(3)} = \frac{\omega}{V_{S1}} \sin \beta, \quad k_x^{(4)} = \frac{\omega}{V_{P1}} \sin \alpha', \quad k_x^{(5)} = \frac{\omega}{V_{S1}} \sin \beta'$$

且有 $k_x^{(1)} = k_x^{(2)} = k_x^{(3)} = k_x^{(4)} = k_x^{(5)}$

由此可得反射和透射定律(斯奈尔定律):

$$\frac{V_{P1}}{\sin \alpha} = \frac{V_{P2}}{\sin \beta} = \frac{V_{P2}}{\sin \alpha'} = \frac{V_{S1}}{\sin \beta'} \quad (3-31)$$

此外,由图 3-9 可以看出:

$$k_x^{(1)} = \frac{\omega}{V_{P1}} \cos \alpha$$

$$k_x^{(2)} = -\frac{\omega}{V_{P1}} \cos \alpha$$

$$k_x^{(3)} = -\frac{\omega}{V_{S1}} \cos \beta$$

$$k_x^{(4)} = \frac{\omega}{V_{P1}} \cos \alpha'$$

$$k_x^{(5)} = \frac{\omega}{V_{s1}} \cos \beta'$$

在介质 1 中, 总的位函数为

$$\varphi_1 = \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)} = A_1 e^{j(k_x^{(1)} x + k_z^{(1)} z - \omega t)} + A_2 e^{j(k_x^{(2)} x + k_z^{(2)} z - \omega t)} \quad (3-32)$$

$$\psi_1 = \psi^{(3)} = A_3 e^{j(k_x^{(3)} x + k_z^{(3)} z - \omega t)} \quad (3-33)$$

在介质 2 中, 总的位函数为

$$\varphi_2 = \varphi^{(4)} = A_4 e^{j(k_x^{(4)} x + k_z^{(4)} z - \omega t)} \quad (3-34)$$

$$\psi_2 = \psi^{(5)} = A_5 e^{j(k_x^{(5)} x + k_z^{(5)} z - \omega t)} \quad (3-35)$$

3.4.2 边界条件

在弹性分界面处, 地震纵波位移连续、应力连续,

即在 $z=0$ 处有

$$\left. \begin{array}{l} u_1 = u_2 \\ \omega_1 = \omega_2 \\ (\sigma_{zz})_1 = (\sigma_{zz})_2 \\ (\tau_{xx})_1 = (\tau_{xx})_2 \end{array} \right\} \quad (3-36)$$

用位函数表示为

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \frac{\partial \psi_1}{\partial z} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \\ \frac{V_{p1}^2 - 2V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} + 2V_{s1}^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x \partial z} \right) = \\ \frac{\rho_2}{\rho_1} \left[\frac{V_{p2}^2 - 2V_{s2}^2}{V_{p2}^2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} + 2V_{s2}^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x \partial z} \right) \right] \\ V_{s1}^2 \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial z^2} \right) = \frac{\rho_2}{\rho_1} V_{s2}^2 \left(2 \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} \right) \end{array} \right\} \quad (3-37)$$

3.4.3 反射系数和透射系数

波函数应满足上述边界条件。将 (3-32) ~ (3-35) 代入 (3-37), 整理得:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{1}{V_{p1}} \sin \alpha (A_1 + A_2) + \frac{1}{V_{s1}} \cos \beta A_3 = \frac{1}{V_{p2}} \sin \alpha' A_4 - \frac{1}{V_{s2}} \cos \beta' A_5 \\
 & \frac{1}{V_{p1}} \cos \alpha (A_1 - A_2) + \frac{1}{V_{s1}} \sin \beta A_3 = \frac{1}{V_{p2}} \cos \alpha' A_4 + \frac{1}{V_{s2}} \sin \beta' A_5 \\
 & -\frac{V_{p1}^2 - 2V_{s1}^2 \sin^2 \alpha}{V_{p1}^2} (A_1 + A_2) + \sin 2\beta A_3 = -\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{V_{p2}^2 - 2V_{s2}^2 \sin^2 \alpha'}{V_{p2}^2} A_4 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \sin 2\beta' A_5 \\
 & -\frac{V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \sin 2\alpha (A_1 - A_2) + \cos 2\beta A_3 = -\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{2V_{s2}^2}{V_{p2}^2} \sin 2\alpha' A_4 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \cos 2\beta' A_5
 \end{aligned} \right\} \quad (3-38)$$

由斯奈尔定律 (3-31), 可得

$$V_{p1}^2 - 2V_{s1}^2 \sin^2 \alpha = V_{p2}^2 - 2V_{p2}^2 \sin^2 \beta = V_{p1}^2 \cos 2\beta$$

$$V_{p2}^2 - 2V_{s2}^2 \sin^2 \alpha' = V_{p2}^2 - 2V_{p2}^2 \sin^2 \beta' = V_{p2}^2 \cos 2\beta'$$

代入 (3-38) 中的第三式, 并将此方程组的各项同除 A_1 , 得

$$\left. \begin{aligned}
 & \sin \alpha \frac{A_2}{A_1} + \frac{V_{p1}}{V_{s1}} \cos \beta \frac{A_3}{A_1} - \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \sin \alpha' \frac{A_4}{A_1} + \frac{V_{p1}}{V_{s2}} \cos \beta' \frac{A_5}{A_1} = -\sin \alpha \\
 & \cos \alpha \frac{A_2}{A_1} - \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \sin \beta \frac{A_3}{A_1} + \frac{V_{p1}}{V_{p2}} \cos \alpha' \frac{A_4}{A_1} + \frac{V_{p1}}{V_{s2}} \sin \beta' \frac{A_5}{A_1} = \cos \alpha \\
 & \cos 2\beta \frac{A_2}{A_1} - \sin 2\beta \frac{A_3}{A_1} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \cos 2\beta' \frac{A_4}{A_1} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \sin 2\beta' \frac{A_5}{A_1} = -\cos 2\beta \\
 & \frac{V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \sin 2\alpha \frac{A_2}{A_1} + \cos 2\beta \frac{A_3}{A_1} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{V_{s2}^2}{V_{p2}^2} \sin 2\alpha' \frac{A_4}{A_1} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \cos 2\beta' \frac{A_5}{A_1} = \frac{V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \sin 2\alpha
 \end{aligned} \right\} \quad (3-39)$$

方程组 (3-39) 即为诺特 (Knott) 方程, 它反映了各波的位函数振幅之间的关系, 其中 $\frac{A_2}{A_1}$ 、 $\frac{A_3}{A_1}$ 、 $\frac{A_4}{A_1}$ 和 $\frac{A_5}{A_1}$ 分别为 P 波的反射系数、SV 波的反射系数、P 波的透射系数和 SV 波的透射系数。

用位移振幅比可表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{A_2}{A_1} &= \frac{S_{02}}{S_{01}} = R_{pp} \\ \frac{A_3}{A_1} &= \frac{S_{03}}{S_{01}} \frac{V_{s1}}{V_{p1}} = \frac{V_{s1}}{V_{p1}} R_{ps} \\ \frac{A_4}{A_1} &= \frac{S_{04}}{S_{01}} \frac{V_{p2}}{V_{p1}} = \frac{V_{p2}}{V_{p1}} T_{pp} \\ \frac{A_5}{A_1} &= \frac{S_{05}}{S_{01}} \frac{V_{s2}}{V_{p1}} = \frac{V_{s2}}{V_{p1}} T_{ps} \end{aligned} \right\} \quad (3-40)$$

其中 S_{01} 、 S_{02} 、 S_{03} 、 S_{04} 和 S_{05} 分别为入射 P 波、反射 P 波、反射 SV 波、透射 P 波和透射 SV 波的位移振幅； R_{pp} 、 R_{ps} 、 T_{pp} 和 T_{ps} 分别为以位移振幅表示的 P 波反射系数、SV 波反射系数、P 波透射系数和 SV 波透射系数。将其代入(3-39) 可得佐普里兹 (Zoeppritz) 方程：

$$\left. \begin{aligned} \sin \alpha R_{pp} + \cos \beta R_{ps} - \sin \alpha' T_{pp} + \cos \beta' T_{ps} &= -\sin \alpha \\ \cos \alpha R_{pp} - \sin \beta R_{ps} + \cos \alpha' T_{pp} + \sin \beta' T_{ps} &= \cos \alpha \\ \cos 2\beta R_{pp} - \frac{V_{s1}}{V_{p1}} \sin 2\beta R_{ps} - \frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} \cos 2\beta' T_{pp} - \frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_{p1}} \sin 2\beta' T_{ps} &= -\cos 2\beta \\ \frac{V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \sin 2\alpha R_{pp} + V_{s1} \cos 2\beta R_{ps} + \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{V_{s2}^2}{V_{p2}^2} \sin 2\alpha' T_{pp} - \frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1} \cos 2\beta' T_{ps} &= \frac{V_{s1}^2}{V_{p1}^2} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (3-41)$$

求解佐普里兹 (Zoeppritz) 方程可以得到各个位移反射系数和透射系数，式中除包括介质的物性参数 ρ_1 、 ρ_2 、 V_{p1} 、 V_{p2} 、 V_{s1} 、 V_{s2} 外，还含有入射角 α 、反射角 β 及透射角 α' 和 β' ，反射角和透射角都可以根据斯奈尔定律用入射角来表示，因此，反射系数和透射系数实际上是由入射角和介质的物性决定的。如果已知入射角和反射系数及透射系数，则可根据佐普里兹 (Zoeppritz) 方程来推断介质的物性参数。基于这一原理，地震反射法可以依据反射振幅 (能量) 随炮检距的变化规律，从动力学的角度来研究介质的物理性质^[97]。

3.4.4 垂直入射反射系数

P 波垂直入射，入射角 $\alpha=0$ ，由斯奈尔定律可知，这时候反射角和透射角都为零。实际勘探工作中，当地层倾角不大而界面埋深远大于炮检距时，有效波的传播可近似看成垂直入射。

在(3-41)中令 $\alpha=\beta=\alpha'=\beta'=0$ ，则垂直入射情况下的佐普里兹 (Zoeppritz) 方程可写成

$$\left. \begin{array}{l} R_{ps} + T_{ps} = 0 \\ R_{pp} + T_{pp} = 1 \\ R_{pp} - \frac{\rho_2 V_{p2}}{\rho_1 V_{p1}} T_{pp} = -1 \\ R_{ps} - \frac{\rho_2 V_{s2}}{\rho_1 V_{s1}} T_{ps} = 0 \end{array} \right\} \quad (3-42)$$

解方程组得

$$\left. \begin{array}{l} R_{pp} = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}} \\ R_{ps} = 0 \\ T_{pp} = \frac{2\rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}} \\ T_{ps} = 0 \end{array} \right\} \quad (3-43)$$

地震波的振幅和能量随传播距离和旅行时间的增长而衰减，波在介质中能量吸收和频率变化（频散）反映了它的运动学特性，遇到弹性分界面时产生反射和透射。由（3-43）式可知，介质的波阻抗差异越大，反射信号越强，而透射信号越弱^[97]。

反射系数越大，反射波的振幅和能量越强；反射系数 $R_{pp} > 0$ ，反射波与入射波相位相同，说明地震波从软弱岩层入射到刚性岩层； $R_{pp} < 0$ 时，反射波与入射波相位相反，或存在“半波损失”，说明地震波从刚性岩层入射到软弱岩层，如图 3-12 所示。若纵波速度 V_p 减小，则表明岩体的裂隙密度或孔隙度增加，岩体体积密度减小；当岩石中含水时， V_p 随含水量的不同而改变，而横波速度 V_s 则无明显变化。

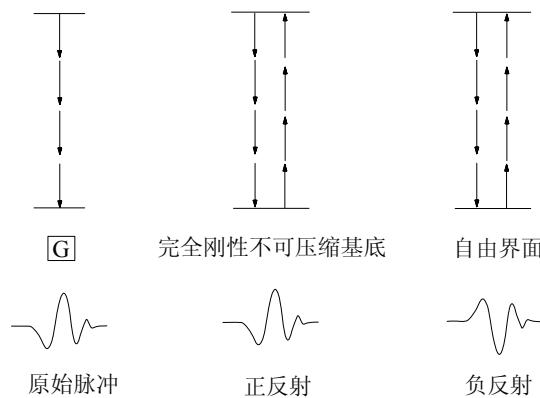


图 3-12 正反射和负反射示意图

3.5 地震记录的人工合成

地震子波是由震源激发、经地下传播并被人们在地面或井中接收到的地震波，是一个短脉冲振动，可理解为有起始时间、有限能量、且在短时间内衰减的一个信号，是组成地震记录的基本单位。其基本属性是振动的非周期性，它在介质中传播时速度、振幅和相位得变化与地层结构、弹性性质等因素有关。根据地震子波的特征，用一些函数的形式近似地描述这种非周期振动，并模拟地震记录。常用地震子波有 Richer 子波、Zinc 子波和正弦指数衰减子波等。

3.5.1 地震子波及二层介质模型地震记录合成

广泛用于地震模型计算的 Richer 子波在时间域的数学表达式为^[87,137,138]：

$$r(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] e^{-(\pi f_p t)^2} \quad (3-44)$$

在频率域可表示为：

振幅谱	$F(f) = (2/\pi)(f^2 / f_p^3) e^{-(f/f_p)^2}$
相位谱	$\theta(f) = 0$

式中， f_p 为峰值频率，若用 f_b 定义为子波宽度 T_b （或称主周期）的倒数，则有

$$f_p \approx 0.77 f_b$$

Zinc 子波在时间域的数学表达式为：

$$z(t) = \frac{2f_H \sin 2\pi f_H t}{2\pi f_H t} - \frac{2f_L \sin 2\pi f_L t}{2\pi f_L t} \quad (3-45)$$

式中， f_H 为子波的上限频率或称高截频， f_L 为子波的下限频率或称低截频。

$$f_b \approx 0.7 f_H, \quad \text{中心频率 } f_m = (f_H + f_L) / 2$$

正弦指数衰减子波在时间域的数学表达式为：

$$w(t) = e^{-\beta^2 t^2} \sin 2\pi f_b t \quad (3-46)$$

式中， f_b 为子波主频， β 为子波衰减系数。

图 3-13a、b、c 分别为 Richer 子波、Zinc 子波、正弦指数衰减子波的波形图和振幅谱曲线。子波峰值频率越大，子波频带越宽，周期越小。Richer 子波和 Zinc 子波主瓣幅度突出，但旁瓣幅度较大；最小相位子波起跳点清楚，但旁瓣波形较复杂，与脉冲函数都存在一定差异。对实际地震资料而言，地震子波是未知的，难以通过时间域子波波形确定其主频，只能通过频谱确定其峰值频率。由于地震子波的主频一般高于峰值频率，所以，采用峰值频率代替主频可以得到关于地震资料分辨率的较为保守的估计，实用中可信度更高^[137-140]。

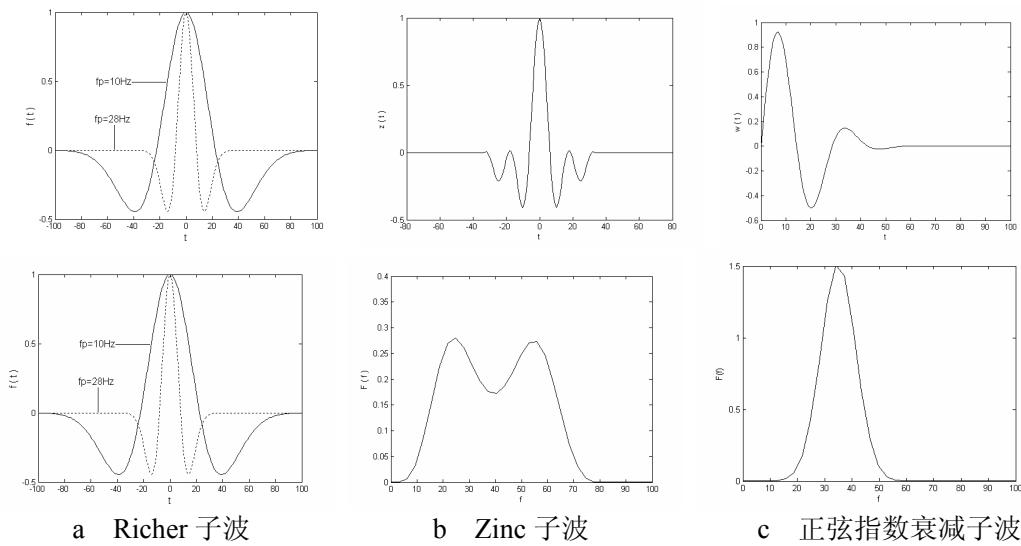


图 3-13 常用子波波形和振幅谱

理论上, 只要知道地震子波波形和反射系数随深度 (或 t_0 时间) 的变化规律就可计算了, 但实际上, 地震子波和反射系数是不容易取得的, 这种计算包含了许多简化: 地层横向均匀, 沿纵向 (深度) 是由不同弹性特征的薄层构成; 地震子波一平面波形式垂直入射到界面, 各层的反射子波和地震子波形状相同, 只是振幅和极性不同; 所有波的转换和吸收、绕射等能量损失都不考虑。

若地震子波波形用 $S(t)$ 表示, 地震剖面反射系数也表示成双程反射旅行时间的函数 $R(t)$, 在数学上可用该二者的褶积来表示地震记录 $f(t)$ 。

$$f(t) = S(t) * R(t) = \int_0^T S(\tau)R(t-\tau)d\tau \quad (3-47)$$

设有二层介质, $V_1 = 2000m/s$, $V_2 = 3200m/s$, $L = 100m$, $\theta = \pi/3$, 存在速度为 $V_g = 1250m/s$ 的干扰波。用 Richer 子波和最小相位子波 (正弦指数衰减子波) 与反射系数随时间的变化合成的二层介质地震记录, 如图 3-14 所示。

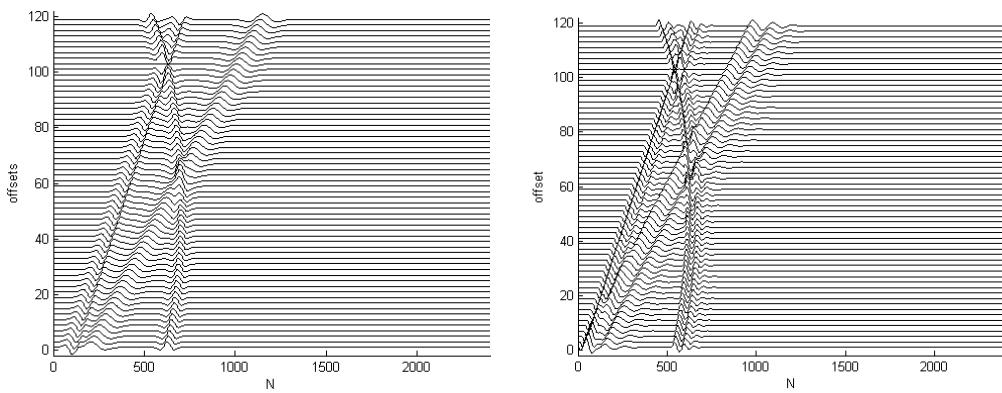


图 3-14 二层介质合成记录

3.5.2 多层介质模型地震记录合成

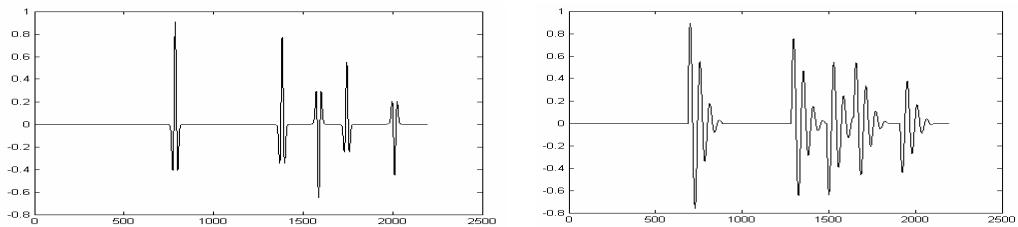
若有 6 层介质，各层参数如表 3-1，为简化计算和绘图，以垂直入射情况为例计算各界面的反射系数：

$$R_{pp(i,i+1)} = \frac{\rho_{i+1}V_{pi+1} - \rho_iV_{pi}}{\rho_{i+1}V_{pi+1} + \rho_iV_{pi}} \quad (3-48)$$

表 3-1 各层参数

参数	厚度 h_i (m)	密度 ρ_i (g/cm ³)	纵波速度 V_{pi} (km/s)	反射系数 $R_{pp(i,i+1)}$	层间时程 Δt_0 (ms)
第 1 层	100	2.04	2000	0.3023	100.0
第 2 层	50	2.38	3200	0.1464	31.26
第 3 层	30	2.46	3600	-0.1328	16.66
第 4 层	20	2.26	3000	0.1709	13.33
第 5 层	40	2.52	3800	0.0486	21.06
第 6 层		2.58	4400		

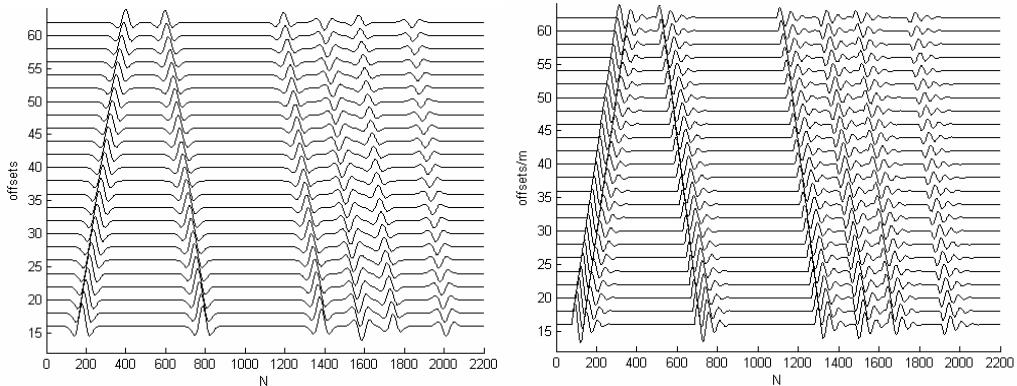
用 Richer 子波、最小相位子波与反射系数随时间的变化合成二层介质地震记录，图 3-15 为单道地震合成记录，图 3-16 为 24 道地震合成记录。以下模型均没有考虑地震波随炮检距增加的振幅衰减，反射系数时间序列按 3-22、3-23、和 3-25 式计算。



a 由 Richer 子波合成的单道记录

b 由最小相位子波合成的单道记录

图 3-15 单道合成记录



a 由 Richer 子波合成的多道记录

b 由最小相位子波合成的多道记录

图 3-16 多道合成记录

若存在速度为 $V_{g1} = 1250m/s$, $V_{g2} = 500m/s$ 的干扰波, 则 24 道合成记录如图 3-17 所示。两个干扰波由于速度和频率的不同, 叠加在地震记录中, 在不同道出现复杂程度不同的干扰波形。

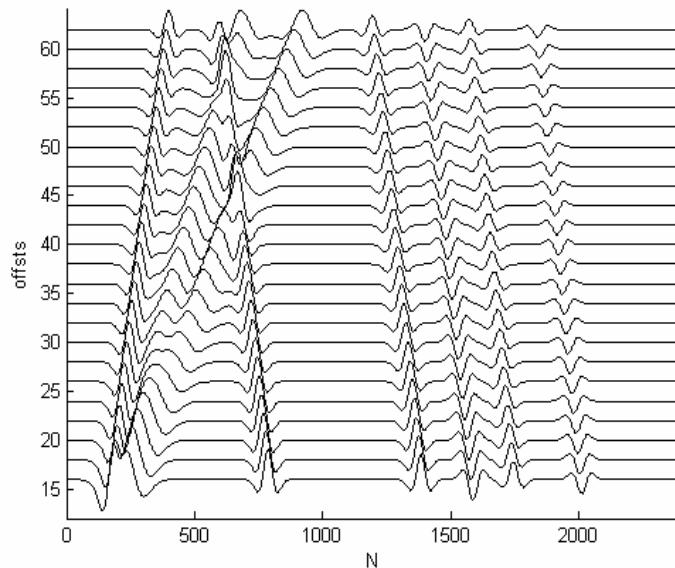


图 3-17 多层介质模型合成记录

3.5.3 垂向分辨能力

图 3-15、16、17 表明, 利用 Richer 子波和最小相位子波都能较好地合成地震记录, Richer 子波主瓣幅度突出, 但旁瓣幅度较大; 最小相位子波起跳点清楚, 但旁瓣波形较复杂。地震子波的频率和旁瓣振幅及其衰减快慢将决定地震波的垂向分辨能力 (即对薄层的识别能力), 频率越高、旁瓣振幅越小、衰减越快, 垂向分辨能力就越强。众多研究结果表明^[137-140], 薄层调谐厚度位于 $1/4$ 主波长处, 即 $h = \lambda_b/4$ 。对于 Ricker 子波:

$$\begin{aligned} f_p &\approx 0.77f_b \\ \text{主波长} \quad \lambda_b &\approx 0.77\lambda_p \quad \text{或} \quad \frac{\lambda_b}{4} \approx 0.77 \frac{\lambda_p}{4} \\ &\lambda_p/4 > \lambda_b/4 \end{aligned}$$

基于主频和峰值频率计算的调谐厚度差 Δh 为:

$$\Delta h = \frac{\lambda_p}{4} - \frac{\lambda_b}{4} = 0.075 \frac{v}{f_b}$$

因此, 对于一定速度的地震波, 频率越高, 对薄层的分辨能力就越强; 频率相同时, Ricker 子波的分辨能力相对要强一些。

3.6 入射角及界面“空间角”对反射系数的影响

3.6.1 入射角对反射系数的影响

由3-41式(Zoeppritz方程)和斯奈尔定律可知,反射系数和透射系数实际上是由入射角和介质的物性决定的,如果已知入射角、反射系数及透射系数,则可根据Zoeppritz方程来推断介质的物性参数^[87]。

$$R_{pp} = f(\alpha, \frac{V_{p1}}{V_{p2}}, \frac{\rho_1}{\rho_2}, \sigma) \quad (3-49)$$

式中, R_{pp} 为子波反射系数, ρ_1 、 ρ_2 、 V_{p1} 、 V_{p2} 分别为第一、二层介质的密度和纵波速度, α 为入射角, σ 为泊松比。

通过对Zoeppritz方程的简化,可以获得一些近似解。1985年舒伊在凯福特、阿基和理查等人的研究基础上,提出了反射振幅的一个近似式^[87,137]:

$$R(\alpha) = R_0 + [A_0 R_0 + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2}] \sin^2 \alpha + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} (\tan^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \quad (3-50)$$

式中, $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2) / 2$, $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$

$$V_p = (V_{p1} + V_{p2}) / 2, \quad \Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}$$

$$B = \frac{\Delta V_p / V_p}{\Delta V_p / V_p + \Delta \rho / \rho}$$

$$A_0 = B - 2(1+B) \frac{1-2\sigma}{1-\sigma}$$

$$A = A_0 + \frac{1}{1-\sigma} \frac{\Delta\sigma}{R_0}$$

垂直入射时的反射振幅 $R_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$

则反射系数为 $R_{pp}(\alpha) = R(\alpha) / R_0$ (3-50)

α_1 为入射角,根据斯奈尔定律计算出 α_2 ,再计算 α 。

$$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{V_{p2}}{V_{p1}} \sin \alpha_1 \right)$$

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2,$$

在给定物性参数的前提下, 根据方程式 3-49 和 3-50, 绘制出反射系数与入射角的关系曲线, 如图 3-18 所示。各种简化方法不同的表达式, 但在总的规律上是一致的, 尤其是当入射角较小时, 各种方法模拟结果十分接近。

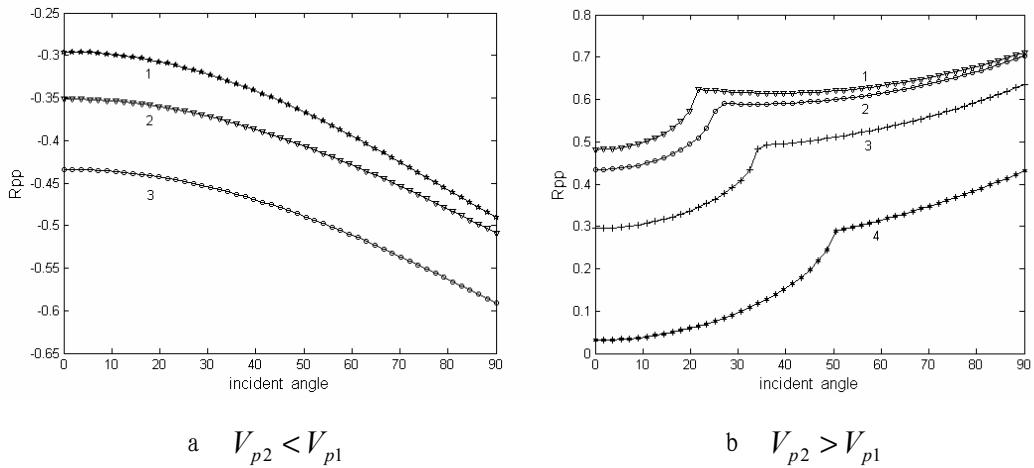


图 3-18 入射角与反射系数的关系

图 3-18a 反映表 3-2 中各模型 $R_{pp} \square \alpha_i$ 的关系, 图 3-18b 反映表 3-3 中各模型 $R_{pp} \square \alpha_i$ 的关系。

表 3-2 $V_{p2} < V_{p1}$ 各模型参数

模型序号	V_{p1}	V_{p2}	σ_1	σ_2	ρ_1	ρ_2
1	3200	1800	0.28	0.34	2.15	2.0
2	3800	1500	0.27	0.36	2.250	2.05
3	4200	1800	0.28	0.34	2.15	2.0

表 3-3 $V_{p2} > V_{p1}$ 各模型参数

模型序号	V_{p1}	V_{p2}	σ_1	σ_2	ρ_1	ρ_2
1	800	2200	0.34	0.28	2.0	2.15
2	1800	4200	0.34	0.28	2.0	2.15
3	2750	3600	0.32	0.28	2.10	2.35
4	1800	3200	0.34	0.28	2.0	2.15

由图 3-18 可知, 当 $V_{p2} < V_{p1}$ 时, 反射系数为 “-”, 其绝对值随入射角增大而增大; 当 $V_{p2} > V_{p1}$ 时, 反射系数总体上也随入射角增大而增大, 但此时纵波具有

临界角 $\alpha_c = \arcsin(V_{p1}/V_{p2})$ ，当 $\alpha \rightarrow \alpha_c$ 时， R_{pp} 急剧增加，而在 α_c 处达到极大值；当 $\alpha > \alpha_c$ 时， R_{pp} 又急剧减小，然后又缓慢增大；介质的波阻抗和泊松比直接影响曲线的形状，介质波阻抗差异越小， R_{pp} 越小。

3.6.2 “空间角”的影响

在隧道反射波法探测中，由于排列较短（60m 左右），且通常只能沿隧道轴线布置，因此，入射角只能在较小的范围内变化，如图 3-19 所示。

理论上，

$$\alpha = 0 \square \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right)$$

式中， θ 为反射界面与隧道轴线的夹角，称为“空间角”或“走向调谐角”。

当界面与隧道轴线垂直时，入射角为零；当界面与轴线平行时，入射角随它们之间的距离增大而增大。

由于检波器离第一个炮点有偏移 x （一般为 15~20m），最后一个炮点与界面和隧道轴线的交点也有较大距离 $(l+5)m$ ，所以有

$$0 < \alpha \square \frac{\pi}{2} - \theta$$

一个界面的反射波时距曲线方程 3-24 式，求得反射波的视速度 V^*

$$V^* = V_{p1} \sqrt{1 + \left(\frac{2L \sin \theta \cos \theta}{x - 2L \sin^2 \theta} \right)^2} \quad (3-51)$$

根据视速度定理有：

$$V^* = \frac{V_{p1}}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (3-52)$$

由 3-51、3-52 两式，并考虑斜率的符号，求得入射角 α 随炮检距 x 和“空间角” θ 的变化关系：

$$\tan(\theta - \alpha) = \frac{2L \sin^2 \theta - x}{2L \sin \theta \cos \theta} \quad (3-53)$$

根据 3-53 式, 绘出入射角 α 与炮检距 x 和“空间角” θ 的关系曲线, 如图 3-20 所示, 图中曲线 1、2、3、4 分别为 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ 。

图 3-19 和图 3-20 清楚的表明, 当“空间角” $\theta \geq 60^\circ$ 、 $L = 100m$ 时, 在 TSP 观测范围, 入射角 $0 \leq \alpha \leq 15^\circ$; 界面距离排列越远、界面与隧道轴线夹角越大, 则入射角越小、其变化范围也越小, 对反射系数的影响随之减小。

当排列测线不在界面的法平面上时, 还需进行视倾角的校正。

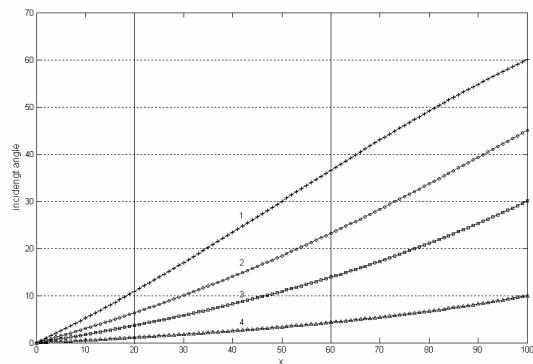


图 3-20 入射角与“空间角”的关系

3.7 本章小结

本章主要从均匀介质的应力与应变的关系和地震波的波动方程出发, 讨论了隧道条件下地震反射法超前探测的基本原理; 推导了一个和多个界面的反射波和直达波时距曲线方程, 并对时距曲线进行了正演模拟, 总结出它们的特点: 直达波时距曲线为直线, 一个平界面的反射波时距曲线为双曲线, 存在多个界面时除第一个界面为双曲线外, 其它界面均不是双曲线; 通过对地震纵波在界面上的反射和透射的讨论, 推导出反射系数和透射系数; 用 Richer 子波和正弦指数衰减子波模拟了多层介质模型的反射波与直达波、干扰波的合成记录, 从调谐厚度与基于主频和峰值频率计算的调谐厚度差出发, 讨论了地震波对薄层的分辨能力, 对于一定速度的地震波, 频率越高, 对薄层的分辨能力就越强; 频率相同时, Ricker 子波的分辨能力相对要强一些。根据对反射系数和入射角关系得简化模拟, 可以看出, 反射系数随总体上入射角增大而增大, 介质的密度、波速和泊松比及其差异直接影响曲线的形状, 介质波阻抗差异越小, 反射能量越弱, 反射系数越小; 界面距离排列越远、界面与隧道轴线夹角越大, 则入射角越小、其变化范围也越小, 对反射系数的影响随之减小。

第四章 赤道组合检波与资料处理解释

本章针对 TSP 技术特点, 设计了一种适合隧道超前预报的赤道组合检波观测系统, 可利用增加的偏移距准确地求取直达波速度; 利用 matlab 对 TSP 实测数据进行分析和处理, 结合工程实例提出了资料解释的原则, 对其主要影响因素和关键技术进行了详细的讨论。

4.1 TSP203 超前预报系统

4.1.1 系统工作原理

TSP203 系统工作原理如图 3-6 所示, 观测排列的布置如图 4-1 所示。在各炮点激发的地震波, 遇到不良地质界面(波阻抗面)发生反射, 被安放在 R 位置的传感器接收, 根据波的可逆性, 可看成是从 R 位置发出的地震波经界面反射到达各炮点位置; 由镜像原理可认为波是从 R 的像点 A (虚震源) 发出直接传到 S_1, S_2, \dots, S_N 各点, R 和 A 是关于不良地质界面对称的。因为 R、 S_1, S_2, \dots, S_N 的空间位置已知, 据联立方程可求出像点 A 的空间坐标, 进而求出 R 和 A 两点所在直线的空间直线方程; 由于不良地质界面是线段 RA 的中垂线, 故可求出该不良地质界面相对于坐标原点 R 的空间方程, 进一步可求出不良地质界面与隧道轴线的交点位置, 以及隧道轴线与该界面的夹角, 即空间角 θ (但它并不是该界面的真倾角)。

通过TSPwin软件处理, 可以获得P波、SH波、SV波的时间剖面、深度偏移剖面、提取的反射层、岩石物理力学参数、各反射层能量大小等成果, 以及反射层在探测范围内的2D 或3D 空间分布^[28,102-105]。

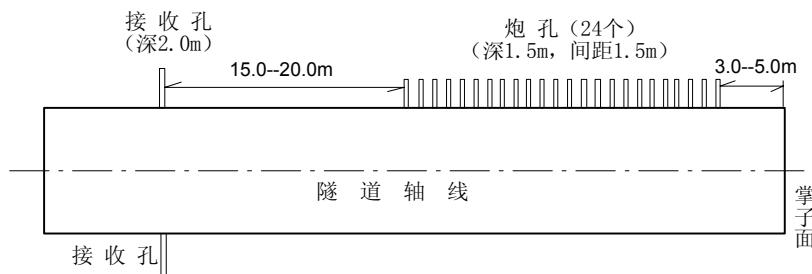


图 4-1 TSP203 超前预报系统观测排列布置

4.1.2 系统主要组成和技术性能

记录单元 12道, 23位A/D转换, 采样间隔 $62.5\mu s$ 和 $125\mu s$, 采样频率分别为8000Hz和4000Hz, 最大记录长度为14468样点(1808.5ms), 动态范围120dB, 4组三分量地震检波器的输入插头, 可卸载的PIII笔记本电脑, 将MS Windows作为软件平台。

接收单元 三分量加速度地震检波器(X-Y-Z), 灵敏度 $1000mV/g\pm 5\%$, 频率范围0.5~5000Hz, 横向灵敏度 $>1\%$, 工作环境温度 $0^{\circ}C\sim 65^{\circ}C$ 。

激发装置 引爆设备由带有外接触发盒的传统起爆器组成, 激发地震信号所需的炸药(约20g)可通过胶带与雷管(能瞬间起爆的电雷管)捆绑在一起。

信号处理与分析 采用高度智能化的TSPwin处理及评估软件, 自动和高级两种处理方式可供选择。

4.1.3 TSPwin 资料处理流程

采集的TSP数据, 通过TSPwin软件进行处理。TSPwin软件处理流程包括11个主要步骤: 数据建立→带通滤波→首波拾取→起跳点信号处理→爆破能量平衡→直达波损耗系数Q值估计→反射波提取→P、S波分离→速率分析→深度偏移→反射面提取。建立数据后, 经一系列数据处理来提取反射波并分离P波和S波, 再通过速度分析、深度偏移将反射信号的传播时间转换为距离(深度)。处理结果用与隧道轴的交角及隧道工作面的距离来表示, 用以确定反射层所对应的地质界面的空间位置, 并根据反射波的组合特征及其动力学特征解释地质体的性质, 通过评估子程序以图表的形式呈现出来。

4.2 赤道组合检波观测系统

4.2.1 赤道组合检波观测系统设计

地震反射法的探测距离虽然可达百米以上, 但因探测对象复杂多变, 各种杂波干扰严重, 有效波的识别与分离十分困难, 导致探测精度低。解决隧道施工超前预报问题的关键问题是高效快捷的探测速度和大距离条件下的高分辨率及高准确度探测。TRT技术(真正的反射层析成像, True Reflection Tomography)是由美国NSA工程公司近年来提出的一种新方法^[119]。该方法也是利用反射地震波进行超前探测, 采用空间多点激发和接收观测方式, 在观测方式和数据处理上与TSP法有很大不同。检波器和炮点呈空间分布, 可以获得更多的空间波场信息, 从而大大提高了前方目标地质体的定位精度。但由于该方法观测系统的布

置比较麻烦，工作效率低，且隧道开挖断面极不规则，对探测精度也有较大影响，目前这一技术还没有得到广泛应用。

赤道组合检波观测系统就是在隧道同一边墙同一水平线上布置 24 个炮点和 2~3 个检波点（三分量传感器），如图 4-2 所示，各炮点的布置要点同 TSP 的要求，3 个检波点应尽量布置在同一均匀岩层中，3 个接收孔要平行、等深度。若要将各检波点接收的地震波存贮在同一记录上，则检波点之间的距离应由（4-1）式计算，以便于识别各检波器接收到的有效波的起跳时间。

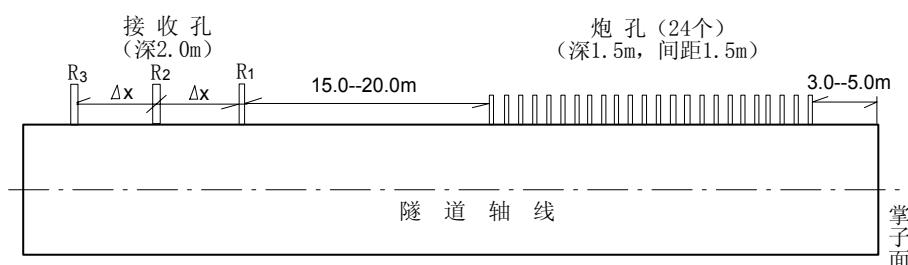


图 4-2 赤道组合检波观测系统

$$\Delta x \geq \frac{\lambda}{4} = \frac{V_p}{4f_b} \quad (4-1)$$

式中， V_p 为隧道穿越岩体的最大纵波速度， f_b 为地震波主频， Δx 为检波点之间的距离，称为组内距。

若各检波点接收的地震波单独存贮，则检波点之间的距离 Δx 可任意确定，一般为 5m、10m。

4.2.2 赤道组合检波观测系统的优点

采用赤道组合检波只是增加一个或两个检波器，现场工作时间并不增加多少，但优点却十分明显：

- 1) 每一次激发，可获得 2 或 3 组地震记录和连续追踪反射界面的追逐时距曲线，信息量是原来的 2 或 3 倍。图 4-3 为来自同一激振的 3 个检波器的地震合成记录。
- 2) 若检波点在同一岩性中，各炮点产生的直达波只是增加了一个相同的时间差 Δt ，反射波旅行时间的增量 $\Delta t'$ 变化也极小，理论上 Δt 或 $\Delta t'$ 随炮检距的变化呈线性变化，各检波点获得的直达波时距曲线应该是互相平行的，反射波时距曲线也近似“平行”。

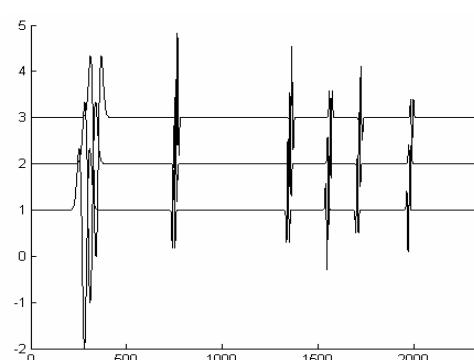


图 4-3 单炮 3 道记录

- 3) 通过简单的加减同步比较或拟合就可以分析原始数据的有效性, 客观评价原始数据的质量; 也可利用各种数据处理方法和技术进行处理分析, 去伪存真, 提高原始数据的质量。
- 4) 通过获得直达波到达各检波器的时间差 Δt , 由 4-2 式和 4-3 式即可准确地计算出直达纵波速度 V_p 和直达横波速度 V_s , 及时与实测围岩情况对比, 分析直达波速度与围岩岩性是否相对应, 不至于出现单点接收时可能出现“软质碎屑岩的直达波速度大于硬质灰岩直达波速度”的现象, 从而提高反演速度的精度, 提高超前预报距离的精确程度。

$$V_p = \frac{\Delta x}{\Delta t_p} \quad (4-2)$$

$$V_s = \frac{\Delta x}{\Delta t_s} \quad (4-3)$$

式中, Δt_p 和 Δt_s 分别为直达纵波和直达横波到达各检波器的时间差。

也可以利用反射波到达各检波器的时间差 $\Delta t'$ 来计算 V_p' 和 V_s' , 比较 Δt 、 V_p 、 V_s 与 $\Delta t'$ 、 V_p' 、 V_s' 是否相同, 就能分析围岩是否发生变化。

- 5) 利用组合检波实现波的叠加、相关分析或小波分析等方法来识别和突出有效波、压制层间多次反射和不规则干扰波, 特别有利于识别和消除因检波器套筒与围岩耦合不好等接收因素带来的不利影响, 进而提高信噪比, 提高对目标体判断的准确性和可靠性。

4. 3 数据处理

4. 3. 1 通带滤波与初至前归零

在资料解释之前, 要对现场获得的原始数据进行滤波和初至前归零等前期处理。图4-4为根据大湾隧道出口TSP203系统测得的X分量原始数据绘制而成的记录 (采样间隔 $62.5 \mu s$, 采样点数 7218)。图4-5为TSPwin系统的显示结果, 显然, 图4-5是对原始数据进行了不同“补偿” (如放大、归一化等措施) 处理后的结果。图4-6为其中第2道记录的振幅谱分布图, 观察、分析平均振幅谱的分布, 获得带通滤波器适合的高、低截止频率, 对有用信号和噪音进行分离, 保留“真正”的信号频率记录^[137,138], 图4-7为经滤波处理的结果。由于设备原因, 在直达波到达之前常常存在一些人为尖脉冲干扰信号, 会影响后续参数的设置, 因此, 必须对直达波之前的振动进行初至前归零, 以获得清晰的直达波轨迹。

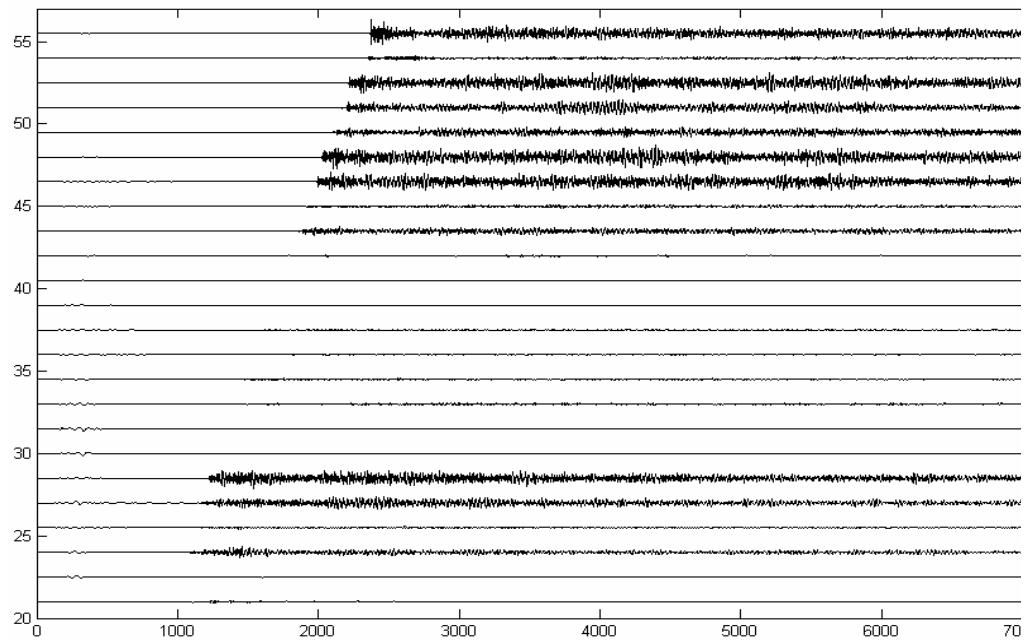


图 4-4 大湾隧道 TSP203 原始数据

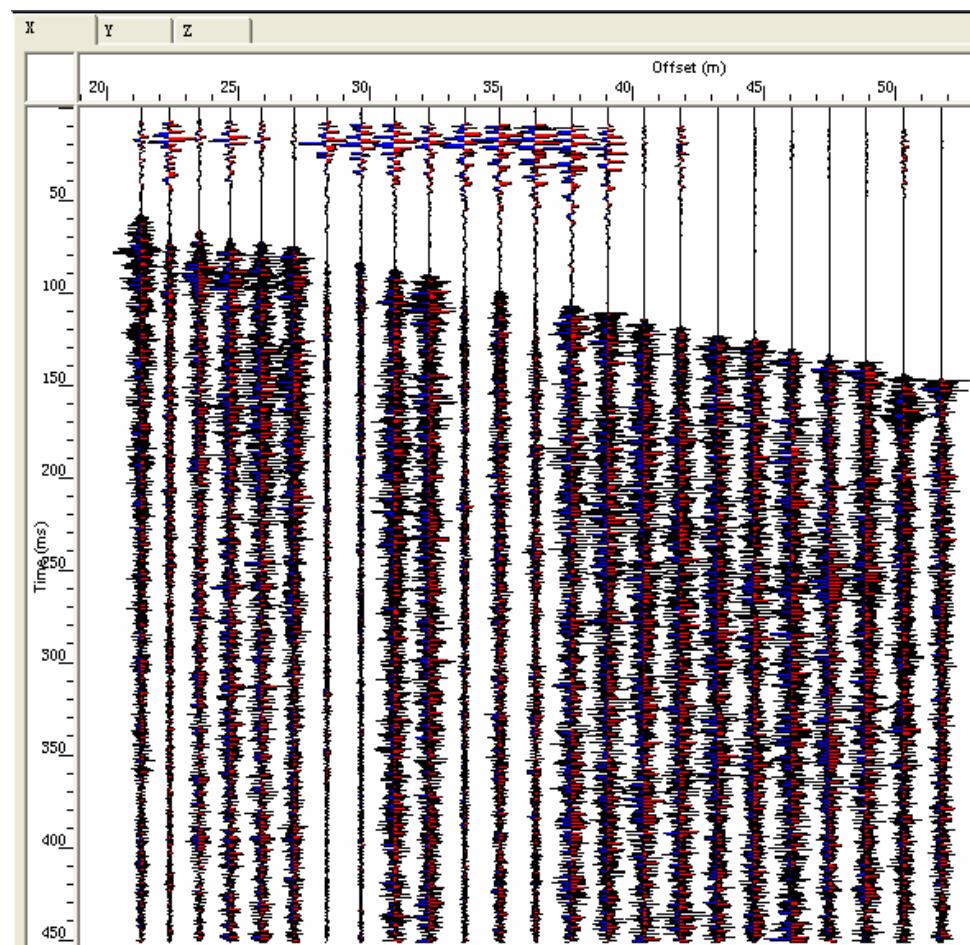


图 4-5 TSPwin 系统显示

对某道记录进行频谱分析，获得振幅谱的分布，如图4-6所示。

$$\Delta f = \frac{1}{N \Delta t}$$

由图可以看出350Hz以下低频成分振幅最大，350~900Hz的高频成分也较大，需要通过滤波来去掉高频干扰，要根据需要保留的频率成分来选择适合的带通滤波器高、低截止频率。

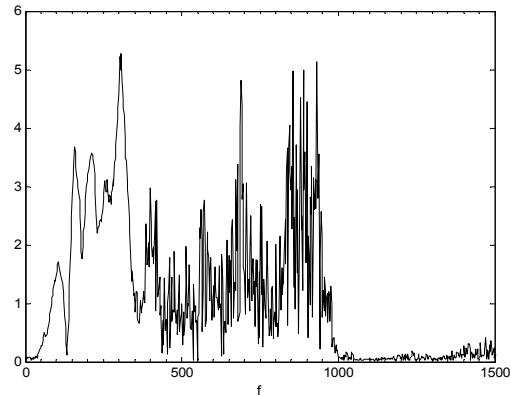


图 4-6 平均振幅谱

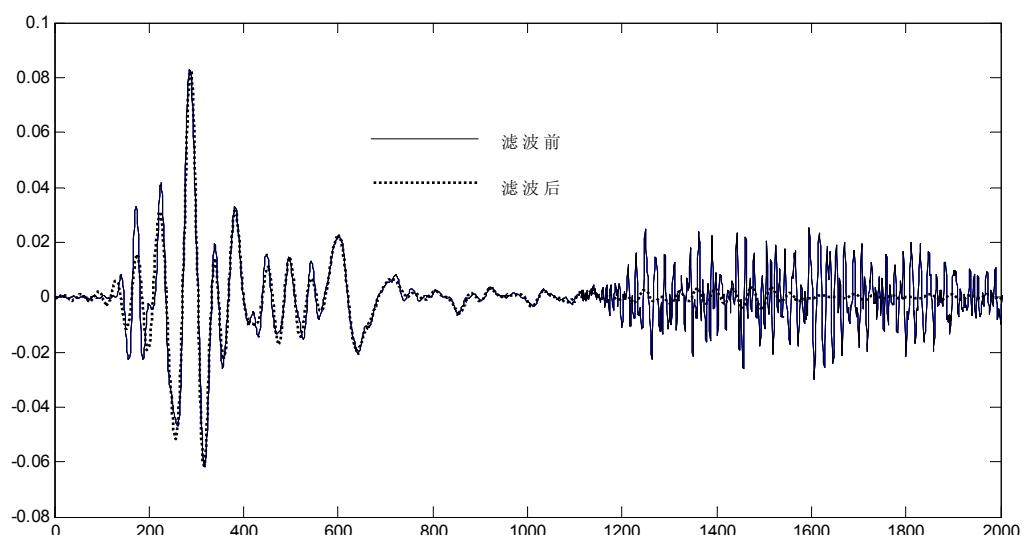


图 4-7 原始数据滤波结果

图4-7为通带(20~350)Hz的滤波效果，可以看出低频部分基本保留，350Hz以上的信号得到明显压制。

4.3.2 直达波的拾取

直达波以最快路径从震源到达接收器，其初至时间对后续解释非常重要。图4-5中都有两条清楚的同相轴，由第一条同相轴，读出第1、24道的起跳时间差：

$$\Delta t_1 = t_{24} - t_1 = 7.5ms$$

由第1个炮点到第24个炮点的距离 $x_{24} - x_1 = 23 \times 1.5 = 34.5m$ ，计算出速度值：

$$V_{p1} = \frac{x_{24} - x_1}{t_{24} - t_1} = 4600m/s$$

由第二条同相轴，读出第1、24道的起跳时间差：

$$\Delta t_2 = t_{24} - t_1 = 96.375ms$$

计算出速度值:

$$V_{p2} = \frac{x_{24}-x_1}{t_{24}-t_1} = 366 \text{ m/s}$$

显然, 第二个同相轴为声波, 第一个同相轴为直达波。且各相邻道之间的时差基本相等, 说明该同相轴斜率是常数, 这正是直达波的特征。因此, 利用这一特征确定各道记录直达纵波到达的时间, 以计算直达波的速率。

直达 P 波的拾取在 x 分量轨迹中最清楚, 直达 S 波在 y 或 z 分量轨迹中最清楚; 当爆破孔不够深时, 直达 S 波会受到 Ray-Leigh 波的干扰, 可利用 Ray-Leigh 波和 S 波在振幅衰减、指向性和传播速度等特征加以分辨。追踪直达横波 (S 波) 最先到达的峰值, 并确定直达 S 波的传播时间, 以计算横波速率 V_s 。

4.3.3 Q 值估计

P 波和 S 波在岩层中传播因几何衰减 (扩散损失)、散射和吸收 (内能衰减) 而产生能量损失, 以发散和吸收形式产生的能量衰减通常用 (4-5) 式来表示:

$$e^{-ax} = e^{-avt} \quad (4-5)$$

地震波在岩石中传播的能量可用 (4-6) 式来计算:

$$Q = \pi f / av \quad (4-6)$$

式中, Q 值为岩石的“地震”质量指标 (表示岩层的微结构), a 为衰减系数, v 为传播速率, x 为传播距离, t 为传播时间, f 为频率。 Q 值小表示损失大、衰减严重, 岩层呈很不均匀的微结构。 Q 值不仅与岩层有关, 还随隧道工地特定条件而变化。一般地, 坚固岩石中存在的断裂、微裂纹或者其它缺陷会导致明显的衰减损失, 使 Q 值变小; 随着地层压力增大, 衰减值减小, Q 值增大; 处于饱和水状态下的岩石, 其能量衰减比干燥或充满气体的岩石更严重; 在干燥或充满气的岩石中, Q_p 值略低于 Q_s 值; 而在充满水的岩石中, Q_p 值则明显高于 Q_s 值 (因 S 波不能在液体中传播); 在所有岩石类型中, 松散沉积物的衰减值最大, Q 值最小。

4.3.4 反射波提取

通过线性 Radon 变换将时间—空间域转换为频率—斜率域 (同时抑制随机噪声), 清零后逆向转换到时间—空间域, 进而提取不同角度的“反射面”, 如图 4-8 所示。图 4-8 清楚地表明, 直达波的斜率与反射波正好相反; 反射波的斜率接近零时, 该界面的空间角也接近于零, 即与隧道轴线几乎平行, “假频”现象越严重, 假频偏移线的斜率为正 (与直达波相同)。

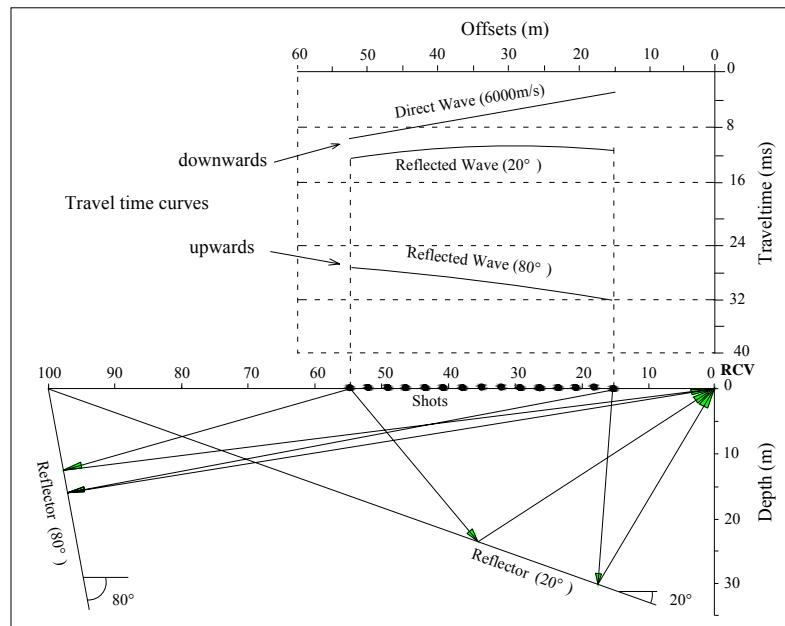


图 4-8 反射界面的提取

4.3.5 P-S 波分离与速率分析

P 波为压缩波, S 波为剪切波, 通常 S 波总是由 SV 和 SH 两部分组成。通过合理安放接收传感器, 使 X 分量中占主导地位的波的成分为纵波, 同时记录 X、Y、Z 三个分量, 得到 P 波 (X 分量)、SV 波 (Z 分量) 和 SH 波 (Y 分量), 再通过转换坐标轴系统来分离地震记录, 提取 P-S 波。

假设直达波速率不变, 采用迭代算法建立最佳宏观速率模型, 近似模拟声波从震源出发到接收器再到每一个潜在的反射面 (离散的速度单元) 处的传播过程。通过创建 P 波与 S 波速率传播的二维模型、计算传播时间 (分别计算 P 波和 S 波从爆破点和接收器与二维速率模型中每一个节点之间的传播时间)、地震数据“迁移” (将 P 波和 S 波反射信号振幅从时间域移到空间域, 并以图像方式在空间域中显示出来) 和速率拾取 (反复“迁移”试算) 等步骤, 以生成更准确的 P 波和 S 波平滑速率模型。

4.3.6 深度偏移和反射面提取

在最终的二维速率模型中, 采用辐射轨迹方程式的数值分析方法模拟波阵面的传播过程, 分别计算 P 波和 S 波从爆破点、接收器到达每个潜在反射点的传播时间; 再将 P 波和 S 波从时间域转移到空间域, 并在空间域以图像方式描绘反射信号振幅, 如图 4-9a 所示。

通过能量补充来平衡反射面的能量损失, 忽略一些影响不大的反射点使图像更加简化, 计算每一条反射线(偏移后的时程曲线)的参数(如长度、空间方位、或与隧道轴线的交点), 以此来提取相应的反射面, 其结果可以用表格或图来表示, 如图 4-9b 所示。

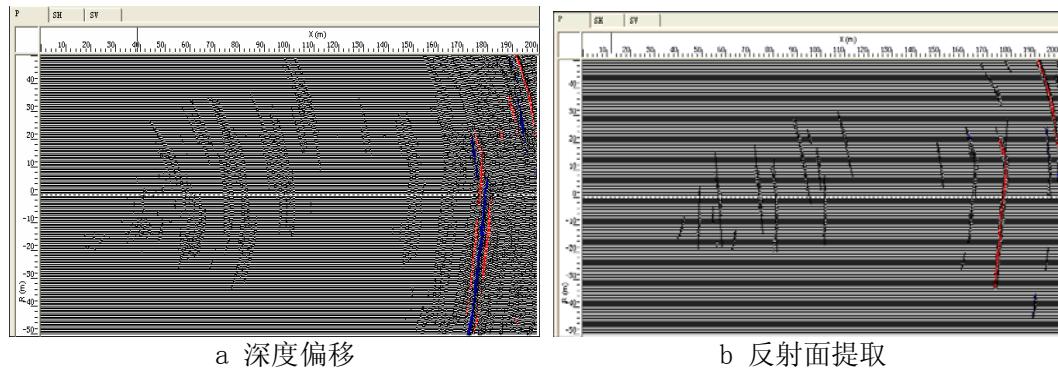


图 4-9 深度偏移

反射面物理特性用反射波的强度和极性来表示, 按以下规则判断:

- ①反射信号振幅越强, 则反射系数越大, 岩石波阻抗差异越大。
- ②反射信号振幅为正, 即反射系数为正, 说明地震波遇到的岩石由软到硬; 反射信号振幅为负, 即反射系数为负, 说明地震波遇到的岩石由硬到软。
- ③如果 S 波信号比 P 波的反射信号强得多, 说明反射反射的地方岩层中饱含水。对来自同一界面的 P 波和 S 波反射信号振幅进行比较将有助于准确地判断反射面的特征。

所有反射面的倾角、方位角(走向)和交叉点都可以通过计算得到, 并通过二维或三维图显示出来。根据 P 波、S 波速率、岩石泊松比和相关经验计算岩石的密度、体变模量、剪切模量、拉梅常数、动静态杨氏模量等力学参数, 并用图示方法直观地显示出来。

4.4 资料解释原则与工程实例

4.4.1 资料解释的一般原则

纵波是岩体弹性模量的函数, 横波是岩体剪切模量的函数。在隧道地质超前预报的分析解释工作中, 要充分研究来自同一界面的纵波信息和横波信息及其差异是非常重要的, 应根据各分量(以 P 波为主)强相位和波组的相似性进行综合分析, 划分界面, 可根据反射信号的正负来分析是从松散、软弱岩层过渡到致密、坚硬岩层, 还是从致密、坚硬岩层过渡到松散、软弱岩层: 正反射

界面后岩体趋于坚硬，负反射界面后岩体趋于软弱；同一波组中纵波弱、横波强是软弱层与含水基本特征。

以三层介质为例，讨论几种常见地质模型的反射纵波和横波信息的基本特征。 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为三种介质的声阻抗， Z_1 和 Z_3 代表隧道正常围岩，假设其弹性波速度相同，用 Z_2 的不同来代表中间层地质情况的变化，界面反射波特征如表4-1所示。

在实际资料解释中，先分析对X、Y、Z三个分量的速度云图、深度偏移剖面、提取的反射界面进行对比，再以X分量（纵波）为主要依据，对二维显示的岩石特性图表进行综合分析，找出不同里程处反射界面所对应的岩石力学参数及其相对变化；确定界面位置的同时，获得界面的弹性变化规律，推断岩性变化规律，据此判断是否存在断层、软弱夹层、破碎带、裂隙发育程度及含水、夹泥等情况。

TSP资料解释应遵循下述基本准则：正反射振幅表明硬岩层，负反射振幅表明软岩层；若S波反射较P波强，则表明岩层饱含水； V_p/V_s 增加或泊松比突然增大，常常由于流体的存在而引起；若 V_p 下降，则表明裂隙或孔隙度增加。

表 4-1 几种不同性质的界面反射特征

模型	中间层性质	界面反射波特征
模型 1	张性裂隙发育带或岩溶发育带，无水。	R_1 界面纵波反射强、横波反射也强，且均为负反射； R_2 界面的纵波和横波为正反射，且衰减严重。
模型 2	张性裂隙发育带或岩溶发育带，饱水或充满水。	R_1 界面纵波反射弱、横波反射强，且均为负反射； R_2 界面为正反射，横波衰减严重、纵波衰减较轻。
模型 3	张性构造破碎带，无水。	与模型1类似的是 R_1 界面的纵波反射强、横波反射也强，且均为负反射。不同的是 R_2 界面的纵波和横波反射的衰减与 Z_2 介质的性质有关：碎裂程度和风化程度越严重则反射纵波和横波衰减越严重，挤压破碎带比张性破碎带衰减量要小一些。
模型 4	压性破碎带，破碎带介质软弱，在挤压作用下破碎带呈片状与构造带平行。无水。	Z_2 介质具有明显的各向异性，利于纵波传播即纵波反射弱，不利于横波中慢波的传播即横波反射强。
模型 5	张性构造破碎带，饱水。	与模型2类似的是 R_1 界面纵波反射弱、横波反射强，均为正反射； R_2 界面横波的衰减明显大于纵波的衰减，纵波和横波均为负反射；与模型2的差别是 R_2 界面的横波反射仍然会有，其衰减与 Z_2 介质的性质有关。

4.4.2 雪峰山隧道（YK96+761~YK96+861）超前探测成果分析

雪峰山隧道为邵怀高速公路上的控制工程，按山岭重丘区高速公路标准设计，设计行车速度为80km/h，双洞单向行车，单洞2车道，设计断面宽度12m，高6m。其中左洞长6942.560m，右洞长6959.605m，最大埋深约850m，隧道轴线总体方向为N70°W。是目前国内首屈一指的超长度、大深度高速公路隧道。

雪峰山隧道位于江南地体东南缘的雪峰山边缘褶皱带的中部，最高海拔约1330m，地形切割剧烈，山势陡峻。穿越前震旦系芙蓉溪群架枧田组（Pt_{fj}）、岩门寨组（Pt_{fy}）、震旦溪江口群长滩组（Zc）地层以及零星的第四系和7条断层，地层岩性主要为硅化砂质板岩、板岩、变质砂岩等变质岩，属硬性岩石，岩层为中厚层状。断层已韧性剪切为主，岩体经武陵、雪峰、加里东、印支——燕山等多期构造活动改造，多期多次褶皱变形变质，劈理、片理和板理非常发育，地质条件较为复杂。切割较深的断层和地下水、岩爆和大变形等是该隧道的主要工程地质问题，给施工带来隐患。为确保隧道的安全施工和工程质量，在施工前采用EH-4型STRATAGEM电磁系统进行隧道工程地质勘查，施工中采用TSP203系统进行超前探测，结合工程地质调查对隧道施工过程中的地质灾害进行预报，作为隧道施工的关键技术，提高了地质预报的准确度，探明了隧道施工设计所需的多种参数，为动态施工设计提供了科学依据，使得隧道顺利通过了3条大断层带、3处大涌水带，为雪峰山隧道的安全提高了保证。

按图4-1布置观测排列，距掌子面最近的炮点距离掌子面7m，检波器距最近炮点15m。图4-10为YK96+761~YK96+861段TSP三个分量的深度偏移剖面及反射面，图4-11是综合解释结果的二维显示。

根据纵横波速度及其比值、泊松比、密度的变化规律和纵横波反射信号的强弱，进行综合解释。探测结果表明，掌子面前方100m范围内，围岩纵波速度为3945~4805m/s，密度为2.45~2.55g/cm³，泊松比为0.21~0.31，静态杨氏模量为22~29Gpa；横波反射强于纵波反射，且纵波以负反射为主，横波以正反射为主。围岩稳定性总体较好，局部存在软岩层及节理裂隙较发育的地段，稳定性变差；结合地质资料推断软弱岩层为炭质板岩或以炭质板岩为主的岩层，解译结果详见表4-2。

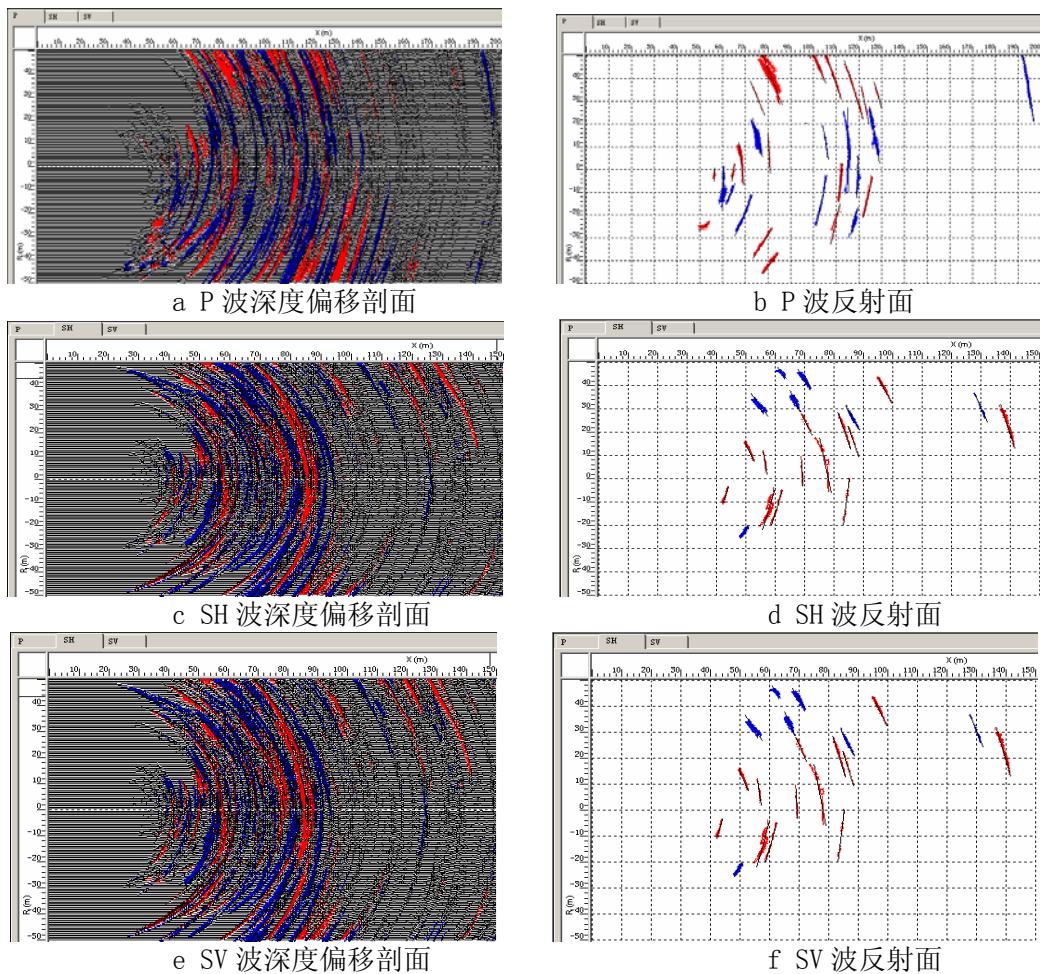


图 4-10 TSP 深度偏移剖面及反射面

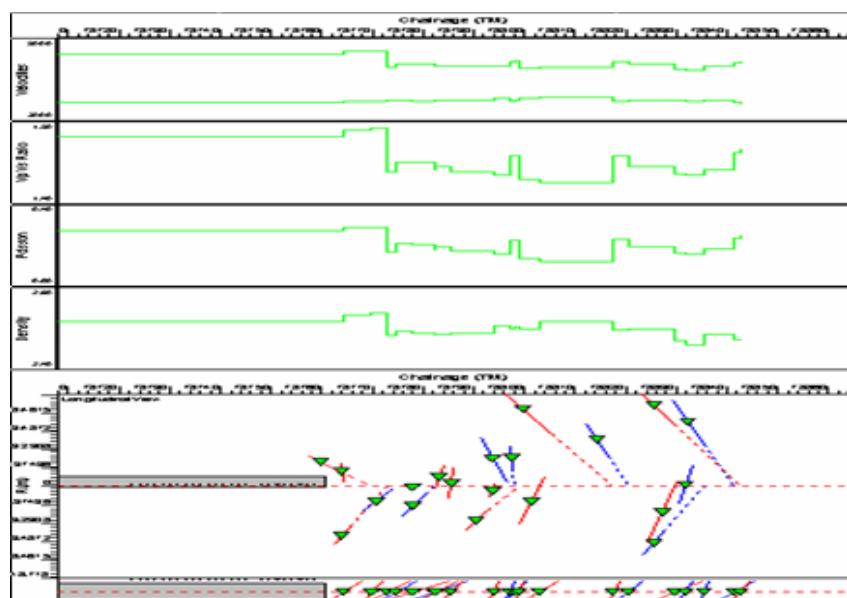


图 4-11 TSP2D 结果显示

表 4-2 YK96+761 ~ YK96+861 段 TSP 物性特征与推断结果

序号	里 程	长 度 (m)	物 性 特 征	推 断 结 果
1	YK96+761 ~ YK96+773	12	纵波、横波反射较强, 且均为正反射, 横波波速变化小。	弱风化岩层, 岩体较完整。
2	YK96+773 ~ YK96+795	22	横波主要为正反射、波速变化不大, 纵波波速突然变小, 泊松比逐渐减小。	强风化岩层, 节理裂隙发育, 局部不均匀, 有软弱夹层。
3	YK96+795 ~ YK96+800	5	纵波波速突然增大, 横波波速减小, 横波反射比纵波反射更强, 泊松比增大。	中风化岩层, 裂隙发育, 含水丰富。
4	YK96+800 ~ YK96+816	16	纵波波速减小, 横波波速增大, 泊松比减小。	强风化岩层, 岩体较完整, 局部节理发育、含水。
5	YK96+816 ~ YK96+822	6	纵波波速突然增大, 横波波速减小, 横波反射比纵波反射更强, 泊松比增大。	强风化岩层, 节理裂隙较发育, 含水
6	YK78+822 ~ +836	14	纵波波速略有减小, 横波波速不变, 泊松比减小, 参数稳定。	中风化岩层, 岩体较完整。
7	YK96+836 ~ YK96+845	9	纵、横波波、泊松比都减小, 密度最小。	强风化岩层, 岩体破碎, 含水。
8	YK96+845 ~ YK96+861	16	纵波波速增大, 横波波速略减小, 纵、横波反射都较弱, 泊松比增大。	强风化岩层, 节理发育。

4. 4. 3 朱家岩隧道 (YK53+032 ~ YK52+890) 超前探测成果分析

沪蓉西线宜昌至恩施段位于扬子准地台鄂西台褶带、八面山带褶带长阳台褶束北部, 地形地貌及地质环境复杂, 出露的地层由老到新有: 震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、白垩系及第四系等, 公路沿线地层属震旦系—白垩系晚期海相碳酸岩为主的沉积岩—陆相沉积岩为主碎屑岩。由于地处长江中下游暴雨中心区域, 水系纵横, 地表地下径流畅通, 溶沟、落水洞、溶洞、地下暗河等十分发育。沿线及两侧存在滑坡、危岩体、崩塌与岩溶、泥石流、顺层滑坡等不良地质及特殊地质现象, 属湖北省地质灾害易发区。朱家岩隧道穿越地层为寒武系上统三游洞群, 岩性为厚层灰岩及白云岩; 地表落水洞及溶蚀天坑发育, 规模较大, 连通性好, 存在地下暗河和溶洞, 隧道施工过程易发生突水、突泥。右线入口地质情况如图 4-12 所示。

采用 TSP203 系统预报掌子面前方 YK53+032 ~ YK52+998 段 142m 范围内

的地质情况，尤其是有无断层、溶洞等可能诱发施工地质灾害的不良地质体。

图 4-13 为深度偏移剖面及反射面，图 4-14 是综合解释的二维显示。

根据纵横波速度及其比值、泊松比、密度的变化规律和纵横波反射信号的强弱，进行综合解释。探测结果表明，YK53+032~YK52+917 段反射界面相对较少，岩石力学参数较均匀，局部有较小变化；YK52+950~YK52+942 段纵波速度基本不变，横波速度有所增加，纵横波速度比和泊松比减小，密度增大，说明岩体含水；YK52+917~+904 反射信号较强、界面多，波阻抗差异大，岩石力学参数变化大，岩体破碎、含水；YK52+904~+890 段岩体较完整，解译结果详见表 4-2。经开挖验证，TSP 资料解释推断结果与实际情况基本吻合。

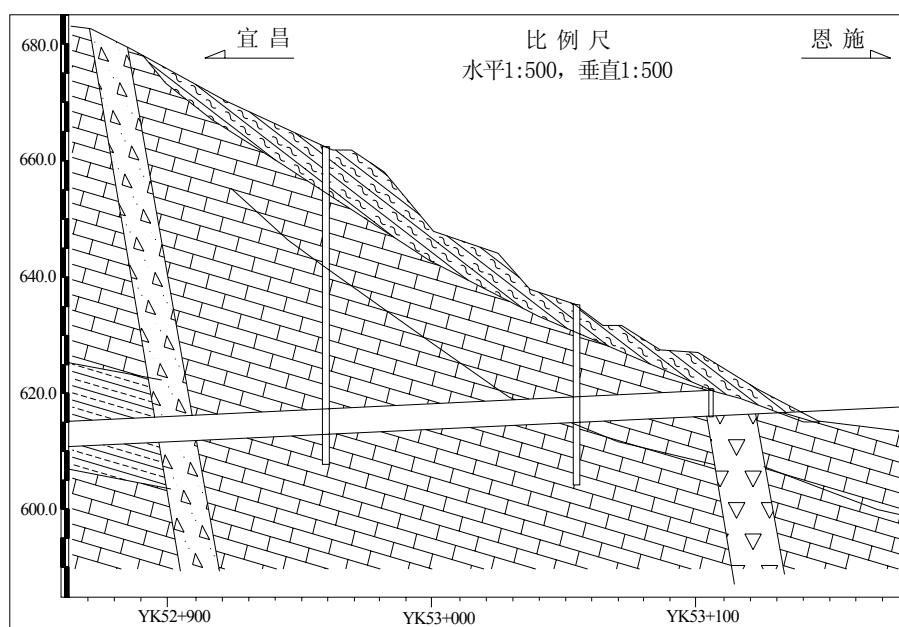


图 4-12 沪蓉西线朱家岩隧道右线入口地质剖面示意图

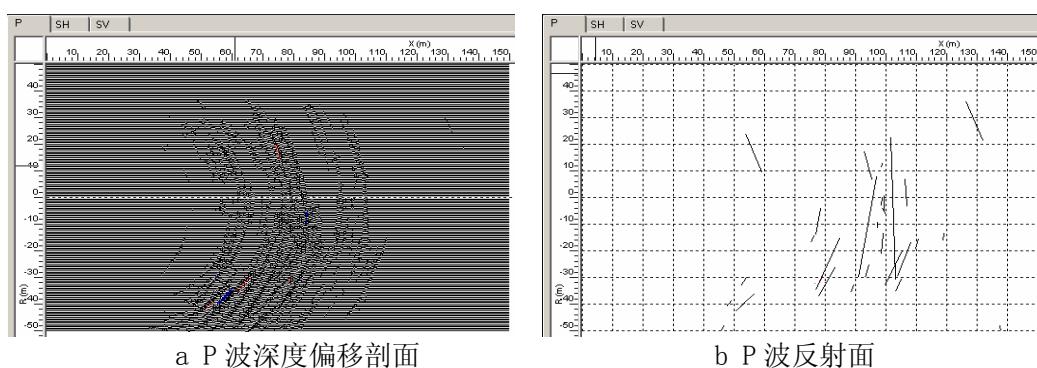


图 4-13 TSP 深度偏移剖面及反射面

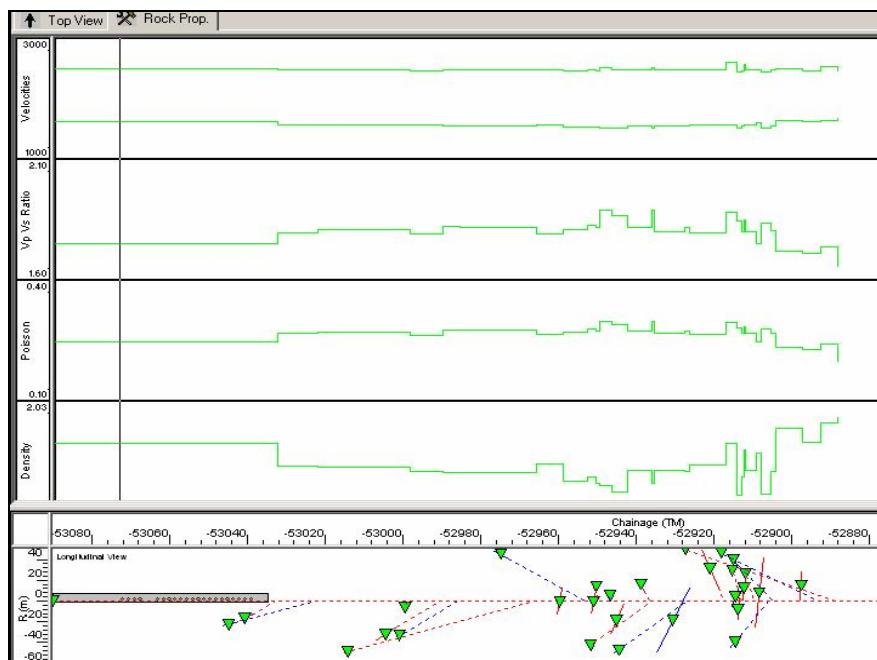


图 4-14 朱家岩隧道 TSP2D 结果显示

表 4-3 朱家岩隧道 TSP203 推断结果与实际情况对照表

序号	里程	长度 m	物性特征	推断结果
1	YK53+032~ YK52+998	34	反射信号较弱，局部纵横波速度比增大。	岩石较破碎
2	YK52+998~ YK52+965	33	反射信号弱，界面不明显。	岩石较坚硬
3	YK52+965~ YK52+950	15		岩石完整
4	YK52+950~ YK52+942	8	纵横波速度比减小，泊松比和密度减小。	局部含水
5	YK52+942~ YK52+917	25	参数较均匀。	岩石较完整
6	YK52+917~ YK52+904	13	泊松比大，横波速度减小，密度小且变化大。	岩石破碎、含水
7	YK52+904~ YK52+890	14	泊松比和密度变化大。	岩石完整，坚硬

4.4.4 不良地质体的基本特征

(1) 断层、断层破碎带及岩溶陷落柱

断层破坏了岩体的完整性和连续性，是裂隙、岩溶发育的地带，增强了围岩的导水性和富水性；断层破碎带的特征取决于其物质组成和胶结程度、围岩结构等因素；岩溶陷落柱的特征主要取决于其物质组成、干湿性、含泥量等。这类地质体有着相似物理力学特性，最根本的特征是与围岩存在十分明显的密度差异，且本身密度变化大、各向异性，随着含水程度的不同，对弹性波传播的影响也不相同。

在深度偏移剖面中，这些地段明显存在较强的正负波组反射，纵波速度降低，密度曲线起伏大；若含水较丰富，则横波反射比纵波反射更强、纵横波速度比减小，密度增大；静态杨氏模量降低，反映出裂隙发育、岩体破碎的特征；各向异性介质对地震横波的传播影响大。通常断层的一盘或两盘岩层较均一，力学参数曲线相对较平直，断层带曲线起伏。

（2）接触破碎变质带和岩脉

由于岩浆侵入形成挤压破碎带、冷却节理、接触变质带，易软化，工程地质条件差，特别是基性岩脉，易风化、强度低，隧道施工时易发生塌方。

通常，侵入岩体本身强度高、密度大，在接触面上，地震波会形成强反射。如从板岩到煌斑岩，界面上的反射为强正反射；从煌斑岩到板岩，为强负反射。接触带常具有断层破碎带的特征。

（3）软弱岩层

如石膏、泥岩、煤系地层、炭质板（页）岩或严重风化破碎带等软弱夹层，密度小、强度低，在深度偏移剖面上，常表现为由较强的负反射过渡到较强的正反射，越过正反射，则为地震反射相对平静区（无明显反射出现）。

（4）含水、储水构造

断层破碎带、不整合面和侵入岩接触带常为含水构造，特别是活动性断层、逆掩断层、张性和扭性断层，及未胶结构造岩与次生构造一般含水性较强。当它们形成较大规模的层状介质被隧道穿越时，可以用TSP法来探测。结构松散、裂隙发育、富含地下水是其共同特点，在TSP探测结果中，横波反射比纵波反射强，纵波速度减小、横波速度不发生明显变化，纵横波速度比减小，静态杨氏模量降低。若从软岩过渡到含水、储水构造带，则密度增大，产生正反射；若从硬岩过渡到含水、储水构造带，则密度减小，产生负反射。

（5）岩溶和地下暗河

石灰岩地区岩溶发育，形态各异，甚至形成地下暗河；含水含泥的溶洞、及地下暗河是突水、突泥、泥石流主要成灾因素。既具有低密度、低波速的弹性异常体的特征，又具有低电阻率、高介电常数的电磁异常体的特征。

4.5 主要影响因素

有效的物探方法的原始数据，都应能反映出被测地质体的异常雏形，各种数据处理的目的只是突出异常或使异常具有较完整的形态，便于对异常进行定性或定量评价。从地震波的激发到接收，各个环节都可能影响所采取数据的客观性，因此，事先必须充分考虑各种认为和客观的影响因素，并对它们的影响结果做出初步估计，在现场千方百计创造最佳激发和接收条件，以获取可靠的、高质量的原始数据^[19, 43, 59]。

4.5.1 激发条件

隧道地震反射法是通过人工引爆钻孔中的炸药来激发地震波的，因此，钻孔深度、炸药的性质和用量及其与围岩的耦合、雷管的时间特性等激发条件都是十分重要的因素。以 TSP203 为例，第一个炮眼到接收器的距离一般控制在 20m 左右，在任何情况下都不允许超过 15m；相邻炮眼之间的距离大致为 1.5m，不允许超过 2.0m；炮眼数至少不得少于 18 个，一般为 20-24 个。所有炮眼和接收器都必须布置在同一条轴线上（X 轴），距离隧道底面约 1m，沿隧道轴径向相对于隧道壁面向下倾斜 10-20°；炮眼直径 30-45mm，一般为 38mm 或 40mm；孔深 1.5m，在超挖和围岩破碎松散段要根据实际情况加深；孔底尽量深入致密坚固的围岩中，炮孔深度确保一致，成孔质量要高，位置准确，否则不利于能量的激发。图 4-15a 为孔深过浅、图 4-15b 为药量过大的地震记录。

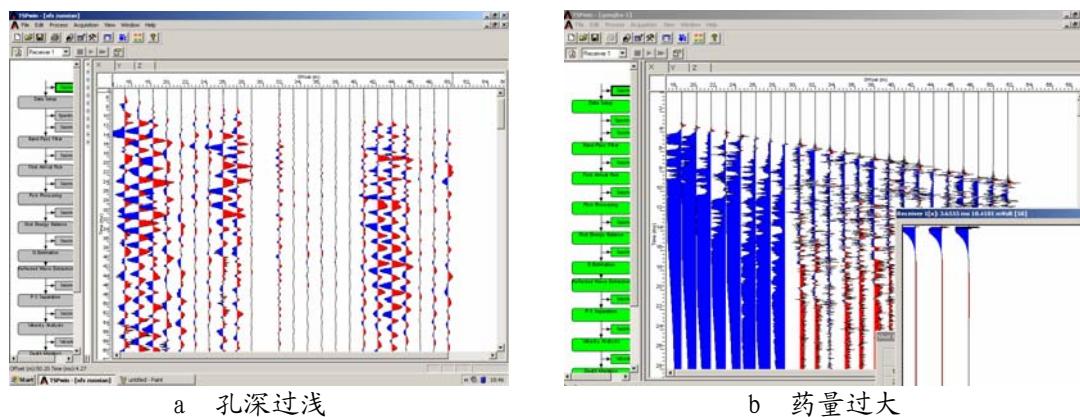


图 4-15 孔深和药量的影响

震源炸药的选择要有利于产生足够强度和能量的宽频带波动信号（主要是纵波），应具有较高的爆速和与待测岩石相匹配的波阻抗。

$$R = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2} \quad (\rho_2 = 0.85 \text{ } \square \text{ } 0.95 \text{ g/cm}^3, v_2 \geq 3200 \text{ m/s})$$

式中 ρ_1 、 v_1 为炮孔围岩的密度与波速, ρ_2 、 v_2 为炸药的密度和爆速。

R 越接近于 1, 所激发的地震波能量越强。震源炸药应具有良好的抗水性, 具有较大的密度、爆速、殉爆距离、猛度和作功能力 (威力)。

通常采用一级岩石乳化炸药, 根据具体围岩特性采用相应的药量; 通常岩浆岩、变质岩中用 50g, 灰岩、白云岩中用 50~60g, 碎屑岩中用 60~100, 风化岩层、断层带中 ≥ 100 g, 一般控制在 50g~100g, 不超过 200g。装药时确保炸药连同雷管一起被推到孔底, 特别注意防止出现雷管和炸药分离现象。药量过大将产生如图 3-16b 所示的地震信号; 炸药与围岩的耦合直接影响到激发地震信号的质量, 炸药和雷管放至孔底后, 要用锚固剂填实 (20~30cm), 力求与围岩紧密接触, 必要时向孔内注水 (松散或有裂隙的围岩漏水, 须增加锚固剂长度), 封堵不密实, 使大部分能量损耗在炮孔中而不能向岩石中传播, 还会形成巨大的干扰噪声。现场有些地段已完成一次衬砌, 与围岩之间常存在不同宽度的空隙, 在安放炸药时可能掉入其中, 引爆后不能在围岩中产生足够能量的地震波, 还可能破坏一衬, 因此, 安放炸药必须十分谨慎, 确保炸药安放到位^[106-109]。

炸药在岩石中爆炸, 产生的地震波在不同地区、不同岩性中具有不同的主频。药量小, 激发地震子波频率高, 但反射波能量不足; 大幅度增加药量, 会使反射波主频降低, 探测分辨率降低。如宜万线, 一般在灰岩等硬质岩石中, 其主频在 200~400Hz 之间, 而在粘土中, 其主频约在 40Hz 左右。若主频明显、其振幅远大于干扰振幅 (如图 4-16a), 则可以获得较可靠的反射信号, 预报结果准确; 若主频不明显、或振幅较小时 (如图 4-16b), 则难以提取可靠的有效信号, 预报结果往往不准确。

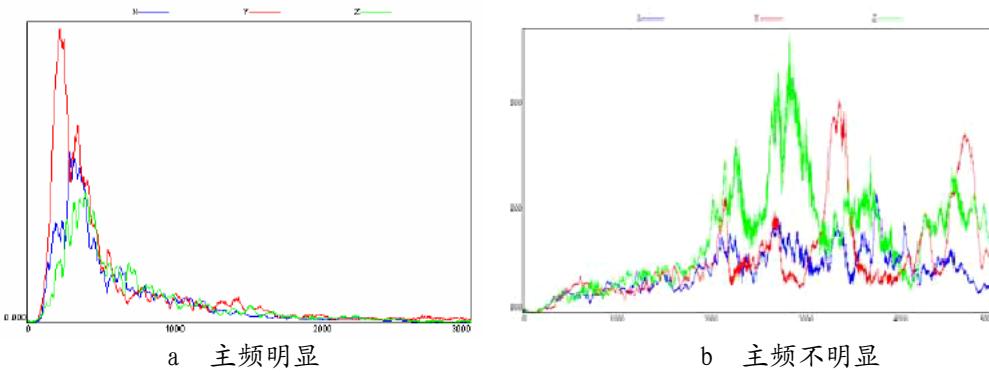


图 4-16 激发地震波的主频

此外, 为保证炸药引爆和主机采集尽可能同步, 必须采用灵敏度高、延时短的毫秒级瞬时电雷管 (最好是 1~3 段延时), 否则会造成主机用于真正采集数据的时间减少, 记录数据质量差, 预报距离误差大。雷管起爆延迟时间的误差

不一,一般1ms到4ms不等,按一般岩体波速4000m/s~6000m/s计算,由雷管起爆延迟造成的预报距离误差在2m~6m。

4.5.2 接收传感器的安放

接收传感器(检波器)将机械振动转换为电信号,采用高灵敏度的三分量加速度地震检波器接收来自隧道前方及上下左右三个方向的地震信号,便于记录和分析纵波、横波的特征和反射界面的空间位置。传感器安放的位置和质量直接关系到能否接收到有效信号和信噪比^[110-114]。接收孔应布置在隧道前进方向与构造走向夹角成钝角的一侧、且围岩较坚硬致密的地段(如果事先不能推测出前方结构面的产状,则两侧分别安放接收器),距离掌子面大约55m,如图3-6所示;接收孔和所有炮眼布置在同一条轴线上,沿隧道轴径向相对于隧道壁面向下倾斜10~20°;孔径43~45mm(孔径过大会影响接收效果),孔深2.0m,孔底尽量深入致密坚固的围岩中,要求成孔质量要高,位置准确;检波器是通过专用套筒深入围岩中的,应在接收孔内部0.5m~1.0m段塞入锚固剂,填实后迅速插入套筒,并将X方向对准掌子面方向,确保套筒与围岩紧密耦合,在孔口将套筒卡紧,以免爆炸时晃动产生干扰。与检波器接触的岩石越致密坚硬,谐振频率越高,耦合联合好时阻尼系数越大,套筒与围岩耦合不好将严重影响接收信号的质量,必须高度重视。

为了避免电磁感应,要将传输电缆线全部散开,并确保电缆线不布置在靠近电力线、变压器和其它能产生电磁场和声波信号的地方。

4.5.3 仪器参数的选择

增大探测距离和提高探测精度是相互矛盾的两个方面,也是超前探测追求的目标,需要通过试验来确定在不同探测条件下的最佳技术参数,如仪器的通频带、信号补偿、采样间隔和采样数目等。应该在不漏掉不良地质体的前提下,通过改善和优化激发、接收条件和仪器参数来增大超前探测的距离^[115-118]。

采样间隔62.5 μ s和125 μ s,样本值(记录长度)为7218和14468样点,

采样间隔×样本值=时间记录长度

$$62.5\mu\text{s} \times 7218 = 451.125\text{ms}$$

$$125\mu\text{s} \times 14468 = 1808.5\text{ms}$$

有效数据长度=预计探测范围 $\times 2 \times 2.5/V_p$

其中 V_p 为岩体平均纵波速度。

从炮点激发的信号必须是一个尖脉冲信号,接收单元必须补失真的将其记

录下来。完成第一次激发—接收后，立即根据直达波的波形检测来判断信号记录的质量（直达波先到，信号最强）。由近及远或由远及近依次激发，将获得一串波列（类似正弦波），包括一正振幅和一个更强的负振幅。该波列的特征形状应该不随爆破孔的位置改变而变化，但由于地震波是以球面波的形式传播（球形发散），且高频信号在岩石中传播信号更容易被吸收、衰减更快，因此，随着爆破孔距接收器的距离的增加，信号幅度会明显减弱、脉冲宽度略有加大。图 4-17 为采集质量较高的地震记录。

如果最先到达（起跳点）的波形具有震动性（起跳后形成一串递减的振动“振铃”），说明接收器与围岩耦合不好，可能是由于接收器套管没有固结好或套管内部不干净。

信噪比直接反映信号的记录质量，由于反射信号幅度随距离的增加而迅速下降，而噪音通常是随机的，所以要保证足够的信噪比，就要以减小探测距离为代价。TSP 方法理论上可以测得掌子面前方 500m 处反射率仅有 0.1 的反射波，但实际探测中，最有效的超前预报距离为 100m，在积累了大量经验的基础上才能将预报距离增加到 150-200m。通过噪音监测来确定噪音的大小，在数据采集时尽可能避免噪音源的产生，以获取高质量的地震数据。

$$S/N = -20 \log \frac{A_s}{A_n}$$

其中 A_s 为信号振幅， A_n 为噪音振幅。

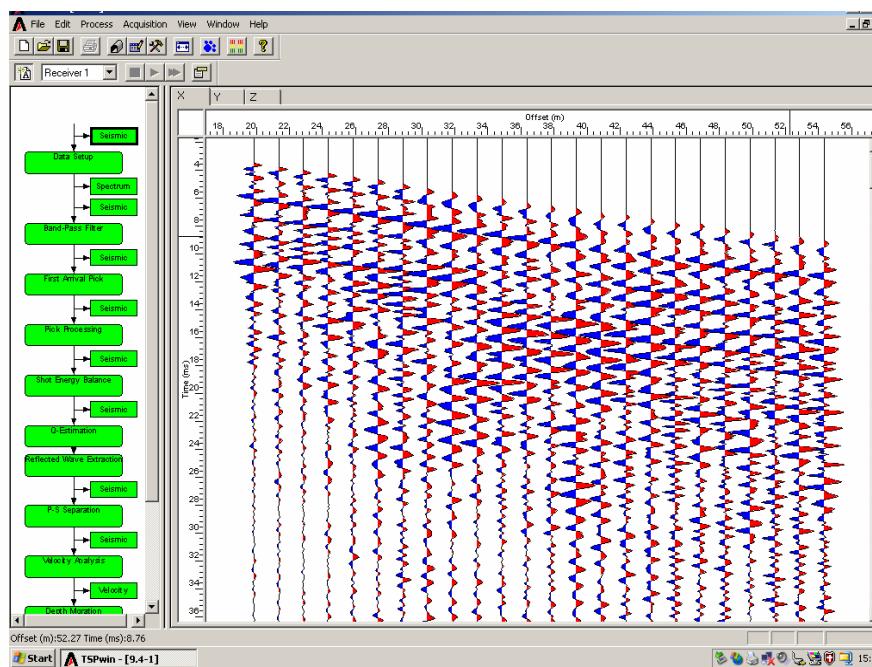


图 4-17 采集质量较高的地震记录

4.5.4 观测系统的布置

由于隧道内可供观测的空间有限, 观测方案受到限制, 因而影响到预报的准确程度。观测系统反映了激发点和接收点相对位置关系, 直接关系到探测结果的精度, 因此, 客观上应通过试验确定最佳观测方式和最佳偏移距等技术参数, 以便将反射波从含有直达波和其它的干扰信号的总体混合信号中分离出来。如赤道组合检波观测系统就有其独特的优点。

若 TSP 的原始数据 (波形) 不能反映掌子面前方不良地质体的反射信号特征, 在现场不能对预报范围内的地质情况做出定性判断, 在室内经过各种方法的数据处理同样也不能得到真实、可靠的预报结果。

最大探测距离就是地震波在仪器的接收时间段内向前传播且能返回而被传感器接收到所能达到的最远距离, 探测距离由波速和时间确定。改变传感器与第一震源间距、震源之间的距离不会改变波速的大小; 增大掌子面与传感器的距离反而使波的有效走时减小, 使时间浪费在掌子面与传感器间的距离内, 减小了掌子面前的探测距离。所以改变爆炸点的间距、第一炸点和传感器的间距不会增加探测距离, 但改变爆炸点的间距能使波的叠加效果得到改变。忽略探测精度的较大的探测距离是没有意义的, 提高震源的质量来提高解译精度有实际意义, 如尽量产生有力的脉冲信号和增加临近接收器震源信号的信噪比。

4.6 关于 TSP 的讨论

大量探测结果表明, TSP 法预报距离长、结论较可靠, 相对其它方法而言, 是目前隧道地质预报最先进的方法之一。必须充分认识和掌握各种不良地质体在 TSP203 探测结果中的基本特征, 熟悉 TSP 方法及 TSPwin 具体应用条件, 才能取得更好的地质效果。

4.6.1 TSP 法应用条件

TSP 法作为一种地震勘探方法, 主要用于研究层状介质的结构及物理力学特性, 应用该方法解决问题时, 同样是从背景场中提取异常。当异常场不足以从正常场中被突出时, 则认为该区域不利于开展反射波法工作。隧道掌子面前方可能引发地质灾害的地质体与围岩之间存在较明显的弹性差异, 有利于地震波法的应用, 因此, 这些地质体的形状、规模及其与观测排列的相对位置客观上决定了该方法的应用效果。由于隧道内观测系统的布置受到限制, 观测排列只

能布置在隧道壁上,探测效果除和掌子面前方的断层、软弱夹层、破碎带等不良地质体的性质有关外,产状及其与隧道轴线的夹角将是最主要的影响因素。若空间角很小,接近于与轴线平行,将严重影响到探测结果的精度;由图3-6可知,同样的地质条件,空间角越大,能观测到的反射界面就越短,获得的界面信息就越少,不利于成果解释。溶洞和溶腔的探测效果与其形状、规模和走向密切相关,隧道掌子面正前方、走向与轴线一致的洞穴或没有足够长度的横切轴线的洞壁的溶腔未必能准确地探测到。

含水体与围岩之间的密度差异远小于它们的电性差异,用弹性波法探水不如电法和电磁法有效。根据反射系数的正负、纵横波波速比、泊松比的变化来确定岩层是否含水,有待进一步研究。因此,用TSP法预报前方水体时必须以其地质的存在可能性为基础。

由于掌子面的尺寸相对探测对象的距离而言要小得多,因此隧道内的地震波场是三维波场。在这种情况下,偏移成像和物性结构反演成像相互迭代是解决问题的重要途径,速度参数的获取是复杂结构探测的核心问题,而目前准确测定速度和反演精细速度的方法尚未实用,先进的波场分离技术亟待开发,使得TSP超前预报系统在复杂探测条件下的精度大打折扣;对与隧道呈大角度相交的面状软弱带(如断层、软弱夹层、地层分界等)探测效果较好,但对不规则形态的地质缺陷(如溶洞、暗河)及岩体含水情况等探测效果仍不够理想。

4.6.2 TSP 反演计算的速度

地震勘探直接获得的是地震波在介质中的传播时间,要得到界面的埋深必须知道波的传播速度,波速的误差决定了预报距离的误差。反射波法速度的计算,都是由第一层速度开始的,理想状态下,视掌子面至预报目标体间的地质体为均匀体,其它各反射层的速度只是第一层速度的相对变化。由于第一层速度(实际上是围岩压密区界面的折射波)的确定与经验有关,且目标界面以内的介质是不均匀的,第二个及其后各界面和与隧道轴线不正交的界面的反射波时距曲线不是双曲线,造成了方程解的非唯一。通过均匀性系统和拟合来获取个层的真速度,由于充分参数依据,在实际计算中必然产生误差。因此,反演出来的速度并不能代表反射界面以下岩体的真实速度,不能准确地确定围岩的级别。TSP的第一层速度是由各炮点至接收器的直达波初至时间确定的,理论上应该相当准确,但实际上并非如此。主观上,检波点的位置和深度、炮点的位置和炮检距、检波点和炮点的成孔工艺、爆破工艺等因素都与理论要求存在一定差距,必然导致最终计算误差;客观上,检波点与炮点之间岩性并不均匀,且沿着开

挖隧道壁传播的滑行波对从炮点到检波器的直达波有非常大的干扰，严重影响到后期的处理解释，使得直达波速度并不能完全真实反映岩体波速。许多TSP实测资料中常常出现“软质碎屑岩的直达波速度大于硬质灰岩直达波速度”的现象，直达波速度本身就不能反映已开挖隧道围岩的真实级别，用它计算出来的其它岩层波速更不能确切地反映岩体的力学特性。因此，利用TSP法反演出来的速度参数来划分隧道围岩级别还需进行更深入的理论研究和工程试验对比。当然，由于速度计算存在一定的误差，反演出来的目标界面位置也相应地出现误差，预报的距离越大，探测精度就越低。通过设定泊松比，然后用实测的纵波波速来计算的横波波速，再算出泊松比，这是目前一些反射法对目标体的定位方法。TSP可以同时测出反射纵波和横波的速度，由它们计算泊松比，但是关键还在于如何准确地测纵横波速度。

就目前TSP应用技术水平而言，超前预报掌子面前方100m范围内地质情况的准确性和精度是能够满足施工要求的，但想要准确预报150~200m甚至更远距离的地质情况，还必须在加强对TSP方法理论研究的基础上，通过大量工程实践的开挖对比，积累经验，总结不同探测条件下成功和失败的经验教训，探索不同条件下的最佳观测方式和解译方法。

4.6.3 物探和地质综合解译

物探成果具有多解性，必须十分慎重，从资料采集到解释完全实现智能化是不现实的。采用两种以上可互补的物探方法（如地质雷达、红外探测、声波探测等距离短、准确性高的方法）相互验证，以克服单一参数多解性的重要手段；将物探与地质调查综合运用，是取得可靠地质效果的重要途径。隧道宏观地质预报与TSP探测解译相结合，可以提高TSP超前地质预报的准确性和精度。对探测区宏观地质情况的了解，可以把握主要不良地质空间分布规律及其与隧道的空间关系，正确选择搜索角和调谐角，指导观测排列（震源和传感器位置）的布置，对不良地质体的发育程度、位置、性质、规模有初步的认识，有利于TSP探测成果的解译。

因此，在利用TSP系统超前探测之前，必须认真研究探测区的构造框架，分析主要结构面的空间产状，确定传感器与观测排列的最佳布置方式。只有将高灵敏的传感器安置在结构面与隧道掌子面前进方向夹角大于90°的隧道壁一侧，才能有效地接收来自远距离的微弱反射信号。探测距离与探测精度是一对矛盾体，越远越容易出错，误差也越大，忽略探测精度的较大探测距离是没有意义的，要通过提高震源质量、信噪比和接收质量来提高探测和解译精度。

4.7 本章小结

设计了一种“赤道组合检波观测系统”，阐述了其基本原理和实践方法，为后续反演叠代提供了精确的初始速度参数。采用该系统可获得连续追踪反射界面的追逐时距曲线，通过简单的对比即可分析原始数据的有效性，利用各种数据处理方法和技术提取有用信息，客观评价原始数据的质量，识别有效信号，采用叠加技术突出有效反射波、压制干扰波，进而提高信噪比。通过获得直达波到达各检波器的时间差可准确地计算出直达纵波速度 V_p 和直达横波速度 V_s ，从而提高反演速度的精度，提高超前预报距离的精确程度。

结合工程实例，利用 matlab 对 TSP 实测数据进行分析和处理，提出了资料解释的原则，对其主要影响因素和关键技术进行了详细的讨论。实践表明，可能引起隧道施工地质灾害的不良地质体与围岩之间存在较明显的弹性差异，纵横波速度、泊松比、密度、杨氏模量等力学参数都有相应的变化规律，在地震反射法的探测结果中具有各自的特征，有利于对它们的识别和解译。TSP203 系统采集和处理数据的方法是目前同类方法中较先进的一种，但要取得准确、可靠的预报结果，还必须结合我国隧道工程特点，在加强理论和实践研究的基础上，进一步深入探索不同条件下的最佳激发、观测方式和解译方法，以确保在足够探测精度的前提下，尽可能获得最大的探测距离。

第五章 隧道地质灾害超前预报雷达探测法

电磁波频率远远高于地震波，对近距离目标体具有较高的分辨能力。探地雷达法(GPR)对洞穴、夹层和断裂带(特别是含水带、破碎带)具有较高的识别能力，在富水地层和溶洞发育地区以及隧道工程事故调查中，因预报准确性高而成为首选的探测手段。本章主要介绍探地雷达法的基本原理，利用有限差分理论对二层介质、圆柱体介质和圆柱体组合进行多种模型的正演模拟，结合大量工程实例讨论了 GPR 在隧道地质灾害超前预报中的应用效果，总结了各种不良地质体在 GPR 图像中的特点和解释原则。

5.1 探地雷达基本理论

5.1.1 雷达探测原理

探地雷达法以电磁波传播理论为基础，以目标体与周围介质的介电性质差异为前提，通过发射高频电磁波(中心频率为数十 MHz 到千 MHz)，以宽带短脉冲形式在掌子面上由发射天线 T 送入前方，经目标体界面反射回来，由接收天线 R 接收，如图 5-1a 所示；电磁波信号在介质中传播，遇到介电性质不同的分界面就会产生反射、色散和衰减等现象，发射和接收天线在测线上按一定的间距同步移动，获得该测线的雷达探测图像(如图 5-1b 所示)，根据反射信号的时间、相位、频率、幅度及波形等特征来分析和推断介质性质与界面位置。

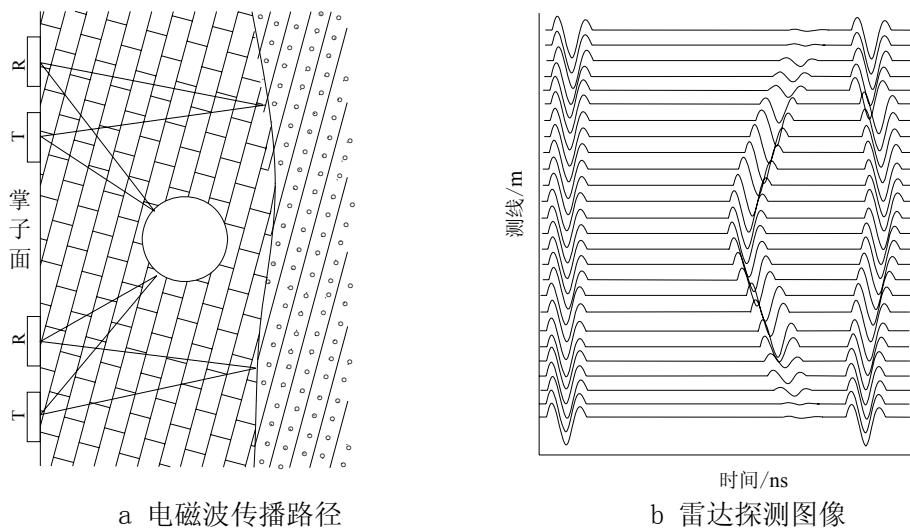


图 5-1 雷达探测原理示意图

探地雷达的分辨率是指对多个目标体的区分或小目标体的识别能力, 取决于脉冲的宽度, 频带越宽, 时域脉冲越窄, 它在射线方向上时域空间的分辨就越强, 或者说深度方向上的分辨率高。探地雷达的水平分辨率主要取决于介质的吸收特性、天线方向及移动步距等因素^[94,127-130]。

探地雷达属于反射波探测法, 其基本原理与对空雷达相似, 根据掌子面反射与目标反射的时间差 Δt , 即可计算出该目标的埋藏深度 L :

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{v^2 \Delta t^2 - x^2} \quad (5-1)$$

式中, L 为目标埋藏深度 (距掌子面的距离), m ;

v 为电磁波传播速度, m/ns ;

Δt 为掌子面反射与目标反射的时间差, ns ;

x 为偏移距 (发射天线和接收天线之间的距离), m 。

对于圆柱体而言, 靠掌子面一侧圆弧面电磁波的反射时间为:

$$t = \frac{1}{v} \left(\sqrt{h^2 + x^2} - r \right)$$

h 为圆柱体中心到掌子面的垂直距离, m ;

r 为圆柱体半径, m ;

x 为天线至圆柱体中心在掌子面上投影的距离。

圆柱体靠掌子面一侧圆弧面电磁波的反射时间 t 与 x 的关系为双曲线关系。

对隧道进行超前探测时, 根据掌子面具体情况布置3~6条测线, 如图5-2所示。一般采用低频天线进行步进“点测”, 中心频率为25MHz或50MHz, 点距为0.1~0.3m, 探测结果采用伪彩色图像或堆积波形方式显示。通过对接收信号实施适当的处理以改善数据资料, 以压制干扰、突出有效信号, 获得清晰可辨的雷达图像; 在此基础上识别异常, 与正演图像比较进行地质解释。

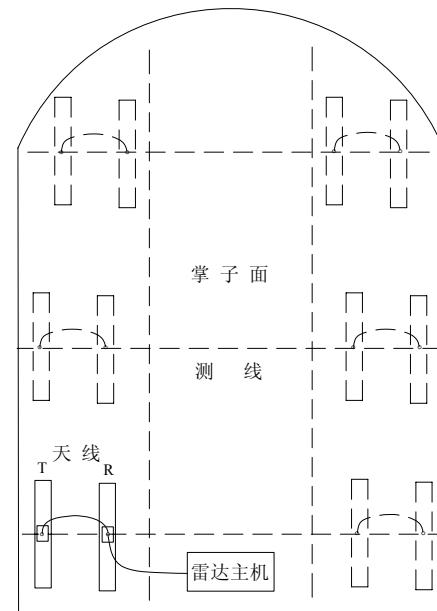


图 5-2 雷达测线布置

5.1.2 电磁波速度估计

对于确定的GPR探测数据, 影响地下目标纵向定位精度的主要因素有两个:

即双程走时和电磁波传播速度的确定。由于电磁波频率非常高,且计算机经搜索目标特征确定的双程走时的相对误差很小,所以,真正影响目标定位精度的因素是电磁波传播速度的确定。在利用探地雷达进行超前预报中,如何精确计算电磁波在地下介质中的传播速度十分重要,下面介绍几种确定电磁波传播速度的方法^[131]。

(1) 介电常数法

相对于GPR所用的高频电磁脉冲而言,通常探测所遇到的介质都是以位移电流为主的低损耗介质。在这类介质中,波速主要取决于介电常数,电磁波传播速度可由下式求得:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (5-2)$$

式中, c 是电磁波在空气中的传播速度, m/ns ;

ϵ 是介质的相对介电常数。

岩石相对介电常数 ϵ 可由实验室测定或者由经验获得,此法费时费力,且室内测得的介电常数 ϵ 不一定符合隧道超越的实际地层,影响定位精度。

(2) 利用共中心道集(CDP)计算波速

如图5-3所示,从发射到接收经目标的双程旅行时间:

$$t(x) = \frac{w}{v} = \frac{\sqrt{x^2 + 4z^2}}{v} = \sqrt{\frac{x^2}{v^2} + t_0^2} \quad (5-3)$$

式中, $t(x)$ 为偏移距 x 处对应双程旅行时间;

t_0 为零偏移距处对应双程旅行时间;

由此式利用实测雷达记录可反求出传播速度,但此法不适合现场超前探测。

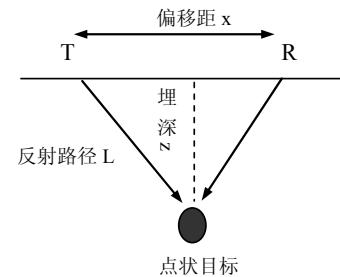


图 5-3 利用 CDP 法求取波速

(3) 霍夫变换法

霍夫变换通过图像处理从图像中识别几何形状的基本方法之一。求取电磁波传播速度时,首先借助于霍夫变换确定地下目标的反射曲线轮廓,再利用类似“几何刻度法”的原理,自动求取波速。

(4) 金属板反射法

根据电磁波反射理论,对于相同的观测装置,层状介质不同界面的反射系数与反射波的振幅成正比。分别多次观测地下浅层介质和铁板的反射信号,并把金属板看作刚性边界,其反射系数为1,由对应的反射振幅 A 及 A_m 按5-4式求得浅表层波速:

$$v = \frac{1 - \sqrt{\frac{A}{A_m}}}{1 + \sqrt{\frac{A}{A_m}}} \times c \quad (5-4)$$

作为一种速度标定的方法，此法在路面结构层厚度检测时常用。

(5) 综合法

在对某隧道进行第一次探测时，先用高精度的介电常数测试仪在现场测得地下介质的介电常数，并在掌子面用金属板反射法获得电磁波速度，对实测雷达记录进行解释，可得到两个厚度值，再通过对第一次预报范围内的开挖结果进行岩性和厚度调查，与预报结果作对比，以修正相对介电常数。当隧道超越不同岩性时，用上述方法再次修正相对介电常数，可以获得准确的电磁波速度，从而提高预报结果的准确性。

5.1.3 岩石的介电常数与反射系数

(1) 介电常数

岩石的电导率主要取决于组成岩石的矿物成分及其含量，还与岩石的含水性密切相关，5-5式表达了它们之间的关系：

$$\sqrt{\sigma} = n(1-s)\sqrt{\sigma_a} + ns\sqrt{\sigma_w} + (1-n)\sqrt{\sigma_s} \quad (5-5)$$

式中， σ 为岩石的电导率， σ_a 为空气的电导率， σ_w 为水的电导率， σ_s 为土粒的电导率， n 为孔隙率， s 为饱和度。

介质电导率减小，其电阻率增大、介电常数减小，其相互关系可由5-6式表示：

$$\varepsilon = \frac{K}{\sqrt[4]{\rho}} = K \sqrt[4]{\sigma} \quad (5-6)$$

式中 ε 为介电常数， K 为与介质性质有关的常数， ρ 为岩石电阻率。

除金属矿和半导体物质以外，常见沉积岩的电阻率都较大，即具有较小的介电常数，详见2.2.3。岩石矿物的介电常数都大于1小于12，而水的介电常数达81，因此，岩石的含水量是影响其介电常数的主要因素。这就是探地雷达法对含水构造十分敏感的根本原因。

(2) 反射系数

电磁波在岩层中传播，遇到介电常数不同的分界面就会产生反射和透射，其反射系数可用5-7式来表示：

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (5-7)$$

反射系数与界面两侧介质的介电常数的关系如图 5-4 所示, ϵ_1 增大或 ϵ_2 减小, 反射系数增大; ϵ_1 与 ϵ_2 差异越大, 则反射信号越强、能量越大。

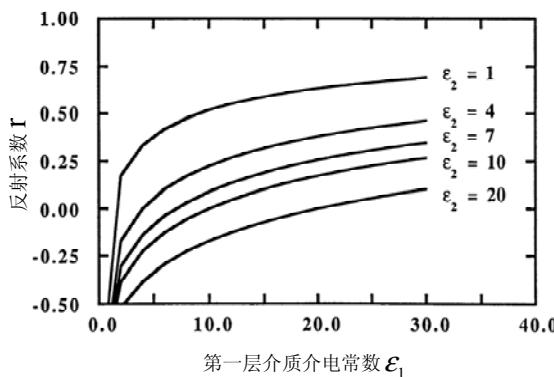


图 5-4 反射系数与介电常数的关系

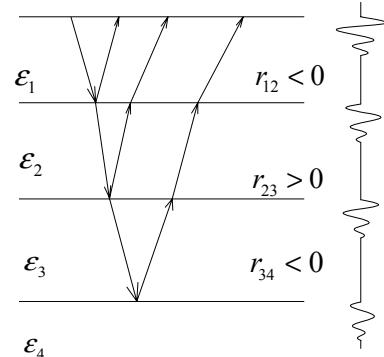


图 5-5 电磁波的正负反射

当 $\epsilon_1 < \epsilon_2$ 时, $r < 0$, 电磁波从高阻介质过渡到低阻介质产生负反射, 即反射波与入射波相位相反; 当 $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 时, $r > 0$, 电波从高阻介质过渡到低阻介质产生正反射, 即反射波与入射波相位相同。图 5-5 为四层介质电磁波正负反射示意图, 各层介质相对介电常数的关系为: $\epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3 < \epsilon_4$ 。

电磁波遇到界面正反射还是负反射取决于介质的介电性质, 当岩性不变或变化不大时, 含水性的变化就决定了介电常数的不同, 因此, 可以根据电磁波的正负反射特征来判断目标体(岩溶、裂隙发育带或破碎带等)是否含水, 对由地下水引起的地质灾害进行准确的预报。

雷达探测资料的解释是根据现场获得的雷达图像的异常形态、特征及电磁波的衰减情况对测试范围内的地质情况进行推断解释。一般来说反射波越强, 前方地质情况与掌子面的差异就越大; 完整岩石对电磁波的吸收相对较小, 衰减较慢; 当围岩较破碎或含水量较大时对电磁波的吸收较强, 衰减较快, 解释过程中电磁波的传播速度主要根据岩石类型(相对介电常数)进行确定, 在有已知地质断面的洞段则以现场标定的速度为准。

5.2 时域有限差分法雷达波正演

Kane S. Yee 于 1966 年发表了著名论文 “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equation in Isotropic Media”, 他把

带时间变量的 Maxwell 旋度方程转化为差分格式(Yee 氏网格)，并成功地模拟了电磁脉冲与理想导体作用的时域响应，被称为时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain Method 或 FD-TD)，是一种新的电磁场时域计算方法。经过近 20 年的发展，吸收边界条件的应用和不断改善，总场区和散射场区的划分，实现了稳态场的计算。20 世纪 80 年代后期以来，时域有限差分法由成熟转入被广泛接受和应用，不断得到了新的发展，主要解决了以下几个问题：(1) 回路积分法和变形网格，(2) 亚网格技术，(3) 广义正交曲线坐标系中的差分格式和非正交变形网格，(4) 适于色散介质的差分格式，(5) 超吸收边界条件和色散吸收边界条件。主要应用于目标电磁散射特性、天线辐射特性、瞬态电磁场、微波电路和光路时域分析、生物电磁剂量学等方面的研究。

时域有限差分 (Finite-Difference Time-Domain, 简称 FDTD) 方法是探地雷达剖面正演合成的有效方法，它采用中心差近似代替麦克斯韦方程组中的微分算符，得到二阶精度的场值抽样，以时间递推的方式直接模拟电磁作用过程，具有运算快、易于解决各种复杂电磁散射问题等优点^[132-135]。

5.2.1 时域有限差分法的基本原理

FDTD 法从含时间变量的两个 Maxwell 旋度方程出发，研究时域电磁场的计算方法。对于均匀、各向同性、线性且与时间无关的介质，在无源区，Maxwell 方程组中的两个旋度方程可表示为：

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma_m H \\ \nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma_e E \end{cases} \quad (5-8)$$

式中， E 为电场强度 V/m ， H 为磁场强度 A/m ， ϵ 为介电常数 F/m ， μ 为磁导率 H/m ， σ_e 为电导率 S/m ， σ_m 为等效磁阻率 Ω/m 。引入等效磁阻率的主要目的在于使方程具有对称性。

在采用 Yee 氏网格时，用 Δx 、 Δy 和 Δz 分别代表在 x 、 y 和 z 坐标方向的网格空间步长，网格点空间坐标可简单表示为：

$$(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$$

其中 i 、 j 和 k 均为整数，分别表示 x 、 y 和 z 坐标方向的网格标号或空间步长个数。时间步长用 Δt 表示， n 表示时间步长的个数。一个时变参量一般既与空间坐标有关，也与时间变量有关，即是一个四维变量。为了表示方便把时间变量写在其代表符号的右上角，并用下面的简化表示方法：

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t)$$

其中 F 为任意时变参量。

以二维空间 (z 方向均匀) 中的 TM 波问题为例, 设研究空间为非磁性的电性均匀空间, 即 $\mu = \mu_0$ (μ_0 为真空中的磁导率), $\sigma = 0$ 。在直角坐标中, 利用 Yee 氏网格可得到时域有限差分方程 (5-9):

$$\left\{ \begin{array}{l} E_z^{n+1}(i, j) = CA(i, j) \cdot E_z^n(i, j) + CD \cdot CB(i, j) \cdot \left[H_y^{\frac{n+1}{2}}(i+1/2, j) \right. \\ \quad \left. - H_y^{\frac{n+1}{2}}(i-1/2, j) + H_x^{\frac{n+1}{2}}(i, j+1/2) - H_x^{\frac{n+1}{2}}(i, j-1/2) \right] \\ H_x^{\frac{n+1}{2}}(i, j+1/2) = H_x^{\frac{n-1}{2}}(i, j+1/2) + CD \cdot [E_z^n(i, j) - E_z^n(i, j+1)] \\ H_y^{\frac{n+1}{2}}(i+1/2, j) = H_y^{\frac{n-1}{2}}(i+1/2, j) + CD \cdot [E_z^n(i+1, j) - E_z^n(i, j)] \end{array} \right. \quad (5-9)$$

其中, $CA(i, j) = \frac{1 - \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2\epsilon(i, j)}}{1 + \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2\epsilon(i, j)}}$; $CD = \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$; $CB(i, j) = \frac{\epsilon_0}{\epsilon(i, j) + \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2}}$;

σ 为电导率, 由于只有电介质, 故去掉了下角标; ϵ_0 为真空中的介电常数;

$\Delta x = \Delta y = \Delta s$, $\Delta's$ 表示统一空间步长。

在 (5-9) 式的差分格式中, 时间增量 Δt 和空间步长 Δs 不是独立的, 它们的取值应满足如下条件

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{2v_{max}} \quad (5-10)$$

以避免数值的不稳定, Δs 一般取 $\lambda_{min}/10$ (λ_{min} 为激励源频谱中最高频率对应的波长), v_{min} 为计算空间中的最大电磁波速度。

从 (5-9) 式的差分格式来看, 在计算过程中, 电场在整数时间步上取值, 磁场在半整数时间上取值。首先由前一时刻的电场求磁场, 由得到的新磁场再计算电场。当空间中有激励源存在时 (若激励源为电脉冲), 则在初始时 $t = 0$, 激励源为 0, 电场和磁场都为 0; 到 $t = \Delta t$ 时刻, 激励源不为 0, 则激励源决定改时刻的电场, 再由 $t = \Delta t$ 时刻的电场计算 $t = (3/2) \times \Delta t$ 时刻的磁场, 通过逐次运算表征电磁场的传播过程。

5.2.2 吸收边界条件与梅-方超吸收边界条件

大地中电磁场的分布是无限的，而计算机的存储空间和运算时间有限的，不可能计算整个空间中的场。实际计算中常用有限计算空间来代替无限空间，为保证二者的等效性，需要对计算空间的截断边界进行特殊处理，使行波在边界上保持“外向行进”特征，无明显反射现象，即波被吸收，并且不使内部空间和边界上的场产生畸变，在数值计算时采用边界条件。

常规 Mur 二阶吸收的边界条件是在截断边界处对 E_z 分量进行如下计算：

$$\begin{aligned} E_z^{n+1}(0, j) = & -E_z^{n-1}(1, j) + \frac{v\Delta t - \Delta s}{v\Delta t + \Delta s} [E_z^{n+1}(1, j) + E_z^{n-1}(0, j)] + \frac{2\Delta s}{v\Delta t + \Delta s} [E_z^n(0, j) + E_z^n(1, j)] \\ & + \frac{(v\Delta t)^2}{2\Delta s(v\Delta t + \Delta s)} [E_z^n(1, j+1) - 2E_z^n(1, j) + E_z^n(1, j-1) + E_z^n(0, j+1) - 2E_z^n(0, j) + E_z^n(0, j-1)] \end{aligned} \quad (5-11)$$

式中， v 表示电磁波的传播速度。其它边界上的二阶近似吸收边界条件的差分格式与 (5-11) 式类似。

Mur 吸收边界条件在模拟计算中得到广泛应用，但这些吸收边界条件的反射显得过大，所适应入射角的范围不够宽。传统的吸收边界条件只是在边界上对电场或磁场进行特殊处理，而不对两者进行同时计算，这是因为只要在边界上知道了电场或磁场，则内部区域的场就能唯一确定。Fang 和 Mei(1988)首次提出了超吸收边界条件的概念，在边界上同时计算电场和磁场，并由此来减少计算电场时所产生的非物理因素所引起的反射，从而改善原吸收边界条件的性能。

若 $i = M$ 为该计算网格的边界之一，则梅方超吸收边界条件的应用步骤为：

(1) 选择一种合适的吸收边界条件并应用于 $E_z^n(M, j)$ ；

(2) 把这一吸收边界条件同时应用于 $H_y^{\frac{n+1}{2}}(M - 1/2, j)$ ，即得到：

$$H_y^{\frac{n+1}{2}(2)}(M - 1/2, j)；$$

(3) 按正常差分方程 (5-9) 式计算得到 $H_y^{\frac{n+1}{2}(1)}(M - 1/2, j)$ ； $E_z^n(M, j)$

(4) 设 $\rho = v\Delta t / \Delta s$ ，按下式计算出 $H_y^{\frac{n+1}{2}}(M - 1/2, j)$ ：

$$H_y^{\frac{n+1}{2}}(M-1/2, j) = \frac{H_y^{\frac{n+1}{2}(1)}(M-1/2, j) + \rho \cdot H_y^{\frac{n+1}{2}(2)}(M-1/2, j)}{1 + \rho}$$

(5) 为提高 $E_z^n(M, j)$ 的计算精度, 利用上一步计算所得的 $H_y^{\frac{n+1}{2}}(M-1/2, j)$ 再计算一次 $E_z^n(M, j)$, 以便对它进行修正, 计算公式为:

$$E_z^n(M, j) = E_z^n(M-1, j) + \frac{1}{C_2} \left[H_y^{\frac{n+1}{2}}(M-1/2, j) - H_y^{\frac{n-1}{2}}(M-1/2, j) \right]$$

式中 $C_2 = \frac{\Delta t}{\mu \Delta s}$ 。

由于吸收边界条件对计算区域的角点不成立, 取文献角点场值^[136]

$$\phi^{n+1}(0, 0) = \phi^n(1, 1) + \frac{v\Delta t \cos \alpha - \Delta s}{v\Delta t \cos \alpha + \Delta s} [\phi^{n+1}(1, 1) - \phi^n(0, 0)] \quad (5-12)$$

式中 α 为计算区域对角线与边界的夹角。

当满足稳定性条件 $\Delta s = 2v\Delta t$ 时为

$$\phi^{n+1}(0, 0) = \phi^n(1, 1) + \frac{v\Delta t \cos \alpha - 2}{v\Delta t \cos \alpha + 2} [\phi^{n+1}(1, 1) - \phi^n(0, 0)] \quad (5-13)$$

其它角点场值的计算公式与 (5-13) 式的计算格式类似。

利用 Matlab 进行编程, 给定模型及其相关参数, 如介质的相对介电常数, 电导率, 第一层介质厚度, 或圆柱体半径及埋深; 天线频率、网格尺寸、空间步长或时间步长、天线起点和终点位置等。可将模拟计算结果保存为文本数据文件, 再利用各种软件成图, 也可利用程序直接在 Matlab 环境下成图。为了绘图的方便, 可将模拟结果转换成“*.dzt”文件, 直接用 GSSI 公司的 Radan 软件或中国电波传播研究所编制的探地雷达数据处理软件系统 IDSP5.0 打开, 直接显示雷达图像。

5.2.3 水平层状模型数值模拟

图 5-6 为二层水平介质模型, 设上层介质的相对介电常数 ϵ_1 为 10, 电导率 σ_1 为 $0.0004 S \cdot m^{-1}$, 厚度为 3m; 下层介质的相对介电常数 ϵ_2 为 20, 电导率 σ_2 为 $0.01 S \cdot m^{-1}$, 介质向下无限延伸。

进行模拟计算时, 天线中心频率取 60MHz 模拟区域 80×100 网格空间, 时
间步数 $nt=512$, 空间步长 $ds = \lambda / 20 = 0.0790$ m, 时间步长 $dt=ds/(2 \cdot v)=0.41667$ ns。
将模拟计算结果用 IDSP5.0 数据处理系统打开, 雷达正演模拟图像如图 5-7 所示。

图 5-7 清楚地反映了在旅行时间约 63ns 的位置存在一个较强反射波, 其相
位与入射电磁波相位相反。

$$h = \frac{1}{2} \frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}} \Delta t \approx 3.0m$$

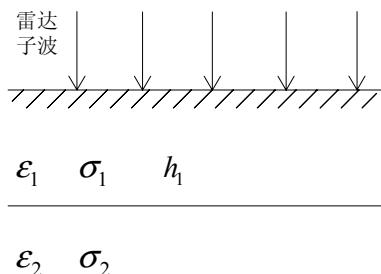


图 5-6 水平层状模型

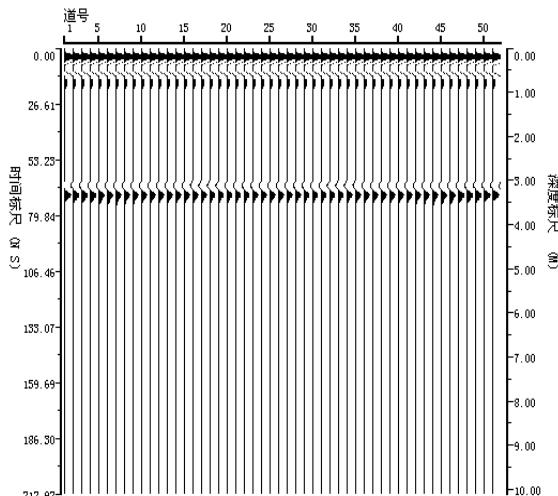


图 5-7 二层水平介质模型雷达正演模拟图像

5.2.4 圆柱体模型数值模拟

图 5-8 为圆柱体模型, 表示某均匀介质中存在一水平圆柱体, 雷达测线垂直
圆柱体走向。表 5-1 为各种圆柱体模型
的不同参数: 相对介电常数、电导率、
圆柱体半径及中心深度等, 这些参数反
映了圆柱体与围岩之间的相对电性和介
电性质差异, 以及圆柱体的规模和埋深,
可以模拟隧道围岩中充水、充泥或充气
溶洞的基本特征。图 5-9~图 5-21 为各种
模型采用时域有限差分法正演计算结果
所对应的雷达图像。

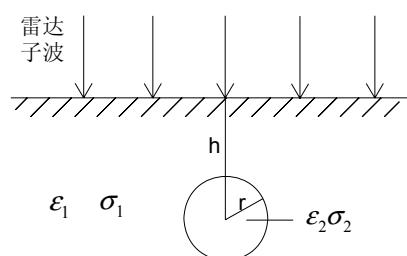


图 5-8 圆柱体模型

表 5-1 各种圆柱体模型参数

模型 编号	ϵ_1	σ_1 ($S \cdot m^{-1}$)	ϵ_2	σ_2 ($S \cdot m^{-1}$)	h (m)	r (m)	网格尺寸	备注
1	10	4×10^{-4}	1	10^{-6}	3.5	1.0	100×100	充气溶洞(1:2:99)
2	10	4×10^{-4}	1	10^{-5}	3.5	1.0	200×100	充气溶洞(70:2:130)
3	10	4×10^{-4}	81	2×10^{-2}	3.0	1.0	200×100	充水溶洞(70:2:130)
4	10	4×10^{-4}	81	2×10^{-2}	5.0	1.0	200×100	充水溶洞(70:2:130)
5	5	4×10^{-5}	81	10^{-2}	3.5	1.0	200×100	充水溶洞(70:2:130)
6	5	4×10^{-5}	81	10^{-2}	3.0	0.5	200×100	充水溶洞(70:2:130)
7	10	4×10^{-4}	1	10^{-5}	3.5	0.5	200×100	充气溶洞(70:2:130)
8	7	10^{-9}	81	10^{-4}	3.0	0.5	200×100	充水溶洞(70:2:130)
9	7	10^{-9}	1	10^{-9}	3.0	0.5	200×100	充气溶洞(70:2:130)
10	8	2.5×10^{-2}	1	10^{-9}	3.0	0.5	200×100	充气溶洞(70:2:130)
11	7	10^{-9}	81	10^{-4}	3.0	0.5	200×100	充水溶洞(1:2:199)
12	5	4×10^{-5}	81	10^{-2}	5.0	0.5	200×100	充水溶洞(1:2:199)

模拟计算时, 天线中心频率为 60MHz, 模拟区域为 200×100 和 100×100 网格空间, 时间步数 nt=512, 空间步长 ds=0.1m, 时间步长 dt 由(5-10)式确定, 圆柱体位于网格中心线上。将模拟计算结果转换“*.dzt”文件, 再用 IDSP5.0 处理软件打开, 即得到图 5-9 所示的结果。

由图 5-9 可知, 圆柱体的二维雷达图像呈双曲形状, 弧顶位置对应的旅行时间正好是雷达波在圆柱体顶部至地表的往返双程旅行时间。双曲线是圆柱体模型雷达图像的基本特征, 实际工作中就是利用该特征来判断地下介质中是否存在空洞、圆柱形异常体。在双曲线的下方, 还存在曲率不同的同相轴, 这是由于雷达波在地表与圆柱体之间有多次反射所造成。可以清楚地看出, 灰岩中的空溶洞几乎没有多次反射, 而充水溶洞则具有明显的多次反射, 特别是溶洞埋藏较浅时, 这种现象更加突出。

这里针对探地雷达剖面的所作二维正演模拟, 除了模型剖面是二维外, 激励源也是二维的。实际工作中, 某些地质剖面可以作为二维处理, 但激励源是很难做到二维的, 因此, 这种模拟计算是雷达剖面的一种近似计算, 与实际情况存在一定差别, 需用根据实际情况进行对比解译。

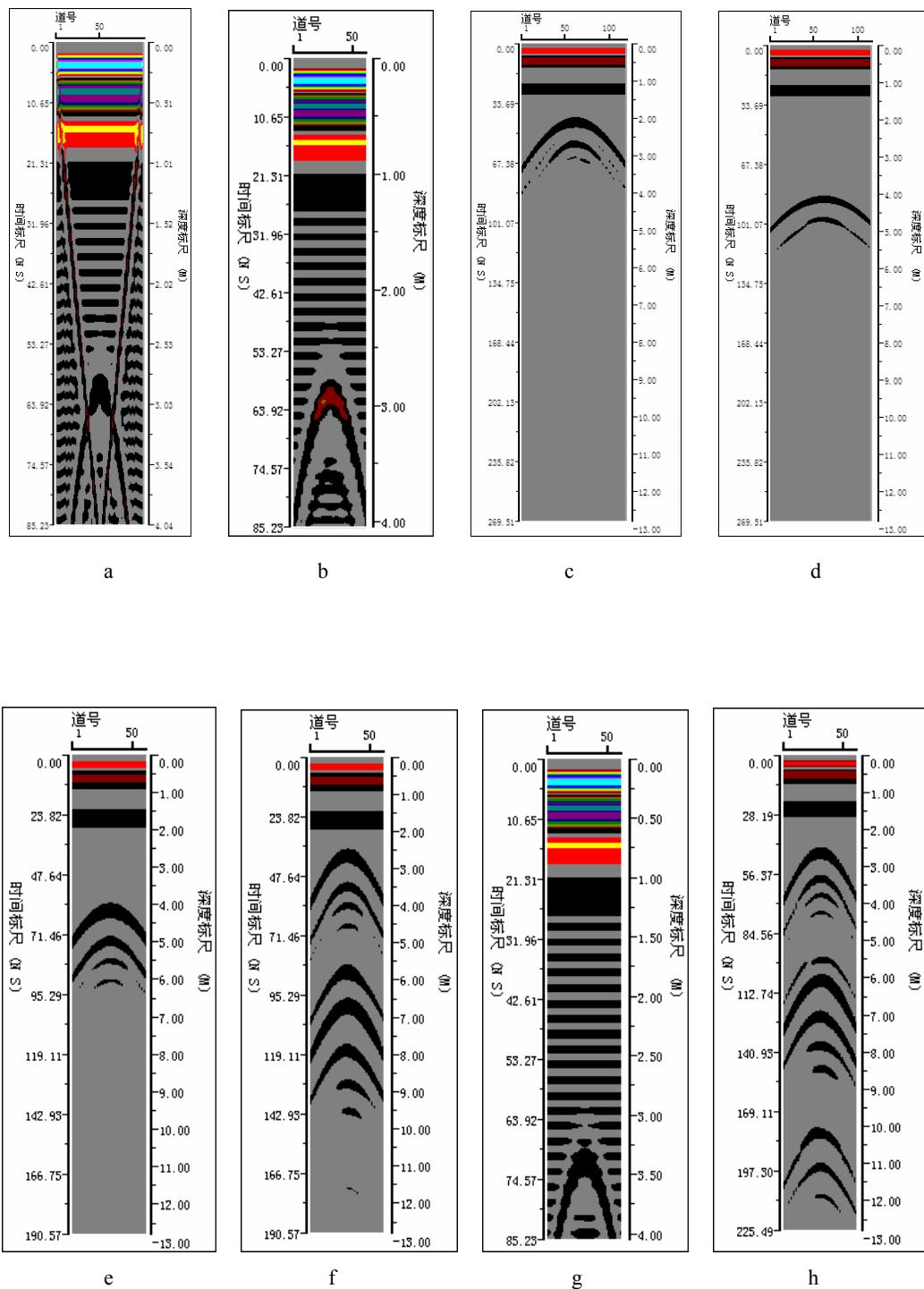


图 5-9A 水平圆柱体模型雷达模拟图像

a 1[#]模型 b 2[#]模型 c 3[#]模型 d 4[#]模型
e 5[#]模型 f 6[#]模型 g 7[#]模型 h 8[#]模型

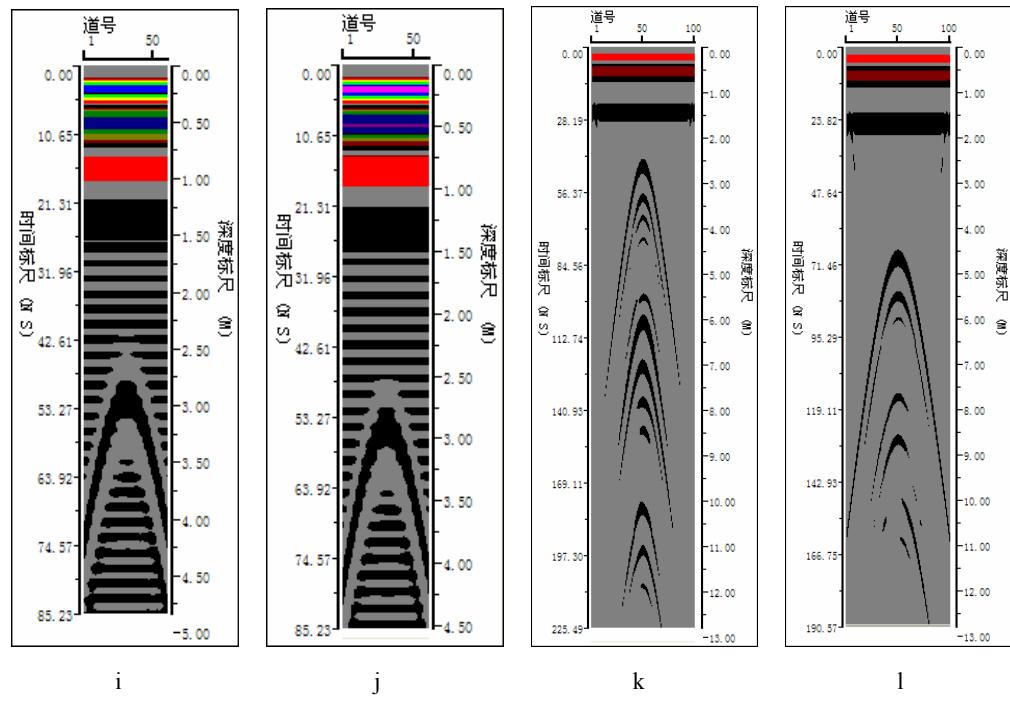


图 5-9B 水平圆柱体模型雷达模拟图像

i 9#模型 j 10#模型 k 11#模型 l 12#模型

图 5-9a 为 1#模型的雷达模拟图像, 模拟区域为 100×200 网格空间 (宽 100、深 200), 圆柱体位于网格中心线上, 测点在网格中从第 1 点移到第 99 点; 图 5-9k、图 5-9l 图为 11#、12#模型的雷达模拟图像, 模拟区域为 200×200 网格空间, 测点在网格中从第 1 点移到第 199 点, 相当于从左边界移到右边界。图 5-9a 中圆柱体半径为 1m, 是网格宽度的十分之一, 边界影响十分明显; 而图 5-9k 和图 5-9l 中圆柱体半径为 0.5m, 是网格宽度的四十分之一, 边界影响只出现在浅部较小范围内。因此, 在模拟计算结果中, 边界的影响主要取决于圆柱体半径相对于网格尺寸的大小, 但如果只观测圆柱体正上方、网格中部三分之一网格宽度范围, 则不会受到边界的影响。在进行隧道超前探测时, 不必考虑这一点。

图 5-10 左图为 11#模型的雷达模拟图像, 模拟区域为 200×200 网格空间, 时间步数 $nt=512$, 空间步长 $ds=0.1m$, 圆柱体位于网格中心线上, 测点在网格中从第 1 点移到第 199 点 (图 5-9l 也是同样的观测方式), 相当于从左边界移到右边界。左图清楚的显示出圆柱体模型的双曲线特征, 弧顶对应圆柱体的顶面位置, 在 13.0m 范围内出现了十分明显的 3 次反射; 左右两端浅部存在边界影响, 但对深部影响不大。右图为第 99 点的反射电磁波曲线, 在 2.5m、5.5m、10.0m 三处出现 3 个与入射波相位相反的反射电磁波, 说明从高阻介质到低阻介质将产生较强的负反射电磁波, 第二次反射的时间近似等于第一次反射时间的两倍,

第三次反射的时间大于第一次反射时间的三倍，反射次数越多，反射时间越长，幅度越低，信号越弱。

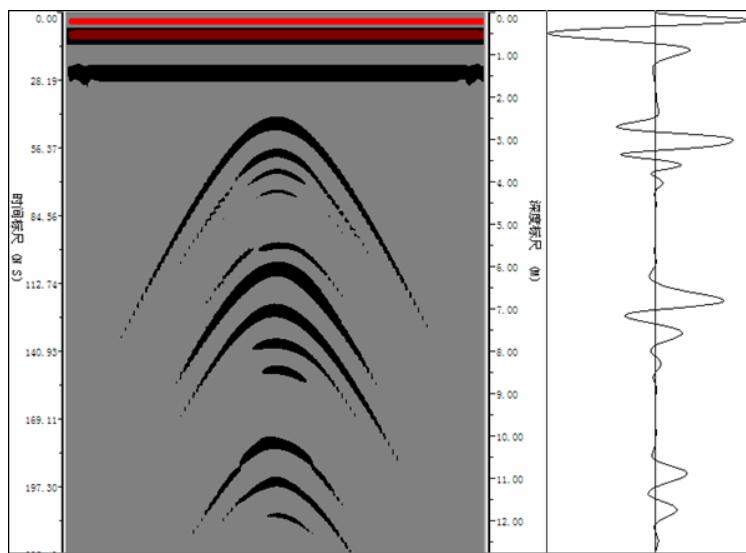


图 5-10 11#模型雷达模拟图像与反射电磁波曲线

模拟结果表明，对于圆柱体模型，无论是高阻还是低阻，在圆柱体正上方都会出现特征明显的双曲线；但是是否出现多次反射、多次反射信号的强弱，则取决于圆柱体与周围介质的导电性和介电常数的差异，以及圆柱体的半径和埋深。通常，介质的导电性和介电常数的差异越大（特别是从高阻介质进入低阻介质时）、埋藏越浅，多次反射越明显。

5.2.5 复杂模型数值模拟

图 5-11 为某介质中不同位置存在不同性质圆柱体的复杂模型，雷达测线垂直圆柱体走向。表 5-2 为各模型参数：相对介电常数、电导率、圆柱体半径及中心深度和间距等，1#圆柱体模拟隧道围岩中充水、充泥溶洞的基本特征，2#圆柱体模拟充气溶洞的基本特征。图 5-11a、b、c 分别对应模型 f1、f2、f3。

表 5-2 各模型参数

模型编号	ϵ_1	$\sigma_1 (S \cdot m^{-1})$	ϵ_2	$\sigma_2 (S \cdot m^{-1})$	ϵ_3	$\sigma_3 (S \cdot m^{-1})$	h_1 (m)	h_2 (m)	r (m)	Δx (m)
f1	81	2×10^{-2}	1	10^{-5}	10	4×10^{-4}	3.5	3.5	1.0	5.0
f2	81	2×10^{-2}	1	10^{-5}	10	4×10^{-4}	3.5	5.0	1.0	0.0
f3	81	2×10^{-2}	1	10^{-5}	10	4×10^{-4}	3.0	5.0	1.0	5.0

模拟计算时, 天线中心频率为 60MHz, 模拟区域为 200×100 网格空间 (模拟 $20\text{m} \times 10\text{m}$ 空间范围), 时间步数 $nt=512$, 空间步长 $ds=0.1\text{m}$ 。图 5-12、图 5-13、图 5-14 为各种模型采用时域有限差分法正演计算结果所对应的图像。

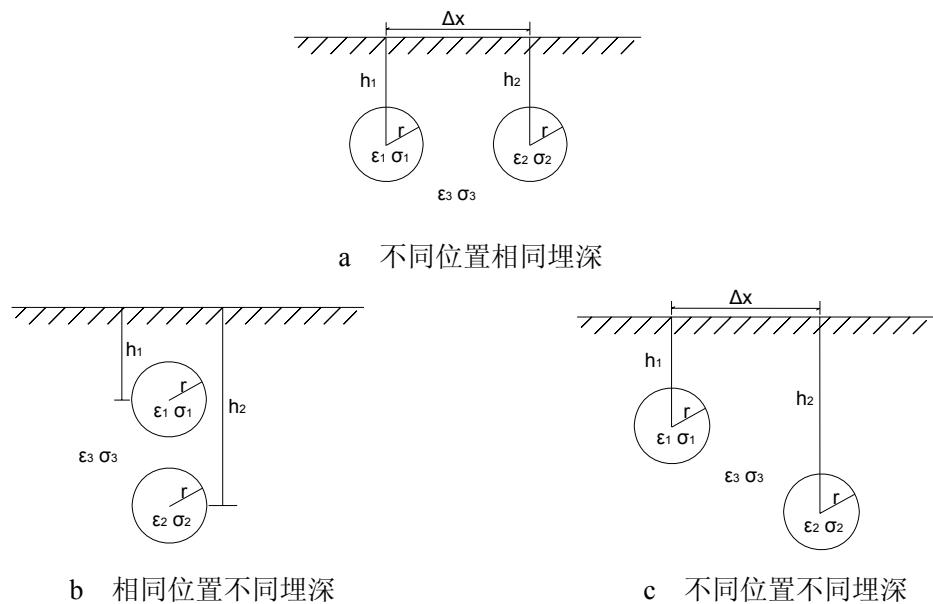


图 5-11 不同性质、不同位置组合的复杂模型

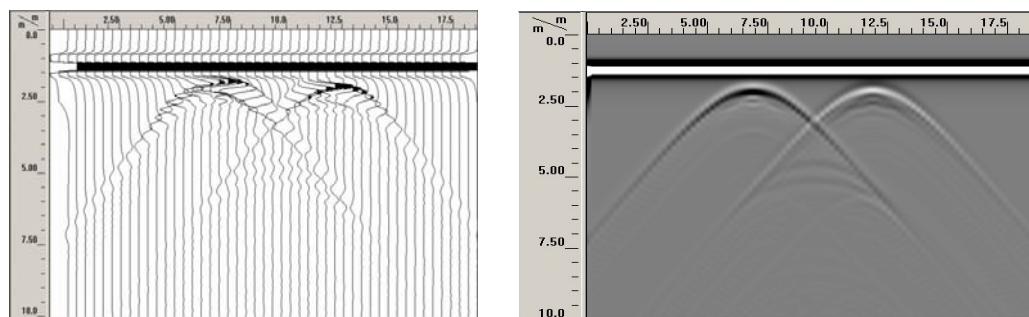


图 5-12 f1 模型模拟图像

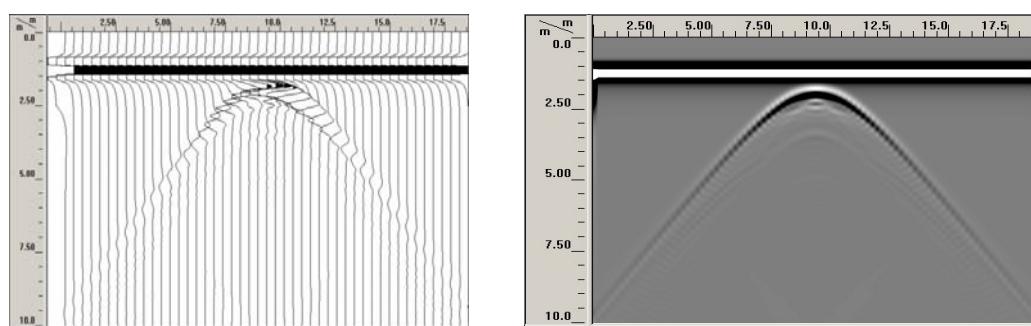


图 5-13 f2 模型模拟图像

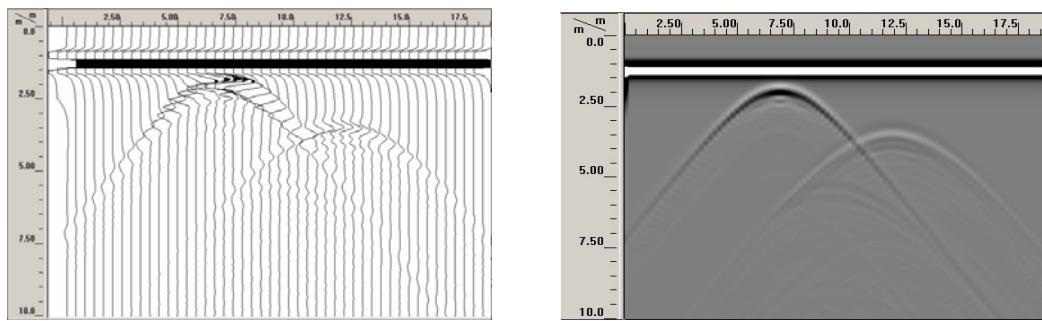


图 5-14 f3 模型模拟图像

由复杂模型的模拟计算图像可以看出, 双曲线依然是圆柱体模型雷达图像的基本特征, 弧顶水平位置正好为柱体在测线上的投影, 深度位置对应正好是圆柱体中心位置减去其半径; 当介质中存在两个异常体时, 雷达的水平分辨能力很强, 如图 5-12、图 5-14 所示, 不管深度是否相同都有两个清晰的双曲线反映, 且水平间距越大, 相互干扰越小, 图像越清晰; 但是, 当沿电磁波传播方向存在两个异常体时, 多个界面的反射和界面之间的多次反射互相叠加, 第一个异常体反映明显, 第二个则很难识别出来, 垂向分辨能力较差, 如图 5-13 所示。存在多个异常体时, 电磁波的绕射和干扰使图像变得杂乱, 不利于识别。反射电磁波的幅度取决于异常体与介质之间导电性和介电常数的差异, 灰岩中含水体和充气体的反射信号极性相反, 且含水体比充气体的反射信号更强。

5.3 雷达探测实例

在隧道施工中, 雷达主要用于掌子面前方的近期(短距离)地质灾害预报, 目的是探测掌子面前方和拱顶上方是否存在溶洞、破碎带、软弱夹层和局部松散体, 预报突水、突泥和塌方等地质灾害和隐患, 这些局部不均匀体与围岩之间存在较明显的介电常数差异, 为探地雷达法的应用提供了良好的客观前提。

5.3.1 工程概况

黔桂铁路南起广西柳州, 北达贵阳, 沿线经过、宜州、金城江、南丹、独山、都匀、贵定、龙里等 9 个县市, 是西南地区重要的出海通道。既有路线全长 607km, 扩能改造后新线全长 489km, 铁路等级由国家Ⅱ级升为国家Ⅰ级, 单线, 预留双线, 工程总投资 93 亿元, 工期 3 年。柳州局管段线路长 262.9km, 投资总额为 50.27 亿元, 在这 200 多公里线上, 隧道 61 个, 共 50840m, 桥梁 90 座, 桥隧比例大到 27.75%。其中最长的隧道是六甲隧道, 长 4534m。

黔桂铁路沿线分为广西盆地、贵州高原斜坡地带及高原 3 种地貌，多为喀斯特地貌。地质复杂、峡谷纵横，隧道穿越地层主要有泥质灰岩夹炭质页岩、泥灰岩及页岩、炭质页岩，节理发育，断层和溶洞、溶腔、溶槽等十分发育；岩溶顺层或沿断层破碎带发育，溶洞大小、形状各异，多呈串珠状、葫芦状，大部分溶洞中充满了水和淤泥，施工中经常遇到塌方、突水、突泥等各种地质灾害现象，造成了较大的经济损失，延缓了工程的进度。如螃蟹冲隧道北端 180m 处发生塌方事故，6 名工人被困洞内，3 天 3 夜才获救；拉之洞隧道出口约 200m 处突然出现隧道史上罕见的“突泥”灾害，大量的淤泥夹着卵砾向外喷射，射程达 45m 之远；六甲隧道进口约 300m 处出现了一个高近 10m、深不见底、顺层发育的大溶洞，由于层间夹泥又失去了支撑，两米多厚的岩层往下坠落，严重威胁了施工安全，等等，各种不同程度的地质灾害和安全隐患在该路段各隧道都存在。为确保隧道施工安全、快速地向前掘进，施工单位采用新奥法施工，两头掘进，光面爆破，锚喷支护，复合衬砌；同时对洛西、北崖、拉之洞、板南、寨熬、虎形、那马、六甲、全村等四十多座隧道开展了雷达超前探测和地质灾害预报工作（部分隧道采用了 TSP 法），并根据探测结果及时调整施工方案，对可能发生地质灾害的地段，严格按照“短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的要求，加强施工组织与管理。

现场探测采用 LTD-2000 探地雷达，实时采集软件 LTDsample2000，雷达数据处理软件 IDSP5.0，天线频率为 25MHz 和 50MHz 两种，采样点数 $nt=1024$ ，由于隧道掌子面不平整，实测时采用点测方式，测点间距 $ds=0.1m$ 。

5.3.2 溶洞类地质体雷达图像特征

当溶蚀现象发育到一定程度，就会形成溶槽、溶洞，在雷达图象中呈现强相位反射、同相轴连续性好。天然溶洞形状不规则、规模不一、充填物不同，在雷达探测结果中具有不同的图像特征：当溶洞的横向尺寸小于掌子面宽度时，呈双曲线或不太规则的双曲线形状；当溶洞的横向尺寸大于掌子面宽度时，则呈与反射面相似曲线形状；当溶洞充满水、且离掌子面较近时，有较强的多次、负反射现象；当溶洞充满淤泥时，则出现十分明显的低频反射现象，且电磁波幅度衰减快；当溶洞为干溶洞时，“双曲线”形状较明显，多次反射少见。水是自然界介电常数最大、电磁波传播速度最低的介质，与岩土和空气的差异最大，对电磁波有强烈的反射，最容易区分和识别。图 5-15 为充气溶洞（空洞）实测雷达图像，图 5-16 为充水溶洞实测雷达图像，图 5-17 为充满淤泥的溶洞（左侧）实测雷达图像（因溶洞较大，只测到一部分，看不到“双曲线”）。

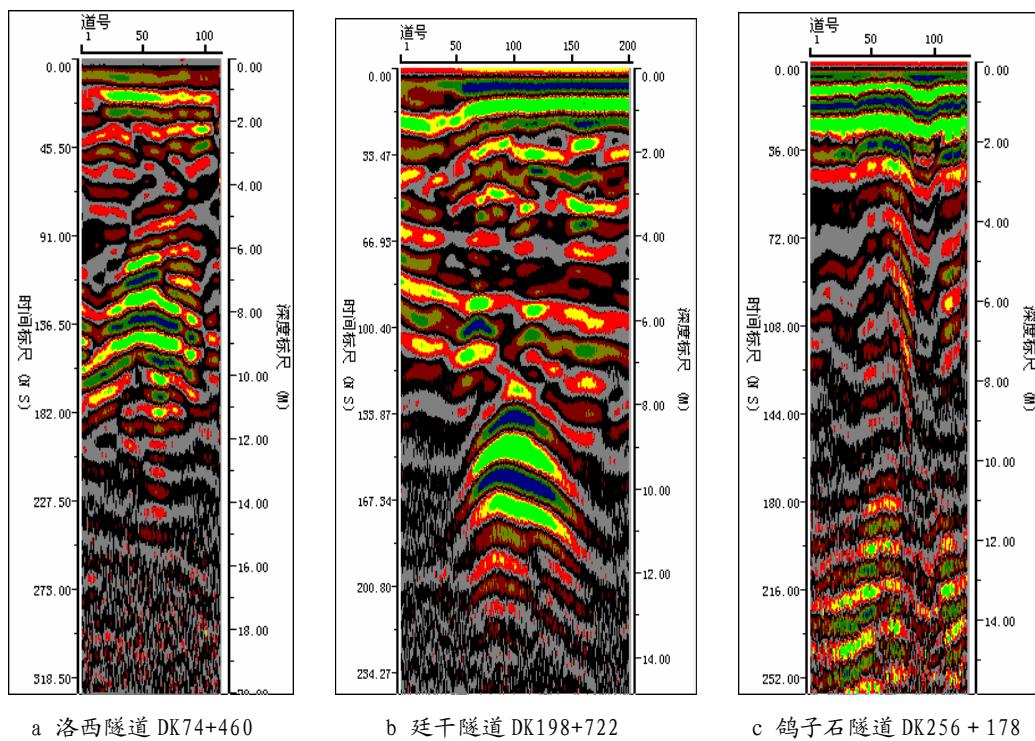


图 5-15 充气溶洞实测图像

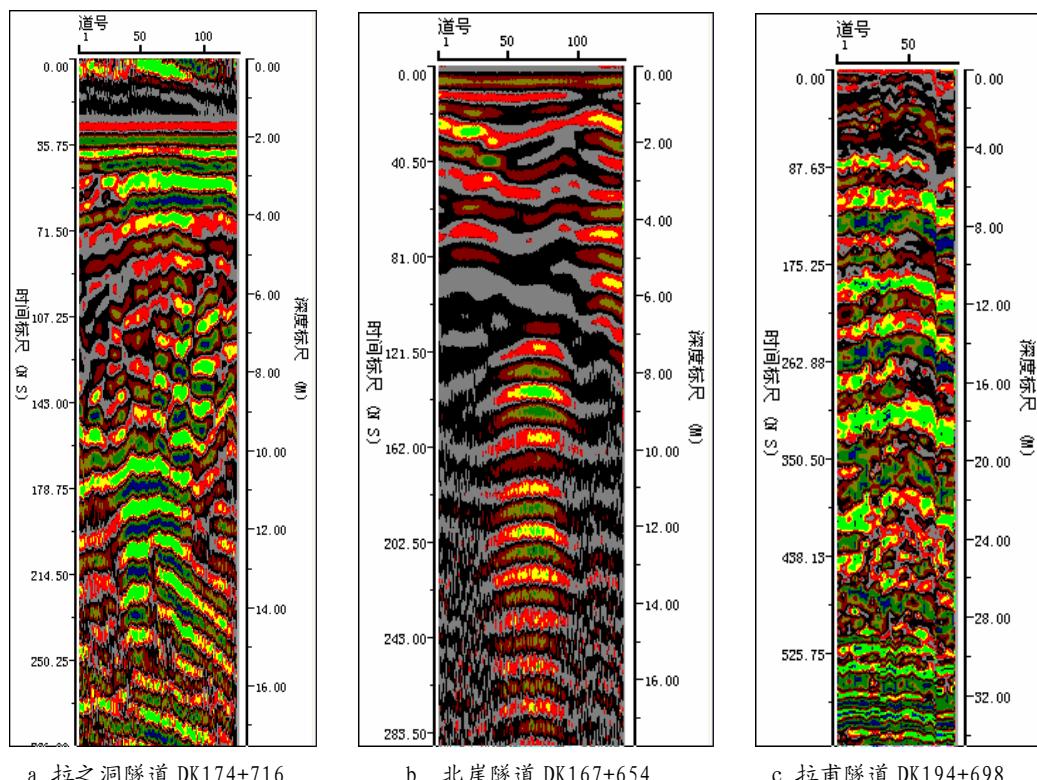


图 5-16 充水溶洞实测图像

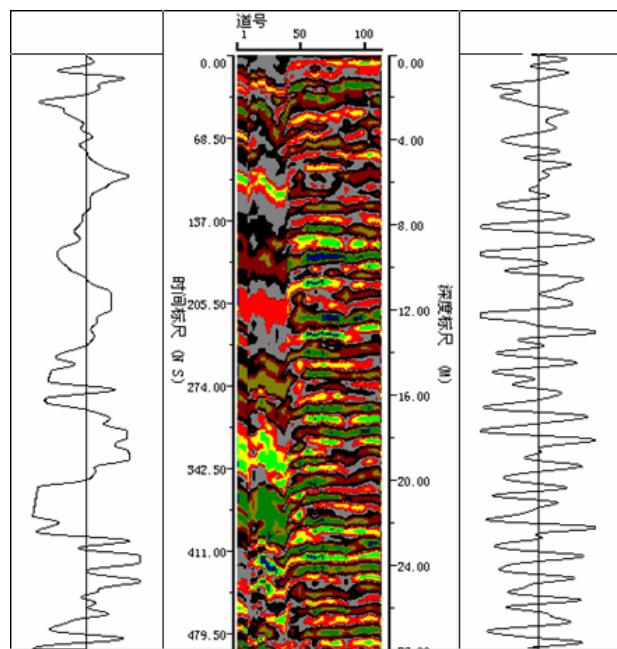


图 5-17 虎形隧道 DK231+915 夹泥溶洞实测图像

5.3.3 断层破碎及夹层类地质体雷达图像特征

完整岩层和夹层电磁波衰减有规律，信号幅度和同相轴连续、一致性好。而断层带、陷落柱和岩层破碎带由于岩石破碎，反射界面不规则，信号大幅衰减，同相轴错断、零乱；若夹泥或含水，则幅度衰减更快。图 5-18a、b 为断层带和夹泥破碎带实测图像，图 5-19a 为完整岩层实测图像，图 5-19b 为夹层实测图像。

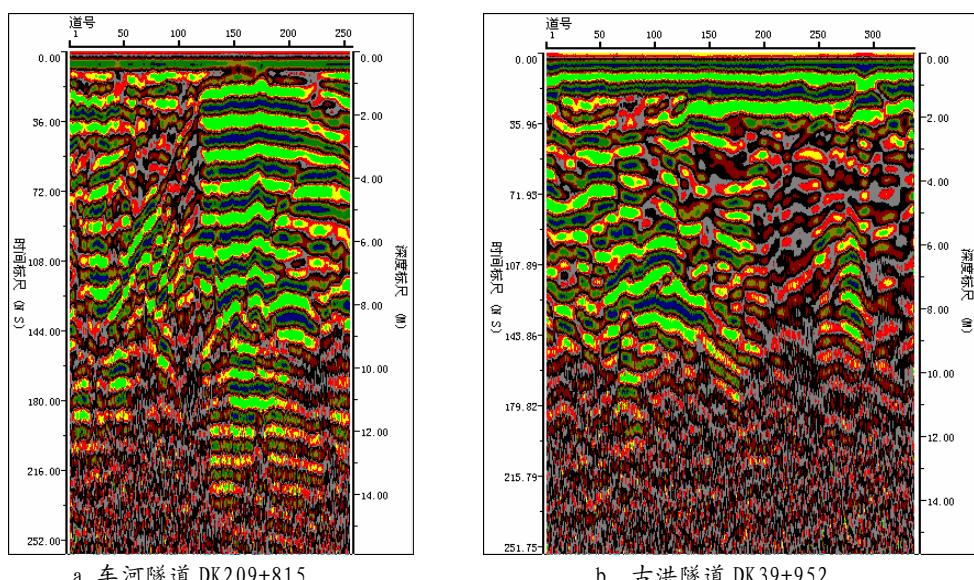


图 5-18 岩层破碎实测图像

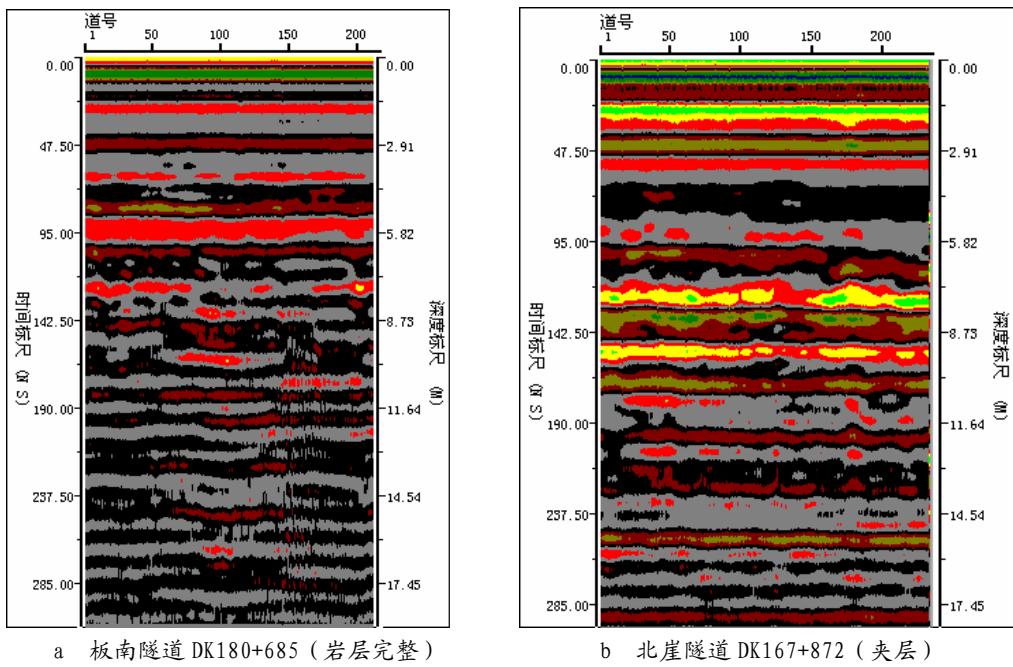


图 5-19 完整岩层和夹层实测图像

5.3.4 裂隙类地质体雷达图像特征

裂隙发育使岩层中出现许多断断续续的裂纹或缝隙，不规则的形状导致电磁波同相轴紊乱，因界面增多，信号衰减迅速，与正常岩层的反射电磁波特征差异十分明显；裂隙充水时反射信号强，后续波衰减快，如图5-20所示。

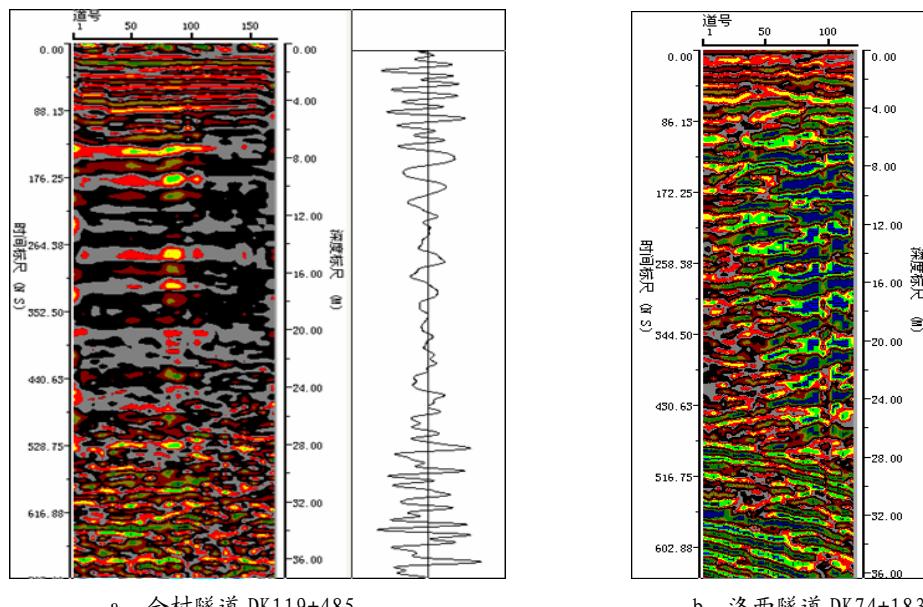


图 5-20 含水裂隙实测雷达图像

5.3.5 多个异常体雷达图像特征

某建筑工地属老城区, 雷达探测方法来寻找和定位地下管道, 探测图像如图5-21所示。图5-21a中在深度为5.0m和6.0m左右两处有两组双曲线, 且信号明显第二组比第一组弱, 开挖证实了该处有上下两个直径为400mm的水泥管。图5-21b中在深度为8.5m和8.0m左右、水平距离约2.0m两处有两组双曲线, 曲线形态和信号十分相似, 清楚地反映出两个地下管道的存在。因预制水泥管形状规则, 所以探测成果图像中双曲线十分清晰。由于雷达探测的水平分辨能力较高而垂向分辨能力较低, 使得在探测成果图像中沿测线方向的异常体更容易识别, 而垂直于测线方向的异常体却很难准确的分辨出来。对于隧道超前预报而言, 由于掌子面尺寸较小, 很多溶洞、陷落柱的直径都大于它, 因此, 沿测线方向很少发现有多个异常体的情况, 如果存在多个小规模的异常体(如沿隧道边墙布置测线)则一定能探测到并分辨出来。利用雷达探测技术能发现不均匀地质体的存在, 能较准确地确定其性质和位置, 但对其规模却不能准确定量。

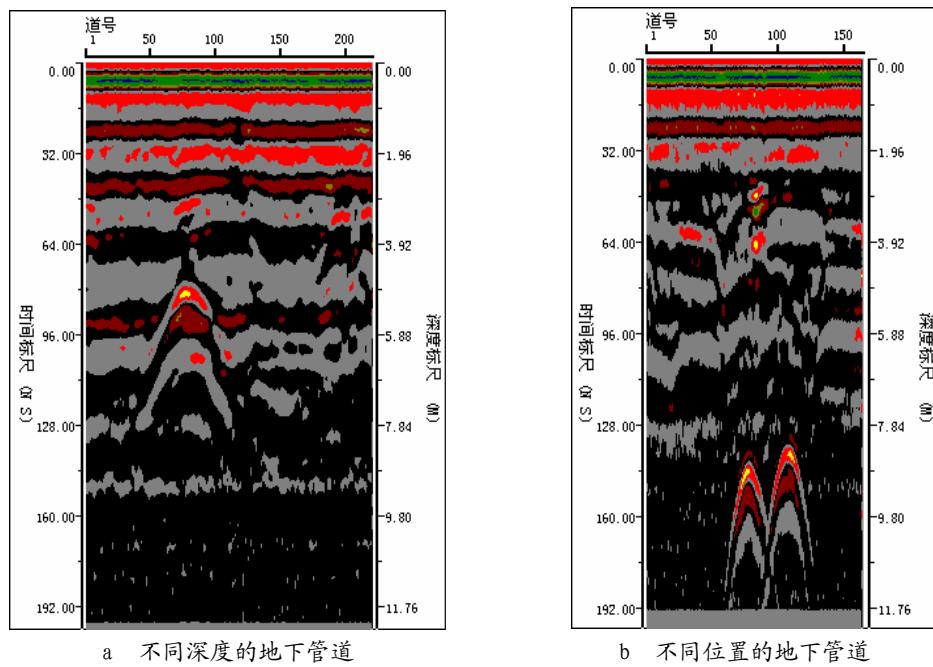


图 5-21 多个地下管道实测雷达图像

5.3.6 综合成果分析

雷达探测异常明显、精度高, 实施方便灵活, 控制密度可根据工程要求的精度来确定; 可对掌子面前方、拱顶、边墙多个方向实施探测; 对大断面隧道可在掌子面布置多条测线, 从而控制掌子面前方探测体积范围内地质构造和地

质异常体的形态。在进行地质解释时,根据单点波形及其衰减规律与同相轴特征来判别目标体性质、分析目标体形态,根据各剖面强相位反射波旅行时间计算界面位置、估算目标体规模。雷达探测中多次波及其他杂波干扰较严重,有效波的识别及其成果解译比较困难,存在多解性,需要结合地质条件综合分析目标体宏观展布和变化趋势,以提高解译结果的可靠性。

雷达资料地质解释的基础是识别目标体反射波,理论模拟和工程实践表明,来自于同一界面的雷达反射波信号具有同相性、相似性以及特定的波形特征。在无构造地区,同一波组的相位特征,即波峰、波谷的位置沿剖面基本上不变或者有缓慢的变化,同一个波组往往有一组平滑平行的同相轴与之对应;由于超前探测时选择的点距很小(一般为10~20cm),而地下地质情况在一般情况下变化不大,因此相邻记录道上同一反射波组形态的主要特征会十分相似;同一地层的电性特征比较接近,不同地层的电性差异一般相对较大,因此不同地层反射波组的波形、波幅、周期及其包络线形态等往往会有其不同的特征。此外,当雷达波穿过含水介质时,频率要显著降低,反射波组高频成分信号有较大的衰减。因而,利用雷达波的时频分析可以成为判断岩层是否含水的重要手段。隧道前方岩石破碎带中岩土含水率和矿化度发生变化时,其介电常数与周围地层具有很大差异,破碎面上反射波振幅能量明显比两侧基岩信号强,其反射波同相轴连线为破碎带的位置。地下水富集或夹泥部位(如灰岩和溶洞、溶蚀带)容易形成高频信号强吸收带,波幅很弱。基岩内溶蚀带呈现出较强振幅、较低频率和同相轴不太连续的波组特征,而较完整的基岩基本没有强反射波组存在,信号呈现高频、弱振幅形态。

对干扰反射波组的识别,应先从探测环境入手,寻找干扰源的分布及其特性,估计干扰反射波组在雷达剖面图像的位置,然后再根据反射波组的具体特征,和相邻剖面的对比,鉴别出干扰反射波组。识别干扰反射波组的三个标志:①散射到空气中的少量的雷达波遇到金属物(如台车、塔架、电缆、装载车等)时,其反射波也会被接收天线所接收。虽然能量只占总能量的一小部分,但由于在空气中传播的电磁波能量几乎不衰减,因此在雷达图像中往往出现相当强的干扰波组;②电磁波在空气中传播的速度比在任何其他地下介质中都快得多,因此干扰反射波组的波长也比地下介质界面反射波组大得多;③估算干扰源反射波组的双程走时和距离,看是否与干扰体到剖面的距离相等。

识别出干扰波后,除了直达波外的其他波组一般都是来自前方不同界面的反射波。正常地层界面反射波组可连续追踪,多呈直线或平缓曲线形状;相对于隧道掌子面而言,有限尺寸的目标体(如溶洞)界面的反射波组一般为孤立的双曲线形或弧形。

a 断层

黔桂铁路沿线主要地层有泥质灰岩夹炭质页岩、泥灰岩及页岩、炭质页岩，地层倾角变化大，断层多。在强溶性岩段，层间滑动明显，与层间滑动断层同生、伴生的节理、裂隙十分发育，透水性好，为地下水的流动提供了良好的通道。断层带岩体破碎、两侧岩层错位，在雷达图像中，破碎带电磁波同相轴零乱，含水时幅度衰减快；两侧同相轴错断。

b 岩溶

沿线属喀斯特地貌，多为强溶性岩和可溶性岩，溶洞、溶腔、溶槽等十分发育，形状各异，多呈串珠状、葫芦状，部分溶洞中充满了水和泥沙、碎石、块石等充填物。规模较大的溶洞常与强溶岩、可溶岩中的断层破碎带密切相关，小溶洞则主要与强溶岩、可溶岩中的节理、小裂隙密切相关，这些小溶洞组合形成小“溶洞群”，与大溶洞、暗河等伴生。岩溶淤泥带作为地下岩溶一种类型，有其特殊的成生地质环境和形成过程：强溶岩或可溶岩中的断层、节理在地下水的侵蚀作用下，破碎的岩石越溶越少，裂隙或破碎带越溶越宽，伴随两壁岩块或碎石的坍塌和水流携带大量地表土壤、残坡积泥沙填入溶沟，形成岩溶淤泥带。这种特殊的岩溶地质现象在该地区广泛分布，利用钻孔进行超前钻探时，首先喷出压力很大的、浑浊的泥水，并夹带大量泥沙和棱角明显的小碎石，然后才逐渐转为仍然具有较大压力的、较清的、黄色的浑水。

溶洞及岩溶淤泥带在雷达图像中呈现强相位反射、同相轴连续，“双曲线”特征较明显。同相轴的形状取决于溶洞的形状和规模（溶洞的几何尺寸相对于隧道断面尺寸的大小），电磁波的衰减规律（幅度衰减和频率变化）取决于充填物的性质。由于存在多次反射和溶洞边界不规则的干扰，影响解释结果的可靠性；特别是当浅部有溶洞时，更深处的异常将可能被掩盖，难以区分和识别。当掌子面或浅部含水丰富时，电磁波能量很快被吸收，幅度衰减严重，深部界面反射信号微弱，有效探测深度减小。

c 裂隙

裂隙和节理常与断层、溶洞伴生，其宽度、长度和形状各不相同，充填物有空气、水、泥或方解石等其它矿物，裂纹或缝隙的存在使电磁波同相轴紊乱；界面增多使信号能量衰减，衰减的快慢取决于裂隙的密度和充填物的性质。

d 组合异常

在探测雷达的有效探测范围内，溶洞和断层、溶洞和裂隙、断层和裂隙常常伴生，大小溶洞串通在一起组合成形状复杂的异常体，使得雷达探测的图像并不像模拟图像中的直线或双曲线，需要进行综合分析才能做出合理解释。

5.4 本章小结

用探地雷达进行隧道地质超前预报属于受限空间工程物探，受客观条件限制，目前国内雷达数据反演和解释都是半定量，即隐患深度定量，隐患属性定性，而隐患规模尺寸不能准确定量。对于隧道施工超前预报而言，异常体的位置和性质比其规模大小更重要，当前方存在灾害隐患时，准确定性的意义显得更加重大。

GPR 的工作频率高，对近距离目标具有较高的分辨能力，对洞穴、夹层和断裂带(特别是含水带、破碎带)具有较高的识别能力。工程实践表明，地质雷达探测的波形和图像规律与理论模拟研究结果基本一致；介质的电导率、磁导率、介电常数以及探测频率等 4 个因素密切相关，对探测深度、分辨率和精度具有重要的影响。电导率、介电常数差异越大，反射信号越明显；探测频率越高，分辨率和精度越高，探测深度越浅；探测频率越低，分辨率和精度越低，探测深度越大，实测时应根据目标体的性质和探测深度合理选择探测频率。

时域有限差分 (FDTD) 方法是探地雷达剖面正演合成的有效方法，可以实现稳态电磁场的计算，将实际探测图像与二层介质、圆柱体模型和复杂模型计算结果进行比较，说明该有限差分算法不仅适合单一地质模型，对于多个模型或组合模型同样适用。

通过对黔桂铁路新线多个隧道典型雷达图像的分析和研究，总结出各种不同岩层雷达图像的一般规律：①粘土层由于层间含水率差异、风化程度的差异等原因，反射波呈现出高幅、低频、宽幅，同相轴连续；②石灰岩中岩溶发育程度较弱或无岩溶时，反射波组为细密直线型；岩溶发育时，反射波同相轴将随溶洞形态的变化呈“双曲线”或“弧线”形；③一般溶洞的反射波为低幅、高频、细密波型，充填风化碎石或水时，局部雷达反射波可变强。④裂隙和节理使电磁波同相轴紊乱，能量衰减。

第六章 结论与展望

6.1 本文结论

隧道施工常遇到滑坍、松散地层、溶洞、断层、岩爆、流沙以及瓦斯溢出地层等特殊地段，由于工程掘进改变了地下岩体的自然平衡状态，突泥、突水、瓦斯突出、岩爆、冒顶与底鼓等隧道地质灾害时有发生。超前探测以介质物理性质差异为基础，是地球物理探测方法在隧道掌子面上的运用，通过观测地下物理场的分布及其变化规律来研究工作面前方是否存在可能诱发灾害的地质异常体，为减灾防灾提供依据。

目前隧道地质超前预报工作主要采用工程地质调查与推断法、反射地震法、TSP、地质雷达探测法和地震CT法等方法，多采用物探和钻探相结合、长距离和近距离相结合的方式，取得了较好的效果。本文基于TSP和GPR方法的基本原理，对层状介质、组合圆柱体模型的地震波与电磁波传播进行了理论模拟和实践应用研究，取得到了以下一些成果：

1、研究了隧道地质灾害体主要类型、成因、地质与构造特征及其物理力学性质，以获得不同探测方法的客观前提，指导灾害预报方法和有关技术参数的选择。指出“塌方、突泥、突水”等地质灾害不仅具有不同的形状、规模，而且与围岩之间具有明显的弹性、电性、介电性质和热学性质等的差异，为物探方法的应用提供了良好的地质—地球物理基础。

2、从均匀介质的应力与应变的关系和地震波的波动方程出发，介绍了隧道条件下地震反射法超前探测的基本原理；推导了多个界面时的反射波时距曲线方程，总结了时距曲线的特点；推导了地震纵波在界面上反射系数和透射系数，用 Richer 子波和正弦指数衰减子波模拟了多层倾斜介质模型的合成记录，从调谐厚度与基于主频和峰值频率计算的调谐厚度差出发，讨论了地震波对薄层的分辨能力；根据对反射系数和入射角关系的模拟分析，讨论了反射系数与入射角和界面“空间角”的关系。

3、设计了一种“赤道组合检波观测系统”，阐述了其基本原理和实践方法，为后续反演叠代提供了精确的初始速度参数；结合工程实例，利用matlab对TSP实测数据进行分析和处理，提出了资料解释的原则，对其主要影响因素和关键技术进行了详细的讨论。

4、以探地雷达法的基本原理为基础，利用时域有限差分方法，运用梅-方超吸收边界条件对二层介质、圆柱体介质及其组合进行多种模型的正演模拟；结合黔桂铁路新线隧道的探测成果，证明了这种模拟方法的合理性和正确性；在

此基础上,总结了各种不同岩层、岩溶雷达图像的一般规律,讨论了影响 GPR 探测效果的主要因素和技术要点。

6、TSP方法研究岩石的密度、泊松比、弹性模量等力学性质,属长距离地质预报,是超前地质预报中的主要方法,但对远距离解译的精度不够高;探地雷达法主要研究介质的电性和介电性质,其工作频率远远高于地震波,对近距离目标体具有较高的分辨能力,对洞穴、夹层和断裂带(特别是含水带、破碎带)具有较高的识别能力,但探测距离短、受隧道内机电设备影响较大。因此,针对不同工程地质条件的隧道,要结合地质构造特征合理选择探测方法,以提高隧道地质灾害超前探测和预报可靠性和准确性。

6.2 工作展望

由于隧道内空间有限、干扰因素多、观测方案受到限制,要达到准确预报的要求难度很大,还需要对探测技术和分析方法作进一步改进,以提高预报的可靠性和精度:

- 1、适用于隧道条件的正、反演三维数值模拟技术还不能完全满足实际应用的要求。因此,要继续加强对隧道(井巷)条件下各种地球物理场(尤其是弹性波场、电磁场、电场等)模拟计算与研究,建立更符合实际分布规律的数学物理模型,开发出适合不同地质、工程条件下超前探测的资料解释系统和软件,使隧道超前预报定性与定量相结合。
- 2、根据对物理场分布的模拟来选择最佳观测方法,加强工程实践,获得在隧道工作面小的不利条件下的最佳激发和接收方式,尽可能减少和消除各种干扰因素的影响,克服“多解性”问题,以确保在更大探测距离的前提下,获得足够的探测精度。
- 3、以地震波和电磁波作为信息载体能较准确地反映岩石的弹性、电性和介电性质等介质主要物理力学性质,利用地震波和电磁波的时间场又能获得岩石结构面空间位置,在隧道地质灾害超前探测和预报中有着广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王梦恕.21世纪是隧道及地下空间大发展的年代.岩土工程界, 2000,3(6),13~15
- [2] 王梦恕.中国是世界上隧道和地下工程最多、最复杂、今后发展最快的国家.铁道标准设计,2003,1:1~4
- [3] 伍法权.中国21世纪若干重大工程地质与环境问题.工程地质学报,2001, 9(2): 115~120
- [4] 钱七虎.现代城市地下空间开发利用技术及其发展趋势.铁道建筑技术,2000,(5):1~6
- [5] 傅冰骏.国际隧道及地下工程发展动向(2002 年世界隧道及地下工程博览会暨学术交流会”情况报导).探矿工程,2002,5:54~57
- [6] 石文慧.当代铁路隧道发展趋势及地质灾害防治.铁道工程学报, 1996,2:55~62
- [7] 张 梁,张业成,罗元华等.地质灾害灾情评估理论与实践.北京:地质出版社,1998,1~9
- [8] 邓雄业,李明高.靠椅山隧道大塌方的处理, 西部探矿工程, 2000, 65(4):91~93
- [9] 孙广忠等.军都山隧道快速施工超前地质预报指南. 北京: 中国铁道出版, 1990,1~5
- [10] 赵永贵,刘 浩,孙 宇等. 隧道地质超前预报进展.地球物理学进展,2003,18 (3) :460~464
- [11] 何继善,柳建新.隧道超前探测方法技术与应用研究.工程地球物理学报,2004,1:293~298
- [12] 刘志刚,赵勇.隧道隧洞施工地质技术.北京:中国铁道出版社,2001,1~21
- [13] 丁恩宝,凌荣华,马继平.隧道工程地质预报方法探讨.工程地质学报,1995,3 (1) :28~34
- [14] 刘志刚,赵勇,李忠.隧道施工地质工作方法.石家庄铁道学院学报,2000, 13(4):1~5
- [15] 陈成宗.隧道地质预测术.现代隧道技术,1995,6:74~79
- [16] 岳建华,刘树才.矿井直流电法勘探.江苏徐州:中国矿业大学出版社,2000, 1~13
- [17] 刘天放,李志聃.矿井地球物理勘探.北京:煤炭工业出版社,1993,1~5
- [18] 朱鲁,李笃远.井下物探多参数综合应用的研究.山东矿业学院学报,1997,16(3):239~242

- [19] 王齐仁.地下地质灾害地球物理探测研究进展.地球物理学进展,2004,19(3):497~503
- [20] 王良奎.多种超前地质预报方法在隧道施工中的应用.金属矿山,2001,1:45~47
- [21] 肖书安.瑞士Vereina隧道工程中的地质超前预报测量.广东公路交通, 1998, 54(增):115~120
- [22] 杨明举.瑞士及北欧公路隧道建设技术.公路,2002,(2):119-121
- [23] GerdSattel, et al. Predicting ahead of the Face. Tunnels & Tunneling, April 1996, 24~30
- [24] 叶英.隧道超前地质预报方法探讨. 2003年全国公路隧道学术会议论文集, 人民交通出版社,北京,2003
- [25] 陈建峰.隧道施工地质超前预报技术比较.地下空间, 2003(1):5~8,16
- [26] 郭朋超.隧道地质超前预报新技术概述.铁道建筑技术.2004,2:24~27
- [27] Hastgawa,M.Usui,M. Geological prediction method a head of tunnel faces.New Technolgy on tunneling,1991,27~28
- [28] Amberg Measuring Technique. Comparison of various tunnel geological forecast techniques. Amberg Measuring Technique,2003,1~19
- [29] 齐传生.TSP202 隧道地震波超前地质预报系统的应用.世界隧道,1999,1:36~40
- [30] 黄秀成,秦之富,朱如荣等.公路隧道地质雷达地质预报方法探讨.公路交通技术,2004,5:107~111
- [31] 王正成,谭巨刚,孔祥春等.地质雷达在隧道超前预报中的应用. 铁道建筑,2005,2:9~11
- [32] 高才坤,郭世明.采用地质雷达进行隧道掌子面前方地质情况预报. 水力发电.2000,3:11~13
- [33] 王连成. 隧道及工程地质中的快速地质雷达探测方法. 地下空间,1999,19 (5) :359~362
- [34] 钟宏伟,赵凌.我国隧道工程超前预报技术现状分析. 人民长江, 2004, (9) :16~18
- [35] 许和平.断层参数预测法超前预报铁路隧道断层技术研究:[硕士学位论文]. 成都:西南交通大学,2000
- [36] 代树林.复杂地层隧道施工地质超前预报及施工方法的确定:[硕士学位论文]. 长春:长春科技大学,1999
- [37] 杨秀权.隧道隧洞超前地质预报技术研究:[硕士学位论文].北京:北方交通大学,2002

- [38] 费守明.隧道施工工程地质条件超前预报系统研究:[硕士学位论文].长春:吉林大学,2002
- [39] 赵玉光,高波.论公路隧道信息化施工超前地质预报系统与地质灾害预报.中国地质灾害与防治学报,2001,12(3):44~47
- [40] 何发亮,李苍松.隧道施工期地质超前预报技术的发展.现代隧道技术,2001,38(3):12~15
- [41] 于宁,朱合华.公路隧道施工中的地质灾害及相应措施的分析.地下空间,2003,23(2):119~123
- [42] 于宁,朱合华,苏生瑞.公路隧道施工中的地质灾害及对策.施工技术,2003,32(9):12~14
- [43] 王齐仁.灾害地质体超前探测技术研究现状与思考.煤田地质与勘探,2005,33(5):65~69
- [44] 李学军.煤矿井下点电源梯度法超前探测试验研究.煤田地质与勘探,1992,20(4):59~63
- [45] 胡礼忠.瑞雷波探测新技术在矿井巷道掘进超前探测中的应用.矿井地质,1997,17(1):32~35
- [46] 高克德,王连成.探测隧道掘进前方充水和瓦斯构造.公路,1994 (9) :44~46
- [47] 王洪勇,张继奎,李志辉.长大隧道红外辐射测温超前预报含水体方法研究与应用实例分析.物探化探计算技术,2003,25 (1) :11~17
- [48] 李惠彩.红外测温法和定点源梯度法在巷道掘进超前探测中的应用.矿井地质,1997,17 (1): 88~89,97
- [49] 刘青雯.井下电法超前探测方法及其应用.煤田地质与勘探,2001,29(5): 60~62
- [50] 程久龙,王玉和,于师建等.巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用.煤田地质与勘探,2000,28 (4) :60~62
- [51] 王为民.矿井下探测含水、导水构造的物探方法.煤田地质与勘探,1996,24 (3) :54~56
- [52] 王璞,黄鹤全,高九华.红外测温技术在煤矿中的应用.煤炭科学技术,2000,28(8):23~25
- [53] 徐济川,黄少霞.大瑶山隧道的突泥涌水机制.铁道工程学报,1996, 2: 83~89
- [54] 蒋忠信,秦小林.南昆铁路隧道溶洞的预测与检验.铁道工程学报,1997,(1):94~103.
- [55] 蒋忠信,秦小林.云贵高原区南昆铁路沿线溶洞发育规律.山地研究,1997,15(4):145~150
- [56] 吴云生,李法昶.秦岭隧道施工对设计地质成果的验证分析.铁道工程学报,

- 1998, 59(3): 69~80
- [57] 毛建安.秦岭特长隧道施工地质超前预报技术的应用.世界隧道,1998,4:36~39
- [58] 曾昭礦, 隧道地震反射法超前预报.地球物理学报,1994(2):218~230
- [59] 王齐仁,杨天春. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法.地球物理学进展,2006,21(2):643~649
- [60] 薛 建,曾昭发,王者江等.隧道掘进中掌子面前方岩石结构的超前预报. 长春科技大学学报,2000,30(1):87~89,97
- [61] 刘盛东,吴 军,张平松. 地下工程震波技术与应用. 中国煤田地质, 2001,13(3):59~61
- [62] 何振起,李 海,梁彦忠.利用地震反射法进行隧道施工地质超前预报 .铁道工程学报,2000,68 (4) :81~85
- [63] 周治国. 隧道工程超前地质预报技术研究:[博士学位论文].上海: 同济大学,2004
- [64] 张景科.隧道施工综合地质超前预报的应用研究:[硕士学位论文]. 兰州:兰州大学,2005
- [65] 薛国强, 宋建平, 武军杰等.瞬变电磁法探测公路隧道工程中的不良地质构造.长安大学学报,2003,25(4):73~75,79
- [66] 王鹰, 陈强, 魏有仪等.红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用.岩石力学与工程学, 2003(5):855~857
- [67] A.Juhlin. Imaging of fracture zones in the Finnsjon area, central Sweden, using the seismic reflection method.Geophysics, 1995(1),,66~75
- [68] Husegawa.M. uaui.M,Ucno,H.and Minctani.A. A case study of geological prediction ahead of the tunnel face in fracture zone. Annu conf.Jpn.Soc.Eng.Geo1, 1990:149~152
- [69] 王洪勇,张继奎,李志辉.长大隧道红外辐射测温超前预报含水体方法研究与应用实例分析.物探化探计算技术,2003,25(1):11~17
- [70] 王洪勇.综合超前地质预报在圆梁山隧道中的应用.现代隧道技术2004, 1(3),55~61
- [71] 刘志刚.概论岩溶或地质复杂隧道隧洞地质灾害超前预报技术.铁道建筑技术,2003,2:1~5
- [72] 李 勇,孙喜峰,李 廷. 隧道施工地质超前预报方法. 地质与资源,2004,13(2):119~122
- [73] 李金铭,罗延钟.电法勘探新进展.北京:地质出版社,1996
- [74] 底青云, 王妙月. 稳定电流场有限元模拟研究. 地球物理学报,1998,41 (2):

- 252~260
- [75] 陶加祥,戴光明,王华军等.圆柱体点源场有限单元模拟.物探化探计算技术,2000,22 (1) :26~29
- [76] 陈炳祥.长大隧道施工地质超前预测预报技术应用研究.铁道工程学报,2004,82(2):57~62
- [77] 刘志刚,赵勇, 赵玉成. 隧道施工地质工作及其任务. 石家庄铁道学院学报,2000,13(3):28~32
- [78] 郑道坊.复杂地质条件下的公路隧道建设.世界隧道,1999(5):5~8
- [79] 刘志刚,刘秀峰.断层参数预测法预报隧道断层.岩石力学与工程学报, 2003, 22(9):1547~1550
- [80] 杜炜平.隧道开挖地质灾害规律与防治对策研究:[博士学位论文].长沙:中南大学论文,2001
- [81] 王 华,杨军生,王春雷. 地质雷达在隧道岩溶超前预报中的试验研究.路基工程,2007,130(1):101~103
- [82] 李卫华.超前地质预报技术在武隆隧道岩溶地质施工中的应用.铁道建筑技术,2002(增刊):29~31
- [83] 刘秀峰,刘志刚.岩溶地质超前预报方法研究.石家庄铁道学院学报,2003,16(2):71~73
- [84] 蒋忠信,王 衡.南昆铁路岩溶洞穴预报技术.水文地质工程地质,2002,2: 67~73
- [85] 薛继连.长梁山隧道软弱围岩施工方法.岩石力学与工程学报,2000, 19(增): 1085~1094
- [86] 朱述鹏.歌乐山隧道岩溶地质灾害超前预报与治理研究:[硕士学位论文].石家庄:石家庄铁道学院.2003
- [87] 陆基孟.地震勘探原理(上册).东营:石油大学出版社,1993,189~194
- [88] 中华人民共和国水利部《工程岩体分级标准》(GB50218-94).中国计划出版社, 北京, 1995
- [89] 考夫曼A A,凯勒G V. 频率域和时间域电磁测深.王建谋译.北京:地质出版社,1990
- [90] James, S.Mellet. Ground penetrating radar applications in engineering, environment at management, and geology, Journal of Applied Geophysics. 1995(33):157~16
- [91] Alvin, Kbenson. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. Journal of Applied Geophysics, 1995(33):177~19

- [92] 王湘云,郭华东.干燥岩石的相对介电常数研究团.科学通报,1999(13):1384~1491
- [93] 孙坚.宜万铁路岩溶隧道施工中的灾害影响与 GPR 超前预报技术研究:[硕士学位论文].北京:北方交通大学,2005
- [94] 斯克尔尼克 MI.雷达手册.北京:国防工业出版社,1978
- [95] Peter C,UlrikSEN F. Application of impulse radar to civil engineering. USA: Geophysical Survey System,Inc,1987
- [96] 孙洪星,李凤明.探地雷达高频电磁波传播衰减机理与应用实例.岩石力学与工程学报,2002(3):113~117
- [97] 陆基孟.地震勘探原理(下册).东营:石油大学出版社,1993,123~193
- [98] 陈仲侯,傅唯一.浅层地震勘探.成都:成都地质学院出版,1986,1~50
- [99] W.伊文等著,刘光鼎译.层状介质中的弹性波.北京:科学出版社,1966
- [100] A. Ben-Menahem and S. J. Singh. Multipolar elastic fields in a layered half-space. Bull. Seism. Soc. Am.,1968,58(5):1519~1572
- [101] 周绪文.反射波地震勘探方法.北京:石油工业出版社,1981
- [102] 刘志刚.隧道地震勘探(TSP)在工程中的应用.铁道建筑技术,2001,5:1~4
- [103] Amberg. TSPwin version 1.1 Processing&Evaluation Software Manual . Version 1.1
- [104] Amberg Measuring Technique Ltd. Operation Manual 19.61. June 2001
- [105] Amberg Measuring Technique Ltd. Software Manual 19.62. June 2001
- [106] 李忠, 刘秀峰, 黄成麟.提高TSP202超前预报系统探测距离的技术措施的研究.岩石力学与工程学报.2003(3):472~475
- [107] 李忠.TSP202探测系统在新课纳隧道地质超前预报中的应用研究, 地质与勘探, 2002(1):86~89
- [108] L.Rybach, M.Pfister. Temperature Predictions and Predictive Temperatures in Deep Tunnels. Rock Mechanics and Rock Engineering 1994, 27(2) :88~88
- [109] 李忠, 汪琦.新保纳隧道地质超前预报中 TSP202 探测系统搜索角研究.铁道工程学报,2001,1:89~91
- [110] 周运祥.TSP203 超前预报系统在乌鞘岭特长隧道不良地质中的应用. 铁路建筑技术,2004,1:45~47
- [111] 温树林, 吴世林.TSP203 在云南元磨高速公路隧道超前地质预报中的应用. 地球物理学进展,2003,18 (3) :465~471
- [112] 匡文龙,古德生,周科平等.林家溪隧道岩体结构的 TSP203 超前预报. 中外公路,2004,24(6):74~77

- [113] 丁国华,黄 截.TSP203 探测系统在隧道施工地质超前预报中的应用. 中外公路,2005,25:107~110
- [114] 刘盛东,吴 军,张平松.地下工程震波技术与应用.中国煤田地质,2001,13 (3) :59~61
- [115] 朱宝龙,陈 强,魏有仪等.TSP 超前地质预报在圆梁山隧道施工中的应用.水文地质与工程地质,2003(1):81~83
- [116] 刘秀峰,李 忠. TSP 探测数据采集和处理中应注意的几个问题. 石家庄铁道学院学报, 2002, 15 (2): 55~59
- [117] Dickmann, T.; Sander, B.K.Drivage-concurrent tunnel seismic prediction (TSP): results from Vereina north tunnel mega-project and Piora pilot gallery Geomechanics Abstracts Volume: 1997, Issue: 2, February, 1997, pp. 82
- [118] 朱宝龙,陈强.TSP超前地质预报在圆梁山隧道施工中的应用.水文地质工程地质.2003(1):81~83,90
- [119] Richard Otto, Edward Button, Helfried Bretterein and Peter Schwab. The Application of TRT-Ture Reflection Tomography-at the Unterwald Tunnel. Geopgysics, 2002,2:51~56
- [120] 杨天春,王齐仁,刘新华.地震仪与地质雷达的数据存储格式及其读取. 岩土工程技术,2006,20(5):221~224
- [121] 杨天春,吴燕清,王齐仁.TSP 的应用及其与 SEG22 数据文件格式间的转换. 物探与化探,2007,31(1):63~67
- [122] Pullan S E. Recommended standard for seismic (/ radar) data files in the personal computer environment.Geophysics,1990,55(9):1260
- [123] GaZdag J.Migration of venicalseismic profiles(VSP) using the phase shift plus interpolation(PSP) wave field continuation algorithm. Ann Mtg,Europ Assn Explor Geophys[C].Oslo:Society of Exploration geophysicists Publ Co,1984
- [124] 吴江滨.超前地质预报在隧道工程中的应用.工程地质学报, 2003,11(2):162~168
- [125] 张会星,宁书年.弹性波动方程叠前逆时偏移. 中国矿业大学学报,2002, 31(5): 371~375
- [126] 刘志刚,刘秀峰.TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1399~1402
- [127] 郑文宁.地质雷达在隧道施工短期超前地质预报中的应用.公路,2005, 4: 191~193
- [128] 隋景峰, 张宇.隧道工作面前方不良地质超前预报中的地质雷达法.铁道工

- 程学报.1998,6(增): 212~218
- [129] Kevin Black and Peter Kopac. The Application of Ground Penetrating Radar in Highway Engineering. Public Roads,1992(3):96~103
- [130] Derald G Smith&Harry M. Jol. Ground Penetrating Radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in quaternary sediments. J. of Applied Geophysics, 1995(33),93~100
- [131] 于景兰,王春和.探地雷达探测地下目标时的波速估计.地球物理学进展,2003(3):477~480
- [132] 岳建华,何兵寿.超吸收边界条件在地质雷达剖面正演中的应用.中国矿业大学学报,1999,28(5):453~456
- [133] How-WeiChen, Tai-Min Huang. Finite-diference time-domain simulation of GPR data.Journal of Applied Geophysics, 1998,40:139~163
- [134] Cao S H, Stewart Greenhalgh, Finite-Different sol1ution of the eikonal equation using an efficient,first-arrival, wavefront tracking scheme. Geophysics, 1994,59:623~643
- [135] 赵永辉, 吴健生, 万明浩.不同地下介质条件下探地雷达的探测深度问题分析.电波科学学报,2003(2):220~224
- [136] 李永明,俞集辉,黄 键.时域有限差分法中的吸收边界条件与角点处理.重庆大学学报(自然科学版),2001,24(3):68~71
- [137] 云美厚,丁 伟.地震子波频率浅析.石油物探,2005,44(6):578~581
- [138] 钱绍瑚,李向义,李套山等.高分辨率地震勘探中接收系统得滤波效应.石油物探,1997,36(3):39~45
- [139] 单娜琳, 程志平,刘云祯.工程地震勘探.北京:业敬业出版社,2006,23~36
- [140] 刘 财,陈业全,刘 洋等.勘探地震资料处理新方法及新技术.北京:科学出版社,2006,1~54

致 谢

本论文从选题、方法研究到论文撰写整个过程中，自始至终都得到了我的导师——何继善院士的悉心指导和关怀，凝聚着导师无数的心血，在此谨向何院士表示崇高的敬意和衷心的感谢。

在跟随何院士学习的几年里，我不仅在业务上得到了很大的提高，更重要的是在怎样做人和如何做学问等方面学到了许多知识。何院士高尚的人格魅力、敏锐的洞察力、开阔的视野、活跃的思维、严谨求实的治学态度和高深的道德风范，使我如沐春风，终生难忘。导师为我提供了良好的研究条件和参加工程实践的机会，使我能接触和使用最先进的仪器设备，培养了我自由的科学思想和独立科研的能力。论文的研究过程中不断得到导师亲切的指导和鼓励，从他学识渊博的言谈中总能得到许多新思想、新见解，给了我很多启迪，受益匪浅，这些教诲将成为我今后人生道路上的宝贵财富。在此，谨向何院士表达我最诚挚的谢意！

在中南大学学习的几年时间里，得到了地球物理勘察新技术研究所的温佩琳教授、鲍光淑教授、白宣诚教授、汤井田教授、朱自强教授、柳建新教授、朱德兵教授、吕绍林教授、戴前伟副教授、瓮晶波老师和地质研究所戴塔根教授、张可能教授、彭振彬教授、彭省林教授等的诸多帮助，在此向他们表示深深的谢意。

在整个研究过程中，杨天春博士给予我许多的宝贵建议和帮助，经常交流学习和研究心得，使我获益颇深，在此深表感谢。在校学习期间，鲁光银、冯德山、刘锡军、杨荣丰、夏代林、胡新发、戴亦军、姚成华、付国红、肖志强等同学给予了很多无私的帮助和启发，在此一并致谢。

最后，我要向多年来一直支持我的妻子周平湘女士及女儿表示感谢，谢谢她们的理解、支持和鼓励。

在中南大学攻读博士学位的几年时间，是我人生的重要历练。我将以此为起点，努力工作，以新的成绩回馈社会，回报我的导师和给予我帮助的人们。

攻读博士学位期间主要研究成果

发表论文:

1. 地下水开采引起的地表变形调查方法^{*}.自然灾害学报,2007,16(13):154-159
(第一作者)
2. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法^{*}. 地球物理学进展,2006,21(6):
643-649(第一作者)
3. 灾害地质体超前探测技术研究现状与思考^{*}.煤田地质与勘探, 2005, 33 (5) :
64-69(第一作者)
4. 声波透射法评价基桩事故处理质量.建筑科学,2005,21(6):84-88,94(第一作者)
5. 地下地质灾害地球物理探测研究进展^{*}.地球物理学进展,2004,19(3):
497-503(第一作者)
6. 现浇混凝土薄壁管桩质量检测与评价.工程勘察,2004,6:64-67(第一作者)
7. Comprehensive Detection and Analysis of Defects in Foundation Pile of Bridge.
Journal of China University of Mining and Technology,
2003,13(2):179-182(第一作者)
8. 大直径桩严重缺陷的处理与复检.中国地球物理 2003.中国地球物理学会年刊,
南京:南京师范大学出版社,2003.10:218-219 (第一作者)
9. 水下灌注桩缺陷特征与成因分析.工程勘察,2003,(6):60-63(第一作者)
10. 地震仪与地质雷达的数据存储格式及其读取^{*}.岩土工程技术, 2006, 20 (5) :
221-224(第二作者)
- 11.智能混凝土的压敏性能试验研究.建筑科学,2002,18(3)48-49(第二作者)
12. TSP 的应用及其与 SEG-2 数据文件格式间的转换^{*}. 物探与化探,2007, 37(1):
63-67(第三作者)
- 13.探地雷达检测道路厚度结构的应用现状及进展^{*}.物探与化探,2003,27(1):
79-82(第三作者)

标注“*”号的为与学位论文相关的论文。

主持和参加科研情况:

1. 基于天然电磁场动态信息的地下水探测方法研究 (湖南省自然科学基金项目 06JJ2077) 2006-2008 (主持)
2. 锡矿山宝大兴采空区地质雷达探测* (横向课题) 2006.4-2006.10 (主持)
3. 黔桂铁路扩能改造工程隧道超前地质预报* 2005-2006 (参加)
4. 沪蓉西国道主干线朱家岩隧道超前地质预报* 2005 (参加)
5. 邵怀高速公路隧道超前地质预报* 2004-2005 (参加)
6. 岩溶地区高速公路路基病害综合物理探测技术研究 2003 (参加)
7. 甘肃省金川二矿区深部资源地球物理勘探研究 2003 (参加)

标注“*”号的为与学位论文相关的课题。

获奖情况:

荣获 2001——2002 学年“优秀博士研究生”荣誉称号.中南大学.2002 年 11 月