



西南科技大学

Southwest university of science and technology

本科毕业设计(论文)

尾矿库浸润线的地质雷达探测技术

学院名称 环境与资源学院

专业名称 安全工程

学生姓名 Tal Nino

学 号 20081000

指导教师 Professor Wang

二〇一二年十二月

尾矿库浸润线的地质雷达探测技术

摘要:尾矿库是矿山企业最大的危险源之一，加强尾矿库的安全检测是保障矿山企业正常生产的重要手段和方法。浸润线的高低反映了尾矿库的安全状态，是尾矿库安全监测的重要内容。传统的浸润线检测手段主要包括测压管、传感器等。这些方法效率低、耗费高，严重限制了尾矿库安全监测水平的提高。地质雷达作为一种无损检测手段，具有高效、低耗费、检测灵活的特点，在尾矿库浸润线检测方面有广阔的应用前景。本文首先结合水利大坝和地下水埋深检测经验，分析得出尾矿库探测介质主要成分为尾矿砂，可以当做砂土处理；然后，本文分析得出尾矿库探测的主要影响因子为含水量，借助包气带水分布模型和Toop公式研究了尾矿浸润线过渡区对探测精度的影响，认为当过渡区厚度小于波长时探测是可行的；其次，本文根据尾矿库的介电模型，利用GPRSIM和MATGPR对浸润线探测做了正反演分析，得出浸润线的图像特征为同相轴组成的连续反射带；最后，本文对尾矿库进行了实地探测，分析其图像发现多层状连续减弱的反射带，通过其振幅衰减可以识别出浸润线位置，研究认为地质雷达探测浸润结果是可靠的。

关键词: 浸润线;探测;地质雷达;正演

Ground Penetration Radar (GPR) used for tailings seepage line detection

Abstract: Tailings is the biggest hazards for mining enterprises, strengthen the safety monitoring is to ensure the tailings mining enterprise normal production of premise. Infiltrating line reflects the tailings safe state, is one important part of the safety monitoring for tailings. The traditional infiltration detection methods are mainly including piezometer tube, sensors, etc. These methods the efficiency is low, the cost is high, severely restricting tailings to raise the level of safety monitoring. GPR as a nondestructive testing method, with high efficiency and low cost, testing flexible characteristics, in the inspection of the tailings infiltration line have broad application prospects. This article tries to water conservancy dam and ground-water depth detection experience, use of geological radar detection tailings infiltrating line. First of all, article with water bag with gas distribution model and the Toop formula analyzes tailings detection conditions, fitting the dielectric model curve, analyzes the feasibility of detecting; Second, according to the tailings dielectric model, we use GPRSIM and MAT-GPR for forward modeling analysis, studied the features of infiltration line images; Finally, this paper analyzes the tailings infiltrating line detection results In engineering application, proving that the GPR is effective way for Infiltrating line detection

Keywords: seepage line, detection, Ground Penetrating Radar, forward modeling

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及研究目的和意义	1
1.1.1 课题背景	1
1.1.2 研究目的和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 尾矿库浸润线监测方法研究现状	2
1.2.2 地质雷达探测浸润线的研究现状	3
1.3 研究内容及工作流程	4
1.3.1 主要研究内容	4
1.3.2 工作流程	5
第 2 章 地质雷达探测原理	6
2.1 地质雷达理论基础	6
2.1.1 麦克斯韦方程与波动方程	6
2.1.2 地质雷达电磁波的传播特性	8
2.1.3 地质雷达工作方法	10
2.2 地质雷达性能参数	11
2.2.1 分辨率	11
2.2.2 探测深度	12
2.2.3 时窗和中心频率	12
第 3 章 尾矿库浸润线地质雷达正反演分析	14
3.1 雷达探测浸润线的可行性分析	14
3.1.1 尾矿库特点	14
3.1.2 地质雷达检测浸润线需要解决的问题	18
3.2 雷达正演分析	20
3.2.1 毛细管过渡区介电分布	20
3.2.2 分段线性模型	22

3.2.3 浸润线地质雷达探测正演	22
3.3 雷达反演分析	28
3.4 小结	29
第 4 章 尾矿库浸润线地质雷达探测实例	31
4.1 工程概况	31
4.2 地质雷达探测尾矿库浸润线	31
4.2.1 雷达选型与测线布置	31
4.2.2 雷达图像反演分析	32
4.2.3 小结	36
结 论	38
5.3 研究结论	38
5.4 不足及展望	38
致 谢	40

第1章 绪论

1.1 课题背景及研究目的和意义

1.1.1 课题背景

尾矿库是金属非金属矿山的重要组成部分，也是矿山企业最大的危险源。美国克拉克大学公害评定小组的研究表明，尾矿库事故的危害，在世界主要93种事故、公害隐患中，名列18位，仅次于核爆炸、神经毒气、核辐射等灾害^[1]。我国的尾矿库数量庞大，根据2009年底安监总局统计数据，中国已建成1.25万余座尾矿库。其中危库、险库和病库为2000多座，普遍存在浸润线过高、调洪库容不够、坝体裂缝现象严重、坝体安全观测设施不健全等重大安全隐患。大量尾矿库事故统计研究表明，渗流问题是引发尾矿库溃坝及其他灾害的重要原因^[2]。稳定渗流的自由水面线称为浸润线，尾矿坝内浸润线位置过高，会使坝面或下游发生沼泽化，易产生流土、管涌等破坏，最终导致溃坝。所以浸润线的高低是表征尾矿库安全状态的一个重要指标。

在尾矿库严峻的安全形势下，尾矿库浸润线的监测具有重要意义。浸润线监测是尾矿库安全监测的重要内容。《尾矿库安全技术规程》规定，尾矿坝的水位监测包括洪水位监测和地下水浸润线监测，水位监测每季度不少于1次。浸润线监测结果对隐患排查，尾矿库运行情况监测，安全评价等具有重要的参考价值。但是，目前尾矿库浸润线监测却面临着诸多问题，如监测装置或设备落后、监测人员专业技能水平低，监测不到位等问题。在对我国尾矿库事故统计分析中发现^[3]，安全投入不足是引发尾矿库事故的最主要原因。尾矿库安全监测的高额费用往往制约了尾矿库安全水平的提高，尾矿库浸润线监测的现状是，国家不断提高的安全标准要求和矿山企业安全投入不足的矛盾。传统的浸润线监测主要依靠钻孔取样，埋设测压管等方法，人工监测效率低，传感器自动监测耗费高，给矿山带来很大经济压力。此种形势下，矿山企业亟需一种快速、准确、廉价的尾矿库浸润线监测手段。

1.1.2 研究目的和意义

地质雷达利用发射天线向地下发射电磁波，电磁波在经过电性界面会发射反射

和折射，这些波被地质雷达接受天线接受，通过分析波形波速特征对地下目标进行探测。研究表明，浸润线上、下层土壤由于水饱和程度不同而存在电性分界面，这为应用地质雷达技术检测提供了条件。尾矿库坝体内部浸润线以下部分的含水量高，对地质雷达的电磁波信号具有极强的吸收作用，也就是说地质雷达信号在浸润线边界处会有明显的波形异常特征，这使得地质雷达探测尾矿库浸润线成为可能。通过对尾矿库浸润线地质雷达探测方法的研究，获取浸润线的反射特征，通过合理的技术手段可以获得准确的浸润线位置，实现探测浸润线的目的。地质雷达具有较高的工作效率和精度，并且不受地形限制，可较方便地对尾矿库进行全面的检测，是一种应用价值较高的浸润线检测手段。

地质雷达无损、高效、检测费用低廉，在尾矿库浸润线检测方面具有广阔的应用潜力，研究利用地质雷达检测尾矿库浸润线具有重大的现实意义。首先，作为一种快速无损检测技术，地质雷达检测浸润线提高了尾矿库浸润线的检测效率，减少了尾矿库安全检测费用，节约尾矿库建设成本；其次，通过无损检测与其他检测相结合，使尾矿库浸润线检测结果更加可靠，丰富了尾矿库检测手段；最后，通过对尾矿库浸润线检测的研究，为更多的地球物探方法用于尾矿库安全检测提供理论依据和实践经验，提升了尾矿库安全检测水平。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 尾矿库浸润线监测方法研究现状

目前，常用的尾矿库浸润线检测方法主要是埋设测压管，用人工测量或传感器监测。这些传统的方法虽然能满足基本的需求，但还存在很多不可弥补的缺点，如测压管人工测量费时费力，自动监测耗费大、效益低，监测断面有限等。此外，如果出现测压管堵塞或者损坏导致测压管失效，还会给尾矿坝埋下安全隐患。因此，许多无损快速检测方法被尝试应用于尾矿库浸润线的检测。其中，地球物理方法备受关注，主要有浅层地震法、直流电阻法、地质雷达法等^[2]。地震法利用锤击或者其他人工方式产生地震波，在尾矿砂的饱和与非饱界面形成的密度差产生反射，从而实现对浸润线的探测，试验研究表明地震法抗干扰能力和分辨率都不是太理想，不能很好满足尾矿库浸润线检测需求^[2]；直流电阻法利用尾矿砂含水量与电阻率的关系，通过测量砂土介电差异来探测尾矿砂的含水量差异，从而实现对尾矿库浸润线的检测。经过研究表明，高密度电法可以检测出尾矿库浸润线分布和坝体异

常^{[2][3]}。但是, 电法检测时受体积效应影响, 检测深度愈大, 灵敏度越低, 而且检测中还容易受环境因素干扰, 准确检测浸润线有一定的难度^{[2][3]}; 相比之下, 地质雷达对浸润线的探测具有先天的优势, 地质雷达无损、快速、准确等检测特点, 使其成为探索尾矿库浸润线检测新方法研究的新宠。

1.2.2 地质雷达探测浸润线的研究现状

地质雷达具有探测快捷、高效、无损、适应性强等特点。该技术一面世便受到工程物探界的普遍重视, 其被广泛应用于公路工程、管线探测、岩溶地下洞穴探测、水文地质调查、考古、矿产资源调查、地下水污染调查等。地质雷达作为一种无损探测设备在水利坝体检测中也已经得到较多研究和应用, 但目前尾矿库浸润线方面利用地质雷达检测的研究还比较少, 与其相关的研究主要集中在水利大坝浸润线和地下水埋深探测方面。从地质雷达探测技术的研究方法来看, 利用各种数字滤波和偏移技术处理图像提高图像识别性能, 借助正反演建立地层地质雷达探测模型, 是地质雷达探测浸润线研究的主要趋势。

国内的研究主要有: 1998年, 中国科学研究院广州地球化学所徐兴新等人利用国产TL-1A型主机和广州地球化学研究所研制的100MHz偶极子半波天线, 探测了广东省高州水库浸润线, 并绘制了浸润面等值线图, 探测深度达40米, 证明了地质雷达检测浸润线是可能的^{[2][3]}; 2001年, 安徽省水利科学研究院周松等人利用SIR-10A地质雷达, 借助100MHz天线, 在120ns时窗下检测了运河扩大工程中截渗墙的浸润线, 与测压管对比误差小于0.3m, 探测结果切合实际^{[2][3]}; 2005年浙江省水利河口研究院葛成双等人, 使用美国SIR-20型地质雷达及100MHz天线, 结合地质雷达和高密度电阻率法探测了某大坝的3处渗漏点, 探测深度约10m, 探测结果与坝顶沉陷、背水坡出水点位置等现象具有较好的相应性^{[2][3]}; 2007年, 广东省华南工程物探技术开发总公司邢庆祝、赵志宏在水库堤坝工程中利用美国SIR-10H型地质雷达, 分别采用了40MHz非屏蔽天线和100MHz屏蔽天线, 探测了渗漏通道和浸润线, 绘制了断面浸润线图, 进一步验证了地质雷达的可靠性^{[2][3]}; 2008年, 吉林大学薛建、易兵等人利用自然电位和地质雷达方法对吉林某电厂灰坝浸润线进行了探测, 探测深度达60m, 证明了地质雷达检测浸润线的有效性^{[2][3]}; 雷少刚等人也在2008年, 利用瑞典的RAMAC地质雷达, 选用25 MHz和50 MHz频率天线探测了10 m和41 m深的潜水面, 并对天线频率、地下水埋深、毛细水带等对探测精度的影响进行了分析^{[2][3]}。

国外地质雷达的水利应用主要集中在地下水位、土壤饱和度、尾矿库污染物渗

流检测等，主要有：1996年，Zaki Har利用地质雷达探测了沙特东部沙丘的地层特征和地下水位，在100MHz和500MHz的天线频率下探测深度分别达到了35m和9m^[2]；1997年，William P. Cleme利用地质雷达结合其他物探方法对地下水表面进行了检测，取得一定成果；2001年，Yuichi Nakashim等人在利用100MHz天线在蒙古国乌兰巴托市探测了地下水位，探测深度达10m，并利用f-k滤波的方法增加了雷达图像的分辨性能[15]；Menezes,DeTravassosa等人于2004年，利用Pulse-EkkoIV型地质雷达，选用100MHz天线，探测了巴西佩特罗波利斯地区的地下水位埋深，并利用了共中心点法对雷达波进行了估算^[2]；2006年，法国巴黎大学Albane Saintenoy等人实验了利用地质雷达进行沙地中水渗流监测^[2]；2011年，美国西弗吉尼亚大学Sandeep Pyakurel利用地质雷达检测了砂土中的水位线，取得满意效果^[2]。

如上所述，地质雷在水坝浸润线检测中已经有丰富的研究成果，将地质雷达检测水坝的方法和成果用于尾矿库浸润线检测也有不少成功的尝试。但是，尾矿库浸润线地质雷达检测技术的研究还存在很多不足，如中国科学研究院广州地球化学研究所徐兴新周松、吉林大学薛建、易兵等人对水坝浸润线的探测研究中，利用钻孔埋设金属物和土壤采样器标定浸润线，并没有从地质雷达浸润线波形特征上进行分析判断浸润线位置，没有对地质雷达的浸润线图像解释方法进行研究；浙江省水利河口研究院葛成双等人、美国西弗吉尼亚大学Sandeep Pyakurel等对渗流及浸润线的研究主要检测的近地面情况，探测深度较小，无法完全满足尾矿库浸润线检测深度的要求；此外，目前地质雷达检测浸润线的成熟研究都在水利大坝中，其对尾矿库浸润线检测的实用性和有效性也有待进一步研究证实。本课题主要从地质雷达探测的基本原理出发，利用正反演结合工程试验的方法，对浸润线地质雷达检测中待解决的一些核心问题进行研究，为尾矿库浸润线地质雷达检测技术的应用推广或进一步研究作理论基础。

1.3 研究内容及工作流程

1.3.1 主要研究内容

本文通过正反演模拟结合工程实测的方式，讨论了地质雷达检测尾矿库浸润线的可行性，分析了尾矿库浸润线检测的难点问题，研究了浸润线的地质雷达图像与浸润线空间位置的关系，确立了浸润线地质雷达探测与图像解释模型。文章的主要章节安排如下：

第一章：介绍了本课题的背景和研究目的意义，以及尾矿库浸润线检测的国内外现状和基于地质雷达的尾矿库浸润线检测研究现状；

第二章：介绍了地质雷达探测的基本理论和探测方法，分析了地质雷达探测性能；

第三章：对尾矿库浸润线地质雷达检测作了可行性分析，讨论了检测中的难点问题，利用正演和反演分析，初步建立了尾矿库浸润线地质雷达图像解释模型；

第四章：利用地质雷达实测了尾矿库浸润线，对地质雷达检测的理论分析结果与实际情况进行了对照分析，评价了尾矿库浸润线地质雷达检测结果的准确性；

第五章：总结选题的主要工作和解决的问题，指出了研究中存在的缺陷与不足，对未来的发展与研究方向进行了展望。

1.3.2 工作流程

本课题的研究主要采用理论分析、软件模拟、工程实验的方式进行，具体工作流程如下：

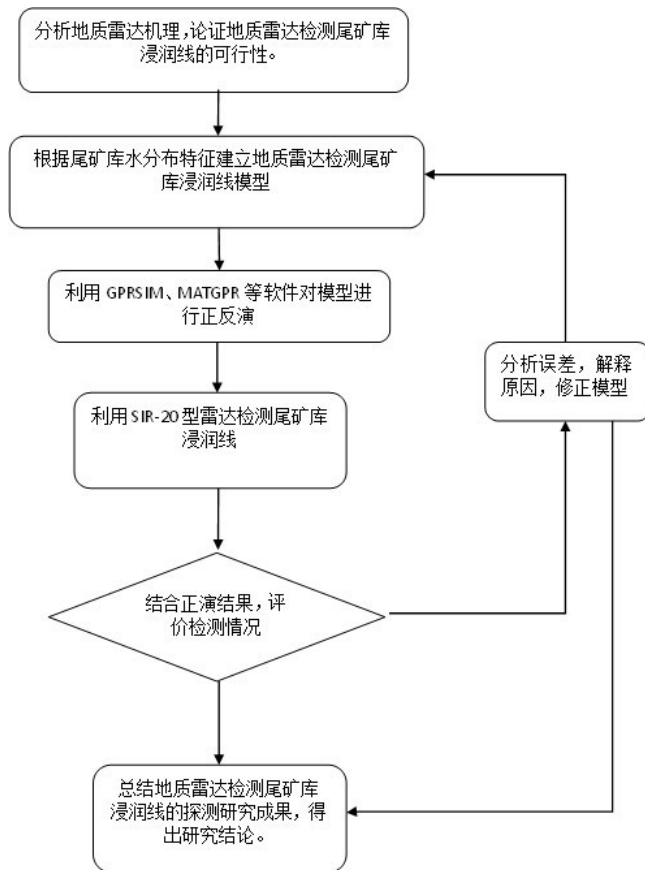


图 1-1 工作流程

第2章 地质雷达探测原理

地质雷达是将高频电磁脉冲通过偶极子天线向地下发射，利用接收天线在时间域上接收雷达的回波，通过计算双程走时和幅值可以确定地下介质的空间分布和电磁性质。其工作示意图如下：

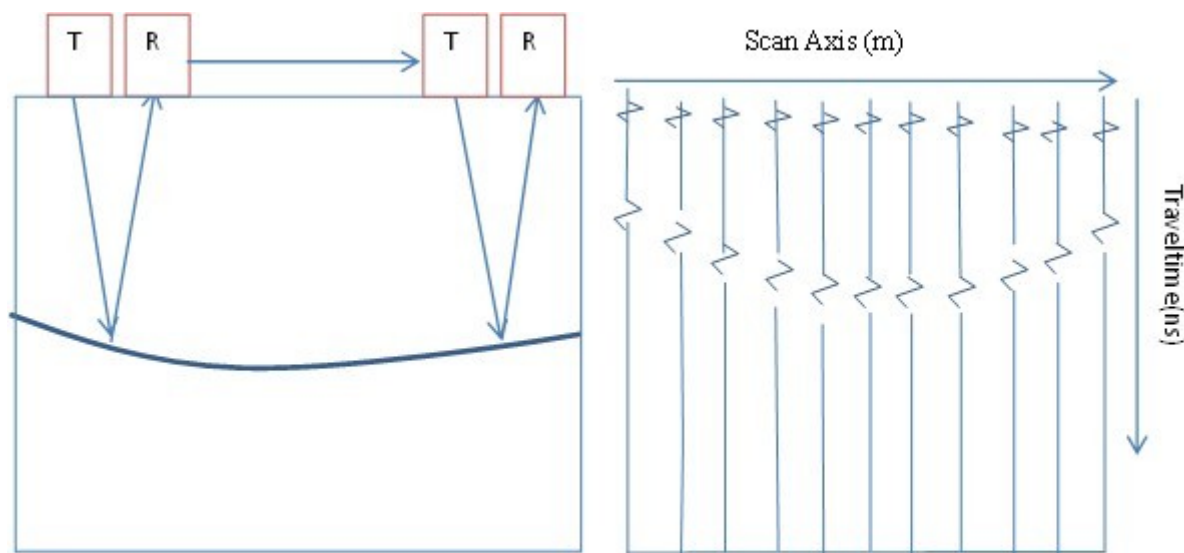


图 2-1 地质雷达工作示意图

地质雷达波在地下的传播速度跟波形都与地下媒质的介电性有关，要弄清雷达波的传播随介质特性的变化规律，以及对雷达图像的影响，必须要对地质雷达电磁波的传播特性有所了解。本章将从麦克斯韦方程和波动方程出发，通过基本方程计算解释地质雷达的电磁原理，分析介电常数、电导率、磁导率、中心频率等对探测的影响，为后面浸润线探测正演分析和实地探测做理论准备。

2.1 地质雷达理论基础

2.1.1 麦克斯韦方程与波动方程

要读懂地质雷达回波信号并提取出目标信息，必须对雷达波在介质中的传播有深入了解。地质雷达天线发射的电磁波，在地下介质中的传播满足麦克斯韦方程，

电磁波这种随时间和空间变化传播的特征同时也符合波动方程的基本理论。地质雷达大都采用偶极子半波天线反射模式工作。因此，地质雷达的理论主要围绕利用麦克斯韦方程和波动方程解偶极子电磁场的问题展开。

1、克斯韦方程

无场源区电磁波的传播遵守麦克斯韦方程：

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{H} &= i + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho\end{aligned}\quad (2-1)$$

上式中， E 为电场， B 为磁场， H 为辅助磁场， D 为电位移， ρ 为电荷密度。 ϵ_0 为物质的电容率， μ_0 为物质的电导率，则它们的本构关系为：

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (2-2)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0 \quad (2-3)$$

2、偶极子电磁场

在解偶极子电磁场方程中引入磁矢位 \mathbf{A} ，其定义为：

$$\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2-4)$$

引进标量电位，结合式2-1与式2-4，可得矢量波动方程：

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mathbf{i} \quad (2-5)$$

上式也称为亥姆霍兹方程，在地质雷达偶极子天线场中，偶极子天线的磁矢位为^{[2]1}：

$$\mathbf{A} = \frac{1}{4\pi} \int_{\tau} \frac{t - \frac{r}{v}}{\gamma} \quad (2-6)$$

3、波动方程

根据波的合成原理，任何脉冲电磁波都可以分解为不同频率的正弦电磁波。电磁波的传播特性满足波动方程，可以用波动原理来解释和处理，在距源 r ，时间 t 单一频率震动波可以用下式表示^{[2]1}：

$$P = |p|e^{-j(\omega t - kr)} \quad (2-7)$$

v 为电磁波传播速度，角频率 $\omega = 2\pi f$ ， $\lambda = v/f$ ，式2-1可以改写为：

$$P = |p|e^{-j(\omega t - \frac{2\pi f}{v}r)} = |p|e^{-j(\omega t - kr)} \quad (2-8)$$

$k = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon + j\frac{\sigma}{\omega})}$ ，可以写成 $K = \alpha + j\beta$ 带入2-8可得：

$$P = |p|e^{-j(\omega t - \alpha r)} \cdot e^{-\beta r} \quad (2-9)$$

综上，地质雷达波的电磁场计算主要是基于麦克斯韦方程展开，麦克斯韦经过变形求旋度可得电磁波的波动方程，在偶极子场中通过引入偶极子天线磁矢位来解得磁场和电场。

2.1.2 地质雷达电磁波的传播特性

在解偶极子天线场中我们知道，电磁场传播路径和场值大小主要由传播常数 k 和天线特性决定。 $k = \alpha + j\beta$ ，可化为下式：

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\varepsilon\omega}\right)^2} + 1\right)} \quad (2-10)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} + \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\varepsilon\omega}\right)^2} - 1\right)} \quad (2-11)$$

其中， α 称为相位系数， β 称为吸收系数。由式2-10与式2-11可知，在特定天线频率下，介电常数 ε ，电导率 σ ，磁导率 μ ，三者共同决定了地质雷达波的传播特性。

1、传播速度

由2-11电磁波表达式可知 α 为相位系数，则电磁波速：

$$v = \frac{\omega}{\alpha} \quad (2-12)$$

电磁波的双程走时由电磁波速决定，从2-12可知， α 是决定速度的决定因素，而 α 与介电常数 ε 、电导率 σ 和频率密切相关，低频时， α 主要由 σ 决定，高频时， α 主要由 ε 决定；而在低介质损耗中，电磁波波速与 σ 无关，与 $\sqrt{\varepsilon\mu}$ 成反比，在良导体介质中时，波速仅与电导率 σ 有关^[2]。

2、反射与折射

如前文所述，地质雷达通过接收天线对地下介质的回波进行探测，电磁波在到达两种有差异电性分界面处会发生反射与折射。电磁波在分界面处反射遵循反射定律， $\theta_1 = \theta_2$ ，折射定律：

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (2-13)$$

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1}} = \frac{k_2}{k_1} \quad (2-14)$$

n 即为折射率，与两介质的性质有关。从介质1到介质2的界面时，反射系数和折射系数 R_{12} 与 T_{12} 分别为：

$$R_{12} = \frac{(\eta_2 \cos \theta_1 - \eta_1 \cos \theta_2)}{(\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2)} \quad (2-15)$$

$$T_{12} = \frac{(2\eta_2 \cos \theta_2)}{(\eta_2 \cos \theta_1 + \eta_1 \cos \theta_2)} \quad (2-16)$$

上式中， $\eta_1 = \sqrt{\mu_1 \epsilon_1}$ ， $\eta_2 = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2}$ ， ϵ_1 、 ϵ_2 为复介电常数。当介质为非磁性介质时，反射系数为：

$$R_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad (2-17)$$

3、散射与衰减

地质雷达波在通过不同电磁特性介质时会发生散射衰减，由式2-11可知吸收系数为 β ，距电场 r 处的吸收衰减可以表示为：

$$A = e^{-2\beta r} \quad (2-18)$$

反射系数为 R ，则透射损失为：

$$B = (1 - R^2) \quad (2-19)$$

由式2-17可知，电磁波在地下介质的传播中，其能量衰减主要跟吸收系数 β 有关：

(1) 在低损耗介质中，即 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \ll 1$ 时， $\beta \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ，吸收率与频率无关，与介电常数 σ 成正比，与电导率平方根 $\sqrt{\epsilon}$ 成反比；

(2) 在损耗介质中，即 $\frac{\sigma}{\epsilon\omega} \gg 1$ 时， $\beta \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ ，吸收率与电导率无关，跟 \sqrt{f} 、 $\sqrt{\sigma}$ 成正比。

电磁波在介质中传播的损耗决定了地质雷达探测能力的大小，同时，需要根据不同探测目标的电磁性质合理选择天线频率。

2.1.3 地质雷达工作方法

地质雷达共四种工作方式，分别为地表反射、弹孔反射、孔中层析成像和地面-孔中层析成像。层析成像实际上是透视测量，需要钻孔埋设天线，应用不多，我们所说的地质雷达也主要是指采用反射测量成像的地质雷达，如本文实验所用SIR-20即为反射偶极子天线雷达。地质雷达利用一个天线向地下发射一定中心频率的无载波电磁脉冲波，通过另一天线接收来自地下的回波，通过对回波波形特征进行解释，可推断出地下介质特性。地质雷达的反射测量方式主要有三种：共位移测量法、广角测量法、共中心点测量法^[2]。

1、共位移测量法

共位移测量法是保持发射天线和接收天线的距离不变，共同沿测线移动。在测线上每一个点都能获得一个记录，多个记录沿着测线组成一幅地质雷达时间剖面图像，图像的横轴为天线移动路径，纵轴为雷达波双程走时，已知电磁波在介质中传播速度则可以进行时深转换，从而知道地下目标的位置。在2.1.2中我们知道，反射和折射跟入射角度有关，当 $\theta_1 = 0$ 时，电磁波垂直入射，此时发射天线和接受天线合并为一，通过 $t = \frac{2d}{v}$ 进行时深转换，可以方便的测出地下目标位置，浅层管道检测等多用此种测量方式。

2、广角测量法

广角测量时,让一个天线固定，另一个天线沿测线等间距移动，通过记录不同点对统一目标的走时来互相校正，可以实现对波速的测量。深度为 h 的水平界面反射波走时 t 满足：

$$t^2 = \frac{r^2}{v^2} + \frac{4r^2}{v^2} \quad (2-20)$$

式中 r 为天线距， h 为反射界面深度。在均匀介质中，当电磁波的传播速度不变时， t^2 与 x^2 成线性关系，通过改变天线距，可以求出电磁波传播速度，因此，广角法的主要用途为求取地下介质传播速度。

3、共中心点测量法

共中心点又叫共深点测量法，它是将收发天线分离，测量时沿测线向两侧等距移动进行数据采集，应用不同天线距对同一测线进行重复测量，通过对相同测点的

记录进行叠加可提高对地下介质的分辨率，天线距步距和叠加次数的选择需要满足一定的条件。

2.2 地质雷达性能参数

2.2.1 分辨率

分辨率决定地质雷达分辨目标位置、形状、大小的能力，它决定了地质雷达是否能对异常目标进行分辨识别。地质雷达分辨率包含垂直分辨率和水平分辨率。

1、垂直分辨率

地质雷达在对地层或特定形状目标探测时，会在地层或目标的上下界面都产生反射，能对两个脉冲回波区分开来的最小距离就称为地质雷达的垂直分辨率。脉冲宽度和带宽关系如下：

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} \quad (2-21)$$

带入 $\Delta h = \frac{v\Delta t}{2}$ 中进行时深转换可得^[2]：

$$\Delta h = \frac{c}{2\Delta f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2-22)$$

而根据地震反射理论中的瑞雷标准定义为分辨率极限是 $\lambda/4$ ，按照怀特分辨率的定义则为 $\lambda/30$ ，如果考虑噪音影响则有所不同，实际中一般认为离散目标的垂直分辨率大约为 $\lambda/4$ ，平面层在 $\lambda/20$ 左右^[2]。

上述结论中用中心频率代替频带宽度，而实际的频带宽度是难以计算的，要提高探测分辨率需要从雷达发射信号带宽、探测方法，数据处理等方面做出改进。

2、水平分辨率

地质雷达在水平方向上能分辨出的最小异常目标尺寸叫做水平分辨率。若两点相距 d ，同在深度为 h 的水平面内，两点的时间间隔：

$$\Delta T = \frac{(2\sqrt{h^2 + d^2}) - 2h}{v} \quad (2-23)$$

要实现区分则脉冲宽度大于 Δt ，又 $\frac{1}{\Delta t} = \Delta f$ ，则：

$$d > \sqrt{\frac{v}{\Delta f} + \frac{vh}{\Delta f}} \quad (2-24)$$

由上可知，水平分辨率也主要取决于频谱宽度，同时，探测深度越深水平分辨率越低。横向分辨率也有两种计算标准，按Sheriff标准为 $\sqrt{2h\lambda}$ ，按照Brokou的计算标准为 $\sqrt{h\lambda}$ ，可以看出垂直分辨率都与埋深有关^{[2]1}。

上述结论中用中心频率代替频带宽度，而实际的频带宽度是难以计算的，要提高探测分辨率需要从雷达发射信号带宽、探测方法，数据处理等方面做出改进。

2.2.2 探测深度

地质雷达能探测到最深的目标体的深度称为地质雷达的探测深度。地质雷达的探测深度跟雷达系统的增益有关，增益Q定义为：

$$Q = \frac{W_t}{W_r^0} \quad (2-25)$$

W_t 、 W_r^0 分别为仪器的发射功率和系统背景噪声功率，雷达识别回波的前提是回波信号幅度大于背景噪音 W_r ，因此，地质雷达的探测深度即为求目标体的回波大小。定义发射天线和接收天线的效率为 η_t 和 η_r ，吸收系数 β ， λ 为雷达波波长，入射方向天线增益为 G_t ，散射增益 G_r ，目标距天线 r ，散射面积为 σ 时，有雷达探测距离公式^{[2]1}：

$$W_r = W_t \eta_t \eta_r G_t G_r \sigma \frac{\lambda^2}{64\pi^2 r^4} e^{-4\beta r} \quad (2-26)$$

目标能被探测的必要条件是 W_r 大于 W_r^0 ，从式2-24可以看出，衰减系数越大，探测深度越浅。由式2-11我们知道，衰减系数跟雷达中心频率和地下介质的电磁性能相关的，降低雷达频率可以增加探测深度，同时由前面分析可知中心频率降低也会导致分辨率的降低。因此，天线中心频率的选择需要衡量探测深度和分辨率的需求。此外，衰减系数另一决定性的因素为介电常数，它也是影响探测深度的重要条件，由于水的介电常数相比其他物质大很多，所以地质雷达的探测深度受水的影响较大。

2.2.3 时窗和中心频率

1、时窗

时窗的选择由最大的探测深度决定，一般取最大探测深度 d_{max} 双程走时的1.3倍。时窗W可按如下计算：

$$w = 1.3 \times \frac{2d_{max}}{v} \quad (2-27)$$

v为波速。

2、中心频率

由2.3.1与2.3.2知道，要对目标实施探测，中心频率的选择很重要。既要满足探测深度又要满足分辨率，此外还要考虑背景噪音。中心频率 f_0 一般采用下式确定：

$$f_0 = \frac{150}{x\sqrt{\epsilon}} \quad (2-28)$$

x 为空间分辨率，为介质的介电常数。中心频率是地质雷达探测的重要指标，跟雷达性能密切相关。表2-1为GISS公司各型天线频率探测能力参考值。

表 2-1 各型天线频率的探测深度

天线种类	主频	脉宽	可达深度	参考值	应用	型号
单体屏蔽天线	1500MHz	0.8ns	0.2-0.5m	0.3m	混凝土结构、钢筋	5100
	900MHz	1ns	0.5-1m	0.7m	混凝土建筑、桥梁	3101D
	400MHz	2.5ns	1.0-5m	3m	工程、市政管线	5103
	200Hz	5ns	1-9m	5m	浅层、工程、环境	5106
	100MHz	10ns	4-25m	8m	环境、地质	3207A
	100MHz加强型	10ns	5-30m	10m	环境、地质	3207
低频组合天线	80MHz	12ns	5-60m	30m	环境、地质、水文	3200MLF
	40MHz	25ns				
	35MHz	30ns				
	20MHz	50ns				
	16MHz	60ns				
空气耦合天线	1GHz	1ns	0.3-0.8m	0.5m	公路面层	4108
	2.2GHz	0.43ns	0.15-0.3m	0.2m	公路面层	4105

第3章 尾矿库浸润线地质雷达正反演分析

地质雷达已广泛应用于生产工程领域检测，其硬件技术水平已经不再是问题，制约着地质雷达应用的瓶颈是雷达数据处理和图像解释。地质雷达在工程应用中的检测结果是否准确，很大程度依赖于检测人员对图像的解释。在一些陌生探测环境下，我们一般采用正反演模拟的办法，利用正反演原理对探测环境进行模拟探测和逆向分析，从而帮助我们更好选择探测方式，更合理地设置雷达参数，更准确地对地质雷达图像做出解释和判断。

目前，应用地质雷达对浸润线的检测比较少，这些少量的研究也主要是利用单体屏蔽天线对浅层地下浸润线或水位进行探测，其探测深度不足，效果也不是很理想。借鉴各类水坝、地下水埋深地质雷达探测的经验，如果解决了雷达图像解释等关键问题，根据现有的技术条件，采用低频组合天线对尾矿库浸润线进行探测是可行的。浸润线探测图像解释主要包括两方面，一是识别出目标回波的异常信号；二是能将特征图像信号转换为准确的浸润线深度信息，即能建立浸润线与图像信号的对应模型。本章将首先研究尾矿库的探测环境，分析其探测的可行性，再通过模型正反演弄清浸润线探测的图像解释。

3.1 雷达探测浸润线的可行性分析

3.1.1 尾矿库特点

地质雷达探测的有效性跟介质介电常数、电导率、磁导率等密切相关，由于待探测介质的矿物组成、密度、含水量等差异都会导致其介电性不同，介电性差异会影响地质雷达电磁波在介质中的传播，所以有必要对尾矿砂的组成特性进行分析。

1、尾矿砂成分

尾矿是尾矿矿浆经过自然脱水形成的固体矿业废料，其中包含有有用的金属和矿物，可以视为一种复合的硅酸盐、碳酸盐等矿物材料。按照尾矿中的主要组成矿物搭配情况，可将尾矿分为8种岩石化学类型：镁铁硅酸盐型尾矿、钙铝硅酸盐型尾矿、长英岩型尾矿、碱性硅酸盐型尾矿、高铝硅酸盐型尾矿、高钙硅酸盐型尾矿、硅质岩型尾矿、碳酸盐型尾矿。尾矿砂的成分随尾矿类型而不同，我国的典型尾矿其组

成成分百分比如表3-1。从表中可知，我国的典型尾矿其组成成分百分比，除钙镁碳酸盐类型尾矿外，其余尾矿组成都以二氧化硅为主，即大部分尾矿库的主要成分为砂土。从组成物电磁特性来看，尾矿成分本身都对电导率和电磁率的影响都较小，可以视为砂土介质。

表 3-1 各类型尾矿组成成分

尾矿类型	主要化学成分/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	NaO	K ₂ O
镁铁硅酸盐型	30-45	0.5-4	0.5-5	0.5-8.0	25-45	0.3-4.5	0.02-0.5	0.01-0.3
钙铝硅酸盐型	45-65	12-18	2.5-5	2-9	4-8	8-15	1.50-3.5	1-2.5
长英岩型	65-80	12-18	0.5-2.5	1.5-2.5	0.5-1.5	0.5-4.5	3.5-5	2.5-5.5
碱性硅酸盐型	50-60	12-23	1.5-6	0.5-5	0.1-3.5	0.5-4	5-12	5-10
高铝硅酸盐型	45-65	30-40	2-8	0.1-1	0.05-0.5	2-5	0.2-1.5	5-2
高钙硅酸盐型	35-55	5-12	3-5	2.0-15	5.0-8.5	20-30	0.5-1.5	0.5-2.5
硅质岩型	80-90	2-3	1-4	0.2-0.5	0.02-0.2	2-5	0.01-0.1	0.0-0.5
钙质碳酸盐型	3-8	2-6	0.2-2	0.1-0.5	1.0-3.5	45-52	0.01-0.2	0.0-0.5
镁质碳酸盐型	1.0-5	0.5-2	0.1-3	0-0.5	17.0-24.	26.0-35	微量	微量

2、尾矿砂含水率

水的介电常数相对于尾矿中其他成分介电常数要大很多，尾矿砂的含水率往往决定了尾矿砂的介电常数，因此含水率对于浸润线检测意义巨大。段蔚平等研究了尾矿坝非饱和带滞水曲线模型认为^[2]，尾矿砂的含水量离滩顶距离有关，离滩顶越远，尾矿砂的含水率越大，颗粒越细，其空隙比越大。其建立的含水率、空隙比随距离的变化规律如下式所示：

$$y = 0.0144x^{1.475} + 4.9697 \quad (3-1)$$

$$y = 1.4222 \times e^{(-3)} + 0.62976$$

上式中，y为孔隙比；x为尾矿砂的沉积距离(m)。上式可以经过相关系数进行修正，可通过简化的数学模型进行一些实用计算。在浸润线地质雷达检测中，我们往往更关注垂直方向上含水率的变化对探测的影响。由于没有针对尾矿砂垂直方向含水率分布研究结果，我们以砂土含水分布模型作简化近似来进行分析。土壤含水率中常

以用包气带模型进行研究^[2]，武汉地质学院陈崇希定义了包气带的水份分布模型，其实验曲线如下^[2]：

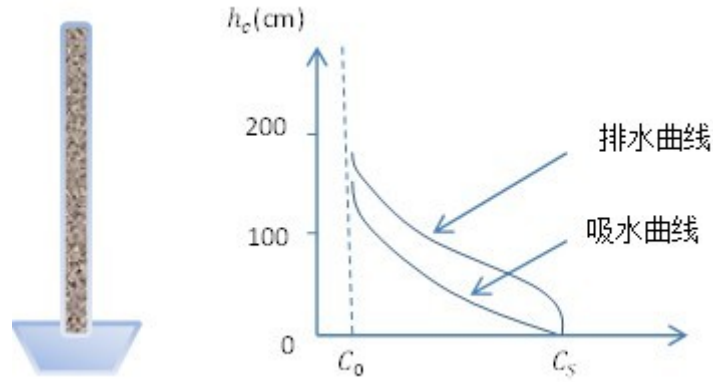


图 3-1 包气带含水率实验装置和分布曲线

上述实验清晰的反应了，砂土饱和和分界面到含水率趋于稳定存在毛细管过渡区域。拟合土壤滞水曲线最常用的参数模型是Van Genuchten函数^[2]：

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \quad (3-2)$$

此处 Θ 是归一化的土壤含水量， θ 是对于给定土壤淹没水头的土柱任意一点的平均含水量， θ_r 和 θ_s 滞留与饱和含水量的值， α 和 n 分别为拟合参数，参数 α 受孔隙率影响。参数 n 跟过渡区的斜率有关。 n 的值越大意味着过渡区越薄，拟合图像如图3-2。

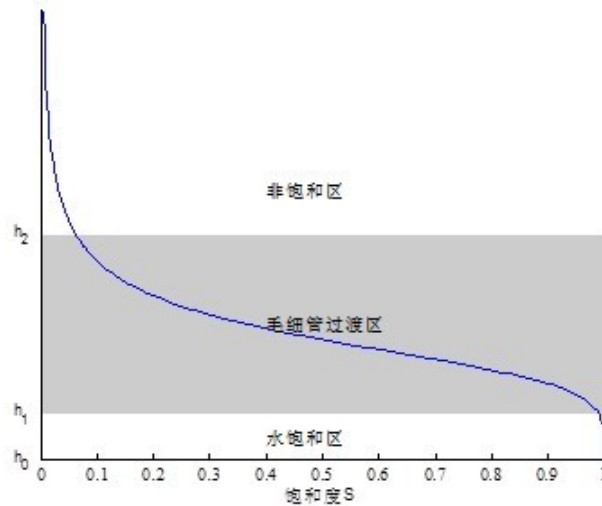


图 3-2 Van Genuchten模型

过渡层含水率的变化引起饱和和分界面到稳定含水率区域的介电常数变化，介电常数与含水率的关系一般用Topp公式来计算^[2]：

$$\varepsilon_{r,b} = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3 \quad (3-3)$$

式中 $\varepsilon_{r,b}$ 、 θ 分别为视介电常数和体积含水量。经验证^[2]，当含水量 θ 在0.02到0.4之间时，topp公式能很好的符合实际。

影响尾矿砂导电性的主要是其中的金属离子，砂土中阳离子的导电能力大小顺序为^[2]： $Na^+ < Li^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Ba^{2+} < Cu^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+} < Th^{4+}$ 。金属离子浓度对砂土的导电性有显著影响，Yoon研究了砂土不同孔隙率下电导率跟含水量的关系，如图3-3所示^[2]。

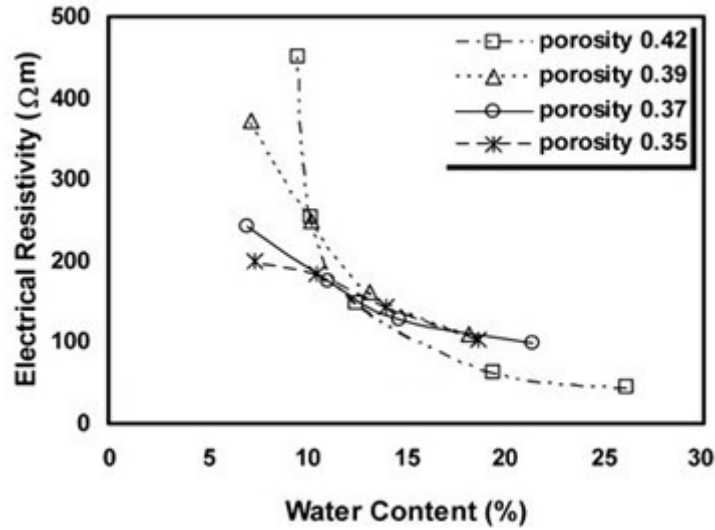


图 3-3 电阻率跟含水量关系

由图2、图2和图3-3可知，在饱和界面到砂土区间的过渡层是含水率急剧变化的区域，也是介电常数和电阻率有重大差异的区域。在饱和砂土电阻率一定的情况下可以用Keller和Frischknecht等人的饱和度与饱和砂土电阻率的关系曲线表示过渡区的电阻率变化：

$$\rho = \rho_{sat} S^{-B} \quad (3-4)$$

式中 ρ_{sat} 为饱和砂的电阻率， S 为饱和度， B 为经验参数，一般介于0.64到2.29之间。过渡层的深度直接影响到探测的精度，因此对过渡层的处理在浸润线探测中有重要意义。

3、探测环境

我国尾矿库多采用上游式筑坝，易出现浸润线过高，坝体浸润线示意图3-4 我

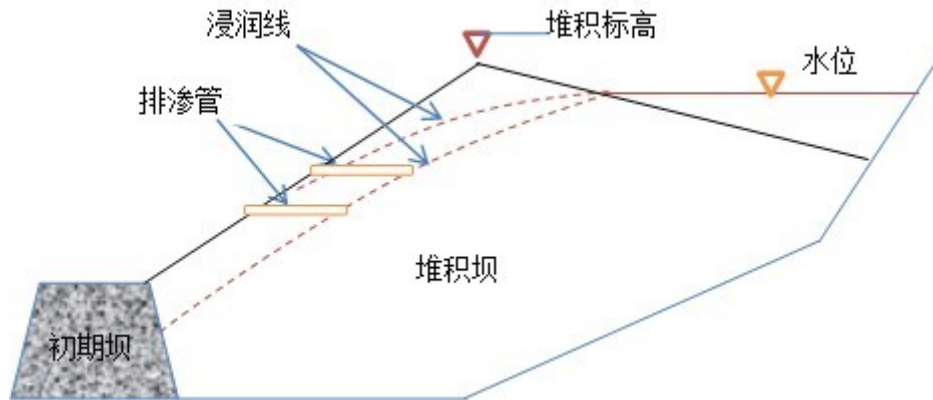


图 3-4 尾矿库浸润线

国80%以上都为中小型尾矿库，坝高小于60m，超过百米坝高的尾矿库只有几十个，而浸润线往往距离堆积坝顶20m内。因此，尾矿库的探测深度环境一般在60m内。尾矿库浸润线检测一般选择初期坝或者堆积子坝的纵向作为测线方向，坝面一般较平整，易于探测操作。尾矿库一般无复杂电磁环境，无电磁噪音干扰。

3.1.2 地质雷达检测浸润线需要解决的问题

地质雷达的探测的有效性取决于其探测深度和分辨能否满足需要，在尾矿库浸润线检测中，高损耗介质环境要求采用低频天线，减少损耗增加探测深度，而分辨率则要求较高中心频率，权衡探测深度和分辨率是浸润线探测中需要解决的问题。此外，过渡层的存在进一步影响了探测精度，评估过渡层对探测的影响也是浸润线检测中的难点。

1、探测深度和分辨率

在3.1.1中分析了尾矿库浸润线探测深度要求，一般都在60m内。而在电磁波传播过程中，电磁波的衰减跟吸收系数有关，由式2-11可知，在损耗介质中，电磁波的衰减跟 \sqrt{f} 、 $\sqrt{\sigma}$ 成正比。电导率 σ 由探测环境决定，由图3-3可知，一般情况下砂土的电导率小于 $0.01(mS/m)$ ，为了提高探测深度，只能尽量减小雷达中心频率。式2-24给出了地质雷达探测能力的理论计算方法，而雷达信号是背景噪音与雷达信

号的叠加，实际探测深度往往跟探测环境、地质雷达性能有关。表2-1给出了各类型天线的探测深度，根据尾矿库浸润线的检测需求，只有低频组合天线符合要求。

地质雷达的分辨率跟探测深度是一对相互矛盾的技术指标^[2]，在提高探测深度降低中心频率的同时也降低了雷达的分辨率。在浸润线检测中分辨率主要是指垂直分辨率，地质雷达中心频率 f 与探测深度 S 和垂直分辨率 ΔS 有如下关系^[2]： 参照

表 3-2 中心频率、探测深度、垂直分辨率关系

$f(MHz)$	10	25	50	100	125	200	500	1000
$S(M)$	50	30	10	5	4	2	1	0.5
$\Delta(cm)$	250	80	40	25	20	12.5	5	2.5

表2-1和表3-1，当选择40MHz低频组合天线时，地质雷达的探测深度可以满足要求，根据式2-21，取 ϵ_r 最小值6，最大值25，可以计算出其垂直分辨率：

$$\Delta S_{max} = \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{150}{40 * \sqrt{6}} \approx 1.5(m)$$

$$\Delta S_{max} = \frac{c}{2\Delta f \sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{150}{40 * \sqrt{25}} \approx 0.75(m)$$

从计算中可知，垂直分辨率介于75cm与150cm。此时有效探测深度大约为30m，从其分辨率可得浸润线检测的基本误差：

$$\delta_{max} = \frac{1.5}{30} = 5.0\%$$

$$\delta_{min} = \frac{0.75}{30} = 2.5\%$$

一般认为误差在5%内都是可以接受的，可以认为地质雷达在满足探测深度的条件下能基本满足探测精度要求。

2、饱和分界面与过渡层

在满足探测深度和分辨率的情况下，目标要被检测需要有足够的信号反馈，即饱和分界面上下部分的电性差异引起的回波信号能被识别。研究认为，当反射系数大于0.01时就有足够的反射^[2]。由于过渡层的存在，饱和分界面处的含水率情况并不清楚，我们先假设饱和度为100%时体积含水率为40%，则用Topp公式^[2]可以求得上下界面相对介电常数，再通过式2-17可以求得界面的反射系数，由此可知，只要

饱和和分界面上下饱和度之差只要大于5%则就有足够大反射，由于砂土的保水性较差饱和和分界面达到5%以上的饱和度差值是肯定的，从这点上看地质雷达探测浸润线是可能的。

然而，在实际中，由于尾矿库浸润线探测是强衰减环境，其反射会逐渐变弱，并且含水率的变化并不是突然变化的，饱和和分界面处的反射并不具备良好的分界面探测条件。此外，在上文中所讨论的垂直分辨率计算方法是基于均匀介质的，在过渡区存在的情况下，研究认为过渡区的厚度满足小于雷达波长时才能实现有效的探测。至于过渡层到底会对地质雷达检测产生什么影响，需要根据尾矿库的滞水曲线模型进一步分析。

本小节通过理论分析和计算，对尾矿库环境下地质雷达探测深度和分辨率，以及浸润线饱和和分界面信号反馈进行了研究，初步认为地质雷达检测尾矿库浸润线是可行的，对于过渡层对检测的影响还有待进一步研究。

3.2 雷达正演分析

由于地质雷达检测剖面图像的复杂性，对其进行解释通常需要借助正演模拟等手段。目前已经有多种雷达波正演算法^[21]，如射线追踪法、时域差分法、假谱法、频率-波速域分步法等。其中，射线追踪法基于几何光学原理，适用于合成无间断点的简单层面雷达记录^[21]；频率-波速域法适合正演非均匀介质的色散和衰减；时域差分法考虑了电磁波的动力学特征，应用范围较广，缺点是计算量大。为了探究浸润线的雷达波图像特征，课题将根据浸润线的介电模型利用MATGPR、GPRSIM等软件正演分析。

3.2.1 毛细管过渡区介电分布

地质雷达正演模拟通常都是利用电性参数求解电磁波传播方程，从而求得各层介质中的速度及衰减实现正演模拟，因此地下媒介的介电性模型对正演结果有着重要影响，合理的介电模型是实现正演的基础。由电磁波传播特性可知，介电常数和电导率决定了雷达波的波速和衰减，它们是尾矿库浸润线介电模型中最重要的参数。介电常数和电导率都跟含水量密切相关，利用Van Genuchten过渡区拟合模型我们可以得到给定条件下的含水量分布。在尾矿库环境下我们根据一般经验，设置模型的初始条件为： $\theta_r = 0.05$ ， $\theta_s = 0.5$ ， $\alpha = 0.02$ ， $n = 7$ 。带入模型可得过渡区含水率分

布图，如图3-5所示。浸润线的介电性特征主要表现在介电常数和电导率的分布上。

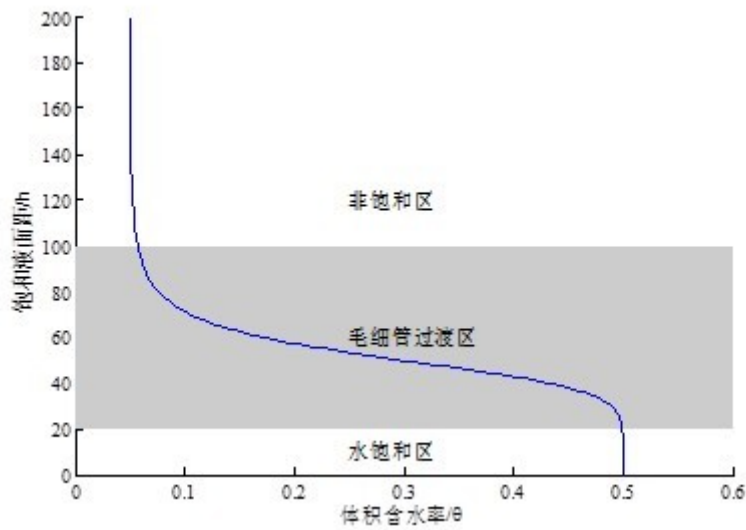


图 3-5 过渡层含水率分布

利用Topp公式和过渡层含水率分布曲线，我们可以得到过渡层的介电常数分布，如图3-6黑色曲线。G.L. Yoon的电导率实验得出在不受含盐水影响下，砂土电导率随饱和度的变化介于 $70\Omega m$ 到 $500\Omega m$ 间，利用Keller的公式，取饱和时电阻率 $70\Omega m$ ，实验参数B为0.85。

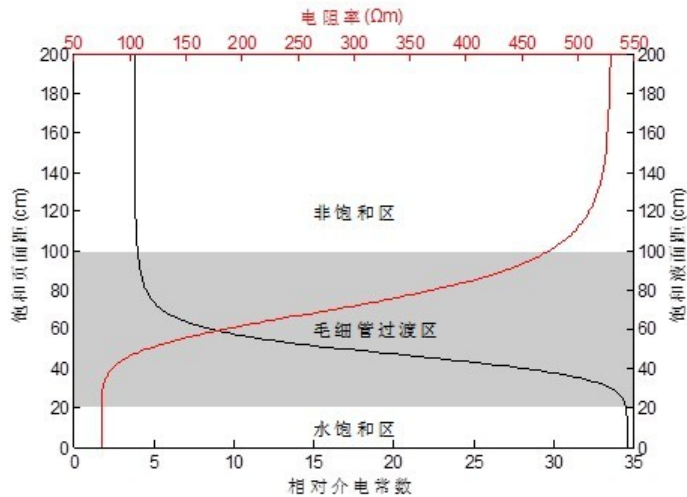


图 3-6 过渡层含水率分布

结合浸润线过渡区含水率分布曲线，我们可以得到过渡区电阻率分布，即图3-6黑色曲线。利用过渡区介电分布我们可以更好的进行正演建模。

3.2.2 分段线性模型

地质雷达正演中，我们首先要解决的是探测建模问题。对于过渡区介电参数连续变化曲线的正演建模，我们既不能用单一介质简化，又不能无限划分网格来逼近曲线。为了在有限的内存限制条件下最大限度地模拟真实探测，我们采取了折中的分段线性逼近的方法，即在饱和和分界面以上按照间隔深度 $0.2m$ ，将过渡层划分为多个层，然后取每个层介电参数的中间值。我们同样以图3-6中初始条件为尾矿库含水率分布模型，采用分段线性模型可得如下介电参数表：分段线性模型实际上是曲线近

表 3-3 分段线性模型参数取值表

区间(cm)	相对介电常数	电阻率(Ωm)	相对磁导率
浸润线以下	35	75	≈ 1
0-20	34.6	76.3	
20-40	33.6	116.3	
40-80	16.8	281.9	
80-120	5.5	435.9	
120-140	4.2	497.7	
140-160	3.9	518.2	
160-180cm	3.8	525.5	
180-200cm	3.8	528.3	
220-地面	3.8	529.6	

似，如此处理后其负面影响也是显而易见的。在每一层的界面由于介电常数和电导率是突然变化的，因此会在界面产生反射，这与实际的连续变化不符，这种影响可能会对正演分析造成影响。但总体来说，我们认为这种分段线性模型是既简单又有效的模型，此模型在Albane Saintenoy的地质雷达探测对滞水曲线敏感性研究中也有采用，取得不错效果^[7]。我们将以此模型为基础进行正演模拟。

3.2.3 浸润线地质雷达探测正演

在浸润线探测正演中，课题采用了MATGPR和GPRSIM结合的方式正演分析。MATGPR是一款免费开源的地质雷达分析MATLAB软件包，可以方便地进行建模正演和对探测数据进行处理，借助MATLAB强大功能还可以对雷达数据进行深度分

析，MATGPR遵循GNU GPL协议，可以自由的使用和修改，很适合教学研究使用；GPRSIM是GSSI公司产品配套的的商业地质雷达处理软件，能模拟各种地质雷达扫描模式，处理多种探测数据，功能完善，性能稳定，适合工程应用。

两款地质雷达分析软件除了以上区别外，最重要的一点就是其正演机制不同。MATGPR有两种正演算法，分别为Split-Step和时域差分法(FDTD)，可以很好的对雷达波的衰减传播等进行模拟。GPRSIM则是基于射线跟踪法(Ray Tracing)，可以快速地对规则物体和层状介质进行正演，但是射线追踪法只基于Snell定律的正演算法，没有考虑波的动力学特征，用地质雷达探测浸润线是否有效，我们将通过GPRSIM与MATGPR的正演图像分析给出结论。

为了探明浸润线地质雷达检测图像特征，课题分别利用MATGPR和GPRSIM进行正演分析。由于算法的差异，GRPSIM主要用于追踪雷达图像反射波的构成和来源，MATGPR主要正演雷达传播中的衰减、散射和最终图像特征。

1、GPRSIM正演

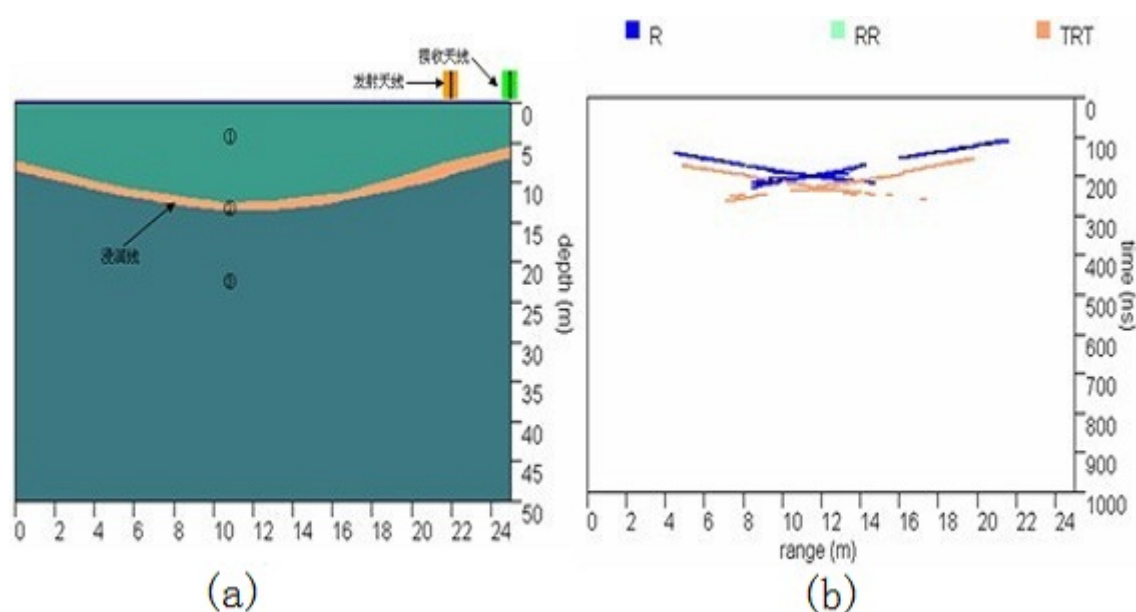


图 3-7 单层过渡浸润线模型正演

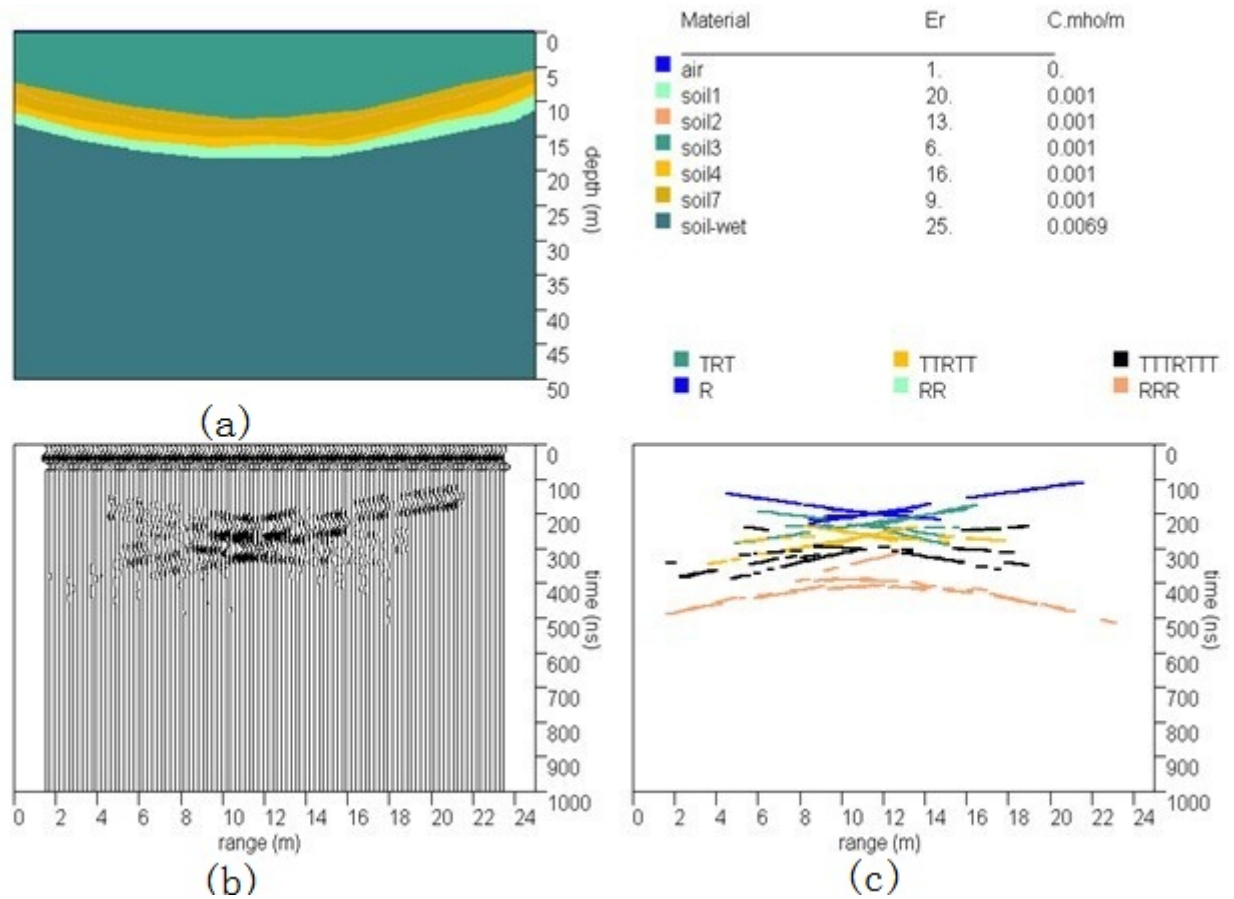


图 3-8 分段过渡层浸润线模型正演

由于GRRSIM正演目的是分析雷达图像波的传播路径，所以图3-7和图3-8的模型参数并没有参照分段过渡近似取值，具体参数可见图。正演中都选用了40MHz低频组合天线，采用共位移测量方法，天线步距为2m，时窗1000ns，其他参数均为默认值。

从图3-7正演图像上看，(b)中显示了浸润线的一次反射波特征，其左右分别为近似直线的曲线，中间凹陷处出现交叉，由于是单层处理，并没有二次反射波；与之对应的是图3-8(c)中，多级近似过渡情况下多种波密集交汇，其最重要的特征波也是一次反射波，其形态同样类似与浸润线曲线相切，中间有交叉。图3-8(b)中显示了分段过渡近似正演的波形图，其上部同相轴轮廓与浸润线形状一致，中部有密集杂乱的波形分布，整体上看，整个波形位置从200ns深度开始，到350ns深度结束，分布在一个较大的范围，中间有复杂的各类型波交汇，其上部轮廓与浸润线模型相符。GRPSIM正演清晰地显示了浸润线的各类反射波的成像情况，从中我们知道反映浸润线位置的同相轴下面存在较多的多次反射波、折射波的叠加干扰，可能会对地质

雷达图像分析中浸润线位置的确定造成影响。

2、MATGPR正演

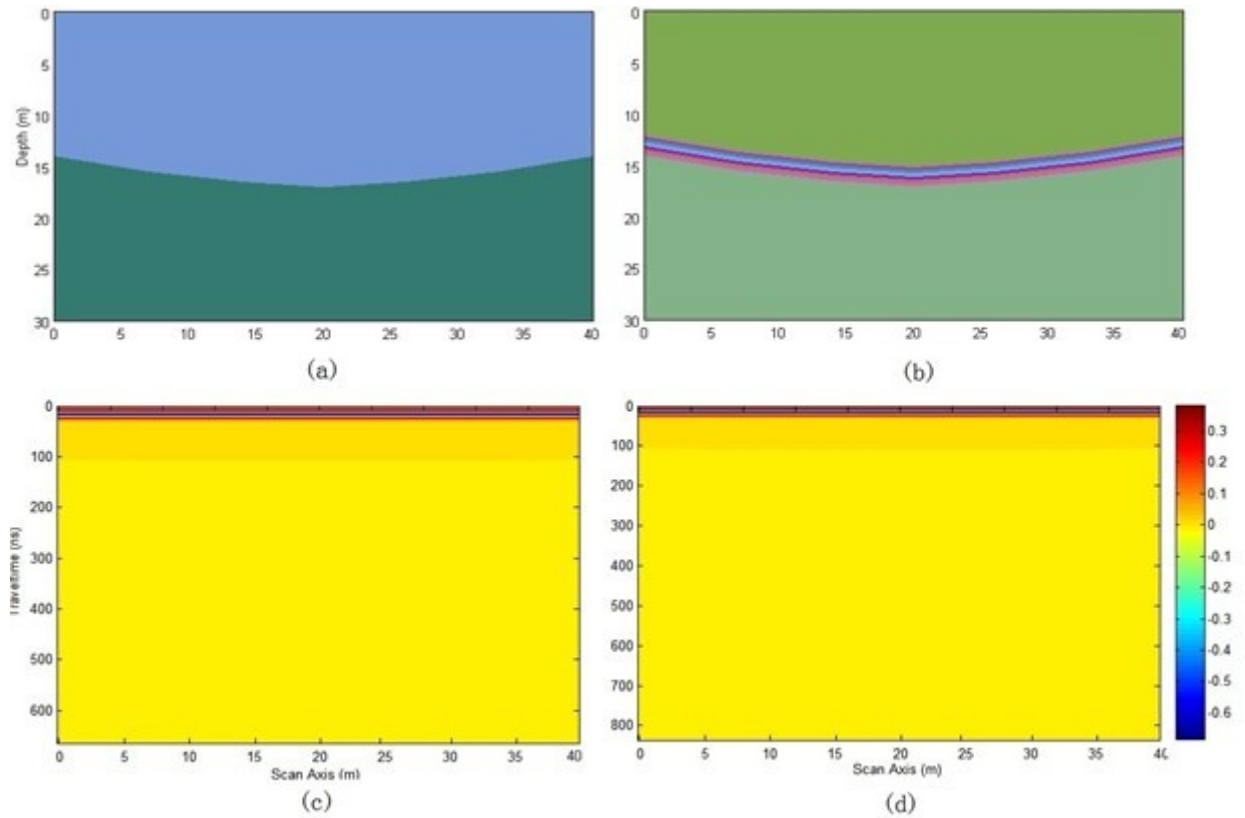


图 3-9 MATGPR正演图像

MATGRP正演的主要目的是对浸润线探测中浸润线的判别特征和信号衰减程度进行分析，其次是评估过渡区对浸润线探测的影响程度。为了对比，我们建立了无过渡区(3-9a)和分段近似过渡区模型(3-9b)，分段近似模型参数按照3.3.2的初始参数取值，天线中心频率为40MH，无过渡区模型与分段近似模型除了无过渡区和时窗不同外，其余设置相同，其他正演参数采用了系统默认。

图3-9中(c)和(d)分别为无过渡区和分段近似过渡区模型的正演原始图像。从颜色条中可以知道，100ns以后雷达回波的幅值接近于0，无法识别出任何浸润线反射特征。在100ns附近有发现雷达波幅值衰减出现的分界面，但从其时间深度和形态中可以确定不是浸润线的反射特征。为了弄清正演图像特征，我们对图像进行了自动增益处理。其结果图如图3-10，其中3-10(a)为无过渡层模型正演增益处理结果，3-10(b)为分段近似模型正演增益处理结果图像。

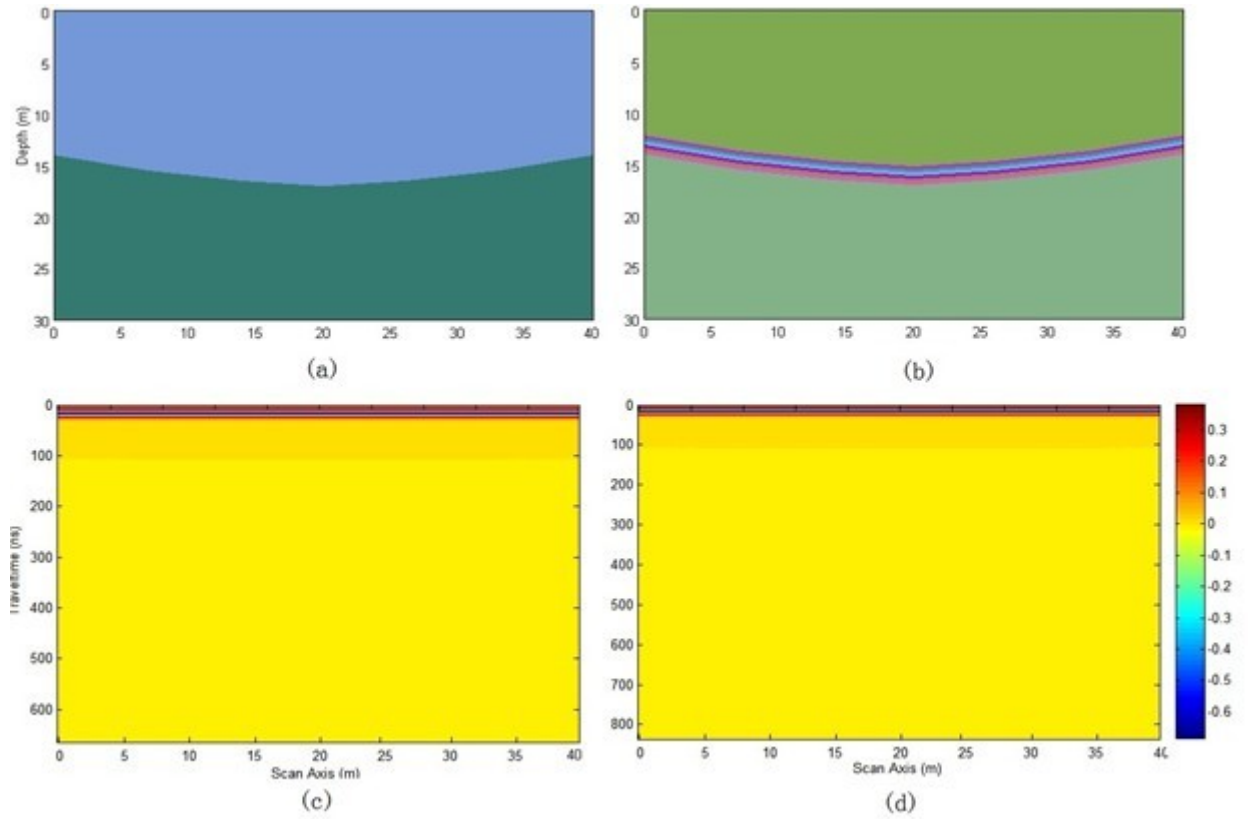


图 3-10 MATGPR正演增益处理后结果

从3-10(a)可以看到，一条与浸润线形态一致的曲线在时深200ns处，从颜色可判断，其幅值为负，波从介电常数小的介质进入介电常数大的介质，即由高速介质进入低速介质，反射系数为负，反射波振幅反向，由此可判断，此幅值为负的绿色曲线为浸润线。在浸润线特征曲线的下面，我们看到了与GPRSIM正演中相似的交叉线出现，但此模型为无过渡层模型，无多次反射、透视射波，观察正演录像后发现，其形成与浸润线曲率有关，可判断为附近曲面反射回波。

3-10(b)中所示的分段近似过渡区模型正演图像和无过渡区模型正演差别不大。主要差异有两点，其一，分段近似模型的尾波图像更密集紧凑，可以观察出其斜线的特征在渐弱，最终表现为水平状带状；其二，分段近似模型浸润线特征曲线时间深度更浅，这是由于过渡层的宽度将反射位置向上提升的原因。浸为了更清晰地说明雷达波在润线处的反射特征，我们用其波形图来说明，如图3-11。

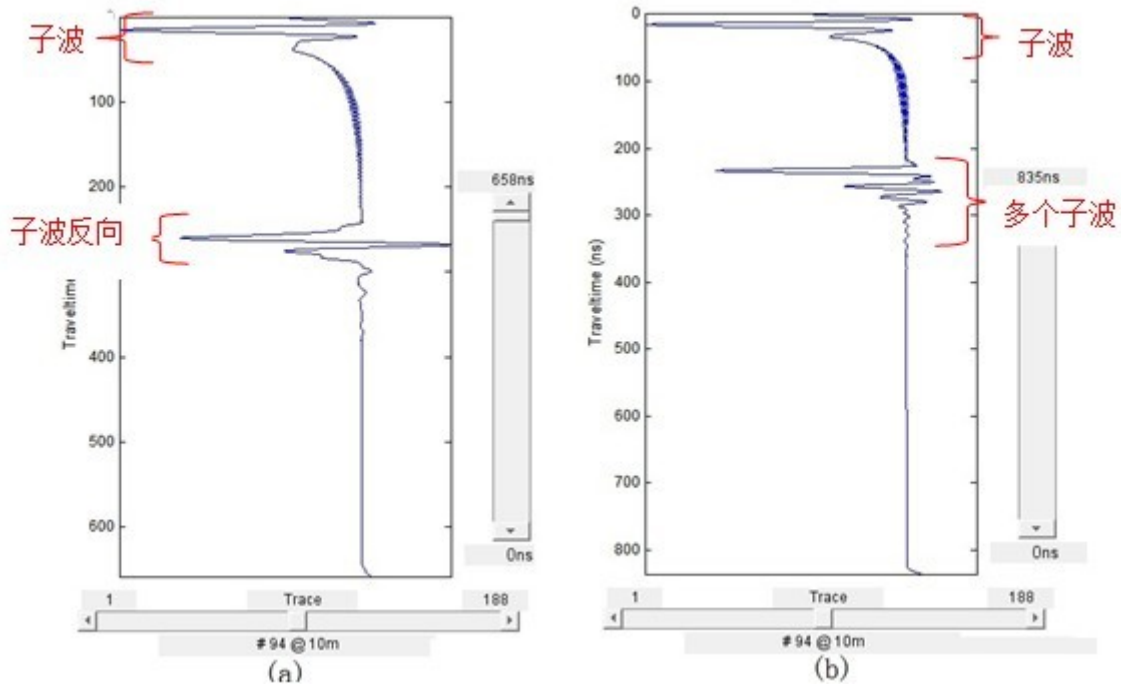


图 3-11 MATGPR正演波形图

图3-11中, (a)为无过渡区模型正演波形, (b)为分段过渡模型正演波形。从(a)中0ns附近开始的波形显示的是地面直达波, 其波形和雷达子波相同, 可以看到子波由一个波谷两个波峰组成, 在浸润线深度处我们看到有反射回波, 其波形组成为两个波谷一个波峰, 说明雷达波在浸润线界面反射时振幅反向, 与反射系数为负的理论结论一致。

由波形图对比可知, 分段过渡区导致了多个反射子波的重叠, 影响了浸润线实际位置的确认, 由于无法精确到哪个子波为浸润线饱和分界面反射回波, 所以其位置只能在过渡区子波范围内大概确定。因此, 过渡区的范围直接影响到浸润线位置的精确度。需要注意的是, 由过渡区引起的波衰减可能导致浸润线反射特征淹没在其他反射波中或者在到达浸润线前波已经衰减到无法探测。

综合以上GPRSIM、MATGPR正演分析, 我们有如下结论:

- (1) 浸润线的雷达回波特征为由同相轴构成的与浸润线走势一致的曲线, 通过连接各扫描道的反射回波同相轴可以直接表示为浸润线
- (2) 雷达波在浸润线饱和分界面处回波相位反向, 浸润线回波出现在连续逐渐衰减的过渡区回波中, 但难以区分浸润线反射的回波子波。
- (3) 浸润线的精度与过渡区的深度有关, 在过渡区较小时可以准确探测到浸润线。

3.3 雷达反演分析

通过地质雷达图像可以反演出介质空间分布和介质电磁特性，在浸润线检测中反演即是进行时将浸润线图像进行时深转换。时深转换中主要依靠速度模型反演，即：

$$t(Z) \rightarrow Z(t) \Rightarrow E(t) \rightarrow E(Z)$$

电磁波的传播速度不仅与介质性质有关还与波的频率和宽度有关，Bano给出了雷达电磁波在介质中传播的速度模型^[2]：

$$\begin{aligned} V(\omega) &= V_0 P(\omega) \\ V_0 &= \frac{1}{\sqrt{\mu K \epsilon_0} \cos(\frac{\pi}{4})} \\ p(\omega) &= \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{\frac{1-n}{2}} \\ n &= \frac{\pi}{2} \tan^{-1} Q \end{aligned} \quad (3-5)$$

$V(\omega)$ 为相速度， ω 为角频率， k 为相对介电常数， ϵ_0 为介电常数， Q 为常数因子，跟电导率和角频率，介电常数虚部有关，其定义如下：

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{\tan \delta} \\ \tan \delta &= \frac{\delta + \omega \epsilon}{\omega \epsilon} \end{aligned} \quad (3-6)$$

在已知介质电性参数的情况下可以通过式3-5计算出电磁波的传播速度，通过地质雷达图像分析所得的双程走时，由 $h = \frac{v}{2}$ 得到浸润线的深度。在实际探测中也可以通过共中心点法测波速或者根据经验估算波速。

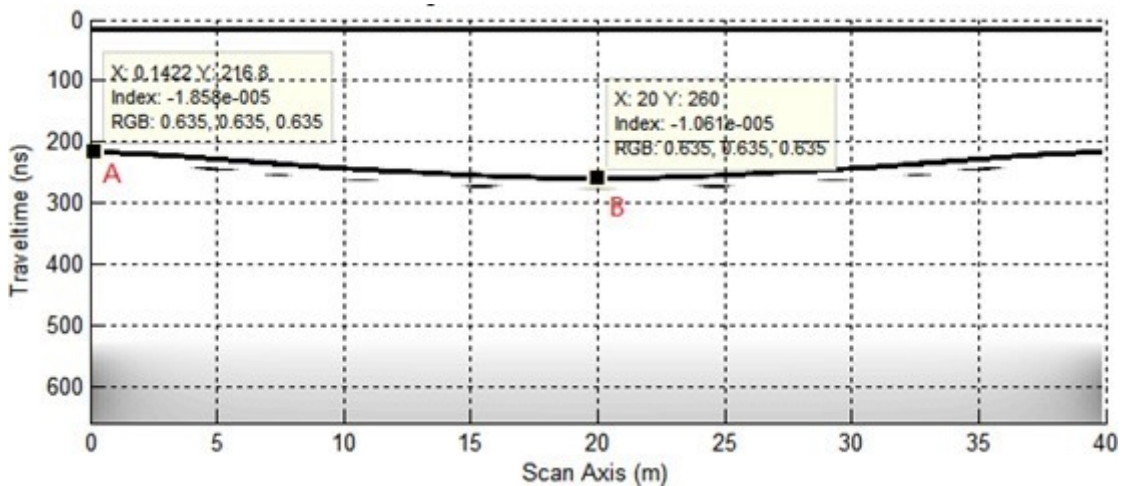


图 3-12 浸润线地质雷达检测图像

以正演结果为原始数据做反演，由图3-12所示，A、B两点分别为浸润线上的两特征点，水平位置分别为0m和20m。A点双程走时为216.8ns，B点双程走时为260ns，现欲求两特征点实际深度。

实际反演中我们需要根据探测环境的估算介质的介电常数，电导率，电磁率等，此处以模型设置代替。3-12为无过渡层浸润线正演图像，浸润线以上的相对介电常数等于5，电导率0.0025，相对磁导率为1。利用式3-5中Bano的速度模型计算可得波速 v 等于0.13324m/ns。时深转换可得：

$$h_A = \frac{0.13324 \times 216.8}{2} = 14.44(m)$$

$$h_B = \frac{0.13324 \times 260}{2} = 17.32(m)$$

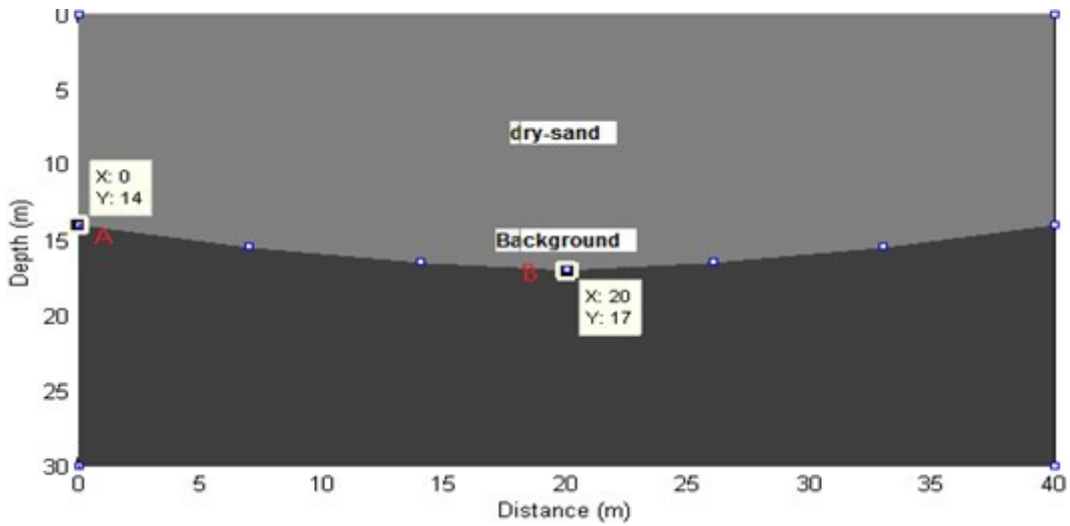


图 3-13 浸润线地质雷达检测图像

由图3-13，计算可得A、B点反演结果与实际深度相对误差分别为3%与1.8%。由此可见，浸润线地质雷达检测结果精度较高，完全符合实际检测需要。

3.4 小结

本章首先对地质雷达探测尾矿库浸润线的适用性进行了可行性分析，通过对尾矿库探测环境和地质雷达探测能力的分析计算，我们认为探测浸润线是完全可行的。为了探究浸润线雷达图像的反射特点，我们利用了GPRSIM和MATGPR进行正演分析。其中，GPRSIM的正演分析了过渡区各种类型波的分布情况，显示了浸润线附近存在复杂的杂波干扰，在中部曲率较大处杂波较为明显，我们认为是附近曲面反

射波所致;在MATGPR的正演中,浸润线的形态特征有较好的体现,通过其图像特征,分析认为浸润线的地质雷达检测是完全可行的,其图像特征为与浸润线一致的异常反射同相轴曲线;同时,通过MATGPR正演图像还发现,过渡层会减弱浸润线反射信号的强度,使反射特征变得不明显,同时还会使浸润线位置上移,因此可以认为过渡层的存在影响了浸润线检测的精度,增加了图像解释的难度。最后,课题利用正演结果的数据做了反演示例,通过浸润线的雷达图像能轻松的反演出浸润线的位置,反映了浸润线的地质雷达图像解释具有很好的操作性,能容易的通过图像识别出浸润线信号特征,得出浸润线深度,进一步说明了地质雷达检测尾矿库浸润线是的有效性。

第4章 尾矿库浸润线地质雷达探测实例

通过正演分析，浸润线的雷达图像表现为一异常反射的特征曲线。在地质雷达实测中浸润线的回波信号还受其他因素影响，如空洞、异物、尾矿砂密度等，其检测图像可能更加复杂。根据地质雷达探测原理和正反演分析经验，课题对某尾矿库浸润线进行了检测。

4.1 工程概况

拟探测的尾矿库初期坝已经形成，目前处于堆坝阶段。尾矿砂的主要成分含有钛铁矿、硫化矿、橄榄石、钛辉石、钛闪角石、斜长石等。初期坝采用滤水堆石坝，坝顶高程为1705m，坝底高程为1658.5m，坝高为46.5m，坝顶宽6m，距坝顶高程每15m处设一马道，马道宽2m。尾矿库采用上游法堆坝，利用尾矿堆筑子坝，堆坝方法采用推土机堆子坝，人工配合修整边坡和护坡。该尾矿库设计总坝高241m，总库容3085.6万 m^3 。根据《选厂尾矿设施设计规范ZBJ1》(已废止，暂无替代规范)的规定，按尾矿库的总库容小于10000万 m^3 ，大于1000万 m^3 ，尾矿库等级为三等；按总坝高241大于100m，尾矿库等级为二等，综合考虑尾矿库为二等库。

4.2 地质雷达探测尾矿库浸润线

4.2.1 雷达选型与测线布置

本次尾矿库浸润线探测采用美国GSSI公司生产的SIR20型地质雷达仪。天线频率选用低频组合天线，频率在15至80MHz之间，可自行组合使用。根据矿山的实际情况，结合前面章节理论分析，选用20MHz和40MHz天线，由表2-1可知，探测深度可达50m左右，能满足探测需要。

由于天线的总长度有2.4m，所以测线选择的位置必须空旷足以满足天线的移动，目前该尾矿库初期坝顶有6m宽，堆积子坝还未形成，所以本次探测把浸润线测线布置在初期坝顶位置。测线的方向沿着初期坝的纵向，由一侧坝肩测向另一侧坝肩，基本呈直线。鉴于地质雷达信号线只有50m长，而初期坝长105m，测线只能分几段进行检测。在前50m测线中我们采用了20MHz探测，剩下部分采用40MHz探测。

4.2.2 雷达图像反演分析

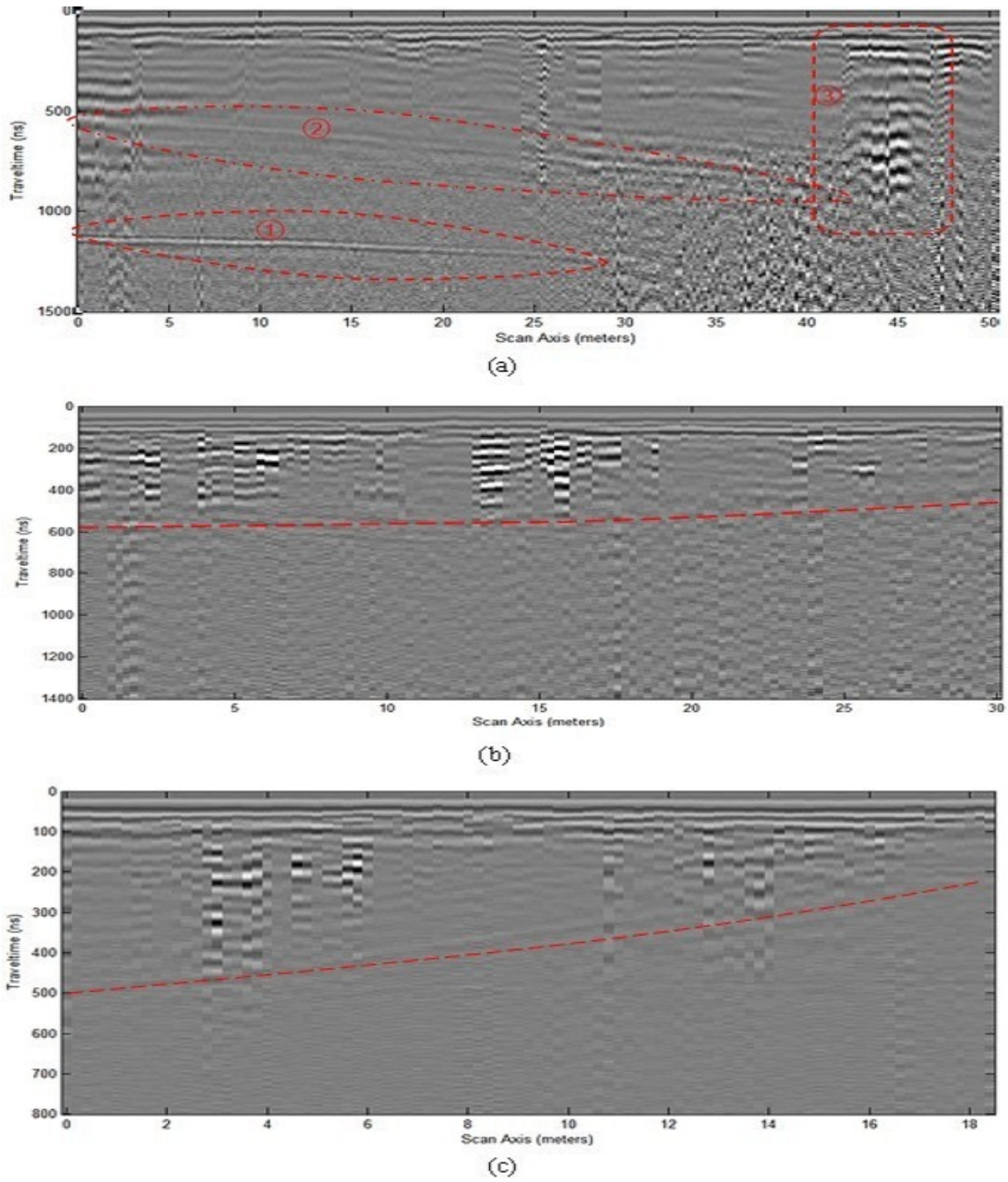


图 4-1 (a)20MHz、0-50m段；(b) 40MHz、50-70m段；(c)40MHz、80-100m段

在浸润线实际探测过程中，第一条测线为0—50m，采用的天线频率为20MHz，时窗1500ns，共扫描269道，如图4-1(a)所示；第二条测线分为了两次测，分别为30m和20m测段，其中前30m采用20MHz天线，时窗为1400ns，共扫描124道，后20m测段采用40MHz天线，时窗设置为800ns，共扫描93道，分别如图4-1中(b)、(c)。

1、图像解释

在前一章正演分析中，我们得出浸润线的雷达回波特征为与浸润线走势吻合的曲线。周松等人大坝浸润线探测资料显示，浸润线雷达图像为一道亮线^[2]，而易兵等人在贮灰坝浸润线的探测中，将浸润线图像描述为条带状连续反射^[2]。由于雷达频率和探测条件的不同，浸润线的图像特征略有差异，但都可以总结为一连续反射特征曲线。本次探测的雷达图像如图4-1，其图像解释主要包括浸润线判断和异常回波的解释。

(1) 浸润线的判断。依据上述浸润线判定标准，图4-1(a)中所示①和②曲线都可被考虑为浸润线，而两条浸润线显然是不合适。从深度上看，曲线①比曲线②更深，通过考察期坝体，发现存在混凝土构筑物，因此可以断定，①为尾矿砂到混凝土界面回波，②为浸润线回波曲线，其较弱的反射曲线也验证了非饱和到饱和是逐渐变化的，非饱和到饱和过渡区域会减弱浸润线的回波强度。下图为10m处的A-Scan解析。

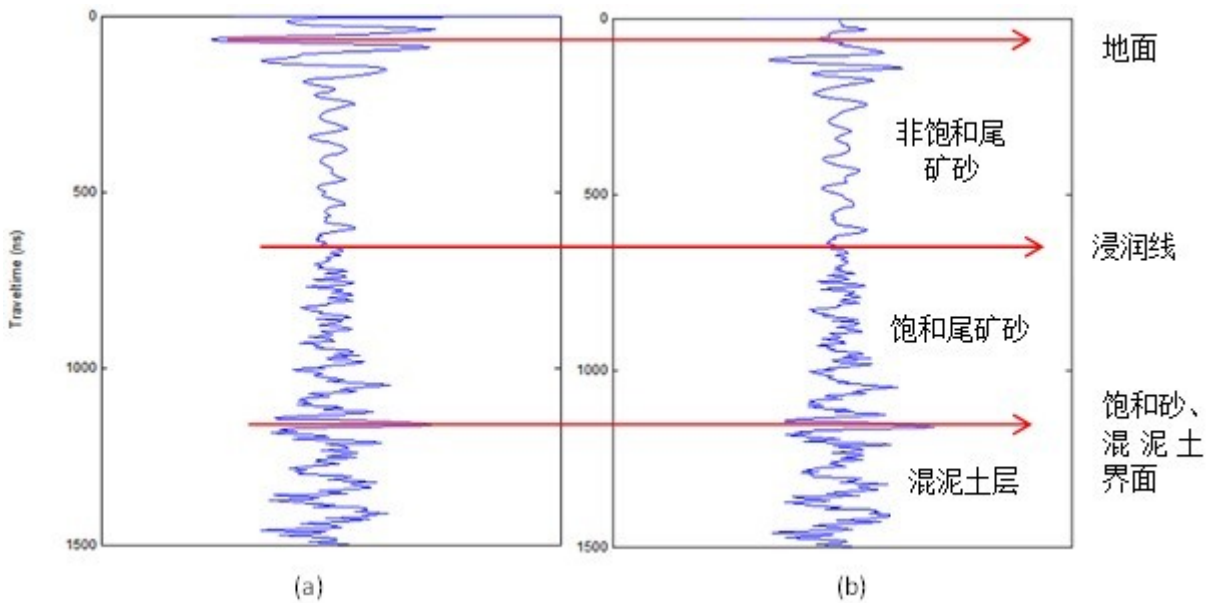


图 4-2 地质雷达A-Scan图像(a)原始图像；(b)背景滤噪后图像

(2) 异常回波解释。如4-2(a)中③所示，图像出现了异常的多次反射，浸润线因为这些强烈反射的干扰而难以辨识。根据一般经验，如果地质雷达天线拖动不当很容易造成图像脱节出现类似多次强反射图像；另一种情况是存在金属涵洞^[2]，由于金属的反射系数最大，接近1，会有极强的振幅出现，在45m处其A-Scan图像如

图4-3(b), 与10m处的A-Scan相比, 其振幅明显大很多, 因此可以推断尾矿库中可能存在金属涵洞, 导致异常多次回波反射图像的出现。

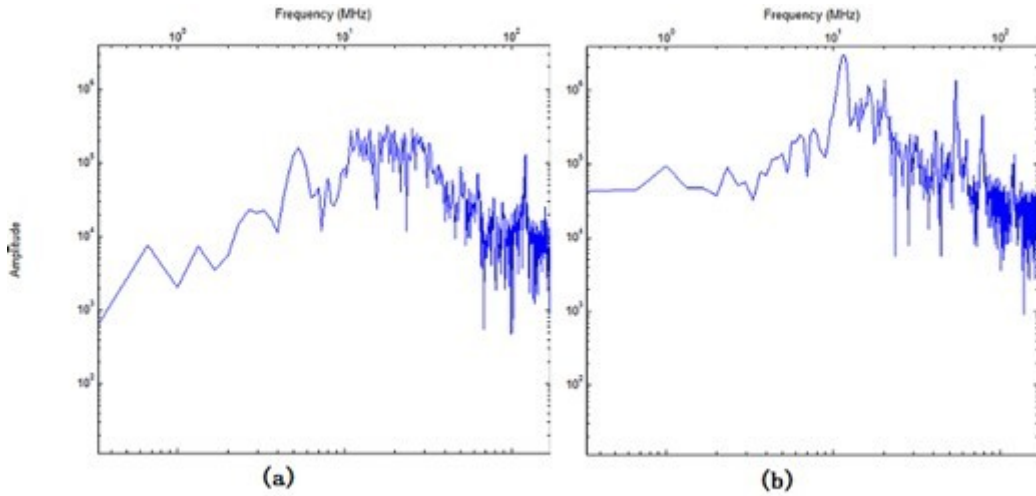


图 4-3 A-Scan的频谱图(a)10m处的频谱图; (b)45m处频谱图

(3) 层状反射条纹。除了雷达图像浸润线曲线和异常回波图像外, 背景图像的主要特征为逐渐减弱的层状反射条纹, 考虑到尾矿砂由非饱和砂土到饱和砂土, 是一个含水率渐变的区域, 其反射系数也是渐变过程。因此, 层状反射条纹可以解释为尾矿砂含水率渐变引起回波反射渐变的图像。

2、时深转换

在大坝浸润线探测中, 一般采用金属物标记的方法, 利用金属物回波双程走时做参照, 对探测图像进行时深转换。在没有埋设参照物的情况下, 我们也可以通过介电常数估算波速, 进行时深转换, 但这种估算方法跟介电常数选取有关, 容易出现较大误差, 在尾矿库环境中, 根据尾矿砂含水量的不同, 介电常数也存在较大差异, 波速不易估算。在前面章节中我们已经分析了尾矿库的介电模型, 此处我们将以介电常数和电导率近似计算波速, 对探测图像进行时深转换。

干砂的相对介电常数一般介于5–8之间, 湿砂相对介电常数介于25–30间, 由于尾矿库是一个重力脱水环境, 有选矿厂排出的水补充, 因此其含水量应该较大, 介于此我们取平均介电常数为18, 电阻率取 $200\Omega\cdot m$ 利用Banno速度模型计算可得波速为 $0.07m/ns$ 。利用MATGPR时深转换功能`time to depth`最终可得图4-4的图像。需要注意的是此图包含了天线到地面空气的距离, 如图4-1所示, 雷达图像实际是地下

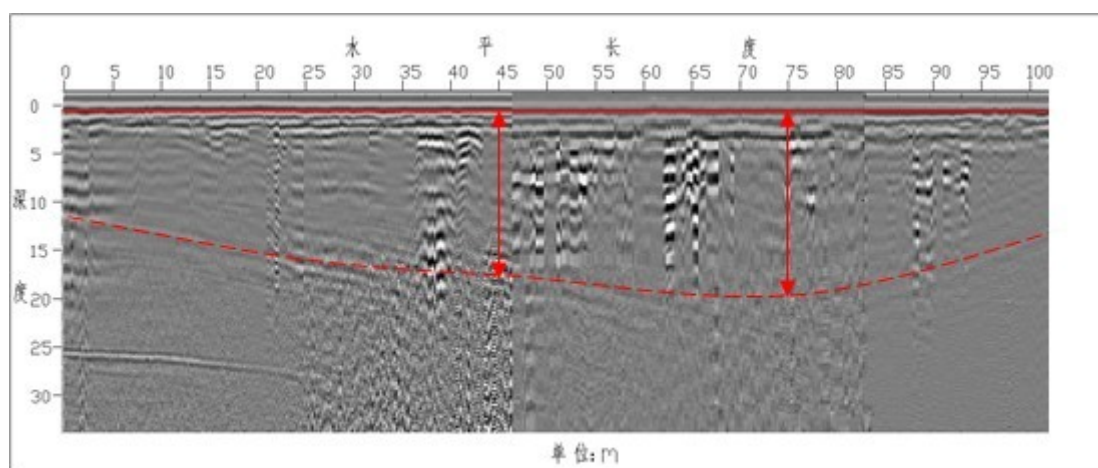


图 4-4 尾矿库浸润线雷达探测合成图像

深度和地面空气层的和，因此实际深度应减去空气深度，即浸润线深度应上移。

3、验证分析

为了验证雷达探测结果的准确性和可靠性，在雷达测线上选择了2个位置进行了钻孔作业，然后安装了测压管，通过测压管内的水压力测量得到了2个探点下的浸润线水位，分别为45m处和75m处。为了准确的将两处的雷达探测深度与实测深度做比较，我们将45m处雷达的A-Scan做分析。其图像如图4-5。可知其双程走时为490ns，波速为0.07m/ns，其深度可知为17.15m，+75m处的A-Scan数据由于探测原因，数据不理想，只能通过综合走势从图上判断，由4-4可知其深度大约为19.5m，与实测数据对比如下表。

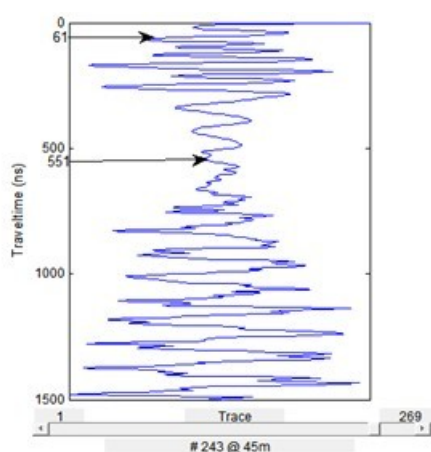


图 4-5 +45m处A-Scan图像

表 4-1 测压管实测与雷达探测浸润线深度比较表

探点位置	实测结果(m)	雷达结果(m)
0+45m	15.7	17.15m
0+75m	18.07	19.50m

从与测压管数据对比上看，雷达探测结果的误差分别为9%和8%，超过一般5%的可接受限度。但是，分析数据可知结果都为雷达探测大于实测数据，说明此误差不属于随机误差，应该属于后期处理的问题，并且通过合理手段是可以消除的。分析认为以下原因可能造成雷达探测大于实测结果。

(1) 介电常数选误差。在时深转换中由于是估算的平均介电常数和电阻率，难免存在误差，如果将介电常数18换为20，则可以缩小探测误差在5%内。由于介电常数对波速影响很大，分析认为介电常数选取是引起探测误差的主要原因。

(2) 浸润线位置的确定有误差，由于杂波环境的干扰，浸润线位置并不能非常精确，只能通过回波振幅和相位的走势大概判断，这会引入一定的误差。

(3) 实测误差。探点实测结果通过测验管测量，由于测压管测量特点其结果并不与真实浸润线位置一致。测压管是将测点的压力反应成一定体积的水头，因此测压管本身测值与真实测值存在误差与滞后。另外就是测压管容易受泥沙沉积及进水孔堵死的影响，测压管管底高程时沉淀管存在滞水而造成观测水位偏高的假象。

综上分析，从浸润线整体趋势来看，其走势中间低两边高符合尾矿砂重力脱水的特点。在数据准确性方面由于介电常数采用估值方式造成了波速计算有比较大的误差，但是这些误差通过其他手段是可以消除的，例如常用的已知目标换算，几何刻度法等，都可以得到准确的波速。因此，研究认为，探测和实测结果的差异是客观存在的，这种差异主要来源于观测误差、绘图不准确或雷达图像后处理的误差等。只要在雷达探测和后处理过程中注意各种因素的影响来消除偏差，那么雷达对浸润线的探测结果是完全可用的。总体而言，雷达测出的坝体浸润线深度分布是比较接近坝体实际情况的可以用于指导尾矿库的安全管理与维护预警工作。

4.2.3 小结

本章通过利用地质雷达实测浸润线，检验了地质雷达探测浸润线的可靠性和准确性。在实测中通过雷达图形，验证了浸润线的连续弱反射的特征，反映了正演模拟的图像特点。在图像解释中，我们通过深度和反射强度区分了混凝土界面和浸润

线界面，时深转换中利用了介电常数估算波速，最后通过钻孔探点的深度验证了雷达探测效果。在验证分析中我们发现雷达探测结果大于实测结果，分析认为是介电常数估算误差导致最后的探测结果误差。

通过以上分析和论证，浸润线是能够通过地质雷达探测的，其图像特征表现为同相轴构成的连续反射带，单振幅较弱，反射不够明显;要准确测定浸润线深度，需要波速进行时深转换，波速可以通过介电常数计算，或者埋设标记物测量计算，只要通过合理方法消除测量中的误差，实现浸润线深度的准确测定是完全可行的。

结论

5.3 研究结论

课题分析了地质雷达探测机理，研究了尾矿库介电特性，探讨了浸润线过渡区水分布模型，利用GPRSIM、MATGPR正演分析了浸润线地质雷达图像反射特征，并用SIR-20型地质雷达对某尾矿库浸润线进行了探测，研究得出以下结论：

(1) 尾矿物的主要成分为石英砂，其介电特性主要由尾矿砂的含水率决定。浸润线上下界面砂土由非饱和到饱和，含水量差异大，能对地质雷达波造成强烈的反射，通过地质雷达能探测到浸润线回波的异常，其特征为与浸润线自身形态吻合的连续反射带。

(2) 饱和尾矿砂到干砂之间存在一个过渡区域，其含水率逐渐减小。过渡层的存在增加了雷达图像的识别难度，影响地质雷达的探测精度，当过渡区的厚度小于波长时其影响有限。

(3) 合理的正演手段能提高地质雷达探测图像的解释准确度，在尾矿库浸润线探测中，利用多种正演手段相结合能更好的分析解释雷达图像。

(4) 理论计算、正演模拟和实际探测表明，通过合理的探测和数据处理方法，地质雷达探测的误差可以控制在较小范围以内，符合一般探测要求，利用地质雷达实现尾矿库探测浸润线的探测要求是完全可行的。地质雷达探测技术相对于传统的浸润线探测方法，具有无损、高效、廉价的特点，无需钻孔和安装设备，探测灵活，结果稳定可靠，作为尾矿库浸润线的一种补充或替代的探测方法，具有较高的实用价值。

5.4 不足及展望

本选题对尾矿库浸润线地质雷达探测应用的可行性进行了分析，并实测验证了地质雷达的实用性。由于各种原因，研究中还存在着一些不足，主要有以下几个方面：

(1) 尾矿库浸润线探测环境考虑不完善。由于缺乏各类型尾矿库介质的电性资料，无法对一些特殊的尾矿库环境作分析，如磁性介质尾矿，未分析地质雷达在各

型尾矿库浸润线检测中的适用性。

(2) 尾矿库浸润线过渡层模型需要验证。研究中所采用的过渡层模型为实验室砂土浸润线模型，与实际尾矿砂的浸润线过渡层有区别，缺乏实测验证。

(3) 浸润线正演模型简化处理有缺陷。饱和分界面到干砂的过渡是连续变化的，而实际正演中无法建立连续过渡模型，只能用多级介质层代替，其最终结果并不能完全展现出浸润线的反射特征。

(4) 尾矿库浸润线地质雷达探测技术细节还需要探讨。如重复连续反射的图像解释，尾矿库电磁波波速估计等需要做进一步分析。

综上，目前地质雷达探测浸润线存在的主要问题是，对尾矿库探测环境不够熟悉，对尾矿介电特性，水分分布等缺乏足够的资料，对浸润线图像异常信号的解释还缺乏经验。未来的研究趋势应该加强对尾矿库电性特征分析，利用正反演方法提高对浸润线图像的处理水平，逐渐完善尾矿库浸润线地质雷达探测方法。

致 谢

首先衷心的感谢我的导师王永强副教授，感谢他的悉心指导和帮助。本文从选题、准备、到具体的实验及论文的撰写无不倾注了王老师的心血。他严谨求实的治学态度、敏锐的学术洞察力以及脚踏实地、精益求精的工作作风，将对我今后的工作、学习和生活起到重要影响，使我终身受益。

在地质雷达试验中，得到了实验室罗老师的全力协助，得以顺利完成实验，感谢罗老师的帮助和支持。

感谢我的室友及同组的各位同学对我论文和学习上大力的帮助。

感谢安全08级的全体同学，难忘和大家在一起的快乐时光，我们的真情长存，友谊之树常青。

最后，衷心感谢我的父母和家人!他们对我无私的爱和关怀是我坚强的后盾，使我无论遇到什么困难和挫折都能够勇往直前，在此表示我衷心的感谢。