

# 地质雷达在引水隧洞衬砌检测中的 正演模拟研究

吕阿谈

(岩土工程事业部工程监测与物探研究院)

**[摘要]** 基于时域有限差分方法,模拟了地质雷达信号在引水隧洞衬砌中单层、双层钢筋、钢筋缺失、不同直径钢筋、不同埋深钢筋、钢拱架、含钢筋网的钢拱架、衬砌厚度不足、衬砌背后脱空的响应特征。结果显示表明:钢筋的响应特征为开口向下的双曲线,钢筋的水平间距若是小于主频天线的水平分辨率时,其响应特征叠加在一起不易分辨,钢筋的垂直间距若是小于主频天线的垂直分辨率时,第一层钢筋信号的屏蔽作用会使第二层钢筋的反射信号消失,同时随着钢筋埋深的增加,其响应信号越弱,双曲线开口越大,其顶点位置即为钢筋所处位置。钢拱架的响应特征也为开口向下的双曲线,由于钢拱架的尺寸较大,双曲线开口较大,由于钢筋网的屏蔽作用,会使钢拱架的响应特征信号较弱,不易确定钢拱架的信息。衬砌厚度不足的响应特征为由于介电常数的差异,会形成一个较明显的反射界面,同时存在多次绕射波。衬砌背后脱空的响应特征为脱空较大时,地质雷达反射信号会在脱空所处位置的界面形成较强的信号,随着脱空尺寸的减小,其响应特征逐渐变为开口向下的双曲线。

**[关键词]** 地质雷达 时域有限差分 钢筋 钢拱架 衬砌厚度 脱空

## 1 研究背景

新建引水隧洞,衬砌是隧洞的主要承载结构和重要的防水设施,受施工中诸多因素的影响,引水隧洞衬砌可能会出现达不到设计要求的质量问题,引水隧洞衬砌施工质量的好坏,将直接影响引水工程的使用寿命<sup>[1-2]</sup>。因此,为及时发现引水隧洞衬砌质量问题,需及时的对引水隧洞衬砌质量进行快速和高分辨率的检测。地质雷达作为一种检测引水隧洞衬砌施工质量的一种无损检测方法,其采用先进的连续扫描无损探伤技术,探测精度高,连续扫描,可获得引水隧洞衬砌探测的连续结果,具有快速、高效、经济、简便的优点,对引水隧洞环境具有很强的适应性,目前已经被广泛应用于引水隧洞衬砌施工质量检测。

## 2 地质雷达原理

### 2.1 地质雷达基本原理

地质雷达探测原理是利用高频电磁波以宽频带短脉冲的形式来探测隐蔽介质分布和目标物。当发

射天线向被测物发射高频宽带短脉冲电磁波时,遇到不同介电特性的介质就会有部分电磁波能量返回,接收天线接收反射回波,并由主机记录下来,同时记录反射时间,形成雷达剖面图(如图1)。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁波场强度以及波形将随所通过介质的电磁特性及其几何形态而发生变化。因此,根据接收到的电磁波特征,及波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度、频率和波形等,通过雷达图像的处理和分析,可以推断出介质的内部结构以及目标体的深度、形状等特征参数,进行地质解释<sup>[3]</sup>。

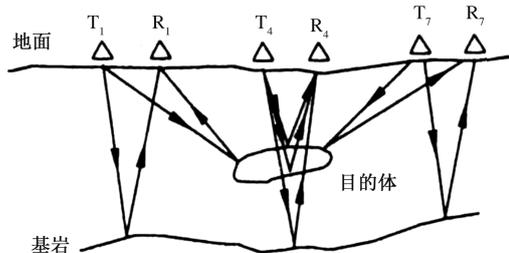


图1 地质雷达原理示意图

**作者简介:**吕阿谈(1990—),男,安徽省界首人,工程师,硕士,从事工程物探工作。

## 2.2 地质雷达对引水隧洞衬砌检测可行性分析

### (1) 引水隧洞衬砌反射系数分析

地质雷达波是一种超高频短脉冲电磁波,其具有波的一般属性,在不同介质的传播过程中,会产生反射、透射和各种绕射,对引水隧洞衬砌的探测主要由反射回波信号的强弱所决定,其强弱主要由反射系数决定。

在岩层环境中,磁导率基本保持不变,反射系数为:

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ —为上下地层的相对介电常数。

引水隧洞衬砌中,岩石的相对介电常数4~8,混凝土的相对介电常数4~20,钢筋等一些金属的相对介电常数为 $\infty$ ,这些结构物与围岩的相对介电常数存在较大的差异。因此,可以选用地质雷达进行引水隧洞衬砌质量的检测。

### (2) 地质雷达垂直分辨率

地质雷达垂直分辨率是指地质雷达在垂直方向上分辨一个目标体的最小厚度的能力,即目标体顶部和底部的反射波不重叠,能够被区分,一般把 $\lambda/4$ 作为地质雷达垂直分辨率的下限。即:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{4} = \frac{C}{4f_c \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ —电磁波在介质中的波长; $C$ —电磁波在介质中的波速; $f_c$ —地质雷达天线的中心频率; $\varepsilon_r$ —介质的介电常数。

### (3) 地质雷达水平分辨率

地质雷达的水平分辨率是指其在水平方向上分辨最小目标体的能力。根据电磁波的波动理论,入射波入射到界面发生反射时,在第一菲涅尔带内,反射波与入射波的光程差为 $\lambda/2$ ,发生相长性干涉,波的振幅增强,在雷达剖面上能够清晰地看到发射波形。在第二菲涅尔带内,反射波与入射波光程差为 $\lambda$ ,发生相消性干涉,电磁波的振幅减弱,可能得不到理想的反射波形。其中第一菲涅尔带半径 $r_f$ 为

$$r_f = \sqrt{\frac{\lambda h}{2}} = \sqrt{\frac{Ch}{2f_c \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}}} \quad (3)$$

式中: $h$ —地下目标体埋深; $\mu_r$ —磁导率。

理论上,地质雷达分辨地下目标体的水平尺寸必须大于 $\frac{1}{4}$ 倍的第一菲涅尔半径,探地雷达分辨相邻目标体的间距必须大于第一菲涅尔半径<sup>[4]</sup>。

## 3 引水隧洞衬砌正演模拟

### 3.1 正演模拟软件 GPRMax 介绍

GPRMax 是一款地质雷达正演模拟软件,其模拟的基础基于时域有限差分法(FDTD),由 Antonis Giannopoulos 教授研发。FDTD 是 K. S. Yee 在 1966 年提出的<sup>[5-6]</sup>,该方法直接求解依赖于时间变量的麦克斯韦旋度方程组:

$$\Delta \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_1 \quad (4)$$

$$\Delta \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{J}_2 \quad (5)$$

$$\Delta \times \vec{B} = \rho_1 \quad (6)$$

$$\Delta \times \vec{D} = \rho_2 \quad (7)$$

式中: $\vec{H}$ —磁场强度; $\vec{E}$ —电场强度; $\vec{B}$ —磁感应强度; $\vec{D}$ —电位移矢量; $\vec{J}_1$ —电流密度; $\vec{J}_2$ —磁流密度; $\rho_1$ —电荷密度; $\rho_2$ —磁荷密度。

由上式可以看出,将旋度方程化为一组电场和磁场各分量的偏微分方程,然后将电场和磁场各分量交叉取样,利用二阶精度的中心差近似将这一组偏微分算符转换为差分形式,这样达到在一定空间和一段时间上对边界电磁场的数据抽样,在时域对电磁场作用过程进行直接模拟。时域有限差分法对整个计算空间划分网格,为保证计算精度,通常每波长至少用 10 个以上网格<sup>[5]</sup>。时间步长的确定则利用数值稳定性条件确定,即:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (8)$$

式中: $\Delta t$ —时间步长; $\Delta x$ — $x$  方向上的步长; $\Delta y$ — $y$  方向上的步长; $\Delta z$ — $z$  方向上的步长。

本文采用 GPRMax 进行正演模拟,采用的边界条件是理想匹配层吸收边界条件,其基本思想是在计算区域边界附近引入虚拟各向异性有耗媒质,在一定的条件下,模拟空间与理想匹配层间、理想匹配层内部层间完全匹配,模拟区域内的外行电磁波可以无反射的进入有耗媒质,并在有耗媒质中进行衰减,从而有效吸收模拟区域内出射的外行波。

### 3.2 钢筋正演模拟研究

#### 3.2.1 均匀介质模拟

对于正演模拟,首先需要设置均匀介质模型,通过均匀介质正演模拟的结果与均匀介质中含有结构物的正演结果进行对比,方可显著的显示出地质雷

达在检测引水隧洞衬砌中正演模拟的响应特征。后文的模型模拟未做特殊说明,参数均与此表参数一致。其中  $H_r$  为设计模型的厚度,  $\sigma_r$  为设计模型的电导率。具体参数设置如表 1。

表 1 均匀介质正演模拟参数设置表

参数名称	参数信息
基本模型	2.5 m×2.5 m
空气层(第一层)	$H_r = 0.01$ m, $\epsilon_r = 1.0$ , $\sigma_r = 0$ s/m, $\mu_r = 1.0$ H/m
衬砌(第二层)	$H_r = 0.49$ m, $\epsilon_r = 10$ , $\sigma_r = 1$ s/m, $\mu_r = 1.0$ H/m
围岩(第三层)	$H_r = 2.00$ m, $\epsilon_r = 4$ , $\sigma_r = 0.00001$ s/m, $\mu_r = 1.0$ H/m
网格单元步长	$\Delta x = \Delta y = 0.0025$ m
时窗	18 ns
计算步长	115
主频天线	900 MHz
天线位置	发射天线(0.0875, 0.008), 接收天线(0.1125, 0.008)
天线移动步长	0.02 m

经过正演模拟获得均匀介质的模型示意图 2 和正演模型成果图 3。

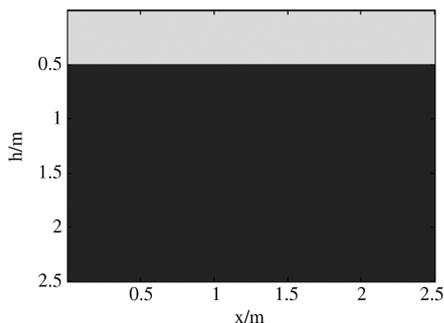


图 2 均匀介质模型示意图

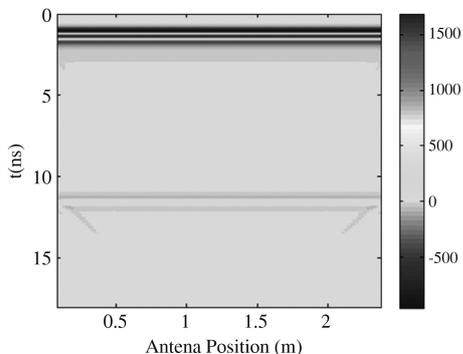


图 3 均匀介质正演模型成果图

由图 3 均匀介质正演模型成果图中可以看出,在每层的均匀介质中,地质雷达没有反射波信号。

由于空气层与混凝土界面,混凝土界面与围岩的相对介电常数存在明显的差异,在正演成果图中存在两个反射界面,第一个反射界面是设计的空气层与混凝土的界面所产生的反射界面,由于空气层与混凝土的相对介电常数相差较大,第一层反射能量较强;第二个反射界面为混凝土与基岩的界面,电磁波随着传播深度的增加,能量逐渐衰减,第二层反射界面的能量相对较弱。

### 3.2.2 单层钢筋模拟

地质雷达检测引水隧洞衬砌中单层钢筋时,首先需要了解单层钢筋在地质雷达图像上的信号特征,然后根据这些信号特征在地质雷达图像上寻找钢筋的信息,因此,通过地质雷达在单层钢筋上的正演模拟,研究钢筋的反射信号特征,以期指导地质雷达检测人员正确判断钢筋的信号。

具体模型设计为钢筋的相对介电常数为  $\infty$ ,电导率为  $\infty$ ,磁导率为 1.0 H/m,钢筋直径为 0.01 m,钢筋间距为 0.20 m,埋深为 0.10 m。通过正演模拟获得图 4 和图 5。

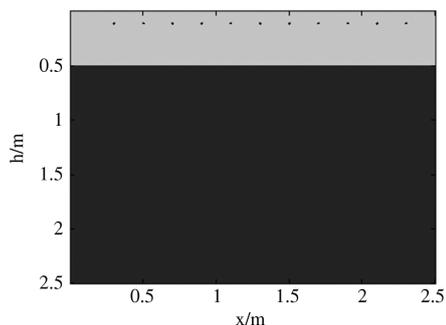


图 4 单层钢筋模型示意图

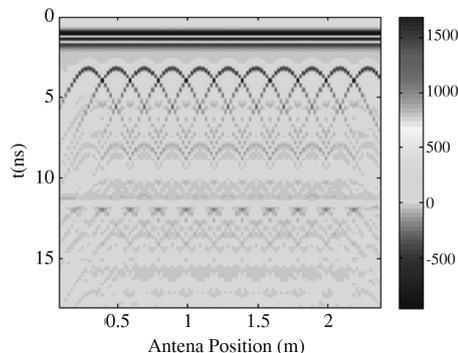


图 5 单层钢筋正演成果图

从图 5 中可以看出,由于钢筋与混凝土的相对介电常数差距大,钢筋信号在地质雷达图上特征反应明显,反射回波信号强,存在多次波,波形为开口

向下的双曲线特征,根据模型与正演成果图对比,双曲线顶点所在的位置为钢筋所在位置,其埋深可以根据双曲线顶点处的时间与电磁波波速求得,由  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$  和  $h = \frac{v \cdot t}{2}$  计算可以求得钢筋的深度,并确定其位置<sup>[7]</sup>。经计算,钢筋所处位置与模型设计的埋深相一致。由于钢筋对电磁波尤其是高频电磁波吸收强烈,混凝土与围岩界面仅反射部分低频电磁波,反射能量较弱<sup>[8]</sup>。

### 3.2.3 不同间距钢筋模拟

不同间距钢筋模拟的模型参数为钢筋间距分别为 0.40 m、0.30 m、0.20 m、0.10 m、0.05 m,埋深均为 0.10 m。通过模拟获得如图 6 和图 7。

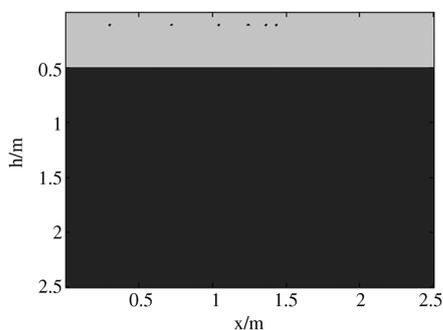


图 6 不同间距钢筋模型示意图

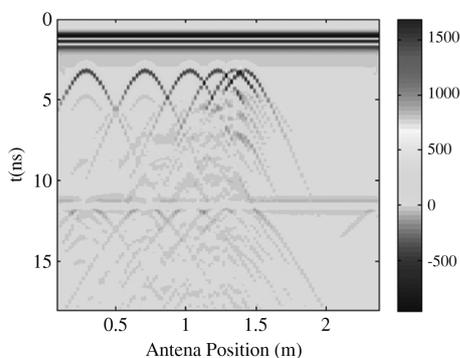


图 7 不同间距钢筋正演成果图

从图 7 中可以看出,随着钢筋间距的逐渐缩小,钢筋之间的反射波信号开始相互干扰,不易分辨出钢筋的具体位置,这是受限于主频 900 MHz 天线的横向分辨率,根据上述公式计算主频 900 MHz 天线的横向分辨率是 0.07 m,当钢筋间距小于横向分辨率 0.07 m 时,地质雷达反射回来的信号相互干扰,不易分辨出两根钢筋的具体位置,只有当钢筋的间距大于 0.07 m 时,两根钢筋在地质雷达检测的过程中才能够很好的区分开,确定双曲线的顶点位置,即钢筋的位置。因此,地质雷达进行检测钢筋时,我们

需要首先确定钢筋的间距,然后选择相适应的天线,这样才能高效率准确的判读钢筋。

### 3.2.4 钢筋缺失模拟

现场采用地质雷达检测引水隧洞衬砌时,主要目的就是要确定施工过程中钢筋的铺设是否按照设计要求进行施工,以防偷工减料,因此,通过地质雷达正演模拟获得钢筋缺失的反射信号特征,以便指导现场工作人员的工作。

具体模型设计为 11 根钢筋,直径为 0.01 m,设计钢筋间距为 0.20 m,埋深均为 0.10 m。缺失两根钢筋,具体缺失位置为第五根和第九根钢筋。通过模拟获得图 8 和图 9。

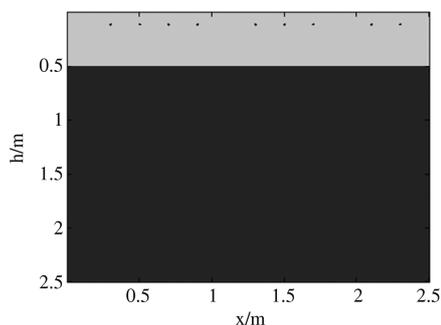


图 8 钢筋缺失模型示意图

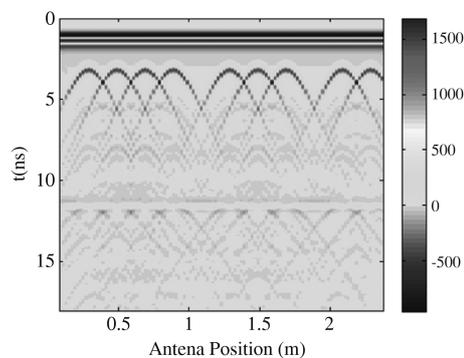


图 9 钢筋缺失正演成果图

从图 9 中可以看出,当钢筋间距均为 0.20 m 时,钢筋的反射双曲线是均匀分布的,根据双曲线顶点可以确定钢筋的埋深和位置;当钢筋缺失时,两个双曲线之间的距离增大,比较容易确定钢筋缺失的具体位置。从图中看出,第五根和第九根钢筋间距增大,判断缺失第五根、第九根钢筋。

### 3.2.5 不同埋深钢筋模拟

不同埋深钢筋模拟,钢筋埋深分别为 0.10 m、0.15 m、0.20 m、0.25 m、0.30 m、0.40 m、0.45 m、0.50 m。通过模拟获得如图 10 和图 11。

从图 11 中看出,随着钢筋埋深的增大,钢筋反射的双曲线开口逐渐增大,由于电磁波在传播过程

中,能量逐渐衰减,钢筋反射的双曲线逐渐模糊,并且不同埋深的钢筋反射双曲线互相干扰,最后一根钢筋的反射双曲线顶点位置已不能明显看出,根据双曲线的特征,可以大致确定钢筋的埋深和位置。因此,在探测深度较深的钢筋时,需要选择合适的天线进行检测,否则,在检测的过程中可能会探测不到钢筋反射信号,导致钢筋的漏查。

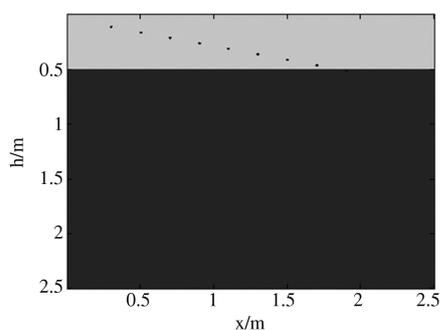


图 10 不同埋深钢筋模型示意图

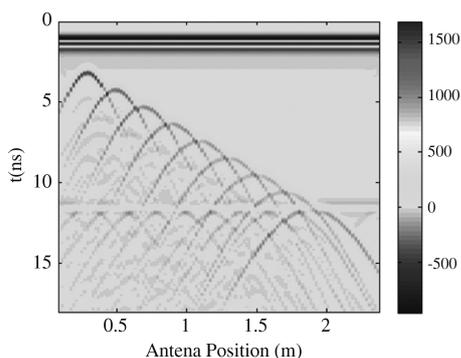


图 11 不同埋深钢筋正演成果图

### 3.2.6 不同直径钢筋模拟

不同直径钢筋模拟,钢筋直径分别设计为 0.01 m、0.015 m、0.02 m、0.025 m、0.03 m、0.04 m、0.045 m,通过模拟获得如图 12 和图 13。

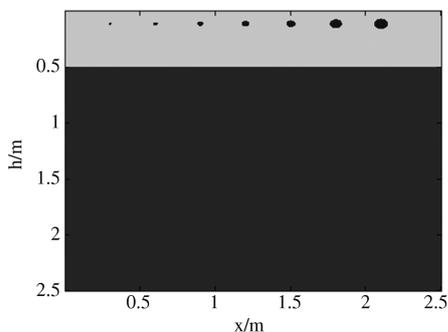


图 12 不同直径钢筋模型示意图

从图 13 中可以看出,钢筋的反射信号为开口向下的双曲线特征,随着钢筋直径的增大,其反射信号

逐渐增强,双曲线顶点的位置反射能量逐渐增强,更加容易确定钢筋的位置,但是双曲线的开口大小却没有明显的变化,说明双曲线的开口大小与钢筋直径没有直接关系,同时通过模拟可以了解地质雷达无法检测钢筋直径的大小。

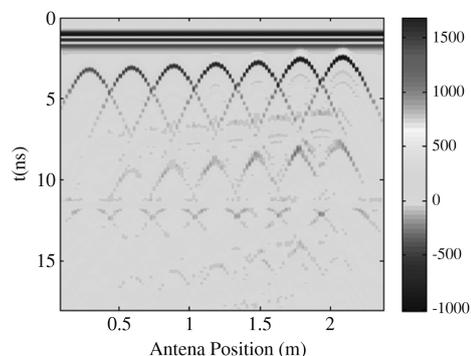


图 13 不同直径钢筋正演成果图

### 3.2.7 双层钢筋模拟

对于双层钢筋的检测,从理论上讲第一层钢筋的反射信号的屏蔽,地质雷达很难检测到第二层钢筋,因此,通过地质雷达正演模拟,获得双层钢筋的反射信号特征,以期指导现场地质雷达检测引水隧洞衬砌双层钢筋的检测,对检测结果获得更好的判读。

具体模型设计为:第一个双层钢筋模型为:第一层钢筋埋深为 0.10 m,第二层钢筋埋深为双层钢筋埋深为 0.12 m;第二个双层钢筋模型为:第一层钢筋埋深为 0.10 m,第二层钢筋埋深为 0.30 m。具体模型示意图如图 14、图 16。模型正演成果图如图 15、图 17。

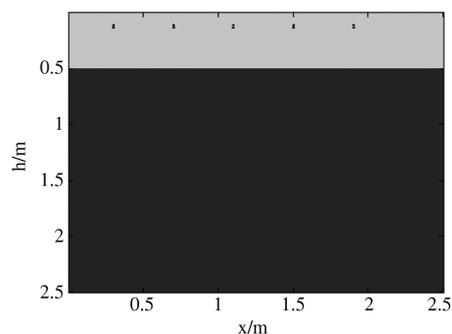


图 14 第一个模型双层钢筋模型示意图

从图 15 中可以看出,只能发现第一层钢筋的反射双曲线,顶点位置即为第一层钢筋所在的位置,第二层的钢筋的反射双曲线无法看出,这是因为主频 900 MHz 天线的垂直分辨率经过计算为 0.03 m,双层钢筋的垂直间距只有 0.02 m,小于主频 900 MHz 天线的垂直分辨率,在正演模拟时,900 MHz 的天线

是不能够区分出第二层钢筋。同时双层钢筋的多次反射较严重,在混凝土与基岩的界面处发现双层钢筋的多次反射双曲线,这个位置未设置钢筋,在现场检测过程中,容易误判为钢筋。

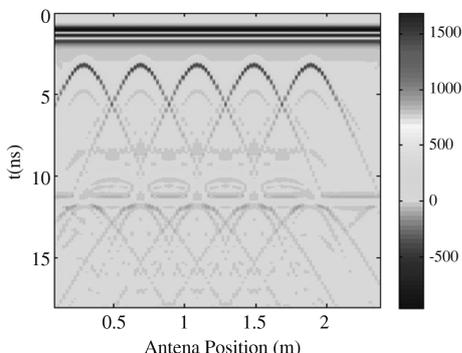


图 15 第一个模型双层钢筋正演成果图

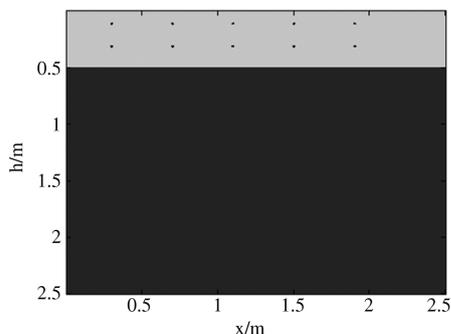


图 16 第二个模型双层钢筋模型示意图

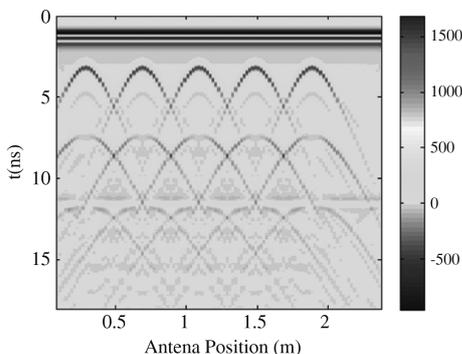


图 17 第二个模型双层钢筋正演成果图

从图 17 中可以看出,不但可以分辨出第一层的钢筋反射双曲线,也可以分辨出第二层钢筋反射的双曲线,这是因为双层钢筋的垂直间距 0.20 m 大于主频 900 MHz 天线的垂直分辨率,在正演模拟时,900 MHz 的天线是能够区分出第二层钢筋,由于第一层钢筋反射信号屏蔽和第二层钢筋埋深的影响,第二层钢筋反射双曲线开口较大,反射能量比较弱,双曲线顶点不如第一层明显。因此,在现场检测时,需要根据双层钢筋的间距合理选择天线的频率。

### 3.3 钢拱架正演模拟研究

引水隧洞在开挖过程中,如遇地质条件不好的岩性,衬砌中需要架设钢拱架进行支护,钢拱架的施工是否按照设计要求进行施工,因此,采用地质雷达进行检测钢拱架,通过正演模拟,获得钢拱架的反射信号特征,以期指导现场地质雷达检测钢拱架时对于钢拱架的判读。

#### 3.3.1 钢拱架模拟

具体模型设计为:钢拱架的相对介电常数为  $\infty$ ,电导率为  $\infty$ ,磁导率为 1.0 H/m,尺寸为 0.10 m  $\times$  0.15 m,间距为 0.20 m,埋深为 0.50 m。通过模拟获得如图 18 和图 19。

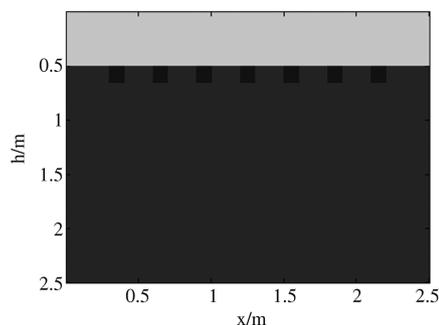


图 18 钢拱架模型示意图

从图 19 中可以看出,在混凝土与基岩的交界处的反射界面上存在七个钢拱架的反射信号,反射信号均为开口向下的双曲线特征,由于钢拱架尺寸较宽,钢拱架的反射双曲线开口较大,双曲线顶部较宽,这是与钢筋反射双曲线的区别。通过双曲线的形态可以确定钢拱架的数目以及钢拱架之间的距离。通过回波时间以及电磁波速度,可以确定钢拱架的埋深和位置。因此,在现场采用地质雷达检测钢拱架时,通过判断钢拱架反射信号的双曲线特征进一步判断钢拱架的信息。

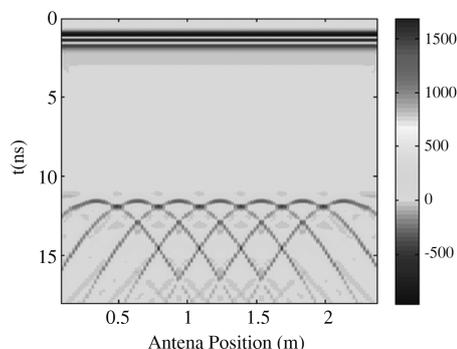


图 19 钢拱架正演成果图

#### 3.3.2 钢筋和钢拱架模拟

引水隧洞开挖的岩性地质条件较差时,如 VI 类

围岩,衬砌中既要设置钢拱架,还需设置有钢筋,通过地质雷达正演获得引水隧洞衬砌中含有钢拱架和钢筋的反射信号特征,对于现场地质雷达检测衬砌的成果判读具有一定的指导意义。

具体模型设计为:钢筋埋深为 0.10 m,钢筋间距为 0.20 m,钢拱架尺寸为 0.10 m×0.15 m,间距为 0.20 m,埋深为 0.50 m。通过模拟获得如图 20 和图 21。

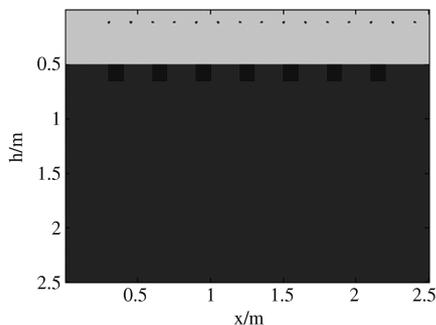


图 20 钢筋钢拱架模型示意图

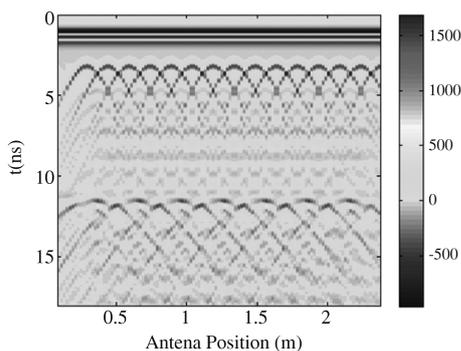


图 21 钢筋钢拱架正演成果图

从图 21 中可以看出,由于钢拱架上方存在钢筋,钢筋的反射信号能量强,大部分能量已经反射回去,下层的钢拱架反射信号较弱,很难分辨出其特征,因此,在地质雷达现场检测衬砌中存在一层钢筋的钢拱架时,由于钢筋反射信号的屏蔽,地质雷达探测出钢拱架的反射信号比较弱,需要对其信号的放大,在进行成果判读时,需要结合设计资料以及钢拱架的反射信号特征进行综合判读。

### 3.4 衬砌厚度不足模拟

在引水隧洞衬砌施工过程中,由于施工工艺以及现场条件的影响,可能存在施工衬砌厚度不满足设计的要求,因此,对衬砌厚度不够的情况进行地质雷达正演模拟,获得其信号响应特征在地质雷达图中表现形式,以此在现场检测中指导技术人员对衬砌厚度不够的情况进行准确判读。

具体模型设计为衬砌设计标准为 0.49 m,衬砌

厚度最薄处为 0.24 m。通过模拟获得如图 22 和图 23。

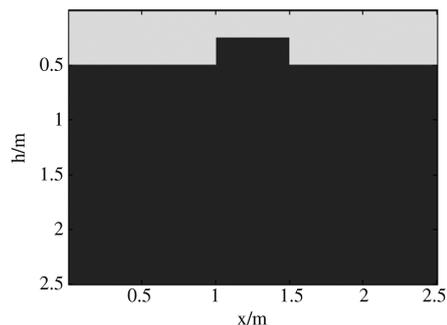


图 22 衬砌厚度不够模型图

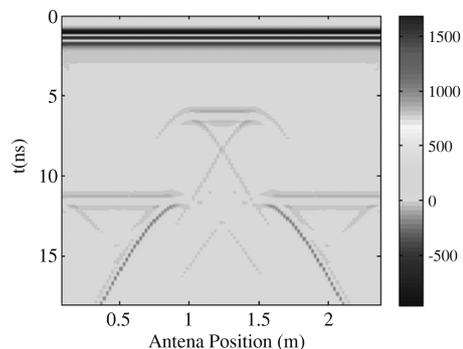


图 23 衬砌厚度不够正演成果图

从图 23 中可以看出,混凝土与基岩界面存在一条十分明显的界面,由于衬砌最薄处厚度只有 0.24 m,在二衬最薄处出现一条反射能量较强的界面,此界面的大小就是衬砌厚度最薄处的埋深,根据电磁波波速以及时间可以计算出衬砌最薄处的厚度。衬砌最薄处两边的曲线是由于电磁波在传播过程中遇到界面所产生的绕射。因此,在现场对引水隧洞的地质雷达检测衬砌厚度的过程中,需要寻找反射界面,通过反射界面进一步判断二衬的厚度。

### 3.5 衬砌背后脱空模拟

引水隧洞的施工中,由于施工工艺的影响,有些衬砌背后可能存在脱空现象,由于脱空现象的存在,衬砌可能起不到支护和防水的功能,对于引水隧洞的正常使用带来安全隐患。因此,本文模拟衬砌背后存在脱空时地质雷达的反射信号特征,对于采用地质雷达现场检测脱空缺陷具有指导技术人员更加准确的判读脱空缺陷。

具体模型设计为倒三角脱空尺寸 0.4 m×0.3 m、0.3 m×0.2 m、0.2 m×0.1 m,正方形脱空为 0.10 m×0.10 m。通过模拟获得如图 24 和图 25。

从图 25 中可以看出,在脱空与混凝土交界面处脱空的反射能量较强,存在多次反射波,随着脱空尺

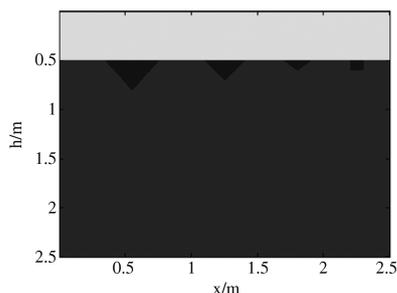


图 24 脱空模型示意图

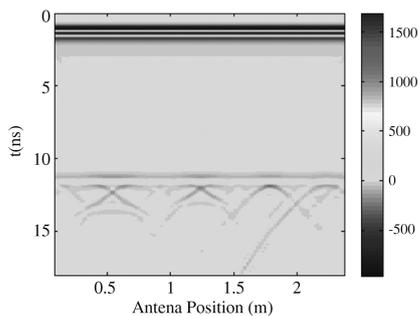


图 25 脱空模型正演成果图

寸的减少,位于交界面处的反射能量逐渐减弱,当脱空尺寸减小到一定程度时,脱空的反射波特征逐渐变为双曲线特征,顶点位置即为脱空的顶界面中心位置,同时,脱空的响应特征与脱空的形状关系不大。因此,根据脱空正演模拟成果图可以指导现场检测脱空缺陷时,对脱空缺陷进行准确判读。

### 4 实测资料

图 26 是地质雷达检测某引水隧洞衬砌钢筋的地质雷达剖面图,从图中可以看出,钢筋的响应特征为开口向下的双曲线,地质雷达对钢筋的反射能量比较强,由于屏蔽作用的影响,钢筋下方的信号反射很弱,基本上看不到有用的反射信号。从图中看出,第 18 到 19 根、第 19 根到 20 根、第 20 到 21 根、第 44 根到第 45 根、第 45 根到 46 根钢筋之间的距离明显增大,可以判断出这几处之间钢筋缺失。

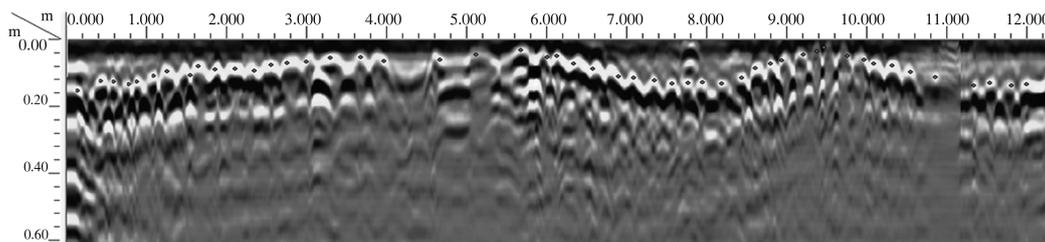


图 26 地质雷达检测衬砌中钢筋剖面图

图 27 是地质雷达检测某引水隧洞衬砌背后脱空的地质雷达剖面图,从图中可以看出,脱空的反射特征为开口向下的双曲线形态,与钢筋的响应特征所不同的是其反射能量较弱,在桩号 154+761 和 154+763.4 埋深 0.50 m 的位置处存在两处脱空,经取芯验证,在埋深 0.47 m 时,取出的芯样为空的,与

地质雷达检测的结论对应的较好。

图 28 为地质雷达检测某引水工程衬砌厚度的地质雷达剖面图,从图中可以看出,在桩号 163+591.000~163+594.3 处出现一个错段的强反射界面,最薄处的衬砌厚度只有 0.10 m。

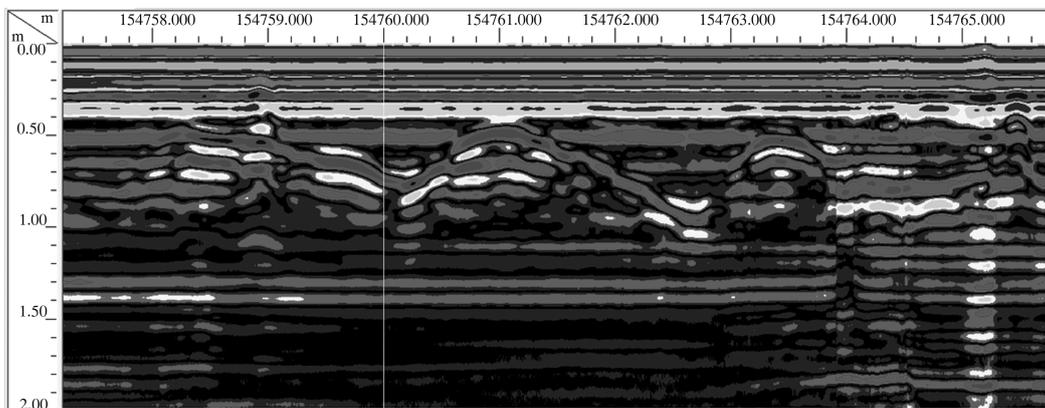


图 27 地质雷达检测衬砌背后脱空剖面图

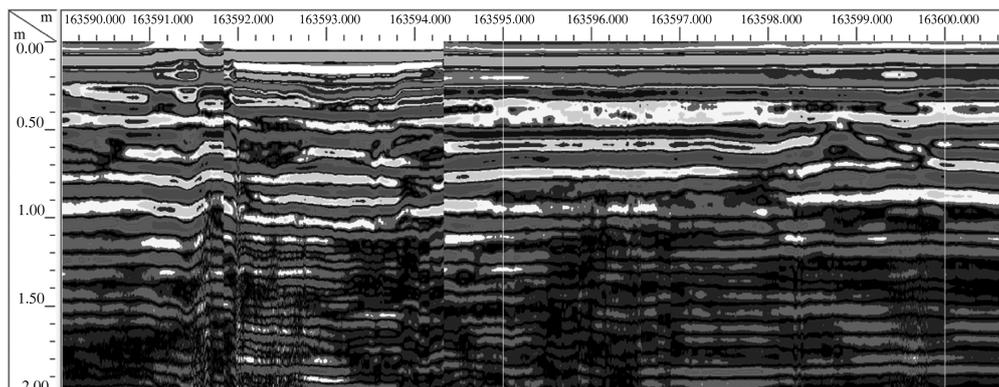


图 28 地质雷达检测衬砌厚度不足地质雷达剖面图

## 5 结语

通过对引水隧洞衬砌的正演模拟以及与实测资料的对比分析,可知,地质雷达对于检测引水隧洞衬砌中的钢筋和钢拱架需要根据设计资料进行综合选择地质雷达的主频天线,这样才会达到理想的效果。对于检测衬砌背后脱空和衬砌厚度不足需要采集高质量的数据并结合现场地质资料进行综合判读,才会得到较精确的结果。

根据钢筋、钢拱架、脱空和衬砌厚度不足的电磁参数,建立精确的地质模型,通过地质雷达正演软件 GprMax2D 和 Matlab 软件可以得到较精确的钢筋、钢拱架、脱空、衬砌厚度不足的正演模拟图像,清晰的反映出其成像特征,证明地质雷达在引水隧洞衬砌的检测和图像识别是可行的,其响应特征能够为技术人员的准确判读提供重要依据。

## 参考文献

- [1] 李孟娟,李川.探地雷达检测隧道衬砌厚度的研究[J].物探化探计算技术,2008,30(3):231-234.
- [2] 孙仲辉,刘金坤等.基于 GprMax 的隧道衬砌地质雷达检测正演模拟与实测数据分析[J].工程地球物理学报,2013,10(5):730-735.
- [3] 曾昭发,刘四新,王者江.探地雷达方法及应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [4] 李大心.探地雷达方法与应用[M].北京:地质出版社,1994.
- [5] Yee, K, S. Numerical Solution Of Initial Boundary Value Problem Involving Maxwell Equations In Isotropic Media [J]. IEEE Trans Antennas Propagate, 1966, 14(3): 302-307.
- [6] 周奇才,李炳杰等.基于 GprMax 的探地雷达图像正演模拟[J].工程地球物理学报,2008,5(4):396-399.
- [7] 葛德彪,阎玉波.电磁场时域有限差分方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [8] 张建锋,张兴昕,贾城琿.地质雷达特征影像与岩溶不良地质现象的对应关系[J].工程测量与检测,2015,33(3):163-165.

## 高海拔宇宙线观测站工程

高海拔宇宙线观测站(LHAASO)是“十二五”期间国家重大科技基础设施之一,由中国科学院高能物理研究所、中国科学院成都分院和四川省共建。LHAASO 的核心科学目标是探索高能宇宙线起源并开展相关高能辐射、天体演化甚至暗物质分布等基础科学的研究。其探测器阵列分为四个部分,分别是:水切伦科夫探测器(WCDA)、缪子探测器(MD)、电磁粒子探测器(ED)、广角切伦科夫望远镜(WFCTA),建成后将是世界上海拔最高、规模最大、灵敏度最强的宇宙线探测装置,同时与现有国际三大宇宙线研究中心(位于南美的 3000 平方公里极高能宇宙线 AUGER 实验,南极的立方公里中微子 ICECUBE 实验,欧洲的伽马天文台定点观测 CTA 装置)形成极好的互补,在国际上形成强大的吸引力,为国家相关科技发展需求做出重要的贡献。

LHAASO 建设地点位于四川省稻城县海子山自然保护区,是青藏高原上最大的古冰川遗址,平均海拔高度约 4410 m,占地面积达 1.36 平方公里。主体工程于 2017 年 6 月开工建设,我公司主要承担主体及附属工程的建设监理工作。截至 2020 年底,基建工程已全面完工,四分之三探测器阵列实现了科学观测运行。