

# 基于地质雷达的隧道超前地质预报技术及其应用研究

黄金山<sup>1</sup>, 林从谋<sup>1</sup>, 黄俊贤<sup>2</sup>, 郑强<sup>1</sup>, 杨海书<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021; 2. 泉州经济技术开发区清濛开发建设有限公司, 福建 泉州 362006)

**摘要:**为了提高地质雷达进行超前地质预报的质量和效率,在众多实践经验的基础上采用统计归纳的方法对参数设置、数据处理和图像判读三个重要环节进行了分析,得出了各个扫描参数的实用参考值,归纳了四种常用滤波算法的应用技巧和滤波效果的评判标准,总结了反射波三要素的变化规律和图像解释的基本方法。最后,结合前埭隧道超前地质预报项目,应用本文方法进行检测与分析,得到的预报结论经开挖验证与实际相符,表明了扫描参数实用参考值的合理性和图像判读的准确性。

**关键词:**地质雷达;超前地质预报;参数设置;图像判读;数据处理

中图分类号:U452.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)01-0047-06

## Advance Geological Forecast Technology and Application Research in Tunnel Construction Based on the Geological Radar

HUANG Jinshan<sup>1</sup>, LIN Congmou<sup>1</sup>, HUANG Junxian<sup>2</sup>, ZHENG Qiang<sup>1</sup>, YANG Haishu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China; 2. Qingmeng Development and Construction Limited Company, Quanzhou Economic and Technological Development Zone, Quanzhou, Fujian 362006, China)

**Abstract:** In order to improve the quality and efficiency of advance geological forecast with geological radar, three important links, such as the parameters setting, the data processing and image interpretation were analysed by using the statistical and inductive methods based on a number of practical experiences and, the practical reference values of all scanning parameters were obtained and, the application skills of four commonly used filtering algorithms and the criteria of filtering effect were induced, and the regularities of three key elements of reflection waves and the basic method of image interpretation were summarized. Finally, the conclusion was that the forecast result was in accord with the practical values of excavation and showed the rationality of scanning reference parameters and veracity of image interpretation by combining with the geological forecast project of Qiandai tunnel.

**Key words:** geological radar; advance geological forecast; parameter setting; image interpretation; data processing

地质雷达是一种用于探测地下深层构造的探测设备。经过 40 多年的发展,如今已被广泛应用于考古、建筑、铁路、公路、水利、电力、采矿、航空等多个工程建设领域,尤其是在超前地质预报和工程质量检测工作中扮演着越来越重要的角色<sup>[1]</sup>。虽然地质雷达功能强大,用途广泛,但是要想获得满意的扫描图像和准确的预报结果却依然是困扰工程技术人员的一个难题。在实际应用中为了提高超前地质预报的准确性,除应综合各方面的基本信息加以考虑外,更应注重参数设置、数据处理和图像判读等方面的深入研究。本文结合南惠高速公路前埭隧道工程实践,详细分析了地质雷达工作流程中三个重要环节,较全面地总结了应用地质雷达进行超前地质预报时应遵循的基本规律,其成果对工程技术人员提高地质雷达预报准确性有重要的参考价值。

## 1 雷达扫描参数的确定

现场采集是利用地质雷达进行地质探测至关重要的第一个环节,它直接影响到探测工作的最终成果。

收稿日期:2010-09-25

基金项目:福建省自然科学基金项目(2006J0445);福建省交通科技发展项目(200910)。

作者简介:黄金山(1983—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事地下结构工程方面的研究。E-mail:254744964@qq.com.

现场采集步骤可参考文献[2],在此不再赘述。进行现场采集前最重要的一个步骤就是确定雷达扫描参数<sup>[3-8]</sup>,合适的参数有助于获取主要地质信息而忽略次要的干扰信号。根据多年的现场实践经验和统计分析,对隧道超前地质预报的实用参数设置总结为以下几点。

1) 精确确定掌子面岩石的相对介电常数需通过做现场波速试验,然后根据  $v=c(\epsilon_r)^{-1/2}$  计算得出;无条件做波速试验时可采用实用参考值。根据对一般岩土介质的统计分析,各种岩石(主要包括砂岩、灰岩、页岩和花岗岩等)的相对介电常数变化范围为 4.5~10.3,平均值为 7.1。各种土(主要包括粘土、壤土、沙土、煤和完全风化的岩石等)的相对介电常数变化范围非常大,且对含水程度十分敏感,在干燥情况下相对介电常数变化范围为 3.3~7.6,平均值为 5.4;在潮湿情况下相对介电常数变化范围为 8.8~28.0,平均值为 18.4。实践中可根据含水程度将土分为低含水土(饱和度小于 33%)、中含水土(饱和度为 33%~67%)、高含水土(饱和度大于 67%)三个级别,相对介电常数可依次取为 12.0,18.4,24.8。现场检测时应根据实际条件在平均值的基础上适当增减。

2) 当前地质雷达中心频率的范围在 5~3 000 MHz 之间,而适用于隧道超前地质预报的仅限于中低频天线,比如 50,100,200,250 MHz 的天线。通过对探测深度和探测精度这一对矛盾的两个方面的试验研究得出:采用 100 MHz 的天线做隧道超前地质预报较为理想;其它检测项目,如初衬检测可采用 800 MHz 的天线,二衬、仰拱检测可采用 500 MHz 的天线。另外,为保证隧道超前地质预报效果,天线应采用屏蔽天线,为满足隧道施工对地质情况预测的要求,探测深度应控制在 10~30 m 左右,精度应控制在 50 cm 以内。

3) 由于掌子面一般不平整,行走条件较差,故采用点测(手动触发)效果较好。初衬检测可采用时间触发方式,二衬检测可采用测距轮触发方式。

4) 点测时,测点间距过大会影响精度,过小又不好控制,经比较,设为 10~20 cm 比较合适。

5) 时窗主要用于设置采样深度,电磁波在岩土介质中传播的平均速度为 0.1 m/ns,所以 20 ns 即相当于 1 m 探测深度。如要探测 30 m 深度,为保证目标深度处的地质信息完整性,时窗可增加 10% 左右,则时窗可设为 600~660 ns。

6) 采样频率以取天线中心频率的 6~15 倍为宜,在不影响图像质量的条件下应尽可能取较大值。一般 100 MHz 的天线采样频率可取 1.0~1.2 GHz,500 MHz 的天线采样频率可取 7.5~8.0 GHz,800 MHz 的天线采样频率可取 10~12 GHz。

7) 采样点数是指设置在一道波线上样点的数量,采样点越多则表示深度方向上测点越密,可用于控制纵向分辨率。采样点数等于时窗乘以采样频率。

8) 叠加次数是指每个采样点接收的用于进行平均化处理的脉冲的个数。雷达每秒可发射 10 万个脉冲,该发射频率由硬件决定,电磁波的接收频率可人为控制。叠加次数越多,计算机处理数据的时间越长,天线移动速度则应适当放慢。一般做超前地质预报点测时叠加次数可设为 128 次,衬砌检测时叠加次数可设为 16 次,二衬检测时叠加次数可设为 8 次。

## 2 数据处理

### 2.1 滤波

滤波就是通过一定的算法,去除雷达记录中的干扰信号,使雷达记录突出主要地质信息,忽略次要地质信息,它对雷达记录的判读有着重要的意义。在隧道超前地质预报中常用到的滤波算法有:①去直流漂移,一般用于处理深部 1/3 的信号。②增益,一般按能量衰减规律进行增益,也可采用 AGC 分段增益。③去水平信号干扰,在非层状结构中一般很少出现水平的同相轴,如果有水平信号,则一般为干扰信号,应予去除。④带通滤波,功能是去除高频和低频信号,保留中心频率附近的信号,通常应使上限频率更靠近中心频率。实际应用中可选取低频信号较多的区域(黑白条纹较宽的区域)的频率值,设置带通滤波的下截频,选取高频信号较多的区域(黑白条纹较窄的区域)的频率值,设置带通滤波的上截频。以上 4 种滤波算法一般应按从 ①到④的顺序依次进行,亦可根据实际情况变通,总的原则是,最大限度地过滤掉干扰信号,从而逐步显示出主要地质信息。

## 2.2 超前地质预报中的典型波形特征

滤波效果的好坏,主要看处理后的图像是否突出了主要地质信息,同时过滤了次要干扰信号。下面是在多年实践经验的基础上总结出来的一些典型的波形特征<sup>[3]</sup>。

### 1) 地下管道波形特征(图 1)

地下管道的反射波呈向下的抛物线形,中间反射强,两侧很快衰减,尤其是金属管道,反射极强。反射弧形宽度与地下管道的直径和管道距地面的深度有关。

### 2) 混凝土中钢筋的波形特征(图 2)

电磁波几乎不能穿透钢板。对于混凝土中的钢筋来说,其反射电磁波的能力极强,在扫描云图上小的抛物线状图案即为混凝土中的钢筋。

### 3) 地下结构层面的波形特征(图 3)

地下结构层面为两种不同介质的接触面,介质差异越大则反射越强烈。根据介质介电常数的不同,反射波与入射波在界面处或同相或反相。反射波频率以低频成分为主。

### 4) 地下空洞反射波形态特征(图 4)

地下空洞反射波具有局部孤立体的特点,在波形图上表现为多次强反射,侧向散射波较弱。反射波频率以高频成分为主,与入射波同相,与表面反射波反相。

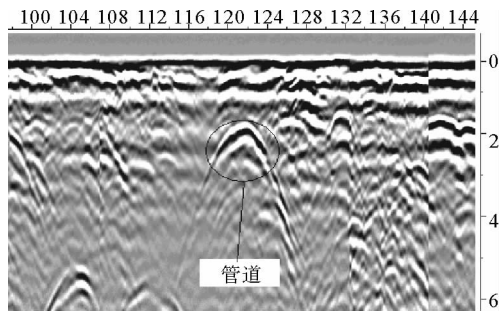


图 1 地下管道波形特征图

Fig. 1 The characteristics of wave profiles of underground pipelines

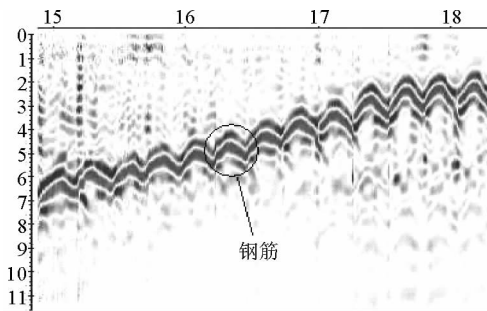


图 2 混凝土中钢筋的波形特征图

Fig. 2 The characteristics of wave profiles of reinforcements in concrete

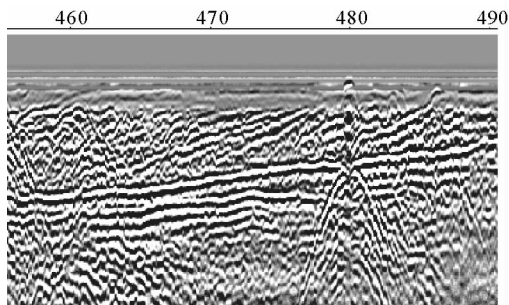


图 3 地下结构层面的波形特征图

Fig. 3 The characteristics of wave profiles of layers in underground structures

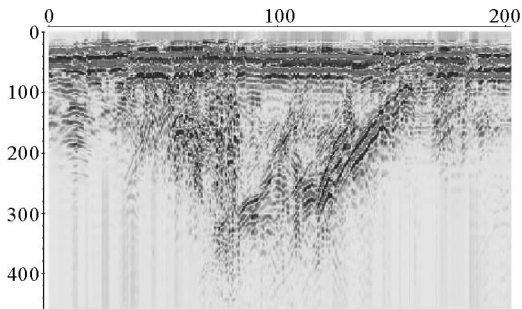


图 4 地下空洞反射波形态特征图

Fig. 4 The characteristics of reflection wave profiles of underground cavities

## 3 图像判读

对从现场采集到的雷达图像进行判读前,还应收集一些与工程有关的资料,以便将多方面的信息进行综合处理,得到正确的结论。需要收集的资料包括工程概况、周边环境、地形图,工程所在地的地质资料、前期

勘探成果,现场地质素描。

判读是理论与实践相结合的综合分析,需要坚实的理论基础和丰富的实践经验。雷达记录中采样点的瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位的变化规律是进行图像判读的主要根据。

1)在雷达记录的黑白云图上,灰度表示振幅,最白(黑)的点表示振幅最大的位置,黑白表示振幅相反。瞬时振幅是反射强度的量度,它正比于该时刻地质雷达信号总能量的平方根。根据电磁波在介质中的传播理论,分界面两侧介质的介电常数差异越大则电磁波的反射越强烈,从而表现为反射波振幅也越大。另外,波从介电常数小的介质进入介电常数大的介质时,反射波振幅与入射波振幅反相;反之,从介电常数大的介质进入介电常数小的介质时,反射波振幅与入射波振幅同相。

2)在雷达记录的波形图上两个波峰(波谷)之间的距离表示反射波的周期,也就是反射波频率的倒数。所以在图像判读时可根据波峰(波谷)间距来判断反射波的频率,间距较宽的波表示低频波,间距较窄的波表示高频波。瞬时频率是相位的时间变化率,它反映了地下介质的岩性变化,有助于识别地层。

3)在大致相同深度上的所有白色(黑色)的点连成的线即为同相轴,瞬时相位是地质雷达剖面上同相轴连续性的量度,能够显示反射波能量的强弱。当电磁波在各向同性的均匀介质中传播时,其相位是连续的;当电磁波在异常介质中传播时,其相位将在异常位置发生显著变化,在剖面图中显示出明显不连续。

雷达记录资料中,同一连续界面的反射信号形成同相轴。同相轴的各种性质,如时间、形态、强弱、振幅大小和方向等,是进行图像判读的重要依据。对于同一反射层,三种瞬时信息同时发生明显变化就可能反映地层的物性变化。在这三个参数中,瞬时相位的分辨率最高,瞬时频率次之,瞬时振幅由于跟能量衰减和深度有关,所以分辨率很低。但在能量堆积图中瞬时振幅反映最为直观,所以在实践中应首先根据瞬时振幅来确定异常或分层的大概位置,然后根据瞬时频率特征判断目标体的属性,最后利用瞬时相位精确确定异常体的位置和分层轮廓线。值得注意的是,同相轴的形态与埋藏物的界面的形态并非完全一致,特别是边缘的反射效应,使得边缘形态有较大的差异<sup>[9]</sup>。

#### 4 地质雷达在工程中的应用实例

前埭隧道位于泉三高速公路泉州支线(南安至惠安)公路工程 NHA3 合同段,为双洞单向行车双车道隧道(上下行分离)。隧道右洞, YK16+774~YK18+057,长 1 283 m;隧道左洞, ZK16+759~ZK18+056,长 1 297 m。前埭隧道洞口位于丘陵坡麓地带,坡体覆盖坡积含角砾质粘性土。坡体基岩裸露,岩体呈松散或镶嵌碎裂结构,风化程度较高。洞身位于坡陡丘陵之中,地面最高点 130 m,最大埋深 86 m。隧道穿越弱风化花岗岩,岩体较坚硬,呈粒状结构。围岩节理裂隙发育,多以近垂直和水平节理为主。地下水为风化基岩裂隙水,受大气降水补给,水文地质一般。2009 年 7 月 1 日对前埭隧道进口右洞 YK17+163 掌子面进行了超前地质探测。

现场试验时,沿隧道掌子面下部测试两次取平均值以减小误差,测线布置如图 5 所示。通过反复改变介电常数、探测深度、测点间距、时窗、采样频率、叠加次数等参数,获得了多幅扫描云图。然后分别对每幅云图进行滤波:第一步,选择深部 1/3 的信号(400~600 ns 之间的信号)进行去直流漂移处理,使深部信息还原为真实情况;第二步,采用能量衰减法增益;第三步,将图像上的直达波信号等水平信号去除;第四步,带通滤波,下截频设为 50 MHz,上截频设为 130 MHz。滤波处理后得到多幅波形图,经过比较,选择效果最好的一张(图 6)作为图像判读的依据。该

波形图对应的扫描参数如表 1 所示,表 1 同时给出了本文总结的经验参考值。

通过比较发现,按试验方法确定的参数基本上没有超出本文给出的经验参考值的范围,从而证明了

本文推荐的扫描参数参考值具有一定的可靠性和实用性。事实上,本文所总结的经验参考值是在众多高质量扫描图像中经过统计归纳总结出来的,所以经验参考值在隧道超前地质预报中具有一定的实用价值。

表 1 雷达扫描参数确定表

Tab. 1 The determination of the scanning parameters of geological radar

项目	介电常数	天线频率 /MHz	深度 /m	精度 /cm	检测模式	测点间距 /cm	时窗 /ns	采样频率 /MHz	叠加次数
经验值	7.1	100	10~30	50	点测	10~20	600~660	600~1 500	128
实际值	6.0	100	30	50	点测	20	600	1 300	128

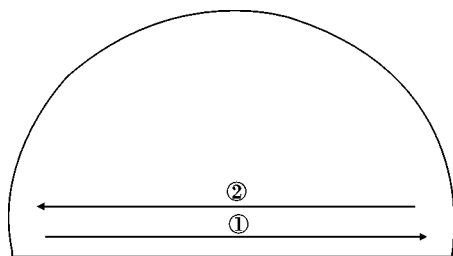


图5 测线布置图

Fig. 5 The layout of measuring lines

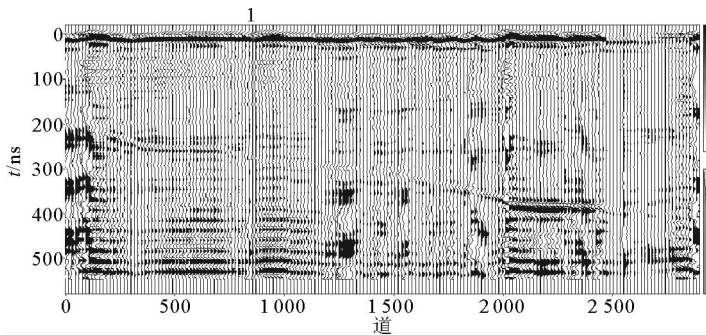


图6 前埭隧道进口右洞 YK17+175 掌子面地质雷达扫描云图

Fig. 6 The scanning nephogram of geological radar in the working face YK17+175 of the entrance of Qiandai's right tunnel

根据图6所示的波形图及其它相关资料,应用图像判读方法对波形图进行解释,得出探测结论:掌子面前方0~200 ns 范围内(深度约为0~10 m)电磁波反射信号较少,振幅微弱,初步判断此区段内,围岩节理裂隙不发育,岩层干燥,岩层完整性较好;在掌子面前方200~360 ns 范围内(深度约为10~18 m)探及一条构造带,通过电磁波同相轴追踪可得构造面位置与形态,构造面表面规整,宽度在1 m 以内;之后360~600 ns 范围内(深度约为18~30 m)岩石条件变差,岩性破碎,裂隙发育,含水丰富。从地形图上获知,当前掌子面前方30 m 处恰好位于隧道附近一水库正下方,故该破碎区中所含水分应为水库渗水。为了保证安全,建议施工方立即实施超前探水,并在掘进中加强支护,及时调整初期支护方式。

2009年7月4日右洞掘进到YK17+175时掌子面上出现了一条构造带,宽度约0.8 m,岩石极破碎(图7);7月7日掘进到YK17+187时掌子面顶部逐渐有管流涌出(图8)。由于施工单位在接到报告后已提前做好好了防范措施,从而避免了施工安全事故的发生。本次超前地质预报的成功,也反映了在参数设置、数据处理和图像判读上的正确性。



图7 前埭隧道进口右洞 YK17+175 掌子面上的地质构造带图

Fig. 7 The geological structure zone in working face YK17+175 of the entrance of Qiandai's right tunnel



图8 前埭隧道进口右洞 YK17+187 掌子面上的管流图

Fig. 8 The pipe stream in working face YK17+187 of the entrance of Qiandai's right tunnel

## 5 结论

地质雷达进行地质探测包括三个重要的环节:现场检测、数据处理和图像判读。现场检测是一切工作的基础,图像判读是检测工作的最终目标,达到目标的方法就是数据处理。本文较全面地总结了地质雷达在超前地质预报工作中应遵循的经验规律,并结合前埭隧道工程实践对研究成果进行了检验,所得预报结果与实践基本吻合。现对地质雷达在超前地质预报工作中应遵循的经验规律总结如下。

1)利用地质雷达进行隧道超前地质预报时,采集参数一般情况下变化范围较小,故可对采集参数进行统计分析,得到其经验参考值。在难以获得各参数准确值的情况下,直接应用经验参考值进行参数设置也能获

得较好的扫描图像,从而可在一定程度上提高工作效率,简化参数设置。

2) 数据处理主要是滤波,常用的有四种算法:①去直流漂移,②增益,③去水平信号干扰,④带通滤波。滤波要考虑两方面的问题:第一是各种算法之间的顺序,一般应按①→②→③→④执行,不同的顺序会得到不同的滤波效果;第二是各种算法本身的参数应合理,可按本文所述的原则进行设置,然后不断调整,直至呈现出典型波形特征为止。

3) 图像判读的基本方法就是紧紧围绕瞬时振幅、瞬时频率和瞬时相位三大要素进行地质信息的发掘。根据振幅确定目标位置,根据频率确定目标属性,根据相位确定目标边界,最后综合现场实际情况进行地质预报,得出结论。

#### 参考文献:

- [1] 于景兰. 国内探地雷达的应用与发展[J]. 地质与勘探, 2003, 39(增): 80-84.  
YU Jinglan. Application and prospect of home-made GPR[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(s): 80-84.
- [2] 中华人民共和国行业标准. TB10223-2004, 铁路隧道衬砌质量无损检测规程[S].
- [3] 赵永贵, 蒋辉. TST 隧道超前预报技术原理与应用[C]//中国地球物理学会第二十四届年会论文集. 北京: 中国大地出版社, 2008: 240.
- [4] 戴前伟, 吕绍林, 肖彬. 地质雷达的应用条件探讨[J]. 物探与化探, 2000, 24(2): 157-160.  
DAI Qianwei, LV Shaolin, XIAO Bin. A discussion on the applied condition of GPR[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(2): 157-160.
- [5] 白冰, 周健. 探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 527-531.  
BAI Bing, ZHOU Jian. Advances and applications of ground penetrating radar measuring technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 527-531.
- [6] 钟世航. 用探地雷达作勘察和工程检测需考虑介质的电导率[C]//中国地球物理学会第二十四届年会论文集. 北京: 中国大地出版社, 2008: 219-220.
- [7] 董延朋, 孔祥春. 影响地质雷达工作的因素分析[J]. 物探装备, 2007, 17(2): 130-133.  
DONG Yanpeng, KONG Xiangchun. Analysis of factors affecting ground-penetrating radar[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2007, 17(2): 130-133.
- [8] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [9] 韩振中, 张文连. 地质雷达在隧道检测中的波形识别及应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008(6): 66-68.  
HAN Zhenzhong, ZHANG Wenlian. Waveform recognition application of geologic radar in detection of tunnel[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2008(6): 66-68.