

探地雷达双天线法在隧道检测中的应用

王锦繁¹, 罗纪彬²

(1. 福建省交通建设工程试验检测中心,福建 福州 350011; 2. 湖南华昇交通规划设计研究院,湖南 长沙 410076)

摘要: 目前在隧道质量检测中较多应用地质雷达技术进行质量无损检测,且一般选用某一固定频率的天线进行检测。由于单一天线总有一定的局限性,因而对结果的判读多以个人经验为主,增加了对结果判断的主观干扰。文中采用双天线法进行隧道质量检测,结合2根天线的测试结果进行分析,使结果的判读更加准确,避免单一固定频率天线检测的不足,并充分减小人为因素的干扰,提高工程质量检测精度。

关键词: 隧道; 质量检测; 雷达; 双天线

中图分类号:U456.3

文献标识码:A

文章编号:1671-2668(2009)04-0234-04

利用探地雷达进行隧道无损检测,具有轻便、高效率、高精度、高分辨率、成果直观等优点,是目前其他检测方法所无法比拟的。但目前利用探地雷达进行检测时,多使用某单一频率天线进行检测,而单一天线总有测试精度和测试深度等因素的限制,这就对测试结果判读人员提出了较高的要求,也增加了结果判读的人为干预程度。本文以美国劳雷公司生产的SIR-20仪器为例,结合实际工程,探讨采用探地雷达双天线检测隧道的可行性和优越性。

测结果来看,支架沉降基本与计算相符。

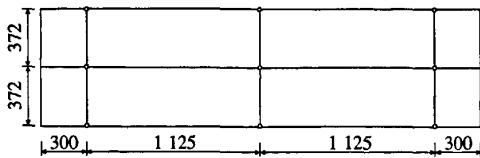


图8 贝雷梁沉降观测点示意图(单位:cm)

表1 支架沉降观测结果

观测工况	各测点沉降值/mm								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
浇筑第一层砼	14	13	14	10	9	11	13	12	14
浇筑第二层砼	22	20	21	18	17	18	21	19	20
浇筑第三层砼	23	22	22	20	19	19	22	21	21

4 结语

东沙特大桥主塔下横梁塔梁固结部分采用支架施工,操作简单、安全。通过对塔梁固结部分进行施

1 探地雷达检测原理及方法

1.1 探地雷达检测原理

探地雷达发射和接收的是高频电磁波,根据电磁波理论,电磁波在地下介质中的传播特性取决于介质的波阻抗 η ,而 η 又主要与介质的相对介电常数 ϵ 成比例关系,即 $\eta = 1/\sqrt{\epsilon}$ 。当相邻两层介质的 ϵ 存在差异时,也就是两介质的波阻抗 η 有差异时,入射到两结构层分界面上的电磁波产生反射,形成反

工分层,提高了塔梁施工的功效与质量。施工完成后对塔梁部分进行观测,未发现裂纹。其施工技术可为类似工程提供参考。

参考文献:

- [1] JTJ041-2000,公路桥涵施工技术规范[S].
- [2] 张宏武,汪成龙,马尚军,等.株洲湘江四桥主桥基础及下部结构施工[J].公路与汽运,2008(5).
- [3] 窦文俊,邵慧燕.石门大桥塔梁墩固结点设计研究[A].中国土木工程学会市政工程学会第三次全国城市桥梁学术会议论文集[C].1991.
- [4] 武志军.塔梁固结体系斜拉桥下横梁预加力效应研究[J].世界桥梁,2008(1).
- [5] 李正仁,朱运河,段自力.珠海淇澳大桥斜拉桥的塔梁墩固结处三维应力分析及三维光弹试验[A].第九届结构工程学术会议论文集(第I卷)[C].2000.
- [6] 许斌.浏阳河大桥塔梁固结段自密实混凝土施工[J].长沙铁道学院学报(社会科学版),2006(3).

收稿日期:2009-04-05

射波,该反射波被地面仪器接收到,从而使该结构层分界面被识别出来(见图 1)。这种波阻抗差异可用反射系数 R 表示:

$$R \approx (\eta_2 - \eta_1) / (\eta_2 + \eta_1) \approx (\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}) / (\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})$$

也可以用功率反射系数 P_r 表示:

$$P_r = |R|^2$$

反射系数直接反映了介质的电性及其差异。由上述表达式可知,在一定深度范围内,相邻两介质的 ϵ 差异越大,反射波越强,反射界面越容易识别。

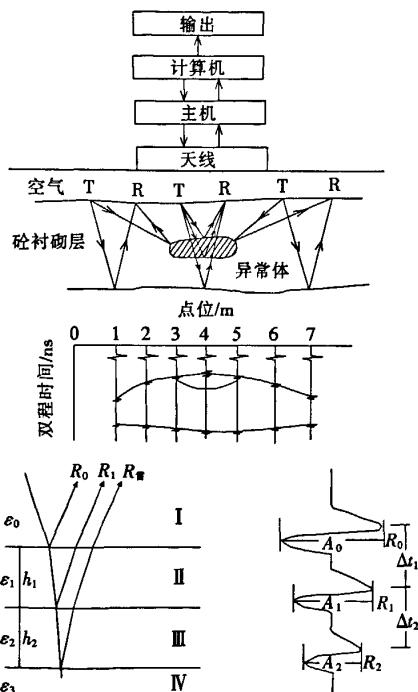


图 1 探地雷达工作原理图

1.2 数据采集方式及主要技术参数

1.2.1 数据采集方式

探地雷达在野外工作时有多种数据采集方式,如自由采集(Free)、连续采集(Continuous)、点采集(Step)等。考虑到隧道质量检测的特殊性,一般常采用点采集的方式。这种方式利用测量轮触发天线控制开关,可自动、均匀、连续地记录数据,数据采集效率高,其点距一般为 0.01~9.99 m,定位误差为土 0.2%,定点精度高。

1.2.2 参数选择

运用探地雷达检测隧道工程质量时,参数的选择是最关键的环节之一,主要包括点距、时窗、采样

间隔、叠加次数。

1) 测点点距选择取决于天线中心频率与介质的介电特性,一般使用 900 MHz 或 400 MHz 天线,点距为 5~10 cm,可保证探测的精度。

2) 时窗的选择主要取决于最大探测深度与介质中电磁波速度,在隧道质量检测中,介质主要是砼和围岩,取电磁波的平均速度为 0.1 m/ns,要求探测深度一般在 1.7 m 左右,故时窗取 35 ns。

3) 采样间隔的选择直接影响波形采集的质量。对于规模较小的空洞异常,采样间隔太大时,波形将会发生削波现象,甚至严重畸变;而采样间隔太小,数据采集的效率将会降低。

4) 叠加次数也会影响波形采集质量和数据采集效率。隧道检测中,采用点测的方式,叠加次数常选为 8 次或 16 次。

1.2.3 主要技术参数

在探地雷达质量检测中,最主要的技术参数是分辨率。分辨率是探地雷达分辨最小异常介质的能力,有垂直分辨率和水平分辨率两种。

垂直分辨率是垂直方向上可以划分的最薄层次,理论上可以把雷达天线主频波长的 1/8 作为垂直分辨率的极限,但由于外界干扰等因素,一般把波长的 1/4 作为其下限。表 1 为探地雷达不同天线垂直分辨率的理论值与经验值(在砼中 $V = 0.1$ m/ns 情况下)。

表 1 探地雷达不同天线垂直分辨率的理论值与经验值

频率/MHz	子波长度/m	分辨率/m
100	1.00	0.273
200	0.50	0.150
400	0.25	0.067
900	0.11	0.030
1 200	0.08	0.025

水平分辨率是雷达天线在地面上拖过,可以分辨的地下最小目标的横向尺寸。这与天线波束的覆盖面积半径 A 有关,覆盖面积又跟目标的埋藏深度有关,就像手电筒的光束聚焦范围随远近变化的道理一样。天线波束的覆盖面积可由下式计算:

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K+1}}$$

其中: A 为天线波束覆盖区半径; λ 为雷达天线的中心波长; D 为地表到反射面的深度; K 为反射面以上介质的平均介电常数。

例如目标体在砼($K=10$)中的埋藏深度为30 cm,用400 MHz的天线,波长 $\lambda=25$ cm,其天线波束覆盖面积半径:

$$A = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{K+1}} = \frac{30 \text{ cm}}{4} + \frac{25 \text{ cm}}{\sqrt{10+1}} \approx 15 \text{ cm}$$

假设目标占据该光斑 $1/4$ 左右可分辨,则雷达在砼深度为0.3 m处的横向分辨率约为3.8 cm。

此外,探测深度也是探地雷达一个重要的技术参数。在仪器性能和地下介质一定的情况下,探测深度主要取决于工作频率选择及地层的衰减系数。一般天线的频率越高,探测深度越浅,分辨率越高;相反,天线频率越低,则探测深度越深,而分辨率降低。故探地雷达在技术上存在探测深度与分辨率的取舍或优选问题。

2 双天线法检测的优势

当检测目标体有深层又有浅层时,一次性采用单天线对隧道进行检测有时难以满足要求,检测效果在一定程度上受到限制。这时可以采用各种天线依次根据需要进行检测。如果采用适当高频和低频双天线组合同时进行检测,则可以提高检测效果和检测效率。

2.1 采用单天线进行检测

隧道缺陷检测主要有衬砌层(初期衬砌和二次衬砌)的厚度、衬砌层内或附近可能存在的空洞或不密实情况、钢筋和钢支撑分布等,有时根据需要只检

测其中的一项或两项。按照围岩的级别采用的复合式衬砌,二次衬砌厚度为30~75 cm,初期衬砌厚度为15~25 cm,钢筋设在二次衬砌内(钢筋挂网在初期衬砌内),钢支撑在初期衬砌内,空洞和不密实的情况有可能在浅层,但更可能存在于隧道开挖面上。检测衬砌层厚度或钢筋分布最好采用900 MHz以上的天线,不仅能满足分辨率的要求,而且比较容易分辨出初期衬砌与二次衬砌的界面。但在检测衬砌层内或附近可能存在的空洞或不密实情况、钢支撑分布时,由于电磁波能量的衰退,采用900 MHz的天线检测很难达到目的,所以检测深层目标体时要采用400 MHz的天线。

2.2 采用双天线检测的优越性

采用双天线检测,不仅能检测浅层目标体,同时还能检测深层目标体;检测时两种天线检测的位置是相同的,所以解释雷达资料时可以相互补充、相互验证,减少人为或外在因素的影响,保证检测结果的准确性,并且可以提高检测效率。

3 检测实例

以福建浦南(浦城—南平)高速公路岭下隧道为例,采用400 MHz和900 MHz天线同时进行检测。

3.1 检测厚度

对ZK90+500~600段二次衬砌进行结构取芯,将检测结果进行对比,结果见表2。

表2 浦南高速公路岭下隧道ZK90+500~600段拱腰二次衬砌检测厚度对比

检测位置	实际厚度(取芯验证)/cm	探地雷达检测结果			
		400 MHz天线		900 MHz天线	
		检测厚度/cm	与实际厚度偏差/cm	检测厚度/cm	与实际厚度偏差/cm
ZK90+500	46.2	48.2	2.0	47.0	0.8
ZK90+510	47.5	48.5	1.0	46.3	-1.2
ZK90+520	45.2	43.1	-2.1	45.6	0.4
ZK90+530	48.3	46.1	-2.2	49.1	0.8
ZK90+540	48.1	46.2	-1.9	48.0	-0.1
ZK90+550	47.2	49.1	1.9	46.2	-1.0
ZK90+560	46.8	45.3	-1.5	47.1	0.3
ZK90+570	45.3	48.5	3.2	45.8	0.5
ZK90+580	50.1	46.7	-3.4	49.6	-0.5
ZK90+590	47.2	49.1	1.9	47.3	0.1
ZK90+600	49.4	52.6	3.2	49.6	0.2

从表 2 可见,900 MHz 天线检测厚度的偏差比 400 MHz 天线检测厚度的偏差小,检测结果比较接近实际厚度。

3.2 检测空洞

图 2 是 900 MHz 天线和 400 MHz 天线空间检测波形和图形。从 900 MHz 天线图形可以看出,其中三处二次衬砌与防水板脱空,但在 400 MHz 图形中该处脱空则不明显。

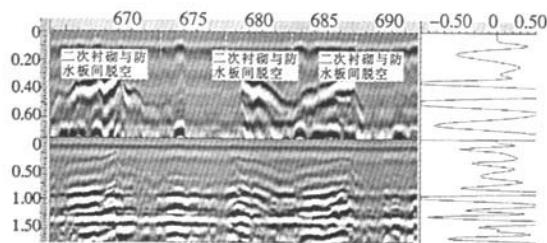


图 2 空间检测原始波形图(单位:m)

3.3 检测密实程度

图 3 是 900 MHz 天线和 400 MHz 天线密实度检测波形和图形。从 400 MHz 天线图形可以看出,在 0.75 m 深度处出现明显的不密实,但在 900 MHz 图形中则没出现。

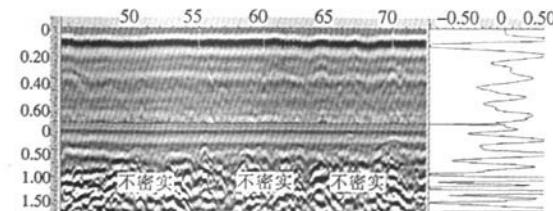


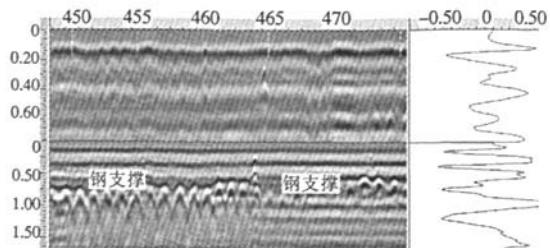
图 3 密实程度检测波形图(单位:m)

3.4 检测钢支撑

图 4 是 900 MHz 天线和 400 MHz 天线钢支撑检测波形和图形。从 400 MHz 天线图形可以看出,在 0.75 m 深度处出现明显的钢支撑,但 900 MHz 天线未能探测到该深度的钢支撑。

4 结语

通过探地雷达双天线法检测隧道质量的工程实



上部是 900 MHz 天线检测图形和波形
下部是 400 MHz 天线检测图形和波形

图 4 钢支撑检测原始波形图(单位:m)

践,可得如下结论:

- 1) 采用双天线检测隧道质量,可有效规避高频天线深度不足和低频天线精度低的弱点,充分发挥高频天线精度高和低频天线深度较大的优点。
- 2) 两种天线的识别深度范围各有差别,900 MHz 天线在 0~0.7 m 深度范围内的识别精度较高,而 400 MHz 天线在 0.2~1 m 深度范围内识别精度优于 900 MHz 天线。
- 3) 采用双天线进行隧道质量检测,便于对测试结果进行判读,从而减小结果判读误差和人为因素的干扰。

参考文献:

- [1] 叶良应. 地铁隧道衬砌脱空和渗漏水病害雷达探测研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2005.
- [2] 郭增强, 刘晓军, 赵玉成. SIR-20 地质雷达在公路质量检测中的应用[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16(4).
- [3] 同楠, 吕建兵. 地质雷达在莲花山隧道质量检测中的应用[J]. 路基工程, 2008(5).
- [4] 李国平. 地质雷达技术在工程检测中的干扰问题分析及处理[J]. 广东土木与建筑, 2008(6).
- [5] 王兴照. 地质雷达在铁路隧道工程检测中的应用分析[J]. 土工基础, 2008, 22(3).
- [6] 刘松, 水中和, 刘道斌, 等. 探地雷达检测水泥混凝土路面压浆效果的研究[A]. 第九届全国建设工程无损检测技术学术会议论文集[C]. 2006.
- [7] 徐茂辉, 谢慧才. 混凝土密实度的雷达检测方法[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(4).
- [8] 史常清. 地质雷达新技术在渝怀铁道隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(z3).

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>