

铁路隧道衬砌质量检测与评价

地质雷达技术 实用手册

• 薄会申 编著



地质出版社

铁路隧道衬砌质量检测与评价

地质雷达技术实用手册

薄会申 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书主要介绍地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用,阐述了地质雷达技术理论知识和常用地质雷达仪器;着重介绍了铁路隧道衬砌知识和评价标准,隧道检测工作布置,以及雷达图像分析和质量评价。

本书可供从事地质勘查、工程质量检测的人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

铁路隧道衬砌质量检测与评价地质雷达技术实用手册/薄会申编著. —北京:地质出版社, 2006. 10

ISBN 7-116-05015-9

I. 铁… II. 薄… III. 雷达—应用—铁路隧道—隧道工程—衬砌—质量检验—技术手册 IV. U459.1—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 118314 号

责任编辑: 祁向雷

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324577 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地大彩印

开 本: 889mm×1194mm^{1/32}

印 张: 4.125

字 数: 100 千字

印 数: 1-1000

版 次: 2006 年 10 月北京第一版·第 次印刷

定 价: 15.00 元

ISBN 7-116-05015-9/T·147

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

前 言

在铁路隧道建设中，地质雷达检测技术被大量采用，从运营隧道的病害检测，到新建隧道的施工质量监控，应用领域越来越广泛。实际工作中，由于知识结构和认识上的差异，对雷达图像的判释结果常常出现分歧，甚至造成检测结果脱离实际情况。

作者长期从事隧道检测工作，在学习前人成果的基础上，总结检测工作中积累的经验，编制本书，希望能对初学者有一定的指导作用。

由于作者水平有限，书中难免存在错误，欢迎指正。

薄会申

2006年10月

目 录

第一章 概述	1
第一节 铁路运营隧道现状	1
第二节 隧道衬砌检测和评价的技术依据	6
第三节 地质雷达技术应用前景	7
第二章 地质雷达技术理论知识	9
第一节 麦克斯韦电磁场理论简介	9
第二节 电磁波在介质中的传播规律	14
第三节 地质雷达资料解释	31
第四节 影响雷达测试精度的因素	38
第三章 常用地质雷达仪器介绍	44
第一节 硬件配置指标	44
第二节 雷达数据处理软件配置	47
第三节 其他型号地质雷达简介	49
第四章 隧道衬砌知识和评价标准	51
第一节 隧道衬砌设计知识	51
第二节 掘进方式和衬砌工艺对衬砌质量的影响	62

第三节	隧道常见质量通病和处理措施·····	65
第四节	铁路运营隧道安全等级评定标准·····	69
第五章	隧道检测工作布置·····	84
第一节	检测前的准备工作·····	84
第二节	选择雷达工作参数·····	87
第六章	雷达图像分析和衬砌质量评价·····	91
第一节	质量缺陷成因分析及其雷达图像特征·····	91
第二节	隧道衬砌质量评价分类·····	109
第三节	外界因素对雷达图像的影响·····	109
第七章	隧道衬砌检测的典型图像·····	113
第八章	“中长期铁路网规划”简介·····	124

第一章 概 述

第一节 铁路运营隧道现状

一、铁路隧道设备的重要性

铁路被誉为国民经济的先行官、火车头，是我国重要的交通工具，铁路建设长度也是一个国家经济发展的标志之一。近年来，我国铁路建设的增长速度很快。在 2000 年初，党中央、国务院批准了关于西部大发展战略的初步设想，拉开了西部铁路建设的序幕，洛湛铁路、渝怀铁路、青藏铁路、宜万铁路等相继开始建设。在 2004 年 1 月 7 日，国家《中长期铁路网规划》经国务院审议通过，这是进入新世纪后，我国第一个获准通过的中长期发展规划，标志着我国铁路新一轮大规模建设的展开。

隧道是保障铁路正常运营的重要设备，隧道施工质量直接影响到将来铁路运营是否通畅，隧道病害是困扰铁路快速发展的一个关键，更是影响国民经济发展的一个重要因素。因此，必须通过系统的研究，总结铁路隧道的病害特点，完善隧道病害检测评价手段，制定出符合我国铁路特点的一整套检测方法，形成从日常维护、病害检测、病害整治到质量跟踪的一整套技术体系，以适应信息化目标管理的需要，将运营隧道的日常维护和病害整治提高到一个新的水平。

二、铁路运营隧道存在的问题

我国铁路隧道建设已经有 110 余年的历史。中国第一座铁路隧道修建于 1887~1889 年，是台湾省台北至基隆窄轨铁路上的狮球岭隧道，长 261m。至 2002 年，我国铁路隧道已经达到 6876 座，总长 3670km，为世界第一。据铁道部统计资料显示，部分运营隧道的病害问题相当严重，甚至已危及到行车安全。据资料记载，宝中线、成昆线、贵昆线、襄渝线、宝成线等均发生过隧道衬砌掉块，特别是 2001 年达成铁路某隧道出现的 30m 大范围拱顶衬砌掉块，险些造成严重的行车事故。为此，铁路部门每年都投入大量的人力、物力和资金用于隧道病害的维修和整治，但隧道设备的状况仍然没有根本好转。



图 1.1 运营隧道衬砌开裂渗水病害



图 1.2 运营隧道衬砌开裂病害

石壁桥隧道（全长 832m，进口里程 K214+465，出口里程 K215+297），K214+580~600 范围内，右侧边墙自起拱线往下，出现大面积鼓包，混凝土开裂达到 5cm，出现“两层皮”现象，有脱落趋势。该图为仰视拍摄。

目前我国铁路运营隧道存在的主要问题是：

- (1)隧道病害数量大而且类型多，整治难度大，所需费用多，周期长，而且修理投资缺口较大；
- (2)由于年代不同，基础资料不完整，管理手段落后；
- (3)隧道病害检查和检测手段落后而且不够规范，早期病害难以发现，使某些可以早期整治的病害得以发展成严重的病害，彻底整治更加困难；
- (4)受施工环境恶劣及材料耐久性差的影响，一些隧道病害的整治效果不明显；

(5)在新建隧道的设计和施工遗留问题较多，某些隧道还相当严重。

由于上述种种原因，致使病害隧道的数量逐年增加，又加之投入不够，造成隧道病害的状况进一步恶化。事实上，隧道病害存在于其使用的全过程，有些隧道在使用之前病害就已经存在。隧道病害形成的原因很复杂，对隧道使用寿命的影响也存在较大差异。因此，对隧道病害及安全性问题的研究工作除了隧道的定期养护和防治以外，应该注重于从隧道检测评价出发，深入了解隧道病害机理，对某一类具体的病害及某一类具体的工程条件，提出的整治措施要具备较强的针对性和可操作性，逐步提高病害整治技术。

三、隧道检测评价的意义

隧道病害的发展具有一个过程，如果能在隧道病害恶化之前发现，并及时采取整治措施，则可大大提高铁路运营隧道的安全性。因此，进行隧道的检测评价是非常必要的。传统的检测评价一般都是依靠经验，采取定性化的方法，在实际的操作过程中很容易受人为因素的影响，不同的工程技术人员可能会根据各自的经验得出差别较大的判别结果；随着技术的进步，仅仅采用定性化指标对隧道病害状况进行描述分析已不能满足目前的使用和养

护要求。因此,采用一些仪器设备对隧道质量进行无损检测,通过科学的检测评价,利用量化的指标来评价隧道的实际状况是非常必要的。通过无损检测,可以达到下面的目的:

(1)通过对隧道状况进行全面检测,得出隧道状况的检测评价报告,科学地查明隧道的实际状况;

(2)根据检测评价报告,为隧道的维修保养和整治提供系统完整的科学依据;

(3)通过检测评价报告获得必要的信息,正确掌握铁路运营隧道病害的实际状况,在此基础上逐步形成从日常维护、病害发现、病害检测到病害整治的一整套技术体系,建立隧道病害整治专家系统奠定基础,从而使现有隧道的运营管理技术提高到一个新的水平;

(4)新建铁路隧道施工阶段,作为施工过程控制手段,及早发现问题,为采取加固措施消除隐患提供依据,起到对隧道施工质量实时监控的作用。

四、检测评价的主要内容

隧道检测评价主要是通过对隧道衬砌、仰拱(或铺底)进行无损检测,查清隧道既有病害的规模,查找隐伏病害、可能造成病害的施工质量缺陷以及灾害性地质病害。具体包括在表 1.1 中所列的 6 个方面:

表 1.1 隧道检测评价主要内容

序号	检测项目	内 容
1	初期支护和衬砌混凝土	在隧道不同部位布置测线, 测出拱顶、拱腰、拱脚及边墙位置的衬砌厚度以及道床仰拱的厚度, 同时还可沿隧道的横断面进行厚度探测。初期支护中的钢筋、钢拱架及格栅钢架等的数量和分布情况, 并准确定位。初衬与二次衬砌之间的密实状况以及衬砌间空洞的分布情况
2	围岩状况	隧道周围 2m 范围(根据需要可进行调整)内的围岩状况。岩溶地区查找并确定溶洞的位置和范围
3	排水	隧道衬砌或围岩中排水盲沟的分布及畅通情况; 高寒地区的冻融情况。隧道围岩或衬砌中的裂隙水分布及赋水情况
4	开挖断面	隧道围岩超挖部分的位置、超挖空间和回填情况(回填的性质); 通过衬砌厚度确定隧道欠挖情况。
5	裂缝	衬砌中的裂隙分布, 尤其是衬砌深部不为肉眼看出的裂隙分布和发展趋势; 配合强度检测对衬砌状况作出全面的评价
6	状况评价	通过对检测结果进行解析, 实现隧道病害状况的评价。评价成果包括衬砌强度值、衬砌结构厚度值、隧道裂隙水分布状况、围岩超欠挖情况、衬砌破损情况以及格栅拱架等的分布情况, 通过这些定量化数据, 直接反映隧道的病害状况

第二节 隧道衬砌检测和评价的技术依据

由于地质条件的复杂性, 隧道设计和施工涉及到众多的技术专业和技术标准, 隧道检测评价是以设计为依据检测施工质量,

同时查找在设计和施工阶段未能发现的隐蔽的灾害性地质病害，为隧道彻底整治提供依据。

铁路隧道检测评价主要依据以下中华人民共和国行业标准：

1. 《铁路工程地质勘察规范》(TB10012-2001, J117-2001)
2. 《铁路隧道设计规范》(TB10003-2005, J447-2005)
3. 《铁路隧道施工规范》(TB10204-2002)
4. 《铁路隧道喷锚构筑法技术规范》(TB210108-2002)
5. 《铁路混凝土与砌体工程施工规范》(TB10210-2001, J118-2001)
6. 《新建时速 200 公里客货共线铁路设计》(2003.10)
7. 《铁路桥隧建筑物劣化评定标准》(TB/T2820.2-1997)
8. 《铁路隧道工程施工质量验收标准》(TB10417-2003)
9. 《铁路混凝土与砌体工程施工质量验收标准》(TB10424-2003)
10. 《铁路工程结构混凝土强度检测规程》(TB10426-2004)

第三节 地质雷达技术应用前景

地质雷达技术是近年来应用于浅层地质构造、岩性检测的一项物探技术，其特点是快速、无损、连续检测，并以实时成像方式显示地下结构剖面，探测结果一目了然，分析、判读直观方便。

因其探测精度高、样点密、工作效率高而倍受一些行业的关注。

地质雷达在 20 世纪 70 年代开始应用于工程场地勘察，近 30 年来，其应用领域已经扩大到考古、建筑、铁路、公路、水利、水电、采矿、城市地下管网等各个方面。

工程场地勘察方面，主要应用于普查地下岩溶、确定基岩风化层厚度、研究地下水水位分布以及查找隐伏地质构造等，大多采用中低频天线，探测深度可以达到 50m 以上。

考古方面，主要用于探测古建筑群、地下洞室等，近年对乐山大佛进行修复前，也采用地质雷达检测，对大佛状况进行前期评估。

地下管网普查方面，由于地质雷达推出了高分辨率的三维探测系统，可以精确地确定各类地下管道的水平位置和深度，得到地下管网三维分布图。

工程质量检测方面，近年来广泛应用于铁路公路隧道衬砌、路基病害、高速公路路面、机场跑道以及地质超前预报工作中，并得到良好效果。隧道检测是其发展较为迅速的领域之一，铁路、公路交通以及水利部门均已经采用地质雷达技术检测评价既有隧道状况，并且在新建项目中开始大量应用，在施工阶段中对质量进行过程控制，及时发现质量缺陷，使地质雷达成为施工质量监控不可缺少的重要手段。

第二章 地质雷达技术理论知识

第一节 麦克斯韦电磁场理论简介

一、位移电流假设

恒定电路中，传导电流是连续的，满足恒定电流的安培环路定理：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

式中的电流是穿过以闭合曲线 L 为边界的任意曲面 S 的传导电流（电荷的定向运动形成的电流）。

非恒定电路中，如图 2.1，由于传导电流不能通过电容的两个极板，所以恒定电流的安培环路定理不再适用。

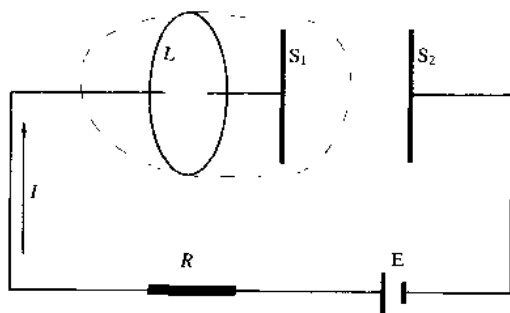


图 2.1 非恒定电路

对于非恒定电路，电流中断处必然发生电荷分布的变化，产生磁场。麦克斯韦电磁场理论认为，对于普遍的情况，在非恒定

电流的情况下，电位移的时间变化率与电流密度相当，变化的电场等效的也是一种“电流”，它也能产生磁场。这就是麦克斯韦提出的著名的位移电流假说，他将电位移通量的时间变化率称为位移电流，而把电位移 D 的时间变化率称为位移电流密度。基于上述假说，提出了全电流的概念，即传导电流和位移电流之和称为全电流，在电流非恒定情况下，将安培环路定理推广为：

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\text{总}} = I_{\text{传导}} + I_{\text{位移}} = I_{\text{传导}} + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

引入位移电流概念以后，非恒定电路中，中断的传导电流被位移电流接替，使电路中电流保持连续不断。在非闭合、电流不恒定的电路中，全电流是保持连续的。

位移电流与传导电流两者相比，唯一共同点仅在于都具有磁效应，都可以在空间激发磁场，但二者本质是不同的：

(1)产生机理不同：位移电流是变化的电场；传导电流是自由电荷的定向运动形成的。

(2)位移电流也即变化着的电场可以存在于真空、导体、电介质中，不需要导体；传导电流需要导体，只存在于导体中。

(3)位移电流没有热效应；传导电流在通过导体时会产生焦耳热。

二、麦克斯韦方程组的物理意义

借助于位移电流和全电流的概念，麦克斯韦把安培环路定理推广到变化的电磁场也适用的普遍形式，提出的涡旋电场和位移电流假说，其核心思想是：变化的磁场可以激发涡旋电场，变化的电场可以激发涡旋磁场；电场和磁场不是彼此孤立的，它们相互联系、相互激发组成一个统一的电磁场。麦克斯韦进一步将电场和磁场的所有规律综合起来，建立了完整的电磁场理论体系。

麦克斯韦电磁理论认为：在一般情况下，电场既包括自由电荷产生的静电场 $E^{(1)}$ 、 $D^{(1)}$ ，也包括变化磁场产生的有旋电场 $E^{(2)}$ 、 $D^{(2)}$ ，电场强度 E 和电位移 D 是两种电场的矢量和。即

$$E = E^{(1)} + E^{(2)} \quad D = D^{(1)} + D^{(2)}$$

同时，磁场既包括传导电流产生的磁场 $B^{(1)}$ 、 $H^{(1)}$ ，也包括位移电流（变化电场）产生的磁场 $B^{(2)}$ 、 $H^{(2)}$ ，磁感应强度 B 和磁场强度 H 是两种磁场的矢量和。即

$$B = B^{(1)} + B^{(2)} \quad H = H^{(1)} + H^{(2)}$$

在 1873 年前后，麦克斯韦提出了在一般情况下电磁场所满足的四个方程，称为麦克斯韦方程组，用以表述电磁场的普遍规律：

(1) 电场的高斯定理