



工业和信息化部“十二五”规划教材

道路无损检测技术

赵茂才 © 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材

道路无损检测技术

赵茂才 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是工业和信息化部“十二五”规划教材。全书共七章，主要包括：引论，基于结构变形响应探测的道路无损检测技术，基于贯入阻力探测的道路无损检测技术，基于机械波探测的道路无损检测技术，基于射线探测的道路无损检测技术，基于电磁波探测的道路无损检测技术，基于光学探测的道路无损检测技术。

本书可作为道路与铁道工程、交通工程及岩土工程等专业硕士研究生和高年级本科生的教材，也可供从事道路施工、道路检测及道路养护的相关技术人员学习、参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

道路无损检测技术 / 赵茂才编著. —北京：电子工业出版社，2016.4

工业和信息化部“十二五”规划教材

ISBN 978-7-121-28645-2

I. ①道… II. ①赵… III. ①道路工程—无损检验—高等学校—教材 IV. ①U41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 080430 号

策划编辑：王晓庆

责任编辑：王晓庆

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：18.25 字数：467 千字

版 次：2016 年 4 月第 1 版

印 次：2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价：48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010)88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010)88254113，wangxq@phei.com.cn。

前 言

在工业和信息化部、哈尔滨工业大学研究生院的资助和支持下，历时三年，《道路无损检测技术》一书终于面世。

本书由第一章引论、第二章基于结构变形响应探测的道路无损检测技术、第三章基于贯入阻力探测的道路无损检测技术、第四章基于机械波探测的道路无损检测技术、第五章基于射线探测的道路无损检测技术、第六章基于电磁波探测的道路无损检测技术、第七章基于光学探测的道路无损检测技术和附录专业词汇汉英对照构成。

本书阐述道路无损检测的基本理论，反映国内外当今的新成就，介绍有关的研究技术和方法，充分注意了符合我国公路建设和管养工程的实际情况，并与近年来我国颁布的有关规范标准相适应，力求做到理论联系实际。本书可作为道路与铁道工程、交通工程及岩土工程等专业硕士研究生和高年级本科生的教材，也可供从事道路施工、道路检测及道路养护的相关技术人员学习、参考。

本书由赵茂才编著。本书在编写过程中，参阅了国内外学者的大量文献，譬如有关的手册、规范、标准，并选用了其中的许多图表和资料，编者表示感谢。编者对工业和信息化部、哈尔滨工业大学的资助和支持表示感谢，并对电子工业出版社有关同志对本书出版的组织和编辑工作表示感谢。

书中不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 4 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第一章 引论	1
第一节 概述	1
一、无损检测的概念及发展历史	1
二、道路无损检测技术	3
第二节 道路无损检测技术特点	4
第三节 道路无损检测技术局限性与发展前景	5
一、道路无损检测技术的局限性	6
二、道路无损检测技术的发展前景	6
主要参考文献	7
第二章 基于结构变形响应探测的道路无损检测技术	8
第一节 概述	8
一、测试基本原理	8
二、弯沉	8
三、弯沉仪发展史	9
第二节 贝克曼梁法 (BB)	16
一、设备构成及类型	17
二、贝克曼梁测定路基路面回弹弯沉试验方法	17
三、贝克曼梁测定路基路面回弹弯沉试验的优缺点	19
第三节 落锤式弯沉仪 (FWD)	20
一、落锤式弯沉仪构成及工作原理	20
二、落锤式弯沉仪测试过程及影响因素	22
三、落锤式弯沉盆形状参数	22
四、落锤式弯沉仪的应用	24
五、落锤式弯沉仪的优缺点	27
第四节 便携式弯沉仪 (PFWD)	27
一、PFWD 弯沉仪的构成及工作原理	28
二、PFWD 落锤式弯沉仪测试程序及特征	29
三、PFWD 落锤式弯沉仪的应用	30
第五节 高速自动弯沉仪	32
一、高速自动弯沉仪的构成及工作原理	32
二、高速自动弯沉仪测试程序及特征	35
三、高速自动弯沉仪的应用	36
第六节 土刚度测试仪 (GeoGauge)	41
一、土刚度测试仪的构成及工作原理	42

二、土壤刚度测试仪的应用	43
第七节 主要设备弯沉测试结果转换关系	43
一、FWD 与贝克曼梁换算	43
二、贝克曼梁与 Dynaflect 换算	44
三、贝克曼梁与 Road Rater 换算	44
四、土壤刚度测试仪与 FWD、LWD 换算	44
主要参考文献	44
第三章 基于贯入阻力探测的道路无损检测技术	46
第一节 概述	46
一、测试基本原理	46
二、发展简史	46
第二节 加州承载比试验法 (CBR)	47
一、加州承载比的定义及机理	47
二、加州承载比试验仪器构成	48
三、加州承载比试验方法	49
第三节 动力圆锥贯入法 (DCP)	54
一、DCP 法设备构成及测试原理	54
二、DCP 法试验程序与特征	57
三、DCP 应用	58
第四节 贯入式路面浅层强度探测法	60
一、贯入式路面浅层强度探测法设备构成及测试原理	60
二、贯入式路面浅层强度探测法操作规程	65
三、贯入式路面浅层强度探测法应用	67
第五节 便携式可变能量动力贯入仪 (触探仪)	70
一、PANDA 的构成及工作原理	70
二、PANDA 的主要用途	72
三、PANDA 的应用	73
主要参考文献	74
第四章 基于机械波探测的道路无损检测技术	76
第一节 概述	76
一、机械波的分类	76
二、机械波的应用	78
第二节 声发射检测技术	79
一、声发射检测的基本原理	80
二、声发射技术的发展历史	81
三、声发射技术在混凝土领域的应用现状	82
四、声发射检测仪器构成	83
五、Kaiser 效应和 Felicity 效应	84
六、声发射检测技术 (AET) 的特点	85

七、声发射信号基础	87
八、工程案例	96
第三节 冲击回波技术检测技术	105
一、冲击回波技术检测的基本原理	105
二、冲击回波技术基桩完整性检测实例	106
第四节 超声波探测技术	112
一、超声检测原理及测试理论	112
二、超声法检测发展历史	117
三、超声法检测应用案例	119
主要参考文献	140
第五章 基于射线探测的道路无损检测技术	142
第一节 概况	142
一、射线特征	142
二、射线检测方法及其优缺点	144
第二节 工业 CT 法	145
一、工业 X-CT 技术发展概况	145
二、工业 CT 技术原理	146
三、工业 CT 应用	159
第三节 核子密(湿)度仪法	172
一、概况	172
二、核子密度仪探测密度技术原理	178
三、核子湿度仪探测含水量技术原理	179
四、核子密(湿)度仪工程应用	180
主要参考文献	187
第六章 基于电磁波探测的道路无损检测技术	188
第一节 概况	188
一、电磁波理论方程	188
二、基于电磁波探测的道路无损检测技术类型	189
第二节 探地雷达	189
一、概述	189
二、探地雷达系统组成、工作原理及探测性能	191
第三节 无核密度仪	198
一、概述	198
二、电磁密度仪(PQI)的基本原理与系统组成	199
三、道路铺筑追踪仪的基本原理与应用	201
四、时域反射仪(TDR)的基本原理与应用	203
五、电子密度仪(EDG)的基本原理与应用	204
第四节 工程应用实例分析	206
一、探地雷达应用案例	206

二、电磁密度仪 (PQI) 的应用案例	210
三、道路铺筑追踪仪的应用案例	211
四、时域反射仪 (TDR) 的应用案例	212
五、电子密湿度仪 (EDG) 的应用案例	213
主要参考文献	214
第七章 基于光学探测的道路无损检测技术	215
第一节 概述	215
一、测试基本原理	215
二、发展简史	215
第二节 激光平整度仪	227
一、路面平整度	227
二、平整度的测试方法	232
第三节 激光车辙仪	237
一、车辙深度、检测方法构成与分类	237
二、车辙深度测试	239
第四节 红外成像仪	242
一、红外成像测试原理与系统构成	242
二、红外成像测试设备及其精度影响	248
三、工程应用实例分析	251
第五节 路面自动检测系统	254
一、路面自动检测系统关键技术	256
二、路面自动检测系统构成	257
三、工程应用实例分析	275
主要参考文献	279
附录 专业词汇汉英对照	281

第一章 引 论

第一节 概 述

一、无损检测的概念及发展历史

1. 无损检测定义

无损检测 (Non-destructive Testing) 是指对材料或工件实施一种不损害或不影响其未来使用性能或用途的检测手段。利用材料内部结构的异常或缺陷的存在所引起的对热、声、光、电、磁等反应的变化, 评价结构异常和缺陷的存在及其危害程度。涉及的术语有: 无损检查 (Non-destructive Inspection)、无损检验 (Non-destructive Examination)、无损评价 (Non-destructive Evaluation) 及无损探伤 (Non-destructive Flaw Detection)。

2. 无损检测相关机构

与无损检测相关的主要机构有:

1) 国际无损检测委员会 (ICNDT-International Committee for NDT), 是世界各国公认的关于无损检测事业和学术的最具权威的国际组织;

2) 全国无损检测标准化技术委员会 (SAC/TC56) (Standardization Administration of China/Technical Committee 56 on Non-destructive Testing);

3) 国家无损检测学会 (China NDT) 及美国无损检测学会 (ASNT-The American Society for Nondestructive Testing (NDT)) 等。

3. 无损检测分类

无损检测分为超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测、涡流检测、计算机层析成像检测、声发射检测等。

1) 超声检测 UT (Ultrasonic Testing)

超声波是频率高于 20kHz 的机械波。在超声探伤中常用的频率为 0.5~5MHz。这种机械波在材料中能以一定的速度和方向传播, 遇到声阻抗不同的异质界面 (如缺陷或被测物件的底面等) 就会产生反射。这种反射现象可被用来进行超声波探伤, 最常用的是脉冲回波探伤法探伤时, 脉冲振荡器发出的电压加在探头上 (用压电陶瓷或石英晶片制成的探测元件), 探头发出的超声波脉冲通过声耦合介质 (如机油或水等) 进入材料并在其中传播, 遇到缺陷后, 部分反射能量沿原途径返回探头, 探头又将其转变为电脉冲, 经仪器放大而显示在示波管的荧光屏上。根据缺陷反射波在荧光屏上的位置和幅度 (与参考试块中人工缺陷的反射波幅度做比较), 即可测定缺陷的位置和大致尺寸。除回波法外, 还有用另一探头在工件另一侧接收信号的穿透法。利用超声法检测材料的物理特性时, 还经常利用超声波在工件中的声速、衰减和共振等特性。

2) 射线检测 RT (Radiographic Testing)

射线的种类很多,其中易于穿透物质的有 X 射线、 γ 射线、中子射线三种。这三种射线都被用于无损检测,其中 X 射线和 γ 射线广泛用于锅炉压力容器焊缝和其他工业产品、结构材料的缺陷检测,而中子射线仅用于一些特殊场合。射线检测最主要的应用是探测试件内部的宏观几何缺陷(探伤)。按照不同特征,如使用的射线种类、记录的器材、工艺和技术特点等,可将射线检测分为多种不同的方法。射线照相法是指用 X 射线或 γ 射线穿透试件,以胶片作为记录信息的器材的无损检测方法。该方法是最基本的、应用最广泛的一种射线检测方法。射线检测适用于绝大多数材质和产品形式,如焊件、铸件、复合材料等。射线检测胶片对材质内部结构可生成缺陷的直观图像,定性、定量准确,检测结果直接记录,并可长期保存。对体积型缺陷(如气孔、夹渣等)的检出率很高,对面积型缺陷(如裂纹、未熔合类),如果照相角度不适当,则比较容易漏检。射线检测的局限性还在于成本很高,且射线对人体有害。

3) 磁粉检测 MT (Magnetic Particle Testing)

磁粉检测,是通过对被检工件施加磁场使其磁化(整体磁化或局部磁化),在工件的表面和近表面缺陷处将有磁力线逸出工件表面而形成漏磁场,有磁极的存在就能吸附施加在工件表面上的磁粉形成聚集磁痕,从而显示出缺陷的存在。磁粉检测方法应用比较广泛,主要用以探测磁性材料表面或近表面的缺陷。多用于检测焊缝、铸件或锻件,如阀门、泵、压缩机部件、法兰、喷嘴及类似设备等。探测更深一层内表面的缺陷,则需应用射线检测或超声波检测。

4) 渗透检测 PT (Penetrant Testing)

渗透检测可以检测非磁性材料的表面缺陷,从而对磁粉检测提供了一项补充的手段。渗透检测方法,即在测试材料表面使用一种液态染料,并使其在体表保留至预设时限,该染料可以是在正常光照下即能辨认的有色液体,也可以是需要特殊光照方可显现的黄/绿荧光色液体。此液态染料由于毛细作用进入材料表面开口的裂痕。毛细作用在染色剂停留过程中始终发生,直至多余染料完全被清洗。此时将某种显像剂施加到被检材质表面,渗透入裂痕并使其着色,进而显现。具备相应资质的检测人员可对该显现痕迹进行解析。渗透检测可广泛应用于检测大部分的非吸收性物料的表面开口缺陷,如钢铁、有色金属、陶瓷及塑料等,对于形状复杂的缺陷,也可一次性全面检测。无须额外设备,便于现场使用。其局限性在于:检测程序烦琐,速度慢,试剂成本较高,灵敏度低于磁粉检测,对于埋藏缺陷或闭合性表面缺陷无法测出。

5) 涡流检测 ET (Eddy Current Testing)

涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的一种无损检测方法,它适用于导电材料,如果把一块导体置于交变磁场之中,在导体中就有感应电流存在,即产生涡流,由于导体自身各种因素(如电导率、磁导率、形状、尺寸和缺陷等)的变化会导致感应电流的变化,利用这种现象而判知导体性质、状态的检测方法,称为涡流检测方法。在涡流探伤中,是靠检测线圈来建立交变磁场的,把能量传递给被检导体,同时又通过涡流所建立的交变磁场来获得被检测导体中的质量信息。所以说,检测线圈是一种换能器。检测线圈的形状、尺寸和技术参数对于最终检测是至关重要的。在涡流探伤中,往往根据被检测的形状、尺寸、材质和质量要求(检测标准)等来选定检测线圈的种类。常用的检测线圈有三类:穿过式线圈、内插式线圈、探头式线圈。

超声检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测和涡流检测是工业上最常用的 5 种主要无损检测方法。

6) CT 检测 (Computed Tomographic testing)

CT 检测是一种在不破坏物体结构的前提下,根据物体周边所获取的某种物理量(如波速、X 射线光强、电子束强等)的投影数据,运用一定的数学方法,通过计算机处理,重建物体特定层面上的二维图像及依据一系列上述二维图像构成三维图像的技术。无论是在医学还是在其他领域,CT 检测近年来发展和普及得很快。

7) 声发射检测 AT、AE (Acoustic Emission Testing)

声发射是指伴随固体材料在断裂时释放存储的能量产生弹性波的现象。利用接收声发射信号研究材料、动态评价结构的完整性称为声发射检测技术。声发射技术是 1950 年由德国人凯泽(J. Kaiser)开始研究的,1964 年美国应用于检验产品质量,从此获得迅速发展。材料的范性形变、马氏体相变、裂纹扩展、应力腐蚀及焊接过程产生裂纹和飞溅等,都有声发射现象,检测到声发射信号,就可以连续监视材料内部变化的整个过程。

4. 无损检测技术的发展历史

无损检测技术是以物理现象为基础的,回顾世界无损检测技术的起源,都是一种物理现象被发现后,随之进行深入研究并投入应用的,一般的规律往往是首先在医学领域、军工领域应用,然后推广到工业领域应用。

世界无损检测技术的发展历史可以大致上以第二次世界大战为重要的转折点:“二战”前已经起步并开始得到少量的初步应用,在“二战”期间,由于医学和军事的需要得到迅速发展,在“二战”后随着工业生产技术的迅猛发展,特别是近代和现代机械制造、电子技术、计算机技术的迅猛发展,现代无损检测技术已经发展到了很高的水平。

无损检测技术发展过程经历了三个阶段:无损探伤阶段、无损检测阶段和无损评价阶段。

第一阶段是无损探伤:主要是探测和发现缺陷;

第二阶段是无损检测:不仅仅是探测缺陷,还包括探测试件的一些其他信息,如结构、性质、状态等,并试图通过测试,掌握更多的信息;

第三阶段是无损评价:它不仅要求发现缺陷,探测试件的结构、性质、状态,还要求获取更全面、更准确的综合信息,如缺陷的形状、尺寸、位置、取向、内含物、缺陷部位的组织、残余应力等,结合成像技术、自动化技术、计算机数据分析和处理等技术,材料力学、断裂力学等知识综合应用,对试件或产品的质量和性能给出全面、准确的评价。

二、道路无损检测技术

在道路工程中,采用无损检测技术对道路工程施工质量及养护管理进行检测评定已有很长的历史,自 1956 年起,世界各国就开始使用贝克曼梁式弯沉仪测量弯沉,至今仍在使用。近年来,随着世界高等级公路修筑里程的增加,新建道路工程质量和现有公路网路况的评估速度与可靠性的提升显得越来越迫切。因此,道路工程中的无损检测技术发展十分迅速。许多道路工程中应用的无损检测技术借鉴了其他学科的发展成果,从诸如医学、军事及工业领域应用的无损检测技术引进或借鉴过来。

1. 道路无损检测技术定义

道路无损检测技术(Non-destructive Testing Technology for Highway)是指对路用材料或结构实施一种不损害或不影响其未来使用性能或用途的检测技术。

2. 道路无检测技术的分类

根据道路工程的特点,将道路无损检测技术分为基于结构变形的道路无损检测技术、基于贯入阻力探测的道路无损检测技术、基于机械波探测的道路无损检测技术、基于电磁波探测的道路无损检测技术、基于射线探测的道路无损检测技术及基于光学探测的道路无损检测技术等。

1) 基于结构变形的道路无损检测技术

主要包括贝克曼梁弯沉仪、落锤式弯沉仪(FWD)、便携式弯沉仪(PFWD)、高速自动弯沉仪及土刚度测定仪(GeoGauge)等。

2) 基于贯入阻力探测的道路无损检测技术

主要包括加州承载比试验法(CBR)、动力圆锥贯入法(DCP)、贯入式路面浅层强度探测法及 Panda 法等。

3) 基于机械波探测的道路无损检测技术

主要包括声发射、冲击回波和超声波检测技术等。

4) 基于射线探测的道路无损检测技术

主要包括核子湿度/密度仪和工业 CT 检测技术等。

5) 基于电磁波探测的道路无损检测技术

主要包括路面雷达(GPR)和无核密度仪等。

6) 基于光学探测的道路无损检测技术

主要包括激光平整度仪、激光车辙仪、红外成像仪及路面自动检测系统等。

3. 道路无损检测技术的发展

交通作为国民经济的大动脉,其发展状况直接影响国民经济发展的速度,在交通运输体系中,公路又是基础中的基础。道路工程的建设和管理质量,一直是困扰科研技术人员的一个重要问题,围绕这一问题,科研技术人员结合现代无损检测技术的发展,探索用不同方法检测路基和路面的各项指标,取得了一定的成果。道路无损检测技术发展经历人工测量、半自动化检测、自动化检测和高速自动化检测 4 个发展阶段。

第二节 道路无损检测技术特点

由于检测的目标体是道路,道路的平面存在形式是条带状构筑物,具有路线长、跨度大、随地形起伏明显、行驶车辆干扰、气候变化多端及路况复杂等特性,使得大多数道路无损检测设备具有灵活移动性特征。

另外还具有以下特点。

1) 便携式无损检测仪器设备袖珍化

随着计算机软件技术及电子元器件技术的不断发展,便携式无损检测仪器设备具备了向掌上型、袖珍化发展的条件,体积越来越小巧,重量越来越轻,但是功能并不减少,从而更方便现场使用。

2) 多种检测方法综合一体化

不仅仅是把同一检测技术中的多种功能合为一体化仪器,而且出现了把不同无损检测方法合为一体的综合检测仪器,如多功能路面检测系统等。

3) 检测结果显示的数字图像化

无损检测技术检测的是被检物体中的物理参数变化,其检测结果的表现是多种多样的,过去在无损检测仪器上反映的是波形信号、电压数值等,对检测人员的技术素质、实践经验要求很高,而且难以满足保存、诉诸众观、传阅等需要。随着计算机技术的飞速发展,无论是硬件还是软件都发展到了很高的层次,因此在无损检测技术应用中已经越来越多地利用数字图像处理(Digital Image Processing, DSP)技术,利用计算机来处理检测结果中的数据、图形和图像信息,将不直观的检测结果转变成可视图像,满足检测结果的可视化效果需要。

4) 检测工艺设计、检测结果评定的智能化

无损检测技术的基础是物质的各种物理性质或它们的组合及与物质相互作用的物理现象。检测结果的评定依赖于检测人员的主观因素,受到检测人员的技术水平、实践经验、思想与身体素质、知识状况等多种因素的影响,特别是无损检测结果的定位、定量与定性三大要素中的“定性”对于被检对象的安全评估有着特别重要的意义。

随着计算机技术和人工智能、思维科学研究的迅速发展,数字图像处理向更高、更深的层次发展,人们已开始利用计算机系统进行图像识别和评定,实现类似人类视觉系统理解外部世界,这被称为图像理解或计算机视觉。

例如,带有缺陷自动识别系统的X射线实时成像检测系统,能够实现半自动或全自动缺陷识别,可根据预设程序的参数对图像进行分析,并按照分析结果自动进行分级判断,用户也可采用半自动模式,当发现实际采样图像在某方面偏离预设程序参数时,系统将把缺陷部位的图像显示在屏幕上并存储相应的数据,由操作者判定缺陷部位为合格或不合格。检测结果评定智能化的关键是建立用户可以自行输入数据的数据库平台,以适应层出不穷的缺陷类型。

5) 多功能自动化无损检测系统

由于道路修筑里程的逐年增加,出于提高生产效率的需要,以及市场经济的深入发展,企业越来越重视成本效益,因此特别是我国经济改革开放以来,公路管理部门对自动化、半自动化检测的需求越来越大,从而大大促进了我国在道路多功能自动化无损检测系统方面的发展。

6) 测试速度快,采样频率高

传统的检测方法是随机选点,钻孔取样,进行室内分析处理,从中获取需要的工程参数。这种常规的方法存在很大的局限性:首先被测点是随机选择的,因而检测结果往往缺乏代表性;同时,由于检测点的密度稀,有些存在缺陷的不良区段极易被漏检,给后续工程留下隐患。

道路无损检测技术实现了由原来的单点检测向近似线或面的方向的跨越。例如,使用高速自动弯沉仪测试弯沉的采样间距可以达到厘米级及毫米级;利用红外成像仪对路面温度场探测可以达到平面温度探测,使得路面评价结果更客观、更准确和更快捷。

第三节 道路无损检测技术局限性与发展前景

应当提及的是,无论哪种无损检测方法都有其不同的物理基础,各有其优点和局限性。各种无损检测技术在应用上都有其自身的优势和局限性,没有任何单一的一种无损检测方法能探测并识别出道路中所有的缺陷。

一、道路无损检测技术的局限性

1) 在技术上测定准确度有待进一步提高

如用探地雷达法测量混凝土路面厚度,精确度与验评标准本身有差异,同时受操作者的专业熟练程度影响,会有人为误差。又如采用 FWD 测量得到路面结构动态弯沉盆精度完全可以满足要求,但根据测量的弯沉数据反演路面结构的力学参数还存在不尽完善的地方(反算模量结果不唯一等)。

2) 检测性能比较单一,综合质量鉴定有待于完善

就路面结构形式而言,可以是刚性路面,也可以是柔性路面。刚性路面又可以分为有接缝的普通混凝土路面、有接缝的钢筋混凝土路面、连续配筋混凝土路面、预应力混凝土路面等形式。随着新结构形式的不断出现,在质量鉴定时,不但要推定出路基、路面结构的质量情况,而且也涉及路基路面结构组成部分,如钢筋质量、接缝填缝料及其共同作用的状况,这就需要研制开发具备综合检测能力的新型无损检测设备。

3) 公路工程现有评定标准的规定限制

以混凝土检验评定为例,规范重以标准试件的混凝土强度的统计结果作为判定依据,对无损检测结果没有明确规定,这势必造成施工检验与监督相脱离的矛盾,从而也影响到无损检测新技术在工程实际中的推广应用。因此有必要明确无损检测的合法地位,将其检测方法和评定标准纳入规范,使无损检测新技术在工程质量监督与控制过程中发挥应有的作用。

4) 路面无损检测与评价涉及学科众多

先进的无损检测设备在科学上涉及许多学科分支,如力学、数学、光学、地球物理、电学等学科,在技术上涉及自动化检测、信息处理、计算机辅助工程等高新技术,设备操作维护复杂。同时它又密切联系工程实践,因而可以说,它是一个综合性很强的科研方向,要求理论研究、技术开发和工程应用三者密切结合、协同发展,这就需要科研部门、工程单位和检测机构加强联系,多学科技术人员通力合作,及时互通信息、资源共享,只有这样才能加快路面无损检测技术的发展速度。

二、道路无损检测技术的发展前景

近 30 年来,国际上道路工程的检测技术发展十分迅速,总体趋势是:由人工检测向自动化检测技术发展,由破损类检测向无破损检测技术发展,由一般技术向高新技术发展。例如,机电一体化技术及高精度传感器被应用于路面弯沉检测,激光技术被用于路面断面检测,雷达技术被用于路面厚度检测,模式识别与图像处理技术被用于路面病害观测等。无损检测技术因其现场性、实用性、快速性等特点,在道路工程中的应用愈来愈广泛,具体而言,在道路建设、运营养护及改建不同阶段发挥着越来越重要的作用。

在道路建设阶段,无损检测技术主要应用于施工质量检测与控制,通过采用先进、高效的检测评价技术,能够及时发现工程质量隐患,有效地防止路面过早破坏,从而避免因路面过早破坏造成直接的巨大人力、财力浪费,更可以避免通行能力降低等间接经济损失。

在道路建成后的养护管理阶段,随着使用时间的增加,路面使用性能会逐渐劣化,但劣化的速率是不均匀的。前期较缓慢,随着损伤累积,后期劣化速率加快,相应地,在不同时期恢复路面使用性能所需要的费用也明显不同,这就给养护决策提出了最佳修复方案或养路

资金优化分配问题。采用先进、高效的路面检测评价技术对路网进行跟踪检测和分析评价,可以深入认识路面使用性能劣化的基本规律,从而为优化养护方案、实现科学决策提供依据。否则,依赖人工检测手段或凭经验制定养路方案,往往会错过最佳修复时间,甚至“头痛医头,脚痛医脚”,使有限的养路经费不能充分发挥效益。

在路面改造阶段,采用无损检测手段,可以对路面剩余强度进行科学检测和评价,进而合理地确定改造方案,优化路面结构设计,从而节省工程造价或提高使用性能。

总之,路面检测与评价技术在检测和控制施工质量、提高公路养护管理科学化水平及改进路面设计等方面都具有十分重要的地位和作用,路面无损检测评价技术水平的不断提高给公路建设带来的经济社会效益是非常明显的。

主要参考文献

- [1] 梁新政,等.路面无损检测技术新发展[J].公路,2002.9.
- [2] 杨静,李孝兵.路面检测技术现状及未来发展趋势[J].公路交通科技应用技术版,2012年1期(总第85期) pp104-108.
- [3] 赵军.道路工程中无损检测技术及发展前景[J].上海公路,200401, pp57-60.
- [4] 夏纪真.国内外无损检测技术的现状与发展(2011年7月).无损检测资讯网 www.ndtinfo.net.

第二章 基于结构变形响应探测的道路无损检测技术

第一节 概 述

一、测试基本原理

基于结构变形响应探测的道路无损检测技术是通过道路材料施加一定的外力（静力、动力），测试其材料的相应变形值，而不对材料造成重大损坏，根据变形值来评价材料的强度特征。同等应力条件下，变形越大，强度越小；反之，变形越小，强度越大。

在道路工程中，基于结构变形响应探测的道路无损检测设备主要有贝克曼梁式弯沉仪、Dynaflect、落锤式弯沉仪、高速自动弯沉仪、便携式弯沉仪及 GeoGauge 等。这些设备在道路工程质量的控制和评估中占有重要的位置。

二、弯沉

在道路工程中，弯沉（Deflection）的定义、分类及影响因素如下。

1. 定义

一般是指路基或路面表面在规定标准车的荷载作用下轮隙位置产生的总垂直变形值（总弯沉）或垂直回弹变形值（回弹弯沉），以 0.01mm 表示。

2. 分类

1) 回弹弯沉

路基或路面在规定荷载作用下产生垂直变形，卸载后能恢复的那一部分变形。

2) 残余弯沉

路基或路面在规定荷载作用下产生的卸载后不能恢复的那一部分变形。

3) 总弯沉

路基或路面在规定荷载作用下产生的总垂直变形（回弹弯沉+残余弯沉）。

4) 容许弯沉

合格路面在正常使用期末不利季节，标准轴载作用下双轮轮隙中间容许出现的最大回弹弯沉值。它是从设计弯沉经过路面强度不断衰减的一个变化值，理论上是一个最低值。

5) 设计弯沉

设计弯沉值即路面设计控制弯沉值，是指路面交工验收时、不利季节、在标准轴载作用下，标准轴载双轮轮隙中间的最大弯沉值，理论上是路面使用周期中的最小弯沉值，是路面验收检测控制的指标之一。依据相关规范和标准由计算确定。

3. 影响因素

路面弯沉不仅反映路面结构层及土层的整体强度和刚度，而且与路面的使用状态存在一