

# 桥面铺装病害检测技术研究

郭成超, 许朋飞, 崔璨

(郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

**摘要:** 在桥梁的全生命周期中, 桥面板是最容易出现病害的部分。桥面铺装层常常由于施工方法选择不当、混凝土老化、钢筋锈蚀等原因产生各种病害, 这对桥梁结构、使用性能都会造成不利影响, 因此有必要对相关病害进行检测, 并对桥面质量做出相关评价。本文介绍了国内外四种主要无损检测方法(半电池电位法、探地雷达法、冲击回波法、红外热成像法)的工作原理以及相应的检测设备, 利用其中一种或几种方法能准确评估桥面板的恶化情况, 对桥面板状况进行快速、无损检测, 为实现桥面铺装的准确检测提供技术支持, 从而减少结构病害, 延长桥梁的使用寿命。

**关键词:** 桥面铺装; 病害; 无损检测

**中图分类号:** U446.1 **文献标识码:** A

## Study on Defect Detection Technology for Bridge Deck Pavements

Guo Chengchao, Xu Pengfei, Cui Can

(Institute of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The bridge deck is the most vulnerable part of a bridge during its entire life cycle. The deck pavement is often adversely affected by improper construction methods, the aging of concrete, and corrosion of steel bars. This then has an adverse effect on the structure and overall performance of the bridge. Therefore, it is necessary to determine defects related to the bridge deck and to conduct relevant quality evaluations. This article describes the mechanism, application methods, and testing equipment of four mainstream nondestructive testing technologies used worldwide: ground penetrating radar, half-cell potential, impact echo, and infrared thermography. The use of one or more of these methods can accurately assess the deterioration of the bridge deck and make a rapid, nondestructive evaluation, which provides technical support for rapid detection and accurate evaluation of the deck situation, leading to reduced structural defects and an extended bridge life cycle.

**Keywords:** bridge deck pavement; defect; nondestructive testing

### 一、前言

美国是世界上基础交通运输网最稠密的国家之一。全美各种各样的道路数以百万千米计, 仅洲

际公路就超过了  $3 \times 10^5$  km, 这之上又包括了几万座桥梁 [1]。同时, 伴随着人们对出行需求的增长, 交通的便利性已经成为了人们的一项基本权利。美国土木工程师学会 (ASCE) 在 2013 年的一份报告

收稿日期: 2017-11-18; 修回日期: 2017-11-30

通讯作者: 郭成超, 郑州大学水利与环境学院, 副教授, 研究方向为基础设施检测修复理论与技术; E-mail: wangchench@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”(2015-XZ-28)

本刊网址: www.enginsci.cn

中给桥梁的评价仅仅为 C+ 级（分 A、B、C、D 四个等级）[1]，在美国 102 个较大的都市区，每天约有两亿人次行驶在有缺陷的桥梁上。为了解决桥梁的相关结构缺陷，美国联邦公路管理局（FHWA）估计，到 2028 年，每年需要投入 208 亿美元，而实际上目前每年的投入仅仅只有 128 亿美元。各州及地方政府每年在桥梁方面需增加 80 亿美元的投资，以解决全国所有存在结构缺陷的桥梁所需要的维护费用 [2]。

在桥梁的全生命周期中，桥面板是最容易出现病害的部分。这主要是由于在冬季的几个里，除冰盐的使用导致了钢筋的锈蚀。因此，桥面板必须经常维修，并多次更换。为了判断桥面板的状况，目前在美国主要使用的方法有目测法和链拖法。另外，考虑到桥梁在交通系统中的重要性，如何对桥面状况做出快速检测与评价就显得很重要了。下面介绍几种常用的检测技术，包括破坏性检测与无损检测。

## 二、桥面板破坏性检测方法

在路面及桥面板的检测中，钻孔取芯机可以对强度较高的水泥混凝土取芯，如图 1 所示。然后检测芯样的强度和厚度，观察其内部的密实性；也可以对沥青混凝土取芯，检测其厚度、密度、压实度、空隙率、油石比、马歇尔稳定度等。另外，对桥面铺装钻孔，可判断铺装与梁板间是否存在结合面。

## 三、桥面板无损检测方法

传统的桥面板无损检测主要依靠目测法和链拖

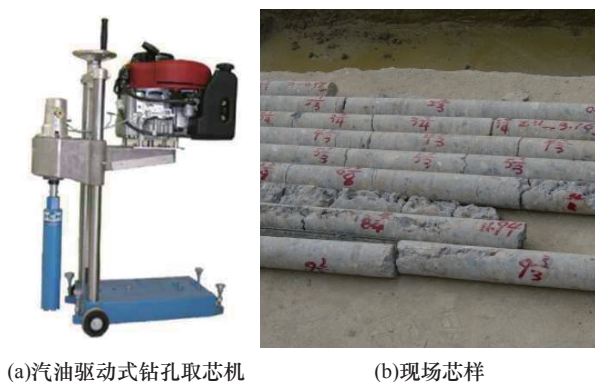


图 1 钻孔取芯机对水泥混凝土取芯

法。目测检查是在年度检查的基础上完成的，检查人员提供的数字评级为 0~9 级，0 级表示完全损坏，9 级表示完好无损 [3]。检查人员采用目测法寻找桥面板表面和腹板处存在的表面磨损、裂缝、风化、受潮等劣化病害。然而，经过对这种方法的可靠性进行深入的分析后发现，用该方法评估桥面板存在的问题并不可靠。此外，对于同一座桥面板，不同的检查人员的评价存在显著不同。

链拖法检查也是一种非破坏性的检测方法，通过在桥面板的表面拖动振动链，由检测者听取振动链产生的声音来判断桥面板存在的问题。然而对这种方法的分析表明，只有在桥面板破损面积较大时才能应用此方法。此外，类似于目测法检查，对于同一个桥面板，不同检查人员的评价差异性也很大。

### （一）半电池电位（HCP）法

美国材料与试验协会颁布的 ASTM C876 标准 [3] 提供了确定桥面板内部钢筋锈蚀区域的准则。例如，当检测设备中的电压表显示电压低于  $-350\text{ mV}$  时，表明内部钢筋锈蚀的概率是 90%。同样，当电压表显示电压高于  $-200\text{ mV}$  时，内部钢筋没有锈蚀的概率是 90%。HCP 布置图如图 2 所示，图中的参考电极是铜-硫酸铜电极。将该电极放在混凝土的表面，参考电极的一端连接电压表，另一端连接在暴露的钢筋上。钢筋锈蚀越严重，电压表读数会越小 [4]。

### （二）探地雷达（GPR）法

在桥面板的检查中，高频率（1~3 GHz）的探地雷达以与行车方向相同的走向快速地扫描桥面板。如果桥面板下的钢筋发生锈蚀，探地雷达的反射信号会和检测到没有发生锈蚀的钢筋不同，因此，

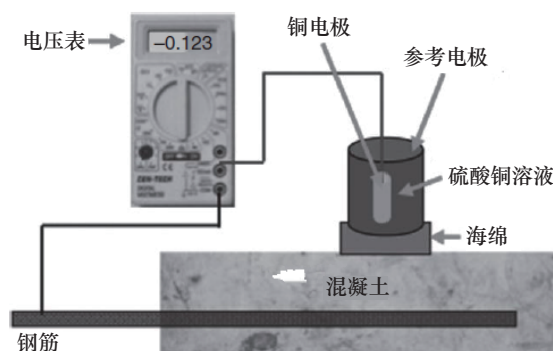


图 2 HCP 布置图

探地雷达法可以用于评价桥面板的劣化状态。

地面耦合的单极 GPR 数据采集如图 3 所示。为了让检测设备能在桥面移动，将天线连接到一个带轮子的小推车上，天线与数据采集单元相连接，该单元可以显示实时数据，以便在获得数据时进行实时检查。为了获得桥面板上的每一根钢筋的详细信息，沿桥面板宽度方向的每 1 cm 都要检查，沿桥面板长度方向，每 2 cm 收集一次数据。数据处理通常是在收集到所有数据之后进行，主要包括每根钢筋检测信号的振幅、时间和坐标。

在我国，随着高新技术的不断发展以及新材料的不断涌现，GPR 技术也获得了迅速的发展。到目前为止，GPR 技术已经广泛应用到了道路裂缝探测、地下空洞探测、地下埋设物探测、工程地质探测等多个领域。2007 年，罗斌 [5] 针对桥梁病害，通过 GPR 在探测中的数据采集、信号处理和图像识别，开展了 GPR 监测路面结构层厚度、破损状况和路基隐患异常部位的工作，取得了路面隐含裂缝和桥梁空心板顶厚度探测的实际应用。2012 年，郭士礼等 [6] 采用电磁波散射叠加原理，分析了垂直裂缝和倾斜裂缝的电磁波响应特征，快速、准确地检测桥梁裂缝及空心板顶厚度，为旧桥的维修和加固提供了更全面的技术数据。2012 年，潘海结等 [7] 运用 GPR 在介质间存在明显电磁学性质差异的特征，无损、高效地检测某大桥桥墩的钢筋保护层厚度是否符合设计要求。



图 3 GPR 数据采集

### (三) 冲击回波 (IE) 法

IE 法主要用于确定钢筋混凝土分层区域的位置、厚度和破损程度，IE 检测设备见图 4。它的工作原理是通过机械激发或冲击波产生的声波在混凝土中传播，在声波遇到混凝土和空气交界面时——通常是分层区或桥面板底部，反射回冲击源。接收器接收到反射波后，通过快速傅里叶变换公式将时域数据转换为频域数据，然后确定回波的频率峰值  $f$ ，以计算混凝土的厚度或缺陷：

$$d = V/2f$$

其中， $d$  为分层深度或混凝土厚度，in (1 in  $\approx$  2.54 cm)； $V$  为应力波的规定速度，in/s； $f$  为所记录波的频率峰值，Hz。

如果计算厚度等于桥面板，那么该部分无分层。为了更准确地确定分层区域或缺陷区域的大小，测试前先将桥面板网格化，然后沿网格收集测量信息。

张志清等 [8] 研究了 IE 法在钢筋混凝土桥面局部精确检测中应用的可行性，在单面测试中，形成 2D 或 3D 图像，直接对反射信号进行分析，对桥面铺装层的内部缺陷、脱层、钢筋网保护层厚度不足及钢筋网下沉现象进行精确判定。

### (四) 红外 (IR) 热成像法

运用红外设备测量材料的辐射温度已经在桥梁的混凝土病害检测中得到应用。IR 检测能快速检测混凝土分层和空隙部位。由于钢筋锈蚀造成的应力集中会导致钢筋上方和下方的混凝土劣化，钢筋附近会产生小空隙，这时混凝土就出现了分层，分层会阻断热量沿混凝土板的传播，从而改变桥面板的



图 4 冲击回波 (IE) 检测设备

热分布,灵敏的红外相机会捕捉到分层区和空隙区域呈现的“热点”[9]。

红外数据采集区域包括桥面板的全部位置。对安装有红外设备的车辆每行驶约 30 cm 收集一次数据,原始图像如图 5 所示。数据收集结束后,数据分析师使用专用的软件将图像按照每一条车道处理成单一的条带图像。在分析过程中,每一个图像都会与参考温度相统一,以便调整由风、过往车辆或其他因素引起的温度波动,然后将每一个通道的条带图像放在相邻通道的旁边,以生成整个表面的热图像。

当混凝土受到破坏而疏松后,强度就会下降,这些疏松部位的温度场分布与完好部位或周边混凝土的温度场分布会产生明显差异,这种差异在红外热成像仪上就会显示出比较明显的“热”“冷”点,这些显示“热”“冷”点的部位就是混凝土出现损伤的部位,如图 5 所示,白色斑点区域表示分层区或空隙区。每个图像中的异常区域都用光标进行了

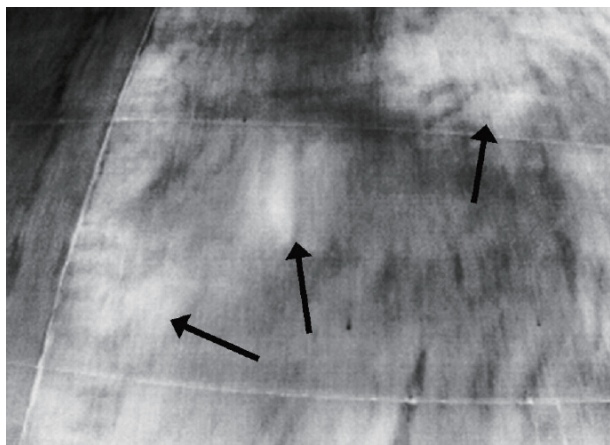


图 5 典型的原始图像,箭头表示分层区域

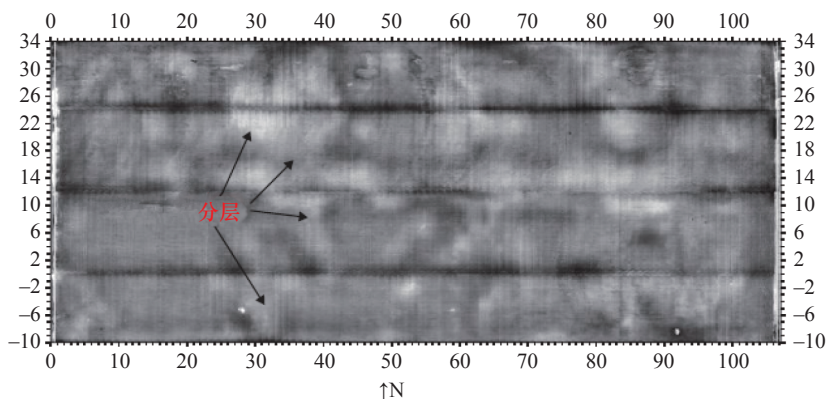


图 6 全桥面的复合红外图像(单位: cm)

概述,随后进行了映射和量化。图 6 和图 7 显示了复合红外热图像和所得到的映射量。

为了快速准确地评估桥面混凝土的分层和钢筋的锈蚀情况,近年来各种传感技术发展迅速,表 1 列出了目前用于公路桥面评估的商业传感技术。

近几年,红外探测技术取得了飞速发展,特别是非制冷红外焦平面阵列技术取得突破,红外热成像技术已成为国际上普遍关注的热门技术。我国已将红外热成像仪广泛应用于沥青路面施工时的温度检测。在材料的缺陷检测与评价方面,武汉理工大学黄鹂等人提出了基于碳纤维混凝土电热效应的红外热成像无损检测方法,并建立了碳纤维混凝土红外热成像方法的瞬态热传导温度分析模型和缺陷体的电-热耦合有限元分析模型。另外,哈尔滨工业大学、北方交通大学、东南大学、华南理工大学、西安交通大学、天津大学等高校的研究人员也对此进行了较为系统而深入的研究,取得了一些有价值的研究成果,为材料和构件的状态检测与评价奠定了理论和实验基础。

#### 四、结论与展望

根据国内外桥面板无损检测技术的文献资料,笔者主要对四种无损检测技术做了介绍,经过数十年的发展,现有的检测技术以及设备和功能已经十分成熟与完善。在对国内外研究现状进行调查和总结后,认为当前我国的桥面板无损检测主要存在四个方面的问题:①检测具有高度主观性,耗时甚多,且会引起交通堵塞;②提供的信息有限,并不能完全做到定期、实时的检查;③很多重大决策往往是基于有限的、主观推测的、过时的信息作出的,检

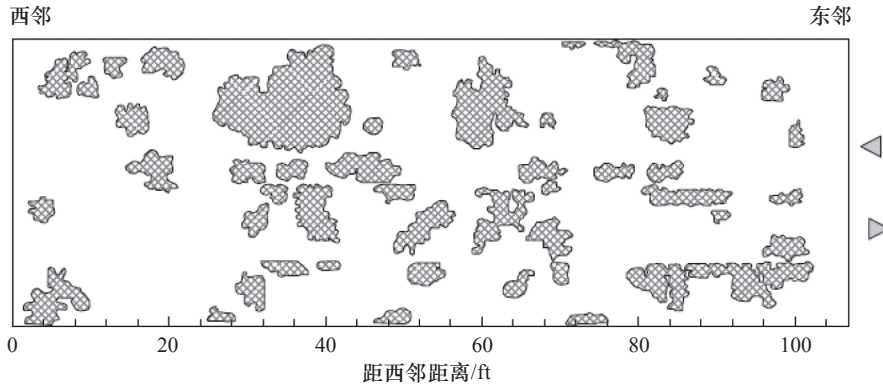


图7 红外热成像的映射结果 (1 ft = 30.48 cm)

表1 用于公路桥面评估的商业传感技术

位置	商业传感技术	测量指标
表面	3D 摄影测量	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面, 桥梁下沉
	街景风格摄像	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面
	光学干涉测量	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面, 振动
	数字图像相关法 (DICM)	桥梁的水平与竖向位移, 振动
	光谱分析	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 化学腐蚀, 表面凹陷
	光电飞机与卫星图像	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面
	激光雷达	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面, 桥梁的水平与竖向位移
	红外热成像	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷
	雷达	密封层缺失, 开裂, 两英尺内的剥落, 表面凹陷, 麻面, 振动
	声学 (如 IE 法)	表面裂缝
面板之下	红外热成像	裂缝含水率, 内水平裂缝, 表面凹陷, 平行裂缝, 凹陷
	雷达	断裂面, 腐蚀变化, 氯离子含量随深度的变化
	探地雷达 (GPR)	裂缝含水率, 断裂面, 表面凹陷, 水平裂缝下陷, 腐蚀变化, 氯化物随深度的变化
	声学 (如 IE 法)	内部水平裂缝, 空心回声, 断裂面, 腐蚀变化
	半电池电位 (HCP)	钢筋易锈蚀区域

测准确性有待提高; ④在数据的后期处理尤其是图像与音频自动识别方面, 还有所欠缺。

因此, 未来桥面铺装无损检测的重点在于如何实现检测图像的完全、快速、自动识别, 以及如何保证相当高的准确率, 也是目前相关学者亟需解决的技术难题。

参考文献

[1] Graybeal B A, Phares B M, Rolander D D, et al. Visual inspection of highway bridges [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2002, 21(3): 67-83.  
 [2] Zaniwski J. Vehicle operating costs, fuel consumption and pavement type and condition factors[R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2010.

[3] Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete [S]. American Society for Testing and Materials, 2009.  
 [4] Stratfull R. Half cell potentials and the corrosion of steel in concrete [R]. Highway Research Record, 2003: 12-21.  
 [5] 罗斌. 探地雷达在路基路面异常体病害探测中的应用 [J]. 公路工程, 2007, 32(6): 153-156.  
 Luo B. The Application GPR in the road subgrade anomaly detection of diseases [J]. Highway Engineering, 2007, 32(6): 153-156.  
 [6] 郭士礼, 蔡建超, 张学强, 等. 探地雷达检测桥梁隐蔽病害方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1812-1821.  
 Guo S L, Cai J C, Zhang X Q, et al. Research on bridges hidden diseases detection method by GPR [J]. Geophysics, 2012, 27(4): 1812-1821.  
 [7] 潘海结, 潘海军, 戴天帅. GPR 在桥梁无损检测中的应用研究 [J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(2): 85-89.  
 Pan H J, Pan H J, Dai T S. GPR in bridge bondestructive testing

- application [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 29(2): 85–89.
- [8] 张志清, 刘晓姗, 丛铖东, 等. IES 冲击回波仪在钢筋混凝土桥面局部精确检测的应用分析 [J]. 交通信息与安全, 2012, 30(5):135–138.
- Zhang Z Q, Liu X S, Cong C D, et al. Application of IES for local accurate detection in reinforced concrete bridge deck [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, 30(5): 135–138.
- [9] 李秀凤. 基于红外成像路面隐伏缺陷探测及有限元数值模拟技术研究(硕士学位论文) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- Li X F. Study of pavement concealed defects detection based on infrared imaging and finite element numerical simulation technology (Master's thesis) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.