

# 公路工程中的无损检测技术应用研究

夏饶锁

云南云路工程检测有限公司 云南 昆明 650000

**摘要：**本文聚焦公路工程中的无损检测技术应用。先剖析常见无损检测技术（超声波检测技术、雷达检测技术、红外热像检测技术、激光弯沉仪检测技术等）的工作原理、应用场景及优缺点。通过工程案例，深入分析无损检测技术在公路工程质量检测、病害诊断等方面的实际应用效果。最后，对无损检测技术在公路工程中的发展趋势进行展望，旨在为公路工程建设与养护提供科学依据和技术支撑，提升公路工程质量和安全性。

**关键词：**公路工程；无损检测技术；应用研究

## 1 引言

公路作为国家交通基础设施的关键组成部分，对经济发展和人民出行安全意义重大。随着我国公路建设规模持续扩大，使用年限不断增加，公路工程的质量检测与病害诊断问题愈发突出。传统检测方法往往会对公路结构造成破坏，影响公路正常使用，且检测结果存在局限性。无损检测技术凭借不破坏被检测对象、检测速度快、精度高等优势，在公路工程中得到越来越广泛的应用。深入研究其应用，对保障公路工程质量、延长使用寿命、降低养护成本及提高行车安全性具有重要现实意义。

## 2 常见的公路工程无损检测技术

### 2.1 超声波检测技术

#### 2.1.1 工作原理

超声波检测技术基于超声波在介质中传播的特性。当超声波在介质中传播时，遇到不同介质的界面会发生反射、折射和散射现象。超声波在介质中的传播速度与介质的密度（ $\rho$ ）、弹性模量（ $E$ ）等物理性质密切相关，其传播速度公式为：

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

（其中 $\mu$ 为泊松比）。当介质中存在缺陷时，超声波的传播路径会改变，反射波的幅度、相位和时间等参数也会发生变化。

#### 2.1.2 应用场景

在公路工程中，超声波检测技术主要用于检测混凝土结构的内部缺陷，如裂缝、空洞、不密实区等。以桥梁墩柱为例，在墩柱上每隔一定距离布置测点，一般测点间距为20-50cm，采用对测或斜测的方式发射和接收超声波信号。通过分析超声波在混凝土中的传播时间、波幅和频率等参数，判断混凝土内部是否存在缺陷。例

如，当传播时间明显延长、波幅显著降低时，可能表明混凝土内部存在空洞或不密实区<sup>[1]</sup>。此外，该技术还可用于检测沥青路面的厚度和压实度。在沥青路面检测中，通过测量超声波在路面材料中的传播时间，结合已知的超声波在该材料中的传播速度，即可计算出路面的厚度。

#### 2.1.3 优缺点

检测灵敏度高，能发现微小缺陷；对被检测对象形状和尺寸适应性强；检测设备相对简单，操作方便。对检测人员经验和技术要求高；检测结果易受混凝土中骨料分布、钢筋等因素影响；检测深度有限，对于较厚的混凝土结构（如厚度超过1m的桥梁墩柱），检测效果可能不理想。

## 2.2 雷达检测技术

### 2.2.1 工作原理

雷达检测技术利用高频电磁波在介质中传播时，遇到不同介电常数（ $\epsilon$ ）的界面会发生反射的原理。电磁波在介质中的传播速度：

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

（其中 $c$ 为光速）。通过发射天线向被检测对象发射高频电磁波，电磁波在介质中传播遇到目标体（如缺陷、不同材料界面等）时会发生反射，反射波被接收天线接收。经过信号处理和分析，根据反射波的旅行时间（ $t$ ）、幅度（ $A$ ）、相位（ $\phi$ ）等参数，利用公式：

$$d = \frac{v \times t}{2}$$

（ $d$ 为目标体深度）确定目标体的位置、深度和性质。例如，当路面基层与面层之间存在脱空时，由于两者介电常数差异较大，电磁波会在脱空界面发生强烈反射，反射波的旅行时间和幅度会发生变化，从而可以确定脱空的位置和深度。

### 2.2.2 应用场景

在公路工程中,雷达检测技术广泛应用于路面结构层厚度检测、路面下空洞和脱空检测、路基病害检测等方面。以某高速公路路面养护工程为例,采用地质雷达对路面进行检测。雷达天线频率通常选择400MHz-1GHz,根据路面结构情况调整<sup>[2]</sup>。在检测过程中,雷达车以5-10km/h的速度沿路面行驶,连续采集数据。通过分析雷达图像,可以清晰地看到路面各结构层的界面反射信号,从而准确测量路面各结构层的厚度。对于路面下的空洞和脱空检测,雷达图像上会显示为明显的异常反射区域,结合反射波的旅行时间和幅度等信息,可以确定空洞和脱空的位置、大小和深度。

### 2.2.3 优缺点

检测速度快,效率高;能连续、大面积检测;对被检测对象无损伤;可获取被检测对象内部的二维或三维图像,直观显示缺陷位置和形态。检测精度受电磁波频率、介质的电性参数等因素影响;对于深部目标(深度超过3m)的检测能力有限;在金属等导电介质中,电磁波衰减较快,检测效果不佳。

## 2.3 红外热像检测技术

### 2.3.1 工作原理

红外热像检测技术基于物体的热辐射原理。任何温度高于绝对零度(-273.15℃)的物体都会向外辐射红外线,红外线的辐射强度与物体的温度(T)有关,遵循斯特藩-玻尔兹曼定律:

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

(其中M为辐射出射度,ε为物体的发射率,σ为斯特藩-玻尔兹曼常数)。通过红外热像仪接收被检测对象发出的红外线辐射,并将其转换为电信号,经过处理后以热像图的形式显示出来。当被检测对象内部存在缺陷或病害时,会导致局部的热传导性能发生变化,从而使该区域的温度分布与周围正常区域不同。

### 2.3.2 应用场景

在公路工程中,红外热像检测技术主要用于检测路面脱空、裂缝、桥面铺装层病害等。以某城市道路检测为例,在夜间环境温度相对稳定(环境温度波动小于±2℃)的情况下,使用红外热像仪对路面进行扫描。红外热像仪的分辨率一般为320×240或640×480像素,热灵敏度小于0.05℃。通过分析热像图中的异常热斑和冷斑,判断路面内部是否存在脱空、裂缝等病害。对于桥面铺装层病害检测,红外热像技术可以快速检测桥面铺装层下的脱空和裂缝,评估桥梁的使用性能。

### 2.3.3 优缺点

检测速度快,能实现大面积快速扫描;非接触式检测,对被检测对象无损伤;可直观显示被检测对象的温度分布情况,便于发现异常区域<sup>[3]</sup>。检测结果易受环境温度、风速、日照等外界因素影响;对于深部缺陷(深度超过0.5m)的检测能力有限;热像图的解读需要一定经验和专业知识。

## 2.4 激光弯沉检测技术

### 2.4.1 工作原理

基于激光测量检测路面弯沉。激光发射器向路面发激光,反射光被接收器接收。路面因荷载等因素弯沉变形时,与发射器、接收器相对位置改变,反射光角度或位置变化。通过测量该变化量,结合几何关系和算法,可算出路弯沉值。如检测时,发射器和接收器固定在检测车上,行驶中测量,车辆经过某点路面弯沉,接收器信号变化,经数据处理系统得弯沉数据。

### 2.4.2 应用场景

公路工程中用于路面强度评估、养护决策、质量验收。如某城市道路改造前,用该技术检测原路面弯沉值,评估强度和承载力,为改造方案提供依据;养护时定期检测,对比数据,分析弯沉趋势,发现早期病害,制定养护计划;交工验收时检测弯沉,判断是否达设计要求,确保工程质量。

### 2.4.3 优缺点

精度高,能测微小弯沉变化;速度快,可连续快速检测;无损路面;数据采集处理自动化高,结果可靠。设备成本高,购买和维护投入大;对环境要求高,恶劣天气影响检测;特殊路面结构(如含大量金属反射物)会干扰激光,影响精度。

## 3 应用案例分析:京港澳高速公路某路段路面病害检测

### 3.1 工程概况

京港澳高速公路是我国重要的南北交通干线,某路段通车已达15年,部分路段出现了不同程度的路面病害,如裂缝、车辙、坑槽等。为了准确了解路面病害的分布情况和严重程度,为路面养护提供科学依据,采用雷达检测技术和红外热像检测技术对路面进行了全面检测。

### 3.2 检测过程

(1) 雷达检测:使用美国GSSI公司的SIR-4000型地质雷达,配备900MHz天线。检测时,雷达车以8km/h的速度沿路面行驶,测线间距为1m。在检测过程中,实时采集数据,并通过配套软件进行处理和分析。通过分析雷达图像中的反射信号,确定路面各结构层的厚度和路面下的空洞、脱空等病害位置。例如,在某一段路面检

测中,发现雷达图像上存在明显的异常反射区域,经分析确定为路面基层与底基层之间的脱空,脱空面积约为15m<sup>2</sup>,深度在0.3-0.5m之间。

(2) 红外热像检测:在夜间环境温度为18℃、风速小于2m/s的条件下,使用FLIRT640型红外热像仪对路面进行扫描。红外热像仪的分辨率为640×480像素,热灵敏度为0.04℃。扫描时,红外热像仪距离路面高度为2m,扫描速度与雷达检测车同步。通过分析热像图中的异常热斑和冷斑,判断路面内部是否存在脱空、裂缝等病害。在上述发现脱空的路段,红外热像图上显示该区域温度比周围正常路面低2-3℃,进一步验证了脱空的存在。

### 3.3 检测结果与分析

雷达检测结果显示,该路段部分路面基层存在脱空现象,脱空面积总计约200m<sup>2</sup>,脱空深度在0.2-0.6m之间;路面面层厚度不均匀,部分区域厚度偏差超过10%。红外热像检测发现,路面裂缝和脱空区域在热像图上表现为明显的异常热斑,与雷达检测结果相互印证。同时,还发现部分路面区域存在温度异常,可能存在路面材料性能不均匀等问题。

### 3.4 养护措施

根据检测结果,对存在脱空的路段进行了注浆处理,注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆,注浆压力控制在0.5-1.0MPa。对裂缝进行了灌缝处理,灌缝材料采用改性沥青。对厚度不足的路段进行了加铺补强,加铺层厚度为4-6cm。经过养护后,路面的使用性能得到了明显改善,行车舒适性提高,路面病害得到了有效控制。

## 4 无损检测技术在公路工程应用中存在的问题及解决措施

### 4.1 存在的问题

当前我国公路工程无损检测技术应用仍存在诸多问题:一是技术标准不完善,不同方法和设备缺乏统一评判依据,影响结果可比性与可靠性;二是检测人员素质参差,部分人员缺乏专业培训,操作不规范,易造成误判或漏检;三是检测设备性能有待提升,国产设备在精度、稳定性及数据分析能力方面与国外先进水平仍有差距;四是多种检测技术综合应用不足,缺乏协同工作机制,难以全面准确评估工程质量与病害状况。

### 4.2 解决措施

为解决公路工程无损检测中存在的问题,应从多方面着手:一是完善技术标准,加快制定统一的检测规范

和评判标准,提升检测结果的可比性和可靠性;二是加强人员培训,建立资格认证制度,提升检测人员的专业能力和操作水平;三是提高设备性能,加大研发投入,推动国产设备精度、稳定性与数据分析能力的提升,借鉴国际先进技术;四是强化多种检测技术的综合应用,根据工程实际合理组合使用不同技术,建立协同工作机制,全面提升检测的准确性和全面性,如在桥梁检测中综合运用超声波、雷达和弯沉仪等技术。

## 5 无损检测技术在公路工程中的发展趋势

无损检测技术在公路工程中的发展趋势主要体现在智能化、多功能集成化以及微型化与便携化三个方面。随着人工智能、大数据和物联网等技术的发展,检测设备将具备自动识别、分析和诊断功能,实现检测数据的实时处理与报告自动生成,提升效率与准确性,例如通过AI算法快速识别雷达图像中的病害<sup>[4]</sup>。同时,为满足多样化检测需求,设备将向多功能集成方向发展,一台设备集合超声波、雷达、红外热像等多种检测功能,提高现场检测效率。此外,为了适应复杂多变的施工环境,设备还将更加小巧轻便,便于携带与操作,如手持式检测仪器的研发,使检测工作更加灵活高效。

## 结语

无损检测技术在公路工程中扮演重要角色,为质量检测、病害诊断和养护决策提供科学依据。本文介绍了常见无损检测技术的工作原理、细节、应用场景及优缺点,并通过具体案例展示了实际应用效果。尽管存在一些问题,如准确性受操作影响等,但相应的解决措施也已提出。未来,无损检测技术将向智能化、多功能集成化、微型化和便携化发展,与新材料、新工艺结合,提供更高效的检测手段。强调在实际工程中应加强该技术的应用研究,以提升检测水平和质量,确保公路工程的安全可靠运行。

## 参考文献

- [1]韩堃.无损检测技术在公路工程检测中的应用分析[J].时代汽车,2024,(05):195-197.
- [2]郭晋波.关于无损检测技术在公路工程中的应用[J].黑龙江交通科技,2023,46(02):179-181.
- [3]桂慧清.无损检测技术在公路工程中的应用及趋势[J].交通世界,2021,(36):82-83.
- [4]陶海飞.基于无损检测技术的公路桥梁安全评估方法研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(08):57-59.