

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社会安全性。

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（ ρ ）、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 μ 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^[1]。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（ ϵ ）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（ ϕ ）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^[2]。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°C）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：

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

（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°C）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°C。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^[3]。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射激光，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，可算出路面弯沉值。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15m²，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°C、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°C。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°C，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200m²，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^[4]。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.