

桥梁隧道质量检测中的无损检测技术与数据分析

文 / 薛 宁 广信检测认证集团有限公司

摘要: 本文探讨了无损检测技术在桥梁隧道质量检测中的应用,并深入分析了检测数据的处理方法。介绍了超声波检测、射线检测、探地雷达检测及红外线高温照相技术等多种无损检测技术,并详细阐述了它们在桥梁隧道质量检测中的实际操作与效果。同时,文章还讨论了数据采集、处理流程,以及包括统计分析、模型分析、数据挖掘在内的多种数据分析方法。此外,数据可视化技术在桥梁隧道检测中的应用也得到了深入探讨。这些技术的应用不仅提高了检测的精准度,还为桥梁隧道的稳定提供安全保障。

关键词: 桥梁隧道; 质量检测; 无损检测技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.060

引言

随着基础设施建设的不断推进,桥梁和隧道作为交通网络的重要组成部分,其安全性与稳定性日益受到关注。为了有效监控和评估这些结构的质量,无损检测技术与数据分析方法应运而生,在工程实践中发挥出重要的作用。

一、无损检测技术概述

(一) 无损检测技术的定义

无损检测技术,英文简称NDT,指的是在不破坏被测元件完整性的基础上,运用物理、化学或光学原理,结合高端设备与技术手段,对被检测对象实施全面细致的检测。该技术能够精确地识别出材料和产品内部或外部存在的缺陷,诸如裂缝、空隙、脱胶、脱层、残余应力、配合不良、尺寸偏差以及材料的非均匀性等问题。利用无损检测,能够精确地定位这些缺陷的位置,测量其尺寸并分析其性质,及时发现潜在问题并采取相应的修复措施。无损检测技术在工业领域的应用价值非常广泛,它不仅对提升和监控产品质量有所帮助,还能保障材料、零部件和产品的可靠性,同时也为设备的运行提供安全保障,提升生产效率并降低生产成本与潜在风险。

(二) 无损检测技术的分类及应用场景

无损检测技术可根据不同的准则进行归类。依据检测原理的差异,该技术可划分为超声检测、射线检测、磁粉检测及涡流检测等。超声检测是借助超声波在材料中传播的特性来探知缺陷,射线检测则利用X射线或 γ 射线的穿透能力来检测材料内部的问题;磁粉检测通过磁场感应来识别材料表面的裂纹等缺陷,而涡流检测则是依据材料中涡流的变化来分析其内部结构和潜在缺陷。另外,根据检测对象的不同,如金属、非金属及复合材料等。以及根据检测目标的不同,如探伤、结构评估及材质分析等,也可对无损检测技术进行分类。在桥梁与隧道的质量检测中,无损检测技术的应用尤为关键。桥梁与隧道作为支撑社会发展的重要基础设施,其安全稳定不容忽视。利用超声检测,能够精确探知混凝土构件中的裂缝和空洞等缺陷;射线检测则能揭示钢结构内部可能存在的焊接缺陷或材料不均匀等问题;磁粉检测常用于发现铁磁性材料表面或近表面的缺

陷,涡流检测则特别适用于导电材料的检测,例如桥梁中的钢筋结构。

二、桥梁隧道质量检测中的无损检测技术

(一) 超声波检测技术

超声波检测技术作为一种标准的无损探伤手段,主要依靠超声波原理来实施检测,借助的工具是超声波检测仪。该技术的操作原理在于运用声波来探测隧道工程中潜在的裂缝或漏洞。在隧道工程中,任何流经墙面缝隙或漏洞的气体都会产生涡流,其强度各异。超声波检测仪能够精确地捕捉这些涡流的位置和强度,并在仪器屏幕上以波段形式清晰展示。检测人员除了可以观察超声波检测仪的屏幕显示外,亦能通过耳机来判断气体泄漏的方向。当接近损伤区域时,气体流动的声音会增大,数位信号的波动也会变得更为明显。若在检测现场存在较多杂音,检测人员可利用橡皮管适当缩小声波的接收范围并遮蔽其他干扰超声波的因素,以减少噪音对检测结果的干扰。人类的耳朵通常能感受到的声波频率范围在20赫兹至20000赫兹之间,但次声波和超声波则无法被人类耳朵所感知。这意味着自然风吹过隧道裂缝时产生的大部分声波,人耳是无法捕捉的。因此,需依

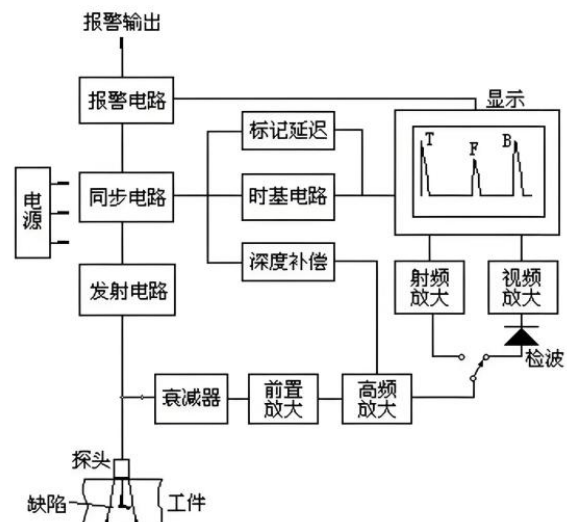


图1 超声波的工作原理

超声波仪器主动发射声波，并借助涡流的回声来定位裂缝。超声波检测技术因其稳定可靠的检测结果而得到广泛应用。超声波束能够集中并稳定地沿特定方向传播，虽然传输过程中会有一定的信号衰减和散射，但损失相对较小，几乎可以忽略。总体而言，超声波检测技术不仅适用于检测较厚的材料，而且灵敏度高、速度快、成本低且无害。目前市场上广泛采用的是脉冲反射式超声波检测仪。需注意的是，超声波检测技术也存在某些局限性，例如探伤难度较大且结果不易保存。因此，在操作超声波检测仪器时，应由经验丰富的专业人员执行，以确保检测的高效性和准确性。

(二) 射线检测技术

在桥梁隧道质量检测领域，射线检测技术依托射线在穿透不同物质时产生的衰减效应，揭示出结构内部的详细状况。当射线穿越不同物质层时，其强度会随物质密度、厚度及射线性质的差异而有所衰减，这种变化为检测人员提供了洞察结构内部状况的线索。X射线因具备卓越的穿透能力，在桥梁隧道检测领域中被广泛应用。它能够轻松穿透厚度高达40cm的混凝土结构，并清晰地呈现出其内部结构细节，为探测团队精确识别和定位潜在问题区域提供了有力支持，为后续的维修工作打下了坚实基础。但传统的射线检测技术也存在一定限制。为了获取全面的检测数据，常需在多个位置部署探测设备，这增加了操作的复杂性和经济投入。另外，在面对特别厚重或结构复杂的区域时，射线可能难以完全穿透，从而影响检测结果的准确性。同时，设备的使用和维护成本相对较高，这也对技术的广泛推广构成了一定限制。近年来，随着科技的不断进步，新型射线检测技术应运而生。例如，借助高性能探测器的工业CT技术，显著提升了检测的准确性。该技术利用旋转的探测设备和探测器阵列，捕获检测对象的三维图像，从而精准地定位和量化评估缺陷。



图2 射线检测施工图

(三) 探地雷达检测技术

探地雷达检测技术能有效地检测隧道工程内部结构的紧密程度，并据此判断隧道的质量。同时，它还能探测到包括地下水位、土层厚度、岩层构成以及隧道净宽度等在内的多项关键信息，为工作人员提供重要的质量检查参考，确保隧道的顺利验收。与超声波检测技术相似，探地雷达检测技术也通过发射和接收信号的方式来工作，但其独特之处在于发射的信号是高频电磁波。这

些高频电磁波由雷达设备通过激振方式产生，直接对隧道路基地面发射射频电磁波，并接收返回的采样信号。探地雷达检测技术不仅精度高而且速度快，在隧道工程质量检测领域有着悠久的历史。该技术所发出的射频电磁波通过特制的固体共振腔获得，具有较短的频率和较长的波长，同时拥有入射、反射、衰变和折射等传播特性。整个雷达检测设备包括天线、发射机、接收机、信号处理器及终端设备。在工作时它通过天线发射高频电磁脉冲波，利用介电常数来区分地层系统的不同结构层。当遇到电磁特性不同的结构层时，部分电磁波会被反射回来，而另一部分则继续深入下一层介质进行探测。每次探测的结果都会在终端上以不同的信号变化曲线显示，根据这些信号的特征可以精确地识别出隧道工程中存在的质量问题，采取相应的解决措施。

(四) 红外线高温照相技术

针对现代化隧道工程建设质量开展无损检测工作，需要相关工作人员运用各类现代化科学技术，以此来对隧道工程，整体施工质量进行有效把控。而在实际隧道工程质量检测过程当中，红外线高温照相技术应有的极为良好的应用效果。在该项技术应用的过程中，工作人员应用设备可发射测量隧道墙体的辐射热，随后借助设备当中的红外线记录系统，对墙体表面的具体温度分布状况有效呈现，通过温度变化的观察，便能掌握热量在墙体表面的流动状况，同时温度的变化还会影响结构机理以及内部水资源的流动，相关工作人员通过墙体表面温度的异常状况，便能够明确结构当中存在的质量问题。采用红外线高温照相技术开展隧道工程质量检测工作，相关工作人员往往会将红外线照相机和扫描器安装在移动车厢上，以此来对隧道内部衬砌以及围岩间水资源在不同温度的流动进行信息收集，还会对其后方地质条件的变化以及衬砌缺陷问题作出明确探测，该种检测技术应用效果极为理想。

表1 红外线高温照相技术检测数据

序号	检测位置	温度范围 (°C)	热量流动状态	潜在质量问题
1	北侧墙体	25-30	正常	无
2	南侧墙体	30-37	异常	水分积聚
3	顶部衬砌	28-32	正常	无
4	底部围岩	24-28	轻微异常	可能的裂缝

三、桥梁隧道质量检测数据分析

(一) 数据采集与处理流程

在采集阶段根据桥梁隧道的结构和特性，需精准布置诸如挠度传感器、应变传感器和位移传感器等多种传感器，这些传感器的合理配置能实现关键结构数据的实时监控与收集。完成数据采集后，信息将通过有线或无线网络迅速传输至数据中心，以保障信息的即时性和效用性。数据处理也是一个关键环节，它包含若干重要步骤。数据清洗是第一步，该过程中会严格筛选并剔除含噪声和异常的数据，以保障数据集的准确性和可信度，为之后的分析打下坚实的基础。接下来是数据统计分析，这一阶段会对清洗后的数据进行详尽的探究，计

算包括均值、方差以及极值在内的各类统计指标，从而全面揭示桥梁隧道结构的变化情况。为了更深入地挖掘数据价值，特征创建成为不可或缺的一环。利用高级算法和模型，从庞大的原始数据集中提炼出富有意义的特征，这些特征对后续的数据挖掘与深度分析具有极大的助力。当面临高维数据时，数据降维成为一个关键步骤。此步骤意在缩减数据的复杂性和运算量，通过削减输入数据的维度来有效提高算法的运行效率和精确度。整个数据采集与处理的流程具备高度的技术性，且要求严谨地操作与周密地管理。

(二) 数据分析方法

桥梁隧道质量检测数据的分析方法构成了一个多层面、多角度的框架体系，该体系融合了统计分析、模型构建与数据挖掘等多种技术途径。统计分析作为这一框架的基石，它涉及对数据的系统性整理，并计算出诸如平均值、方差及协方差等核心统计指标，从而揭示数据

间的内在联系与规律。此方法有助于初步把握数据的分布特点，为后续的高级分析奠定坚实基础。在数据处理流程中，模型分析占据举足轻重的地位。该方法依赖于数学模型的构建，旨在对数据进行精准的拟合与未来趋势的预测。回归分析、时间序列分析等技术是模型分析中的常用工具，它们能够阐释自变量与因变量之间的关联，预测数据未来的演变方向，进而为桥梁隧道的保养与管控提供有力的决策依据。数据挖掘技术的引入，使得从庞大数据集中提炼有价值信息与知识成为可能。聚类分析技术能够辨识数据集中的群组特征，而关联规则挖掘则能发掘数据元素间的联系与模式。这些先进技术为深刻理解桥梁隧道质量检测数据提供了关键的辅助手段。针对桥梁隧道质量检测数据的独特性，基于机器学习的分析方法同样展现出卓越的解析能力。支持向量机(SVM)、随机森林等分类技术能够有效地对数据进行归类与识别，而神经网络等回归方法则能对复杂的非线性

表 2 桥梁隧道质量检测数据分析方法

序号	分析方法	主要技术	应用目标	示例指标
1	统计分析	均值、方差分析	数据初步整理与内在联系揭示	平均值、标准差
2	模型分析	回归分析	数据拟合与未来趋势预测	回归系数、预测误差
3	数据挖掘	聚类分析	群组特征识别	聚类数目、聚类中心
4	机器学习	支持向量机	数据分类与识别	分类准确率、召回率

性关系进行建模与预测。

(三) 数据可视化技术

在桥梁隧道质量检测领域数据可视化技术的应用范围相当广泛，其重要性不言而喻。举例来说，利用各种图表，诸如折线图、柱状图等，能够明确地展示出桥梁隧道的关键监测指标，例如应力、形变、温度等的即时数据以及它们的历史变化趋势。这种可视化的表现方法不仅有助于工程师迅速了解桥梁隧道的整体状况，同时也为后续维护决策的制定提供了坚实的数据基础。不仅如此，三维模型可视化技术的采用，进一步以立体且直观的方式展现了桥梁隧道的结构和形变状况。借助这一技术，人们能够从多个视角观察和解析桥梁隧道的详细特征，从而更为精确地评估其安全性能和稳定性。这无疑为工程师们提供了一种新颖且高效的检测方式。数据可视化技术在异常侦测与预警系统中的应用亦值得称赞。通过设定适宜的预警界限和运用前沿算法，系统能够实时监控桥梁隧道的各项核心指标。一旦数据出现异常变化，系统便能即刻触发警报，促使相关人员及时采取应对措施。

四、无损检测技术与数据分析的发展趋势

(一) 智能化检测技术的创新与发展

在桥梁隧道质量检测领域，智能化检测技术正逐渐成为引领行业变革的重要力量。借助尖端的算法与人工智能技术，该技术不仅实现了对桥梁隧道结构的自动识别，更能够完成高精度的损伤评估。利用机器学习、深度学习等先进技术，系统能够独立地解析复杂的检测数据，准确地识别潜在的安全隐患，并及时发出预警。智能化检测技术的广泛运用预示着检测精准度和效率的

大幅度提升，为桥梁隧道的安全稳定运营构建了坚实的保障。

(二) 多技术融合的检测方法

不同的无损技术各具特点与优势，通过精心融合能够对桥梁隧道的质量进行更为详尽和全面的评估。例如，红外线热成像技术、超声波检测技术以及激光全息摄影技术等，它们之间的融合运用能够相互补充，揭示更多关于桥梁隧道状态的细节信息。这种多技术融合的策略展现了更加精确的结构健康状态全貌，为后续的维护保养工作提供了科学的依据。

结束语

本研究通过对无损检测技术与数据分析方法的深入探讨，揭示了它们在桥梁隧道质量检测中的重要性。这些技术不仅为工程师提供了科学决策支持，还有助于提升基础设施的安全性和稳定性。未来，随着技术的不断创新与发展，智能化检测和多技术融合将成为主流趋势，进一步推动桥梁隧道质量检测领域的进步。建议相关部门持续关注技术动态，及时更新检测手段，以确保交通基础设施的安全运营。

参考文献

[1] 刘华. 无损检测技术在隧道工程质量检测中的应用分析[J]. 运输经理世界, 2023, (18): 81-83.
 [2] 张徐. 隧道工程质量检测中无损检测技术的应用分析[J]. 工程技术研究, 2023, 8(05): 90-92.
 [3] 陈兵. 无损检测技术在桥梁工程质量检测中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2021, (34): 97-99.
 [4] 杨诚河. 隧道工程质量检测中的无损检测技术[J]. 四川建材, 2019, 45(09): 190-191.