

# 桥梁老化与损伤评估的有效方法

文 / 贾 振 山东鲁鉴工程检测鉴定有限公司

穆振泉 山东鲁鉴工程检测鉴定有限公司

**摘要：**随着桥梁的日益老化和使用年限的增加，桥梁的损伤评估与健康监测变得尤为重要。传统的评估方法如视觉检测和物理检测虽然广泛应用，但在识别隐蔽损伤、精确度和效率上存在一定局限。结构健康监测技术（SHM）和人工智能（AI）技术的发展为桥梁损伤评估提供了更精确、实时的解决方案。本文通过探讨不同类型桥梁的老化与损伤评估，分析了传统评估方法与现代智能技术的优势与不足，并通过实际案例展示了智能技术在桥梁健康监测中的应用。研究表明，结合传感器技术与人工智能分析，能够显著提高桥梁评估的精度和效率，为桥梁的长期健康管理提供有效的技术支持。

**关键词：**桥梁；损伤评估；人工智能；传感器技术；智能监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.11.080

## 引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，其安全性直接关系到人民生命财产的安全。随着使用年限的增加，桥梁结构会出现不同程度的老化和损伤，可能影响其承载能力和使用寿命。如何及时有效地评估桥梁的健康状况，成为了结构工程领域中的一个重要课题。传统的损伤评估方法，如视觉检测、超声波检测等，依赖人工检查和现场检测设备，虽然广泛应用，但在面对复杂结构和隐蔽性损伤时存在一定局限性。随着信息技术和传感器技术的迅速发展，结构健康监测（SHM）技术逐渐成为桥梁评估的重要手段。人工智能（AI）和大数据分析技术的引入，为桥梁损伤的自动识别、健康评估和维护决策提供了新的可能性。本文旨在探讨桥梁的损伤评估方法，并重点分析智能化评估技术在桥梁健康监测中的应用。

## 一、桥梁老化与损伤的基本概念

### （一）桥梁的分类与老化机理

桥梁根据功能、结构和材料可分为公路桥梁、铁路桥梁、城市桥梁等多种类型。常见的结构形式包括梁式桥、拱桥、悬索桥和斜拉桥等。随着桥梁使用年限的增加，老化是不可避免的，主要包括物理老化、化学老化和力学老化。物理老化受温度、湿度等环境因素影响，导致材料膨胀收缩，产生裂缝。化学老化主要表现为钢筋腐蚀和混凝土碱-骨料反应，这会削弱桥梁承载力。力学老化则主要由交通荷载作用引起，尤其是超载车辆频繁经过，容易加速疲劳损伤。桥梁老化是一个多因素、长期积累的过程，涉及材料的物理和化学变化以及外部荷载的影响。

## （二）常见的损伤类型

桥梁的常见损伤类型包括裂缝、腐蚀、变形和磨损等。裂缝通常由荷载作用、温湿变化和冻融作用引起，会影响桥梁耐久性并加速腐蚀。腐蚀主要发生在钢筋中，特别是在含氯盐的环境中，可能导致钢筋强度下降和混凝土剥落。变形损伤表现为桥梁的弯曲、位移或下沉，通常由不均匀荷载或地基沉降引起。磨损损伤主要发生在高交通流量的桥面，由车辆摩擦导致材料损耗。不同类型的损伤可能互相影响，导致桥梁性能下降，因此在损伤评估时需要综合考虑各种损伤的共同作用。

## 二、评估方法概述

### （一）传统评估方法

传统的桥梁损伤评估方法主要包括视觉检测和物理检测。视觉检测是一种直观的评估方法，通过人工目视检查桥梁的结构表面，识别裂缝、腐蚀、变形等明显的损伤。这种方法操作简便，费用较低，但其局限性在于只能发现显露的损伤，且受检查人员经验和视角的限制较大，难以对隐蔽或微小的损伤进行准确判断。视觉检测常常作为初步筛查手段，结合其他检测方法使用。物理检测包括无损检测（NDT）和应变测试等，能够更深入地检测桥梁的结构完整性。常见的无损检测方法包括超声波检测、声波检测、磁粉检测和红外热成像等，这些方法通过声波、磁场或温差等物理原理，揭示桥梁内部结构的缺陷或损伤<sup>[2]</sup>。这些方法能有效识别隐蔽的损伤，如裂纹、腐蚀或材料退化，且对结构的影响较小，能够保障桥梁的继续使用。

表 1 不同桥梁类型的老化与损伤评估结果

桥梁名称	桥梁类型	老化年限	损伤类型	损伤部位	检测方法	损伤程度	健康状况评估
桥梁 A	高速公路桥梁	25	裂缝	桥面板	视觉检测	轻微损伤	正常
桥梁 B	城市桥梁	18	腐蚀	钢筋部分	锈蚀电位检测	中等损伤	需要修复
桥梁 C	高架铁路桥梁	30	空洞、裂缝	桥墩、桥面	传感器网络监测	严重损伤	危险
桥梁 D	斜拉桥	15	预应力裂缝	主塔钢索	人工智能分析	微小损伤	正常

通过这一表格，我们可以更直观地看到不同类型桥梁在长期使用中的老化情况及其损伤评估结果。这为进一步

探讨传统评估方法的效果和局限性提供了实际数据支持。

## (二) 智能技术与现代方法

随着科技的进步,智能技术和现代方法在道路桥梁损伤评估中的应用逐渐普及,尤其是传感器技术和人工智能(AI)技术。传感器技术通过在桥梁的关键部位安装传感器,实时监测结构的应力、变形、温度、振动等数据,能够全面、连续地获取桥梁运行状态。常见的传感器包括应变传感器、加速度计、位移传感器等,这些设备能够在不干扰桥梁正常使用的情况下,提供精确的数据,为桥梁健康状态的长期监控和早期损伤预警提供支持。人工智能技

术在桥梁评估中也得到了广泛应用,特别是在数据分析和损伤识别方面。基于机器学习和深度学习的算法可以分析大量的监测数据,识别出潜在的结构问题并进行自动化判断。通过分析传感器数据,AI系统能够自动检测出不明显的裂缝或变形,甚至预测未来的损伤发展趋势和可能的风险<sup>[3]</sup>。这种技术的优势在于能够快速处理大规模数据,提升评估的精度和效率,尤其适用于复杂环境下的实时监控。结合大数据分析,AI还可以实现桥梁健康管理的智能化,为桥梁的维修决策提供科学依据。

表2 评估方法的成本效益分析

评估方法类型	适用场景	成本(元/桥梁)	检测时间(小时)	检测准确度(%)	适用性评估
视觉检测	小型桥梁、应急检测	500	1	75	快速、低成本
钢筋锈蚀电位检测	中型桥梁、腐蚀检测	3000	4	85	高精度、适中成本
传感器网络监测	大型桥梁、长期监测	10000	24	95	持续监测、实时反馈
人工智能分析	大型桥梁、复杂结构	12000	48	92	高精度、自动化

通过这张表格,可以清晰地看到不同评估方法在成本、时间、精度等方面的对比。智能评估方法虽具有较高的成本和检测时间,但其高精度和自动化特点使其在复杂环境和大规模桥梁监测中具有明显优势。人工智能技术可以为桥梁的健康管理和决策提供更加科学的依据。

## (三) 损伤评估标准

桥梁结构从发生损伤到最终破坏的机理是一个逐步积累的过程。在桥梁的服役过程中,受到多种不利因素的影响,特别是地震动作用,微小的缺陷不断发展并逐渐加剧,形成新的裂缝,导致桥梁的某一部分发生损伤。随着损伤的不断积累,桥梁的承载力逐步接近或超过设计极限,结构的力学性能开始退化。在局部薄弱部位,裂缝不断发展,最终可能导致局部构件的失效,进而导致整个桥梁系统的崩溃,最终完全丧失工作性能。结构损伤分析方法已经被广泛应用于桥梁的抗震设计中,研究表明,地震损伤模型能够合理可靠地评估桥梁在不同

地震烈度下的破坏情况。通过损伤分析,可以有效地评估桥梁是否还能继续正常工作,或者是否需要采取适当的修复措施以确保其安全性和使用性能<sup>[4]</sup>。为了定量描述损伤程度,损伤指数(DM)被引入,它通过一定的函数关系将多个损伤变量结合在一起,给出一个数值,以便于损伤的量化与评估。

损伤指数DM的特征如下:

1. 取值范围:损伤指数的值范围在0到1之间( $0 \leq DM \leq 1$ )。当DM=0时,表示结构或构件处于无损状态;当DM>1时,表示结构或构件已完全破坏。
2. 单调递增:损伤指数DM是一个单调递增的函数,意味着随着损伤的加剧,DM值会单调增加,且这一过程是不可逆的。

通过将损伤指数DM与不同的损伤等级进行对应,可以有效量化桥梁的抗震性能。以下表3展示了结构损伤的指数与损伤等级之间的关系,为进一步分析和修复决策提供了依据。

表3 桥梁构件及整体的损伤指数与损伤状态对应关系

破坏程度	损伤描述	破坏指数范围
基本完好	构件处于弹性状态,结构功能基本未受影响	0.00 ~ 0.10
轻微破坏	构件产生允许范围内的裂缝,构件及整体结构承载力未受影响	0.10 ~ 0.30
中等破坏	构件受到损伤或局部破坏,结构承载力降低,较难修复	0.30 ~ 0.50
严重破坏	构件整体严重破坏,结构承载能力显著降低	0.50 ~ 0.70
倒塌	构件无法使用,桥梁局部或整体坍塌	0.70 ~ 1.00

通过以上表格的量化方式,损伤指数能够准确地反映出桥梁的损伤程度,并为后续的修复和加固工作提供科学依据。通过对钢管混凝土拱桥的具体研究,本文进一步将损伤指数DM与桥梁构件及整体的损伤状态进行对比,验证了该方法在实际应用中的有效性和精确度。

## 三、评估技术应用与案例分析

### (一) 结构健康监测技术

结构健康监测技术(SHM)是通过采集桥梁或其他结构的动态响应数据,并进行实时分析,以评估其健康状况的一种方法。这种技术依赖于传感器网络的布设,通过传感器如应变计、加速度计、温度传感器等,对桥

梁的受力、变形、振动等物理量进行监测。随着技术的发展,结构健康监测已经从传统的单一传感器布置,发展到采用无线传感器网络(WSN)、光纤传感器、智能传感器等多种高科技手段,能够实现对桥梁全方位、多层次的监测<sup>[5]</sup>。

图1展示了桥梁的全桥模型,通过显示钢管与混凝土配合的部分,帮助理解桥梁结构的健康监测过程。在实施结构健康监测时,基于桥梁的不同部位设置合适的传感器,并将其数据通过传感器网络传输,实时获取桥梁的运行状态。这对于及时发现潜在损伤并采取有效措施至关重要。

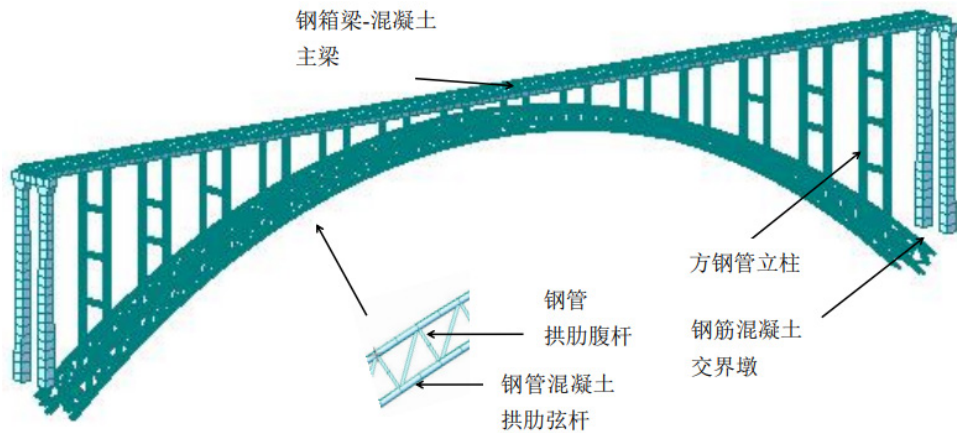


图1 全桥模型图

**(二) 无损检测与数据分析案例**

无损检测 (NDT) 作为一种重要的桥梁损伤评估技术, 通过对桥梁的物理属性进行检测而不破坏其结构, 广泛应用于桥梁健康监测中。以超声波检测为例, 通过超声波波速在不同材料中的传播特性, 能够识别出混凝土或钢结构内部的裂纹、空洞、分层等缺陷。结合现代数据分析技术, 无损检测已不仅限于传统的人工检测, 而是发展为自动化和智能化的检测系统。在某次公路桥梁的检测中, 结合红外热成像技术和超声波检测, 成功检测出桥梁中部存在严重的钢筋腐蚀情况。红外热成像技术通过检测温差变化, 发现了桥面下的热传导异常区域, 表明可能存在结构损伤, 而超声波技术进一步确认了该区域存在微裂纹和钢筋锈蚀的情况。这些损伤如果不及时修复, 可能对桥梁的安全性造成严重影响。通过数据分析, 检测系统能够将各项数据进行融合, 并通过算法对桥梁的损伤类型、位置、深度进行精确判定, 极大提高了检测的效率与准确性。再如, 某城市桥梁通过布设基于振动响应的传感器网络, 利用时域分析与频域分析相结合的方法, 成功实现了对桥梁结构的动态监测与损伤诊断。这一方法不仅能实时监测桥梁的振动变化, 还能通过数据建模预测结构可能出现的隐患。通过无损检测与数据分析技术的结合, 桥梁健康监测得到了全面提升, 极大增强了桥梁的安全性和管理效能。

**四、挑战与前景**

**(一) 当前评估方法的局限性**

虽然桥梁损伤评估方法已经取得了一定进展, 但仍然存在局限性, 影响其广泛应用和效果优化。传统的视觉检测依赖检查人员的经验, 结果容易受到主观因素影响, 且只能识别表面损伤, 难以发现深层或隐蔽性损伤。物理检测方法如超声波、红外热成像等, 尽管能提供较为准确的损伤信息, 但设备成本高, 操作复杂, 限制了在大范围和复杂环境中的应用。此外, 现有评估方法缺乏高效的数据分析能力, 无法处理多点、多维度的实时数据, 影响评估的全面性和准确性。传感器设备的长期运行也可能受到环境影响, 导致数据偏差, 进一步限制了评估方法的实际效果。

**(二) 未来技术发展趋势**

未来桥梁损伤评估技术将向智能化、自动化和多维度数据融合发展。随着传感器技术和物联网的发展, 智能传感器网络将成为主流, 能够实现更精准的监测和远程自动化监控。人工智能和机器学习的应用将进一步提高评估精度和效率, 通过数据挖掘识别潜在损伤并预测发展趋势。基于大数据和云计算平台, 桥梁健康管理将更加精准、全面, 具备长期趋势预测能力。未来的桥梁评估将整合结构工程、材料学、人工智能等多学科技术, 实现桥梁损伤的早期预警、全面诊断和优化维护。总体而言, 未来技术将大幅提升桥梁的安全性、耐久性和使用寿命。

**结语**

桥梁的老化和损伤评估是确保桥梁安全、延长使用寿命的重要手段。本文通过对传统评估方法与现代智能评估方法的对比, 探讨了结构健康监测技术和人工智能技术在桥梁评估中的应用。研究表明, 智能化技术, 如传感器网络与人工智能算法的结合, 能够显著提高桥梁评估的精度、效率与智能化水平, 尤其在复杂环境下, 具有更强的适应性和自动化优势。未来, 随着技术的不断进步, 智能评估方法将在桥梁健康管理中扮演更加重要的角色, 推动桥梁安全管理向着更加高效、精确和智能化的方向发展。然而, 智能评估方法仍面临设备成本高、数据处理复杂等挑战, 需要通过技术革新和实践积累不断优化, 以实现更广泛的应用和普及。

**参考文献**

[1] 高坤. 新形势下提高道路桥梁养护的措施分析 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (23): 148-150.  
 [2] 侯勇. 碳纤维增强材料在道路桥梁维修与加固中的应用研究 [J]. 工程与建设, 2024, 38 (04): 908-909+916.  
 [3] 孙大勇. 道路桥梁施工和养护管理探讨 [J]. 居舍, 2021, (19): 143-144+148.  
 [4] 于沛杰, 修仕涛, 姜珍珍. 探析目前道路桥梁施工中存在的主要问题与对策 [J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43 (10): 111-112.  
 [5] 赵贵峰. 道路桥梁工程施工技术与安全监控研究 [J]. 交通世界, 2020, (09): 82-83.