

# 钢结构桥梁无损检测及评估探究

张旭凯

浙商检测集团有限公司 浙江 宁波 315300

**摘要：**钢结构桥梁在现代交通建设中广泛应用，但制造与使用过程中易出现缺陷与损伤，威胁其安全性和耐久性。本文介绍了钢结构桥梁常见缺陷与损伤类型，包括制造缺陷和使用损伤。阐述了多种无损检测技术及其特点，提出多技术融合的无损检测策略，以提高检测效果。同时，构建了涵盖评估指标体系、评估方法与模型、评估等级划分的钢结构桥梁评估体系，为保障桥梁安全运营提供科学依据和技术支持。

**关键词：**钢结构桥梁；无损检测；评估体系

## 1 钢结构桥梁常见缺陷与损伤类型

钢结构桥梁凭借其高强度、轻质以及施工便捷等诸多优势，在现代交通基础设施建设中得到了广泛应用。在制造与使用过程中，钢结构桥梁不可避免地会出现各种缺陷与损伤，这些缺陷和损伤不仅影响桥梁的美观，更对其安全性和耐久性构成严重威胁。因此，深入了解钢结构桥梁的常见缺陷与损伤类型，对于保障桥梁的安全运营至关重要。

### 1.1 制造缺陷

制造缺陷主要源于桥梁构件在生产加工过程中的不规范操作或工艺问题。常见的制造缺陷包括焊接缺陷，如焊缝未焊透、气孔、夹渣等。未焊透会导致焊缝强度不足，在承受荷载时容易发生开裂；气孔和夹渣则会降低焊缝的致密性，影响结构的整体性能。构件尺寸偏差也是常见的制造缺陷之一，若构件尺寸不符合设计要求，可能导致装配困难，甚至影响桥梁的整体受力性能。另外，钢材的材质问题，如化学成分不合格、力学性能不达标等，也会给桥梁结构埋下安全隐患。

### 1.2 使用损伤

使用损伤是在桥梁投入使用后，由于长期受到各种环境因素和荷载作用而产生的。腐蚀是钢结构桥梁最常见的使用损伤之一，大气中的水分、氧气以及腐蚀性介质会与钢材发生化学反应，导致钢材表面锈蚀，逐渐削弱钢材的截面面积，降低其承载能力<sup>[1]</sup>。疲劳损伤也不容忽视，桥梁在反复的车辆荷载作用下，结构内部会产生应力集中，长期积累会导致材料疲劳，出现裂纹甚至断裂。意外碰撞、超载等因素也可能对桥梁结构造成损伤，如碰撞可能导致构件变形、焊缝开裂，超载则会使桥梁承受超过设计承载能力的荷载，加速结构的破坏。

## 2 钢结构桥梁无损检测技术

为了及时发现钢结构桥梁的缺陷与损伤，确保桥梁

的安全运营，无损检测技术应运而生。无损检测技术能够在不破坏被检测对象的前提下，对其内部和表面的缺陷进行检测和评估。

### 2.1 超声检测技术

超声检测技术利用超声波在材料中传播的特性来检测缺陷。当超声波遇到缺陷时，会发生反射、折射和散射等现象，通过分析反射波的幅度、时间和波形等参数，可以确定缺陷的位置、大小和性质。该技术具有检测灵敏度高、穿透能力强等优点，能够检测出钢材内部的微小缺陷，如裂纹、气孔等。然而，超声检测技术对检测人员的操作技能要求较高，且对复杂形状构件的检测存在一定的局限性。

### 2.2 射线检测技术

射线检测技术是利用X射线或 $\gamma$ 射线穿透被检测物体，通过检测透射射线的强度变化来发现内部缺陷。当射线穿过材料时，缺陷部位对射线的吸收程度与正常部位不同，从而在底片上形成不同的影像，通过观察底片可以直观地发现缺陷的形状、大小和位置<sup>[2]</sup>。射线检测技术对体积型缺陷（如气孔、夹渣）的检测效果较好，能够提供较为直观的检测结果。但该技术存在辐射危害，需要采取严格的防护措施，且检测成本较高，检测速度较慢。

### 2.3 磁粉检测技术

磁粉检测技术适用于铁磁性材料的表面和近表面缺陷检测。当被检测的铁磁性材料被磁化后，若材料表面或近表面存在缺陷，缺陷处会产生漏磁场，吸附施加在材料表面的磁粉，形成磁痕，从而显示出缺陷的位置和形状。磁粉检测技术操作简单、检测速度快、灵敏度高，能够检测出微小的表面裂纹等缺陷。不过，该技术只能用于铁磁性材料，且对被检测表面的清洁度要求较高。

### 2.4 涡流检测技术

涡流检测技术是基于电磁感应原理,当交变磁场靠近导电材料时,会在材料内部产生涡流,涡流的大小和分布会受到材料内部缺陷的影响。通过检测涡流的变化,可以判断材料是否存在缺陷。涡流检测技术对表面和近表面缺陷具有较高的检测灵敏度,检测速度快,可实现自动化检测。但它对检测对象的材质和形状有一定要求,且对深层缺陷的检测能力有限。

### 2.5 红外热成像检测技术

红外热成像检测技术利用红外热像仪检测物体表面的温度分布,通过分析温度异常区域来发现缺陷。当钢结构桥梁存在缺陷时,如腐蚀、裂纹等,会导致局部热传导性能发生变化,从而使该区域的温度与周围正常区域不同。红外热成像检测技术具有非接触、检测速度快、能够大面积检测等优点,可快速发现桥梁表面的温度异常区域,初步判断可能存在的缺陷。然而该技术受环境温度、风速等外界因素影响较大,对深层缺陷的检测效果不佳。

## 3 多技术融合的无损检测策略

单一的检测技术往往存在一定的局限性,难以全面、准确地检测钢结构桥梁的各种缺陷与损伤。因此采用多技术融合的无损检测策略成为提高检测效果的重要手段。

### 3.1 融合必要性

不同的无损检测技术在钢结构桥梁检测中扮演着重要角色,但它们均存在独特的优缺点与适用范围。超声检测技术凭借超声波在材料中的传播特性,能够深入材料内部,精准地检测出如裂纹、气孔等内部缺陷,对内部缺陷的检测效果十分显著。然而它在表面缺陷检测方面能力有限,难以有效发现桥梁表面的细微损伤。磁粉检测技术则对铁磁性材料的表面和近表面缺陷具有极高的检测灵敏度,哪怕是微小的表面裂纹,也能通过磁粉形成的磁痕清晰显示出来。但它的局限性在于只能用于铁磁性材料,对于非铁磁性材料则无能为力。鉴于单一检测技术的不足,将多种检测技术融合成为必然趋势。通过融合,可以充分发挥各技术的优势,形成互补。比如,将超声检测技术与磁粉检测技术结合,既能检测内部缺陷,又能发现表面缺陷,实现对钢结构桥梁缺陷与损伤的全面、准确检测。这种多技术融合的方式还能显著提高检测的可靠性和准确性,有效降低漏检和误检的概率,为桥梁的安全评估提供更为坚实可靠的依据<sup>[3]</sup>。

### 3.2 融合方式与方法

多技术融合的方式主要有串联融合和并联融合。串联融合是指按照一定的顺序依次使用不同的检测技术,

前一种检测技术的结果作为后一种检测技术的输入或参考。例如,先使用红外热成像检测技术对桥梁进行大面积快速扫描,发现温度异常区域后,再使用超声检测技术对该区域进行详细检测,以确定是否存在内部缺陷。并联融合则是同时使用多种检测技术对同一对象进行检测,然后将各技术的检测结果进行综合分析。例如,同时采用超声检测技术和射线检测技术对桥梁的关键部位进行检测,通过对比两种技术的检测结果,更准确地判断缺陷的情况。在融合方法上,可以采用数据融合算法,如加权平均法、神经网络法等,对不同检测技术获取的数据进行分析和处理,以得到更准确的检测结果。加权平均法是根据各检测技术的可靠性和重要性,为每种检测结果赋予不同的权重,然后进行加权平均计算。神经网络法则通过建立神经网络模型,对大量的检测数据进行学习和训练,使模型能够自动识别和融合不同检测技术的信息,提高检测的智能化水平。

### 3.3 融合检测的实施流程

融合检测的实施流程是一个系统且严谨的过程,一般涵盖以下几个关键步骤。首先,要依据桥梁的结构特点,如桥梁的跨度、构件形式等;使用情况,包括交通流量、是否处于腐蚀性环境等;以及检测目的,是日常巡检、针对性缺陷排查还是全寿命周期评估等,来精心选择合适的检测技术组合。不同的检测技术各有侧重,只有合理搭配,才能发挥最大效能。接着,制定详细的检测方案至关重要。明确各检测技术的检测范围,避免出现检测盲区;确定检测顺序,例如先进行大面积快速扫描,再针对疑似区域深入检测;设定合理的检测参数,保证检测结果的准确性。在检测过程中,检测人员必须严格按照检测方案进行操作,每一个环节都不能马虎,以确保各检测技术获取的数据准确可靠。检测完成后,对各检测技术获取的数据进行预处理,如去除噪声干扰、进行数据归一化等,使数据更具可比性和分析价值。另外,采用合适的融合方法,如加权平均法、神经网络法等,对预处理后的数据进行融合分析,得出综合检测结果。最后,根据综合检测结果,对桥梁的缺陷与损伤进行全面评估,并提出针对性的处理建议,为桥梁的安全运营提供有力保障。

## 4 钢结构桥梁评估体系构建

### 4.1 评估指标体系

评估指标体系作为评估体系的基础,其重要性不言而喻,它需全方位、多维度地反映钢结构桥梁的各项性能,为准确评估桥梁状况提供坚实依据。评估指标主要可划分为结构性能指标、环境影响指标和使用状况指

标三大类。结构性能指标是衡量桥梁安全运营的关键要素，承载能力直接决定了桥梁能够承受的最大荷载，若承载能力不足，在车辆、行人等荷载作用下，桥梁可能发生变形甚至坍塌；刚度则影响着桥梁在荷载作用下的变形程度，刚度不足会导致桥梁晃动过大，影响行车舒适性和安全性；稳定性关乎桥梁在各种工况下保持原有平衡状态的能力，一旦失稳，后果不堪设想。环境影响指标着重考虑桥梁所处环境对结构造成的潜在威胁。腐蚀环境会加速钢材的锈蚀，降低钢材的力学性能，缩短桥梁使用寿命；温度变化会引起钢材的热胀冷缩，导致结构内力发生变化，长期作用下可能引发裂缝等缺陷。使用状况指标反映了桥梁在实际使用过程中的情况。交通流量的大小和变化规律会影响桥梁的疲劳损伤程度；超载情况会加重桥梁的负担，加速结构的破坏；维修历史则记录了桥梁过往的维护和修复情况，有助于了解桥梁的健康状况。在确定评估指标时，必须充分考虑指标的科学性、可操作性和代表性，确保评估结果能够真实、准确地反映桥梁的实际状况。

#### 4.2 评估方法与模型

评估方法与模型是评估体系的核心所在，其主要功能是对评估指标进行量化分析和综合评估，从而得出科学合理的评估结果。目前，常用的评估方法有层次分析法、模糊综合评价法、神经网络评价法等。层次分析法是一种将复杂问题层次化的分析方法。它首先将评估问题分解为多个层次，如目标层、准则层和方案层等，然后构建判断矩阵，通过两两比较各指标的重要性，计算出各指标的权重，最后根据权重进行综合评估。这种方法能够将复杂的评估问题简单化，使评估过程更加清晰明了。模糊综合评价法利用模糊数学理论，充分考虑了评估过程中的模糊性和不确定性。在桥梁评估中，许多指标如“桥梁外观状况”等具有模糊性，难以用精确的数值来描述。模糊综合评价法通过建立模糊隶属函数，将定性指标进行量化处理，从而能够对桥梁的安全状况进行更准确的评估。神经网络评价法通过建立神经网络模型，对大量的评估数据进行学习和训练。神经网络具有强大的非线性映射能力和自适应学习能力，能够自动识别和提取数据中的特征信息，从而对桥梁的安全状况进行评估。在实际应用中，可以根据桥梁的具体情况选择合适的评估方法，或者组合多种评估方法，充分发挥各方法的优势，提高评估的准确性和可靠性。

#### 4.3 评估等级划分

评估等级划分是将桥梁的安全状况划分为不同的等级，这一举措对于桥梁的分类管理和科学决策具有重要意义。评估等级通常根据评估结果进行划分，一般可分为一级（良好）、二级（一般）、三级（较差）和四级（危险）等。一级桥梁表示桥梁的结构性能良好，环境影响较小，使用状况正常，能够安全、稳定地运行。对于这类桥梁，可进行常规的维护保养，如定期检查、清洁、涂装等，以保持其良好的状态<sup>[4]</sup>。二级桥梁意味着桥梁存在一定的轻微缺陷或潜在问题，但不影响正常使用。对于此类桥梁，应加强监测和检查，增加检查的频率和范围，及时发现并处理可能出现的问题，防止缺陷进一步扩大。三级桥梁表明桥梁的结构性能有所下降，存在较为明显的缺陷或损伤，需要进行维修加固。应制定详细的维修加固方案，及时对桥梁进行修复，恢复其结构性能，确保桥梁的安全运营。四级桥梁则处于非常危险的状态，可能随时发生安全事故。对于这类桥梁，应立即采取限行或封闭等措施，禁止车辆和行人通行，同时尽快组织专业人员进行评估和修复，以保障公众的生命财产安全。评估等级划分应具有明确的界定标准和可操作性，以便于在实际工作中准确执行。

#### 结束语

钢结构桥梁无损检测及评估是保障桥梁安全运营的关键环节。通过全面了解桥梁的缺陷与损伤类型，合理运用多种无损检测技术并实现多技术融合，以及构建科学完善的评估体系，能够及时发现桥梁存在的问题，准确评估其安全状况。未来，随着技术的不断发展，无损检测及评估技术将更加智能化、高效化，为钢结构桥梁的安全运行提供更可靠的保障，推动交通基础设施建设的可持续发展。

#### 参考文献

- [1]周建国.无损检测技术在钢结构桥梁焊缝检测中的应用分析[J].科技资讯,2022,20(21):67-70.
- [2]张鑫.无损检测技术在钢结构桥梁中的应用[J].四川建材, 2022,48 ( 10 ):36-37.
- [3]杨羿,张建东,李昊.钢结构桥梁焊接无损检测技术应用及发展[J].轻工科技,2020,36(12):70-71+114.
- [4]邵阳.钢结构工程焊缝无损检测技术及其运用分析[J].现代制造技术与装备, 2020(05):167-168.