

建筑与桥梁钢结构检测：焊缝无损检测技术的实践与探索

陈盛弦

广东名远工程检测有限公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/ADA.2025020026

摘 要： 钢结构焊缝质量关乎结构安全，无损检测至关重要。超声波、磁粉、X射线等主流检测技术不断发展，国际国内应用参数和判定准则有差异。文中介绍各技术原理、设备及应用案例，指出智能信号处理、多传感器融合等面临挑战，提出优化路径，强调检测技术组合应用、智能化数字化及完善标准体系的重要性。

关 键 词： 钢结构焊缝；无损检测技术；优化路径

Testing of Steel Structures in Buildings and Bridges: Practice and Exploration of Non destructive Testing Technology for Weld Seams

Chen Shengxian

Guangdong Mingyuan Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： The quality of steel structure welds is related to structural safety, and non-destructive testing is crucial. Mainstream testing technologies such as ultrasound, magnetic powder, and X-ray are constantly developing, but there are differences in application parameters and judgment criteria between international and domestic markets. The article introduces various technical principles, equipment, and application cases, points out the challenges faced by intelligent signal processing and multi-sensor fusion, proposes optimization paths, and emphasizes the importance of combining detection technologies, intelligent digitization, and improving standard systems.

Keywords： steel structure welds; non destructive testing technology; optimized path

引言

《“十四五”国家知识产权保护和运用规划》于2021年9月颁布，旨在推动各领域技术创新与规范发展。在建筑工程领域，钢结构凭借诸多优势广泛应用于大型建筑与桥梁项目，而焊缝质量关乎结构安全，无损检测至关重要。当前，超声波、磁粉、X射线等主流检测技术不断演进，但国际标准与国内规范存在差异。同时，智能信号处理算法、多传感器数据融合、自动化检测装备等方面面临挑战，需优化改进。在此背景下，遵循相关政策，完善检测技术与标准体系，对保障建筑与桥梁钢结构质量，推动行业发展意义重大。

一、钢结构焊缝无损检测技术概述

（一）钢结构焊缝检测的重要性

钢结构在建筑工程中占据核心地位，因其具备强度高、自重轻、施工周期短等优势，广泛应用于各类大型建筑与桥梁项目。然而，焊缝作为钢结构连接的关键部位，其质量直接关乎结构整体安全性。焊缝质量缺陷如裂纹、气孔、夹渣等，可能削弱结构承载能力，引发应力集中，降低结构的疲劳寿命^[1]。在承受动荷载或恶劣环境作用下，这些缺陷极有可能逐步扩展，最终导致结构的局部破坏甚至整体坍塌，带来严重的人员伤亡和经济损失。因此，对钢结构焊缝进行无损检测至关重要，它能够在不损害结构性能的前提下，及时发现内部缺陷，为结构安全评估提供可靠

依据，保障建筑与桥梁钢结构的长期稳定运行。

（二）主流检测技术发展现状

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测领域，超声波、磁粉、X射线三种主流检测技术不断演进。超声波检测技术凭借对内部缺陷敏感、操作便捷等优势，从早期技术精度有限，发展到如今可精确探测微小内部缺陷，在建筑与桥梁钢结构检测中广泛应用。磁粉检测针对铁磁性材料表面及近表面缺陷检测效果显著，随着工艺改进，其对细微缺陷的分辨能力大幅提升。X射线检测能直观呈现内部结构，早期受设备及辐射限制应用受限，如今设备小型化、辐射防护完善，图像数字化处理技术也使缺陷分析更精准。不过，国际标准与国内规范在这些技术的具体应用参数、判定准则等方面存在一定差异^[2]，这要求检测人员在实际操作中充分关

注，确保检测结果的准确性与可靠性。

二、核心检测技术机理分析

（一）超声波检测技术体系

超声波检测技术是焊缝无损检测中的重要手段。其探伤原理基于超声波在材料中的传播特性，当超声波遇到缺陷时，部分声波会发生反射、折射和散射，使接收信号产生变化，从而发现缺陷。检测设备主要由超声探伤仪、探头及耦合剂等组成。探伤仪负责产生和接收超声信号，需合理设置诸如频率、增益、扫描速度等参数。探头则将电信号转换为超声波并发射，不同类型探头适用于不同检测场景。耦合剂确保探头与被测材料表面良好接触，减少声能损失。材料的声学特性如声速、衰减系数等对检测精度影响显著，不同材质的钢结构，其声学特性存在差异，需考虑这些差异来优化检测工艺，以此提高检测精度^[3]。

（二）磁粉检测技术特性

磁粉检测技术特性基于漏磁场形成机制。当铁磁性材料被磁化后，若其表面或近表面存在不连续性（如焊缝中的缺陷），则会在不连续处形成漏磁场。湿法磁粉检测工艺，是将磁粉悬浮在载液中施加于检测表面，其磁粉流动性好，能检测微小缺陷，适合检测表面光滑的工件；干法磁粉检测是直接将干燥磁粉施加于检测表面，操作简单，适合粗糙表面工件检测。检测灵敏度与磁化参数密切相关，存在特定数学关系^[4]。合适的磁化参数，如合适的磁场强度、磁化时间等，能有效提高检测灵敏度，使不连续处的漏磁场能更好地吸附磁粉，从而清晰显示缺陷的位置、形状和大小，准确判断焊缝质量。

三、典型工程应用实践

（一）建筑钢结构检测案例

1. 高层建筑梁柱节点检测

在某超高层项目中，高层建筑梁柱节点的全熔透焊缝检测至关重要。采用超声波相控阵技术，该技术能够实现对焊缝的高效、精准检测。通过其独特的电子扫描系统，可对梁柱节点焊缝进行全方位扫查。在检测过程中，利用相控阵探头的多晶片特性，依据不同角度和深度灵活调整声束方向，全面覆盖焊缝区域，有效发现内部缺陷。该技术还能生成三维成像^[5]，直观呈现焊缝内部结构，检测人员能够清晰观察到焊缝内部的气孔、夹渣、未熔合等缺陷的位置、形状及大小，为后续的质量评估和修复提供可靠依据，极大地提高了检测的准确性和可靠性，保障了高层建筑梁柱节点焊缝的质量安全。

2. 大跨度网架结构检测

以某大型体育场的大跨度网架结构为例，该网架结构承担着体育场屋盖的支撑重任，其焊缝质量至关重要。传统检测手段在面对复杂空间焊缝时，效率较低且检测结果受人为因素影响较大。引入X射线数字成像技术后，此状况得到显著改善。该技术利用X射线穿透焊缝区域，将接收到的信号转化为数字图像，

检测人员可通过专业软件对图像进行分析，精准识别焊缝中的缺陷，如气孔、夹渣、未焊透等。相较于传统方法，其检测效率大幅提高，能在短时间内完成大面积焊缝检测。同时，数字成像便于存储和追溯，为后续质量评估提供可靠依据^[6]。

（二）桥梁钢结构检测案例

1. 正交异性桥面板检测

在某大型钢箱梁桥正交异性桥面板检测中，针对疲劳裂纹问题，有效采用了磁粉检测与涡流检测协同应用方案。首先，因磁粉检测对铁磁性材料表面及近表面缺陷有高灵敏度，能直观显示缺陷位置、形状和大小，所以先用其对桥面板疑似疲劳裂纹区域进行全面扫查，快速定位可能存在的表面及近表面缺陷。之后，考虑到涡流检测不受材料磁性限制，对微小裂纹及表面下一定深度缺陷检测效果好，利用涡流检测对磁粉检测发现的重点区域进一步精确探测，确定缺陷深度、延伸等详细信息。通过这种协同方式，全面且精准地检测出正交异性桥面板的疲劳裂纹情况，为后续维护与修复提供可靠依据^[7]。

2. 铆接桥梁修复检测

在某历史桥梁维修改造项目中，针对老旧铆接结构运用TOFD技术进行检测。该桥梁建造年代久远，铆接部位历经长期荷载与环境作用，状况复杂。TOFD技术凭借其独特优势，如对内部缺陷检测灵敏度高、能精确测定缺陷高度等，可有效评估铆接部位状况。检测人员依据TOFD技术原理，布置检测探头，对铆接区域逐一扫描。通过分析检测数据，清晰呈现出铆接部位可能存在的内部缺陷，如裂纹、未焊透等。结果表明，TOFD技术对老旧铆接结构具有较好的适用性，能够为桥梁维修改造提供关键技术支持，确保修复工作精准有效^[8]。

四、技术挑战与优化路径

（一）检测精度提升方向

1. 智能信号处理算法

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测中，智能信号处理算法对检测精度提升至关重要。当前面临的技术挑战在于，超声回波信号复杂，包含大量噪声，给准确提取特征带来困难。传统算法难以有效处理这类复杂信号，导致缺陷分类识别的精度受限。为优化此状况，研究基于深度学习的超声回波特征提取方法成为关键路径。深度学习强大的特征学习能力，能够自动从复杂的超声回波信号中挖掘出有效特征，建立更精准的缺陷分类识别模型^[9]。通过大量有标记的超声回波数据对模型进行训练，使其不断优化对各类缺陷特征的识别能力，从而提升检测精度，更准确地判断焊缝中的缺陷情况，保障建筑与桥梁钢结构的质量安全。

2. 多传感器数据融合

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测中，提升检测精度、实现多传感器数据融合面临诸多技术挑战。不同类型传感器的工作原理与特性各异，超声检测对内部缺陷敏感但对表面缺陷分辨率有限，电磁检测则擅长检测表面及近表面缺陷，二者数据格式、特征维度等存在差异，难以直接融合。且现有融合评估标准不够完

善，缺乏对复杂钢结构焊缝特性的针对性。优化路径可从两方面着手，一方面深入研究超声与电磁联合检测模式下的数据互补机制，挖掘不同传感器数据间潜在关联，通过特征提取、转换等技术将数据统一到可融合框架。另一方面，依据钢结构焊缝特点，结合大量实际检测数据，制定科学、精准且具操作性的融合评估标准^[10]，以此提高多传感器数据融合效果，切实提升焊缝无损检测精度。

（二）检测效率优化策略

1. 自动化检测装备开发

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测中，运用爬行机器人搭载相控阵探头构建移动式检测系统，虽有一定优势，但也面临技术挑战。机器人在复杂钢结构表面移动时，可能因结构形状不规则、表面粗糙度差异等，影响探头与焊缝的贴合度，进而降低检测精度与效率。而且，数据传输与处理速度也可能成为瓶颈，大量检测数据需快速准确分析，现有系统可能无法及时应对。优化路径方面，可改进机器人的自适应移动机构，例如采用多关节柔性结构，使其能更好适应不同形状的钢结构。同时，升级数据传输与处理算法，利用高速数据传输技术和高效数据处理软件，实现数据的快速、精准分析，提升整体检测效率，推动自动化检测装备进一步完善。

2. 检测工艺参数优化

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测中，检测工艺参数优化对提升检测效率至关重要。建立基于正交试验法的检测参数组合模型，能有效实现质量与效率的平衡优化。通过精心设计正交试验，全面考虑如探伤设备的功率、扫描速度、探头频率、耦合剂类型等多个参数。对不同参数组合下的检测结果进行细致分析，以缺陷检出率、检测时间等作为关键评估指标。从中筛选出既能保证焊缝缺陷精准检测，又能大幅缩短检测时长的最佳参数组合。这不仅能提高单次检测的效率，还通过优化流程，为大规模建筑与桥梁钢结构焊缝检测提供高效且可靠的技术方案，推动无损检测技术在该领域的高效应用与发展。

（三）标准体系完善建议

1. 新型技术标准化研究

在焊缝无损检测中应用三维超声成像技术，面临着不少技术

挑战。该技术成像复杂，数据处理难度大，对检测人员专业素质要求极高，且不同设备成像效果差异大，缺乏统一规范。为优化这一现状，要从制定标准体系入手。构建系统的三维超声成像技术标准路径，详细规定检测流程、设备参数等，使操作有章可循。同时，制定量化缺陷评级指标体系至关重要，通过明确缺陷尺寸、性质、位置等量化指标，提高缺陷评定的准确性与一致性，为建筑与桥梁钢结构焊缝质量判断提供可靠依据，推动三维超声成像技术在焊缝无损检测领域标准化发展。

2. 全生命周期检测规程

在建筑与桥梁钢结构焊缝无损检测全生命周期检测规程方面，存在一些技术挑战。检测技术在不同阶段的衔接不够顺畅，设计阶段的理论标准与制造、运维阶段实际检测操作难以无缝对接。而且不同检测方法在各阶段的适用性缺乏精准界定，导致实际应用中选择困难。优化路径可从细化各阶段检测规程入手，明确设计阶段对焊缝质量指标的精确量化标准，制造阶段规范检测流程与参数，运维阶段制定周期性检测频率与重点内容。同时，搭建不同阶段检测技术交流平台，加强信息互通，形成统一且连贯的全生命周期检测规程，以保障钢结构焊缝在各个阶段的检测都科学、有效，提升结构全周期可靠性。

五、总结

在现代钢结构工程中，焊缝无损检测技术的组合应用极具价值。超声检测、射线检测与磁粉检测相互补充，能全面精准地发现焊缝中的各类缺陷，保障钢结构的质量与安全。随着科技发展，智能化、数字化成为焊缝无损检测技术的重要趋势，不仅能提升检测效率，还可增强检测结果的准确性与可靠性。同时，完善标准体系是行业稳健发展的关键，它为检测工作提供统一规范，确保检测质量。展望未来，新型检测技术与 BIM、物联网技术的融合值得期待，这将实现对钢结构全生命周期的实时监测与智能管理，进一步推动建筑与桥梁钢结构检测行业迈向新高度，为工程建设提供更坚实的质量保障。

参考文献

[1] 邓淋方 . 基于磁记忆技术的钢结构焊缝中残余应力检测方法研究 [D]. 重庆交通大学, 2023.
[2] 熊飞 . 基于压电波动的混凝土梁裂缝无损检测技术研究 [D]. 江苏大学, 2021.
[3] 范剑伟 . 基于无损检测技术的沥青路面裂缝及结构状态检测评价方法研究 [D]. 东南大学, 2022.
[4] 钱超 . 钢结构焊接残余应力超声无损检测与原位调控 [D]. 浙江工业大学, 2021.
[5] 陈军 . 钢结构构件焊缝的视觉检测研究 [D]. 合肥工业大学, 2021.
[6] 龚小俊 , 陆鹏宇 . 钢结构桥梁无损检测技术分析 [J]. 运输经理世界 , 2023, (14): 86-88.
[7] 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.
[8] 聂煜川 . 公路钢结构桥梁焊缝的无损检测技术研究 [J]. 运输经理世界 , 2024, (13): 113-115.
[9] 陈再文 . 钢结构焊缝无损检测方法的应用 [J]. 冶金与材料 , 2022, 14(01): 179-180.
[10] 高伟 , 陈永松 , 罗剑 . 关于高速公路钢结构桥梁焊缝的无损检测应用探讨 [J]. 工程与建设 , 2023, 37(01): 209-213.