

# 钢结构焊缝超声波检测中缺陷识别准确性研究

熊书亮

湖北楚天卓越工程技术有限公司 湖北 宜昌 443000

**【摘要】**：针对钢结构焊缝超声波检测中缺陷识别易出现漏判、误判的问题，本文从检测系统操作、焊缝结构特性、外部环境干扰三方面，分析影响识别精准度的关键因素，构建了检测系统与操作协同优化、焊缝结构适配及盲区补偿、信号处理与智能识别三大优化路径。通过设备参数精准配置、检测操作标准化、复杂结构检测技术适配及智能算法应用，可有效提升缺陷识别的精准度与稳定性，为钢结构工程质量安全提供坚实的检测技术支持。

**【关键词】**：钢结构焊缝；超声波检测；缺陷识别准确性

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.030

## 引言

钢结构焊缝作为工程结构受力核心，其内部缺陷直接关乎结构安全与服役寿命。超声波检测凭借穿透性强、定位精准等优势，成为焊缝无损检测主流技术，但实际检测中，设备参数、操作规范、焊缝结构及外部环境等因素，常导致缺陷识别偏差，影响检测结果可靠性。本文聚焦缺陷识别准确性问题，深入分析影响因素并提出优化策略，旨在提升检测精准度，保障钢结构工程检测质量。

## 1 钢结构焊缝超声波检测基础理论与缺陷特性

钢结构焊缝作为工程结构受力传递核心部位，内部缺陷直接左右结构安全与服役寿命，超声波检测凭借穿透性强、定位精准、对裂纹类缺陷敏感度高等特殊性质，成为钢结构焊缝无损检测主流技术。该技术依托超声波在固体介质中直线传播与界面反射规律构建理论支撑，超声波经探头耦合进入焊缝后，会在完整材质、缺陷界面及焊缝背面形成特征回波，检测人员借助回波幅值、位置、波形形态及动态变化完成缺陷判别与定位。钢结构焊缝焊接过程中易滋生裂纹、未焊透、未熔合、气孔、夹渣等典型缺陷，不同缺陷的几何形态、分布位置与声学界面特性存在明显差异，对应的超声波反射信号特征具备清晰区分度。缺陷识别准确性核心在于精准划分缺陷回波信号与结构本体回波、干扰回波，对这一原理的认知深度与缺陷特征的掌握程度，是保障检测判定可靠、规避漏判误判的关键，也为后续影响因素分析与准确性提升研究筑牢基础。

## 2 影响缺陷识别准确性的关键因素分析

### 2.1 检测系统与操作规范性影响

检测系统与现场操作构成缺陷识别直接执行环节，设备参数适配度、操作流程标准化水平及人员专业素养，从信号源头影响识别成效。超声波检测设备核心参数需与焊缝厚度、缺陷类型深度契合，频率设定关联检测分辨率与穿透效果，工程中薄板焊缝多采用 5MHz 频率，过高频率易导致声束快速衰减，厚板焊缝常用 2.5MHz 频率，过低频率则难以分辨微小缺陷，两种情况均会破坏缺陷回波完整性。探头角度需贴合焊缝坡口

形式与熔合线位置，70° 和 45° 为常用角度，角度偏差会导致声束无法精准覆盖缺陷界面，造成裂纹、未熔合等面状缺陷回波信号缺失。耦合剂负责传递超声能量，其黏度、流动性需适配工件表面状态与现场温度，选用不当易形成耦合层间隙，引发回波幅值异常衰减，干扰缺陷信号真实呈现。

现场操作规范程度是保障检测结果稳定的关键，耦合状态控制影响能量传递效率，探头与工件表面贴合不紧密、施压不均，会产生随机杂波，掩盖微小缺陷信号。扫查路径与速度决定检测覆盖范围，参照国家标准 GB/T11345，手工扫查速度需控制在 50mm/s 以内，速度失控是焊缝内部缺陷漏检的主要操作诱因。操作人员专业经验决定波形判别能力，缺乏现场实践积累的检测人员，难以区分缺陷回波与结构回波，易将焊趾反射、根部反射误判为内部缺陷，也可能忽略低幅值微小裂纹信号，导致识别准确性大幅下滑。检测系统与操作行为的协同偏差，会从信号采集到结果判定产生连锁误差，这一因素既最具有可控性，也最易出现问题，参数适配不当与操作标准化缺失，会直接导致检测数据丧失参考意义。

### 2.2 焊缝结构特性与检测盲区影响

焊缝自身结构形态是超声波传播的天然载体，几何形状、坡口形式、厚度变化与节点构造直接改变声束传播路径，形成固定检测盲区并引发信号畸变，这类由构件设计与焊接工艺决定的因素，构成影响识别准确性的客观核心条件。对接焊缝、角焊缝、T 型焊缝等不同结构形式，对应超声声束反射规律存在明显差异，角焊缝与异型节点的不规则界面会促使声束发生多次折射与反射，破坏缺陷回波单一性，让检测人员难以精准判定缺陷位置与尺寸。焊缝坡口角度与钝边厚度影响声束入射深度，坡口角度小于四十五度时，熔合线区域检测覆盖率明显下降，钝边过厚则形成根部检测盲区，无法识别未焊透缺陷。

焊缝厚度变化引发近场区与远场区信号差异，薄板焊缝近场区长度可达 8~12mm，缺陷回波与始波叠加难以分离识别，厚板焊缝则因声束扩散导致缺陷定位精度降低。焊趾、焊根等几何突变位置会产生强烈结构反射波，这类幅值高、形态稳定的回波，极易与裂纹、未熔合等危险缺陷回波混淆造成误判。

箱型柱、桁架节点等复杂钢结构构件中，多焊缝交汇形成空间结构，声束传播路径被多次改变，既扩大检测盲区，又产生多重干扰反射，导致缺陷波形特征完全失真。检测盲区的大小与分布由焊缝结构直接决定，无法通过简单操作调整消除，仅能借助技术手段补偿，结构特性带来的信号畸变具有固定性和规律性，是造成缺陷识别系统性误差的主要客观因素，也是提升检测准确性需重点突破的难点。

### 2.3 外部环境与干扰信号影响

钢结构焊缝检测多在施工现场推进，外部环境的温度波动、机械振动、电磁干扰及工件表面状态，均会产生非缺陷类干扰信号，破坏超声回波稳定性，削弱缺陷识别准确性。环境温度直接影响检测设备与耦合剂工作性能，10~30℃为适宜检测区间，超出该范围后，探头压电陶瓷元件灵敏度会明显衰减，高温易造成耦合剂快速挥发流失、破坏耦合层连续性，低温则导致耦合剂凝固、降低能量传递效率，温度波动引发的设备性能变化，会让回波幅值出现无规律浮动，干扰缺陷信号判定。

施工现场的机械振动与电磁干扰属于常见环境干扰源，焊接设备、起重机械、振捣设备运行产生的振动，会传递至工件与探头，形成连续杂波信号，覆盖微小缺陷的低幅值回波。电磁干扰直接干扰检测仪器信号采集系统，造成波形失真、基线漂移，使得缺陷回波形态与位置难以精准识别。工件表面状态是影响耦合效果的直接环境因素，参照 NB/T47013.3 标准，检测区域表面粗糙度需控制在 Ra6.3μm 以内，表面状态超出该范围会大幅降低耦合效率，进而削弱检测灵敏度。现场粉尘、水汽附着在工件表面，会进一步破坏耦合状态，形成虚假反射信号。外部环境干扰具备随机性与突发性，其产生的杂波与缺陷回波高度相似，难以通过单一手段过滤，既是施工现场导致缺陷识别准确性波动的重要外部因素，也对检测过程的环境控制与信号甄别能力提出更高要求。

## 3 提升缺陷识别准确性的优化策略与实践路径

### 3.1 检测系统与操作体系协同优化

检测系统与操作体系协同优化构成提升缺陷识别准确性的基础环节，精准配置设备参数、标准化约束操作流程、体系化提升人员能力，从信号采集源头消除人为与设备引发的系统性误差，筑牢检测数据稳定可靠根基。设备参数优化层面，搭建焊缝厚度、材质与超声参数对应配置台账，遵循 GB/T11345-2013 钢结构超声波检测及质量分级法，6mm 至 20mm 薄板焊缝优先配置 5MHz 探头，保障缺陷分辨率，20mm 以上厚板焊缝采用 2.5MHz 探头，平衡穿透能力与信号清晰度，角焊缝及熔合线检测固定配置 70° 斜探头，确保声束与缺陷界面垂直入射，从参数设定层面规避因选型不当造成的信号缺失。耦合剂选取结合现场环境与工件表面状态，常温施工现场选用工业甘油，高温作业环境适配高温耦合膏，低温环境采用

防冻型耦合剂，依托耦合剂与工况精准匹配，维持超声能量传递效率稳定，缩减耦合问题引发的回波衰减。

操作流程标准化推进，搭建全流程可追溯检测操作规范体系，统一探头耦合压力与贴合方式，配备手持恒压装置辅助检测，规避人工施压不均引发的杂波干扰。严格落实扫查速度与间距控制准则，手工扫查速度控制在 50mm 每秒以内，扫查间距不超过探头晶片尺寸的三分之二，实现焊缝两侧及热影响区全覆盖扫查，关键受力部位增设正反双向扫查流程，彻底消除检测覆盖盲区。同步制定标准化检测记录模板，实时留存探头参数、扫查路径、波形特征等关键信息，保障每一处检测数据均可精准复核追溯。人员能力提升维度，构建检测人员分级培训与考核机制，明确所有现场检测人员需持有 UT 二级及以上无损检测资格证书，定期组织缺陷波形辨识、复杂结构检测实操专项培训，通过标准试块与现场缺陷试样对比训练，强化检测人员对裂纹、未熔合、夹渣等典型缺陷波形的判别能力。以理论考核与实操测评双轨把控准入与能力门槛，降低经验不足引发的误判风险。

### 3.2 焊缝结构适配与盲区补偿技术升级

焊缝结构复杂性引发的检测盲区与信号畸变属于客观技术难点，结构适配检测方案设计、多技术组合盲区补偿、结构反射波精准甄别，可实现复杂焊缝缺陷有效识别，提升检测结果精准度。不同焊缝结构类型对应专项检测方案，对接焊缝采用单侧双角度扫查模式，角焊缝与 T 型焊缝选用小尺寸晶片探头缩小声束扩散范围，箱型柱、桁架节点等复杂空间结构通过多角度多方位组合扫查，动态调整探头位置与角度适配不规则结构声束传播路径，确保声束覆盖所有焊接关键区域。坡口角度小于 45° 的窄坡口焊缝，采用小角度斜探头与直探头联合检测，弥补单一探头入射范围不足，提升熔合线与根部缺陷检出能力。

薄板焊缝近场区信号叠加问题通过延迟块探头分离始波与缺陷回波，厚板焊缝根部盲区采用背反射法与双晶探头提高近表面缺陷识别精度。焊趾、焊根等几何突变位置产生的结构反射波，依托结构特征波数据库，通过波形动态变化规律区分结构反射与缺陷反射——裂纹类缺陷波形具备峰值稳定、位置固定特征，结构反射波会随探头移动快速变化，以此减少误判。参照 NB/T47013.3 承压设备无损检测标准，对检测盲区区域开展二次复核检测，采用不同参数探头交叉验证确保盲区内部缺陷无遗漏。声束路径模拟技术同步引入，检测前通过软件模拟不同结构下声束传播轨迹，提前预判盲区位置与信号畸变区域，针对性优化扫查方案。焊缝结构适配与盲区补偿技术凭借定制化检测方案与多技术组合应用，破解结构特性带来的检测限制，让复杂焊缝缺陷识别具备更强针对性与可靠性。

### 3.3 信号处理与智能识别技术赋能

为系统性解决环境干扰过滤、缺陷特征强化与精准定位难题，本研究构建了从信号采集到缺陷识别的全流程技术路径，见图1。

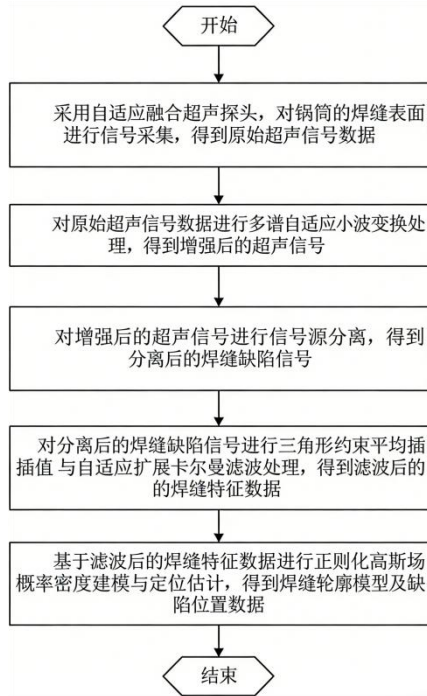


图1 钢结构焊缝超声波检测缺陷识别信号处理与智能定位流程

在传统检测基础上融入数字信号处理与智能识别技术，能够有效过滤环境干扰、强化缺陷特征、提升判别精度，是现代钢结构焊缝超声波检测向精准化、智能化发展的核心路径，也是降低人为误差、提升识别准确性的关键手段。现场信号采集

#### 参考文献：

[1] 罗杰.超声波检测技术在钢结构缺陷识别中的应用研究[J].行车指南,2025(1):0055-0057  
 [2] 陈明航.大跨径连续钢结构桥梁焊缝超声波无损检测技术[J].四川建材,2025,51(12):183-186  
 [3] 高峰.建筑钢结构焊缝检测中的超声波无损检测[J].城市开发,2025(4):162-164  
 [4] 曹小龙.钢结构焊缝超声波损伤检测研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(22):4-6  
 [5] 周攀虎.钢结构焊缝超声波无损探伤检测标准比较与分析[J].陕西建筑,2025(10):13-20

环节采用自适应耦合探头完成原始信号获取，保证复杂工况下超声信号传输的稳定性与完整性。在信号处理优化方面，以多谱自适应小波变换完成缺陷信号的初步增强与噪声抑制，通过盲源分离技术实现缺陷回波、结构反射波与环境杂波的有效剥离，再利用自适应扩展卡尔曼滤波对波形进行平滑校正，精准保留缺陷有效特征信号，解决施工现场干扰信号掩盖缺陷信号的问题。针对温度变化、表面状态导致的波形幅值波动，采用幅值自动校准技术，以标准试块回波为基准实时校正仪器灵敏度，保证不同工况下波形数据的一致性。

智能识别应用推进，搭建钢结构焊缝典型缺陷波形数据库，收录裂纹、未焊透、未熔合、气孔、夹渣等缺陷标准波形与现场实测波形，深度学习算法自动提取分类波形特征，实现缺陷类型智能判别。依托工程实测数据，智能识别模型可将缺陷误判率降低15%以上，显著提升识别效率与准确性。现场实操中，内置智能识别算法的数字化超声检测仪，可实时呈现仪器自动标注的缺陷位置、尺寸与类型建议，检测人员结合自身经验综合判定，推进人机协同检测。同步建立缺陷识别结果复核机制，智能与人工判别结果存在差异部位，采用多探头多方法复测验证，确保结果真实可靠。

#### 结语

本文聚焦钢结构焊缝超声波检测缺陷识别准确性核心议题，系统剖析检测系统、焊缝结构、外部环境三类关键影响因素，构建设备与操作协同优化、结构适配与盲区补偿、智能技术赋能升级三大实践路径。研究成果紧密贴合工程实操场景，能切实降低识别误差、提升检测精准度。后续可结合更多工程案例深化策略有效性验证，助力超声波检测技术向精准化智能化进阶，筑牢钢结构工程质量安全检测防线。