

# 风电塔筒现场 UT 探伤工艺优化及缺陷检出率分析

张羽

中车兰州机车有限公司，甘肃兰州，730000；

**摘要：**风电塔筒现场超声检测（UT）探伤作业，长期受到户外复杂工况条件的干扰与制约，其工艺方案的科学合理性，直接决定环焊缝缺陷检出率的高低水平。本文针对现场 UT 探伤过程中存在的核心技术痛点，系统优化探伤工艺的关键执行环节，深入分析工艺优化措施对缺陷检出率提升的内在逻辑机理，最终为进一步提升风电塔筒现场 UT 探伤作业质量、切实保障风电设备长期稳定运行安全，提供具备实践指导价值的技术参考。

**关键词：**风电塔筒；现场 UT 探伤；工艺优化；缺陷检出率；户外工况适配

**DOI：**10.64216/3080-1508.26.02.051

## 引言

风电塔筒环焊缝作为整个风电设备结构体系中的承载核心部件，承担着传递风载、保障塔筒整体结构稳定性关键功能。超声检测（UT）探伤技术凭借其对检测对象无损伤、检测精度较高的技术优势，已成为风电塔筒现场环焊缝缺陷排查的核心技术手段，在行业内得到广泛应用。然而，风电塔筒现场 UT 探伤作业环境与室内检测存在显著差异，作业过程中需直面多重干扰因素，包括户外昼夜与季节交替产生的温差变化、风电设备运行时带来的持续振动、环焊缝表面因长期暴露形成的氧化皮与锈蚀，以及焊缝成形过程中本身存在的表面不规则等问题。传统现场 UT 探伤工艺多采用固定化的操作流程与参数设置，缺乏对户外复杂工况的针对性适配，难以有效应对上述多重干扰。这直接导致探伤过程中产生大量干扰杂波，缺陷信号被杂波掩盖，缺陷信号捕捉难度大幅增加，最终制约缺陷检出率的提升，无法充分发挥 UT 探伤技术的优势。因此，针对户外工况特点优化现场 UT 探伤工艺，明确工艺优化措施与缺陷检出率之间的关联，阐明其对检出率的提升作用，已成为当前风电行业在塔筒缺陷检测领域的关键技术需求。

## 1 风电塔筒现场 UT 探伤工艺优化方向

风电塔筒现场 UT 探伤工艺的优化工作，需始终围绕“适配户外复杂工况、有效削弱各类干扰、实现缺陷精准探检”这一核心目标展开，从探伤作业的全流程出发，聚焦三个关键执行环节进行技术突破，打破传统工艺的局限，全面提升工艺方案对户外工况的适配性，以及对环焊缝缺陷的探检精准度。

### 1.1 探伤前预处理工艺优化

探伤前预处理工艺的核心目标，是消除环焊缝表面与超声波耦合环节可能产生的干扰因素，为后续探伤作业提供良好的基础条件，减少初始干扰对缺陷信号捕捉的影响。针对环焊缝表面普遍存在的氧化皮、锈蚀等问题，摒弃传统无规则打磨方式，采用定向打磨工艺进行表面处理。打磨操作需严格按照环焊缝本身的坡口走向规范打磨路径，确保打磨过程中不破坏焊缝坡口原始形态，同时保证焊缝表面平整度达到 UT 探伤作业的技术要求，从源头避免因焊缝表面不规则导致超声波反射紊乱，进而产生干扰杂波的问题。在超声波耦合环节，耦合剂的选择与涂抹方式同样需要优化。耦合剂需优先选择适配户外温差特征的类型，既要满足低温环境下的抗冻性能，避免低温导致耦合剂凝固、无法形成有效耦合层，也要具备高温环境下的抗蒸发性能，防止高温使耦合剂快速蒸发、耦合层厚度不均。同时，优化耦合剂涂抹方式，采用“定量点涂结合均匀刮涂”的操作方法，先按固定间距进行定量点涂，确保耦合剂用量充足，再通过专用工具将耦合剂均匀刮涂，保证焊缝表面耦合层厚度一致，避免因耦合层厚度不均导致超声波传播过程中出现信号衰减差异，影响缺陷信号的有效传递。

### 1.2 探伤中参数与路径优化

探伤作业实施过程中的参数调整与探检路径规划，是影响缺陷探检覆盖度与精准度的核心环节，优化需紧密结合现场塔筒环焊缝的实际结构特征，同时规避户外风电振动带来的干扰。在探伤参数优化方面，需摒弃传统固定参数模式，建立“环焊缝结构—探伤参数”的动态适配机制。根据现场实测的环焊缝厚度、焊接坡口形式（如 V 型、U 型坡口）等结构参数，针对性调整超声

波探头的角度与超声波发射频率。对于厚度较大的环焊缝，选择合适的小角度探头，确保超声波束能够穿透焊缝全厚度，精准覆盖焊缝根部、层间等易滋生缺陷的关键区域；对于厚度较小的环焊缝，适当调整探头角度与超声波频率，提升超声波束的分辨率，便于捕捉细小缺陷信号。在探检路径优化方面，采用“螺旋递进+定点复核”的组合式路径模式。探检时，探头需按固定间距沿环焊缝圆周方向以螺旋式轨迹递进推进，确保每一个探检点位均能覆盖环焊缝的不同深度与位置，避免出现探检盲区；当探检过程中捕捉到信号异常区域时，需立即停止螺旋递进，增加定点复核次数，通过调整探头角度与位置，反复采集信号，确认信号异常是否由缺陷引发，避免漏探，减少手持晃动导致的探检路径偏差，确保探检路径按预设规划精准执行。

### 1.3 探伤后信号处理工艺优化

探伤后信号处理工艺的优化，需充分考虑现场作业的便捷性，引入适配现场环境的轻量化信号处理流程，无需依赖复杂的大型设备，即可快速完成信号处理，有效削弱干扰杂波，提升信号判读的准确性。在信号滤波环节，采用针对性滤波技术替代传统通用滤波方式。根据户外工况下干扰杂波的来源与特征，分别对户外电磁环境引发的电磁杂波、风电振动引发的振动杂波进行定向过滤，通过设定特定的滤波频率阈值，精准过滤上述干扰杂波，同时最大限度保留缺陷信号的波幅、衰减速度、传播时间等核心参数，避免滤波过程中对缺陷信号造成损伤或丢失。在信号判读环节，重点优化信号判读阈值的设定标准。摒弃传统统一的判读阈值，结合现场实际工况特征，如户外温差、振动强度等因素，调整缺陷信号判读的核心指标阈值，包括波幅高低阈值、信号衰减速度阈值等，确保判读标准能够适配现场信号特征，既避免因阈值设定过高导致细小缺陷信号被判定为无效信号，引发漏判，也防止因阈值设定过低导致干扰杂波被误判为缺陷信号，造成误判。

## 2 工艺优化对缺陷检出率的提升逻辑

从干扰管控、探检精度、判读准确性维度，解析工艺优化推动缺陷检出率提升的内在逻辑。

### 2.1 探伤前预处理工艺的优化

从源头减少了探伤作业的初始干扰，为缺陷检出率提升奠定基础。通过定向打磨工艺实现焊缝表面平整，

有效减少了表面不规则引发的杂波；通过适配性耦合剂选择与均匀涂抹，避免了耦合不均导致的信号衰减。这两项优化措施共同作用，降低了初始干扰对缺陷信号的掩盖，使缺陷信号能够更清晰地呈现，减少了因缺陷信号被干扰掩盖，导致探伤过程中无法捕捉到信号，进而引发漏检的问题，为后续缺陷信号的捕捉与判读创造了良好条件。

### 2.2 探伤中参数与路径的优化

直接提升了缺陷探检的覆盖度与精准度，进一步降低漏探概率，直接推动缺陷捕捉概率的提升。动态参数调整机制确保超声波束能够精准指向环焊缝易滋生缺陷的关键区域，避免因参数不匹配导致波束无法覆盖关键部位，引发缺陷漏探；“螺旋递进+定点复核”的路径模式，既通过螺旋递进实现了环焊缝的全面覆盖，无探检盲区，又通过定点复核对异常区域进行二次确认，避免因单次探检遗漏缺陷信号。同时，固定探头支架减少了振动引发的路径偏差，确保探检过程精准，进一步减少因覆盖不全、波束偏差导致的漏探，直接提升缺陷信号的捕捉概率。

### 2.3 探伤后信号处理工艺的优化

有效降低了信号判读过程中的误差，确保已捕捉到的缺陷信号能够准确转化为检出结果，避免“信号已捕捉但未准确判读”导致的漏检，最终实现缺陷检出率的提升。轻量化针对性滤波技术在削弱干扰杂波的同时，完整保留了缺陷信号核心参数，确保缺陷信号不被丢失或失真；适配现场工况的判读阈值调整，减少了因判读标准不当导致的误判与漏判，使每一个被捕捉到的缺陷信号，都能被准确判定为有效缺陷信号，避免“捕而未判”的情况，将缺陷捕捉概率转化为实际的缺陷检出结果，最终实现缺陷检出率的提升。

## 3 工艺优化效果的核心保障

围绕工艺稳定执行与效果长效维持，从规范、能力及数字化层面搭建核心保障体系。

### 3.1 制定统一的现场 UT 探伤工艺执行规范

为优化工艺的稳定执行提供制度依据。规范内容需全面覆盖探伤前预处理、探伤中参数调整与路径执行、探伤后信号处理三个核心环节，明确每个环节的具体操作标准，如定向打磨的平整度标准、耦合剂涂抹的厚度标准、探头角度与频率的调整范围、螺旋路径的间距标

准、滤波技术的参数设置标准，以及信号判读阈值的具体数值范围等。同时，明确每个环节的验收要求，设定验收指标与判定方法，确保每一步操作均符合优化工艺的要求。通过统一规范的制定与执行，确保不同检测人员在不同时间、不同塔筒的探伤作业中，均能严格按照相同标准执行优化工艺，避免因个人操作习惯差异导致工艺执行偏差，进而影响优化效果的稳定性。

### 3.2 强化检测人员的现场实操能力

为优化工艺的精准落地提供人员支撑。培训工作需结合户外实际工况开展，搭建模拟户外温差、振动环境的实操培训场景，让检测人员在贴近真实作业的环境中，学习并掌握优化工艺的核心操作方法，包括定向打磨的路径控制、探伤参数的动态调整技巧、螺旋路径的精准执行、干扰杂波的判断与滤波技术的应用，以及适配工况的信号判读阈值调整方法等。通过模拟实操培训，提升检测人员应对户外复杂工况的能力，确保其在实际作业中能够准确判断工况特征，灵活调整工艺参数，精准执行优化工艺，避免因人员对优化工艺理解不深、操作不熟练，导致工艺优化措施无法充分发挥作用，进而保障优化工艺持续稳定地发挥对缺陷检出率的提升效果。

### 3.3 智能数字化追溯与云端协同保障

风电塔筒现场UT探伤工艺优化效果的长效维持与稳定输出，需以智能数字化工具为核心支撑载体，同时依托云端协同体系的技术赋能，构建“设备端数据存储—云端数据处理—跨主体协同联动”的全链条保障模式，从技术层面规避工艺执行偏差，确保优化效果持续落地。在设备端智能改造与数据存储层面，需引入具备多组独立存储通道的智能UT探伤设备。该类设备可按户外不同工况类型（如低温、高温、高振动工况），分类存储对应的优化工艺参数（如探头角度、超声波频率）、探头配置方案及信号判读阈值标准，形成标准化的工艺参数数据库。现场开展探伤作业时，检测人员可根据实时工况特征，通过设备终端一键调用匹配的参数方案，无需重新进行参数调试，有效避免因重复调试操作差异、调试过程中人为判断偏差导致的工艺执行不一致问题，保障现场工艺参数与优化标准高度契合。在云端协同体系搭建与数据处理层面，需同步构建面向风电塔筒UT探伤的专用无损检测云平台。该平台需具备实时数据传

输功能，可将现场智能探伤设备采集的探伤过程数据（如探头移动轨迹、检测时长）、缺陷信号波形数据及初步识别的缺陷特征信息，实时上传至云端数据库；同时引入区块链技术，对上传的各类数据进行加密处理与分布式存储，形成不可篡改的数据链路，实现从工艺参数调用、数据采集到结果输出的全程可追溯，从根本上杜绝数据篡改风险，保障数据真实性与完整性。云平台内部需集成深度学习算法模块，该模块可基于平台积累的海量历史探伤数据（含不同工况、不同缺陷类型的相关数据），通过持续的模型训练与参数迭代，不断优化缺陷信号判读算法的精准度，提升对复杂杂波干扰下缺陷信号的识别能力。

## 4 结语

风电塔筒现场UT探伤工艺的优化，核心在于立足户外复杂工况特征，通过探伤前预处理、探伤中参数与路径、探伤后信号处理三个环节的协同优化，实现对户外工况的精准适配，有效削弱各类干扰因素的影响。该优化方案通过减少初始干扰、提升探检精度、降低判读误差，从“减少漏探、降低误判”两个关键维度，直接推动缺陷检出率的提升。依托统一的工艺执行规范与检测人员实操能力提升两大保障措施，可确保工艺优化效果稳定落地，避免效果波动。这一工艺优化体系，既为风电塔筒现场UT探伤作业提供了可操作、可落地的工艺方向，也为风电塔筒环焊缝缺陷排查质量的提升提供了可靠技术支撑，与风电设备安全运行的核心需求高度契合，具备重要的实践应用价值。

## 参考文献

- [1] 刘鹤. 风电塔筒法兰焊接变形控制的工艺分析[J]. 技术与市场, 2021, 28(7): 141-142.
- [2] 河南双海通用设备有限公司. 一种风电塔筒法兰焊接变形控制装置: CN202222605348.6[P]. 2023-02-28.
- [3] 中国船舶集团广西造船有限公司. 一种风电塔筒法兰焊接变形高精度校正装置: CN202311125793.5[P]. 2023-12-01.
- [4] 马志文. 风电塔筒法兰组合式米字支撑结构技术经济分析[J]. 风能, 2022(2): 72-75.
- [5] 王培培. 基于风电塔筒法兰焊接措施的分析[J]. 百科论坛电子杂志, 2021(19): 2131.