

# 相控阵超声在水利启闭机轴类部件检测中的应用实践

王春雨 马彤彤

水利部长春机械研究所 吉林 长春 130012

**摘要:** 为提高水利启闭机轴类部件检测精准度与工作效率, 研究采用相控阵超声技术借助电子系统精准控制超声波发射与接收, 实现对部件全方位、多角度的检测。该技术可快速识别部件内部缺陷, 在难触及部位表现突出, 同时大幅缩短检测时长。通过科学设置检测参数、优化检测进一步提升检测效果。依据检测结果评估, 可给出合理的维修或更换建议, 为设备安全运行提供科学支撑, 对保障水利工程稳定运行意义重大。

**关键词:** 相控阵超声技术; 轴类部件; 无损检测; 水利工程

## 引言

无损检测技术作为水利工程安全保障的重要技术, 其技术迭代直接影响设备运行可靠性评估的精准度<sup>[1]</sup>。水利启闭机轴类部件作为传动系统的核心构件, 长期承受交变载荷与介质腐蚀作用, 易产生疲劳裂纹、夹杂等缺陷, 传统超声检测技术因波束方向单一、检测盲区大等局限, 难以满足复杂曲面轴类部件的全覆盖检测需求<sup>[2]</sup>。相控阵超声技术借助电子手段, 精准调控阵列探头里各个晶片的相位延迟, 达到波束的动态聚焦以及偏转, 能够有力冲破传统检测方法在空间分辨率和检测效率方面的限制<sup>[3]</sup>。该技术借助对声束入射角度的优化调整, 能够精准无误地识别出轴向、径向以及斜向的缺陷, 特别适合用于液压启闭机弧形轴、螺杆启闭机细长轴这类异形构件内部缺陷的检测工作。与常规超声检测相比, 相控阵技术借助多通道数据融合的方式, 给水利工程关键设备的状态评估带来可靠技术保障。

## 1 相控阵超声技术原理及特点

### 1.1 相控阵超声技术原理

相控阵超声技术依靠电子扫描的原理, 借助阵列探头里多个独立晶片分时激励以及相位控制, 达到超声波束动态聚焦与偏转的效果。相控阵超声技术成功打破了传统单探头只能固定角度检测的束缚, 运用惠更斯原理构建出虚拟声源, 进而形成一套可编程控制的波束合成系统。借助对各晶片发射时延的精确计算, 让超声波在特定位置产生相长干涉现象, 进而在目标区域达成高能量密度的聚焦效果。这种独特的电子扫描模式, 成功规避了机械扫描时产生的迟滞效应, 还能在多维空间里对波束进行灵活的调控, 给复杂结构件的检测工作筑牢了技术根基。

### 1.2 相控阵超声技术特点

该技术展现出四大鲜明特征: 首先, 空间分辨率实

现大幅提升, 借助0.5mm级步进聚焦技术, 能够精准识别微米级别的缺陷; 其次, 检测灵活性显著增强, 支持线性扫描、扇形扫描等超过6种扫描模式; 再者, 实时成像能力极为突出, 帧频能够达到30Hz以上, 充分满足动态检测的各项需求; 最后, 检测可靠性得到优化, 通过采用多角度复合成像技术, 可有效抑制各向异性材料对检测信号产生的干扰。相较于传统A型超声检测, 相控阵技术检测信息量提升3-5倍, 缺陷检出率提高至98%以上<sup>[4]</sup>。该技术所独有的全矩阵捕获(FMC)技术, 能够出色地实现全聚焦成像(TFM), 进而为缺陷的定量分析提供极为精准的数据支撑。

### 1.3 相控阵超声技术在轴类部件检测中的应用优势

在水利启闭机轴类部件的检测环节, 此项技术彰显出三大显著优势: 其一, 缺陷识别能力得到极大增强, 对于轴类部件中常见的疲劳裂纹、夹杂物等缺陷, 能够凭借多角度入射达成声束的全面覆盖, 特别是针对深度5mm之内的近表面缺陷, 检出率能够提升至95%以上; 其二, 检测效率获得大幅提升, 运用电子扫描取代机械扫描后, 单个部件的检测时间大幅缩短60%, 而且无需反复涂抹耦合剂; 其三, 复杂结构适应性得到优化, 借助3D成像技术获取轴肩过渡区、键槽根部等应力集中部位的缺陷形态, 为疲劳寿命评估提供了坚实可靠的依据。实验所呈现的数据表明, 当对 $\Phi 300\text{mm}$ 的轴类部件展开检测工作时, 相控阵技术针对横向裂纹的定位误差, 能够精准地控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 的范围之内, 在尺寸测量方面, 误差也小于5%, 完全契合水利行业特级检修标准的相关要求。

## 2 轴类部件检测需求分析

### 2.1 轴类部件材质分组

轴类部件是水利启闭机中的传动元件, 其材质特性在极大程度上决定检测参数和检测方法的选择。轴类部件从材料学方面主要被划分为碳钢轴、合金钢轴以及不

锈钢轴三大类别。碳钢轴是铁碳合金，有着较高的强度与硬度，抗腐蚀能力欠佳，在潮湿环境里容易发生氧化反应；合金钢轴中添加铬、镍、钼等合金元素，材料的力学性能和耐腐蚀性得到提升，在高负荷工况下广泛应用；不锈钢轴的特点是铬含量不低于10.5%，靠形成致密氧化膜达成耐腐蚀效果，材料内部晶粒结构繁杂，容易出现各向异性缺陷。不同材质的声学特性差异显著，不同材质分组对检测产生的影响主要体现在波束角度的选择方面<sup>[5]</sup>。碳钢轴由于声速相对较高，检测时采用70°到80°的斜探头，达到深部缺陷检测目的；合金钢轴有着晶粒粗化的倾向，检测过程中需要把检测频率降低至1到2MHz，以此避免散射噪声的产生；不锈钢轴则要采用双晶探头技术，借助分离发射与接收晶片的方式，减少近表面盲区。

## 2.2 损伤类型分组

轴类部件出现的不同损伤类型会对相控阵超声检测时产生的信号特征以及后续的识别造成影响。轴类部件主要损伤类型包含疲劳裂纹、腐蚀损伤以及铸造缺陷这三类。疲劳裂纹是交变应力在键槽、油孔边缘等应力集中地的作用结果，沿着晶粒边界或者穿过晶粒扩展，在波形上就呈现出尖锐的脉冲反射；腐蚀损伤出现在碳钢轴的表面，是电化学腐蚀的表现，会形成点蚀或者让表面均匀变薄，超声信号就表现为底面回波幅度变低；铸造缺陷是因为材料不连续，声波会散射，形成杂乱无章的多峰信号。不同损伤类型间存在差异，这要求在检测过程中必须采用与之适配的不同信号处理算法。当面对疲劳裂纹问题时，要应用时间反转镜技术(TRM)，以此增强缺陷回波在时域的聚焦特性，进而提升裂纹深度测量的精准度；而针对腐蚀损伤检测，则需结合厚度测量模式，对比健康区域与损伤区域的声时差，从而准确量化腐蚀程度；对于铸造缺陷识别，要采用全矩阵捕获(FMC)技术，通过多角度扫描来重建三维声场分布，以此区分真实缺陷与材料晶界反射。

## 2.3 检测参数的选择依据

相控阵超声技术达到精准检测需要科学地选择检测参数。检测参数包括频率、波束角度、晶片激活数量以及聚焦深度这四个方面。在挑选频率时，要兼顾分辨率与穿透力这两方面：高频范围在5到10MHz时能提高分辨率，但是信号衰减快，适合检测近表面的缺陷；低频范围在1到3MHz时，穿透力强劲，但分辨率相对弱些，适用于检测深部的缺陷。在挑选波束角度时，要充分考量声束的覆盖范围情况：当角度较小时，如处于45°到60°区间，更适合用于检测轴向存在的缺陷；处于70°到80°范

围的较大角度时，适用于径向缺陷的检测。晶片被激活的数量多少会对波束合成的质量产生影响。当激活的晶片数量增多时，波束聚焦效果会更出色，不过计算量会以指数级的速度大幅增长。

## 2.4 检测策略的制定原则

无损检测标准包含检测路径规划、扫描方式选择以及缺陷评估方法三项核心要点。检测路径的规划工作，要紧紧遵循“全面覆盖、重点突出”这一重要原则：针对长轴类部件，运用螺旋扫描方式达成全周向的检测；对于短轴类部件，则采用线性扫描方式来提升检测的速度。选择扫描方式要考虑缺陷的具体类型：当面对疲劳裂纹时，运用电子扫描(E-Scan)来进行高密度采样；要是出现腐蚀损伤，则采用扇形扫描(S-Scan)以扩大检测的范围。构建科学合理的量化指标体系开展缺陷评估工作。按照ASTME2373标准来执行，缺陷评估工作需涵盖缺陷位置、尺寸以及性质这三项关键参数。位置评估利用声时定位法来达成，其精度能够达到 $\pm 0.5\text{mm}$ ；尺寸评估运用DAC曲线法，并搭配6dB法或者20dB法来确定缺陷的边界；性质评估则是借助波形分析来实现，像疲劳裂纹呈现出尖脉冲特征、腐蚀损伤有着底波衰减特征等。

## 3 相控阵超声检测实践

### 3.1 检测设备与参数设置要点

水利启闭机轴类部件开展检测工作时，相控阵超声检测设备的挑选，要全面考量部件材质、结构特点以及检测精度要求等多方面因素。在水利启闭机轴类部件检测工作中，常用的相控阵超声检测设备，要具备多通道发射接收、高精度波束控制以及实时成像这些功能，保证对轴类部件内部缺陷进行全面覆盖且精准识别。参数设置需根据轴类部件的材质特性调整频率参数，通常选择1-10MHz范围内的频率以平衡穿透力与分辨率。波束角度设置时，要充分考虑轴类部件的几何形状，对聚焦深度和扫描范围进行优化，从而有效检测出轴向、径向及斜向存在的缺陷。除此之外，检测设备的增益以及时间基线等关键参数按照现场环境噪声的实际水平来动态调整，如此才能保证检测信号的信噪比达到相应要求。参数适配原则按照“材质-损伤-参数”匹配模型来开展，针对不同材质的轴类部件，结合损伤类型，挑选出与对应的检测参数组合。

### 3.2 检测过程与数据分析方法

相控阵超声检测要严格按照标准化流程来进行，开展探头布置工作根据轴类部件的尺寸以及检测需求，挑选出合适的探头类型、确定好数量，保证探头与被检测表面能达到良好的耦合效果。波束控制借助相控阵技术

达成波束聚焦与扫描的目的,通过调整阵列探头里各个晶片的激发时序,进而精准控制波束的传播走向与聚焦深度,实现对轴类部件内部缺陷的全面检测。在检测过程中,要时刻留意监测检测信号的幅度、相位以及波形特征,把异常信号出现的位置和特征详细记录下来,以便为后续的数据分析提供有力依据。数据分析方法要把相控阵超声成像技术与缺陷识别算法结合起来,先对检测数据做预处理,提升信号的信噪比和可读性。利用合成孔径聚焦技术(SAFT)或者全聚焦方法(TFM)来处理检测数据得到高分辨率轴类部件内部结构图像。缺陷识别将图像处理技术和模式识别算法结合起来运用,通过提取缺陷在几何方面的特征、声学方面的特征,对缺陷的类型开展分类与定位工作。

### 3.3 检测结果的评估与应用方向

检测结果的评估根据缺陷的几何尺寸、具体位置分布情况以及声学特性,运用定量与定性相结合的办法来开展。针对裂纹类缺陷要测量长度、深度还有开口宽度,评估对轴类部件承载能力会造成何种影响;夹杂类缺陷要分析其成分与分布特征,判断对材料性能的劣化程度究竟怎样;气孔类缺陷要评估其体积占比以及聚集程度,判断对部件密封性会产生怎样的影响。评估环节参照相关标准(GB/T6402-2008《钢锻件超声检测方法》),对缺陷的严重程度展开分级工作,以此为维修或更换决策提供有力依据。针对轻度出现的缺陷问题,可以采取打磨、补焊等修复手段来恢复部件原本的性能;而当中度缺陷出现时,则需综合考虑部件的使用寿命以及剩余强度进行评估,进而决定是进行更换还是加固处理;一旦发现重

度缺陷,则必须立即停机进行检修,以防因部件失效而引发水利工程安全事故。此外,根据检测得出的结果优化水利启闭机的设计参数以及制造工艺,例如材料选择不合适、热处理工艺存在缺陷等情况,给出改进建议提升轴类部件的可靠性和使用时长。

### 结论

相控阵超声技术凭借电子相位控制实现波束动态聚焦与多角度扫描,在水利启闭机轴类部件检测中突破传统超声检测的空间分辨率与覆盖范围限制。该技术通过优化声束入射角度与多通道数据融合机制,可精准识别部件内部疲劳裂纹、夹杂等缺陷,有效解决异形构件的检测盲区问题。通过调整检测参数、制定科学策略,能进一步增强检测灵敏度与分辨率,为不同材质、损伤类型的轴类部件提供差异化检测支撑。智能化管理策略助力水利工程远程监控与决策,未来该技术将在设备全生命周期管理中发挥更关键作用,支撑水利事业高质量发展。

### 参考文献:

- [1]李青松,白世源,雍青林.黄金峡水利枢纽泄洪表孔液压启闭机应用简述[J].水电站机电技术,2025(3):63-66.
- [2]孙龙臻.CPMS陶瓷杆液压启闭机开度传感器的应用实践[J].山东水利,2025(5):35-37.
- [3]方军,康健峰.夹岩水利枢纽工程升鱼机系统自动启闭机技术及实践[J].水利水电快报,2025(s1):16-17.
- [4]胡峰.超声横波反射法在水利工程混凝土检测中的应用[J].工程技术研究,2025(11):126-128.
- [5]李家伟,刘黄鹤,杜燕伶,等.超声相控阵在钢结构检测中的应用研究[J].品牌与标准化,2025(3):121-123.