

# 变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺及应用

王志<sup>1</sup> 王红梅<sup>2</sup> 陶勇<sup>3</sup> 林雪松<sup>1</sup> 蔡志强<sup>1</sup>

(1. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 针对国家和行业均无铜铝过渡线夹焊缝检测相关标准的问题进行了研究, 寻找到并确定了变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺, 通过现场应用可以有效地检出铜铝过渡线夹焊缝的缺陷。

**关键词:** 变电站; 铜铝过渡线夹; 超声相控阵; 检测工艺; 应用; 焊缝

**Abstract:** Because there is no related national and industrial standards for welds inspection of copper to aluminum terminal connector, the detection technology of ultrasonic phased array for copper to aluminum terminal connector of substation is determined, which can effectively detect the weld defects of copper to aluminum terminal connector by field application.

**Key words:** substation; copper to aluminum terminal connector; ultrasonic phased array; detection technology; application; welds

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-0056-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.013

## 0 概述

铜铝过渡线夹是变电站重要连接部件, 在变电站应用广泛, 由于变电站早期设备出线端子多为铜材, 而输电线往往是铝, 为了避免电化学腐蚀, 通常采用铜铝过渡线夹来避免两种材料之间连接的电化学腐蚀。铜铝过渡线夹的结构形式主要有闪光对接焊、摩擦对接焊、钎焊和爆炸焊 4 种对接型式。

近年来, 国家电网公司发生多起电力设备铜铝过渡线夹断裂事故, 对电网的安全稳定运行造成了相当大的影响。据某集团公司 2000 年至 2007 年的不完全统计, 发生设备线夹断裂事故 16 次, 造成设备停电故障 7 次。已发生的 16 次线夹断裂, 除 1 次为铸铝线夹外, 其余均为铜铝过渡线夹, 并且都是采用铜铝对焊方式, 断裂部位基本都在铜铝结合部位。2006 年江西省电力公司在昌东变电站 220 kV 线夹断裂, 引线掉落引起 220 kV 母差保护动作, 造成多个 220 kV 变电站母线或主变压器失压, 南昌地区损失负荷 133.4 MW, 占比 8.2%; 南昌用户停电 7.5 万户, 占比 4.27%, 造成了极大的社会影响。

铜铝过渡设备线夹在变电站广泛应用, 据统计, 四川省内变电站在役钎焊和爆炸焊对接型式线夹铜

铝过渡线夹约为 5 万个, 闪光焊对接型式线夹总数量约为 5 万个。涉及面广, 短期内无法全面进行更换。对铜铝过渡线夹无损检测技术进行研究, 寻找铜铝过渡线夹有效的无损检测方法, 从而保证电网的安全运行, 势在必行。

从国家电网和四川电网在役铜铝过渡线夹断裂情况来看, 发生断裂的铜铝过渡线夹主要是闪光焊对接型式线夹。经对断裂线夹相关失效分析, 发现铜铝过渡线夹断裂主要是焊缝存在焊接缺陷, 在外力和焊缝焊接应力的作用下, 焊缝缺陷不断扩展, 最终导致线夹断裂。因此要防止线夹断裂, 重点是对该类线夹焊缝缺陷的检测。

当前, 国家和行业均无铜铝过渡线夹焊缝检测的相关标准, 也没有现成的检测方法可以借鉴。于是开展了大量工作, 对渗透(PT)技术、声纵波法、横波法、表面波法、爬波法、导波法等多种方法进行了深入的试验和研究, 最终确定采用超声相控阵检测技术和工艺, 可以有效地检测出铜铝过渡线夹焊缝的缺陷。

## 1 超声相控阵波检测技术

超声相控阵技术采用了全新的发射与接收超声

波的方法,通过控制换能器阵列中各阵元的激励(或接收)脉冲的时间延迟,改变由各阵元发射(或接收)声波到达(或来自)物体某点时的相位关系,实现聚焦点和声束方位的变化,完成声成像的技术。

波束聚焦是通过软件控制每一个晶片的触发时间,使波前在指定位置叠加实现的。焦点取决于所用晶片的大小和数量以及晶片的激发频率,如图1所示。

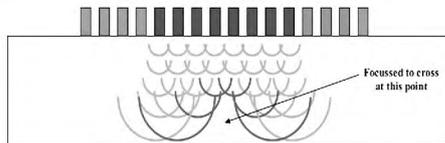


图1 波束聚焦

波束的偏转是通过软件控制每一个晶片激发的延时使波阵面沿特定角度传播来实现的,如图2所示。

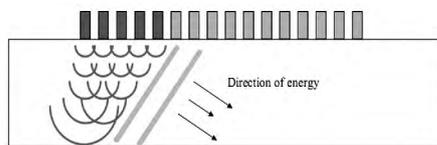


图2 波束的偏转

超声相控阵是超声探头晶片的组合,由多个压电晶片按一定的规律分布排列,然后逐次按预先规定的延迟时间激发各个晶片,所有晶片发射的超声波形成一个整体波阵面,能有效地控制发射超声束(波阵面)的形状和方向,能实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦。它为确定不连续性的形状、大小和方向提供出比单个或多个探头系统更大的能力。

超声相控阵检测技术使用不同形状的多阵元换能器产生和接收超声波束,通过控制换能器阵列中各阵元发射(或接收)脉冲的不同延迟时间,改变声波到达(或来自)物体某点时的相位关系,实现焦点和声束方向的变化,从而实现超声波的波束扫描、偏转和聚焦。然后采用机械扫描和电子扫描相结合的方法来实现图像成像。

## 2 铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺

### 2.1 超声相控阵探伤仪的选择

由于中国现无超声相控阵探伤仪的相关技术标准,设备选择时可参考 ASTM E2491《评估性能特征的相控接收阵列超声波检验仪器和系统的标准指

南》的相关技术要求外,还应满足以下要求:

1) 功能强大。内置聚集法则计算器,可根据工件需求自由选择聚集方式,如深度/声程/投影面/任意面聚集,可实现线性/扇形等多种扫查方式。配备高亮高分辨率彩色液晶触摸屏,在可图像化同时显示多种扫查方式的检测结果之外,既能保证检测结果的可靠性,又方便监控、存档与作进一步的缺陷分析。

2) 高性能指标。相控阵探伤仪具有多通道,通道达到32/128,兼具双独立通道高性能 TOFD 和常规超声波检测功能;负方波发射脉冲,脉宽精度达到2.5 ns,脉冲重复频率达20 kHz;仪器带宽0.5~15 MHz,可兼容多种频率的相控阵探头。

3) 完善的数据处理能力。实时数据采集,在线或离线进行数据分析;支持不少于1 024个聚集法则,能满足高速扫查,避免漏检;数据存储可选择SD卡可外接USB设备;检测报告可在仪器上直接生成。

4) 测量更为精确。可对每个声速进行延迟、灵敏度及TCG校准。

### 2.2 超声相控阵探头的选择

探头的性能参数满足 JB/T 11731-2013《无损检测 超声相控阵探头通用技术条件》,针对铜铝过渡线夹宜选择自聚焦探头,探头频率为7.5 MHz,阵元数为16,阵元中心距离为0.5,阵元长度为10。

### 2.3 超声相控阵试块的选择

选择为本项设计的超声相控阵试块 TLXJ-1 金属试块(如图3所示)和对比试块。

超声相控阵试块 TLXJ-1 金属试块主要用于探伤设备、探头灵敏度的测试。主要测试设备、探头能否有效地检测出 TLXJ-1 加工的孔,检测出来的孔的位置参数与 TLXJ-1 金属试块已知位置的参数误差能否满足超声相控阵无损检测的要求,TLXJ-1 加工的孔的图像是否清晰,分辨率是否满足要求。

超声相控阵对比试块是用在役的铜铝过渡线夹加工制作的,其声学性能与实际线夹是一致的,对比试块的相关特性代表了实际工件,除表面补偿外不再进行相关声学性能的补偿。通过对比试块上的人工缺陷(加工的孔和槽)的调校,确定在役的铜铝过渡线夹超声相控阵无损检测的探伤灵敏度。

## 2.4 超声相控阵耦合剂的选择

宜选用粘度较大的、对铜铝线夹不存在腐蚀的耦合剂,如浆糊、机油等。

## 2.5 超声相控阵探伤前的准备工作

### 2.5.1 宏观检查

为节约资源,对在在役的铜铝过渡线夹进行超声相控阵探伤前,首先进行宏观检查,按照铜铝过渡线夹相关标准的要求,发现超过标准要求的不合格铜铝过渡线夹(如线夹表面裂纹、机械损伤超、线夹焊缝裂纹、表面开孔的气孔、表面夹渣、焊缝错边超标等)应进行更换,不再进行超声相控阵探伤检测。

### 2.5.2 检测面的选择和准备

通过对比试验发现,由于在役的铜铝过渡线夹铝基体是铸铝,铸造缺陷较多,铝晶粒较大,使得声速发现畸变,因此主要在线夹铜侧进行线夹焊缝探伤。

为保证检测面具有良好的声耦合,要去除线夹表面氧化层、毛刺、油污、焊接飞溅,准备好的检测对象要再次进行宏观检查,发现超标缺陷的线夹要进行更换,不再进行超声相控阵探伤检测。

## 2.6 超声相控阵无损检测

### 2.6.1 探头和仪器灵敏度校准

采用 TLXJ-1 金属试块,根据所采用探头和楔块的种类,在仪器中输入相关参数,选择适当的聚焦法则,对准已知的孔,已知标准孔的位置、尺寸、大小能否在超声相控阵设备上完整反映。在最大检测位置探头和仪器组合灵敏度余量不小于 10 dB,探头和仪器组合分辨率不小于 10 dB,如图 3 和图 4 所示。

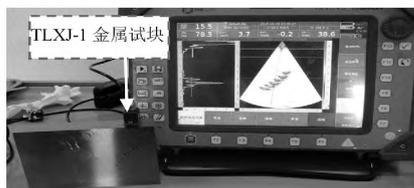


图3 纵波超声相控阵探头和仪器灵敏度的测试校准图

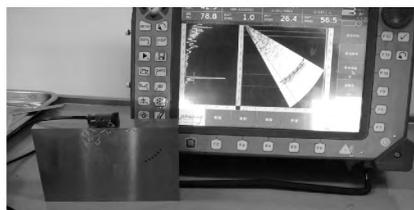


图4 横波超声相控阵探头和仪器灵敏度的测试校准图

### 2.6.2 检测灵敏度调校

根据聚焦法则,在仪器上输入工件相关参数,利用加工的铜铝线夹的对比试块进行调校,根据工件厚度,对声速进行修正。

根据工件厚度选择铜铝线夹的对比试块,对准对比试块加工的 1 mm 人工切槽,将对对比试块上检测最大声程处深的 1 mm 人工切槽最大反射波,调整至 A 扫描显示满幅波高的 80%,作为基准灵敏度,再增益 6 dB 作为检测灵敏度,根据工件表面状况,可对表面进行 0 ~ 3 dB 的表面补偿。

### 2.6.3 铜铝过渡线夹超声相控阵检测

根据选择的设备、仪器、探头及设备调校后,对铜铝过渡线夹进行超声相控阵检测。

## 2.7 缺陷测量

1) 缺陷测长:缺陷长度一般用端点半波高度法测定,即根据探头沿焊缝长度方向移动时,由缺陷左右两端的最大波幅降低一半时的移动距离确定。

2) 缺陷测高:缺陷高度可依据 S 扫描或 B 扫描图像,用 6 dB 降落法测定。首先找到缺陷的最高波,调至基准波高(80%),然后改变探头角度,找到一半波高位置(40%),并通过测量线进行测量。

## 2.8 焊缝缺陷评定

1) 危害性缺陷如裂纹、未熔合缺陷不允许,一律判为废品。

2) 非危害性缺陷如焊缝内容或表面夹渣、气孔等,单个缺陷直径  $\Phi \geq 2$  mm,不允许。单个缺陷直径  $\Phi < 2$  mm,但缺陷长度  $\geq 5$  mm 不允许。焊缝中多个缺陷,其间距小于缺陷本身的尺寸,按同一缺陷进行评定,即缺陷长度是缺陷本身长度和间距之和。

## 2.9 检测记录和报告

检测记录:记录的目的是为工件无损检测质量评定(编发检测报告)提供书面的依据,并提供质量追踪所需的原始资料。记录的内容应尽可能全面。主要包括检测设备信息、工件信息、检测缺陷信息。

检测报告:检测报告可采用表格或文字叙述的形式。其内容至少应包括被检工件名称及细节、扫描面和表面状态、图号及编号、检测规程的编号、相控阵超声仪器细节、相控阵探头细节(①探头阵元数;②频率;③阵元间距;④焦距)、楔块细节(①声速;②入射角;③几何尺寸)、虚拟窗孔的使用(即使用的阵元数和阵元宽度)、聚焦法则使用的阵元数

及设置细节、仪器调整方法及细节、验收标准,超标缺陷的位置、尺寸、评定结论、操作者姓名及检测日期等。报告中最重要的一部分评定结论,需根据显示信号的情况和验收标准的规定进行评判。若出现难以判别的异常情况,应在报告中注明并请有关部门处理。

### 3 应用

根据所研究的铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺,对铜铝过渡线夹进行了超声相控阵检测,具有较好的检测效果。

#### 3.1 模拟缺陷检测

取铜铝过渡线夹实物,根据铜铝过渡线夹不同厚度加工了一系列对比试块,在对比试块上加工了不同类型的、不同位置的缺陷来模拟实际缺陷,通过超声相控阵技术,可以很好地检出模拟缺陷,见图5和图6所示。

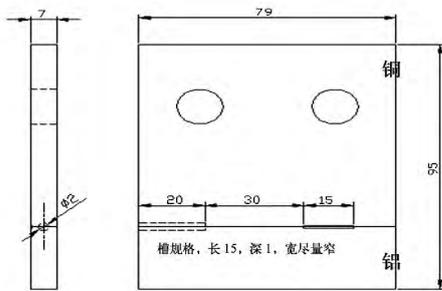


图5 对比试块(T1502081)上的模拟缺陷

图5是编号为T1502081对比试块,在对比试块上加工了模拟铜铝线夹的内容缺陷的孔和表面缺陷的槽。

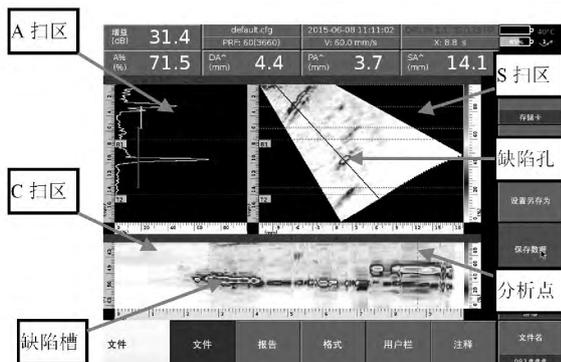


图6 对比试块(T1502081)上的模拟缺陷  
超声相控阵检测截图

T1502081试块上加工的孔和槽可以从S扫和C扫上清晰地分辨。且可以从S扫和C扫上精确地测量试块上孔和槽尺寸。通过测量,模拟缺陷位置、缺陷尺寸误差在0.1 mm左右。

#### 3.2 现场应用

通过对数个变电站所使用铜铝过渡线夹进行检测,发现了大量的缺陷。图7为其中一个铜铝过渡线夹现场检测情况截图。

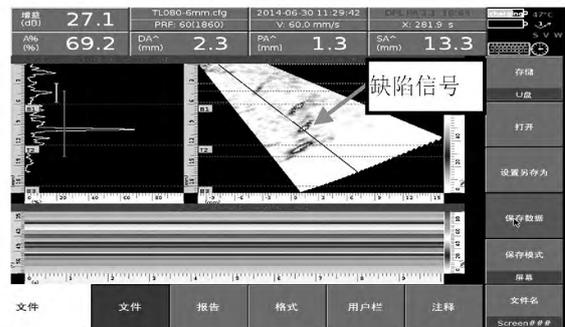


图7 现场实际检测截图

该铜铝过渡线夹用在某变电站隔离开关支柱绝缘子上,其厚度为6 mm。通过检测发现在工件深约2.3 mm处有一个长约8 mm缺陷,缺陷幅值为27.0 dB。根据所研究的“变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺”中质量标准,该缺陷超标,变电站对该铜铝过渡线夹进行了更换。

### 4 结论

根据对比试块的模拟检测和现场实际应用检测,所制定的变电站铜铝过渡线夹超声相控阵检测工艺符合工程实际,可以有效地检测出变电站铜铝过渡线夹焊缝中缺陷,从而保证电网的安全。

#### 参考文献

- [1] 钟相源. 变电站铜铝过渡设备线夹断裂分析[J]. 中国电力 2010 43(12): 27-30.
- [2] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社 2008.

(收稿日期: 2015-07-31)