

# 航空转子铜-钢结合层缺陷的五轴超声成像检测系统

安仕伟, 刘勋丰, 胡 克, 刘康正, 程树云, 胡文杰

(南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 南昌 330063)

**摘要:** 针对现有的四轴平动扫描成像系统检测航空转子时系统定位精度低、抗干扰能力差的问题, 研制了一套五轴超声成像检测系统。该系统对检测工作台, 探头夹持装置及抗干扰装置进行了优化设计, 改进了滤波方式, 并在软件中加入探头对中算法。采用该系统进行抗干扰性试验, 并对系统的定位精度进行验证, 试验结果表明, 五轴超声成像检测系统的定位精度高, 成像效果好, 能有效抑制电磁干扰, 实现转子的连续稳定检测。

**关键词:** 超声检测; 航空转子; 扫描成像系统

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2023)02-0066-06

## Five-axis ultrasonic imaging detection system for copper-steel bonding layer defects in aerospace rotors

AN Shiwei, LIU Xunfeng, HU Ke, LIU Kangzheng, CHENG Shuyun, HU Wenjie

(Key Laboratory of Non-destructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low positioning accuracy and poor anti-interference ability of the existing four-axis translational scanning imaging system for detecting aeronautical rotors, a five-axis ultrasonic imaging detection system was developed. The system optimizes the design of the detection workbench, the probe clamping device and the anti-interference device, improves the filtering method, and adds the probe alignment algorithm into the software. The system is used for anti-interference testing, and the positioning accuracy of the system is verified. The experimental results show that the five-axis ultrasonic imaging detection system has high positioning accuracy, good imaging effect, can effectively suppress electromagnetic interference, and realize the continuous and stable detection of the rotor.

**Key words:** ultrasonic inspection; aviation rotor; scanning imaging system

在飞机动力传动系统中, 柱塞式液压泵是液压传动系统中的重要部件, 其主要由缸体、滑靴、转子、柱塞、配流盘等结构件组成, 其中转子采用铜-钢双金属复合结构, 以扩散焊方法制造。目前一般采用超声成像检测的方法对转子扩散焊接质量进行评价。张锐等<sup>[1]</sup>提出了一种超声特征扫描成像技术,

研制了手动超声特征扫描成像系统。刘新等<sup>[2]</sup>研制了一种三轴孔内转子成像检测系统, 实现了单个转子柱塞孔的检测, 但是该系统每次只能检测一个转子, 检测功能较为单一, 检测效率低。罗雪峰等<sup>[3]</sup>研制了一套四轴平动扫描成像系统, 可以连续检测九个转子, 提高了系统检测效率, 但转子定位误差较大, 信号受干扰严重, 成像效果并不理想, 容易出现缺陷误判问题。基于以上背景, 针对系统精度低, 信号受干扰严重等问题, 笔者开展了五轴转动扫描成像系统的设计及研制工作。该系统具备回转工作台, 减小了转子的定位误差, 优化了探头夹持装置;

收稿日期: 2022-03-11

作者简介: 安仕伟(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超声检测系统研发及应用

通信作者: 刘勋丰, 13970931600@163.com

设计了探头对中功能, 提高了系统的检测精度; 同时改进了滤波方式, 提升了系统抗干扰能力, 使成像结果更加清晰、可靠。

## 1 检测对象

双金属转子结构如图 1 所示, 其为铜-钢复合层结构, 转子孔的内层工作面为铅青铜材料, 外层加固基体为高强度 45 钢<sup>[4]</sup>。

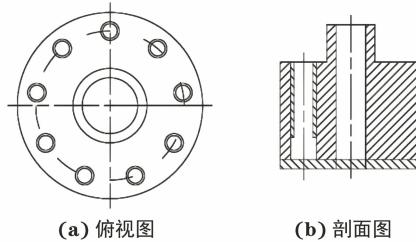


图 1 双金属转子结构示意

双金属转子的铜层密度为  $8.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 其纵波声速为  $4425 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 声阻抗为  $3.94 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 基体钢的密度为  $7.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 纵波声速为  $5900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 声阻抗为  $4.60 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 空气的密度为  $1.3 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 纵波声速为  $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 声阻抗为  $44.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

两种金属以扩散焊方式连接, 在结合层处可能存在完全未结合、弱结合缺陷。若结合层界面扩散焊接良好, 超声波由铜层垂直入射到钢层, 声压反射率可表示为

$$r = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \times 100\% = 7.7\%$$

式中:  $Z_1$  为铜合金的声阻抗;  $Z_2$  为钢合金的声阻抗。

结合层处的声压透射率可表示为

$$t = 2Z_2/(Z_2 + Z_1) \approx 1$$

结合层界面出现脱接缺陷时, 超声波由铜层入射到空气中, 结合层处的声压反射率可表示为

$$r = (Z_3 - Z_1)/(Z_3 + Z_1) \approx -1$$

式中:  $Z_3$  为水的声阻抗。

结合层处的声压透射率可表示为

$$t = 2Z_3/(Z_3 + Z_1) \approx 0$$

由此得知, 铜-钢结合层处焊接界面良好时, 结合层处声压反射率低, 几乎全透射。焊接界面出现脱接缺陷时, 超声波在结合层处几乎全反射, 产生明显的缺陷波和底波降低现象, 根据超声检测信号的这一现象可以评估柱塞孔铜-钢结合层界面的焊接质量<sup>[5-9]</sup>。

## 2 系统研制

五轴转动超声成像检测系统主要包括机械转动扫查装置、电气控制系统、超声发射/接收系统和软件系统等。该系统以工控机作为上位机, PLC(可编程逻辑控制器)作为下位机, 上、下位机基于以太网进行通信。机械扫查装置作为动作单元, 控制转子旋转和探头移动, 控制系统利用编码器产生同步信号, 激励超声发射接收仪发射信号, 实现信号发射与运动控制同步。系统原理框图如图 2 所示。

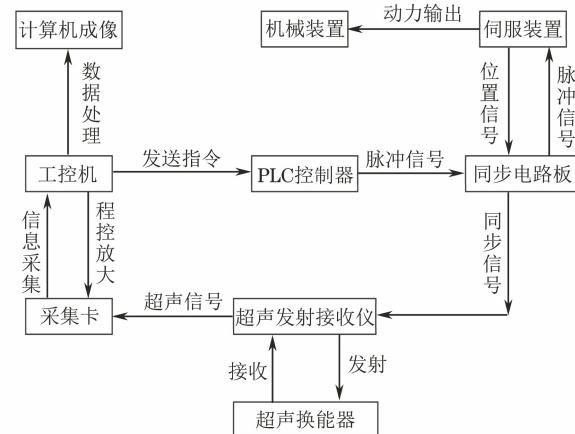


图 2 五轴转动超声成像检测系统原理框图

### 2.1 转动机械扫查装置

转动机械扫查装置组成如图 3 所示, 主要包括线性模组、扫查架、水箱、探头式夹持装置、回转工作台和激光定位装置等。

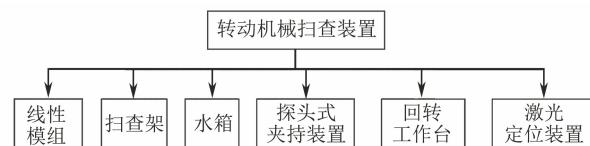


图 3 转动机械扫查装置组成

回转工作台主要替代四轴检测系统的定位板, 用于转子工件装夹并实现回转和分度定位, 是保证转子定位精度和系统定位精度的关键装置, 其主要由转动大圆盘、平面轴承、主轴、填料函架、填料函、电机及减速机等组成。回转工作台实物如图 4 所示, 转子均匀分布在回转工作台上, 通过十字形激光使工作台原点复位, 检测时被检转子的 1 号柱塞孔与检测原点重合, 避免转子位置产生偏移。

激光定位装置用于回转工作台原点定位, 其工作现场如图 5 所示, 在工作台边缘均布 4 个直径为 1 mm 的盲孔, 设备正式检测前, 激光发射器发射十字型光线对圆盘边缘的两个盲孔分别进行对中, 微调



图 4 回转工作台实物

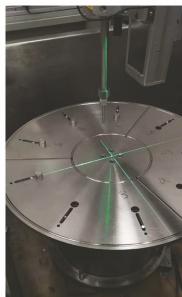


图 5 激光定位装置工作现场

回转工作台角度将回转工作台转到检测原点,从而保证转子的定位精度,使探头能够准确进入柱塞孔内。

## 2.2 电气控制系统

电气控制系统主要包括 PLC、伺服装置、防干扰装置、同步信号电路等。下位机选择三菱 FX5U 系列小型 PLC,采用自主研发的同步信号电路板控制伺服驱动器驱动电机旋转,然后将编码器信号传递给超声脉冲发射接收仪来触发超声信号的发射和采集,实现位置与超声信号同步。

防干扰措施构成如图 6 所示,包括配置特制滤波器和线缆接地。在电源进线端接入输入滤波器,抑

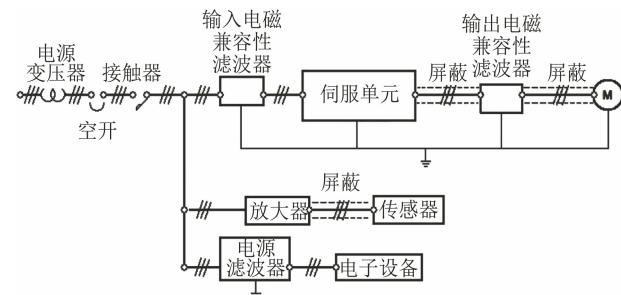


图 6 系统防干扰措施构成

制伺服单元产生高次谐波,避免了传导干扰,同时也减少对电网的污染。在伺服单元输出端接入输出滤波器,有效减少了伺服单元对超声信号传导的干扰及对外界的耦合干扰。良好的接地能抑制电气系统对超声信号的干扰和设备自身的干扰。各设备模块的地线要相互独立接地,避免了地间电位差引入的共模信号干扰。

## 2.3 超声发射/接收系统

超声发射/接收系统主要由 5077 型超声发射接收仪、指式超声换能器、信号采集卡和同步触发单元组成。同步触发信号由伺服电机编码器通过同步信号电路板产生,从而激励换能器发射超声波。反馈的超声信号带有工件缺陷信息,由 5077 型超声发射接收仪接收处理,然后发送到信号采集卡,信号采集卡对超声波进行数字处理、信号放大、滤波,使其成为上位机软件可识别的超声信号,从而在软件上进行成像。

## 2.4 系统软件及功能实现

系统软件主要包含运动控制模块、参数设置模块、成像和后处理模块、数据管理模块等,上位机软件整体架构如图 7 所示。

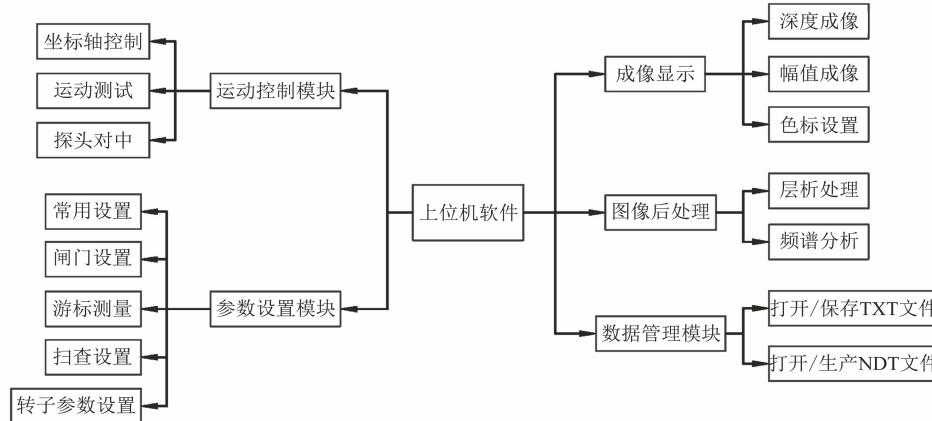


图 7 上位机软件整体架构

参数设置模块的功能包括设置不同型号转子的参数信息,包括工件外径、孔心圆直径、检测孔直径、检测孔深度等;使用时可根据检测需求设置扫查参

数,包括厚度、增益、声速、扫查步进、扫查速度等。上位机软件界面如图 8 所示。

软件的探头对中功能是将探头圆心点与柱塞孔的

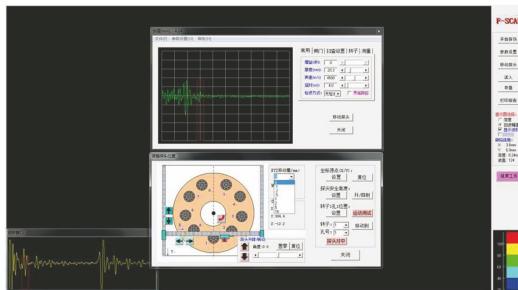


图 8 上位机软件界面

孔心点重合。即探头旋转  $360^\circ$ , 取旋转一周的数据, 计算探头正反面对应界面波的时间差, 取最大差值及对应角度, 最大差值的一半对应声程长度, 微调探头, 使探头圆心点与柱塞孔心点重合, 即可完成对中。

### 3 系统误差来源及措施

#### 3.1 系统误差分析

超声特征扫描成像系统检测转子时, 理想状态是探头旋转过程中探头杆的圆心始终与转子柱塞孔的孔心重合, 即探头与柱塞孔内表层距离始终保持一致, 时域波形图中的孔内表面反射回波不会产生移动。实际检测过程中, 系统会受到诸如转子加工误差等外在因素(见表 1)的影响, 出现系统检测误差。

表 1 检测系统误差影响因素

| 对系统检测精度影响程度 | 系统检测误差影响因素 | 设计误差/mm    |
|-------------|------------|------------|
| 较大          | 工件装夹误差     | —          |
|             | 探头装夹误差     | —          |
|             | 零件尺寸误差     | $\pm 0.1$  |
|             | 定位板加工及安装误差 | —          |
| 较小          | 转动杆尺寸加工误差  | $\pm 0.05$ |
|             | 模组定位误差     | 0.05/500   |

旋转盘自身加工了中心孔和定位孔, 不同型号转子由相匹配的定位销来定位, 通过两个定位销(分别是中心定位销和孔心定位销)将转子固定在转盘上, 中心定位销限制转子的平移自由度, 孔心定位销限制转子的转动自由度。两个销与转子孔和工作台面的孔为过渡配合, 若加工的销尺寸偏小或者销长期使用受到磨损后直径变小, 转子装夹时会产生角度偏移, 导致转子装夹误差变大。

探头转动杆的同轴度和径向跳动度会影响探头位置精度, 若转动杆外径和内孔同轴度差别较大或径向跳动度较大, 探头旋转时会产生偏移, 从而使得声波入射到工件表面的距离发生变化, 引起焦点偏移, 进而导致转子焊接层处的聚焦能量减弱, 检测灵敏度下降。

回转工作台的精度包括工作台的轴向跳动度、径向跳动度、回转精度及分度精度。回转工作台的径向跳动误差过大将直接影响回转精度和分度的精准度, 导致探头在孔内中心位置偏移过大, 可能无法连续检测 9 个转子, 甚至引起探头(下降进入孔内时)与工件的碰撞。若回转工作台的轴向跳动过大, 转子位置倾斜, 则会引发探头与转子孔内壁产生上下角度偏差的现象, 使得入射到铜层表面的波产生斜入射, 声波能量降低, 检测能力下降。

#### 3.2 解决措施

(1) 改进探头夹持装置, 重新设计探头转动杆, 取消探头线转接及探头键连接方式, 提高转动杆的强度和硬度, 减小转动杆同轴度和回转跳动度, 从而提高探头回转精度, 降低探头转动误差及装夹误差。

(2) 每次扫查前, 通过激光定位装置使回转工作台与检测原点重合, 避免回转工作台位置偏移引起检测误差。

(3) 检测过程中利用软件探头对中功能对每个被检转子的 1 号检测孔进行中心对中, 然后进行检测, 可有效消除回转工作台装配误差及转子定位误差, 提高系统检测定位精度。

### 4 试验结果及分析

#### 4.1 抗干扰性试验

为了验证系统抗干扰能力, 使用四轴平动检测系统和五轴转动检测系统对单孔缺陷试块进行成像分析。四轴平动扫描成像系统如图 9 所示, 五轴转动超声成像检测系统如图 10 所示。单孔试块结构如图 11 所示(图中  $\phi 1.2$  mm 孔底应为平面, 标号 CH-1 为表面刻字), 在试块上分别制作了直径为 1.2 mm 和 2 mm, 埋深分别为 1, 1.5, 2, 2.5 mm 的平底孔缺陷, 用于验证系统的缺陷检出能力。



图 9 四轴平动扫描成像系统

根据被检工件的结构设置检测厚度、延时、声速、电压、增益、闸门高度、扫查范围、扫查速度和扫查间距等参数。四轴检测系统的试块成像结果如图

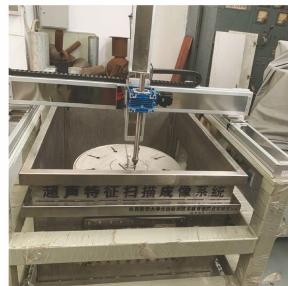


图 10 五轴转动超声成像检测系统

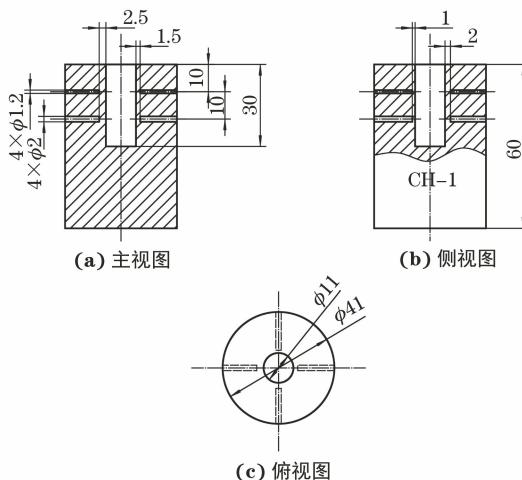


图 11 单孔试块结构示意

12 所示,四轴检测系统的增益设置为 45 dB,扫查间距为 0.5 mm,成像图中零散的点状图像是由噪声干扰信号所引起的。五轴检测系统试块成像结果如图 13 所示,其他参数与四轴系统设置相同情况下,五

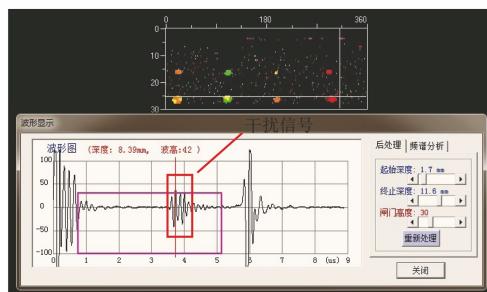


图 12 四轴检测系统的试块成像结果

轴检测系统的增益设为 40 dB,扫查间距设为 1 mm,可以看出,五轴检测系统的成像界面清晰、干净,具有更强的缺陷检出能力及抗干扰能力。

#### 4.2 验证系统定位精度

双金属转子实物如图 14 所示,该转子的检测孔直径为 13 mm,检测孔深度为 30 mm,可用于验证系统的定位精度。四轴系统检测转子时,将转子分布在  $3 \times 3$  定位板上进行操作,五轴转动系统检测转子时双金属转子均布在回转动作台上,采用特制定

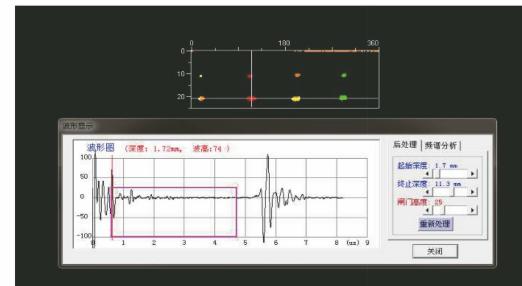


图 13 五轴检测系统的试块成像结果

位销进行定位,防止检测过程中转子发生滑动和偏移。



图 14 双金属转子实物

四轴平动扫描成像系统检测转子的时域波形如图 15 所示,设置闸门高度为 30,将闸门框选到二次界面波处,起始深度为 12 mm,终止深度为 13 mm,闸门宽度为 1 mm。其幅值成像结果如图 16 所示,图中不同的颜色用于区分在闸门范围内波形的幅值高度,零散的点状图是干扰信号引起的,红色区域表示界面波在闸门范围内,黑色区域表示界面波超出闸门范围,由图中可知界面波产生了较大的偏移。四轴检测系统界面波最大偏移位置如图 17 所示,可

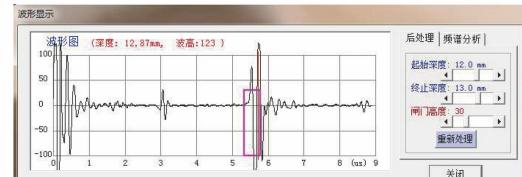


图 15 四轴检测系统成像时域波形

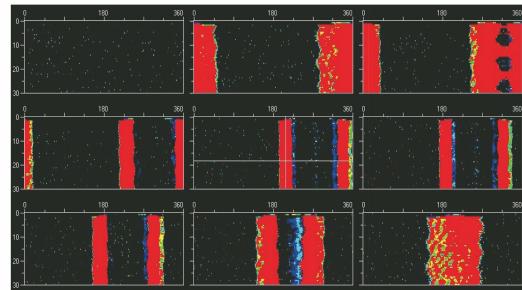


图 16 四轴检测系统幅值成像结果

计算得出界面波最大偏移量超过 6 mm, 系统检测误差超过  $\pm 3$  mm。

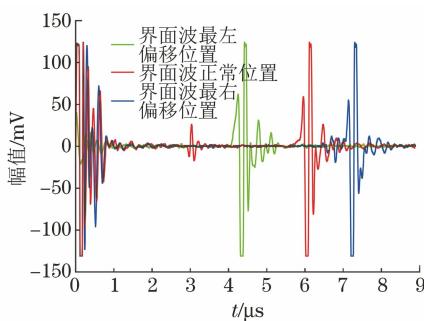


图 17 四轴检测系统界面波最大偏移位置示意

五轴转动检测系统检测转子的时域波形如图 18 所示, 设置闸门起始深度为 12.2 mm, 终止深度为 13 mm, 闸门高度为 30 mm, 所得幅值成像结果如图 19 所示, 可见成像结果全部为红色, 表明二次界面波全部在闸门范围内。五轴转动检测系统的界面波最大偏移位置如图 20 所示, 计算得出五轴转动检测系统的最大偏移量在 0.8 mm 内, 系统检测精度误差为  $\pm 0.4$  mm。

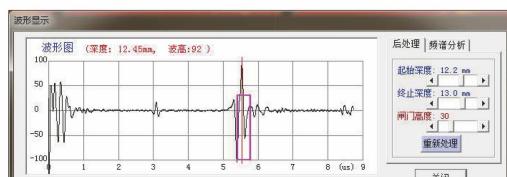


图 18 五轴检测系统成像时域波形

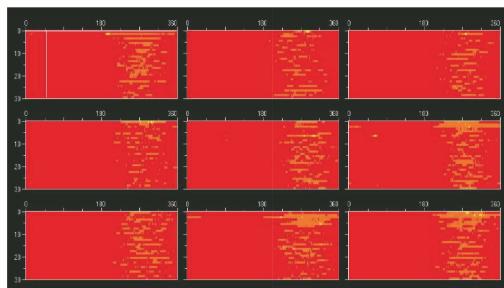


图 19 五轴检测系统幅值成像结果

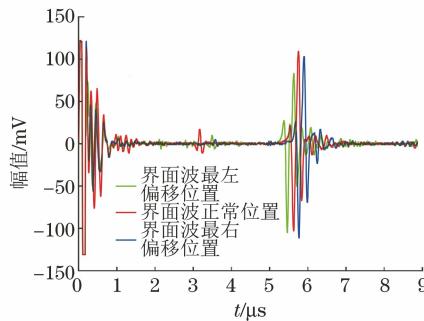


图 20 五轴检测系统界面波最大偏移位置示意

## 5 结论

(1) 在四轴平动扫描成像系统基础上, 设计回转工作台装置, 改变了转子的检测方式, 并改进电气系统的滤波方式, 研制了一套五轴转动超声成像检测系统, 提升了检测系统的定位精度及抗干扰能力。

(2) 对探头夹持装置进行了优化设计, 对转动杆进行重构, 改变转动杆的夹持方式, 从而提高了探头的转动精度。

(3) 在软件上增添探头对中功能, 检测前, 使探头中心点与被检转子的中心孔重合, 保证探头发射到铜-钢结合层处的能量一致。

(4) 分析了影响特征扫描成像系统定位精度的因素, 并提出解决措施。使用四轴平动扫描成像系统和新研制的五轴转动超声成像检测系统分别对单孔试块和双金属转子进行检测。结果表明, 四轴平动扫描成像系统的综合检测误差为  $\pm 3$  mm, 五轴超声成像检测系统的综合检测误差为  $\pm 0.4$  mm, 五轴转动超声成像检测系统的检测定位精度更高, 抗干扰能力更强, 可以实现转子的连续稳定检测, 满足使用和生产需求。

## 参考文献:

- [1] 张锐, 陈以方, 付德永. 复合材料手动扫描超声特征成像检测[J]. 材料工程, 2003, 31(4): 34-38.
- [2] 刘新, 陆铭慧, 陈以方, 等. 双金属转子复合层超声特征成像系统[J]. 无损检测, 2007, 29(6): 309-311, 318.
- [3] 罗雪峰. 多转子连续扫描超声特征成像系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [4] 郭夏阳, 林建平, 孙博. 扩散焊技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(17): 15-20.
- [5] 梁永宽, 张智. 高速轴向柱塞泵搅拌和摩擦功率损失及空化分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [6] 王飞, 田玉清. 铜合金-钢双金属柱塞液压泵转子材料的研制[J]. 粉末冶金工业, 2013, 23(3): 56-60.
- [7] 刘少杰, 张国伟, 王明杰. 铜/钢双金属泵体转子界面结合技术研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 73-77.
- [8] 陆铭慧, 朱毅, 刘勋丰. 结构特殊航空构件的超声特征扫描成像检测[C]//西南地区第十一次无损检测学术年会暨 2011 年(昆明)国际无损检测仪器展览会论文集. 昆明: 国际无损检测仪器展览会, 2011.
- [9] CEPEDA-JIMÉNEZ C M, CARREÑO F, RUANOO A, et al. Influence of interfacial defects on the impact toughness of solid state diffusion bonded Ti-6Al-4 V alloy based multilayer composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 563: 28-35.