

基于 Harris—SUSAN 算法的发动机叶片 裂纹检测系统设计

王晓惠, 冯彩英, 徐忠根

(商丘工学院 信息与电子工程学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 目前设计的发动机叶片裂纹检测系统存在裂纹感应电压能力差的问题, 导致缺陷信号峰值检测结果误差较大, 为此提出基于 Harris—SUSAN 算法设计一种新的发动机叶片裂纹检测系统; 利用传感器中高灵敏度的二轴霍尼韦尔各向异性磁阻 (AMR) 元件, 分析水平与垂直方向范围内的磁场分布与变化情况, 设计传感器, 选择旋转电磁激励台实现激励台的旋转磁化; 引用 Harris—SUSAN 算法设定检测程序, 计算兴趣值确定最优点, 比较磁场强度, 检测发动机叶片裂纹; 实验结果表明, 基于 Harris—SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统的电压波动范围较大, 为 195 mV, 波动范围更大, 精测精度平均值为 98.6%, 能够有效提高裂纹感应电压能力, 增强缺陷信号峰值检测结果检测准确率。

关键词: Harris—SUSAN 算法; 发动机; 叶片裂纹; 检测系统

Design of Engine Blade Crack Detection System Based on Harris—SUSAN Algorithm

Wang Xiaohui, Feng Caiying, Xu Zhonggen

(School of Information and Electronic Engineering, Shangqiu Institute of Technology, Shangqiu 476000, China)

Abstract: At present, there is a problem that the ability of crack induced voltage is poor in the design of engine blade crack detection system, which leads to large error of defect signal peak detection results. Therefore, a new engine blade crack detection system based on Harris SUSAN algorithm is proposed. In this paper, the high sensitive two-axis Honeywell anisotropic magnetoresistance (AMR) element is used to analyze the distribution and variation of magnetic field in the horizontal and vertical directions. The sensor is designed and the rotating electromagnetic excitation platform is selected to realize the rotating magnetization of the excitation platform. The Harris SUSAN algorithm is used to set up the detection program, calculate the value of interest to determine the best advantage, and compare the magnetic field strength to detect the engine blade crack. The experimental results show that the voltage fluctuation range of the engine blade crack detection system based on Harris SUSAN algorithm is 195 mV, the fluctuation range is larger, and the average precision is 98.6%, which can effectively improve the ability of crack induced voltage and enhance the detection accuracy of defect signal peak detection results.

Keywords: Harris—SUSAN algorithm; engine; blade crack; detection system

0 引言

目前我国工业制造业快速发展, 各行业生产已逐步实现机械化操作。在机械设备中, 发动机是十分重要的一个组成部分, 发动机决定着机械设备的启动工作, 其质量也直接关系到机器的整体性能^[1-2]。发动机的组成结构较为复杂, 其中, 叶片是发动机必不可少的组成部分, 叶片的质量决定着发动机运行的安全程度, 进而影响到发动机的使用寿命。由于叶片长期处于飞速旋转的高温高压状态, 且工作时间长, 产生的热量难以消散, 叶片很容易产生疲劳裂纹, 这些裂纹将会对发动机的安全运行造成潜在威胁, 一旦在工作过程中发生叶片脱落飞出, 将会造成机械设备或电路的损坏甚至对工作人员造成人身伤害^[3-4]。因此, 对

发动机叶片进行详细具体的定期检测非常重要, 我国目前也十分重视在发动机叶片裂纹检测方面的研究。

对发动机叶片裂纹的检测方法一般有两种: 破坏性检测和非破坏性检测。破坏性检测需要将发动机的故障叶片拆解下来, 在实验室进行精细的实体检测; 非破坏性检测则不需要毁坏发动机的设备结构, 通过观察记录发动机运行时叶片产生的声音、杂质、热量、电力消耗等情况, 利用实验对其进行磁场、温度、噪声等干扰, 记录叶片不同情况产生的异常数据, 对比研究对叶片裂纹情况进行分析检测。而这两种方法都具有一定程度的缺陷, 破坏性检测容易造成发动机叶片的直接损毁, 而非破坏性检测会因为数据误差或分析方向错误使安全隐患没有解决, 进而造成日后的故障事故^[5-6]。

基于对传统检测方法的研究, 本文设计了一种基于 Harris—SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统, 将叶片检测技术与 Harris—SUSAN 算法的定位技术和兴趣区域池

收稿日期: 2020-10-23; 修回日期: 2020-11-03。

作者简介: 王晓惠(1988-), 女, 河南许昌人, 硕士, 讲师, 主要从事电子信息工程、信号处理、电路与系统方向的研究。

化的操作技能相结合，使检测精准性能够达到超过网络操作准确度的一个高水平。

1 基于 Harris—SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统硬件设计

发动机叶片裂纹一般呈细长状分布，因此本文选用了 Harris—SUSAN 算法中的 anchor 算法，并根据发动机叶片检测的特征进行了相应调整，提高了检测程序的精确度和适配度^[7-8]。通过利用 Harris 算法的角点检测技术对发动机叶片裂纹部分进行全方位的多点动态追踪，最后匹配成一幅较为完整详细的裂纹分布状况图，有利于检测更准确顺利地检测。同时还增加了对发动机叶片的声像同步的检测，大大提高了检测的精准性。Harris 算法的应用在提高检测准确度的同时，也对检测系统的硬件设备载体性能提出了较高要求^[9-10]。为此，本文也针对检测系统的硬件装置进行了加强优化设计。硬件整体结构如图 1 所示。

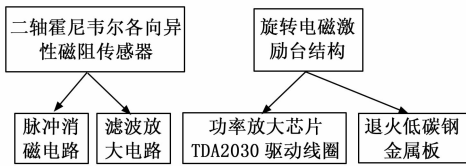


图 1 系统整体结构图

如图 1 所示，系统硬件结构分为传感器及旋转电磁激励台结构两部分，其中，通过脉冲消磁电路产生方波、整形，通过滤波放大电路实现传感器电压信号的检测；通过退火低碳钢作为旋转激励台的线圈铁芯，通过功率放大芯片 TDA2030 实现激励台的旋转磁化。

1.1 传感器设计

在检测系统中，主要负责信息接收和传输的重要部件是传感器。发动机叶片进行检测时，传感器受到电磁波激励进行图像声音等检测信号的接收，并向系统的控制装置传输接收到的信号信息。为了满足检测信息的精准全面，可适当增加电磁波线圈激励装置，提高检测装置的工作能量支持，以便叶片表面裂纹的细小部分也能够清晰地检测到。同时也减少了不必要的部分占据传感器空间，在一定程度上简化了传感器的硬件设备组成，提高了信息检测性能的同时有利于传感器装置的小型化设计。

由于对发动机叶片裂纹进行检测之前，裂纹分布情况处于未知状态，该系统的传感器还设计了三维空间磁场检测装置，在传感器装置外部增加三维方向的空间磁场感应器。通过利用传感器中高灵敏度的二轴霍尼韦尔各向异性磁阻 (AMR) 元件，确定水平与垂直方向范围内的磁场分布与变化情况，获取检测对象三维方向的空间磁场信息，便可以对叶片裂纹的分布情况有大致地了解^[11-12]。

二轴霍尼韦尔各向异性磁阻传感器元件是按照四元惠斯通电桥进行的配置，能够将磁场强度转化为传感器承受范围内的电压，并分次序进行电压输出。而且它的灵敏度

很高能够检测并转换低于 30 μ Gauss 的磁场^[13]。传感器磁阻 HMC 1022 的封装/引脚如图 2 所示。

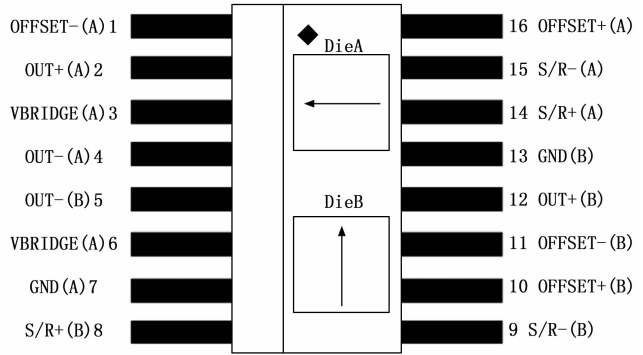


图 2 HMC 1022 的封装/引脚

对于传感器磁阻 HMC1022 的一些主要技术参数，线性误差为 0.5%，滞后误差为 0.07%；灵敏度可达到 1 mV/Gauss；分辨力一般为 85 μ Gauss。由此可见该传感器磁阻的性能之高，极大地增强了传感器装置的续航持久力和装置结构的小型化、便捷化程度^[14]。

为了消除外界磁场对磁阻元件磁场信号的采集，本文还为二轴霍尼韦尔各向异性磁阻元件设置了脉冲消磁电路，实现了磁阻磁场信号的完整获取，而且对磁阻的灵敏度和其他方面性能没有影响。脉冲消磁电路主要负责产生方波、整形、消磁等主要工作，通过 NE555 芯片产生部分方波，然后方波会经过 SN74CH04CN 芯片的组成电路并完成整形环节，之后开启大功率三极管增大电路电流进行放大，最后通过 IRF7106 效应管进行消磁，经过这些步骤之后，便能够得到脉冲消磁电路。

脉冲消磁电路如图 3 所示。

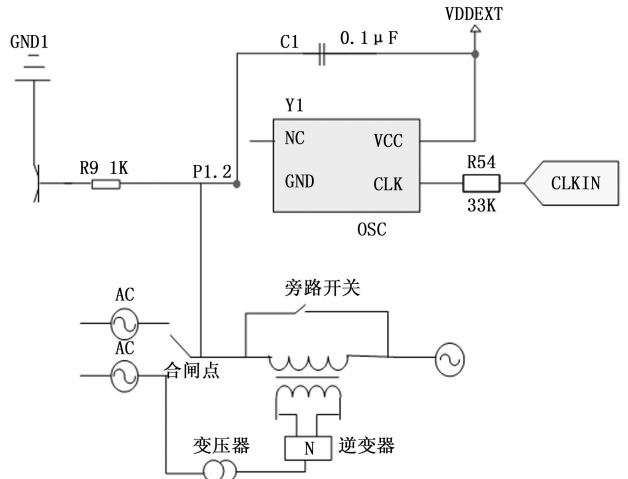


图 3 脉冲消磁电路

二轴霍尼韦尔各向异性磁阻元件在处理磁场信号过程中的电路还需采用 AD620 放大器和 UA740 运算放大器，磁阻在对磁场信号进行转化拆分时，需要放大信号才能具体

地进行分解。信号拆分首先要经过 AD620 放大器进行第一次放大, 然后进行无源滤波, 之后采用 UA740 运算放大器进行两次连续滤波放大, 即可得到应用到检测传感器的电压信号。

滤波放大电路如图 4 所示。

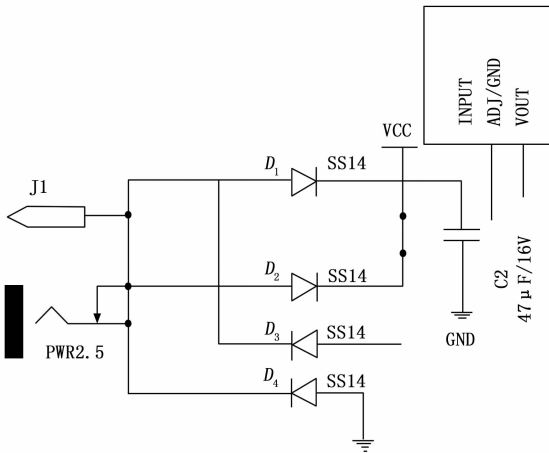


图 4 滤波放大电路

由于线圈感应电流的能力较为微弱, 为了增强电流感应能力, 可在传感器电路线圈中加入磁芯, 使原本的线圈能够直接与二轴霍尼韦尔各向异性磁阻元件联系在一起, 组成集合形式的检测探头。这种结果设计不仅节省了电流转换时间和传感器电阻装置的空间占用比例, 而且减少了电流不必要的浪费, 有利于传感器结构的完整性和适应性^[15]。

1.2 旋转电磁激励台结构设计

由于传感器检测装置需要电磁激励台对检测工作提供能量支持, 本文基于对传统的电磁激励装置组成原理的研究, 设置了旋转电磁激励台装置。该装置根据线圈通电产生磁场的原理进行优化, 增加了非破坏性检测的外部激励装置, 同时还增加了对检测系统内部空间的磁场转换功能。优化后的电磁激励装置能够根据磁场的分布和变化情况、方向、强度等方面对检测装置内部进行固定方向的磁场转化。由于激励台线圈与磁阻元件进行了直接连接, 使检测系统中的磁场能够形成一个近乎均匀的磁场分布状态。旋转激励台线路内部铁芯的选择也有较高的要求, 由于检测工作一般在低频状态下实现, 铁氧体一般应用于高频状态, 在低频情况下导致磁场传导效率降低, 因此应选用适用于低频环境的退火低碳钢来作为旋转激励台的线圈铁芯。

发动机的叶片一般为曲面不规则形状, 还有叶尖、榫头等不规则形状的零件, 这使其无法很好地固定在监测装置的激励台上, 因此, 本文在激励台上增加了固定装置结构。根据磁阻元件所处的低频环境, 选取了退火低碳钢金属板, 以保证磁阻传导的正常进行。夹板形状需根据发动机叶片的形状和弧度进行打磨, 形成一个能够与叶片曲面完整贴合的固定夹板, 夹板周围选用高强度的螺丝进行固

定, 以增强固定装置的可靠性。

激励台驱动的外部驱动电路需要采用推挽形式的功率放大芯片 TDA2030 驱动线圈来实现激励台的旋转磁化。

2 基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统软件设计

设计发动机叶片裂纹检测系统软件部分, 首先基于 Harris-SUSAN 算法对裂纹进行提取, 通过损失函数对发动机叶片上方金属磁场分解, 提取金属板出现裂纹时所引起的扰动磁场, 通过三维涡流法分析磁场强度, 带入损失函数判断发动机是否存在裂纹, 实现发动机叶片裂纹检测系统软件设计。

2.1 基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹提取

发动机的叶片构成十分复杂, 当叶片上出现微小的裂纹时, 传统的方法很难检测到, Harris 算子是一种点特征提取算子, 能够简化计算步骤, 在计算过程中仅仅需要应用灰度一阶查分滤波。通过 Harris 算子提取的点特征十分均匀, 通过计算兴趣值确定最优点, 计算时只需要应用一阶导数, 就可以得到稳定的特征提取算子。综上所述, 本文应用 Harris-SUSAN 算法设计发动机叶片裂纹检测系统软件。

设定目标物利用 Harris-SUSAN 算法建立损失函数:

$$L(\{p_i\}, \{t_i\}) = \frac{1}{N_{ds}} \sum_i L_{ds}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i L_{res}(t_i, t_i) \quad (1)$$

其中: i 表示训练集中的索引, p_i 表示目标物概率。

将发动机叶片上方的叶片金属磁场设定为 H , 对金属磁场进行分解, 按照磁场类型分解成三部分, 分解表达式为:

$$\bar{H}(x, y, z) = \bar{H}_m(x, y, z) + \bar{H}_{pm}(x, y, z) + \bar{H}_{p,c}(x, y, z) \quad z > 0 \quad (2)$$

其中: $\bar{H}_m(x, y, z)$ 表示叶片线圈在不受到金属干扰时的激励磁场; $\bar{H}_{pm}(x, y, z)$ 表示引入的金属板无缺陷时, 线圈的扰动磁场; $\bar{H}_{p,c}(x, y, z)$ 表示当金属板出现长裂纹时所引起的扰动磁场。

引入 ANSOFT 电磁场有限元分析软件, 通过离散化处理求解区域获得不同的单元, 利用数学计算法将模型的边值问题转化成泛函求极值问题。相比较于场量, 位函数更容易建立边界条件, 因此需要根据磁力线分布确定磁通, 确定函数后, 加入边界定解条件, 从而获得求解值。

2.2 发动机叶片裂纹检测系统软件设计

基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统软件工作流程如图 5 所示。

应用三维涡流法对磁场强度进行重新描述, 计算公式为:

$$H = H_p + \nabla \cdot \varphi \quad (3)$$

$$H = H_p + \nabla \cdot \varphi + T \quad (4)$$

其中: φ 表示标定磁位; H_p 表示金属叶片上不同边的磁

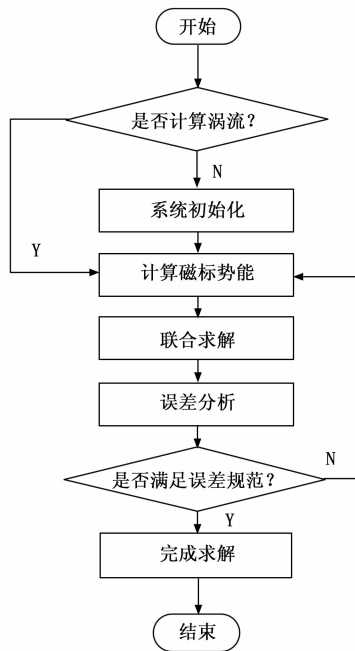


图 5 发动机叶片裂纹检测系统软件工作流程

场强度； T 表示对应的金属边的矢量电位。分析叶片的导电区域和非导电区域，将交界面的矢量电位切分，获得电位 T 的切向分量。在确定磁场强度 H 后，将公式 (1) 的损失函数带入，获得表达式为：

$$H(x, y, z) = H - L(\{p_i\}, \{t_i\}) \quad (5)$$

其中： $H(x, y, z)$ 表示被测定的金属磁场。将 $H(x, y, z)$ 的测定值与公式 (2) 中的 $\bar{H}(x, y, z)$ 进行对比，如果 $H(x, y, z) \geq \bar{H}(x, y, z)$ ，则证明发动机叶片存在裂纹；如果 $H(x, y, z) < \bar{H}(x, y, z)$ ，则证明发动机不存在裂纹。

裂纹判断流程如图 6 所示。

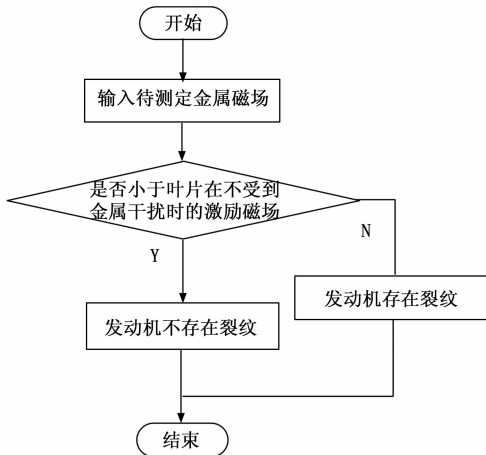


图 6 发动机叶片裂纹检测系统软件工作流程

3 实验结果与分析

3.1 实验步骤

为检测本文研究的基于 Harris-SUSAN 算法的发动机

叶片裂纹检测系统工作效果，开展实验。分别与传统的基于图像识别的发动机叶片裂纹检测系统、基于 ACFM 原理的发动机叶片裂纹检测系统进行实验对比。

实验采用发动机叶片型号为 NOVAScope6000，由于发动机的叶片表面是曲面，在不同位置存在的曲率不同，很难进行三维建模和划分网格，因此本文引入正弦函数曲线获得磁纹密度，对叶片的裂纹进行简化，简化结果如图 7 所示。

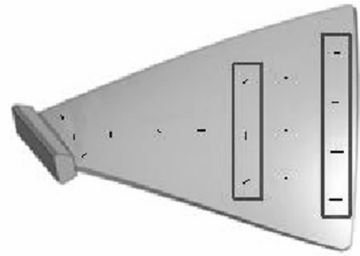


图 7 发动机叶片裂纹相应位置

发动机叶片裂纹会在金属板上产生涡电流，不同的裂纹左右两侧的磁场都不同，因此会出现差分电压。分别选用传统系统和本文系统同时对发动机叶片进行感应，得到发动机叶片裂纹检测系统感应电压波形图，判断检测系统的灵敏度；在此基础上检测裂纹波动幅值，得到监测系统的准确性。

3.2 实验结果

采用不同方法得到的感应电压波形图如图 8~10 所示。

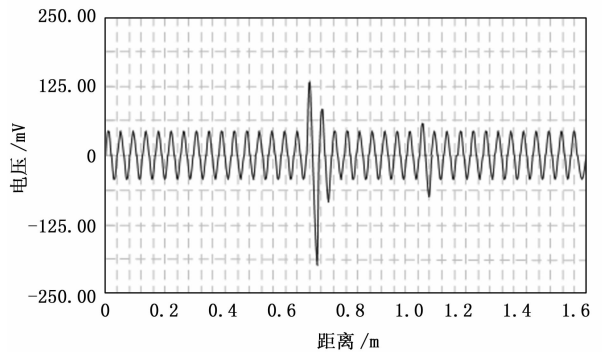


图 8 基于图像识别的发动机叶片裂纹检测系统感应电压波形图

裂纹的感应电压随着裂纹的深度、长度不同而出现改变，当长度相同时，裂纹越深，感应电压波动越大；当深度相同时，裂纹越长，感应电压波动越大。对比上述实验结果，在一定范围内，传统系统与本文系统都会随着裂纹深度和长度的增加而出现一定的电压波动，但是波动范围不同，本文提出的系统波动范围更大，波动效果更明显，更容易获得检测结果。

在确定感应电压波动结果后，选取三种系统分别对不同高度的裂纹波动幅值进行检测，检测结果如表 1 所示。

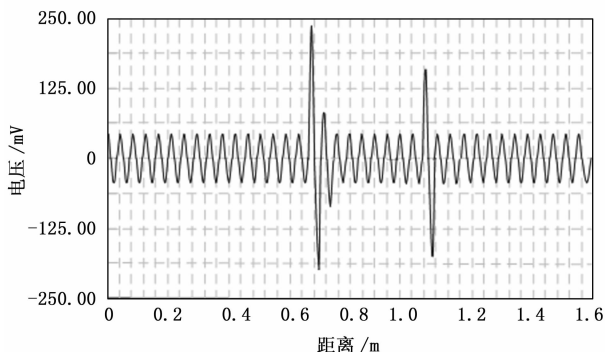


图 9 基于 ACFM 原理的发动机叶片裂纹检测系统感应电压波形图

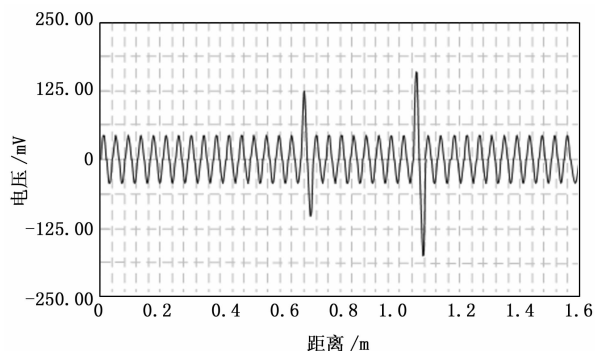


图 10 基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统感应电压波形图

表 1 缺陷信号峰值检测结果

检测数值	裂纹深度/mm		
	≤0.4	0.4~0.8	0.8~2.4
实际值/mV	18 000	25 000	60 000
基于图像识别的发动机叶片裂纹检测系统检测数值/mV	17 800	22 000	18 200
基于 ACFM 原理的发动机叶片裂纹检测系统检测数值/mV	17 900	21 000	30 200
基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检测系统检测数值/mV	17 900	24 500	59 000

由表 1 可知, 当裂纹深度在 0.00~0.40 mm 之间, 裂纹受到的外界干扰较小, 三种系统的检测准确率都相对较高, 但是随着裂纹深度增加到 0.80 mm 时, 传统系统的检测效果开始降低, 本文系统的检测结果仍然十分准确, 当裂纹深度增加到 2.4 mm 时, 叶片内部裂纹的磁通量很大, 检测效果十分不明显, 传统系统已经无法检测到裂纹, 而本文系统仍然能够确定裂纹。根据上述实验结果可以看出, 本文研究的基于 Harris-SUSAN 算法的发动机叶片裂纹检

测系统在检测灵敏度和准确度上都高于传统系统。

4 结束语

本文主要介绍了基于 Harris-SUSAN 算法发动机叶片裂纹检测系统, 对传感器和激励台进行了改造设计, 使检测装置的准确度得到很大提高, 而且减少了能量消耗; 旋转激励台不仅能够产生旋转磁场, 而且保留了传统方法中的单向磁场激励功能。通过实验也证明了这种叶片裂纹检测系统对发动机叶片裂纹的检测有很好的鲁棒性。本文设计的基于 Harris-SUSAN 算法发动机叶片裂纹检测系统不仅提高了发动机叶片裂纹检测的精准性和完整性, 而且对于叶片故障检测领域的研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 胡世创, 魏莹玉, 周唯逸, 等. 基于图像处理的风电叶片裂纹检测系统设计 [J]. 可再生能源, 2018, 36 (8): 129-135.
- [2] 宋凯, 王冲, 张丽攀, 等. 航空发动机涡轮叶片裂纹的自动仿形涡流检测系统设计及试验研究 [J]. 航空制造技术, 2018, 61 (19): 45-49.
- [3] 陈棣湘, 潘孟春, 田武刚, 等. 基于柔性电磁传感器的发动机叶片微缺陷检测 [J]. 中国测试, 2018, 44 (1): 65-68.
- [4] 韩宁, 张志杰, 尹武良, 等. 基于涡流传感的金属表面缺陷检测方法研究 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (5): 66-72.
- [5] 陆晓华, 左洪福, 孙见忠. 基于检查数据和物理退化模型的涡轮叶片检修策略优化 [J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50 (5): 107-114.
- [6] 吴琪强, 郭帅平, 王钢, 等. 基于固有频率的风力机叶片裂纹精确定位与程度识别 [J]. 振动与冲击, 2019, 38 (24): 18-27.
- [7] 梅迪, 苏中, 刘洪. 基于 Harris-Hough 算法的芯片初始测试点对准方法 [J]. 中国测试, 2018, 44 (9): 129-133.
- [8] 耿晓锋, 魏克湘, 王琼, 等. 基于多频简谐波调制的风力机叶片裂纹检测研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (22): 206-210.
- [9] 章宏标, 闫志祥, 闫庆安, 等. 航空发动机压气机整流导向叶片裂纹故障分析 [J]. 航空精密制造技术, 2019, 55 (1): 36-40.
- [10] 孙红, 李晶. 融合 Harris 角点检测算法的肺实质分割方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40 (4): 818-822.
- [11] 马建徽, 杨光, 刘勇. 航空发动机涡轮叶片的内窥镜荧光渗透原位检测 [J]. 无损检测, 2020, 42 (6): 50-53.
- [12] 何明灿, 朱永凯, 唐语. 材料微观裂纹的光学低相干检测技术 [J]. 无损检测, 2019, 41 (7): 30-33.
- [13] 卜嘉利, 高志坤, 佟文伟, 等. 某型风扇转子叶片裂纹失效分析 [J]. 航空发动机, 2019, 45 (1): 16-20.
- [14] 蔡航, 孙靖, 张正旭. 黏液型铜绿假单胞菌的毒力基因、产金属酶检测与耐药性探索 [J]. 养生保健指南, 2018 (9): 244.
- [15] 郑涛, 郝行猛, 陈梅. 基于特征匹配预估的 Mean Shift 运动检测与跟踪 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37 (7): 135-137.