

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*

宋凯¹,王冲¹,张丽攀¹,王婵²,李轶名¹,赵志忠¹

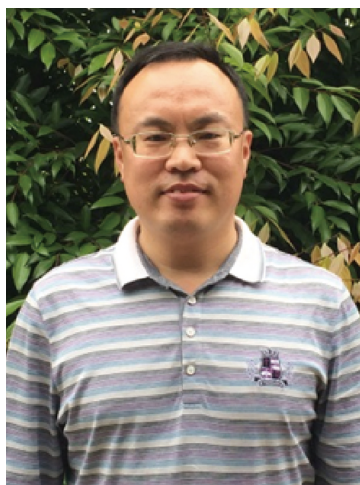
(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063;

2. 西安航空动力股份有限公司,西安 710021)

[摘要] 针对航空发动机涡轮叶片的快速检测难题,研制了机械自补偿差动式涡流探头,开发了专用五轴联动自动仿形扫查系统,开展了涡轮叶片自动涡流检测试验研究。试验结果表明,使用研制的探头配合自动扫查系统可以消除提离信号,减小抖动干扰,显著提高裂纹缺陷的检测信噪比,可望应用于涡轮叶片类复杂曲面构件的缺陷检测。

关键词: 涡轮叶片;涡流检测;裂纹;自动检测;仿形扫查

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.045



宋凯

教授,主要研究方向为电磁无损检测仪器与装备、电磁无损检测新技术、测控技术与系统、检测信号处理与识别。研制的航空发动机叶片涡流自动探伤线已应用于实践。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51865033); 航空科学基金(GA201708257); 重点实验室开放基金(EW201708252)。

涡轮叶片是航空发动机的重要部件之一,其可靠性直接影响到发动机的使用寿命、飞机的飞行安全以及经济效益^[1]。涡轮叶片在高温、高压和高转速的复杂工况下运转,容易产生疲劳裂纹,从而引发飞行事故^[2-5]。研究涡轮叶片裂纹的快速高效检测方法,及时发现并预防危害性故障对于确保飞行安全具有非常重要的意义。目前涡轮叶片主要采用渗透技术进行检测,在检测前需要去除热障涂层,检测效率低,成本高。涡流检测(Eddy Current Testing, ECT)^[6-8]能够有效检测出非铁磁性构件中的表面和近表面缺陷,具有无需耦合剂、检测成本低和对环境污染小等优点,可以实现对航空发动机涡轮叶片构件裂纹缺陷的自动快速检测,提高检测效率。

近年来,国内外很多学者在涡轮

叶片的涡流检测方面进行深入研究,付刚强、郑勇^[9]设计了发动机二级涡轮叶片探伤专用探头,并通过人工扫查可检出涡轮叶片排气边缘的微裂纹,但利用人工扫查的方式稳定性和效率较低。2014年沈阳黎明航空发动机公司赵秀梅等^[10]采用专用阵列涡流检测探头和特殊工装解决了高压涡轮叶片原位检测难题,但其探头仍存在一定的检测盲区。张卫民等^[11]研制了差激励式涡流探头并利用了数控扫查台实现了对叶片类零件表面微裂纹位置的判定,但仍然未解决涡轮叶片高效检测难题。尽管学者们在涡轮叶片检测方面开展了大量的研究工作,然而对涡轮叶片如何进行快速批量检测仍是一个难题^[12-16],主要存在检测信号信噪比低、检测效率低、检测成本高、难以实现自动批量检测等方面的问题。

本文以航空发动机涡轮叶片裂纹缺陷检测为研究对象,研制了适用于涡轮叶片的小尺寸高灵敏机械自补偿差动式涡流探头,配合开发的五轴联动自动仿形扫查系统对涡轮叶片裂纹缺陷实施高效检测,研究了涡轮叶片手动扫查和自动化扫查的涡流检测信号特征,验证了涡轮叶片裂纹缺陷自动化涡流检测系统的实用性。

仿形扫查涡流检测系统开发

1 仿形扫查涡流检测系统结构

仿形扫查涡流检测系统结构示意图如图1所示,主要包括自动仿形扫查系统、叶片专用涡流检测探头和涡流仪构成,实施检测时,自动仿形扫查系统运行载有叶片扫查路径、扫查方向和扫查范围等信息的G代码,使涡流探头在涡轮叶片表面上展开仿形扫查,采集缺陷涡流检测信号并传输至涡流仪中进行调理和显示。

2 涡流检测探头

差动式涡流检测探头利用差动线圈对相同信号进行抵消、差异信号进行叠加的原理,能够有效抑制温度变化、提离效应等共模干扰信号。由于叶片属于复杂曲面构件,在自动检测过程中,表面状态、提离距离等干扰因素不可避免,采用差动式探头能够有效抑制干扰、增强灵敏度和提高信噪比,有利于涡轮叶片微裂纹的检测。研制了一种尺寸小、灵敏度高的机械自补偿差动式涡流探头,其前端壳体直径为4mm。

接收线圈磁芯直径为1mm的圆柱体铁氧体,线圈线径为0.05mm,匝数为100匝。激励线圈的线径为0.1mm,匝数为50匝,绕制在检测线圈外侧,如图2所示。

涡流探头自动扫查过程中易与叶片碰撞而造成损坏,为保护探头并减小探头提离距离,设计加工了探头机械自补偿装置,装置设计图如图3所示,该装置主要由压缩弹簧、外部壳体 and 探头端部限位装置组成,弹簧尺寸为内径4.5mm,线径0.2mm,长度23mm,主要给探头提供向下压力,保证探头和叶片紧贴并有效保护探头,其中装置中部的自补偿限制部位通过螺丝和探头相连,限制机械自补偿的范围为4mm;间隙配合部件与探头端部相互嵌合,使探头在扫查和机械自补偿过程中保持稳定的运动状态,探头在因曲率变化受力不均的情况下仍与叶片接触点保持垂直,机械自补偿涡流探头装配效果图如图4所示。

3 自动化仿形扫查系统

自动化仿形扫查系统结构图如图5所示,实物图如图6所示。系统采用单回转台和单摆头的结构设计,主要运动轴为:探头的上下A轴和摆头运动B轴,回转台的X和Y轴运动及叶片的Z轴转动。控制系统采用五轴运动专用控制系统,搭配PM95A通信卡完成开关、引导手轮、软件通信等多方面的功能。运动轴电机均采用伺服电机,速度可以达到50mm/s,定位精度可达到 $\pm 2'$,重复

定位精度可达到 $\pm 1'$ 。摆头是保证探头垂直于叶片的关键结构,在运动过程中需要保证探头垂直于叶片表面,因此要求具有较高的精度和稳定性。检测系统在摆头的设计上应用了减速器降低伺服电机转速,使探头在叶片扫查过程中平稳流畅。

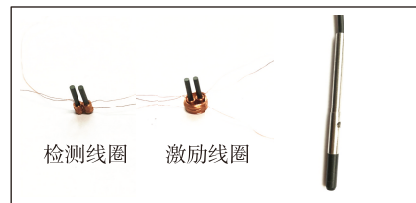


图2 差动式探头及内部线圈结构
Fig.2 Differential probe and internal coils

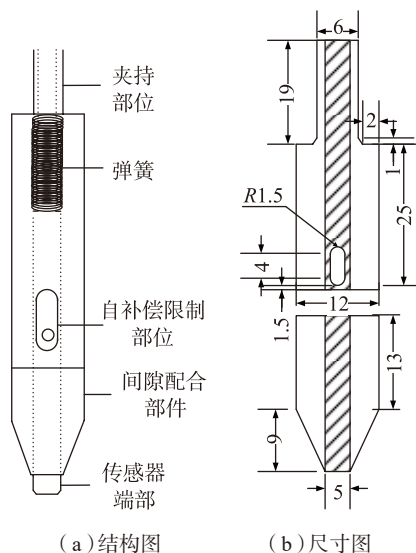


图3 机械自补偿装置设计图
Fig.3 Mechanical self-compensation device sign

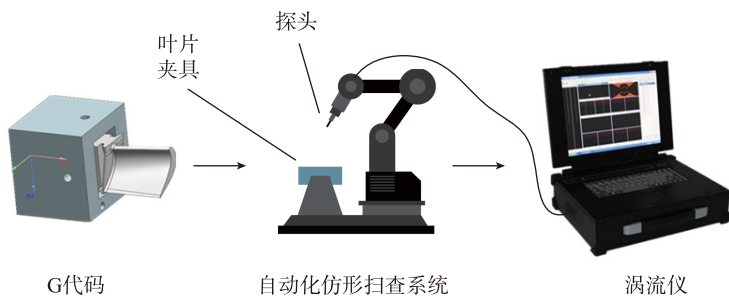


图1 仿形扫查涡流检测系统结构示意图
Fig.1 Structure of profile scanning eddy current testing system



图4 机械自补偿涡流探头装配效果图
Fig.4 Eddy current probe of mechanical self-compensation

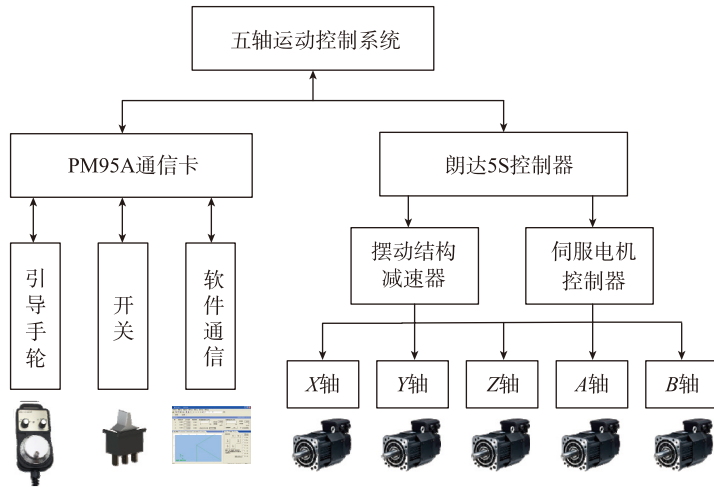


图5 自动仿形扫查系统结构图
Fig.5 Auto-profile scanning system structure

自动仿形扫查系统运行流程图如图7所示,将涡流探头和涡轮叶片通过夹具安装在扫查机床上,系统机械复位后载入由UG生成的载有扫查路径、扫查方向、扫查范围等涡轮叶片信息的G代码,使用手轮手动控制使探头对涡轮叶片做预定路径的仿形扫查,确认正常后调整速度开启自动仿形扫查模式,同时涡流检测系统接收涡流探头的扫查信号,保存结果后对缺陷信号进行特征提取、分析和评判。涡轮叶片涡流自动仿形

扫查系统通过编程能够保证涡流探头有效地垂直贴合于叶片,消除了叶片曲率变化产生的影响,在扫查过程中减小了抖动信号,有利于提高信噪比,同时自动仿形扫查方式也能大幅提高检测效率。

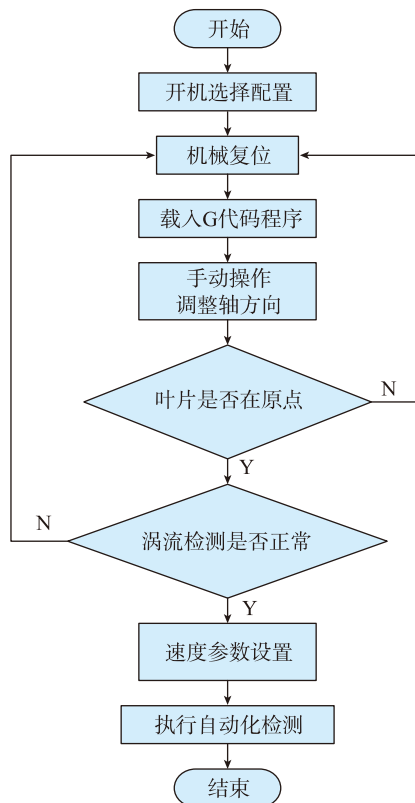


图7 自动化仿形扫查系统运行流程图
Fig.7 Operation flow chart of auto-profile scanning system



图6 自动仿形扫查系统实物图
Fig.6 Auto-profile scanning system photo

航空发动机涡轮叶片裂纹的涡流检测试验研究

涡轮叶片试件材质为GH4169镍基高温合金,在叶盆和叶背边缘及曲率变化较大的区域预制横向和纵向裂纹,其长×宽×深均为5mm×0.13mm×0.2mm,如图8所示。其中2~5#缺陷为横向裂纹,2#缺陷位于曲率较大处,3~5#缺陷则位于叶片边缘,1#和6#缺陷为纵向裂纹,位于曲率较大区域。

采用人工手动扫查的方式对涡轮叶片缺陷进行检测,激励频率为500kHz,增益为30dB,扫查方向为叶根向榫头方向来回扫查,检测结果如图9所示。由图9可以看出裂纹走向对手动检测结果影响较大,其中1#和6#纵向裂纹可以检出,信噪比也较高,但检测横向裂纹时存在较大干扰噪声,导致无法有效判别缺陷信号。

研制专用夹持工装固定涡流检测探头和涡轮叶片,按照图7所示的运行流程进行检测,参数与手动扫查方式保持一致,检测结果如图10所示。由图10可以看出,1#和6#缺陷的涡流检测信号具有较高的信噪比,而2~5#横向裂纹缺陷也能被检

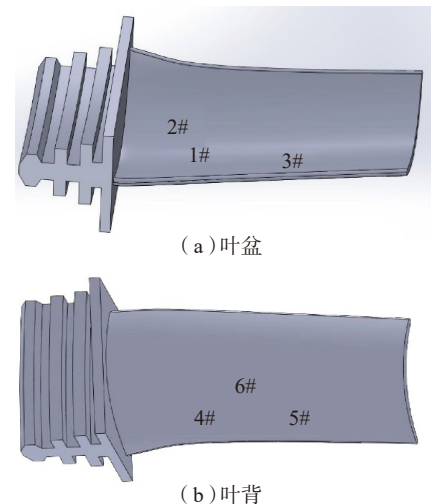


图8 涡轮叶片缺陷分布示意图
Fig.8 Distribution of defects lying in turbine blade

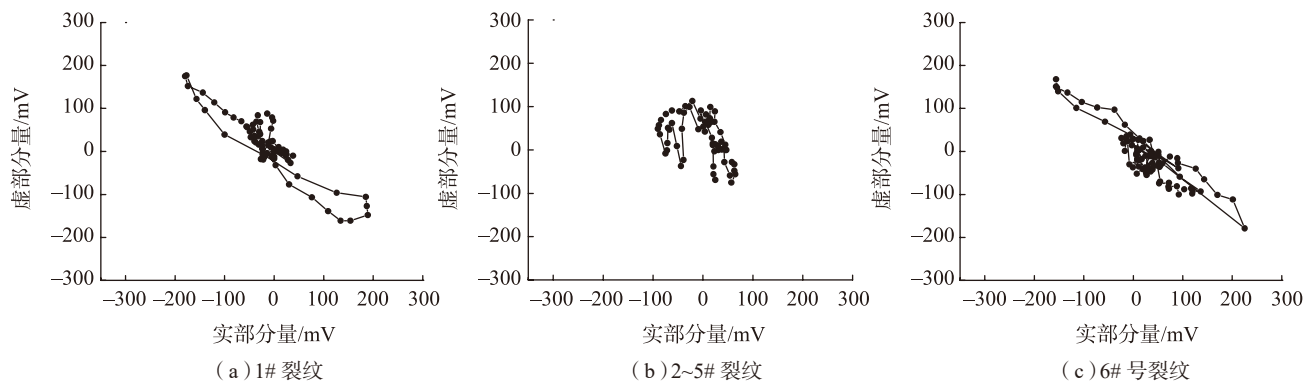


图9 涡轮叶片裂纹的手动涡流检测结果

Fig.9 Eddy current testing results of turbine blade crack by manual

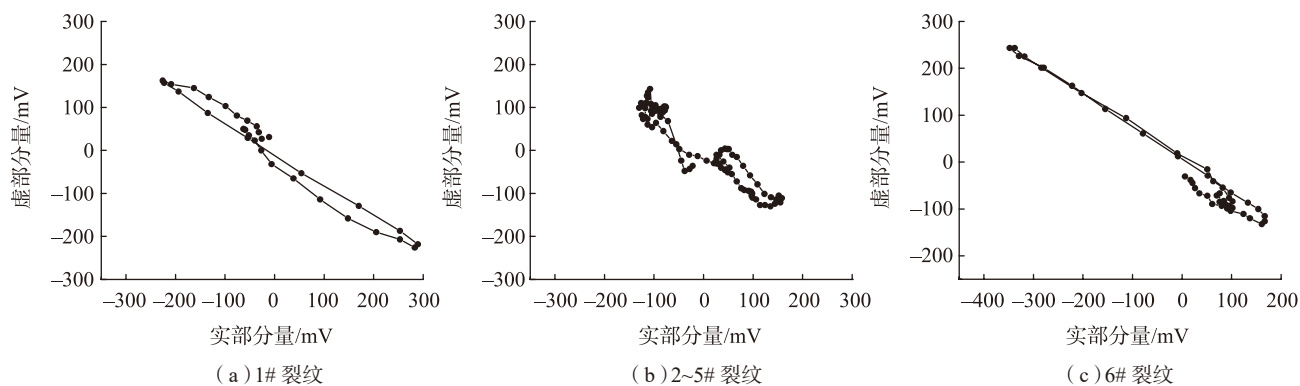


图10 涡轮叶片裂纹的自动涡流检测结果

Fig.10 Eddy current testing results of turbine blade crack by automatic

出,且能有效辨别缺陷信号,对比图9,说明了应用自动仿形涡流检测系统提高了缺陷检测信噪比,具体如图11所示。

由图11可以发现,对于手动扫描检测方式,其缺陷信号信噪比较低,如纵向裂纹检测信号信噪比最高只有4.6,而横向裂纹检测信号则由

于信噪比过低而无法有效判别;自动仿形扫描检测方式有助于提高缺陷信号的信噪比,其中横向裂纹检测信号信噪比最低已高达为6.0。自动仿形扫描方式有效提高了检测信号信噪比的主要原因是,采用仿形扫描,使得涡流探头始终垂直于涡轮叶片构件表面,探头前端线圈区域的敏感面实现了与被检面的有效贴合,涡轮叶片裂纹对涡流场的扰动达到较为显著的程度,而手动扫描时,难以实现探头与被检面的实时垂直,导致提离效应信号明显增大,并还降低了裂纹的检测灵敏度,使得裂纹信号的信噪比较大而难以识别。

对比两种扫描方式,说明自动仿形扫描方式在一定程度上有效消除提离信号,减小抖动信号,提高信噪比,特别对于叶片边缘或者曲率较大处的纵向裂纹,采用自动仿形扫描方

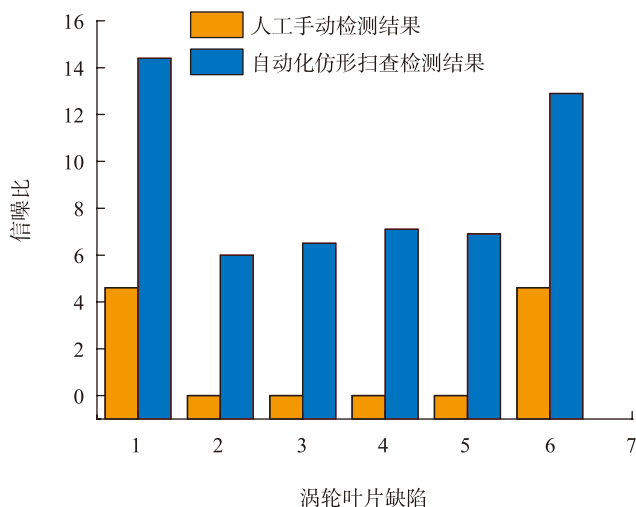


图11 涡轮叶片缺陷检测信号信噪比

Fig.11 Signal-to-noise ratio of inspection to defect in turbine blade

式能够定位准确,防止产生漏检现象,避免了边缘效应和叶片曲率变化引产生的噪声信号

结论

针对涡轮叶片裂纹缺陷实施涡流检测噪声大的检测难题,研制了机械自补偿差动式涡流探头,开发了的五轴联动自动仿形扫查系统,并实现了涡轮叶片的自动仿形快速检测。试验研究结果表明,涡流探头具有较高的灵敏度和分辨率,有效检出涡轮叶片多方向的微裂纹;采用自动涡流检测系统使探头始终沿着叶片曲面的切面方向按预定的轨迹移动,大幅降低干扰而提高信噪比,处于叶片边缘或曲率较大部位的纵向裂纹信噪比达到 6.0 以上,为涡轮叶片类复杂曲面金属零件涡流检测提供了新思路。

参考文献

- [1] 王大伟,苗学问,洪杰.某发动机涡轮叶片使用寿命可靠性分析[J].北京航空航天大学学报,2006,32(8):903-907.
- WANG Dawei, MIAO Xuewen, HONG Jie, et al. Reliability life time analysis of the turbine blade of turbofan engine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(8): 903-907.
- [2] 宋凯,刘堂先,李来平,等.航空发动机涡轮叶片裂纹的阵列涡流检测仿真[J].航空学报,2014,35(8):2355-2363.
- SONG Kai, LIU Tangxian, LI Laiping, et al. Simulation on aero-engine blade cracks detection based on eddy current array[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(8): 2355-2363.
- [3] 邵靖,段力,王强,等.MEMS 高温温度探头的研制与测量精度研究[J].传感技术学报,2017,30(9):1352-1358.
- SHAO Jing, DUAN Li, WANG Qiang, et al. Fabrication and high temperature characterization by MEMS embedded sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(9): 1352-1358.
- [4] 马立印,李洋,周正干.整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵产生检测[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1990-1908.
- MA Liyin, LI Yang, ZHOU Zhenggan. Detection of welding crack in blisk blade based on ultrasonic phased array[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1900-1908.
- [5] AMINEH R K, RAVAN M, SADEGHI S H H, et al. Removal of probe liftoff effects on crack detection and sizing in metals by the AC field measurement technique[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2008, 44(8): 2066-2073.
- [6] 任吉林.电磁无损检测[M].北京:国防工业出版社,2001.
- REN Jilin. Electromagnetic nondestructive testing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [7] 丁华,何宇廷,焦胜博,等.基于涡流阵列探头的金属结构疲劳裂纹监测[J].北京航空航天大学学报,2012,38(12):1629-1633.
- DING Hua, HE Yuting, JIAO Shengbo, et al. Fatigue crack monitoring of metallic structure based on eddy current array sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(12): 1629-1633.
- [8] 秦峰.航空涡轮叶片缺陷的扫查式涡流检测技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- QIN Feng. Research of scanning eddy current testing technology for the defects on aircraft turbine blades[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [9] 付刚强,郑勇.涡轮叶片专用探头研制与应用[J].无损检测,2002,24(7):289-291.
- FU Gangqiang, ZHENG Yong. Development and application of the probe for turbine blades[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(7): 289-291.
- [10] 赵秀梅,段建刚,李永.涡流阵列探头在高压涡轮叶片原位检测中的应用[J].无损检测,2014,36(4):20-22.
- ZHAO Xiumei, DUAN Jiangan, LI Yong. Application of eddy current array probe in the in-situ detection of high pressure turbine blade[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(4): 20-22.
- [11] 于霞,张卫民,邱忠超,等.飞机发动机叶片缺陷的差激励涡流探头检测[J].北京航空航天大学学报,2015,41(9):1582-1588.
- YU Xia, ZHANG Weimin, QIU Zhongchao, et al. Differential excitation eddy current sensor testing for aircraft engine blades defect[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(9): 1582-1588.
- [12] 李安阳,尹武良,陈立晶,等.基于电磁差动涡流探头和FPGA的金属板探伤研究[J].测试技术学报,2013(1):61-66.
- LI Anyang, YIN Wuliang, CHEN Lijing, et al. Defect detection for metal plates based on differential inductive eddy current sensor and FPGA[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013(1): 61-66.
- [13] 于霞,张卫民,邱忠超,等.基于涡流检测信号的航空发动机叶片缺陷分类与评估方法[J].测试技术学报,2016(2):99-105.
- YU Xia, ZHANG Weimin, QIU Zhongchao, et al. Study on classifying and evaluating defects of aviation engine blade based on eddy current detection signals[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016(2): 99-105.
- [14] 陈友东,樊锐,陈五一,等.在五轴数控机床上刃磨球头铣刀的研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(3):276-279.
- CHEN Youdong, FAN Rui, CHEN Wuyi, et al. Equation for grinding ball nose mill in the five-axis machine[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 276-279.
- [15] TALON J L H, BORJA D R, MURO L B, et al. Functional check test for high-speed milling centres of up to five axes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(1): 39-51.
- [16] 杜玉湘,陆启建,刘明灯.五轴联动数控机床的结构和应用[J].机械制造与自动化,2008,37(3):14-16.
- DU Yuxiang, LU Qijian, LIU Mingdeng. Structure and application of five-axis linkage CNC machine[J]. Machine Building and Automation, 2008, 37(3): 14-16.

通讯作者:张丽攀,讲师,研究方向为电磁无损检测技术与仪器, E-mail: zhanglipan@tom.com.
(下转第57页)

[23] BENOIT M, CHRISTOPHE B, CHRISTIAN N, et al. Robotic laser ultrasonic imaging of composite complex geometry components[C]// 62nd CASI aeronautics conference and AGM 3rd garden conference, Montreal, 2015.

[24] GIROLAMO D, GIROLAMO L, YUAN F G. Automated laser-based barely visible impact damage detection in honeycomb sandwich composite structures[J]. Qnde, 2015, 1650(1): 1392-1400.

[25] KALMS M, PETERS C, WIERBOS

R. Assessment of carbon fiber-reinforced polyphenylene sulfide by means of laser ultrasound[C]// 2011/2012 Scholarship Program in Optical Science and Engineering, Shanghai, 2011.

[26] KARABUTOV A A, PODYMOVA N B. Nondestructive porosity assessment of CFRP composites with spectral analysis of backscattered laser-induced ultrasonic pulses[J]. Journal of Non-destructive Evaluation, 2013 (23): 315-324.

[27] 张昭, 肖迎春, 李闵行, 等. 激

光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用[J]. 航空工程进展, 2014, 5(3): 269-274.

ZHANG Zhao, XIAO Yingchun, LI Minhang, et al. Applications of laser ultrasonic nondestructive testing technology in aeronautical carbon fiber composite[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2014, 5(3): 269-274.

通讯作者: 胡婷萍, E-mail: hutingping@comac.cc.

Application of Laser Ultrasonic Nondestructive Testing Technology in Aeronautical Composite Structures

HU Tingping, GAO Limin, YANG Hainan

(Beijing Key Laboratory of Civil Aircraft Structures and Composite Materials, Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China)

[ABSTRACT] With composite materials more and more widely used in the aerospace industry, the laser ultrasonic technique has been considered as an emerging advanced nondestructive testing technique. The principle and advantages of the laser ultrasonic technique have been analyzed, and the current development of the application of the technique in the areas of nondestructive testing of Laminate structure, complex composite structure, honeycomb sandwich structure, thermoplastic composites, and the evaluation of porosity has been discussed. A brief cost analysis of this technique has also been given in this paper. Finally, the existing problems and the future development trend of the application of the nondestructive testing technique in composite structures have been described. It has certain reference for the research and application of laser ultrasonic on the composite structure.

Keywords: Aerospace; NDT (nondestructive testing technique); Laser ultrasonic test; Composite; Damage

(责编 铃兰)

(上接第49页)

Design and Experimental Study of Automated Eddy Current Testing System for Turbine Blade Crack

SONG Kai¹, WANG Chong¹, ZHANG Lipan¹, WANG Chan², LI Yiming¹, ZHAO Zhizhong¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Xi'an Aero Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] Based on the fast detection problem of aero-engine turbine Blades, a new differential eddy current sensor is developed with mechanical self-compensation, the research of automated eddy current testing experiment on turbine blade of aero-engine is developed with the five axis linkage contour automatic detection system. The results show that using the eddy current sensor with the automatic detection system is able to eliminate the lift-off signal, reduce jitter interference, and effectively improve the signal-to-noise ratio compared with manual detection. This method is expected to be applied to the metal with complex curved surface like turbine blade.

Keywords: Turbine blade; Eddy current testing; Crack; Automatic detection; Profile scanning

(责编 铃兰)