

航空发动机叶片机械手 无损检测技术*

徐春广,马朋志,肖定国,刘 然

(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

[摘要] 航空发动机叶片具有复杂的曲面结构和变厚度的特点,常规的检测方法无法实现自动化检测。为解决叶片的自动化无损检测,由此提出一种基于工业机械手超声无损检测方法。首先根据叶片的结构特点,选择超声纵波垂直入射检测叶身和厚度,超声纵波斜入射检测进排气边和叶根等部位;其次基于叶片模型规划机械手扫查轨迹,同时以叶片试块为被测对象进行缺陷和厚度检测试验。试验结果表明,所提出的机械手超声检测方法可以识别叶片上最小直径为 0.15mm 的人工平底孔缺陷和宽度 0.15mm 人工裂纹缺陷,叶片厚度测量精度为 $\pm 0.03\text{mm}$,整体叶片检测周期少于 20min,满足叶片检测要求。因此机械手超声无损检测技术是实现叶片自动化检测的有效技术手段。

关键词: 航空发动机;叶片;无损检测;机械手;超声

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.042



徐春广

教授、博士生导师,现任先进加工技术国防重点学科实验室主任,北京理工大学无损检测与控制研究所所长,教育部新世纪人才。主要研究方向为超声无损检测、数字控制、几何量测量,发表学术论文 200 余篇,获得国家发明专利 30 多项,国防科技发明二等奖、国防科技进步二等奖等省部级科技奖励。

叶片作为航空发动机的关键组成部分,其自身的可靠性及工况安全对于发动机极其重要。为了保障叶片能够正常工作,减少由于生产工艺引起的气孔、夹杂、脱粘等缺陷以及使用过程中出现的疲劳缺陷与裂纹等影响叶片使用寿命的因素,有必要在叶片出厂前以及服役过程中对其表层及内部结构进行无损检测^[1-2]。现在常用检测叶片的方式有涡流检测、渗透检测技术。涡流检测对于表面和近表面缺陷比较敏感,但难以实现内部缺陷检测。渗透检测技术在检测前需要对叶片去涂层处理,工艺复杂成本高。传统的无损检测设备难以实现对复杂曲面构件的自动化检测,尤其是难以实现对部分曲率变化明显、变厚度、复杂造型曲面构

件的高精度仿形轮廓跟踪,多数情况下仍依靠人工检测的方式完成探伤工作,检测精度无法得到有效保证。机械手超声检测系统能够有效地检测叶片内部和表面缺陷,有效地检测叶片的厚度,可以实现对叶片缺陷和厚度的快速自动化检测,提高生产效率。

航空发动机叶片具有曲率复杂、厚度变化等特点,常规检测方法难以实现其检测。近几年,国内外叶片无损检测技术得到快速发展。宋凯等^[3]提出采用五轴联动涡流检测系统,通过仿叶片加工运动解决叶片涡流自动化检测,对比分析了手持涡流探头检测和自动化检测信号的信噪比。海克斯康计量公司^[4]研制了激光叶片快速检测机,通过激光扫描叶片获取叶片 3D 点云数据,与叶片 CAD 模型做分析,结果形成 3D 色差图、指定点偏差报告等。魏文斌等^[5]

*基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1737203)。

统由硬件和软件构成,两者有机结合构成了自动化检测系统的核心组成,同时也是实现叶片等复杂构件的无损检测的关键。软件系统主要包括机械手扫描运动轨迹规划软件、无损检测检测结果显示软件。

机械手超声检测系统的硬件部分主要包括工业机械手及其控制器、超声收发装置、工业控制计算机、超声换能器、叶片专用夹具和液浸水槽等设备,如图3所示。其中超声换能器主要负责超声信号的发射和接收,可根据不同工作要求更换不同频率、焦距以实现最优的检测结果。叶片夹具采用快换夹具连接,以便于进行快速更换,同时保证叶片安装坐标系的固定。机械手工具坐标系与换能器所在用户坐标系位姿关系的找正,也需要由工装夹具的位置信息配合确定。

2 机械手运动轨迹规划技术

根据叶片检测的要求,利用CAD/CAM 仿加工技术获取被测叶片表面加工过程的刀具路线,如图4所示。在后处理文件中读取各离散点相对于工件坐标系的空间位置及法向矢量,同时构建表征各离散点法



图3 机械手无损检测系统

Fig.3 Nondestructive testing system of robotic

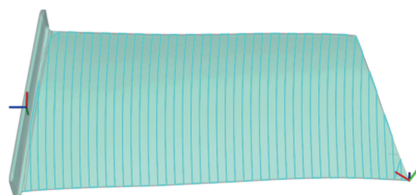


图4 叶片加工仿真中刀轨路径示意图

Fig.4 Schematic diagram of tool path in blade machining simulation

向量的位姿矩阵,用于完成机械手末端执行器的空间扫描轨迹的生成。

机械手无损检测系统中的坐标系如图5所示, $\{A\}$ 表示机械手末端法兰坐标系, $\{B\}$ 表示叶片的工件坐标系,超声换能器所在位置设置为用户坐标系 $\{C\}$,机械手的世界坐标系表示为 $\{W\}$ 。由机器人运动学理论可知当机械手的D-H (Denavit - Hartenberg) 参数确定,即可推导出工具坐标系 $\{A\}$ 与基准坐标系 $\{W\}$ 的相对位姿。

由CAD/CAM 加工仿真后处理器中得到的离散点数据是基于工件坐标系的位姿信息,检测过程中,为满足超声纵波反射法的入射角要求,需要保证离散点法向与超声换能器声束轴线保持一致,即需要求解当坐标系 $\{B\}$ 旋转至坐标系 $\{C\}$ 位姿时,工具坐标系 $\{A\}$ 的位姿。当辅助坐标系由 $\{B\}$ 旋转到 $\{C\}$ 时,满足以下条件:

$${}^A P = {}^A_B T {}^B_C T {}^C P = {}^A_C T {}^C P \quad (1)$$

式中, ${}^A P$, ${}^B P$, ${}^C P$ 表示法向矢量相对于坐标系 $\{A\}$, $\{B\}$ 和 $\{C\}$ 的法向

矢量。

本课题采用 STAUBLI TX90L 六自由度机械手,其各关节运动规律符合 X-Y-Z 欧拉角的旋转顺序,如图6所示,即坐标系 $\{X_A, Y_A, Z_A\}$ 分别绕上次旋转姿态下的 X、Y、Z 轴旋转 α , β , γ 角度后得到坐标系 $\{X''_B, Y''_B, Z''_B\}$ 姿态。在坐标系旋转过程中,由坐标系 $\{A\}$ 位姿旋转到坐标系 $\{C\}$ 所需要的变换矩阵为式(2)中所示,其中, $\cos\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 分别简写成 $c\alpha$ 和 $s\alpha$ 。

$$R_{X-Y-Z} = R_X(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix}$$

(2)

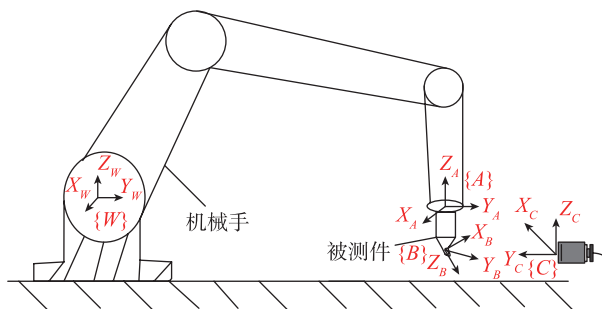


图5 机械手检测系统中坐标系分布

Fig.5 Coordinate system distribution in manipulator detection system

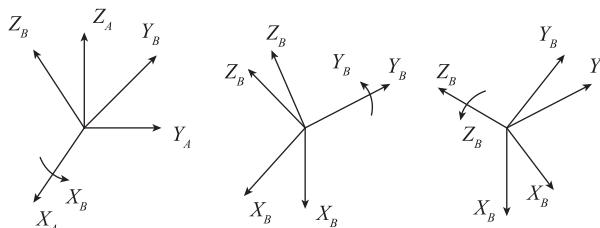


图6 X-Y-Z 欧拉角旋转矩阵的变换顺序

Fig.6 Transformation order of X-Y-Z Euler angular rotation matrix

需要依据超声检测的约束条件(包括超声入射角、声程长度等)对离散点位姿进行限定。CAM加工仿真过程中的刀具路径受前倾角影响,因此定义超声换能器声束轴线相对于被测表面法向矢量的偏转角为 θ^* ,当采用超声纵波反射法检测时,依据不同的缺陷类型和检测需要来确定 θ^* 。

针对超声垂直入射检测内部缺陷时,为减少超声衍射带来的影响,需要保证超声声束轴线垂直入射叶片表面,即 $\theta^*=0$ 。依据坐标系变换矩阵位姿约束要求,当超声波垂直入射时,离散点坐标系{B}和用户坐标系{C}保持法向量平行或反向。

采用超声纵波斜入射的检测方法检测表层缺陷时,假设超声入射角沿机械手工具坐标系X轴、Y轴和Z轴的偏转角度分别为 ξ 、 φ 、 ψ ,如图7所示,向量R为R₀分别偏转 ξ 、 φ 、 ψ 角后得到的矢量,经正交归一化后可用于求解各偏转角的解析解。依据坐标系变换矩阵定义,坐标系{B}相对于{C}的旋转矩阵为:

$${}^B_C R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\xi & \sin\xi \\ 0 & -\sin\xi & \cos\xi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

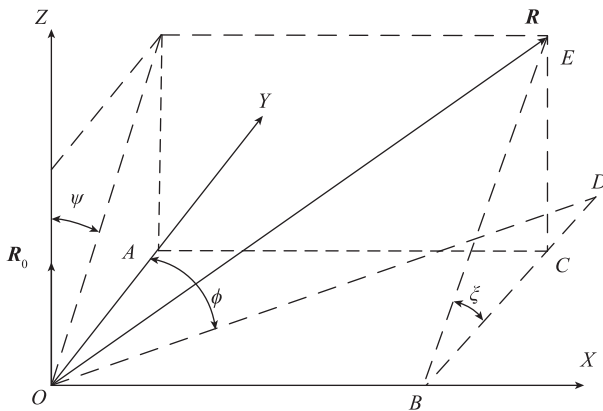


图7 超声入射角的偏转示意图
Fig.7 Deflection diagram of ultrasonic incidence angle

$$\begin{bmatrix} c\varphi c\psi & c\varphi s\psi & -s\varphi \\ c\xi s\varphi c\psi - c\xi s\psi & c\xi s\varphi s\psi + c\xi c\psi & s\xi c\varphi \\ c\xi s\varphi c\psi + s\xi s\psi & c\xi s\varphi s\psi - s\xi c\psi & c\xi c\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于超声斜入射通常仅要求与声束轴线成一固定夹角。因此,实际规划机械手轨迹时需依据法矢基准面规定 ξ 、 φ 、 ψ 中某一偏转角等于入射角。

机械手超声无损检测技术 试验研究

1 试验装备

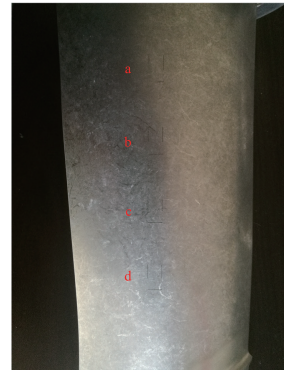
本课题采用STAUBLI TX90L六自由度机械手搭建系统,试验仪器还包括SIUI超声探伤仪、水浸聚焦超声换能器等。该系统主要技术指标:超声采集卡采集频率为250MHz;机械手运动位置触发间隔为0.1mm,时间触发间隔为0.0001s;工作通道为2;超声换能器采用20MHz水浸聚焦探头。机械手扫查运动空间Y轴行程 $\leq 600\text{mm}$,X轴行程 $\leq 500\text{mm}$,Z轴行程 $\leq 400\text{mm}$;机械手扫查空间内重复定位精度为 $\pm 0.10\text{mm}$ 。

2 试验方案

为验证机械手超声无损检测系统检测性能和技术指标,采用五轴数控加工中心和电火花加工在叶身、进气边分别制作标准平底孔缺陷、裂纹缺陷,如图8和图9所示。标准平底

孔缺陷尺寸设计值见表1;标准裂纹缺陷尺寸设计值见表2。

为验证系统检测叶片厚度性能,通过提取叶片CAD模型表面设计仿叶片曲面厚度阶梯试块,厚度设计范围为2~12mm,并采用五轴数控加工中心加工制作,如图10所示。厚度试块厚度标准值经过第三方检测机



(a) 标准裂纹缺陷



(b) 标准平底孔缺陷

图8 叶片叶身人工平底孔和裂纹缺陷
Fig.8 Artificial flat bottom hole and crack defects of blade body

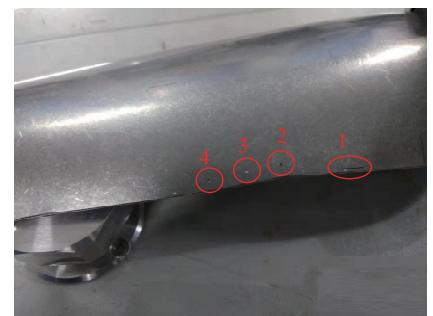


图9 进气边人工平底孔和裂纹缺陷
Fig.9 Artificial flat bottom hole and crack defects on air inlet side

构测量。

3 试验结果

图 11 为叶身上标准裂纹缺陷和标准平底孔缺陷的超声垂直入射检测 C 扫描成像图,从超声 C 扫描成像中可以看出缺陷分布与设计叶片试块上缺陷的位置一致。并通过图像分析直径为 0.15mm 的平底缺陷可以看出缺陷信号强度高于噪声信号,如图 12 所示,因此缺陷检测结果是有效的。检测结果表明系统能够检测出直径 0.15mm 的标准平底



(a) 仿叶片曲面厚度试块 (b) 设计模型

图10 仿叶片曲面阶梯厚度试块

Fig.10 Simulated blade curved surface and stepped thickness component

表1 平底孔设计尺寸

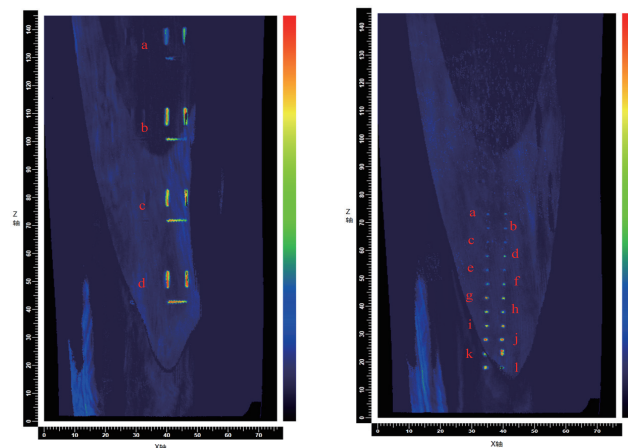
Table 1 Design size of flat bottom hole

编号	直径/mm	孔深度/mm
a	0.15	0.5
b		0.8
c		1.0
d		0.5
e	0.2	0.8
f		1.0
g	0.3	0.5
h		0.8
i		1.0
j	0.4	0.5
k		0.8
l		1.0

表2 裂纹设计尺寸

Table 2 Design dimensions of cracks

编号	宽度/mm	裂纹深度/mm
a	0.15	0.2
b	0.15	0.4
c	0.15	0.6
d	0.15	0.8



(a) 标准裂纹缺陷 (b) 标准平底孔缺陷

图11 超声C扫描成像显示

Fig.11 Ultrasonic C-scan imaging display

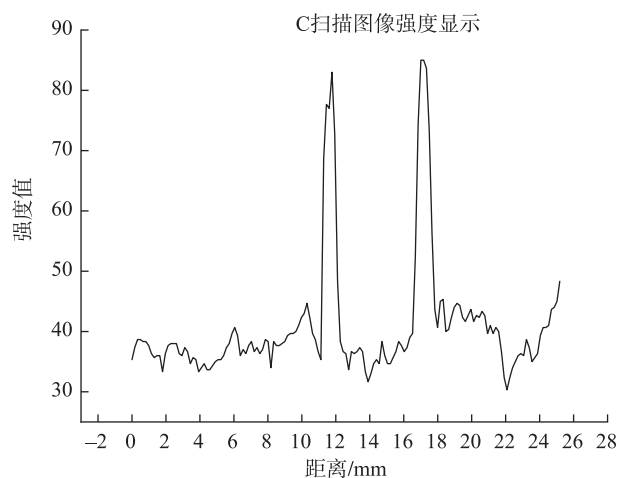


图12 a组0.15mm直径平底孔缺陷图像强度值显示

Fig.12 Defect image intensity value display of flat bottom hole with 0.15mm diameter in group a

孔缺陷和 0.15mm 宽的裂纹缺陷, 满足检测要求; 同时检测叶片叶身面积的 80% 仅用 14min, 相对于人工检测效率更高且缺陷检测可靠性更高。

针对叶片进排气边采用超声纵波以大于第 2 临界角的角度斜入射扫查, 沿进排气边进行扫查, 并采用超声 B 扫描成像方法进行检测, 检测结果如图 13 所示, 可以看到与人工设计缺陷位置相符合, 因此采用该方法能够实现检测出进排气边直径为 0.2mm 的平底孔缺陷和 0.2mm 宽的裂纹缺陷, 满足叶片进排气边等部位表层缺陷的检测。

对于超声检测仿叶片曲面厚度

试块方法是采用 CAD 模型在每个阶梯厚度上随机选择 2 个点, 并通过三坐标测量机对所选点厚度值进行标

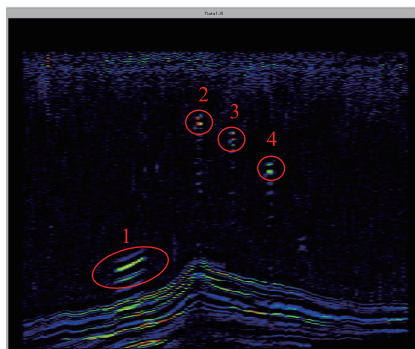


图13 叶片进排气边超声B扫描成像显示
Fig.13 Ultrasonic B-scan imaging display of inlet and exhaust edges of blade

表3 仿叶片曲面厚度试块检测结果

Table 3 Test results of components with simulated blade surface thickness

坐标点位	标称厚度/mm	检测结果/mm	检测误差/mm
(-12.87,-7.84,200.00)	1.956	1.9469	-0.009
(-2.25,-5.59,199.99)	1.938	1.9219	-0.016
(-12.51,-6.46,180.00)	3.466	3.4624	-0.003
(-0.74,-3.95,179.99)	3.451	3.4481	-0.002
(-13.62,-5.52,159.99)	4.972	4.9665	-0.005
(-1.46,-2.50,159.99)	4.96	4.9436	-0.016
(-14.36,-4.47,139.99)	6.468	6.4577	-0.010
(-15.64,-3.62,120.00)	7.964	7.9632	-0.001
(-4.95,-0.07,120.00)	7.957	7.9725	0.015
(-4.82,1.44,99.99)	9.397	9.4052	0.008
(6.23,3.76,100.00)	9.387	9.4073	0.020
(5.60,5.64,80.00)	10.938	10.9535	0.015
(16.75,7.06,79.99)	10.928	10.9207	-0.007
(-4.30,4.51,59.99)	11.937	11.9556	0.018
(6.75,7.37,59.99)	11.932	11.9513	0.019

定测量; 然后采用标准厚度值标定叶片声速并进行其他点厚度检测, 其检测结果如表 3 所示, 可以看出检测厚度误差小于 $\pm 0.03\text{mm}$, 满足叶片厚度检测要求。

结论

(1) 根据叶片特点, 提出机械手超声自动化检测的方法, 采用机械手持叶片, 超声换能器固定, 实现对叶片叶身、进排气边等部位的无损检测, 同时实现叶片厚度的精确测量。

(2) 基于叶片的 CAD 模型进行叶片仿加工获取机械手扫查轨迹, 根据扫查轨迹实现叶片垂直入射检测叶片内部缺陷, 斜入射检测进排气边, 并实现叶片指定测厚点厚度的精确测量。

(3) 本课题研制的机械手超声自动化检测系统可完成检测叶身长度为 50~300mm 的叶片, 被测叶片最大重量 4kg, 能够实现叶身缺陷检测、叶身厚度检测, 缺陷检测能力可检测出直径为 0.15mm 的平底孔缺陷和 0.15mm × 10mm 的裂纹缺陷。厚度测量范围为 0.5~12mm, 测量精度 $\pm 0.03\text{mm}$, 成功解决了航空发动机叶片的无损检测难题。

参考文献

[1] LAKSHMI M R, MONDALA K, JADHAV C K. Overview of NDT methods applied on an aero engine turbine rotor blade[J]. Insight, 2013, 55(9): 482-486.

[2] FRANKENSTEIN B, SCHULZE E, WEHNACHT B. Structural health monitoring of major wind turbine components[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 1(2): 2456-2462.

[3] 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.

SONG Kai, WANG Chong, ZHANG

Lipan, et al. Design and experimental study of automated eddy current testing system for turbine blade crack[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(19): 45-49.

[4] 郑小晖. 航空发动机叶片现场高速检测方案[J]. 航空制造技术, 2014, 13(16): 68-69.

ZHENG Xiaohui. High-speed inspection solution shop floor for aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 13(16): 68-69.

[5] 魏文斌, 汪千强. 反应堆压力容器六轴机器人检测系统的研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 1-4.

WEI Wenbin, WANG Qianqiang. Research of the reactor pressure vessel inspection through six-axis robot control system[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(2): 1-4.

[6] 尤敬业, 何娟娟. 航空发动机叶片检测与裂纹分析[J]. 计测技术, 2016, 36(S): 74-75.

YOU Jingye, HE Juanjuan. Aircraft engine blade detection and crack analysis[J].

Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(S): 74-75.

[7] 周正干, 赵胜, 安振刚. 航空发动机叶片实时成像自动检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 180-184.

ZHOU Zhenggan, ZHAO Sheng, AN Zhengang. Research on automatic inspection techniques of real-time radiography for turbing-blade[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 180-184.

[8] 贾庸, 张瑞民, 张炜. 超声热成像对含曲率 TC4 结构表面裂纹的检测仿真[J]. 表面技术, 2017, 47(10): 302-308.

JIA Yong, ZHANG Ruimin, ZHANG Wei. Simulation of surface crack detection of TC4 curvature structure by ultrasonic infrared thermography[J]. Surface Technology, 2017, 47(10): 302-308.

[9] 傅健, 路宏年, 侯涛. 基于 ICT 图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 325-330.

FU Jian, LU Hongnian, HOU Tao. Wall thickness precision measurement method for air engine turbine blade based on ICT images[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 325-330.

[10] 张祥春, 周言贤, 刘安, 等. 航空发动机涡轮叶片的三维 CT 检测[J]. 无损检测, 2017, 39(8): 34-40.

ZHANG Xiangchun, ZHOU Yanxian, LIU An, et al. The three-dimensional ct detection of aero-engine turbine blade[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(8): 34-40.

[11] MOROZOV M, PIERCE S G, MACLEOD C N, et al. Off-line scan path planning for robotic NDT[J]. Measurement, 2018, 122: 284-290.

[12] BURGHARDT A, KURC K, SZYBICKI D. Robot-operated inspection of aircraft engine turbine rotor guide vane segment geometry[J]. Tehnikivjesnik, 2017, 2: 345-348.

通讯作者: 徐春广, E-mail: xucgbit@263.net.

Robotic Nondestructive Testing Technology for Aero-Engine Blades

XU Chunguang, MA Pengzhi, XIAO Dingguo, LIU Ran

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[ABSTRACT] The aero-engine blade with characteristics of complex curved surfaces and variable thickness is unable to be accurately and automatically detected by conventional inspection method. For this issue, an automatic and non-destructive inspection method based on the combination of ultrasonic testing and industrial robot is proposed. Firstly, according to the structural characteristics of the blade, the ultrasonic longitudinal waves are applied to detect the defects and measure the thickness of blade body through vertical incidence and to inspect the LTE (the leading and the trailing edges) and roots of blade through oblique incidence, respectively. Secondly, the defects and thickness of a test block of blade are also detected and measured respectively based on the manipulator scanning trajectory planned according to the CAD model of blade. The inspection results show that a flat bottom hole with a minimum diameter of 0.15mm and a crack with a width of 0.15mm can be identified, the accuracy of thickness is $\pm 0.03\text{mm}$, and the inspection period for whole blade is less than 20min. These results meet the requirements of inspection for blade and indicate that the robotic ultrasonic non-destructive testing technique is effective for automatic inspection of blade.

Keywords: Aero-engine; Blade; Nondestructive testing (NDT); Robot; Ultrasound

(责编 铃兰)