

检测发动机叶片的相控阵超声换能器设计

马立印¹,李 洋¹,周正干^{1,2}

(1.北京航空航天大学 机械工程及自动化学院,北京 100083;2.北京航空航天大学 先进航空发动机协同创新中心,北京 100083)

摘 要:相控阵超声检测技术能够为发动机叶片表面裂纹的检测提供方法。设计并制作了满足检测要求的带有楔块的相控阵超声换能器,该换能器包含阵元和楔块,其中阵元为线阵,个数为32,中心频率为5 MHz,阵元宽度为0.3 mm,阵元间距为0.1 mm;楔块与叶片的表面完全耦合。采用有限元法对相控阵超声换能器和楔块的设计理论进行可行性验证。同时,构建相控阵超声检测系统,对叶片试样进行检测试验,试验结果表明,设计的带楔块的线阵换能器能实现对试样表面裂纹缺陷的检测。

关键词:叶片;相控阵超声检测;线阵换能器;有限元仿真;表面裂纹

中图分类号:TB553 **文献标识码:**A

Design of Phased Array Ultrasonic Transducer for Detection of Aero Engine Turbine Blade

MA Liyin¹, LI Yang¹, ZHOU Zhenggan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

Beijing 100083, China; 2. The Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine (CICAAE),

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The phased array ultrasonic detection provide a method for the inspection of surface crack in turbine blade. A phased array ultrasonic transducer with wedge is designed and fabricated. The transducer is a linear phased array, its element numbers are 32, center frequency is 5 MHz, the element width is 0.3 mm and the element space is 0.1 mm. The wedge can couple with the surface of blade completely. The feasibility verification of the transducer and the wedge design is carried out by using the finite element method. A phased array ultrasonic detection system is set up to conduct the experiment on the turbine blade sample. The experimental results show that the proposed transducer with wedge can achieve the inspection of the surface crack in the turbine blade.

Key words: turbine blade; ultrasonic phased array detection; phased array ultrasonic transducer; finite element simulation; surface crack

0 引言

航空发动机叶片的结构复杂,是典型的双曲面构件。发动机叶片长期工作在高温、高腐蚀、高载荷等恶劣环境中,在服役过程中叶片表面易产生裂纹缺陷,这严重影响飞行器的安全^[1]。发动机叶片的根部区域检测空间很小,叶片的间距通常也只有几厘米。现有的叶片裂纹检测方法,由于检测设备的整体尺寸较大,难以满足叶片靠近根部区域表面裂纹缺陷的现场检测需求^[2]。

相控阵超声检测技术能灵活控制声束的偏转和聚焦,有线性扫查、扇形扫查、动态聚焦等工作方式^[3-4]。其具有探头小巧,设备便携,扫查速度快,声

束可达性良好,检测精确性高及缺陷分辨率高等优点^[5-6],在复杂型面构件的无损检测领域有广泛的应用^[7]。目前,国内、外将相控阵超声检测技术应用于汽轮机叶轮叶缘^[7]、低压汽轮机叶片^[8]、列车车轮^[9]等复杂型面结构的检测,取得了良好的检测效果。因此,研究满足叶片根部区域裂纹缺陷的相控阵超声检测方法,具有重要的理论和实际工程意义。

本文针对叶片根部区域表面裂纹的检测,设计满足检测要求的相控阵超声换能器和楔块,并基于有限元仿真法对设计的换能器和楔块进行验证,加工制作带楔块的相控阵超声换能器,对叶片试样进行检测试验并分析试验结果。通过有限元仿真和试验研究验证设计的带楔块的相控阵超声换能器,能

收稿日期:2016-11-10

基金项目:工信部民用飞机专项科研基金资助项目(MJZ-G-2013-05)

作者简介:马立印(1992-),男,河南周口人,硕士生,主要从事相控阵超声检测技术研究。通信作者:周正干(1967-),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师,主要从事现代无损检测技术研究。

够满足叶片根部区域表面裂纹的检测。

1 基本理论

1.1 斯奈尔定律在三维空间的应用

在二维平面情况下,超声波在不同介质间传播遵循斯奈尔定律,即

$$\frac{\sin \alpha}{v_a} = \frac{\sin \beta}{v_\beta} = \frac{\sin \theta}{v_\theta} \quad (1)$$

式中: α 、 β 、 θ 分别为入射、反射、折射横波或折射纵波的角度; v_a 、 v_β 、 v_θ 分别为入射、反射、折射横波或折射纵波的速度。

在三维空间内,超声波在不同介质之间的传播同样遵循斯奈尔定律^[10],此时的条件是入射波 I、反射波 R、折射波 T 与声波入射点的法向量 N 在同一平面内,如图 1 所示。图中, S 为入射点的切平面。

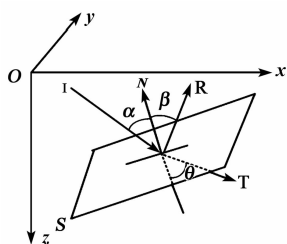


图1 斯奈尔定律在三维空间的应用

1.2 声波往返透射率

在楔块-叶片界面,声波透射能量的强弱会对检测结果产生影响。声波往返透射率可用来衡量声波穿过不同介质界面时的透射能量,其取决于介质的密度、声波速度、入射声波的波型、声波的入射角和折射的声波类型。

楔块密度为 $1\,050\text{ kg/m}^3$,纵、横波声速分别为 $2\,337\text{ m/s}$ 和 $1\,155\text{ m/s}$;叶片密度为 $4\,540\text{ kg/m}^3$,纵、横波声速分别为 $6\,008\text{ m/s}$ 和 $2\,958\text{ m/s}$ 。结合参考文献^[10]计算纵波从楔块入射到叶片表面时的横波和纵波的声波往返透射率如图 2 所示。图中, α_{C1} 、 α_{C2} 分别为第一、二临界角。

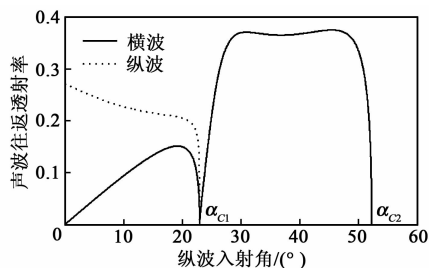


图2 声波往返透射率

2 相控阵超声换能器及楔块设计

2.1 相控阵超声换能器参数选取

换能器要求能在狭小的空间内完成对叶片根部

的检测,因此,换能器的尺寸不能太大。此外,叶片的纵、横波声速分别为 $6\,008\text{ m/s}$ 和 $2\,958\text{ m/s}$ 。根据超声波检测能探测到的最小缺陷尺寸约为波长的一半。因此,要保证能够探测到宽度在 0.3 mm 以上的裂纹缺陷,采用横波反射法进行检测,换能器的中心频率应大于 5 MHz 。综合换能器的尺寸和频率要求,选择中心频率为 5 MHz 的线阵换能器,阵元个数为 32 ,阵元宽度为 0.3 mm ,阵元间距为 0.1 mm 。

2.2 楔块参数设计

叶片表面为双曲面,声波在叶片内部的传播路径较复杂,为保证声波能从楔块传播到叶片的待检测位置,在检测截面内,声波的传播要满足斯奈尔定律。裂纹缺陷的尺寸小,采用横波检测时,为了提升裂纹缺陷的检测精度,要有足够的声波能量透过楔块-叶片界面,同时楔块的倾斜角要保证在叶片内部声波的主要成分是横波。因此,楔块的参数需满足以下条件:

- 1) 满足在检测截面内声波能够从楔块传播到叶片的待检测区域。
- 2) 要设计楔块的倾斜角使声波在叶片内部为横波。

图 3 为对待检测点 F 处进行检测的楔块设计示意图。点 C 为换能器的中心,在叶片截面 A 的上表面轮廓上距 F 适当的距离取一个点 O ,设点 O 为换能器的中心 C 在叶片上表面的声波入射点, CO 为探头中心发射的等效声束。在整个设计过程中,以等效入射声束 CO 、折射声束 OF 来代替所有阵元的声束。根据斯奈尔定律,探头的发射声束 CO 与折射声束 OF 及叶片上 O 点的曲面法向量在同一平面内,基于叶片模型设计楔块截面如图 3(b) 所示,使得 O 点在截面 A 的曲线法向量 N_1 与 O 点在叶片表面的曲面法向量 N_2 相同,则在三维空间内,声波能在 A 内传播到点 F ,完成对点 F 的检测。

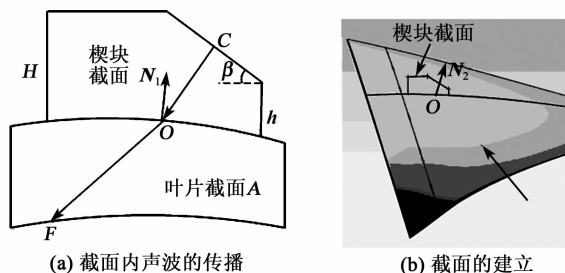


图3 楔块设计流程示意图

由图 2 可知,当纵波入射角在 $29^\circ \sim 47^\circ$ 时,横波的声波往返透射率更高,调整楔块的倾斜角度 β ,使得阵元的入射角度落在 $[29^\circ, 47^\circ]$ 区间内。此外,由

于检测空间狭小,楔块的高度不能太大,通过调整等效入射声束 CO ,使得最大高度 $H \leq 30\text{ mm}$,同时要满足楔块的加工要求,楔块最薄处的厚度 $h \geq 3\text{ mm}$ 。

根据上述流程建立的楔块截面沿法线方向向两侧各拉伸 4 mm ,即得到楔块的三维实体。楔块的底面与叶片完全耦合,其中一个检测截面的楔块参数如表 1 所示。相控阵超声换能器及楔块在叶片表面的摆放位置如图 4 所示。

表 1 楔块参数

宽度/mm	长度/mm	H /mm	h /mm	倾斜角度/($^{\circ}$)
8	20.85	10.05	3.12	35.53

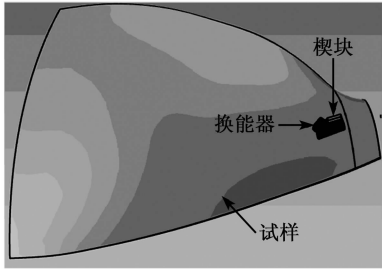


图 4 换能器与试样摆放位置示意图

3 换能器设计仿真验证

3.1 有限元模型建立

基于 Abaqus 平台,建立检测截面的叶片轮廓和楔块的二维模型。为节省计算时间,提高计算效率,只对靠近待检测区域两侧的区域进行计算。有限元模型如图 5 所示。模型上半部分为楔块,下半部分是叶片。楔块的材料密度为 $1\,050\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 $4.007\,7\text{ GPa}$,泊松比为 0.32 ;叶片的密度为 $4\,540\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 106.4 GPa ,泊松比为 0.34 ;裂纹的宽为 0.5 mm ,深度为 0.5 mm 。楔块与叶片表面完全耦合,且楔块的参数已设定,用施加在楔块上间距为 0.1 mm ,长为 0.3 mm 的 32 个线节点上的压力载荷来模拟线阵换能器的激励信号,载荷方向垂直于楔块表面。激励信号为高斯窗调制的 3 周期正弦信号,中心频率为 5 MHz 。超声波的聚焦点在待检测区域,基于延时聚焦法则对每个节点的调制信号进行相位延迟。

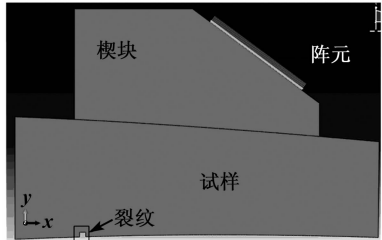


图 5 有限元模型

3.2 仿真计算结果分析

仿真算法采用 Abaqus/Explicit。采用三节点线性单元对模型进行自由网格划分,单元的类型为 CPE3,网格尺寸为 0.04 mm ,时间增益步长设为 1 ns ,计算总时长为 $25\text{ }\mu\text{s}$ 。将有缺陷模型得到的超声信号与无缺陷模型得到的信号做差,得到的缺陷信号如图 6 所示。

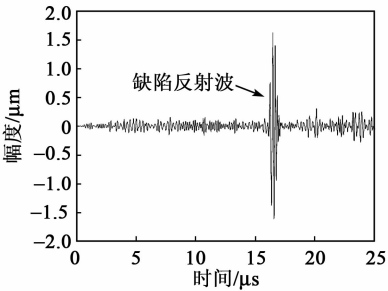


图 6 缺陷的信号

由图 6 可知,所设计的带楔块的相控阵超声换能器能够实现对叶片表面裂纹缺陷的识别和检测。

4 相控阵超声换能器制作及试验

4.1 相控阵超声换能器

根据相控阵超声换能器和楔块参数的设计,制作带楔块的相控阵超声换能器,楔块的一部分凸出来,且能够与叶片的表面完全耦合,换能器实物及主要的尺寸如图 7 所示。

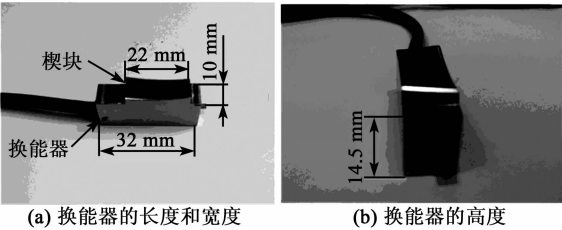


图 7 换能器的主要尺寸

4.2 试验结果及分析

图 8 为本试验所采用的试验系统示意图。叶片表面的虚线是标记的待检测区域,圆形标记区域内是预制的表面裂纹缺陷。试验过程中的检测参数如表 2 所示。

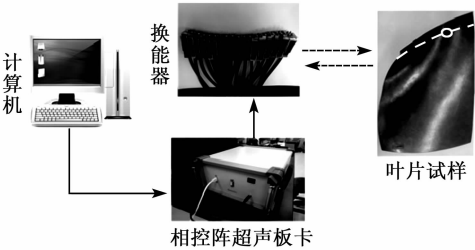


图 8 试验系统组成

表2 检测参数

探头频率/MHz	阵元个数	孔径大小	扫查方式
5	32	32	S扫
聚焦深度/mm	扫查角度/(°)	增益/dB	激励电压/V
25	40~70	60	400

对待检测区域进行检测,叶片试样表面预制缺陷处的S扫图像及在裂纹处的超声信号如图9所示。

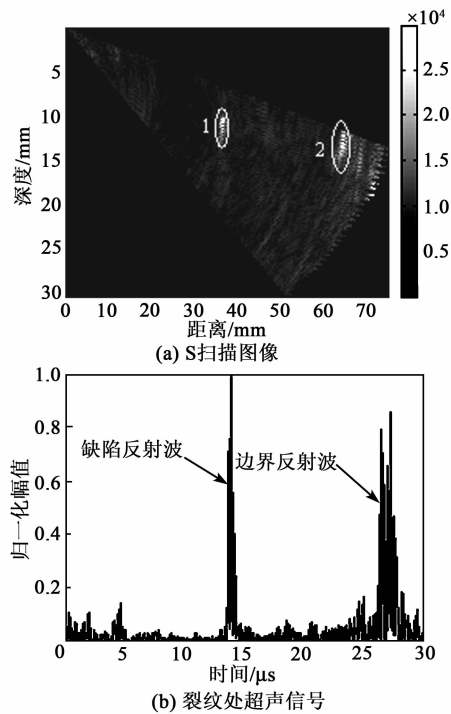


图9 检测结果

对比裂纹缺陷与相控阵超声换能器之间的相对位置可知,在图9(a)中,1为裂纹缺陷,2为叶片试样的边界。结合S扫图像和裂纹缺陷的超声信号,发现裂纹缺陷的信号明显,表明设计的带楔块的相控阵超声换能器能够实现对叶片表面预制裂纹缺陷的检测。

5 结束语

针对叶片表面裂纹的检测,设计了能够满足检测要求的相控阵超声换能器和楔块。基于有限元法验证所设计的换能器和楔块能够实现对检测区域表面裂纹的检测。同时,基于设计的相控阵超声换能器、相关相控阵超声板卡等搭建试验系统平台,对叶片试样进行检测试验,试验结果表明设计的换能器能够实现叶片根部表面裂纹缺陷的检测。

参考文献:

[1] 于霞. 飞机发动机叶片缺陷的电磁检测技术研究[D].

北京:北京理工大学,2014.

[2] 孙护国,霍武军. 航空发动机涡轮叶片的检测技术[J]. 航空发动机,2002(1):23-25.
SUN Huguo, HUO Wujun. Inspection technique for turbine blade in aeroengine[J]. Aeroengine, 2002(1): 23-25.

[3] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(9): 925-934.
JIN Shijiu, YANG Xiaoxia, CHEN Shili, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.

[4] 董世运,朱学耕,徐滨士,等. 叶轮相控阵超声检测方法[J]. 装甲兵工程学院学报,2015(4):93-96.
DONG Shiyun, ZHU Xuegeng, XU Binshi, et al. Ultrasonic testing method for the impeller phased array[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015(4): 93-96.

[5] 徐娜,何方成,周正干. 基于动态孔径聚焦的L型构件相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(6):1000-1006.
XUE Na, HE Fangcheng, ZHOU Zhenggan. Ultrasonic phased array inspection of L-shaped components based on dynamic aperture focusing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1000-1006.

[6] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津:天津大学,2012.

[7] 陈世利,常文爽,靳世久. 汽轮机轮缘超声相控阵检测中缺陷方向识别[J]. 纳米技术与精密工程,2013,11(4):328-333.
CHEN Shili, CHANG Wenshuang, JIN Shijiu. Recognition of defect direction in ultrasonic phased array testing of turbine disc rims[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, 11(4): 328-333.

[8] CHARLESWORTH C. Phased array ultrasonic inspection of low-pressure steam turbine rotors-curved axial entry fir tree roots [J]. Insight, 2011, 2(53): 37-44.

[9] 陈昌华,汤志贵,陈能进,等. 列车车轮缺陷的超声波相控阵分析[J]. 物理测试,2012(1):34-39.
CHEN Changhua, TANG Zhigui, CHEN Nengjin, et al. Ultrasonic phased array analysis of railway wheel flaws[J]. Physics Examination and Testing, 2012(1): 34-39.

[10] SCHMERR L W. Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation: a modeling approach [M]. New York: Plenum Press, 1998:107-115.