

光纤法-珀传感器在飞机发动机叶片裂纹检测中的应用

单 宁,史仪凯,刘 霞

(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要: 基于光干涉原理确定初始法-珀腔长度,设计了光纤法-珀干涉仪,建立了非接触式光纤法-珀激光超声试验装置,用于探测飞机发动机叶片的裂纹。光纤法-珀传感器使用单根光纤实现多束光干涉测量,制作简单,成本低,能快速、有效地实现非接触叶片表面裂纹检测。

关键词: 激光超声; 光纤法-珀传感器; 发动机叶片; 裂纹检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2009)03-0206-02

Detecting Crack of Aircraft Engine Blade Based on Optical Fiber F-P Sensor

SHAN Ning, SHI Yi-Kai, LIU Xia

(School of Mechatronics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on interference principle of light, the length of Fabry-Perot cavity and an optical fiber F-P interferometer was obtained. The contactless type laser ultrasound experimental system of optical fiber was established and used for detecting the crack of aircraft engine blade. The optical fiber F-P sensor realized many bundle lights interference measurement using single optical fiber, which was easy to fabricate and with low cost, as well. It could detect the crack of blade efficiently, fast and contactlessly.

Keywords: Laser ultrasound; Optical fiber Fabry-Perot sensor; Engine blade; Surface crack detection

发动机叶片是飞机的关键零部件,目前用于叶片裂纹检测的常规方法主要有X射线检测、交变磁场检测、涡流检测、磁粉检测和超声检测^[1-4]。激光超声检测技术是通过激光激发超声信号,通过光学方法检测,实现完全非接触激发和接收的方法,便于在高温、高压等恶劣环境下进行。此外,激光超声的激发和检测都是在瞬间完成的,故能够实现快速实时检测,且可用于表面几何形状复杂及受限制部位(如焊缝根部和小直径管道等)的检测,广泛应用于无损检测和评估领域^[5-7]。

笔者基于光干涉原理设计制作了光纤法-珀干涉仪,建立了基于光纤法-珀干涉仪的激光超声检测试验装置,用于检测飞机发动机叶片裂纹。

收稿日期: 2008-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275125); 航空科学基金资助项目(2007ZE53050)

作者简介: 单 宁(1980—),男,博士研究生,研究方向为激光超声检测技术及纳米材料性能测试。

1 光纤法-珀腔

光纤法-珀干涉仪的结构示意图如图1所示。由试样表面和相对的光纤端面构成光干涉腔。入射光从光纤纤芯传输到光纤端面时,部分光发生反射,形成参考光,另一部分光透过光纤端面折射到试样表面,经过反射的部分光携带外界信息进入到纤芯内形成信号光。由于参考光和信号光具有相同的频率和偏振方向,相位差恒定,满足干涉原理。

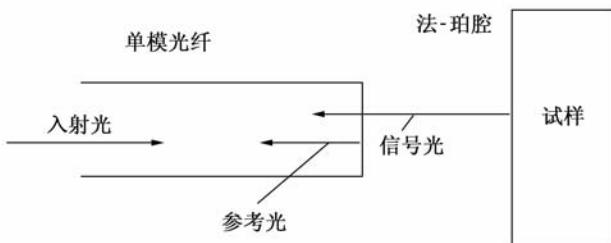


图1 光纤法-珀干涉仪示意图

由光学理论可知干涉腔的反射光光强 I 为^[8]:

$$I = 2I_0 r^2 (1 + \cos\varphi) \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光的光强; r 为干涉腔两反射面的反射比; φ 为信号光与参考光的相位差。如果 $\cos\varphi = 1$, 则两束光发生相长干涉, 反射光强 I 最大, 此时 $\varphi = 2k\pi$ (k 为任意整数)。由

$$\varphi = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (2)$$

得: $d = \frac{\varphi\lambda}{4\pi} = \frac{k\lambda}{2}$ (3)

式中 d 为法-珀腔长度; λ 为光波波长。即当干涉腔的长度是传输光半波长的整数倍时, 反射光强最大。

笔者采用 $\lambda = 633$ nm 的氦-氖激光光源, 相干长度约为 20 cm, 取初始腔长 $d = 0.9495$ mm。为便于安装固定, 可使 $d = 1$ mm, 传感光纤末端贴有高反射膜, 且带有护套, 以便于安装固定。

2 试验装置

光纤法-珀超声检测试验装置如图 2 所示。由 TEA-CO₂ 脉冲激光器发出的波长为 10.6 μm, 脉宽 15 μs, 单脉冲能量 20~30 mJ, 光斑直径约为 4 cm 的激光经透镜聚焦后, 照射到飞机发动机叶片表面, 激发出表面波信号, 超声信号由光纤法-珀传感系统接收。传感系统由功率为 25 mw 的氦-氖激光光源、聚焦透镜、3 dB 光纤耦合器、光电转换器和信号处理单元构成。光源输出光经透镜聚焦后进入到光纤耦合器, 部分透射光由纤芯传输到法-珀腔的两个端面, 经过声波信号调制, 返回法-珀腔, 发生干涉现象。干涉光经耦合器传输到光电探测器, 转换成电信号, 经放大及滤波处理后进入 TDS2012 双通道数字示波器。

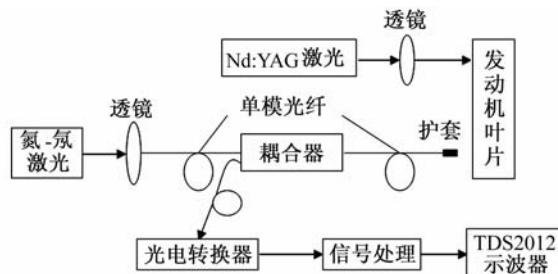


图 2 非接触式光纤 F-P 超声探测装置

某型带有裂纹的飞机发动机压缩机叶片最高工作温度为 598 ℃, 转速为 13 300 转/min。试验中传感器和激光源位于裂纹的同侧。图 3 为传感系统在没有缺陷的叶片上探测到的超声信号, 图 4 为传感

系统在带有缺陷的叶片上探测到的缺陷信号。可见, 没有缺陷的超声信号只有一个峰-峰值, 而带有缺陷的超声信号有两个峰-峰值。第一个波峰是传感器探测到的直达表面波信号, 第二个波峰就是表面波遇到缺陷后的反射回波。显然, 可以通过这种方法有效检测叶片裂纹。

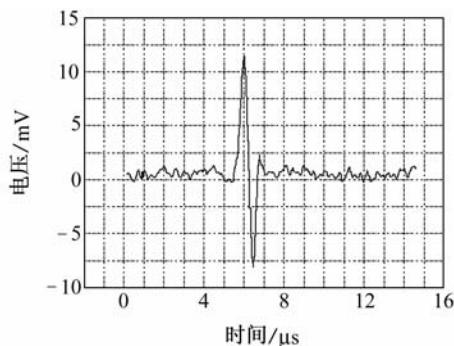


图 3 无缺陷超声信号

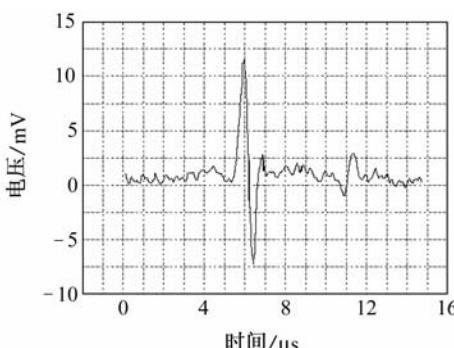


图 4 缺陷超声信号

3 结论

设计制作了光纤法-珀干涉仪, 建立了基于光纤法-珀干涉仪的激光超声检测试验装置, 用于检测飞机发动机叶片裂纹。由以上试验结果可知, 该系统操作简单, 经济成本低, 能快速、实时、非接触、有效地检测飞机发动机叶片裂纹, 具有一定实用价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 许占显, 林为干. 飞机发动机叶片裂纹的交变磁场非接触原位探测[J]. 无损检测, 2005, 27(12): 637—639.
- [3] 陆佳佳. 飞机涡轮发动机叶片红外探伤技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [4] 郭海鸥. 飞机某型发动机压缩机一级叶片裂纹检测研究[J]. 无损探伤, 2004, 28(5): 45—46.

(下转第 216 页)

越大,过零时间越短,试验获得的同深不同宽缺陷的瞬态波形对比见图5。可见,过零时间只与试件的损耗深度有关系,可根据过零时间这一特征量对腐蚀缺陷的深度进行定量检测。采用最小二乘曲线拟合方法拟合出的缺陷深度随过零时间变化的方程为:

$$d = at + b = 0.0058 \times t - 2.3876 \quad (3)$$

式中 t 表示过零时间; d 表示被测缺陷的深度。

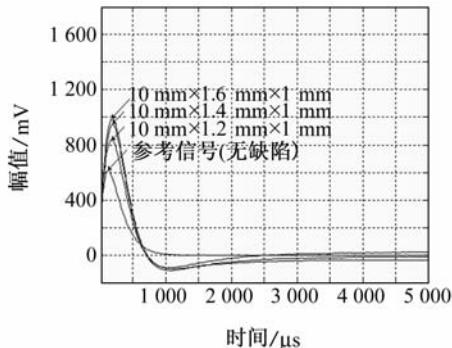


图4 同深不同宽的小缺陷的瞬态电压信号

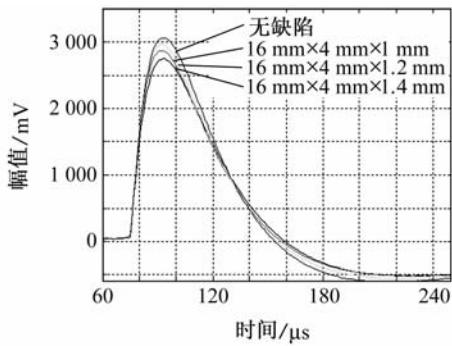


图5 同宽不同深缺陷的瞬态电压信号

3.3 腐蚀缺陷长度(宽度)的定量检测

当传感器扫描经过腐蚀缺陷时,在检测线圈进入缺陷时刻,瞬态感应电压信号的峰值达到最大值(最小值);相反地,在检测线圈离开缺陷时刻,瞬态感应电压信号的峰值出现最小值(最大值)。因此,只要在传感器的扫描过程中,实时采集感应信号的峰值,并将所有的峰值点连接起来形成峰值扫描波形,如图6所示,则由波峰和波谷两个极值点的信息即可对腐蚀缺陷的长度(宽度)进行定量检测。计算

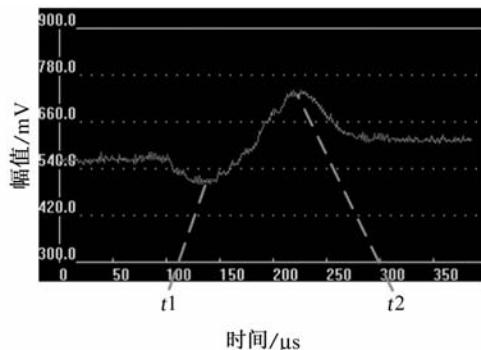


图6 峰值扫描曲线

公式为:

$$l = v \cdot (t_2 - t_1) \quad (5)$$

式中 l ——被测缺陷的长度;

v ——传感器的扫描速度;

t_1, t_2 ——峰值达到最大值或最小值的时刻。

4 结论

采用低频涡流与脉冲涡流技术结合的方法,设计了一套完整的腐蚀缺陷检测系统。利用瞬态感应电压峰值,可实现腐蚀缺陷深度与体积的定量检测;利用峰值扫描曲线,可实现腐蚀缺陷长度的定量检测。可以看到,在多层结构腐蚀缺陷的检测中,低频脉冲涡流技术具有明显的优势,在飞机无损检测行业中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 许万忠. 低频涡流技术的应用[J]. 无损检测, 1996, 18(8): 227—231.
- [2] Moulder J C, Bieber J A, Ward W W, et al. Scanned pulsed eddy current instrument for nondestructive inspection of aging aircraft[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1996, 2945: 2—13.
- [3] Safizadeh M S, Lepine B A, Forsyth D S, et al. Time-frequency analysis of pulsed Eddy current signals[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2001, 20(2): 73—86.
- [4] 陈清明, 蔡虎, 程祖海. 激光超声技术及其在无损检测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 53—57.
- [5] 苏琨, 任大海, 李建, 等. 基于激光超声的微裂纹检测技术的研究[J]. 光学技术, 2002, 28(6): 518—519.
- [6] 施德恒, 陈玉科, 孙金峰, 等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J]. 激光, 2004, 25(5): 1—4.
- [7] 孟克. 光纤干涉测量技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004.