

文章编号: 1001-2486(2009)05-0101-05

航空发动机叶片的内窥涡流集成化原位检测*

田武刚, 潘孟春, 罗飞路, 陈棣湘

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 目前内窥检测是航空发动机叶片原位检测的唯一方法, 但是内窥检测对于叶片裂纹缺陷的检测效果不理想。为此, 提出内窥涡流集成化检测技术, 使这两种方法的优势互补, 实现对航空发动机叶片的原位检测。研制了一种可用于航空发动机叶片原位检测的内窥涡流集成化检测探头, 给出了航空发动机叶片的检测实例。检测结果表明: 内窥涡流集成化检测技术的缺陷检测能力高, 并且可以实现对裂纹缺陷的定量评估, 因此较单一的内窥检测更有优越性, 具有很高的实际应用价值。

关键词: 内窥检测; 涡流检测; 航空发动机叶片; 原位检测

中图分类号: V267; TG115.28 **文献标识码:** B

Borescope and Eddy Current Integrative In-situ Detecting Defects in Aeroengine Laminas

TIAN Wugang, PAN Mengchun, LUO Feilu, CHEN Dixiang

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: At present, borescope inspection is the only technique for in-situ detecting defects in aeroengine laminas, but the inspection performance is poor by using borescope to detect cracks in laminas. Therefore, borescope and eddy current integrative testing technique was presented, combining the advantages of these two techniques. The technique can achieve in-situ detecting defects in aeroengine laminas. A borescope and eddy current integrative testing probe used for aeroengine laminas was developed. A testing example of aeroengine lamina using the probe was given. The testing results show that the inspection performance is high using borescope and eddy current integrative testing techniques, and the cracks can be estimated quantitatively. It was concluded that the integrative testing technique is superior to single borescope inspection, and it is very valuable for practical application.

Key words: borescope inspection; eddy current testing; aeroengine lamina; in-situ detecting

叶片是航空发动机的主要零件之一, 由于功能的关系, 其所处的工作环境是十分恶劣的。叶片承受较高的离心负荷、气动负荷、高温和大气温差负荷以及振动的交变负荷, 压气机叶片还受发动机进气道外来物的冲击, 受风沙、潮湿的侵蚀, 涡轮叶片受燃气的腐蚀和高温热应力等, 这些因素使叶片上容易产生缺陷, 如疲劳裂纹。如果拆分航空发动机对叶片进行分解检查, 则既麻烦又浪费时间。原位检测技术是现代维修技术新的重要组成部分, 它避免了装备和结构的拆卸、分解和安装, 节省检测费用和时间, 原位检测技术在航空发动机的检修中具有十分重要的意义^[1]。由于航空发动机结构的特殊性, 常规的无损检测技术(如磁粉、渗透和射线等)因其技术上的局限性在叶片的原位检测中受到限制。

内窥检测具有直观、可靠、重复性好等优点, 是目前航空发动机叶片原位检测的唯一方法^[2-3], 但是内窥检测对于叶片裂纹缺陷的判别难度较大。为了提高航空发动机叶片的疲劳寿命, 目前都对叶片进行了喷丸或渗层处理, 叶片基体表面变成了次表面。从大量试验和失效分析知, 喷丸或渗层处理的叶片裂纹恰恰是在次表面上萌生^[4], 当叶片基体出现裂纹时, 表面反映不明显, 内窥图像难以判断。涡流检测对于金属试件的表面和近表面有很好的检测能力^[5], 但是涡流探头与试件的接触位置及耦合状态在无法看到的情况下很难操作, 且容易漏检和误判。因此, 提出内窥涡流集成化检测技术, 使这两种方法

* 收稿日期: 2008-11-12

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 田武刚(1978-), 男, 博士生。

的优势互补^[6], 以实现航空发动机叶片的原位检测。

1 内窥涡流集成化检测探头设计

1.1 内窥涡流集成化检测探头结构

航空发动机叶片上产生的最常见的四种缺陷分别为: 裂纹、边缘刻口、凹坑和掉块。设计的用于航空发动机叶片原位检测的内窥涡流集成化探头, 可实现内窥检测和涡流检测。内窥检测主要用来检测叶片常见的四种缺陷, 同时为涡流检测提供图像, 使检测人员可以清楚看到涡流探头与叶片的相互位置和接触情况, 而内窥检测对于裂纹缺陷难以准确判断, 涡流检测主要用来检测叶片的裂纹缺陷。如图 1 所示设计了一种特殊的结构, 使内窥探头和涡流探头巧妙地结合在一起, 其中, 内窥探头位于前端, 通过操作控制部, 可以使探头旋转, 观测到叶片, 涡流探头位于内窥探头后面, 从侧面检测叶片。检测探头的最大外直径为 12mm, 可以从航空发动机预留的检测孔(孔径 $\geq 13\text{mm}$)中深入到叶片部位。这种结构可以满足内窥和涡流检测互为补充的目的, 实现对叶片的原位检测。

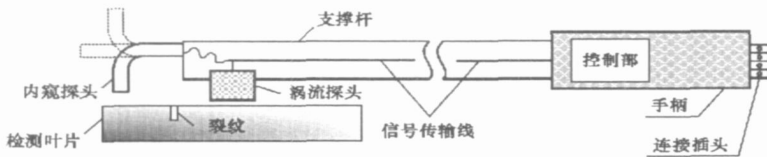


图 1 内窥涡流集成化检测探头结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of the borescope and eddy current integrative testing probe

1.2 内窥探头设计

目前常用的工业内窥镜有刚性内窥镜、光纤内窥镜和电子内窥镜三种, 其中电子内窥镜具有图像清晰, 分辨率高, 可供多人同时观察, 可采用数字图像处理技术提高图像质量等优点^[3]。电子内窥镜的工作原理为冷光源对所检查部位照明后, 物镜将被测物体成像在图像传感器光敏面上, 然后将光信号转化成电信号, 由电缆传输至视频处理器, 经处理还原后显示在监视器上。本文中内窥检测探头采用了电子内窥镜探头, 主要由光源、镜头和图像传感器等组成。

内窥镜大多采用独立冷光源, 并由导光光纤把光线传至检查位置上, 这种方式结构复杂, 冷光源体积比较大, 导光光纤容易折断。本文中光源选择了高亮度白光 LED, 通过调节 LED 中的电流, 实现亮度可调。为了保证视场内光照均匀, 探头端部上下各固定一只白光 LED, 如图 2(a) 所示。

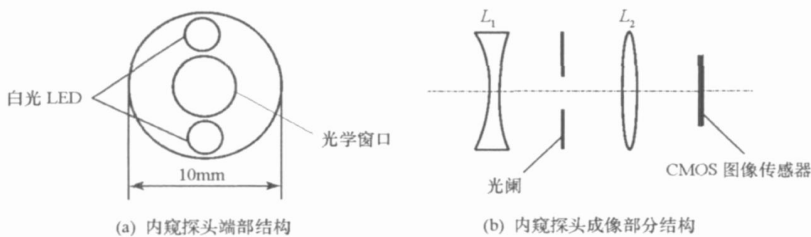


图 2 内窥探头结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of video borescope probe

根据内窥涡流集成化探头用于发动机叶片检测的实际情况, 内窥探头的镜头要求具有大视场、短焦距、大相对孔径和高分辨率。采用了一种反远距型物镜镜头^[7], 由一个负光焦距的前组和一个正光焦距的后组构成, 如图 2(b) 所示。这种结构能同时实现大视场、大相对孔径、大的景深、低的畸变、长的后工作距离和小的外形尺寸。

图像传感器是内窥探头的关键元件, CCD 和 CMOS 图像传感器是当前普遍采用的两种图像传感器。

CMOS 图像传感器的画质稍逊于 CCD,但是 CMOS 图像传感器价格低廉、功耗低、集成度高^[8]。CMOS 图像传感器可将感光阵列、控制与驱动电路、模拟信号处理、A/D 转换电路、I/O 接口电路、数字图像处理等高度集成在一块芯片上。本文中选用 OmniVision 公司的 CMOS 图像传感器 OV7670 芯片用于内窥探头设计。OV7670 是一款单片 VGA 模式 CMOS 彩色图像传感器芯片,感光大小为 1/6 英寸,成像面大小为 2.36mm × 1.76mm,采用新的光学格式,像素尺寸为 3.6μm。OV7670 采用了 OmniVision 专有的 OmniPixel 传感架构,从而提高信噪比和低光照下的性能。OV7670 图像传感器提供了全功能的单片 VGA 照相和图像处理器,它采用 3.8mm × 4.2mm 封装,可使照相模块的尺寸减至 6mm × 6mm × 4.5mm,通过 I²C 接口可提供全帧、欠采样或 8 位窗口模式的图像。所需的图像处理包括曝光控制、gamma、白平衡、色饱和度、色彩控制、白像素消除和噪声消除,都可通过 I²C 接口编程,可以很容易地和视频处理单元相连接^[9]。

1.3 涡流探头设计

叶片进行原位检测时,表面不可避免地存在污染物,因结构限制,不便先期去除,传统的涡流传感器具有很大的提离效应,不适合用于叶片原位检测。文献[10]中提出了一种类匀强涡流传感器,用于焊缝缺陷的检测,其提离效应很小。本文中将这种传感器进行改进,用于叶片的原位检测。

类匀强涡流传感器由一个大的矩形激励线圈和一个小的偏平检测线圈构成,如图 3 所示。宽大的矩形激励线圈在其正下方产生类匀强磁场,磁场 H 的方向垂直于激励线圈电流密度方向 J_0 ,由安培定律:

$$\nabla \times H = J_0 \quad (1)$$

磁场 H 产生磁感应强度

$$B = \mu H \quad (2)$$

其中, μ 为磁导率。

磁感应强度 B 的变化又会产生电场:

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (3)$$

电场会在电导率为 σ 的导电材料中产生涡流:

$$J_e = \sigma E \quad (4)$$

涡流方向垂直于磁感应强度方向。类匀强涡流传感器检测是基于电流连续原理,即

$$\nabla \cdot J_e = 0 \quad (5)$$

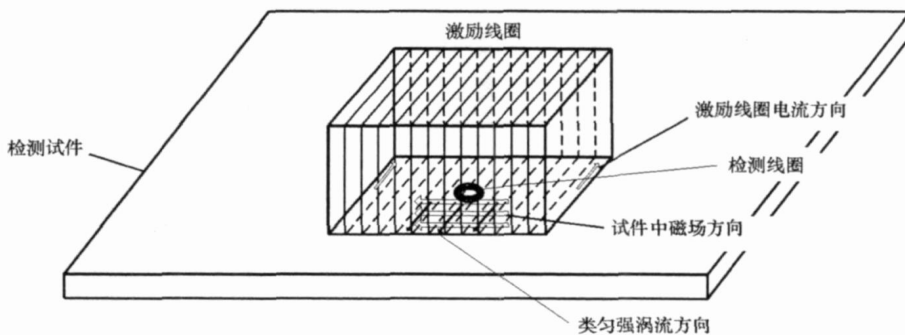


图 3 类匀强涡流传感器

Fig. 3 The uniform eddy current probe

如果检测试件没有缺陷,这时磁感应强度平行于试件,由于检测线圈只检测垂直于试件表面的磁感应强度,检测线圈中不会产生感应电压信号。如果检测试件表面或近表面有裂纹,破坏了材料的连续性,裂纹处的电导率由 σ 变为零,这时裂纹附近的涡流分布会发生改变,裂纹上磁感应强度也会发生变化,会产生垂直方向的磁通 φ_n ,从而使检测线圈中会产生感应电压:

$$V = -N \partial \varphi_n / \partial t \quad (6)$$

其中, N 为检测线圈的匝数。

当涡流传感器扫描一个裂纹时(裂纹垂直于涡流), 检测线圈中产生的缺陷信号如图 4 所示。当检测线圈正好进入裂纹边缘时, 缺陷信号得到最大值, 而当检测线圈正好离开裂纹另一边缘时, 缺陷信号得到最小值。两个峰值之间的距离约为裂纹的长度, 峰值的大小与裂纹的深度有关, 裂纹深度越大, 峰值越大。

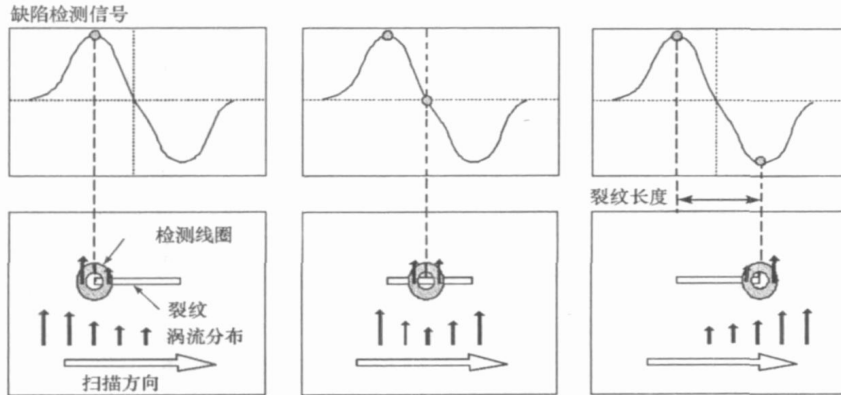


图 4 缺陷检测信号

Fig. 4 The testing signal of flaw

本文中研制了一种小型专用类匀强涡流探头, 探头尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 和内窥探头集成在一起后, 可以从发动机预留的检测孔伸入到叶片位置进行叶片的检测。

2 检测实例

2.1 检测试件的制作

为了达到最佳的检测效果, 选择了一块某型航空发动机报废叶片(叶片尖上有穿孔), 在上面采用电火花加工了两个人工缺陷, 作为检测试件, 如图 5 所示。两个人工缺陷大小分别为: $5\text{mm} \times 1\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ (长度 \times 宽度 \times 深度) 和 $10\text{mm} \times 1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。将检测试件安装到航空发动机上, 然后再进行原位检测。

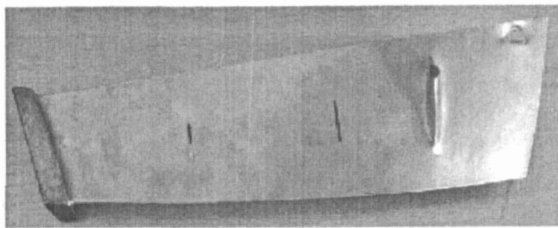


图 5 叶片实际检测试件

Fig. 5 The real testing sample of lamina

2.2 检测结果

研制的内窥涡流集成化探头从航空发动机预留的检测孔伸入到叶片位置进行检测, 从内窥图像中可以观测到裂纹缺陷(如图 6 所示), 然后使探头在这个部位的附近扫描, 从涡流传感器检测信号中可进一步得到裂纹缺陷的长度和深度信息, 如图 7 所示。可以看出缺陷 1 的长度约为 5mm , 缺陷 2 的长度约为 10mm , 缺陷 2 的深度大于缺陷 1 的深度。如果通过一系列不同深度的缺陷, 把检测信号幅度的峰值与缺陷的深度之间的关系用一个曲线表示出来, 则可以根据检测信号幅度的峰值得到缺陷的深度。

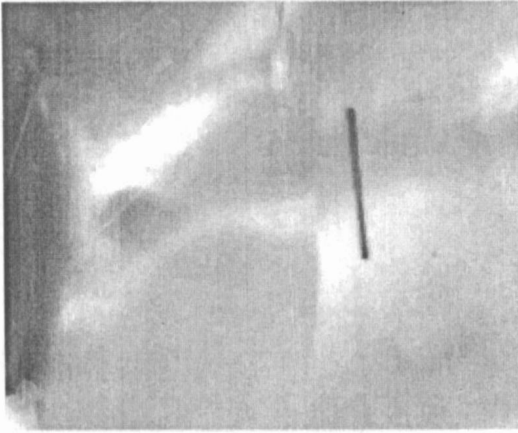


图6 叶片内窥检测的图像

Fig. 6 The image of borescope inspection for lamina

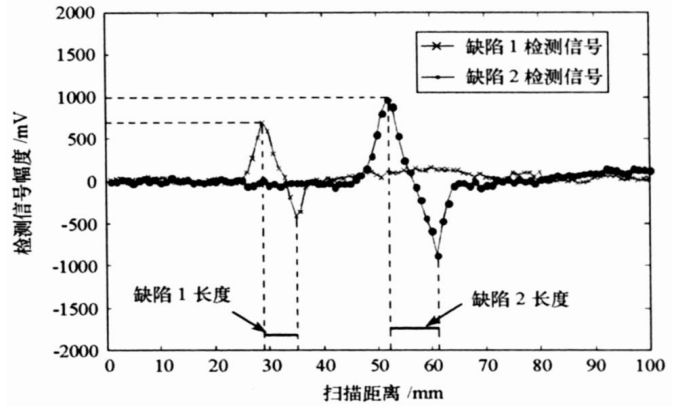


图7 叶片涡流检测信号波形

Fig. 7 The curve of eddy current testing for lamina

3 结论

内窥涡流集成化检测结合了内窥和涡流检测的优点,实现了对航空发动机叶片的原位检测,可以对裂纹缺陷进行定量评估。该方法也可用于航空发动机内部像轮盘等部位的原位无损检测。与单一的内窥检测方式相比,内窥涡流集成化检测更具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 许占显,李佩春. 原位检测技术[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 203- 204.
- [2] 于辉,左洪福,黄传奇. 先进内窥技术与发动机故障检测[J]. 航空工程与维修, 2002(2): 20- 22.
- [3] Anon. Video Borescoping Helps Keep Gas Turbines Healthy[J]. Turbomachinery International Magazine, September/October, 1998: 46- 48.
- [4] 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.
- [5] Hagenmaier D. Eddy Current Depth of Penetration[J]. Materials Evaluation, 2004, 62(10): 1028- 1029.
- [6] 田武刚,潘孟春,罗飞路,等. 内窥涡流集成化原位无损检测[J]. 无损检测, 2008, 30(6): 332- 333, 337.
- [7] 刘钧,高明. 光学设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2006.
- [8] Carlson B S. Comparison of Modern CCD and CMOS Image Sensor Technologies and Systems for Low Resolution Imaging[C]//Proceedings of IEEE Sensors 2002. First IEEE International Conference on Sensors, Orlando, 2002(1): 171- 176.
- [9] 田武刚,潘孟春,罗飞路,等. 一种新型嵌入式内窥涡流集成化无损检测系统[J]. 无损探伤, 2008, 32(3): 28- 30.
- [10] Hoshikawa H, Koyama K. A New Eddy Current Probe Using Uniform Rotating Eddy Current[J]. Materials Evaluation, 1998, 56(1): 85- 89.