

基于电涡流技术的叶尖间隙及定时测量研究

王维民 尚文 姚剑飞* 崔津
(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 透平机械叶尖间隙以及叶片的振动幅值是表征叶片健康状况以及进行叶片故障预测的重要参数。本文提出一种基于电涡流传感技术的叶尖间隙及振动幅值测量的方法,该方法利用电磁感应原理,通过测试标定获取输出电压信号与叶尖间隙变化的关系,提出在欠采样情况下叶顶间隙的获取方法。运用高速采集装置进行叶尖定时信号采集,获取叶片达到传感器的时间;随后结合电涡流叶尖间隙及定时分析算法对测试信号进行后处理计算,可得到旋转机械在运行状态下的叶尖间隙及叶片振动参数。在搭建的模拟实验台上进行不同运行转速下的测试实验,结果表明该测量方法可以准确获取叶尖间隙值及叶片振动位移值,相较于传统的电容技术及光纤技术具有更强的抗环境干扰能力,适合执行长期的状态监测任务,有较高的工程实践价值。

关键词: 叶尖定时测量;电涡流技术;静态标定;叶尖间隙;叶片振动

中图分类号: TM311; V216.2

引言

多转子轴系振动监测法在转子不平衡、不对中、弯曲等故障的识别方面已经得到广泛的研究和验证,逐渐形成一套包括信号采集与处理、征兆提取、故障诊断及可靠性维护的完善的理论体系。然而,在分析叶盘裂纹、叶片断裂、叶顶-机匣碰摩甚至透平机械叶顶间隙主动控制等方面,转子轴系振动监测法还存在一定的技术瓶颈^[1]。而叶尖间隙及定时测量技术能够较为准确监测叶片、叶轮的运行参数,相对于转子轴系振动监测法技术优势明显,而且通过对叶片振动的监测,可以计算出叶片在运行过程中的应力幅值,由此可以进行叶片疲劳寿命的预测^[2]。

目前,叶尖间隙及定时测量技术主要包括放电探针技术、电容式传感技术、光纤式传感技术及电涡流传感技术。其中放电探针法在原理上只能测量最小叶尖间隙,无法测量出每个叶片的叶尖间隙^[3];电容式传感器受到叶片与传感器之间的电介质影响,在不同机型、不同工况的测试中存在诸多约束,

通常应用于恒定工况下的实验研究^[4];光纤式传感器需要叶片及传感器表面保持洁净,而在长周期监测过程中频繁出现的污染会造成测量精度下降,因此在工程实践中倾向于短周期的检测^[5]。与以上3种技术相比,电涡流传感器技术更适用于长周期复杂工况下的机组运行监测,测量受介质、环境和工况的影响较小^[6]。

在健康状态下,叶轮的叶尖间隙与叶尖间距保持恒定^[7]。叶轮的疲劳损伤、叶片的外物损伤或腐蚀裂纹将引起某些叶片偏离原先的位置,导致叶尖的径向和轴向位置都会发生改变^[8]。因此本文提出一种电涡流传感技术,根据实际透平机械叶片构造及运行特点,结合电涡流传感器对于动态测试目标的监测原理,通过对测试叶片进行静态标定的方法寻求原始测量信号与实际叶尖间隙值的关系;并通过叶尖定时测振算法对叶尖到达时间参量进行后处理计算,在线分析每个叶片的振动情况,从而完成对叶尖间隙值及叶片振动参数的准确实时测量。

1 叶尖间隙及定时测量

1.1 叶尖间隙测量

电涡流叶尖定时传感器利用电磁感应原理,前置器输送高频振荡电流进入电涡流探头线圈,在线圈中形成交变磁场,当被测金属进入交变磁场,其表面产生交变电流,所产生交变磁场与原磁场反向,使得高频振荡电流的幅值、相位发生改变。当被测物

收稿日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(51275028);北京市高等学校青年英才计划(YETP0495)

第一作者: 男,1978年生,副研究员

* 通讯联系人

E-mail: yaojf@mail.buct.edu.cn

体与电涡流探头表面的距离 d 发生变化时,传感器的品质因子 Q 值、阻抗 Z 及电感 L 发生变化,从而引起电压幅值 U 发生变化。这一变化与金属体磁导率、电导率、线圈的几何形状、几何尺寸、电流频率以及探头端部到金属导体表面的距离等参数有关。通常假定金属导体材质均匀且性能稳定,则线圈和金属导体系统的物理性质可由金属导体的电导率 σ 、磁导率 ξ 、尺寸因子 τ 、探头端部与金属导体表面的距离 d 、电流强度 I 和频率 ω 参数来描述。线圈特征阻抗函数可表示为如式(1)所示。

$$Z = F(d, \tau, \xi, \sigma, I, \omega) \quad (1)$$

一般情况下,可以控制 $\tau, \xi, \sigma, I, \omega$ 这几个参数在一定范围内不变,则线圈的特征阻抗 Z 就成为距离 d 的单值函数,通过前置处理电路将特征阻抗 Z 转化为输出电压信号 U ,进而通过输出电压信号 U 表示叶尖间隙值 d 。

1.2 叶尖定时测量

叶尖定时测振的基本原理是利用叶尖定时传感器监测叶片经过每个传感器的时间点(即叶片定时到达信号),同时从转子轴系上采集转速同步信号,经过对比以上两种信号,计算分析叶片的振动情况。

由转速同步信号结合实际被测叶轮情况生成同步角基准信号,其作用是与叶片定时到达信号作对比。如果在无叶片振动或弯曲情况下,同一叶片的角基准信号和定时到达信号无时间差,此时叶片的到达时间点被称为“理想到达时间点”;而存在叶片振动或叶片弯曲的情况下,角基准信号和定时到达信号将出现时间差,从而叶片相对于原来位置将产生周向偏移(即叶片振动位移)。

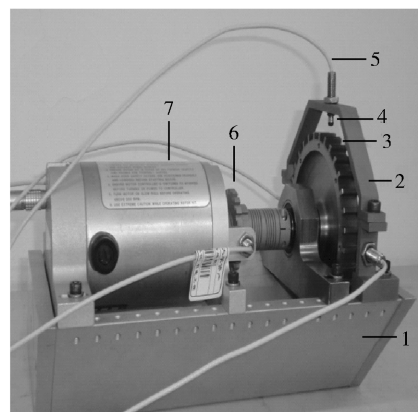
2 叶尖间隙测量实验

2.1 电涡流叶尖定时实验台

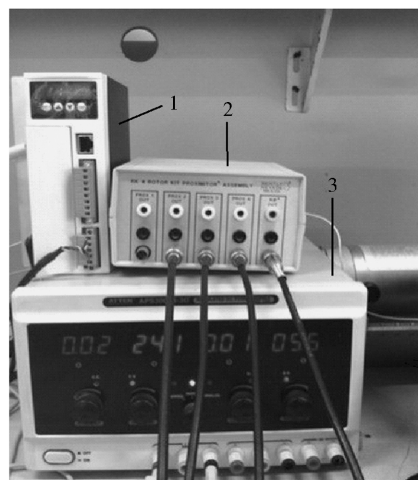
采用一种齿式加工轮盘模仿透平机叶轮的设计概念,将其作为电涡流测量叶尖间隙方案的基础实验模型,以降低初期实验成本,为工程实践奠定基础。本实验重点以叶片端面的几何尺寸及符合工艺设计要求的叶尖间隙标准值作为模拟工程实际叶片运行的两大指标,目的在于电涡流法测试方案的制定、运行机理与测试方案的拟合及测试算法的优化研究。

电涡流叶尖定时实验台主体部分由本特利电机(美国本特利公司)、刚性转轴、滚动轴承、联轴器、传感器支架和齿式叶轮搭建而成,同时安装配备电涡流位移传感器、前置调节器、调速控制器及电压调

节器,从水平、竖直两个方向对实验轮盘的运行情况进行监测。所使用电涡流传感器探头为本特利高性能位移传感器,探头直径 $\Phi = 5 \text{ mm}$,测试线性范围 $0.2 \sim 2.3 \text{ mm}$,输出分辨率 -7.87 V/mm ,频响 10 kHz ,同时采用 PCI 高速采集卡,保持 4 通道同时在线采样频率在 100 kHz 。为便于探究电涡流叶尖定时技术在工程实践中的应用,本实验所监测的叶片尖端厚度为 3 mm ,与实际工程中透平机械的叶尖端面的厚度相符合,尺寸略小于测试用电涡流传感器的探头内径。传感器及机匣的安装根据工程实践中透平机械叶片同机匣的安全准则,通过螺旋测微仪进行间隙值调节,设定叶尖间隙值(传感器到齿的距离)范围在 $0.5 \sim 3 \text{ mm}$,同时为确保叶尖间隙测量系统免受损伤,安装的传感器须与机匣衬套平行,要求测量精度达微米级,如图 1 所示。



1—基座; 2—机匣(传感器支架); 3—棘轮; 4—传感器探头;
5—传感器传输线路; 6—键相齿轮; 7—电机
(a) 主体结构



1—调速控制器; 2—前置控制器; 3—电压调节器
(b) 辅助结构

图 1 叶尖间隙测量实验装置

Fig. 1 The blade tip-timing measurement test bench

2.2 测试标定

由于被测叶片的靶面积内径远小于传感器技术参数要求中的最小靶面积内径 15 mm, 因此这类电涡流传感器在传统转子轴系测振中可以应用的线性范围(0.2 ~ 2.3 mm)将无法在叶尖间隙测量中适用, 必须对电涡流传感器输出的原始信号进行一定分析处理, 在无法利用线性范围和输出分辨率的情况下将电信号转化为叶尖间隙值。为解决这一技术问题, 提出一套应用于叶尖定时测量的测试标定方案。根据具体的测试情况(叶片的厚度、叶轮的工作转速等)进行测试前的标定, 对于电涡流传感器与被测叶片组成的系统, 详细研究两者的相对空间位置, 对不同间隙、不同周向相对位置的被测叶片进行静态标定或工作转速下的动态标定。

叶片的静态标定是在停机状态下进行, 分为径向标定和周向标定两个部分。保持叶轮相对于转子轴静止, 通过旋转电涡流传感器对被标定叶片的叶尖间隙进行调节, 利用螺旋测微仪准确读取数值, 同时测试不同间隙值对应的输出电压幅值, 此为径向静态标定部分。调节叶尖定时传感器至所关心的叶尖间隙值并固定, 根据实际传感器探头端部与叶尖的几何尺寸, 将叶尖通过传感器的时间历程合理的划分为若干相等节段, 默认叶片通过传感器的整个时间历程内叶尖间隙值保持不变; 在整个叶尖通过传感器的时间历程中, 沿着叶片旋转方向调整叶尖的相对空间位置, 分别读取每个节段静态下对应的测试信号电压幅值, 此为周向标定部分。

本实验采用叶片的静态标定技术, 通过螺旋测微仪的实际测量将水平和竖直两个方向的叶尖定时传感器调节至距叶尖端 0.7 mm、1 mm 及 2 mm 的基准位置, 此时传感器相对于所有叶片的叶尖间隙值相对一致, 将这 3 个间隙值设定为关心的叶尖间隙值, 读取所对应的输出电压幅值, 完成对叶片的径向静态标定, 如图 2 所示。针对本实验台所采用的 PLC 信号采集卡的性能参数指标, 经实验验证, 测量误差在 ± 0.05 mm 水平下; 如提高采集卡的采样频率等级或传感器的数量, 则可进一步提高测量精度。

由于电涡流探头的最大频响为 10 kHz, 随着转速的升高会产生周向采样误差, 即无法采集到叶片几何中心线和探头端面几何中心线相重合时的信号, 所以必须在径向标定的基础上进行周向静态标定。根据叶尖端面与探头端面的实际尺寸情况, 将叶片通过传感器的时间历程划分为 9 个标定点, 8

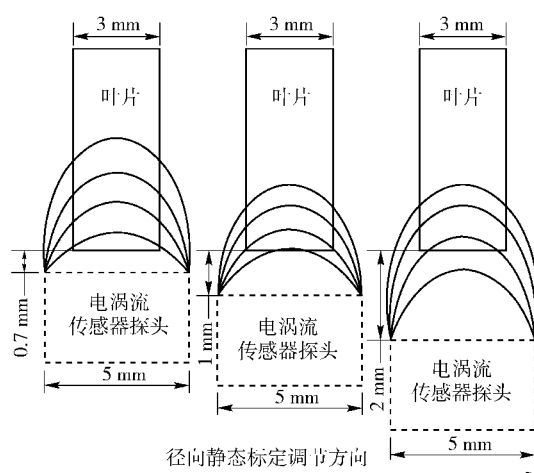


图2 叶片的径向静态标定

Fig.2 Blade radial direction static calibration

个等步长, 求得被测叶片在整个时间历程内不同相对空间位置的测试信号幅值变化关系, 以此消除周向采样误差。周向静态标定过程如图 3 所示。

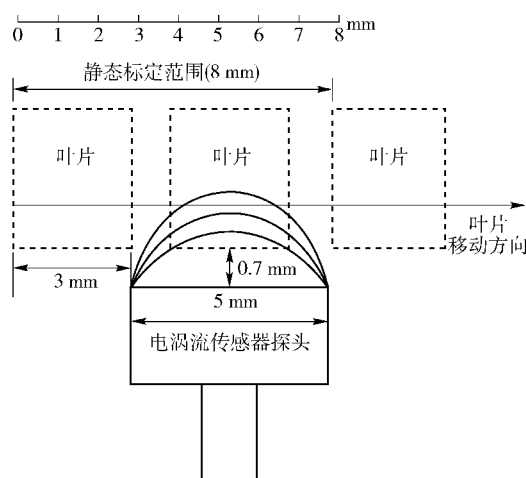


图3 叶片的周向静态标定

Fig.3 Blade circumferential direction static calibration

将叶尖间隙值调节至 0.7 mm 作为基准值, 测试仪器分别读取 32 个叶片所对应的测试信号幅值。按照图 3 所示的 9 个标定点进行周向静态标定, 分别读取 32 个叶片通过传感器整个时间历程内对应的 9 个测试信号幅值, 将 32 个叶片的平均测试信号幅值作为静态标定的结果, 即径向静态标定中 0.7 mm 叶尖间隙值所对应的信号幅值为 $V_{\text{平均}} = -5.43$ V。叶片通过传感器的整个时间历程内 9 个标定点所对应的信号幅值为 $V_{0,\text{平均}} = -20.62$ V, $V_{1,\text{平均}} = -17.95$ V, $V_{2,\text{平均}} = -10.48$ V, $V_{3,\text{平均}} = -6.18$ V, $V_{4,\text{平均}} = -5.42$ V, $V_{5,\text{平均}} = -6.76$ V, $V_{6,\text{平均}} = -10.84$ V, $V_{7,\text{平均}} = -16.65$ V, $V_{8,\text{平均}} = -20.37$ V。

通过 Fourier 算法对周向标定结果进行曲线拟合,如图 4 所示。

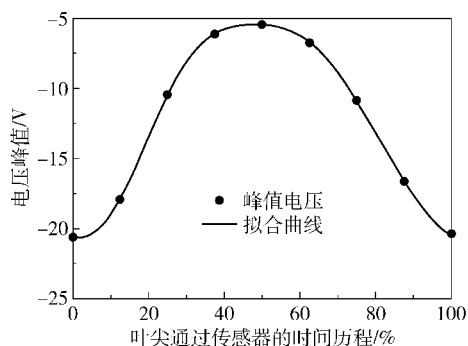


图 4 Fourier 静态标定拟合曲线

Fig. 4 Fourier static calibration fitted curve

2.3 实验结果与分析

在完成叶尖间隙静态标定的基础上,将实验台的叶尖间隙调节至 0.7 mm,在 500 ~ 4000 r/min 区间的 8 个运行转速下进行叶尖间隙测量实验。根据静态标定拟合曲线实时对测试原始数据进行后处理,计算出不同转速下的叶尖间隙值。

对测试系统进行采集设置,采样频率为 100 kHz,在每组测试周期为 30 s,在线采集 3 个方向的叶尖定时信号和键相信号。提取测试原始信号进行后处理,500 ~ 2000 r/min 叶尖定时信号原始波形如图 5 所示,2000 ~ 4000 r/min 叶尖定时信号原始波形如图 6 所示。经过对比不同工况下的测试信号图谱,得出结论:随着转速的增加叶尖所对应的电压峰值(绝对值)逐渐增大,由 5.10 V 递增至 12.90 V。

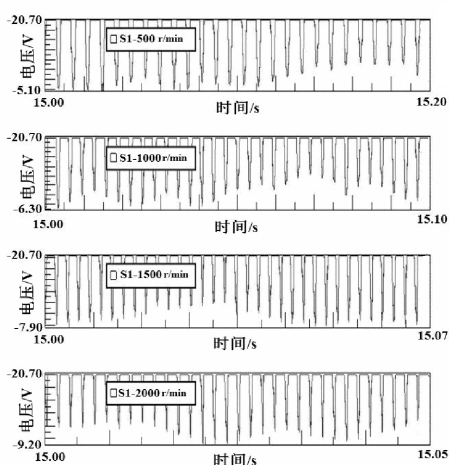


图 5 500 ~ 2000 r/min 叶尖定时信号原始波形

Fig. 5 The original signal waveform of blade tip-timing at 500 ~ 2000 r/min

经过大量电涡流法叶尖间隙实验研究,总结分

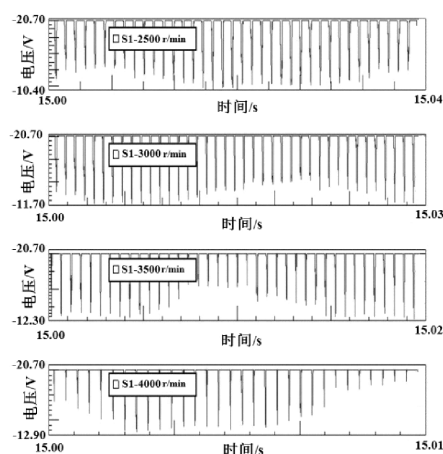


图 6 2000 ~ 4000 r/min 叶尖定时信号原始波形

Fig. 6 The original signal waveform of blade tip-timing at 2000 ~ 4000 r/min

析出电压绝对值随转速递增的原因:由于整个测试过程均采用最高采样频率 100 kHz 保持不变,电涡流传感器相对于叶尖部分的采样点数随转速的升高逐渐减小,信号中峰值所对应的采样点逐渐远离电涡流传感器探头端面的几何中心线,从而引起动态采样时对应的传感器灵敏度大于径向标定时处于几何中心线的传感器灵敏度;另外,电涡流传感器的频响范围决定了采样数据中会存在大量的虚值数据,在高转速下引起真值数据点远离电涡流传感器探头端面的几何中心线。以 500 r/min 运行工况为例,计算此工况下某叶片叶尖间隙值的大小。拾取 7 号叶片叶尖通过 1 号叶尖定时传感器的时间历程信号,一共获取时间历程采样点 125 个,其中拾取第 64 个点的电压值 $V_{64} = -5.10$ V,所对应的时间历程点 $t_{64} = 8 \times 64 / 125 = 4.096$,代入 Fourier 拟合曲线公式进行计算,得出此采样点对应的静态标定电压值 $V_{\text{标定}} = -5.41$ V,则对应的真实灵敏度 $S_{64} = V_{\text{标定}} / d_{\text{center}} = -5.41 / 0.70 = -7.72$ V/mm,所以 500 r/min 运行状态下叶尖间隙为 $d = V_{64} / S_{64} = 0.661$ mm。运用上述处理方法对 1000 ~ 4000 r/min 运行工况下的测试数据进行后处理,所测得叶尖间隙值如表 1 所示。从表中可以发现在 1000 ~ 4000 r/min 范围内,叶尖间隙值随着转速的升高呈略微减小的趋势。分析其原因可能为:(1)随着运行转速逐渐增大,轮盘整体所受的离心力逐渐增大,引起轮盘及叶片沿径向应变不断增大,从而使叶尖间隙值呈减小的趋势;(2)由于实际转子系统本身存在一定的不平衡量,在未超过临界转速的运行范围内,随着转速的增大,系统产

生振动幅值逐渐增大,从而造成叶尖间隙值随振动逐渐减小。

表 1 叶尖间隙测量

Table 1 Blade tip clearance measurements

叶轮运行转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	输出电压峰值 (绝对值)/V	叶尖间隙值/ mm
500	5.10	0.661
1000	6.34	0.673
1500	7.91	0.656
2000	9.27	0.648
2500	10.44	0.642
3000	11.75	0.635
3500	12.33	0.621
4000	12.90	0.617

3 叶片定时测振实验

以本文实验台的目标叶片为例,通过获取第 i 个叶片在第 j 圈叶尖定时实际到达时间及理论角基准到达时间,可以经过式(2)~(5)的计算获得目标叶片在第 j 圈的振动幅值。

$$\Delta t_{ij} = t_{ij} - t_{0ij} \quad (2)$$

$$\Delta \theta_{ij} = 2\pi \Delta t_{ij} / T \quad (3)$$

$$y_{ij} = R \Delta \theta_{ij} \quad (4)$$

$$A_{ij} = (y_{imax} + y_{imin}) / 2 \quad (5)$$

对 4200 r/min 运行转速下的叶轮进行测试,从整组测试数据中提取某一周期(9.50~9.52 s)内 32 个叶片的叶片定时信号及转速同步信号,如图 7 所

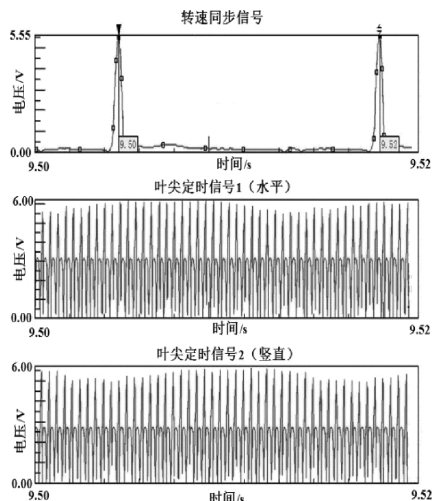


图 7 叶尖定时测振实时采样图

Fig. 7 Online acquisition graph of blade tip-timing vibration measurements

示。将转速同步信号转化为此周期内每个叶片相对应的角基准信号,与叶尖定时信号 1(水平方向)及叶尖定时信号 2(竖直方向)进行对比。

随后对 3 组信号进行实时后处理,通过后处理计算得到此周期内所有叶片的到达时间差及叶片振动幅值曲线图。此周期内所有叶片的到达时间差值相对于零点上下波动,相对于无振动状态下的“理想到达时间点”,叶片主要为提前到达,少数为滞后达到,其中 11 号叶片的提前到达时间差最大为 7.07×10^{-6} s, 21 号叶片的滞后时间差最大为 -2.47×10^{-6} s。同一周期内叶片的振动幅值同样呈现为正弦曲线,最大振幅为 9 号叶片的 0.387 mm,如图 8 所示。

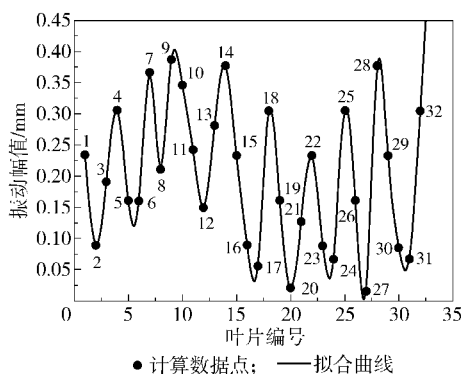


图 8 4200 r/min 运行状态下同一周期内所有叶片的振动幅值曲线图

Fig. 8 Vibration amplitude of all blades at 4200 r/min

4 结论

本文提出的基于电涡流法的叶尖定时测量方法以仿工程实验为研究手段,依据标定中绘制出的拟合曲线,将测试信号的输出电压转化为实际叶尖间隙值。在不同转速下(1000~4000 r/min),通过后处理计算的叶尖间隙值随转速的升高呈略微减小的趋势,测试结论符合理论分析结果。在完成叶尖间隙测量的同时,结合转速同步信号进行叶片振动参数的识别,通过叶尖定时算法可获取恒速运行下同一周期内所有叶片的振动幅值。

参考文献:

- [1] 李孟麟. 融合叶尖定时信号的旋转机械转子故障诊断技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011: 1-4.
Li M L. Research on fault diagnosis of rotating machinery rotor with blade tip-timing data[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011: 1-4. (in Chinese)

- [2] 欧阳涛, 郭文力, 段发阶, 等. 基于叶尖定时的旋转叶片同步振动辨识新方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 249–254.
Ouyang T, Guo W L, Duan F J, et al. New method for identifying rotating blades synchronous vibration based on tip-timing[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 249–254. (in Chinese)
- [3] 曾军, 王鹏飞. 民用航空发动机涡轮叶尖间隙主动控制技术分析[J]. 航空科学技术, 2012, 4(2): 1–6.
Zeng J, Wang P F. Analysis on turbine active clearance control technology of civil aircraft engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2012, 4(2): 1–6. (in Chinese)
- [4] 黄春峰, 侯敏杰. 航空发动机叶尖间隙技术研究[J]. 测控技术, 2011, 27(3): 27–32.
Huang C F, Hou M J. Technology for measurement of blade tip clearance in an aeroengine[J]. Measurement and Control Technology, 2011, 27(3): 27–32. (in Chinese)
- [5] 张娜, 黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 未来测量, 2010, 13(7): 41–45.
Zhang N, Huang C F. Measuring technology of blade tip clearance of aeroengine[J]. Future Measurement, 2010, 13(7): 41–45. (in Chinese)
- [6] Chana K S, Cardwell M T, Sullivan J S. The development of a hot section eddy current sensor for turbine tip clearance measurement[C] // Proceeding of ASMS Turbo Expo, Texas, USA, 2013: 35–46.
- [7] Abdul-Aziz A, Woike M, Baaklini G, et al. Turbine engine disk rotor health monitoring assessment using spin tests data[C] // Proc SPIE, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems Integration, San Diego, USA, 2012: 32–43.
- [8] Mandache C, McElhinney T, Mard N. Aircraft engine blade tip monitoring using pulsed eddy current technology[C] // 4th International Symposium on NDT in Aerospace, Augsburg, Germany, 2012: 27–36.

A blade tip-timing measurement study based on eddy current technology

WANG WeiMin SHANG Wen YAO JianFei CUI Jin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A blade tip-timing measurement method based on eddy current technology has been proposed using the electromagnetic induction principle. The relationship between output voltage signal and tip clearance variation was achieved by blade calibration, and the blade tip-timing signal was collected by a high-speed data acquisition device. The measurement signal was calculated by post-processing with a reasonable algorithm in order to obtain the blade tip clearance and blade vibration parameters in the operating state. The test results were consistent with theoretical analysis in a test bench, which indicated that the method gives accurate blade tip clearance and blade vibration amplitude data. Furthermore, compared with the traditional capacitance technology and optical fiber technology, our new method is better able to resist environmental interference, has a higher engineering practical value, and performs long-term condition monitoring tasks effectively.

Key words: blade tip tip-timing measurement; eddy current technology; static calibration; blade tip clearance; blade vibration