

基于叶尖间隙测量的航空发动机转子振动预测

沈响响¹, 陈 果², 胡 伟³, 李成刚³

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 通用航空与飞行学院, 江苏 溧阳 213300;

3. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 基于叶尖间隙测量, 进行了航空发动机转子振动位移和轴心轨迹的预测方法研究, 建立于叶尖间隙变化动态模型, 对叶尖间隙变化进行了数值计算以及有限元仿真, 并针对带机匣的转子试验器进行了试验研究。采用电涡流传感器对相互垂直的两个测点进行叶尖间隙测试; 通过 Hilbert-Huang 变换对信号进行处理, 提取其低频分量; 再利用互相关分析方法提取出转频信号, 并由转频分量绘制了轴心轨迹; 与直接测得同截面转轴上的轴心轨迹相比, 两者的吻合度达到 90% 以上, 试验结果充分表明了研究方法的正确有效性, 为通过叶尖间隙测试间接获取转子振动位移提供了有效的技术途径。

关 键 词: 叶尖间隙; Hilbert-Huang 变换; 互相关分析方法; 轴心轨迹; 转子振动

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

Vibration prediction of aero-engine rotor based on tip clearance measurement

SHEN Xiangxiang¹, CHEN Guo², HU Wei³, LI Chenggang³

(1. College of Civil Aviation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of General Aviation and Flight,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Liyang Jiangsu 213300, China;

3. Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Based on the measurement of tip clearance, the prediction method of aeroengine rotor vibration displacement and axis trajectory was studied. Based on the dynamic model of tip clearance change, the numerical calculation and finite element simulation of tip clearance change were carried out, and the experimental research was carried out for the rotor tester with casing. The tip clearance of two measuring points perpendicular to each other was measured by eddy current sensor. The signal was processed by Hilbert Huang transform to extract its low-frequency component. The cross-correlation analysis method was used to extract the frequency conversion signal, and the axis trajectory was drawn from the frequency conversion component. Compared with the direct measurement of the axis trajectory on the rotating shaft of the same section, the coincidence degree of these two was more than 90%. The test

收稿日期: 2022-04-11

基金项目: 国防科工局中国航发自主创新专项(ZZCX-2018-013); 国家科技重大专项(J2019-IV-004-0071)

作者简介: 沈响响(1997—), 男, 博士生, 主要从事转子振动、叶片振动监测研究。

通信作者: 陈果(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事发动机整机振动、状态监测与故障诊断研究。

E-mail: cgnaacca@163.com

引用格式: 沈响响, 陈果, 胡伟, 等. 基于叶尖间隙测量的航空发动机转子振动预测[J]. 航空动力学报, 2022, 37(12): 2840-2850. SHEN Xiangxiang, CHEN Guo, HU Wei, et al. Vibration prediction of aero-engine rotor based on tip clearance measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(12): 2840-2850.

results fully showed the correctness and effectiveness of the research method, providing an effective technical way to indirectly obtain the rotor vibration displacement through the blade tip clearance test.

Keywords: tip clearance; Hilbert-Huang transform; cross-correlation analysis; axis orbit; rotor vibration

航空发动机结构复杂、工况多变, 由于机匣的包容性, 难以直接测得工作过程中转子系统的实际振动情况, 因此无法了解转子系统的振动情形, 为实际的航空发动机故障分析和诊断带来了很大困难。然而, 由于旋转叶片尖端与发动机机匣内壁之间的叶尖间隙参数与发动机的效率、压比、燃油消耗率、稳定性等直接相关^[1], 是提升发动机性能的关键^[2], 因此实际航空发动机的叶尖间隙测试成为发动机的重要测试项目。目前, 国内外常用的叶尖间隙测量技术通常有放电探针法^[3]、电涡流法^[4]、反射式光纤法^[5]、光导探针法^[6]、电容法^[7]、超声波法以及微波法^[8]等。叶尖间隙显然受发动机工作时热应力、转子转动时产生的离心力和机匣内外压差等因素的影响。Kypuros 等提出了一种涡轮叶尖间隙的简化模型^[9], 该模型考虑发动机工作时热应力、转子转动时产生的离心力和机匣内外压差等因素对间隙变化的影响, 分别计算出机匣、轮盘和叶片在热应力和机械应力下径向位移随转速的变化。詹江正等^[10]研究了某型发动机轴流高压压气机第 12 级转子与机匣在运行过程中受温度、气动和离心载荷综合作用的径向变形。郭政波等^[11]进行了涡轮叶尖间隙的变化机理研究, 建立了机匣、叶片和转子的简化模型, 研究了发动机地面起动时涡轮叶尖间隙动态变化规律。但是, 由于转子振动位移导致的叶尖间隙变化往往与叶片通过频率一起叠加在转静间隙信号之中, 因此, 可以利用信号分析的方法将其分离出来。

基于此, 本文拟针对带机匣的转子试验器, 利用信号处理方法, 研究一种基于叶尖间隙测试的转子振动预测方法。首先, 建立了叶尖间隙变化的简化动态模型, 进行了叶尖间隙变化机理分析, 对试验器的叶片与转子盘进行了有限元计算仿真, 发现在试验转速下, 转子盘的振动对叶尖间隙变化影响很大。然后, 采用电涡流法, 利用两支互成 90°电涡流传感器在进行了叶尖间隙测试, 利用希尔伯特-黄变换和互相关方法, 从叶尖间隙信号中提取出转子振动基频, 并进而获取转子测试截面的轴心轨迹。最后, 在相同截面, 利用两支互成 90°的电涡流传感器直接测取转子轴心轨迹,

利用将基于叶尖间隙测试的轴心轨迹和直接测到的轴心轨迹进行比较, 以验证本文方法的正确有效性。

1 叶尖间隙变化机理分析及模型

1.1 叶尖间隙变化机理

叶尖间隙变化的原因主要是发动机的静止或者转动部件受到大量负载而产生位移或者变形。负载主要包括两种: 发动机负载和飞行负载。发动机负载包括离心力、热应力、发动机内压和推力负载; 飞行负载包括惯性力(重力)、空气动力学力(外部环境压力)和陀螺负载^[12]。如图 1 所示, 发动机负载可产生对称的和不对称的间隙变化, 飞行负载引起非对称的间隙变化。

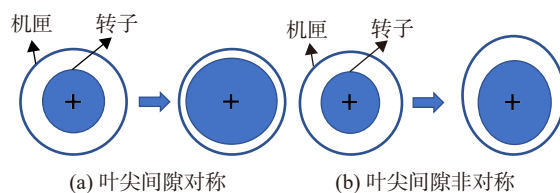


图 1 对称与非对称叶尖间隙变化示意图

Fig. 1 Diagrams of symmetry and asymmetry tip clearance variation

1.2 叶尖间隙变化的动态模型

叶尖间隙动态模型主要由四部分构成, 分别是机匣、叶片、转盘和转轴。由于其各自所处的工作环境不同, 应分别分析计算其在温度、压力、离心力等因素作用下的径向形变。但根据本文试验中所使用的试验器为航空发动机简化模型, 且由外部电动机驱动, 所以本文只考虑离心力、转子盘振动对叶尖间隙的影响。

总的叶尖间隙的变化式如下:

$$d(t) = r_{\text{case}}(t) - r_{\text{rotor}}(t) - r_{\text{blade}}(t) - a(t) \quad (1)$$

式中 $d(t)$ 、 $r_{\text{case}}(t)$ 、 $r_{\text{rotor}}(t)$ 、 $r_{\text{blade}}(t)$ 、 $a(t)$ 表示叶尖间隙、机匣内径、转子盘外径、叶片长度和转轴振动幅值随时间的变化。

由式(1)可得叶尖间隙的变化

$$d(t) = r_{\text{case}} - (r_0 + u_{r1}) - (l_0 + u_{b1} + u_{b2}) - a \quad (2)$$

式中 r_{case} 为机匣内半径, r_0 为转子盘初始半径, u_{r1}

为转子在离心力作用下的径向位移变化, l_0 为叶片的初始长度, u_{b1} 为叶片在离心力作用下的径向位移, u_{b2} 为叶片振动幅值, a 为转子振动幅值。

2 基于叶尖间隙测量的航空发动机转子振动预测方法

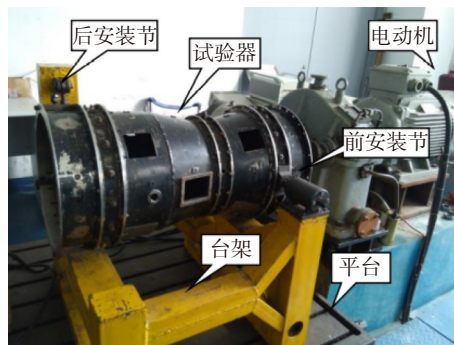
2.1 带机匣的转子模型试验器简介

本文叶尖间隙测量所采用的试验器模型外形与发动机核心机基本相同, 但尺寸减小到初始尺寸的 1/3; 试验器内部结构采用 0-2-0 支架结构, 多级压气机简化为单级的盘片结构, 叶片简化成平面, 涡轮也做同样简化。轴为实心刚性轴, 最大运行速度 7 000 r/min, 试验器由电动机驱动, 形成了单转子航空发动机系统的典型模型。试验器的实物图以及剖面图分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。

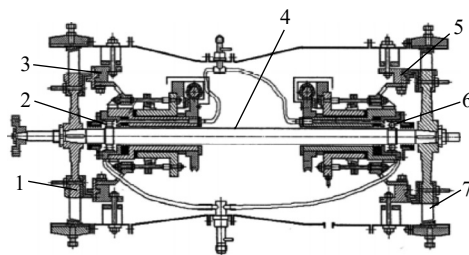
2.2 试验方案

为研究航空发动机叶尖间隙变化原因, 设计并搭建了叶尖间隙测试试验台。该试验台主要由发动机叶尖间隙测试试验器与信号采集、分析系统两个部分构成, 叶尖间隙测试系统示意图如图 3 所示, 图 4 为电涡流传感器测量叶尖间隙及轴振的详细布局示意图, 现场试验如图 5 所示。

信号采集与分析系统主要包括扬州晶明科技有限公司的 E02 电涡流传感器与 JM5936 数据采集器, 如图 6 所示。采样频率为 8 000 Hz。安装



(a) 叶尖间隙测量试验器实物图



1 压气机转子; 2 滚棒轴承; 3 压气机静子; 4 轴; 5 涡轮静子; 6 球轴承; 7 涡轮转子。

(b) 叶尖间隙测量试验器剖面图

图 2 带机匣的转子试验器实物图与剖面图

Fig. 2 Physical and sectional drawings of rotor tester with casing

在机匣上面的电涡流传感器通过电磁感应测量叶尖到传感器端面的距离并产生电压信号输出, 信号经由信号放大器、信号采集器后, 输入到计算机。再通过本文信号分析方法得到转轴振动位移信号, 并进而获得该截面的轴心轨迹图。

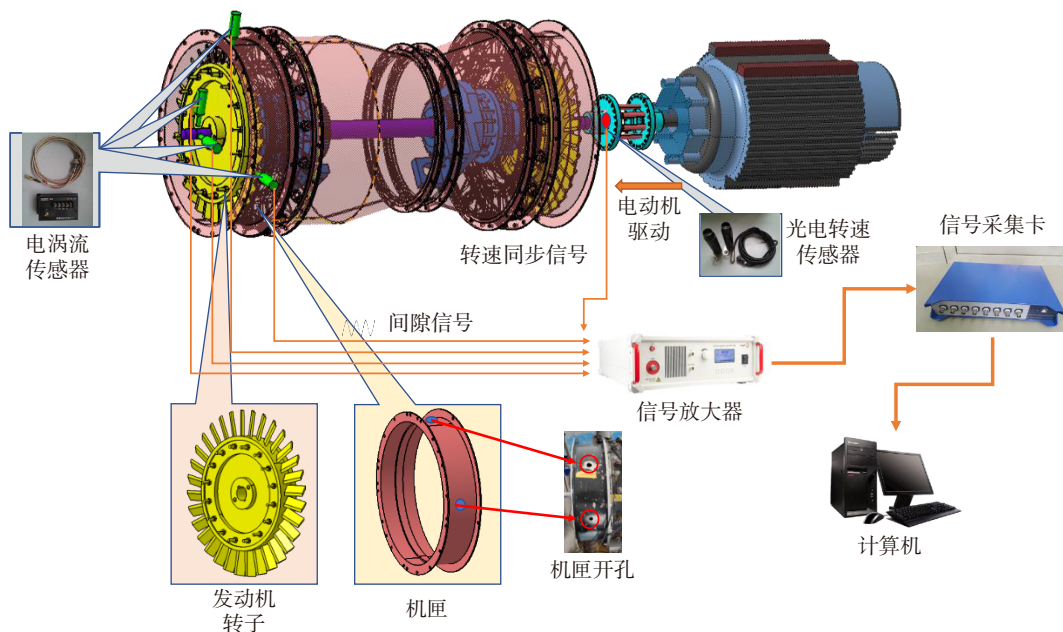


图 3 叶尖间隙测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tip clearance test system

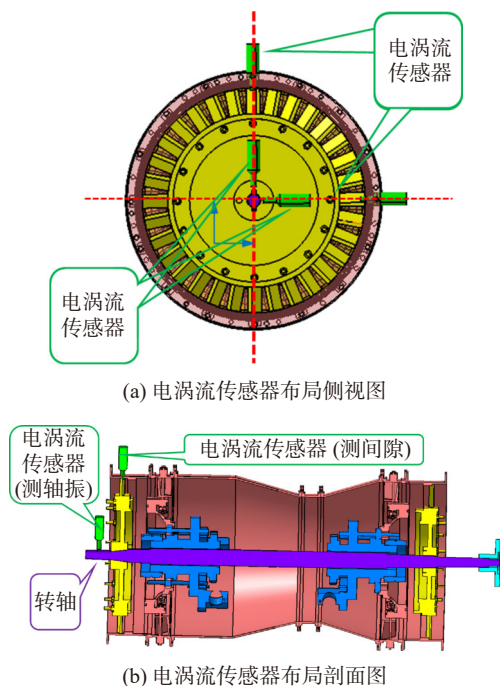


图 4 电涡流传感器布局示意图

Fig. 4 Schematic layout of eddy current sensors

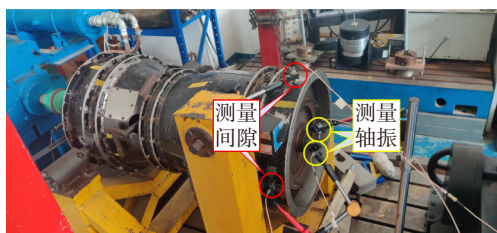


图 5 叶尖间隙测试现场图

Fig. 5 Field test diagram of tip clearance



图 6 E002 电涡流传感器及 JM5936 采集器

Fig. 6 E002 eddy current sensor and JM5936 collector

2.3 转静间隙影响因素仿真分析

2.3.1 试验器转子旋转中机匣变形分析

航空发动机转子试验器机匣的几何形状是环状结构, 机匣包裹着叶片。试验器通过刚性支架固定, 并安装在试验平台上。前安装节位于压气机静子机匣左右两侧, 采用螺栓结构固定在支架上, 结构如图 7(a)所示。后安装节位于涡轮静子机匣左侧(顺航向看), 通过铰链悬挂吊起试验器

尾部, 如图 7(b)所示。本文采用电涡流传感器进行叶尖间隙测量, 需要在机匣上开孔, 如图 7(c)所示, 因此机匣的内径变化无法对测量的间隙产生影响, 因此本文忽略了试验中机匣的尺寸变化。

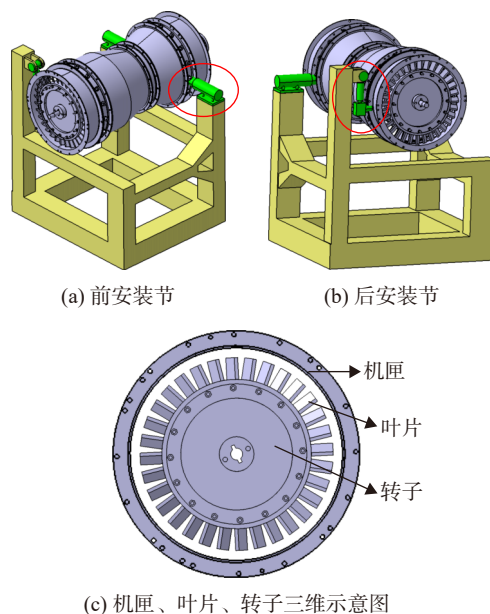


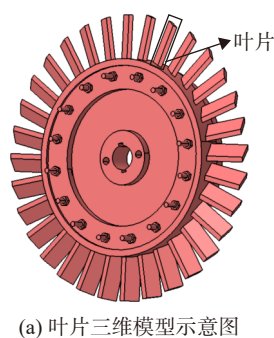
图 7 试验器安装节安装位置与机匣示意图

Fig. 7 Diagram of installation joint position and casing of tester

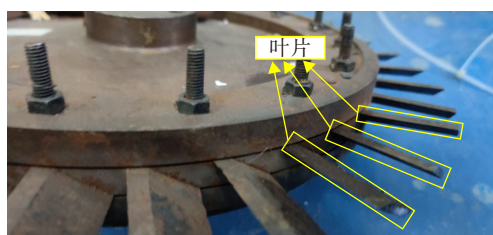
2.3.2 试验器转子旋转中叶片的变形分析

在三个部件中, 叶片为主要部件, 如图 8 所示, 叶片被安装在叶盘上面, 本文将叶片简化为一质量均匀的长方形薄片。

叶片的形变主要包括叶片所受离心力导致叶



(a) 叶片三维模型示意图



(b) 叶片实物图

图 8 叶片示意图

Fig. 8 Blade schematics

片产生形变以及叶片振动所导致的间隙值变化两部分。由于在实验室环境,叶片的外部激励很小,加之其固有频率很高,因此由振动带来的转静间隙变化可以忽略不计。

离心力的大小与转轴的角速度 $\omega(t)$ 、叶片质量 m 以及转动轴与叶片重心的距离 $l(t)/2+r_0(t)$ 成比例。根据应力应变关系可得变形量^[13]:

$$u_{bl} = \frac{m}{A} \left[\frac{l(0.5l+r_0)\omega^2}{E} \right] \quad (3)$$

其中 ω 为角速度随时间变化的函数, E 为叶片金属的弹性模量, m 为叶片质量, A 为叶片简化后的叶片横截面积。

2.3.3 试验器转子旋转中转盘的变形分析

将试验器中转子模型的转盘与叶根看作一个整体进行分析,将转盘与叶片模型简化成一个厚度均匀的圆盘,并且根据实际试验器条件,只考虑离心力引起的圆盘形变。

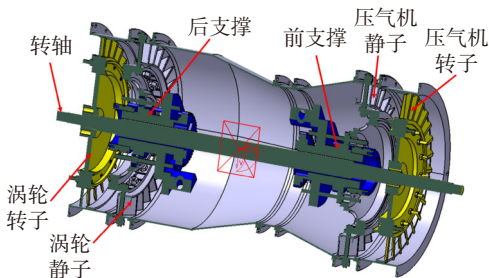
离心力作用下的转子径向变形量可估算为

$$u_{rl} = \frac{\rho_r \omega^2 r_0^3}{4E} (1-\mu) \quad (4)$$

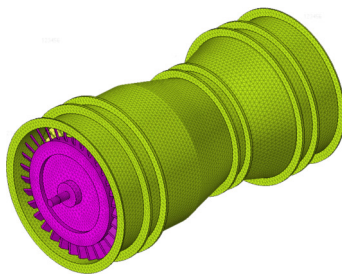
式中 r_0 为转子盘和叶根的初始半径长度, μ 为泊松比, ω 为角速度随时间变化的函数, E 为叶片金属的弹性模量, ρ_r 为材料密度。

2.3.4 试验器转子旋转中转轴的振动变形分析

除此之外,转轴的振动也会对叶尖间隙产生显著的影响,并且随着转速的增加,转轴的振动会越来越明显^[14]。本文建立了转子试验器的整机动力学模型,如图 9(a)为整机装配几何模型半剖图,将试验器的 Computer Aided Three-dimensional Interactive Application 模型以 Standard for the Product Model Data 格式导出,导入 Hypermesh 软件进行网格划分。Hypermesh 软件提供多种网格划分方式,精确控制网格规模及网格质量,实现高效高质量的有限元建模,图 9(b)为转子系统有限元模型。试验器转子和机匣所用材料为 30CrMnSi,如表 1 所示。



(a) 试验器整机装配几何模型半剖图



(b) 试验器整机有限元模型

图 9 试验器整机有限元及几何模型

Fig. 9 Finite element and geometric model of tester

表 1 材料参数

Table 1 Material parameter

弹性模量 $E/10^{11}$ Pa	密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	泊松比 μ
2.1	7 850	0.3

设置涡轮盘和压气机盘的不平衡量均为 1 000 g·mm。通过整机不平衡响应计算,通过有限元仿真得到测量点处转轴相对于机匣的振动位移幅值,如表 2 所示。

表 2 不同转速下转轴振幅

Table 2 Amplitude of shaft at different rotational speeds

转速/(r/min)	转轴振动/mm
600	0.587×10^{-3}
1 200	0.266×10^{-2}
1 800	0.100×10^{-1}
2 400	0.480×10^{-1}

2.3.5 不同转速下试验器叶尖间隙变化量的影响因素仿真分析

由上述分析可知,叶尖间隙值得影响因素主要包括叶片形变、转盘形变和转轴振动,其中,在不同转速下的叶片形变与转盘形变由式(3)与式(4)可得,结果如表 3 所示。根据以上分析,对叶尖间隙影响的因素主要包括叶片形变、转盘形变以及转轴涡动,如图 10(a)所示为不同转速下

表 3 不同转速下叶片与转盘形变

Table 3 Deformation of blade and disc at different rotation speeds

形变位置	转速/(r/min)			
	600	1 200	1 800	2 400
叶片/mm	5.73×10^{-5}	2.29×10^{-4}	5.15×10^{-4}	9.16×10^{-4}
转盘/mm	4.19×10^{-5}	1.68×10^{-4}	3.77×10^{-4}	6.70×10^{-4}

叶片形变、转盘形变以及转轴涡动幅值的大小,从图 10(b)可以看出各个转速下转轴涡动对叶尖间隙的影响都起到了主导作用。

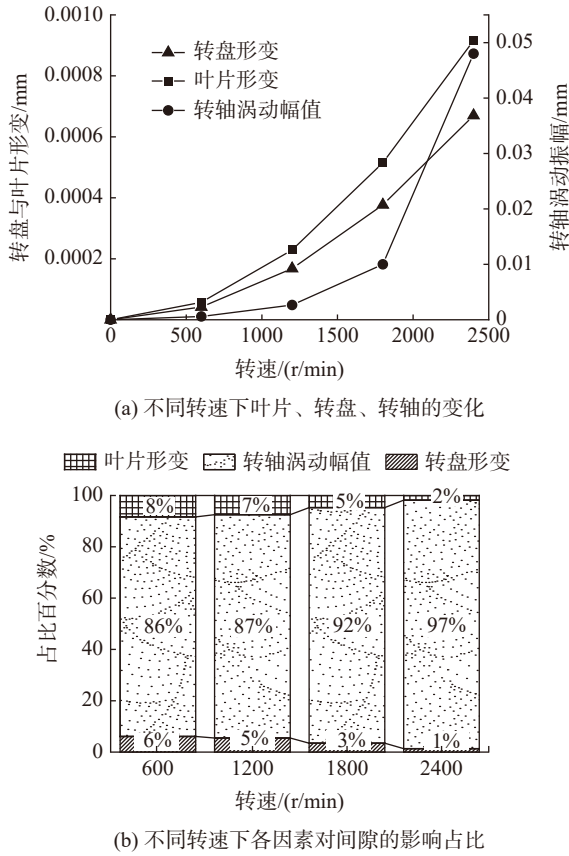


图 10 不同因素对叶尖间隙的影响

Fig. 10 Effects of different factors on tip clearance

3 叶尖间隙的转频分量提取方法

3.1 叶尖间隙信号的仿真模型

由文中第 2.3 节转静间隙影响因素仿真分析可知,转静间隙的影响因素主要包括叶片形变、转盘形变以及转轴涡动。在定转速下,前两者为额定值,后者为周期变化的函数。

为便于理解叶尖间隙测量原理,对叶尖间隙进行数值仿真分析。根据上述分析,可给出定转速下叶尖间隙值的函数表达式,如式(5)所示。

$$P = A_j \sin(2\pi \times R \times f \times t_i) + A_r \sin(2\pi \times f \times t_i) \quad (5)$$

其中 P 表示叶尖间隙脉冲信号, A_j 叶尖间隙值, A_r 为转轴振动幅值, f 为转速频率, R 为叶片数目, t_i 为间隔时间点, $i=1, 2, \dots, N$ 。

叶尖间隙仿真参数如表 4 所示。根据表 4 中数值仿真的参数,得到的仿真叶尖间隙信号及其频谱,如图 11 所示。图 12 为叶尖间隙试验信号

及其频谱,对比仿真和试验结果,可以看出两者的频谱结构是相似的,在此表明了叶尖间隙信号仿真模型的正确性。

表 4 叶尖间隙数值仿真参数

Table 4 Numerical simulation parameters of tip clearance

转速频率 f/Hz	仿真 时间/s	叶尖间隙 值 A_j/mm	叶片数目 R	转轴涡动 幅值 A_r/mm
20	1.0	0.001 5	32	0.000 1

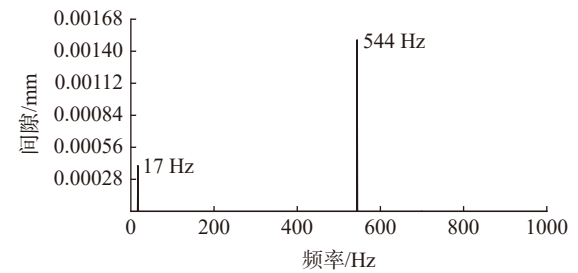
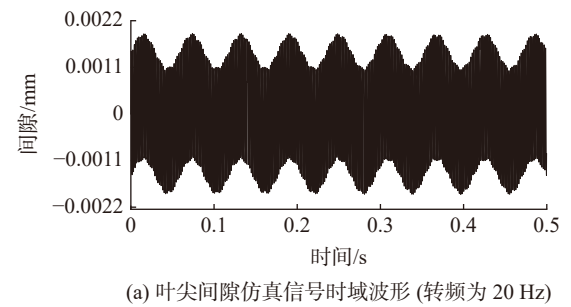
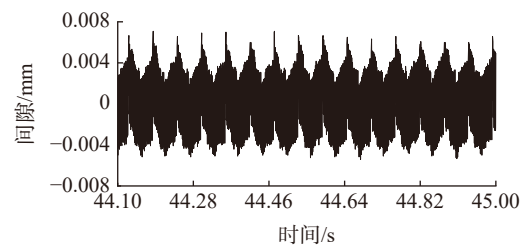
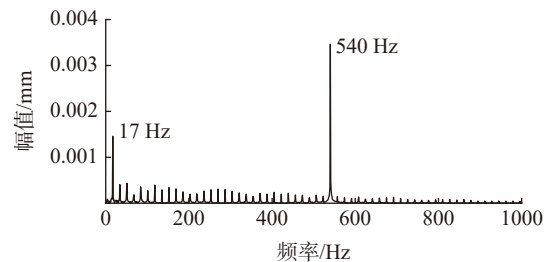


图 11 叶尖间隙仿真信号

Fig. 11 Simulation signal of tip clearance



(a) 叶尖间隙试验信号时域波形 (转频为 17 Hz)



(b) 叶尖间隙试验信号频谱

图 12 叶尖间隙试验信号

Fig. 12 Tip clearance experimental signal

3.2 基于叶尖间隙信号的转频分量提取方法

由上述分析可知,叶尖间隙信号为叶片通过频率的高频分量和转速频率及其倍频的低频分量的叠加而成,为了准确地从叶尖间隙信号中提取出转频分量,本文提出基于希尔伯特-黄变换和互相关分析的叶尖间隙信号的转频分量提取方法,方法流程如图 13 所示。

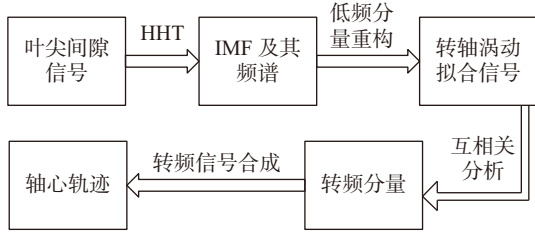


图 13 叶尖间隙信号的转频分量提取方法流程

Fig. 13 Extraction process of rotational frequency component of tip clearance signal

3.2.1 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换^[15](Hilbert-Huang transformation, HHT),主要包括两个部分,经验模态分解法(empirical mode decomposition, EMD)与提取本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)。这是一种非平稳、非线性信号分析方法,不需要事先选定基函数,具有良好的自适应性及优秀的时频分辨率^[16],而经验模态分解的过程,就是在“筛选”信号,具体流程参见文献[17-18]。

3.2.2 互相关分析方法

互相关法能在噪声背景下有效地提取有用信号。根据转子动力学知识,由转子不平衡量引起的响应是以旋转频率(基频)振动的谐波信号,然而,在实际转子系统振动测试中,所获取的振动信号往往还有其他干扰信号。因此,需要消除噪声干扰影响,准确获取在转子不平衡激励下的基频响应幅值和相位,而基于互相关分析的谐波信号提取技术是一种非常有效的方法,该方法只需要将基频信号和所测得的响应信号进行互相关处理即可实现。下面简单介绍该方法的原理。

设振动信号 $x(t)$ 为正弦信号与噪声信号的叠加,即

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi) + n(t) \quad (6)$$

其中 f_0 为正弦信号频率, $n(t)$ 为其他频率分量和噪声之和。将振动信号 $x(t)$ 与频率等于 f_0 、初相位等于 0 的正弦信号和余弦信号分别做互相关,

来提取基频信号的幅值及相位。设在 $[0, T]$ 范围内,正弦和余弦信号分别为

$$\begin{cases} y(t) = \sin(2\pi f_0 t) \\ z(t) = \cos(2\pi f_0 t) \end{cases} \quad (7)$$

将正弦信号 $y(t)$ 、余弦信号 $z(t)$ 分别与振动信号 $x(t)$ 做互相关运算

$$\begin{cases} R_{xy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t + \phi) \times A \sin(2\pi f_0 t) dt + \\ \quad \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \times n(t) dt \\ R_{xz}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t + \phi) \times A \sin(2\pi f_0 t) dt + \\ \quad \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t) \times n(t) dt \end{cases} \quad (8)$$

在式(8)中,第二个积分由于 $\sin(2\pi f_0 t)$ 和 $\cos(2\pi f_0 t)$ 与 $n(t)$ 不同频率且不同相,所以积分值均为 0。所以得

$$\begin{cases} R_{xy}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \times \\ \quad A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{A}{2} \cos \phi \\ R_{xz}(0) = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi f_0 t) \times \\ \quad A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{A}{2} \sin \phi \end{cases} \quad (9)$$

$$R_{xy}(0) = \int_0^T \sin(2\pi f_0 t) \times A \sin(2\pi f_0 t + \phi) dt = \frac{AT}{2} \cos \phi \quad (10)$$

由式(9)与式(10)可求出幅值以及相位,如式(11)与式(12)所示:

$$A = 2 \times \sqrt{R_{xy}^2(0) + R_{xz}^2(0)} \quad (11)$$

$$\phi = \arctg \frac{R_{xz}(0)}{R_{xy}(0)} \quad (12)$$

上述使用了连续信号来分析阐述互相关原理,但是在计算机处理信号时,只能处理数字信号。连续信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 经过离散采样后,离散序列分别为 $x(i)$ 、 $y(i)$ 、 $z(i)$,则离散互相关序列如式(13)与式(14)所示:

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x(i) y(i) \quad (13)$$

$$R_{xz}(0) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x(i) z(i) \quad (14)$$

实际的基频幅值与相位如式(15)所示:

$$\begin{cases} A_0 = 2 \times \sqrt{R_{xy}^2(0) + R_{xz}^2(0)} \\ \phi = \arctg \frac{R_{xz}(0)}{R_{xy}(0)} \end{cases} \quad (15)$$

由于根据式(15)得到的相位角范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$, 实际的基频相位应为: 当 $R_{xy}(0) < 0$ 时,

$\theta = \phi + \pi$, 当 $R_{xy}(0) > 0$ 且 $R_{xz}(0) < 0$ 时 $\theta = \phi + 2\pi$ 。

3.2.3 仿真信号的分解实例

对图 11(a)所示的叶尖间隙仿真信号进行希尔伯特-黄变换后, 可以得到两个本征模态函数, 如图 14 所示。可以看出, IMF1 信号的幅值与频率与仿真中的间隙信号一致, IMF2 信号的幅值与频率与仿真中的转轴涡动信号相同。

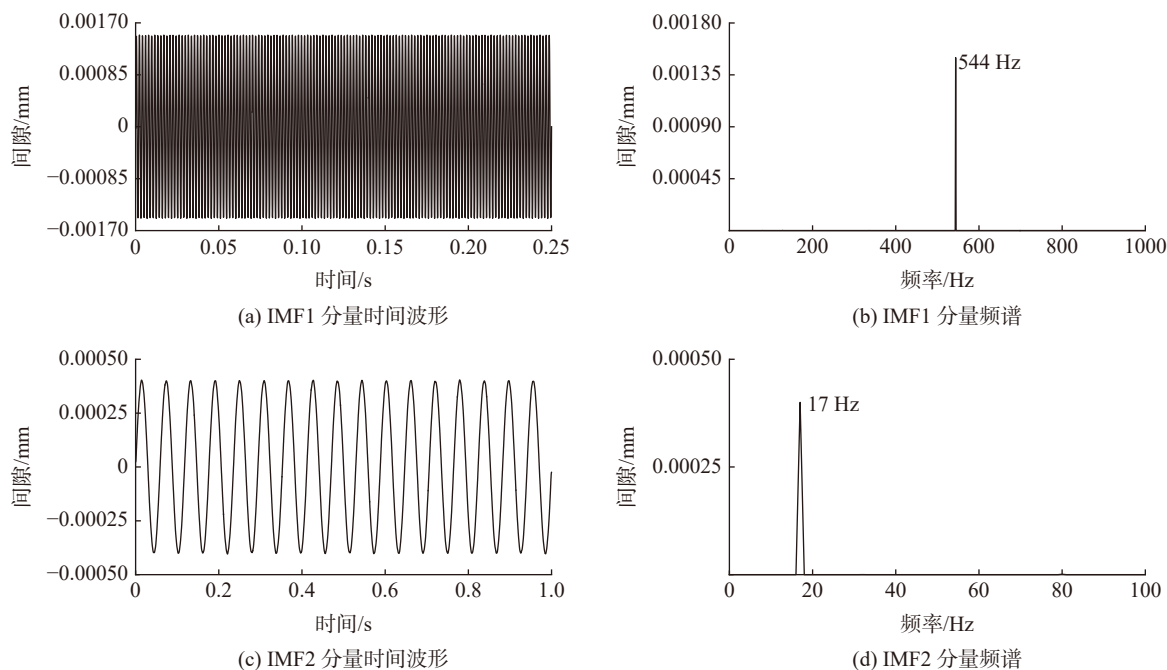


图 14 叶尖间隙仿真信号 HHT 结果

Fig. 14 HHT results of tip clearance simulation signal

考虑到实际低频信号中包含有转频及其倍频分量, 因此, 将 IMF 频率大于 10 倍转频的信号进行叠加作为高频的间隙脉冲信号, 其余 IMF 分量间隙叠加后作为低频的转轴振动信号, 再利用互相关方法提取出转速频率分量。

3.3 基于试验器叶尖间隙信号的实例分析

在转速为 1 038 r/min 下, 设定采样率为 8 000 Hz, 提取 1 s 数据进行分析。将原始信号去掉平均值后的信号如图 15 所示。

图 15 为叶尖间隙的动态变化值。对采集到的叶尖间隙原始信号进行 EMD 分解, 其结果如图 16 所示, 得到 9 个本征模态函数。

将频率低于 10 倍转频的 IMF 分量进行叠加作为转轴涡动信号, 与轴振信号达到了很好的相似度, 如图 17 所示。从图中可以看出间隙拟合轴振信号很好地反映出了叶尖间隙信号的整体变化情况, 即叶尖间隙信号中的低频信号变化。

对图 17 中经过 HHT 得到的信号与基频信号

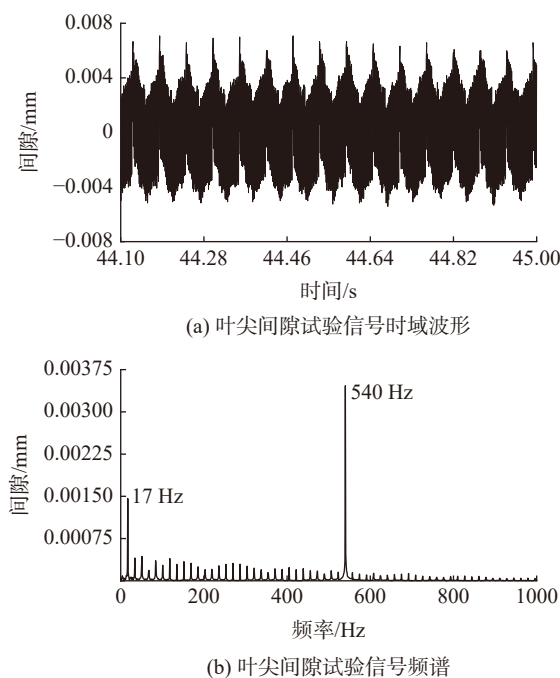


图 15 叶尖间隙仿真试验信号

Fig. 15 Simulation experimental signal of tip clearance

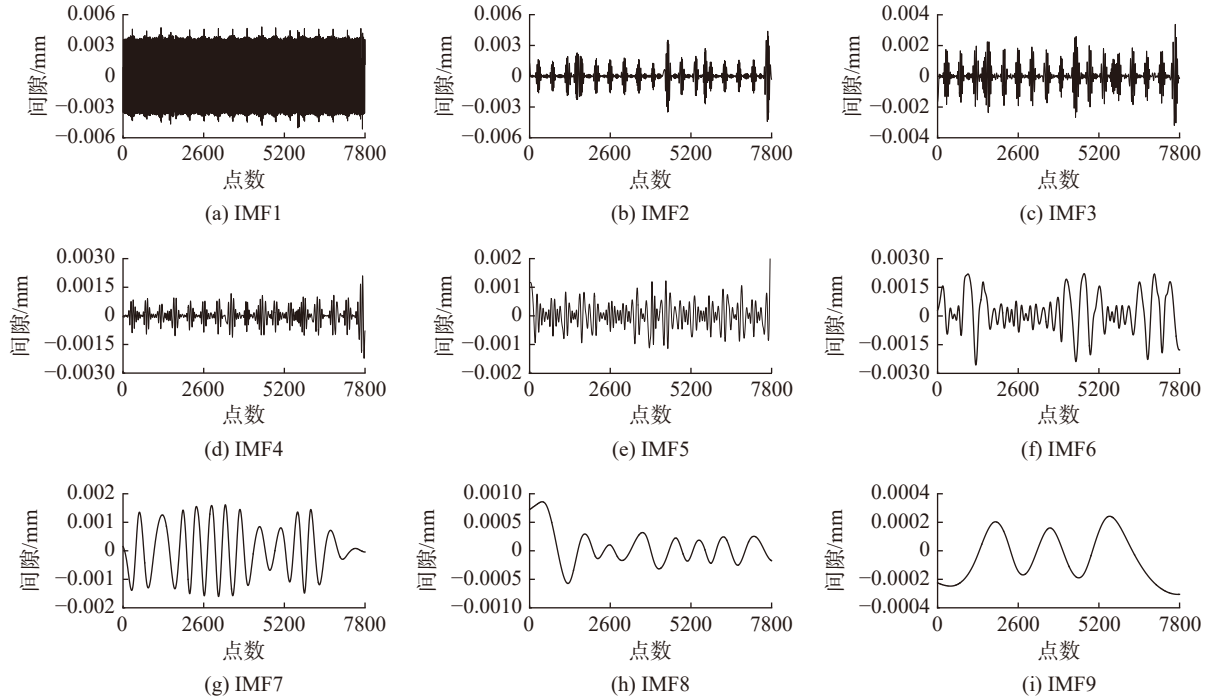


图 16 HHT 结果

Fig. 16 Results of HHT

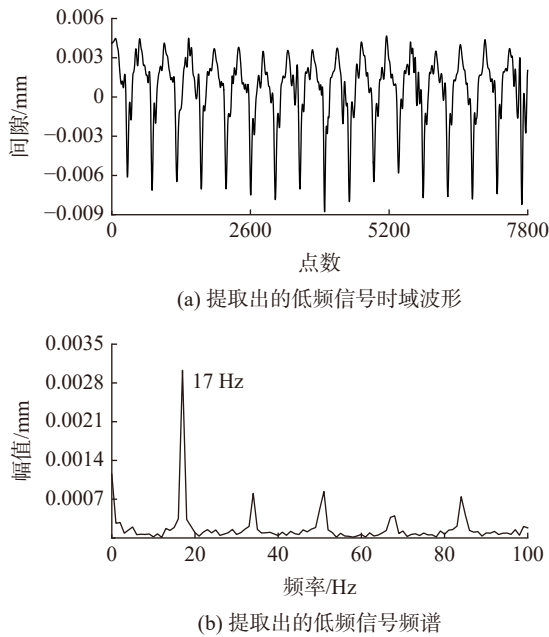


图 17 叶尖间隙真实试验信号

Fig. 17 Real experimental signal of tip clearance

进行互相关处理, 得到拟合轴振信号, 如图 18 所示, 绿色曲线表示的即为通过间隙信号拟合出的轴振信号。按照上述的方法对 Y 方向采集到的叶尖间隙信号进行分析, 然后得到 Y 方向叶尖间隙拟合轴振信号, 与得到的 X 方向拟合轴振信号绘制轴心轨迹图。

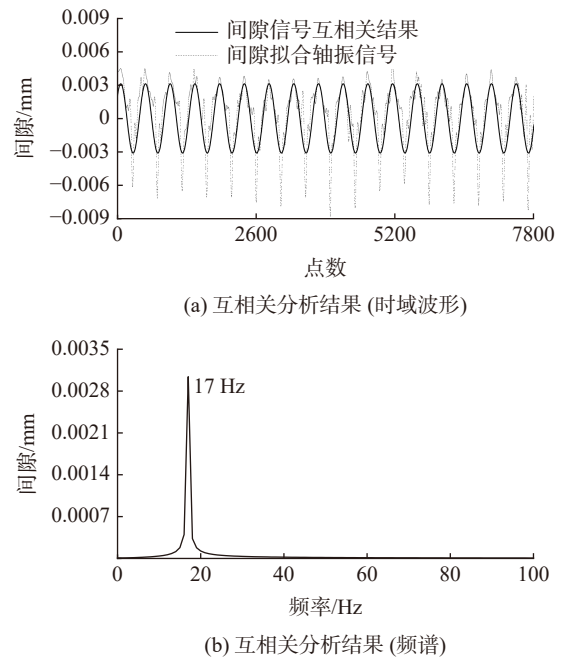


图 18 叶尖间隙试验信号互相关结果

Fig. 18 Cross correlation results of tip clearance experimental signals

3.4 试验结果验证分析

本文在试验时, 在转子盘临近位置同样安装了两支相互垂直的电涡流传感器, 直接对轴振信号进行采集。轴振信号采集传感器布局如图 4 所示。

对直接采集到得轴振信号与基频信号进行互相关处理。对 X 方向采集到的轴振信号与基频信号进行互相关分析, 可以过滤掉采集到的轴振信号中干的扰信号, 如图 19 所示。同理对 Y 方向原始轴振信号信号进行相同的处理, 然后与 X 方向信号合成后得到轴心轨迹, 如图 20 所示。

通过上述对叶尖间隙信号和对轴振信号的处理, 分别得到轴心轨迹图进行对比, 可以从图 21(a) 中可以看出, 从叶尖间隙信号中得到的轴心轨迹与直接测量轴振得到的轴心轨迹基本一致。如图 21(b) 为 2 000 r/min 转速下得到的轴心轨迹, 可以看出, 轴心轨迹幅值的预测与直接测量呈现出很好的吻合度。

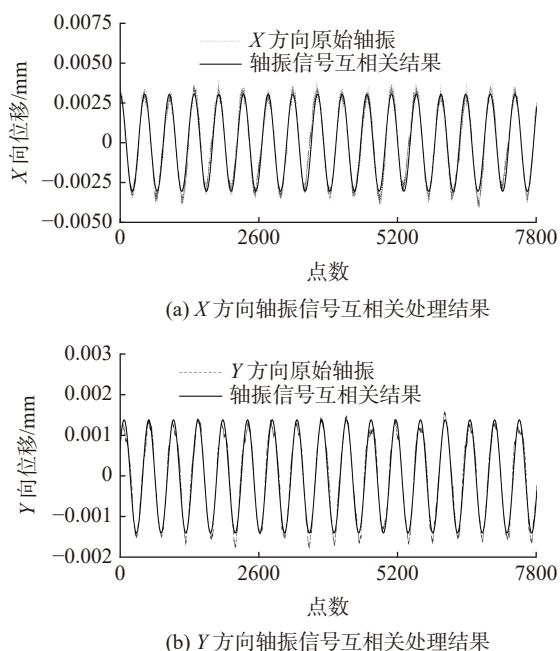


图 19 轴振信号互相关结果

Fig. 19 Cross-correlation results of axial vibration signals

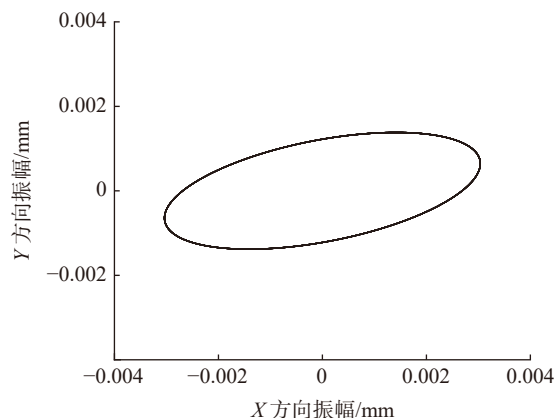
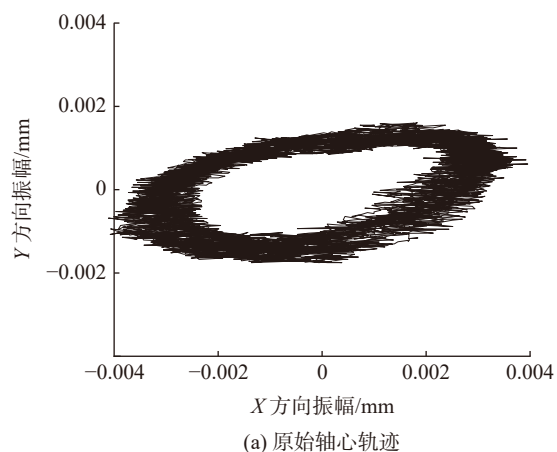


图 20 轴心轨迹提取结果

Fig. 20 Extraction results of axis orbit

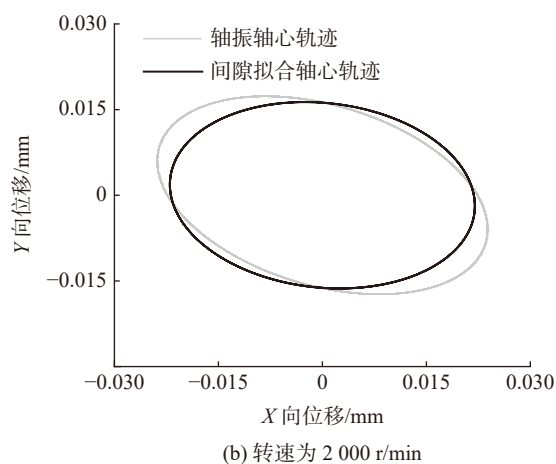
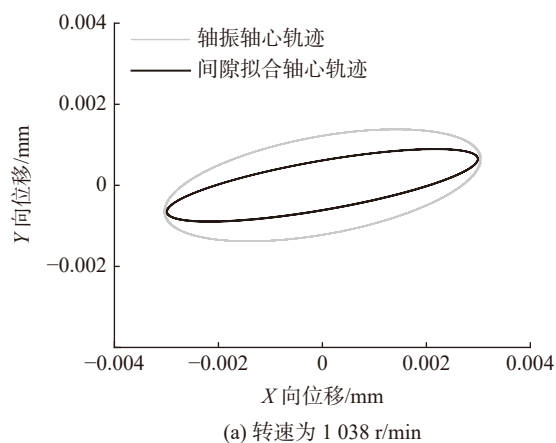


图 21 不同转速下的轴心轨迹测试结果

Fig. 21 Test results of axis orbit at different rotational speeds

4 结 论

本文基于带机匣的转子试验器, 利用电涡流传感器进行了叶尖间隙测试试验。针对转静间隙信号, 提出了一种基于希尔伯特-黄变换和互相关方法的转轴信号提取方法, 利用希尔伯特-黄变换,

对叶尖间隙信号的低频分量进行分离,然后,利用互相关方法从分离出的低频信号中提取出转频振动分量,并绘制出轴心轨迹,与直接利用电涡流传感器测量轴振信号相比,基于叶尖间隙信号得到的轴心轨迹精度达到90%以上,结果充分表明了本文方法的正确有效性。本文研究工作将为基于叶尖间隙信号预测转子振动响应提供有效途径。

参考文献:

- [1] 张帅,张强波,张霞妹.基于方差分析的航空发动机风扇叶片外物撞击识别[J].航空学报,2021,42(5):187-198.
ZHANG Shuai, ZHANG Qiangbo, ZHANG Xiamei. Identification of foreign object impact on aero-engine fan blades with variance analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 187-198. (in Chinese)
- [2] FENG Tong, ZHAO Xiaodong, JING Mingsui, et al. Experimental Study of rotor blades vibration and noise in multistage high pressure compressor and their relevance[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(3): 870-878.
- [3] YU Bing, ZHANG Tao, KE Hongwei, et al. Research on the tip clearance measuring method based on AC discharge[J]. IEEE Access, 2020, 8: 60355-60363.
- [4] WU Jiang, WEN Bin, ZHANG Qi, et al. A novel blade tip clearance measurement method based on event capture technique[J]. Mechanical systems and signal processing, 2020, 139: 106626.1-106626.16.
- [5] ZHANG Xiaodong, XIONG Yiwei, XIE Siying, et al. Optical-fiber-based dynamic measurement system for 3D tip clearance of rotating blades[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32075-32095.
- [6] 李永继.燃气轮机叶尖间隙监测技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
LI Yongji. Research of turbine blade tip clearance monitoring technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [7] LI Jian, GUO Guanghui, DUAN Fajie, et al. A novel self-adaptive multi-peak detection algorithm for blade tip clearance measurement based on the capacitive probe[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 32(8): 1361-1372.
- [8] ASLINEZHAD M, HEJAZI M A. Turbine blade tip clearance determination using microwave measurement and k-nearest neighbour classifier[J]. Measurement, 2019, 151: 107-142.
- [9] KYPUROS J A, MELCHER K J. A reduced model for prediction of thermal and rotational effects on turbine tip clearance[R]. NASA/TM-2003-212226, 2003.
- [10] 詹江正,张光,宋文艳,等.某型高压压气机12级转子叶尖间隙理论分析与数值模拟[J].机械科学与技术,2019,38(10):1639-1640.
ZHAN Jiangzheng, ZHANG Guang, SONG Wenyan, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of tip clearance of 12-stage high-pressure compressor rotor[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(10): 1639-1640. (in Chinese)
- [11] 郭政波,魏智辉,潘鹏飞.发动机地面起动时涡轮叶尖间隙动态变化规律[J].工程与试验,2020,60(1):18-20.
GUO Zhengbo, WEI Zhihui, PAN Pengfei. Dynamic change of turbine blade tip clearance during engine ground starting[J]. Engineering & Test, 2020, 60(1): 18-20. (in Chinese)
- [12] 高琨,申秀丽,薛园园,等.机动载荷对核心机叶尖间隙的影响初探[J].航空动力学报,2018,33(9):2205-2218.
GAO Kun, SHEN Xiuli, XIE Yuanyuan, et al. Initial research on impacts of maneuver loads on core engine tip clearance[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(9): 2205-2218. (in Chinese)
- [13] 贾丙辉,张小栋,任新宇.转子对高压涡轮叶尖间隙变化规律的影响[J].振动、测试与诊断,2012,32(3):488-493.
JIA Binghui, ZHANG Xiaodong, REN Xinyu. Effect of rotor on changes phenomena of turbine tip clearance[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 488-493. (in Chinese)
- [14] 赵春霞,郭迎清,张小栋.影响涡轮叶尖间隙的转子振动抑制方法[J].测控技术,2016,35(10):46-50.
ZHAO Chunxia, GUO Yingqing, ZHANG Xiaodong. Rotor vibration suppression methods in affecting turbine tip clearance[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(10): 46-50. (in Chinese)
- [15] 胡爱军. Hilbert-Huang变换在旋转机械振动信号分析中的应用研究[D].河北:华北电力大学,2008.
HU Aijun. Research on the application of Hilbert-Huang transform in vibration signal analysis of rotating machinery[D]. Hebei: North China Electric Power University, 2008. (in Chinese)
- [16] 马文朋.基于振动分析的民航发动机转子系统故障诊断研究[D].天津:天津大学,2015.
MA Wenpeng. Research on fault diagnosis for the rotor system of civil aeroengine based on vibration analysis[D]. Tianjing: Tianjin University, 2015. (in Chinese)
- [17] BAGHERZADEH S A, SALEHI M. Assessment of cabin noise contributing factors of a turbo-propeller airplane using EMD and SSA signal decomposition methods[J]. Applied Acoustics, 2021, 178(1): 145-160.
- [18] HW Y F, LI Q. An adjustable envelope based EMD method for rolling bearing fault diagnosis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(3): 108-118.

(编辑:张雪)