

航空发动机转子扭振测量新方法

蒋云帆, 廖明夫, 王四季

(西北工业大学旋转机械与风能装置测控研究所 西安, 710072)

摘要 利用航空发动机已有的测速齿盘、传感器等装置, 研究了一种非接触式的航空发动机转子扭振测量新方法。该方法根据扭转振动将引起测速脉冲信号宽度发生变化, 造成转子转速瞬时波动的原理, 监测转子是否发生扭振。通过实验和数值仿真对其进行了验证。结果表明, 该方法可以监测由于扭振引起的转速波动, 实现对转子扭振的测量。

关键词 航空发动机; 转子扭振; 齿盘; 转速脉冲变化
中图分类号 V231.96; TH873.7

引言

扭振是航空发动机轴系存在的主要振动形式之一, 其具体表现为由于短暂的冲击(如转静碰摩)、材料性能和机械结构等原因, 使转子发生塑性变形或弹性振动, 造成一种循环不止的疲劳破坏, 直接影响发动机的工作可靠性和使用寿命, 对发动机具有极大的破坏力^[1-3]。

现有的扭振测量技术存在两大类方法: a. 接触式测量, 利用安装在回转轴上的测振传感器等测振装置得到与扭振相关的信息。接触式测量有时会破坏轴的原结构, 且由于发动机转子的转速极高, 传感器的安装维护以及所测信号的传递困难^[1-2, 4-6]。b. 非接触式测量, 它是利用装在轴上的码盘、齿轮等结构, 通过非接触式的测振传感器产生相应的脉冲信号, 进而得到与扭振相关的信息^[5]。目前, 典型的非接触式测量方法主要有: a. 光电脉冲法, 它测量的是转子旋转一周所用的时间, 即转子在一周内的平均转速, 而对于航空发动机扭转振动测量, 更需要的是转子“瞬时转速”的波动情况^[1]; b. 多普勒效应测量法, 该方法能实现扭振的绝对测量, 但测量装置复杂且昂贵, 难于推广应用^[4], 对于航空发动机扭振监测具有一定的局限性。因此, 利用航空发动机已有的结构和测量装置, 实现在地面台架试车、机载地面试车和机动飞行条件下, 对发动机转子进行扭

振监测, 具有重要的工程实践意义。

笔者利用航空发动机测速齿盘和电涡流位移传感器, 结合扭振将引起脉冲信号宽度发生变化的原理, 研究了一种航空发动机扭振测量新方法。

1 扭振测量原理

发动机风扇转子上有一个测速齿盘, 该齿盘与转子同转。测速齿盘外缘上加工有 N 个齿, 有一个为宽齿。设第 N 个齿为宽齿, 以给出测量时的零基准点。对于除宽齿之外的 $N-1$ 个窄齿, 相邻窄齿之间的周向角距离为 $\Delta\theta_2$, 宽齿与相邻窄齿的周向角距离为 $\Delta\theta_1$ 。测速齿盘随转子转动时, 其上的每个齿都会使电涡流位移传感器产生电脉冲, 用数据采集卡的计数器确定第 $i-1$ 和第 i 个脉冲之间的时间 $\tau_i (i=1, \dots, N)$ 。则转子的瞬时角速度为 $\Omega_i = \frac{\Delta\theta_i}{\tau_i}$, 其中 $\Delta\theta_i$ 为第 $i-1$ 和第 i 个齿之间的周向角距离。当转子在稳态工作时, 若发动机转子稳定运转, 则转子瞬时角速度 $\Omega_1 = \Omega_2 = \dots = \Omega_N = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_1} = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_2} = \dots = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_{N-1}} = \frac{\Delta\theta_1}{\tau_N} = \Omega_0$ (Ω_0 为转子在稳态工作时的平均角速度, 为常数), 此时发动机转子无扭转振动; 若发动机转子发生扭转振动, 则转子的瞬时角速度 $\Omega_i = \frac{\Delta\theta_i}{\tau_i}$ 不再为常数, 而是绕转子平均角速度 Ω_0

波动。

为了利用航空发动机已有的测速齿盘实现扭振测量(如图 1),测量系统主要由测速齿盘、电涡流位移传感器、信号调理器、数据采集卡和计算机等组成。当发动机在稳态工作时,测速齿盘的每一个齿通过电涡流位移传感器都会产生电脉冲,电涡流位移传感器通过振动信号传输线将电脉冲信号送入信号调理器,信号调理器将电脉冲信号进行整流处理,并将其送入数据采集卡。

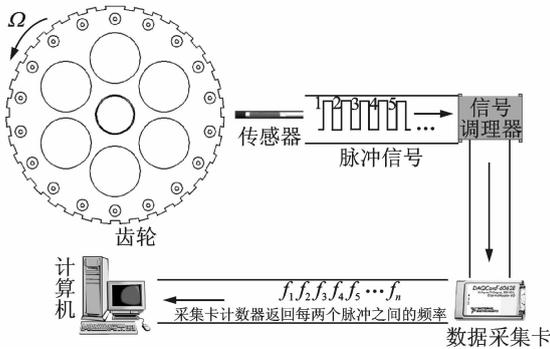


图 1 扭振测量系统简图

扭振引起的轴系瞬时角速度波动与平均角速度相比很微弱,信号的幅值调制度很小^[2]。因此,为了提高测量精度,实现对轴系瞬时角速度波动的监测,本文利用数据采集卡的模/数转换器对电脉冲信号进行模/数转换后,由数据采集卡的计数器通过自身产生的 $F_t = 20 \text{ MHz}$ 的高频时钟脉冲信号确定相邻两脉冲之间的时间 $\tau_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

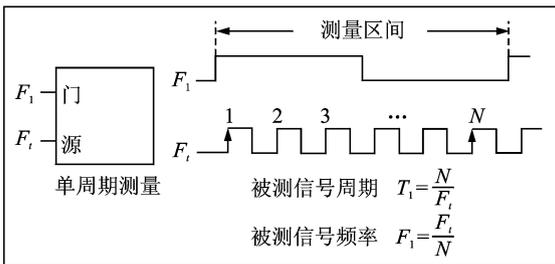


图 2 采集卡计数器工作原理图

根据图 2 所示的采集卡计数器工作原理图可知

$$\tau_i = n / F_t \quad (1)$$

其中: n 为相邻两脉冲之间对应的时钟脉冲个数。

发动机测速齿盘的宽齿与相邻窄齿之间的周向角距离 $\Delta\theta_1$,以及相邻窄齿之间的周向角距离 $\Delta\theta_2$,在设计时已确定。通过周向角距离 $\Delta\theta_1$ 、周向角距离 $\Delta\theta_2$ 和相邻两脉冲之间的时间 $\tau_i (i = 1, 2, \dots,$

$N)$,利用式(2)得到发动机转子的瞬时角速度序列 $\Omega_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为

$$\Omega_i = \begin{cases} \frac{\Delta\theta_2}{\tau_k} & (k = 1, 2, \dots, N - 1) \\ \frac{\Delta\theta_1}{\tau_N} & \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\tau_k (k = 1, 2, \dots, N - 1)$ 为相邻两窄齿形成的脉冲之间的时间; τ_N 为宽齿形成的脉冲与相邻的窄齿形成的脉冲之间的时间。

通过所获得的转子瞬时角速度序列 Ω_i 判断转子是否发生扭转振动,若

$$\Omega_1 = \Omega_2 = \dots = \Omega_N = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_1} = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_2} = \dots = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_{N-1}} = \frac{\Delta\theta_1}{\tau_N} = \Omega_0 \quad (3)$$

则证明转子没有发生扭转振动。若转子瞬时角速度序列 Ω_i 不为常数 Ω_0 ,而是绕着平均角速度值 Ω_0 波动,且波动信号的主要频率成分包含转子扭振频率,则发动机转子发生扭转振动。

2 数值仿真

2.1 仿真模型

当发动机转速恒定为 Ω_0 时,若发生扭转振动,转子的瞬时工作转速为转子的平均转速与扭转振动速度之和^[7]。建立模型时,假设转子扭转振动的运动方程为 $\theta = \varphi \sin \omega t$,则扭转振动速度为 $\dot{\theta} = \omega \varphi \cos \omega t$,其中: φ 为扭振幅值; ω 为扭振频率。当扭转运动方向与转子旋转方向一致时,如式(4)所示,转子瞬时角速度 Ω 为转子平均转速 Ω_0 与扭转振动速度之和。当扭转运动方向与转子旋转方向相反时,如式(5)所示,转子瞬时角速度为转子平均转速与扭转振动速度之差。

$$\Omega = \Omega_0 + \omega \varphi \cos \omega t \quad (4)$$

$$\Omega = \Omega_0 - \omega \varphi \cos \omega t \quad (5)$$

对瞬时转速 Ω 做积分,即

$$\Psi = \int_0^t \Omega dt \quad (t \leq T) \quad (6)$$

其中: T 为转子旋转一周的时间。

当扭振发生时,测速齿盘的每一个齿通过电涡流位移传感器产生高电平信号,齿隙通过电涡流位移传感器时为低电平信号,即

$$V(t) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \quad 5(2n+1) \frac{2\pi}{2N+1} \leq \Psi \leq (2n+2) \frac{2\pi}{2N+1} \\ \quad (n=1,2,3,\dots,N-1) \\ 0 \quad 2n \frac{2\pi}{2N+1} \leq \Psi \leq (2n+1) \frac{2\pi}{2N+1} \\ \quad (n=1,2,3,\dots,N-1) \\ 5 \quad 2n \frac{2\pi}{2N+1} \leq \Psi \leq (2n+1) \frac{2\pi}{2N+1} \\ \quad (n=N) \end{array} \right. \quad (7)$$

其中： N 为测速齿盘的齿数。

将式(6)代入式(7)，得到如图3所示的模拟信号 $V(t)$ 。对如图3所示的模拟信号高频率采集，得到数字信号序列 $V(t_i)$ ($i=1,2,3,\dots$)。当 $V(t_i) - V(t_{i-1}) \geq 3$ 时， t_i 时刻对应信号的上升沿，记录信号上升沿对应的时刻 $t_k = t_i$ ($k=1,2,\dots,N+1$)，则相邻两脉冲(即相邻两齿)之间的时间间隔 $\tau_k = t_{k+1} - t_k$ ($k=1,2,\dots,N$)，转子的瞬时角速度 $\Omega_j = \frac{\Delta\theta_2}{\tau_j}$ ($j=1,2,\dots,N-1$)， $\Omega_N = \frac{\Delta\theta_1}{\tau_N}$ ，其中： $\Delta\theta_1$ 为宽齿与相邻窄齿之间的周向角距离； $\Delta\theta_2$ 为相邻窄齿之间的周向角距离，则 Ω_k 对应的时间约为 $T_k = (t_k + t_{k+1})/2$ 。以 Ω_k 序列为纵坐标，以 T_k 为横坐标所形成的时域波形即转速波动曲线。

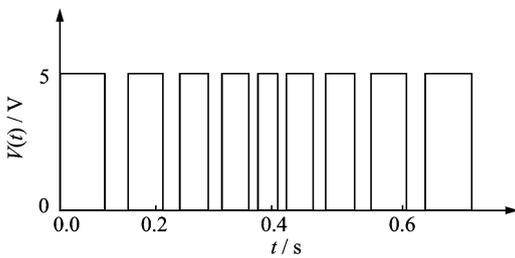


图3 数字信号序列

2.2 仿真过程及结果

为了验证测量原理的正确性，研究不同扭振频率下、不同测试条件对测量结果的影响，根据上述仿真模型，建立了如下仿真过程。

1) 扭振频率大于转子转速频率，测速齿盘直径不变，改变测速齿盘齿数，计算转子旋转一周的测量结果，该过程的具体参数值选取如表1所示。

表1 扭振测量仿真过程(1)

转子转速 频率/Hz	扭振频率/ Hz	扭振幅值/ (°)	测速齿盘齿数/个
20	120	0.56	35(其中1个为宽齿)
20	120	0.56	1400(其中1个为宽齿)

2) 扭振频率等于转子转速频率，测速齿盘直径同仿真(1)，改变测速齿盘齿数，计算转子旋转一周的测量结果，该过程的具体参数值选取如表2所示。

表2 扭振测量仿真过程(2)

转子转速 频率/Hz	扭振频率/ Hz	扭振幅值/ (°)	测速齿盘齿数/个
20	20	3.3	35(其中1个为宽齿)
20	20	3.3	1400(其中1个为宽齿)

为了模拟真实的实验测量条件，如表1和表2所示，仿真过程中选择测速齿盘齿数 $N=35$ ，且其中一个为宽齿。为了便于计算，在改变测速齿盘齿数时，将齿数设为 $N=1400$ 。

图4(a)为仿真过程(1)，测速齿盘齿数 $N=35$ 的计算结果。由图可以看出，当转子发生扭振振动时，转子瞬时转速绕着转子的平均转速波动，波动频率为扭振频率。在该条件下，测量得到的瞬时转速信号波形类似于锯齿波，分析原因，这是由于测速齿盘齿数偏少，导致测量信号出现了削波现象。如图4(b)所示，将测速齿盘齿数变为 $N=1400$ ，得到的转子瞬时转速波形，与图4(a)相比发生了变化，为标准简谐波。

根据仿真结果并结合采样定理可知，增加测速齿盘齿数可以提高测量精度，有利于扭振的监测。

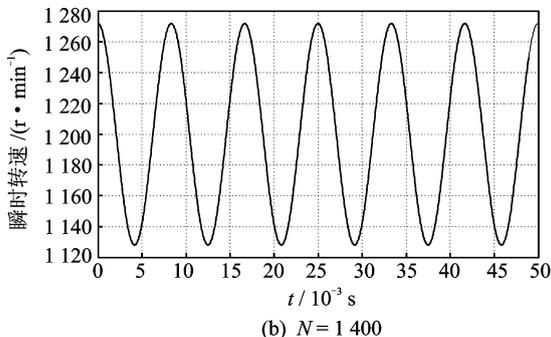
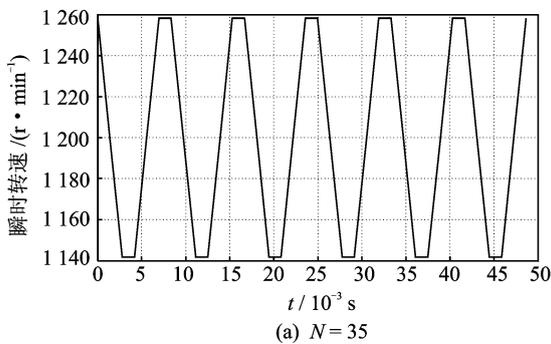


图4 转子瞬时转速波动曲线(扭振频率>转速频率)

图5(a)为仿真过程(2)，测速齿盘齿数 $N=35$ 的计算结果。从图5(a)中可以看出，当转速频率和

扭振频率相同时(即共振),计算得到的转子瞬时转速波动曲线,为单周期简谐波。如图 5(b)所示,增加测速齿盘齿数,波形并未发生变化。

根据图 5(a)和图 5(b)的仿真结果和采样定理得知,当扭振频率低于转速频率时,瞬时转速信号仍以扭振频率绕着平均转速简谐波动。

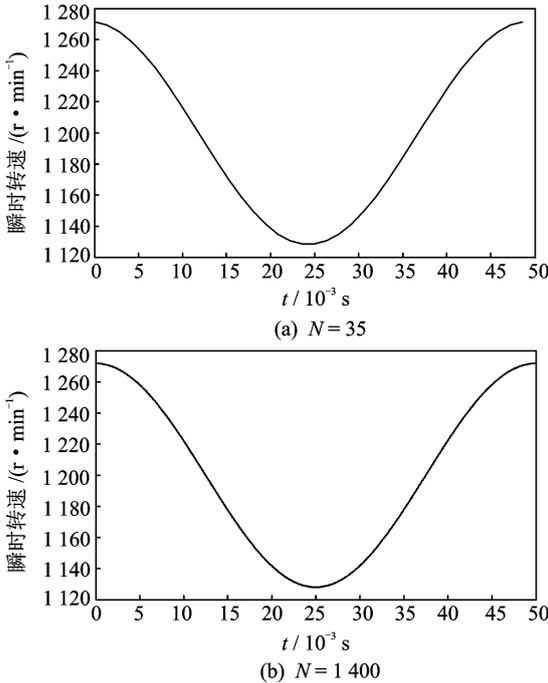


图 5 转子瞬时转速波动曲线(扭振频率=转速频率)

仿真结果表明:a.当转子发生扭转振动时,转子的瞬时转速以扭振频率绕着平均转速波动;b.在利用测速齿盘测量转子的瞬时角速度时,应尽量增加测速齿盘的齿数,避免测量信号出现失真现象。

3 实验过程与结果分析

本研究提出的扭振测量方法是利用航空发动机已有的测速齿盘结构,在发动机的轴系上直接测量转子的扭转振动信号。因此,根据发动机测速齿盘的结构特点,采取与发动机测速齿盘结构相似的原则,设计了如图 1 所示的齿盘结构,齿盘齿数 $N = 35$,其中一个为宽齿,34个窄齿。

实验过程中,将齿盘安装在实验转子的轴系上,与转子同转,电涡流位移传感器安装在齿盘的径向位置,对准齿盘的任意齿。当转子旋转时,齿盘的每一个齿通过电涡流位移传感器都会产生电脉冲信号,数据采集卡将电脉冲信号进行 A/D 转换,并通过其自身的计数器计算相邻脉冲间的周期。利用相邻脉冲间的周期和相邻两齿之间的周向角距离便可

得到转子的瞬时转速。

本实验的关键在于对转子进行测试前,能够确定转子发生扭转振动,并能确定扭振频率,以便验证扭振测量方法的正确性。实验内容如下。

1) 将转子实验器与驱动电机间的连接法兰用弹性联轴器连接(图 6)。测量时,使电机驱动端处于制动状态,将转子转动一定角度,随后释放转子并测量转子的瞬时转速信号,计算瞬时转速波动频率,该频率即为弹性联轴器的扭转自振频率。

2) 转子与驱动电机间的法兰盘采用实验(1)的连接方式。将电机的转速频率恒定在弹性联轴器的自振频率处,测量转子旋转 64 周的瞬时转速信号。

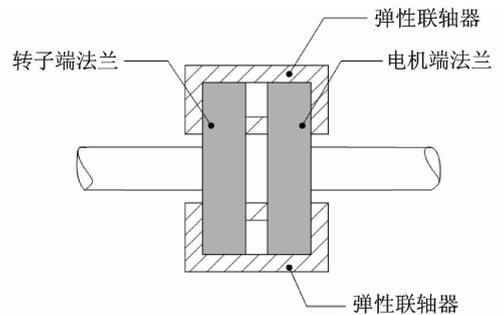


图 6 法兰连接方式示意图

在实验(1)中,弹性联轴器的回复力将使转子被释放后的运动形式为扭转运动,由于实际情况中存在阻尼,因此,该扭转运动的运动方程为 $\theta = \varphi \cos \omega t \cdot e^{-c\omega t}$,转子的瞬时角速度为 $\Omega = -\omega \varphi \sin \omega t \cdot e^{-c\omega t} - c\omega \varphi \cos \omega t \cdot e^{-c\omega t}$,其中,阻尼 c 和扭转运动频率 ω 根据图 7 所示的实验结果假定。根据以上叙述,得到转子瞬时转速信号的理论波形为如图 8 所示的正弦衰减曲线。

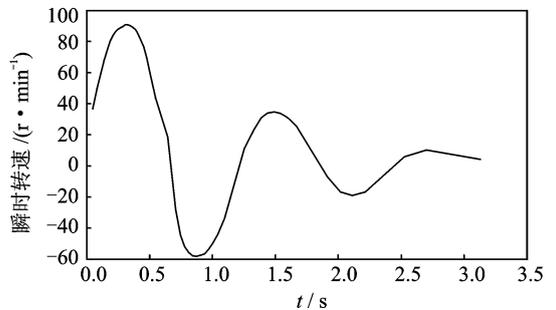


图 7 实验(1)测量波形

图 7 为实验(1)测量得到的转子瞬时转速波动曲线。根据测量原理可知,笔者测量的瞬时转速实际为齿盘相邻两齿之间的平均转速,因此,齿盘齿数越多测量值越逼近真实值。从图中可以看出,由于

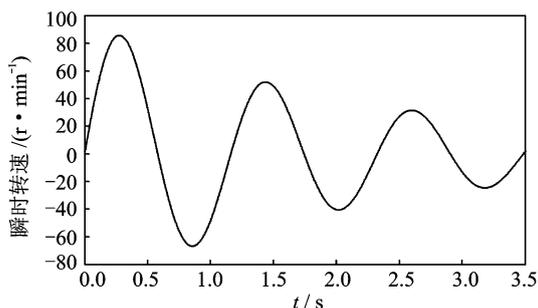


图8 实验(1)理论波形

本文的测速齿盘齿数偏少,测量信号出现失真,但曲线的大体形态按照正弦衰减规律变化,与理论分析一致。通过图7计算得到,转子的瞬时转速波动频率为0.86 Hz,该频率即为弹性联轴器的扭转自振频率。

由共振理论得知,当转子的转速频率为弹性联轴器的扭转自振频率时,转子在运行过程中将伴随

着持续的扭转运动,该运动形式与转子在稳态下发生扭转振动时的运动形式一致。根据实验(1)测得的弹性联轴器扭转自振频率,实验(2)中将驱动电机的转速频率恒定在0.9 Hz。

图9为实验(2)测量得到的转子瞬时转速波动曲线,从图中看出,测量得到的曲线与数值仿真结果一致。对图9的瞬时转速进行傅里叶变换,得到如图10所示的转子瞬时转速频谱图,频谱图中的主要频率为转子瞬时转速的变化速率。由实验(1)测量结果和上述扭振测量原理得知,实验(2)中,转子瞬时转速的变化速率为扭转运动的频率,即为实验(1)中测得的弹性联轴器扭转自振频率。从图10可知,频谱图中的主要频率为0.88 Hz,与实验(1)测得的弹性联轴器扭转自振频率(0.86 Hz)仅相差2.3%,两实验结果一致。因此,可认为实验(1)和实验(2)的测量结果可以证明本研究方法的正确性。

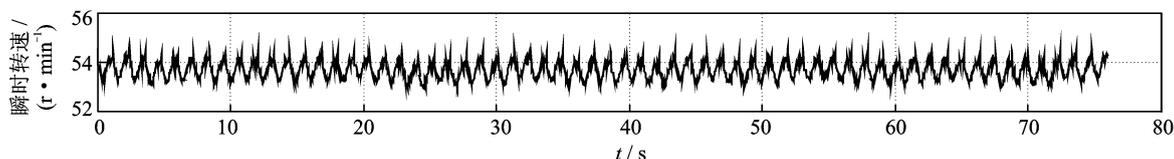


图9 实验(2)测量波形(电机转速54 r/min,转子瞬时转速波动曲线)

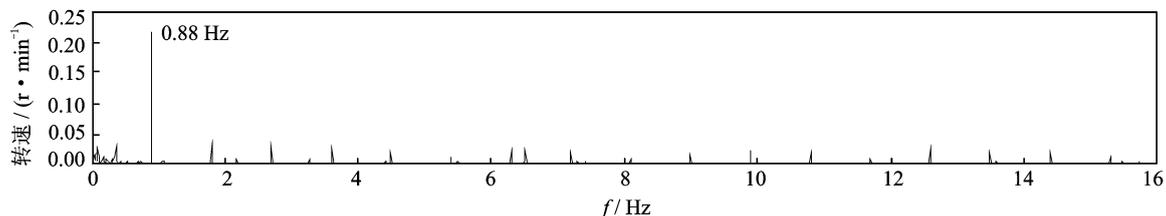


图10 转子瞬时转速频谱图

4 结论

利用航空发动机已有的测速齿盘,结合扭振将引起脉冲信号宽度发生变化的原理,对扭振测量方法进行了数值仿真和实验研究,结论如下。

1) 利用航空发动机已有的测速齿盘,通过电涡流位移传感器在航空发动机轴系上直接测量扭转振动信号,测量过程不影响发动机的正常工作,便于判断转子是否发生扭转振动。

2) 利用采集卡计数器产生的20 MHz高频时钟脉冲信号采集转子的瞬时转速,可以避免由于扭振引起的轴系瞬时转速波动相对于平均转速很微弱而无法测量的问题。

3) 数值仿真和实验结果表明,若发生扭转振动,转子瞬时转速以扭振频率绕着转子平均转速波动,适当增加齿盘齿数有利于提高测量精度。

4) 数值仿真和实验结果一致,证明了本文扭振测量方法的正确性,该方法对航空发动机转子扭振测量具有一定的可行性。

参 考 文 献

- [1] 罗胜阳, 骆德渊, 秦东兴. 航空发动机转子扭转振动测试仪的研究[J]. 微计算机信息, 2006(1): 155-157.
Luo Shengyang, Luo Deyuan, Qin Dongxing. Research of torsional vibration measuring instrument of rotor of aeroengine[J]. Microcomputer Information,

- 2006(1):155-157. (in Chinese)
- [2] 黄震,刘彬,董全林. 基于激光多普勒技术扭振测量的研究[J]. 光学学报,2006(3):389-392.
Huang Zhen, Liu Bin, Dong Quanlin. Research on the torsional vibration measurement based on laser doppler technique[J]. Acta Optica Sinica, 2006(3):389-392. (in Chinese)
- [3] 周迅,俞小莉,李松和. 扭振测量误差分析及实用发动机高精度扭振测量仪的研制[J]. 内燃机工程,2005(5):77-80.
Zhou Xun, Yu Xiaoli, Li Songhe. Investigation of torsional vibration measurement and development of a new digital torsional vibration instrument with high precision for engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005(5):77-80. (in Chinese)
- [4] 郭力,李波. 轴系扭转振动测量方法评述[J]. 磨床与磨削,2000(3):53-56.
Guo Li, Li Bo. Comment on measuring methods for torsional vibration of shaft[J]. Grinder and Grinding, 2000(3):53-56. (in Chinese)
- [5] 宋志峰,梅顺齐. 转轴扭振测量方法研究[J]. 现代制造工程,2005(9):75-77.
Song Zhifeng, Mei Shunqi. Research on measuring method for torsional vibration of rotating shaft[J]. Modern Manufacturing Engineering Journal, 2005(9):75-77. (in Chinese)
- [6] John M. Vance, rotordynamics of turbomachinery [M]. Texas:Jonh Wiley & Sons, 1988: 363.
- [7] 邓小文. 双盘转子碰摩的弯曲和扭转耦合振动研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.



第一作者简介:蒋云帆,男,1986年11月生,博士生。主要研究方向为旋转机械状态监测与故障诊断研究。曾发表《The design of counter-rotating dual-rotor experimental apparatus》(《ISJPPE会议论文集》,西安:西北工业大学出版社,2012年)等论文。
E-mail:yunfanj@163.com