

文章编号:1000-8055(2013)12-2752-07

航空发动机中介轴承的故障特征与诊断方法

廖明夫¹, 马振国¹, 刘永泉², 王德友²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 提出了转差域频谱和转差域包络谱的概念,建立了诊断航空发动机中介轴承故障的方法.利用发动机高、低压转差作为触发信号,对发动机振动信号进行等转差周期采集,并在转差域对振动信号进行频谱和包络谱分析.结果表明:不平衡响应、不对中响应以及外环静止的轴承故障响应等振动信号在转差域频谱和转差域包络谱上的位置随转速变化;而中介轴承的故障响应在转差域频谱上的边频成分间距不随转速变化,具有倍频“恒间距”特征;在转差域包络谱上的位置也不随转速变化,具有“恒频”特征.带外环故障的中介轴承实验表明:转速变化时,在转差域包络谱中,外环故障特征倍频成分位置不变;在转差域频谱中,出现间隔宽度恒定为外环故障特征倍频的频率成分.

关 键 词: 航空发动机; 中介轴承; 故障诊断; 转差域包络谱; 恒频

中图分类号: V231.92; TH133.33

文献标志码: A

Fault characteristics and diagnosis method of intershaft bearing in aero-engine

LIAO Ming-fu¹, MA Zhen-guo¹, LIU Yong-quan², WANG De-you²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Spectrum and envelope spectrum analysis of vibrations measured on aero-engines were developed in rotary-speed-difference-domain for detection of faults in inter-shaft bearings. Rotary-speed-difference of high pressure rotor and low pressure rotor is used as triggering signal. Vibration signals were sampled at the whole cycles of rotary-speed-difference, and their spectrum and envelope spectrum were analyzed in rotary-speed-difference-domain. The result shows that the position of vibration components caused by rotor imbalance, misalignment and defects in normal bearings (outer race fixed) will change in the horizontal coordinate (octave form in rotary-speed-difference-domain) when the rotary speed changes. However the side-band components in the vibration spectrum resulting from defects in inter-shaft bearings will keep constant space between any two components when the rotary speed changes. This phenomenon is referred to as “constant space” feature. Furthermore, vibration components in envelope spectrum caused by defects in inter-shaft bearings will keep constant location in the horizontal coordinate (octave form in rotary-speed-difference-domain) when the rotary speed changes. This phenomenon is referred to as “constant octave” feature. The experimental results obtained from the measurements on a test rig of inter-shaft bearing

收稿日期:2012-11-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.017.html>

作者简介: 廖明夫(1960—)男,陕西富县人,教授、博士生导师,博士,主要从事发动机结构动力学,旋转机械故障诊断和风力发电技术研究.

with defects in outer race show that the two features really present in the spectrum and envelope spectrum in in rotary-speed-difference-domain respectively.

Key words: aero-engine; inter-shaft bearing; fault diagnosis;
rotary-speed-difference-domain envelope spectrum; constant octave

为了减轻质量,在现代航空发动机和燃气轮机中,普遍使用中介轴承(或称轴间轴承),即高压转子的后支点支承在低压轴上,或低压轴支承在高压转子的内腔中.该轴承外环随高压转子旋转,内环随低压转子旋转,故称中介轴承.中介轴承工作的温度高,润滑条件不易保证,动载荷大,容易出现故障.中介轴承一旦出现故障,对发动机的安全运行将造成极大威胁,因此,及时诊断中介轴承的初发故障非常重要.

目前,采用加速度传感器测量承力机匣的振动,从所测的振动信号中分析中介轴承的故障特

征信息,以此来诊断中介轴承的故障.但所测信号中包含了发动机高压转子和低压转子的不平衡响应、不对中引起的振动以及其他轴承的故障信息等大量的背景振动,而且如图 1 所示,中介轴承故障所产生的激振力传递路线很长,所产生的振动与背景振动相比非常弱,可能被淹没.目前经常采用的滚动轴承故障特征倍频诊断方法主要针对外环静止、内环随轴转动的情况^[1-7],由于中介轴承外环和内环同时转动,因此,该方法不适用于诊断中介轴承的故障.

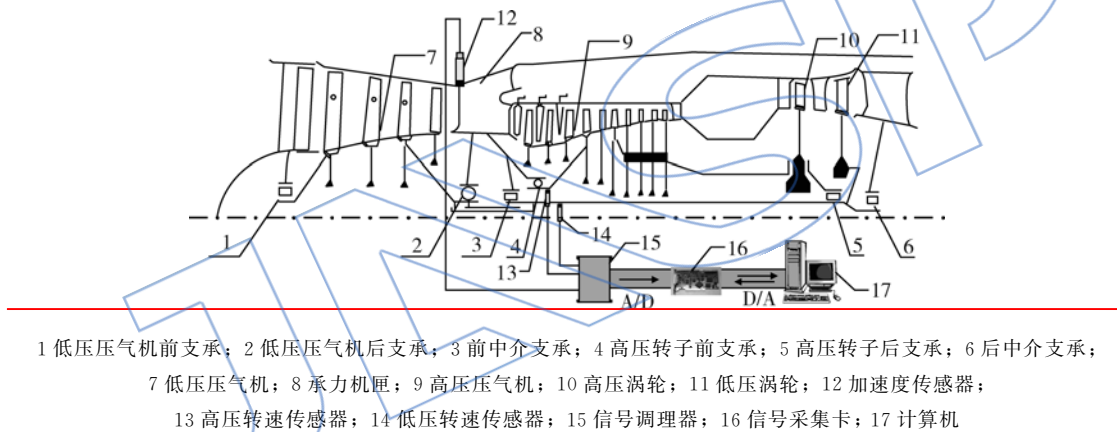


图 1 发动机中介轴承振动测量示意图

Fig. 1 Diagram of aero-engine intershaft bearing vibration measurement

1 发动机振动信号的测量与特点

一般情况下,在机匣上安装加速度传感器来测量发动机的振动.发动机上各处的振动均可由不同的传递路径传至机匣.因此,振动加速度传感器在机匣上测得的振动信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = A_h \cos(\Omega_h t + \beta_h) + A_l \cos(\Omega_l t + \beta_l) + \sum_{k=1}^N A_{lk} \cos(k\Omega_l t + \beta_{lk}) + \sum_{k=1}^S Q_{hb}(\Omega_h F_{hb} t) \cdot h(\omega_{hb} t) + \sum_{k=1}^T Q_{lb}(\Omega_l F_{lb} t) \cdot h(\omega_{lb} t) + \sum_{k=1}^R Q_{interb}[F_{interb}(\Omega_h - \Omega_l) t] \cdot h(\omega_{interb} t) + \dots \quad (1)$$

式中 Ω_h 为高压转子转速; Ω_l 为低压转子转速; A_h, β_h 为高压转子不平衡响应幅值、相位; A_l, β_l 为低压转子不平衡响应幅值、相位; A_{lk}, β_{lk} 为低压转子不对中响应幅值、相位; Q_{hb} 为高压转子轴承某元件故障的周期脉冲激励函数; F_{hb} 为高压转子轴承某元件故障特征倍频; h 为轴承在单位脉冲激励作用下的响应函数; ω_{hb} 为高压转子轴承第 k 阶自振频率; Q_{lb} 为低压转子轴承某元件故障的周期脉冲激励函数; F_{lb} 为低压转子轴承某元件故障特征倍频; ω_{lb} 为低压转子轴承第 k 阶自振频率; Q_{interb} 为中介轴承某元件故障的周期脉冲激励函数,是转速差 $(\Omega_h - \Omega_l)$ 的函数; F_{interb} 为中介轴承某元件故障特征倍频; ω_{interb} 为中介轴承第 k 阶自振频率.

机匣上测得的振动信号中,除中介轴承故障

响应之外,还包含高压转子和低压转子不平衡响应、低压转子不对中响应、高压轴承和低压轴承故障响应、附件振动等大量局外振动信号,且局外振动信号较中介轴承故障响应强得多,会淹没中介轴承故障信号。

对振动信号 $x(t)$ 进行频谱分析,得到频谱

$$\begin{aligned} X(\omega) = & \pi A_h e^{j\beta_h} \delta(\omega - \Omega_h) + \\ & \pi A_l e^{j\beta_l} \delta(\omega - \Omega_l) + \sum_{k=1}^N \pi A_{lk} e^{j\beta_{lk}} \delta(\omega - k\Omega_l) + \\ & \sum_{k=1}^S \sum_{m=-M}^M A_{hbk}^{(m)} \delta(\omega - \omega_{hbk} + mF_{hb}\Omega_h) + \\ & \sum_{k=1}^T \sum_{m=-P}^P A_{lbk}^{(m)} \delta(\omega - \omega_{lbk} + mF_{lb}\Omega_l) + \\ & \sum_{k=1}^R \sum_{m=-J}^J A_{interbk}^{(m)} \delta[\omega - \omega_{interbk} + \\ & mF_{interb}(\Omega_h - \Omega_l)] + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $A_{hbk}^{(m)}$ 为高压转子轴承第 k 阶自振频率的第 m 个边频的幅值。 m 为负表示自振频率左边的边频, m 为正表示自振频率右边的边频。 $A_{lbk}^{(m)}$ 和 $A_{interbk}^{(m)}$ 的含义与此类似。 δ 为单位脉冲函数。

式(2)说明,所有频率成分的幅值随着频率 Ω 变化,其在频率轴上的位置随高压转子和低压转子转速的变化发生移动。每一个轴承若出现故障,将激起周期脉冲响应,在频谱上产生一系列以某阶自振频率(如 ω_{hbk} , ω_{lbk} , $\omega_{interbk}$)为中心的边频带。边频带中相邻频率之间的宽度随高压和低压转子转速的变化而发生变化,频谱特征非常复杂,中介轴承的故障信息会被淹没。

对振动信号 $x(t)$ 进行包络分析,得到包络信号

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) = & \sum_{k=1}^M \hat{A}_{hbk} \cos(kF_{hb}\Omega_h t + \beta_{hbk}) + \\ & \sum_{k=1}^S \hat{A}_{lbk} \cos(kF_{lb}\Omega_l t + \beta_{lbk}) + \\ & \sum_{k=1}^P \hat{A}_{interbk} \cos[kF_{interb}(\Omega_h - \Omega_l)t + \beta_{interbk}] + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\hat{A}_{hbk}$ 为高压转子轴承某元件故障特征倍频 k 倍频幅值; β_{hbk} 为高压转子轴承某元件故障特征倍频 k 倍频相位; $\hat{A}_{lbk}$ 为低压转子轴承某元件故障特征倍频 k 倍频幅值; β_{lbk} 为低压转子轴承某元件故障特征倍频 k 倍频相位; $\hat{A}_{interbk}$ 为中介轴承某元件故障特征倍频 k 倍频幅值; $\beta_{interbk}$ 为中介轴承某元件故障特征倍频 k 倍频相位。

对包络信号 $\hat{x}(t)$ 进行频谱分析,得到包络谱

$$\begin{aligned} \hat{X}(\omega) = & \sum_{k=1}^M \hat{A}_{hbk} e^{j\beta_{hbk}} \delta(\omega' - kF_{hb}\Omega_h) + \\ & \sum_{k=1}^S \hat{A}_{lbk} e^{j\beta_{lbk}} \delta(\omega' - kF_{lb}\Omega_l) + \\ & \sum_{k=1}^P \hat{A}_{interbk} e^{j\beta_{interbk}} \delta[\omega' - kF_{interb}(\Omega_h - \Omega_l)] \end{aligned} \quad (4)$$

可见包络谱中中介轴承的频率成分不仅随高压转速的变化而变化,而且也随低压转速的变化而变化,分析起来很不方便。

因此,直接对机匣上测得的发动机振动信号 $x(t)$ 进行分析很难诊断出中介轴承的初发故障^[8-9]。

2 发动机振动信号的转差域测量与转差域频谱和包络谱特征

由式(1)~式(4)观察到中介轴承的信号随 $(\Omega_h - \Omega_l)$ 的变化而变化,为凸显中介轴承的故障信息,可利用转差触发来采集发动机振动信号,并在转差域进行频谱分析。由于发动机高压转速信号和低压转速信号均有精准输出,可得到高压转子转速和低压转子转速之差为 $\Delta\Omega_{hl} = \Omega_h - \Omega_l$ (简称转差)。利用转差触发,整周期采集发动机振动信号,就可得到转差域的发动机振动信号。

设低压转子转速和高压转子转速之比为

$$\eta = \frac{\Omega_l}{\Omega_h}$$

则

$$\Omega_h = \frac{\Delta\Omega_{hl}}{1-\eta}, \quad \Omega_l = \frac{\Delta\Omega_{hl}\eta}{1-\eta}$$

将测得的发动机振动信号的频率转化为 $\Delta\Omega_{hl}$ 的倍数,可将发动机振动信号表示为

$$\begin{aligned} x(\tau) = & A_h \cos\left[\frac{\tau}{1-\eta} + \beta_h\right] + \\ & A_l \cos\left[\frac{\eta\tau}{1-\eta} + \beta_l\right] + \\ & \sum_{k=1}^N A_{lk} \cos\left[\frac{\eta k\tau}{1-\eta} + \beta_{lk}\right] + \\ & \sum_{k=1}^S Q_{hb} \left[\frac{F_{hb}\tau}{1-\eta}\right] \cdot h\left[\frac{\omega_{hbk}\tau}{\Delta\Omega_{hl}}\right] + \\ & \sum_{k=1}^T Q_{lb} \left[\frac{\eta F_{lb}\tau}{1-\eta}\right] \cdot h\left[\frac{\omega_{lbk}\tau}{\Delta\Omega_{hl}}\right] + \\ & \sum_{k=1}^R Q_{interb} (F_{interb}\tau) \cdot h\left[\frac{\omega_{interbk}\tau}{\Delta\Omega_{hl}}\right] + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\tau = \Delta\Omega_{hl} t = (1-\eta)\Omega_h t = \frac{1-\eta}{\eta}\Omega_l t$ 。

定义 ω' 为转差倍频数, $\omega' = \frac{\omega}{\Omega_h - \Omega_l}$. 对式

(5) 做频谱分析, 得到转差谱

$$\begin{aligned} X(\omega') = & \pi A_h e^{i\beta_h} \delta\left(\omega' - \frac{1}{1-\eta}\right) + \\ & \pi A_l e^{i\beta_l} \delta\left(\omega' - \frac{\eta}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^N \pi A_{lk} e^{i\beta_{lk}} \delta\left(\omega' - \frac{k\eta}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^S \sum_{m=-M}^M A_{hbk}^{(m)} \delta\left(\omega' - \frac{\omega_{hbk}}{\Delta\Omega_{hl}} + \frac{mF_{hb}}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^T \sum_{m=-P}^P A_{lbk}^{(m)} \delta\left(\omega' - \frac{\omega_{lbk}}{\Delta\Omega_{hl}} + \frac{\eta m F_{lb}}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^R \sum_{m=-J}^J A_{interbk}^{(m)} \delta\left(\omega' - \frac{\omega_{interbk}}{\Delta\Omega_{hl}} + mF_{interb}\right) + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)说明给定转速差 $\Delta\Omega_{hl}$ 后, 振动信号的频谱可由转差倍频数 ω' 表示, 称为转差倍频谱, 简称转差谱. 局外振动信号的频谱分量幅值随高压转子转速和低压转子转速之比的变化而变化, 并且其在 ω' 轴上的位置随高压转子转速和低压转子转速之比的变化发生移动. 轴承故障激起的周期脉冲响应在转差倍频谱上边频带的中心频率 $\left[\frac{\omega_{hbk}}{\Delta\Omega_{hl}}, \frac{\omega_{lbk}}{\Delta\Omega_{hl}}, \frac{\omega_{interbk}}{\Delta\Omega_{hl}}\right]$ 随高压转子和低压转子转速比的变化发生变化, 高压转子和低压转子的外环固定轴承的边频带中各相邻幅值突出频率之间的宽度随高压转子和低压转子转速比的变化也发生变化, 但中介轴承的边频带中各相邻幅值突出频率之间的间隔宽度不随高压转子和低压转子转速比的变化而发生变化, 保持为中介轴承的故障特征倍频数 F_{interb} . 由此说明, 中介轴承故障响应转差谱中, 故障特征倍频之间的具有“恒间距”特征.

对 $x(\tau)$ 做包络谱分析, 则得转差域包络倍频谱(简称转差域包络谱)为

$$\begin{aligned} \hat{X}(\omega') = & \sum_{k=1}^M \hat{A}_{hbk} \left(kF_{hb} \frac{1}{1-\eta}\right) e^{i\beta_{hbk}} \delta\left(\omega' - kF_{hb} \frac{1}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^S \hat{A}_{lbk} \left(kF_{lb} \frac{\eta}{1-\eta}\right) e^{i\beta_{lbk}} \delta\left(\omega' - kF_{lb} \frac{\eta}{1-\eta}\right) + \\ & \sum_{k=1}^P \hat{A}_{interbk} (kF_{interb}) e^{i\beta_{interbk}} \delta(\omega' - kF_{interb}) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)说明, 中介轴承的故障响应转差域包络谱在 ω' 轴上的位置不随高压转子和低压转子转速比的变化而发生移动, 始终固定在中介轴承特征倍频 F_{interb} 的倍数处, 即 $\omega' = kF_{interb}$ 处, 称为具

有“恒频”特征. 由此说明, 中介轴承的故障响应包络谱在转差域内具有“恒频”特征. 而高压转子和低压转子外环固定轴承的故障响应在转差域包络谱的位置则随高压转子和低压转子转速比的变化而发生移动, 不具有“恒频”特征. 可利用中介轴承故障振动信号在转差域中的“恒间距”特征和“恒频”特征诊断中介轴承信号.

3 中介轴承故障特征倍频

外环静止, 内环随轴转动的轴承故障特征倍频定义为故障特征频率与轴的转频之比^[10-15]. 本文定义中介轴承某元件的故障特征倍频为该元件故障特征频率与中介轴承内、外环转速之差(以下称差频)的比值. 中介轴承各元件的故障特征倍频计算如式(8)~式(10)所示.

内环特征倍频

$$F_i = \frac{f_i \times 60}{|n_i - n_e|} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right] z \quad (8)$$

外环特征倍频

$$F_e = \frac{f_e \times 60}{|n_i - n_e|} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right] z \quad (9)$$

滚动体特征倍频

$$F_b = \frac{f_b \times 60}{|n_i - n_e|} = \frac{D_m}{d} \left[1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cos^2 \alpha \right] \quad (10)$$

式(8)~式(10)中, f_i, f_e, f_b 分别为对应元件的故障特征频率; n_i, n_e 分别为内环和外环转速, 转速方向相同则 n_i, n_e 同号, 否则 n_i, n_e 反号; d 为滚动体直径; α 为接触角; D_m 为滚动体中心公转圆的直径; z 为滚动体个数.

中介轴承的 n_i 和 n_e 即为发动机的 Ω_l 和 Ω_h (或 Ω_h 和 Ω_l).

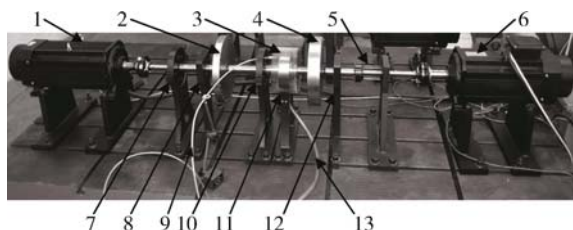
4 诊断实例

本文以某发动机外环故障中介轴承的振动信号为例, 验证利用“恒间距”和“恒频”特征诊断中介轴承故障的有效性.

4.1 中介轴承实验器介绍

图 2 为中介轴承实验器照片. 图中高压电动机驱动高压转子旋转, 低压电动机驱动低压转子旋转. 高压转子一端支承于鼠笼式弹性支承, 另一端通过中介轴承与低压转子连接. 中介轴承内环与低压转子轴连接, 中介轴承外环与高压转子连接. 中介轴承为润滑油润滑. 油泵将润滑油经进油管和喷嘴喷入中介轴承内环和外环之间的滚道内. 润滑油通过集油环和出油管回入油泵.

高压转子转速和低压转子转速通过安装于高压转子和低压转子轴上的反光纸和光电传感器(Schenk P-84型)测量,中介轴承振动信号由安装于轴承座(图2中10)的压电式加速度传感器(Schenk AS-020)测量,盘位移振动信号由电涡流位移式传感器(Schenk IN-085型)测量。



1 低压电动机; 2 低压转子盘; 3 中介轴承; 4 高压转子盘;
5 鼠笼式弹性支承; 6 高压电动机; 7 低压转子前支承;
8 低压转子限幅器; 9 进油管; 10 低压转子后支承;
11 集油环; 12 高压转子限幅器; 13 出油管

图2 中介轴承实验器照片

Fig. 2 Photo of intershaft bearing test rig

振动信号由高压转子、低压转子转速差触发,每个转速差周期采集1024点数据,每组数据连续采集32周期。

图3为中介轴承照片,中介轴承为单列圆柱滚子轴承,其几何参数和各元件故障特征倍频如表1和表2所示。该中介轴承外环有局部剥落。



图3 中介轴承照片

Fig. 3 Photo of intershaft bearing

表1 中介轴承几何参数表

Table 1 Geometric parameters list of intershaft bearing

滚动体直径 d/mm	中径 D_m/mm	接触角 $\alpha/(\circ)$	滚动体个数 z
8	125	0	34

表2 中介轴承故障特征倍频

Table 2 Fault characteristic octave frequencies of intershaft bearing

外环特征倍频	内环特征倍频	滚动体特征倍频
15.912	18.088	15.561

4.2 中介轴承故障诊断

图4~图6为某发动机中介轴承在外环转速为1200 r/min,内环转速为300 r/min的加速度振动信号的时域波形、转差域频谱、转差域包络谱。图4横坐标为转速差周期,1个转速差周期 T 代表 $1/(\Omega_h - \Omega_l)$ 。图5、图6的横坐标为转差倍频,表示 $(\Omega_h - \Omega_l)$ 的倍数。

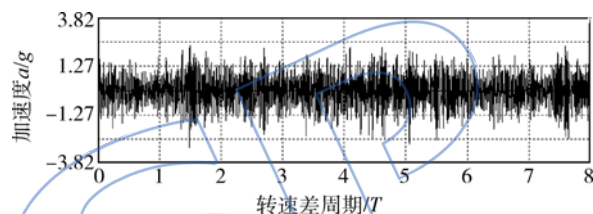


图4 中介轴承的振动信号时域波形

($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

Fig. 4 Vibration signal time-domain wave of intershaft bearing ($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

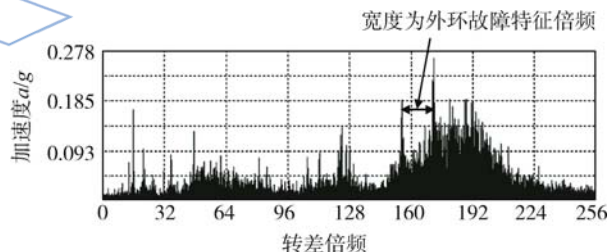


图5 中介轴承的振动信号转差域频谱

($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

Fig. 5 Vibration signal rotate-speed-difference-domain spectrum of intershaft bearing ($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

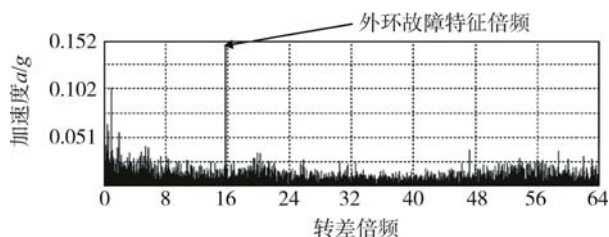


图6 中介轴承的振动信号转差域包络谱

($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

Fig. 6 Vibration signal rotate-speed-difference-domain envelope spectrum of intershaft bearing

($n_l = 300 \text{ r/min}$, $n_h = 1200 \text{ r/min}$)

由图 4 可见,中介轴承振动信号时域波形不具有明显的周期性。由图 5 可见,中介轴承转差谱中,振动共振区在较高的频率段,且共振区频谱有突出的间隔宽度为外环故障特征倍频的频率成分,即具有“恒间距”特征。需要指出的是,间隔宽度为外环故障特征倍频的频率成分并不是每一组数据都会出现,只是经常出现,这可能是高频部分噪声较多、较大造成的。由图 6 可见,转差域包络谱中,外环故障特征倍频突出,位置不变,这是外环发生故障的明显特征,即“恒频”特征。这种现象几乎所有数据都会出现。

图 7 和图 8 为发动机中介轴承在外环转速为 900 r/min,内环转速为 300 r/min 的振动信号转差域频谱和转差域包络谱。可见,由于内外环相对转速降低,图 7 和图 8 的振幅比图 5 和图 6 要小。图 7 中共振区频谱有突出的间隔宽度为外环故障特征倍频的频率成分,间隔宽度与图 5 相同,即具有“恒间距”特征。图 8 中,外环故障特征倍频出现的位置与图 6 相同,体现了中介轴承的“恒频”特征,确认了该轴承具有外环局部故障。

需要注意的是,如果中介轴承发生局部故障,则在不同相对转速的转差包络谱中,均应出现该局

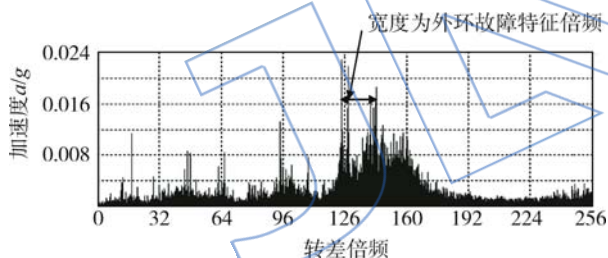


图 7 中介轴承的振动信号转差域频谱
($n_i = 300$ r/min, $n_e = 900$ r/min)

Fig. 7 Vibration signal rotate-speed-difference-domain spectrum of intershaft bearing
($n_i = 300$ r/min, $n_e = 900$ r/min)

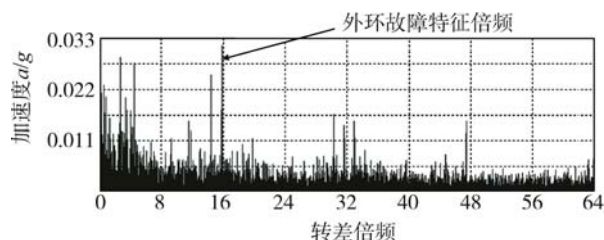


图 8 中介轴承的振动信号转差域包络谱
($n_i = 300$ r/min, $n_e = 900$ r/min)

Fig. 8 Vibration signal rotate-speed-difference-domain envelope spectrum of intershaft bearing
($n_i = 300$ r/min, $n_e = 900$ r/min)

部故障的故障特征倍频。否则,有可能是偶然现象。

4.3 转子不平衡和不对中信号分析

由于本次实验中转子不平衡和不对中主要集中在低频部分(相对于轴承振动信号),而加速度传感器对低频信号不敏感,因此,对转子不平衡和不对中响应的测量通过电涡流位移传感器进行。图 9 为低压盘振动位移信号的时域波形,其中,图 9(a)为高压转子转速为 900 r/min,低压转子转速为 300 r/min 的时域波形;图 9(b)为高压转子转速为 1200 r/min,低压转子转速为 300 r/min 的时域波形。图 10 为低压盘振动位移信号的转差域频谱,其中,图 10(a)为高压转子转速为 900 r/min,低压转子转速为 300 r/min 的转差域频谱;图 10(b)为高压转子转速为 1200 r/min,低压转子转速为 300 r/min 的转差域频谱。

由图 10 可见,在转差域频谱中,当转差不同时,转子的不平衡和不对中信号出现在不同的位置,相互间的宽度也不同,即不具有“恒频”特征和“恒间距”特征,与对式(6)和式(7)的分析结果相同。

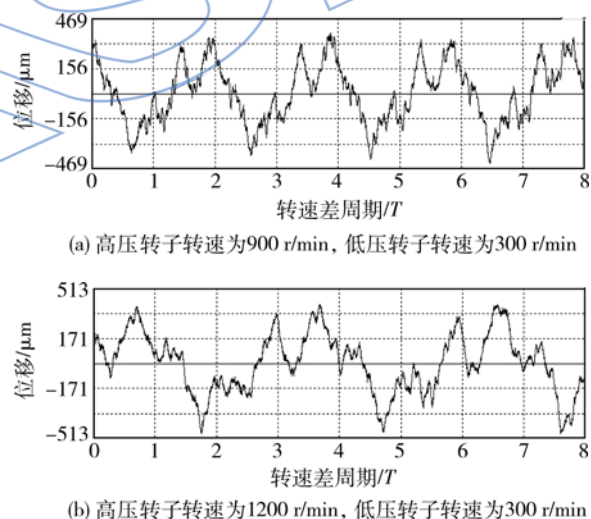
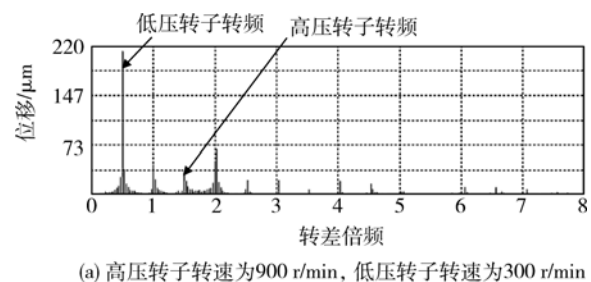
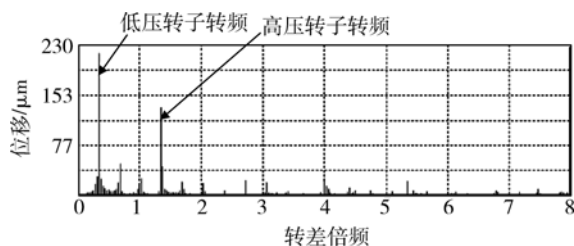


图 9 低压盘振动位移信号的时域波形

Fig. 9 Vibration displacement signal time-domain wave of low pressure disk



(a) 高压转子转速为 900 r/min, 低压转子转速为 300 r/min



(b) 高压转子转速为1200 r/min, 低压转子转速为300 r/min

图10 低压盘位移信号的转差域频谱

Fig. 10 Rotate-speed-difference-domain spectrum of low pressure disk displacement signal

5 结 论

1) 在不同转速下,带故障中介轴承的振动信号的转差域频谱中,会出现间隔宽度固定为故障特征倍频的频率成分,即出现故障倍频成分间隔宽度不随转速变化的特征,称之为倍频“恒间距”特征.在带故障中介轴承振动信号的转差域包络谱中,故障特征倍频成分的位置不随转速变化,即出现“恒频”特征.而高压转子、低压转子不平衡响应、外环静止轴承故障振动响应等其他振动信号不具备上述特征.

2) 实验结果表明,利用转差域中倍频“恒间距”特征和“恒频”特征可有效地诊断中介轴承的故障.

参考文献:

- [1] McFadden P D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1984, 96(1): 69-82.
- [2] McFadden P D. The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 98(2): 263-273.
- [3] 沈庆根. 化工机器故障诊断技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1994.
- [4] 雷剑宇, 廖明夫. 滚动轴承局部故障的特征倍频诊断方法[J]. 测控技术, 2007, 26(9): 72-75.
LEI Jianyu, LIAO Mingfu. A new approach based on the defect characteristic octave frequencies to diagnose local defects in a rolling element bearing[J]. Measurement and Control Technology, 2007, 26(9): 72-75. (in Chinese)
- [5] 陈刚, 廖明夫. 基于小波分析的滚动轴承故障诊断研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(12): 2810-2814.

CHEN Gang, LIAO Mingfu. Fault diagnosis for a rolling element bearing based on wavelet analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(12): 2810-2814. (in Chinese)

- [6] 王平, 廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 606-612.
WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 606-612. (in Chinese)
- [7] 孟涛, 廖明夫. 利用时延相关解调法诊断滚动轴承的故障[J]. 航空学报, 2004, 25(1): 41-44.
MENG Tao, LIAO Mingfu. Detection and diagnosis of the rolling element bearing fault by the delayed correlation envelope technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(1): 41-44. (in Chinese)
- [8] Gasch R, Nordmann R, Pfuetzner H. Rotordynamik[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [9] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] 廖明夫, 马振国, 邓巍. 某型航空发动机中介轴承外环故障振动分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2422-2426.
LIAO Mingfu, MA Zhenguo, DENG Wei. Vibration analysis on turbofan engine intershaft bearing with outer race defect[J]. Journal of Aerospace and Power, 2011, 26(11): 2422-2426. (in Chinese)
- [11] 邓巍, 廖明夫, 马振国. 航空发动机中介轴承局部故障边带差值诊断法[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(2): 335-339.
DENG Wei, LIAO Mingfu, MA Zhenguo. Sideband difference diagnostics of local defects for aero-engine intershaft bearing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(2): 335-339. (in Chinese)
- [12] 雷剑宇. 滚动轴承局部故障的振动分析与诊断[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
LEI Jianyu. Vibration analysis and diagnosis on the local fault of a rolling element bearing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [13] 屈梁生. 机械故障诊断学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [14] 孟涛. 齿轮与滚动轴承故障的振动分析与诊断[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
MENG Tao. Vibration analysis and diagnosis on the fault of the gear and rolling element bearing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [15] Vance J M. Rotordynamics of turbomachinery[M]. New York: Wiley, 1987.