

文章编号:1000-8055(2011)11-2422-05

某型航空发动机中介轴承外环故障振动分析

廖明夫, 马振国, 邓 巍

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 根据某型双转子航空发动机的结构和动力学特点,设计建造了中介轴承实验器.实验中发现中介轴承的外环故障包络谱与内环故障和滚动体故障的包络谱相似,也受周向载荷不均匀分布和传感器相对位置周期性变化的影响.基于此,推导了中介轴承故障特征倍频公式,建立了中介轴承局部故障的理论模型,采用希尔伯特包络检波技术,对外环剥落轴承振动信号进行了分析,结果表明,所建立的中介轴承局部故障理论模型是正确的.

关 键 词: 航空发动机; 中介轴承; 外环故障; 故障特征倍频; 剥落

中图分类号: V229⁺.2

文献标志码: A

Vibration analysis on turbofan engine intershaft bearing with outer race defect

LIAO Ming-fu, MA Zhen-guo, DENG Wei

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to structural characteristics and kinetic characters of dual-rotor turbofan engine, a intershaft bearing test rig was developed to experiment and test vibration of a intershaft bearing with contact fatigue spalling. Defect characteristic octave frequency formula of intershaft bearing and a model was developed to describe the vibration signals and its envelope signals produced by a intershaft bearing with defect.

Key words: turbofan engine; intershaft bearing; outer race defect; defect characteristic octave frequency; fatigue spalling

由于多转子发动机在气动稳定性上要优于单转子发动机,现代航空发动机多采用双转子或三转子结构.其中一般会使用中介轴承,中介轴承是高压转子和低压转子之间支承的关键部件.若中介轴承发生故障,轻则转子振动增大,重则转子抱死,发动机空中停车.因此,对中介轴承进行状态监测、故障诊断和预警十分重要^[1-7].

本文以研究中介轴承发生故障时的振动特点为目的,以某型双转子航空发动机在大修中替换下的外环大面积剥落中介轴承(下称外环剥落轴承)为实验对象,设计建造了中介轴承实验器.在实验器上,使中介轴承外环和内环所支承的转子

同向运转,在内外环不同相对转速下测试了外环剥落轴承的振动信号,对振动信号进行了希尔伯特包络谱分析,总结了外环剥落故障轴承的振动特点,并与建立的理论模型进行对比,建立了中介轴承诊断方法,实验结果表明,该方法是有用的.

1 外环剥落故障轴承和实验器介绍

滚动轴承的内、外滚道和滚动体表面既承受载荷又相对滚动.由于交变载荷的作用,首先在表面下一定深度处(最大剪应力处)形成裂纹,继而扩展到接触表面使表层发生剥落坑,最后发展到大片剥落,这种现象就是疲劳剥落.疲劳剥落会造

收稿日期:2010-11-30; 修订日期:2011-02-12

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.

成运转时的冲击载荷、振动和噪声加剧。

某型双转子航空发动机的中介轴承,为圆柱滚子轴承,处于在高压涡轮转子和低压涡轮转子之间,该处环境温度高,润滑不易,导致极易发生故障。发动机每大修一次,均发现该中介轴承重则疲劳剥落,滚子出现周向划痕;轻则虽无明显局部缺陷,但滚道上制造时特殊处理过的表面已轻微磨损或烧伤,滚道原来淡黄色的已变为银白色,越往滚道中心变色越严重。

本文以寻找外环剥落故障轴承的振动信号特点为目的,选用图 1 所示的具有外环剥落故障的中介轴承为实验研究对象。



图 1 中介轴承

Fig. 1 Intershaft bearing

建立了简单的中介轴承实验器。图 2 为中介轴承实验器照片。图中左、右两盘分别为高压转子盘 2 和低压转子盘 4,两转子轴通过中介轴承 3 联接,其中高压转子轴 5 联接在轴承的外环上,低压转子轴 6 连接在轴承内环上。1 为鼠笼式弹支,模拟发动机中的弹性支承。轴 5 左端和轴 6 右端分别以联轴器联接驱动电机。7 为油管,用于润滑中介轴承。8,9 为轴 6 的支座。10,11 为限幅器,用来限制轴 5,轴 6 的振幅,起保护作用。

2 中介轴承的故障特征倍频和局部故障的理论模型

2.1 中介轴承的故障特征倍频

依据文献[8],外环静止内环旋转的轴承故障特征倍频是指故障特征频率与转速的比值。区别于绝大多数滚动轴承在实际应用中总是保持外环静止、内环与轴一起旋转,中介轴承的内环和外环

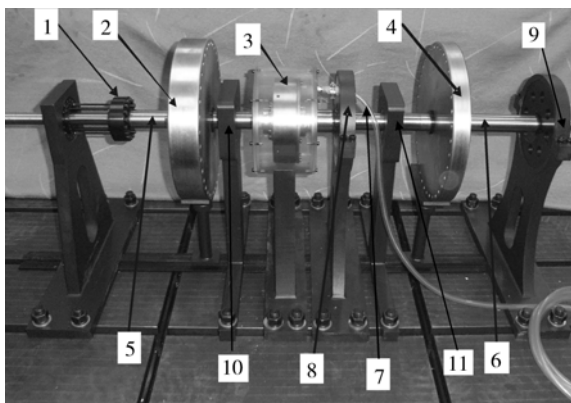


图 2 中介轴承实验器

Fig. 2 Intershaft bearing test rig

各随一个轴旋转。本文定义中介轴承的故障特征倍频为故障特征频率与转速差的比值。因此,中介轴承的故障特征倍频^[8-9]计算方法不同于一般用途的轴承。本文参考文献[8,10]中的推导方法,建立了中介轴承故障特征倍频的计算公式,如表 1 所示。表中 $f_i, f_e, f_{o1}, f_{em}, f_{im}$ 分别为对应元件的故障特征频率; n_i 和 n_e 分别为内环和外环转速,转速方向相同则 n_i 和 n_e 同号,否则 n_i 和 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(中径); z 为滚动体个数。

表 1 各元件的故障特征倍频公式

Table 1 Formulas of intershaft bearing characteristic octave frequencies

缺陷位置	故障特征倍频
内环	$F_i = \frac{f_i \times 60}{ n_i - n_e } = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right) z$
外环	$F_e = \frac{f_e \times 60}{ n_i - n_e } = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right) z$
滚动体	$F_{o1} = \frac{f_{o1} \times 60}{ n_i - n_e } = \frac{D_m}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D_m^2} \cos^2 \alpha \right)$
保持架与外圈摩擦	$F_{em} = \frac{f_{em} \times 60}{ n_i - n_e } = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right)$
保持架与内圈摩擦	$F_{im} = \frac{f_{im} \times 60}{ n_i - n_e } = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d \cos \alpha}{D_m} \right)$

2.2 轴承参数和故障特征倍频值

中介轴承参数如表 2 所示。根据轴承参数,通过表 1 中的公式,计算得到中介轴承的故障特征倍频,如表 3 所示。

表 2 中介轴承参数表

Table 2 Parameters 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 3 中介轴承故障特征倍频表

Table 3 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

2.3 滚动轴承外环局部故障的理论模型

轴承故障引起振动信号的时域和频域形态是滚动轴承状态监测与故障诊断的基础^[9]. 若滚动轴承工作表面存在离散型缺陷或局部损伤, 当另一工作表面通过缺陷点时, 就将发生冲击作用, 会激起轴承、支座或传感器系统某些元件的固有频率振动, 在系统阻尼的作用下, 产生衰减振动信号. 轴承连续运转, 就会产生成系列的衰减振动信号. 文献[9, 11-12]建立了外环固定内环随轴转动情况下单点故障和多点故障理论模型.

不考虑转子系统不平衡、中等转子因素对轴承载荷的影响, 则外环静止的滚动轴承, 其外环某一点的单位面积的载荷(载荷密度)是固定的. 当发生外环局部故障, 传感器在固定支座安装时, 每次冲击的力度相同, 引起的冲击衰减振动的幅值相同, 振动信号的传递路线也相同. 因此, 文献[9-11]建立的模型中, 外环故障振动信号不受周向载荷不均匀分布和传感器相对位置周期性变化的影响. 此时, 外环振动信号的基本形态如图 3 所示. 图中 $x(t) = d_0 e^{-\omega_h \xi t} \sin(\omega_h t + \varphi)$, 为衰减振动信号, $d(t) = d_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d)$, 为脉冲力序列, T_d 为冲击衰减振动发生的时间间隔, $1/T_d$ 为外环故障特征频率.

中介轴承外环故障振动信号不同于外环静止的轴承, 中介轴承外环和内环同时旋转, 其发生外环故障时, 故障点的载荷密度随着外环的转动作周期性变化, 每次冲击时相对于传感器的位置也不同. 因此, 中介轴承的外环故障振动信号与内环相似, 也受周向载荷不均匀分布和传感器相对位置周期性变化的影响. 一般外环静止的轴承, 其内

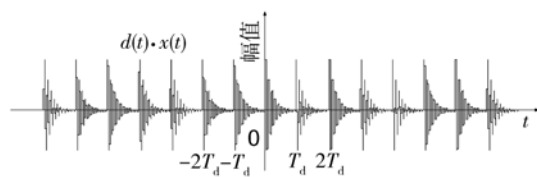


图 3 外环静止轴承的外环局部故障振动信号基本形态^[8]

Fig. 3 Basic vibration shape of outrace-static bearing with outrace fault^[8]

环(滚动体)发生局部故障时, 载荷区影响函数和位置影响函数的周期是转频(保持架旋转频率)的倒数^[9]. 若中介轴承外环(内环或滚动体)发生局部故障, 则载荷区影响函数和位置影响函数的周期 T_s 是外环(内环或保持架)转频的倒数. 当中介轴承外环发生局部故障且其载荷区影响函数和位置影响函数同相位或相反(传感器安装方向为竖直方向)时, 振动信号基本形态应如图 4 所示. 其中, $q(t)$ 为载荷区影响函数^[11], $a_v(t)$ 为位置影响函数^[8], T_s 为外环(内环或保持架)转频的倒数, T_d 为外环(内环或滚动体)故障特征频率. 相应的, 其包络谱的基本形式如图 5 所示. 图中 $D(f)$, $Q(f)$, $A_v(f)$ 分别为 $d(t)$, $q(t)$, $a_v(t)$ 的频谱, $E(f)$ 为 $x(f)$ 的上包络 $e(t) = d_0 e^{-\omega_h \xi t}$ 的频谱, $f_s = 1/T_s$, $f_d = 1/T_d$. 可见, 中介轴承外环故障振动信号的包络谱中, 外环故障特征频率 f_d 及其倍频 kf_d 的周围, 存在 $kf_d \pm mf_s$ ($k=0, 1, 2, 3, \dots$; $m=1, 2, 3, \dots$) 的边频分量, 此时, f_s

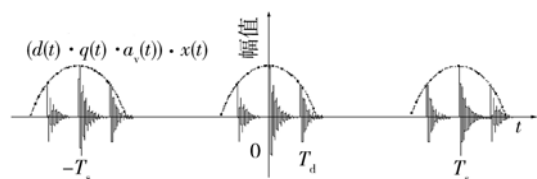


图 4 中介轴承的外环局部故障振动信号基本形态
Fig. 4 Basic vibration shape of intershaft bearing with outer race fault

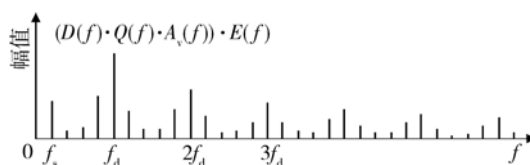


图 5 中介轴承外环局部故障振动包络信号频谱基本形态

Fig. 5 Basic vibration shape of intershaft bearing with outer race fault

为外环转频,这与外环静止轴承的内环和滚动体故障振动信号包络谱类似。

3 测试系统

本文用自行研发的齿轮和滚动轴承状态监测与故障诊断系统 GBMD2006 对中介轴承进行振动测试。该系统主要应用时域波形、频谱、希尔伯特包络谱,包络相关谱等方法对轴承振动信号进行分析。

硬件主要包括:信号调理器、采集卡、振动传感器、转速传感器等。信号调理器用于对信号进行放大、滤波处理和对需要供电的传感器供电等。信号采集卡采用美国国家仪器有限公司(NI)的 USB6210 数据采集卡,其参数为最大采样频率 250 kHz、最多 16 个单点接地通道、分辨率为 16 位、测量范围最大 ± 10 V。由于轴承局部故障信号属于冲击引起的衰减振动信号,衰减振动频率为轴承元件或支座固有频率,故振动传感器选用频响范围较宽的压电式加速度传感器 AS020。该传感器的主要参数为:灵敏度 100 mV/g,频率响应 4~10 kHz(0.5 dB),测量范围 ± 80 g。转速测量采用光电传感器。高压轴和低压轴各安装一只光电传感器,分别测量高压转子和低压转子转速。

起动两驱动电机,使高压转子和低压转子同向转动。将驱动高压转子和低压转子的电机稳定在某转速下,采用同步整周期采样。以贴在转子轴上的反光纸触发光电传感器,两次触发之间的时间为转子转动周期。先后采集高压转子和低压转子转速,采样频率是高压转频和低压转频之差的 n 倍。

4 实验分析

实验数据采用希尔伯特包络解调谱分析,并给出故障特征倍频参考线。现在的实验阶段,实验器未调整至最佳状态,取较低转速情况下一组数据进行分析。图 6 为高压转子(外环)转速为 1189 r/min,低压转子(内环)转速为 304 r/min 时,外环故障包络解调谱,纵坐标为幅值,横坐标为转速差的倍频,即 1 倍频是 14.75 Hz(1189 - 304 = 885 r/min)。图 6 中打点数据处的倍频如表 4 所示。其中,第 6 点和第 8 点为外环故障特征倍频 F_e 和 $2F_e$;1,2,3 点相邻点的距离为 1.3435 倍频左右,4,5,6,7 点相邻点的距离也为 1.3435 倍频左右。1.3435 倍频为外环转速相对于内环外环转速差的倍频($1189/885 = 1.3435$);1,2,3 点为

$0 \times F_e$ 倍频(直流量)的边频,4,5,7 点为 F_e 倍频(点 6)的边频,即边频带各频率间隔为外环转频,这与图 5 的分析结果相同。边频间距不精确等于 1.3435、外环故障倍频(第 6 点)不精确等于 15.912 的原因是,采集数据的总时间长度有限(以 32 周期为例),根据采样定律,分辨率最高为 $1/32 = 0.03125$ 倍频。

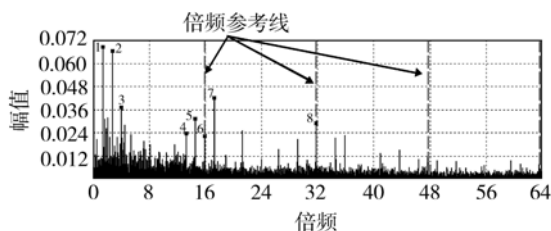


图 6 外环故障包络解调谱

Fig. 6 Envelope frequency spectrum of vibration of intershaft bearing with outerrace fault

表 4 打点处数据的倍频值
Table 4 Value of marked frequency

序号	1	2	3	4
倍频	1.3438	2.6875	4.0313	13.218
序号	5	6	7	8
倍频	14.562	15.906	17.25	31.812

5 总结

本文建立了中介轴承故障特征倍频公式和中介轴承故障的振动信号理论模型,并在设计建造的实验器上进行了外环剥落中介轴承验证试验。结果表明,所建立的中介轴承特征倍频公式和振动信号理论模型是正确的。

参考文献:

- [1] Gasch R, Nordmann R, Pfuetzner H. Rotordynamik[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [2] 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(12): 2810-2814.
CHEN Gang, LIAO Mingfu. Fault diagnosis for a rolling element bearing based on wavelet analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2007(12): 2810-2814. (in Chinese)
- [3] 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)

- Chinese)
- [4] 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)
- [5] Cavallaro G, Nelias D. Analysis of high-speed intershaft cylindrical roller bearing with flexible rings[J]. Tribology Transactions, 2010, 48(2): 154-164.
- [6] 王平. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调方法[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- WANG Ping. Adaptive demodulated resonance technique for diagnosing the fault of the rolling element bearing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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 & Control Technology, 2007, 26(9): 72-75. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 沈庆根. 化工机器故障诊断技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994.
- [11] McFadden P D, Smith J 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.
- [12] McFadden P D, Smith J D. The vibration produced by multiple point defects in a rolling element bearing[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 98(2): 263-273.