

发动机转子系统早期故障特征提取方法*

王仲生, 黎 伟

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 对飞机发动机转子系统早期故障特点进行分析的基础上, 提出了利用虚拟仪器和 M atlab小波工具箱分析软件对其早期故障进行检测和特征提取的方法。文中对早期故障特征量的选取、有用信号与噪声信号的分离方法、突变信号与奇异信号的特征提取等进行了分析和研究, 并以转子早期碰摩和早期不平衡为例进行了实验研究。结果表明, Labview 和 M atlab小波分析软件相结合, 能够快速有效地提取发动机转子系统的早期故障特征, 为发动机转子系统早期故障的快速识别提供了一种新途径。

关键词: 航空发动机; 转子; 故障; 特征提取[†]

中图分类号: V231.96 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2006) 02-0137-04

Approach in early fault features extraction of aero-engine rotor system

WANG Zhong-sheng LIW ei

(Coll. of Aeronautics, Northwestem Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract A method to detect early fault and extract its features of aero-engine rotor systems with VI (Virtual Instruments) and MT (M atlab Tools) is proposed. It is based on the analysis of early fault of the aero-engine rotor systems. The method is described in detail. The early fault characteristic signal from detected signals and analysis the selection of early fault eigenvalue is extracted, in which useful signal is separated from dominant noise signal. The experiments on the early rub-in-pact and early unbalance of the aero-engine rotor system is performed and the effectiveness of our method was demonstrated in the following respects: it shows that not only complex calculation can be avoided with VI and MT but also early fault features can be quickly extracted. The early fault feature signal can be obtained by means of de-noising, decomposition and reconstruction. Early fault features of aero-engine rotor system can be fast extracted from the complex signals by energy distribution of feature frequency. Early fault can be separated and amplified by Wavelet Analysis.

Key words Aero-engine; Rotor; Fault; Fault feature extraction[†]

1 引 言

转子系统是发动机的核心部件。飞机在飞行过程中, 发动机转子系统既要承受高温、高压气流的冲击作用, 又要在高速旋转中为发动机和飞机提供足够的动力。由于其在大功率、高负荷环境下运转, 转子系统最容易发生故障。如果在转子系统故障还未达到危险程度之前或故障刚刚萌生, 就能将其检测出来, 将会有效地提高发动机工作的安全性和可靠性及

对故障的防护能力。宋友等提出了基于小波包分解的早期碰摩故障诊断方法^[1], 王孝江等提出了基于局域波时频分布的转子系统早期故障诊断方法^[2], 张华君等提出了一种非线性频谱分析的多模型在线早期故障预报方法^[3], Lin Kin 等提出了利用模型与神经网络来诊断转子的早期碰摩^[4-6], 这些都为早期识别发动机转子系统故障做了很好的尝试。本文通过对发动机转子系统早期故障特点的分析, 提出了利用虚拟仪器和 M atlab小波工具箱分析软件, 对其早期故障进行检测、信噪分离和特征提取的方法。该方

* 收稿日期: 2005-08-30 修订日期: 2005-12-14

基金项目: 国家自然科学基金 (60472116); 航空科学基金资助 (03153068)。

作者简介: 王仲生 (1946—), 男, 博士生导师, 研究领域为智能故障诊断与状态监控等方面的研究。

Email: sazs_wang@nwpu.edu.cn

法由于充分发挥了 LabVIEW 和 Matlab 各自的优势,提高了发动机转子系统早期故障特征提取的有效性和快速性。

2 发动机转子系统早期故障特点

发动机转子系统主要由转子、压气机、涡轮、风扇、支承等组成。发动机在工作过程中,由于转子系统受高温、高压气流和多种载荷的作用,其常见故障除结构件的疲劳、裂纹、腐蚀、断裂、磨损、弯曲、变形等外,还有转子不平衡、不对中、动静件碰摩、松动等。这些故障在早期主要有以下特点:

(1)故障信号很微弱。发动机转子系统早期故障,根据其变化快慢可分为渐变型和突变型两类。无论哪一类,在早期由于故障刚刚形成或出现,其信号都很微弱,一般很难发现和检测,只有经过特征处理,才能识别出这些微小故障。

(2)故障信号会被噪声信号湮没。由于发动机转子系统是在高温、高压、高负荷条件下运转,背景噪声信号通常远远大于早期故障信号,并将早期故障信号湮没。为了从强噪声信号中提取出早期故障特征信号,必须对信号进行消噪处理。

(3)故障信号常具有瞬变性和奇异性。瞬变性就是信号大小突然发生变化,奇异性就是在信号波形图上出现一些异常信号。这些瞬变信号和奇异信号,非常有助于发现和提取早期故障特征信号。

3 发动机转子系统早期故障特征提取

3.1 早期故障特征量的选取

故障特征量应能反映故障特征的变化。一个故障特征量可以包含多种故障信息,一种故障也可以在多个故障特征量中得到反映。作为故障的特征量,一般可分以下三类^[7]:

物理特征量,如频率,振型,幅值,相位,图像,光谱,磨粒等。

结构特征量,如质量,刚度,阻尼,裂纹,弯曲,变形等。

数学特征量,如均值,方差,特征向量,响应函数等。

对于发动机转子系统,由于它是一个高速、高负荷旋转部件,在运转过程中必然会产生振动。正常状态下,振动比较平稳;若发生故障,必然产生异常振动。因此,可以选择反映转子系统的异常振动能量作为其早期故障特征量。该特征量在时域、频域、幅值

域和时频域都具有明显的故障表征。若对其进行小波包变换,就可以组成对故障更敏感的小波特征量,这样就可以根据不同小波包序列和不同小波包位置上奇异能量的大小和分布,快速识别出早期故障。在选取早期故障特征量时须注意:

(1)早期故障特征量必须能够反映发动机转子系统的早期故障特征或故障模式;

(2)早期故障特征量对发动机转子系统的早期故障或故障参数的微小变化最敏感;

(3)早期故障特征量要便于提取、识别和分析。

3.2 信噪分离与奇异特征提取

3.2.1 信噪分离

由于发动机转子系统是在强噪声环境下运转,且噪声分布范围较宽,为了快速有效地从强大的背景干扰噪声中提取出微弱的早期故障特征信号,本系统采用 LabVIEW 和 Matlab 小波分析软件对信号进行组合消噪处理。

传感器检测的发动机转子系统的振动信号,首先利用 LabVIEW 中的信号分析处理和滤波函数图标,对信号进行一次快速消噪处理,如果故障特征信号比较明显,则从其中提取出早期故障特征信号;若故障特征信号不明显,再转入 Matlab 小波工具箱进行二次消噪处理。Matlab 小波消噪有三种途径:

保留重构法,就是在了解所关心频率成分的情况下,通过小波分解,只保留所关心频段的小波变换结果,而将其它频段的小波系数置零,然后再进行重构以消除噪声。

置零重构法,若噪声信号和有用信号位于不同频段,则可将噪声信号所对应频段的小波系数置零,然后重构以消除噪声。

阈值重构法,就是信号经小波分解后,将小于和等于阈值的小波系数全置零,然后通过对保留信号的小波系数进行重构以消除噪声。阈值有软阈值和硬阈值^[8]。

保留重构法要明确所关心的频率成分,置零重构法要知道噪声信号和有用信号的频段,阈值重构法要确定合适的阈值。使用时三种方法可单独使用,也可组合使用,具体可根据检测信号的特点灵活选用。

3.2.2 奇异特征提取

奇异特征提取,可根据突变信号和奇异信号在不同小波包序列与位置上能量的大小分布,利用 Lipschitz 指数 α 就能提取出早期异常特征信号。

设有正指数 n , $n \leq \alpha \leq n+1$, 如果存在常数 $A > 0$

及 n 次多项式 $\rho_n(x)$, 使

$$|f(x) - \rho_n(x - x_0)| \leq A |x - x_0|^\alpha \quad (1)$$

则称 $f(x)$ 在 x_0 处的 Lipschitz 指数为 $\alpha^{[9]}$, x_0 为小波变换在尺度 α 下的局部模极大值点。若 $f(x)$ 在 x_0 处的 $\alpha \neq 1$, 则称 $f(x)$ 在 x_0 处是奇异的; 若 $f(x)$ 在 x_0 处有界不连续, 则 $\alpha = 0$ 。对于有效信号, 则 $\alpha > 0$ 且其小波变换模的极大值随 α 的增大而增大; 对于白噪声, 则 $\alpha < 0$ 且其小波变换模的极大值随 α 的增大而减少。 α 越大, 函数越光滑; α 越小, 表示函数在某点处变化越剧烈; 若 $f(x)$ 在 x_0 的 $\alpha < 1$, 则 x_0 为 $f(x)$ 的奇异点。由于 $f(x)$ 在一点的 α 值反映了该点的奇异性大小, 这样, 将奇异性指数 α 作为早期故障的敏感因子, 就可以根据 α 的大小提取出信号中的突变奇异信号。

奇异点 x_0 的位置, 可根据 $f(x)$ 的小波变换^[10]

$$wf(s, x) = \frac{1}{s} \int_{x-sk}^{x+sk} f(x) \Psi^* \left| \frac{x-t}{s} \right| dt \quad (2)$$

在 x_0 的某一邻域内如果有

$$|wf(s_0, x)| \leq |wf(s_0, x_0)| \quad (3)$$

的模极大值点 (s_0, x_0) 来确定。其中 $s = 2^{-j}$, j 为分解的级数。

4 实验结果及分析

实验是在本单位转子试验台上进行。数据采集程序和转速控制程序均用 LabV IEW 的 C 语言编写。安装在两个轴承座 x, y 方向上的 4 个加速度传感器用来采集转子的碰摩、不平衡等振动信号, 采集的数据可在 CRT 窗口用波形实时显示, 并可自动保存到 SD 文件中。用 Notepad 程序可以打开 SD; 再将 SD 复制到 Matlab 文件窗口和保存为 *.mat 格式的文件中。这样, 在 LabV IEW 平台上和 Matlab 命令窗口、M 文件窗口、小波分析工具箱图形用户界面, 均可方便的调用这一数据。

4.1 早期碰摩检测与特征提取

碰摩实验是在转子试验台上用铝制契块人为控制撞击安装在转轴上的负载盘来进行。实验时, 在某一转速下, 每隔一定时间用契块撞击一下负载盘, 撞击力度由轻至重以模仿轻微碰摩和严重碰摩。实验共进行了 6 次, 前 3 次为轻微碰摩 (即早期碰摩), 后 3 次为较重碰摩。振动传感器检测的碰摩故障信号分别被命名为 CZPM 6_N (垂直碰摩 6 次) 和 SPPM 6_N (水平碰摩 6 次), 其中 N 为振动传感器的通道信号。在线采集碰摩信号时首先进行消噪处理, 然后用奇异

点检测程序分别对 CZPM 6_N 和 SPPM 6_N 进行处理。图 1 和图 2 为用 db5 (即 5 阶 Daubechies 小波) 对第 2 和第 3 通道所采数据进行分解与重构后的 6 层部分波形图。图中 $s = a_6 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1$ 。

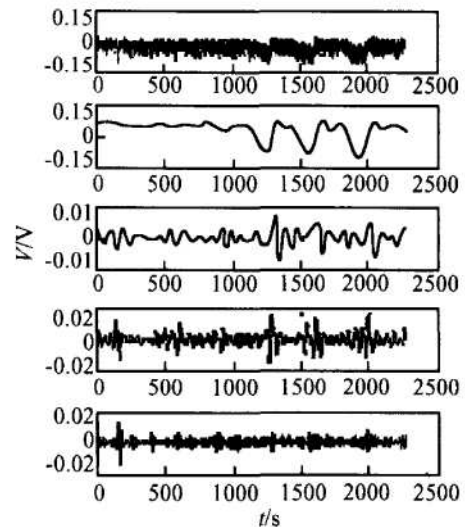


Fig 1 CZPM 6_2 wavelet decomposition diagram

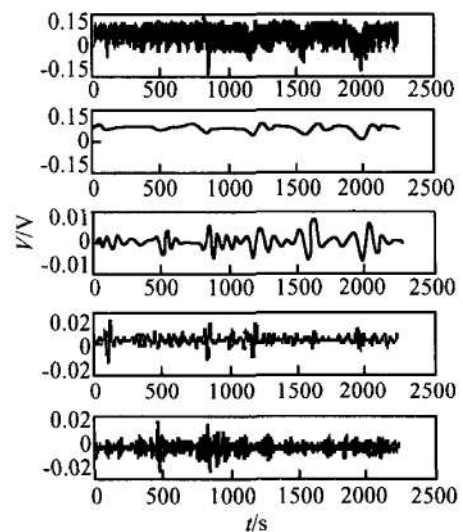


Fig 2 CZPM 6_3 wavelet decomposition diagram

从图中可以看出, 后 3 次碰摩在原始波形 s 上可以明显地显示出来 (图 1 中的 1300, 1600, 2000 处和图 2 中的 1200, 1500, 1900 处), 这是因为这 3 次碰摩冲击能量较大, 所以波形特征很明显; 而前 3 次碰摩因冲击能量小, 所以在原始波形图 s 上不易看出, 但对其进行小波分解后, 在 d_6, d_5 两层细节信号图上不光后 3 次严重碰摩的特征信息很明显, 而且前 3 次轻微碰摩的特征信息也体现出来 (图 1 中的 150, 600, 1000 处和图 2 中的 100, 500, 800 处)。可见利用小波分解, 可以有效地提取在时域波形上不易观察的奇

异故障特征。另外还可以发现,只有在 d_6 d_5 两层细节信号图上可以明显地发现 6 次碰摩信息,而在其它层上并不明显。根据小波分解结果, d_6 和 d_5 两层细节所对应的频率为低频范围,这就表明早期碰摩故障引起的信号突变可以在低频段被检测和提取出来。

4.2 早期不平衡检测与特征提取

不平衡实验是通过在负载盘的螺钉孔上用加配重螺钉的方式进行。不平衡量的大小,可通过调整安装配重螺钉的大小和数量人为调节控制。为了有效地检测早期不平衡故障,首先利用 LabVIEW 滤波函数对检测的振动信号进行一次背景消噪,然后在 Matlab 操作界面点击 Wavelet 1-D 图标,对信号进行装载、分解和压缩降噪等操作。图 3 和图 4 分别为对以 bph_{iN} (N 通道不平衡)命名的 db5 小波进行 6 层分解和利用软硬两种阈值进行消噪后的功率谱图。

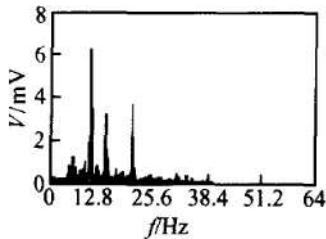


Fig 3 bph_2 power spectrum after de-noise

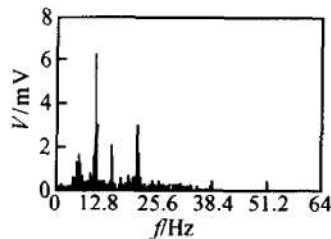


Fig 4 bph_3 power spectrum after de-noise

从图中可以看出,在 10 Hz 处,经消噪后的不平衡故障明显地显示出来,此频率正好对应转子的旋转频率 (600 r/min)。12.8 Hz 和 20.48 Hz 处的两个峰值,经分析比较可知分别为轴承损伤和不对中故障特征。

以上结果表明,早期不平衡故障,由于不平衡量很小,容易被噪声信号所淹没,利用 LabVIEW 和小波工具箱中的压缩降噪操作消除噪声信号后,就可以将早期不平衡故障有效地检测和提取出来。

5 结论

(1) 将小波分析与虚拟仪器相结合,在 LabVIEW 环境下利用 Matlab 工具箱中的小波分析提取发动机

转子系统的早期故障特征信号,可以避免繁杂的复杂计算,操作简便,分析提取速度快。

(2) 在对信号进行小波包分解之前,先对原始信号进行消噪,然后再分解和重构,这样得到的重构信号较少受噪声干扰,容易体现早期故障的本质特征。

(3) 由于小波包分解能在全频段内对信号进行多层次的频带划分,这样根据特征频率在各频带内的能量分布,就能方便地提取出早期故障特征信号。

(4) 小波分析对早期故障信号具有很强的提取能力,它能将隐藏在正常振动信号中的早期故障信号进行分离和放大,是一种提取发动机转子系统早期故障特征的有效方法。

参考文献:

- [1] 宋友,柳重堪,李其汉. 基于小波包分解的早期碰摩故障诊断研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(1): 87~90
- [2] 马孝江,王风利,蔡悦,等. 局域波时频分布在转子系统早期故障诊断中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 161~164
- [3] 张华君,韩崇昭. 一种基于非线性频谱分析的多模型在线早期故障预报方法 [J]. 计算机工程与应用, 2004, (3): 182~184
- [4] Lin H H, George M C. A model-based approach to robot fault diagnosis [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2005, 18(4): 225~233
- [5] Kim K, Partos A G. Reducing the impact of false alarms in induction motor fault diagnosis [J]. *Journal of Dynamic System Measurement and Control*, 2003, 125(1): 80~95
- [6] Vania A, Pannacchi P. Experimental and theoretical application of fault identification measures of accuracy in rotating machine diagnostics [J]. *Mechanics System, Signal Process*, 2004, 18(2): 329~352
- [7] 黄文虎,夏松波,刘瑞岩,等. 设备故障诊断原理、技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] 王成栋,朱永生,张优云. 转子振动信号消噪方法研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(4): 252~255
- [9] 岑翼刚,岑丽辉,孙德宝. 信号 Lipschitz 奇异性的计算与分析 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 18
- [10] 向阳,蔡悦斌. 小波分析在信号奇异性检测及瞬态信号检测中的应用 [J]. 振动与冲击, 1997, 16(4).

(编辑: 郭振伶)