

小波分析在发动机早期故障识别中的应用研究

王仲生, 何 红, 陈 钱

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:在对飞机发动机早期故障进行分析的基础上,提出了利用虚拟仪器和小波分析相结合对发动机早期故障进行识别的原理与方法。文中对如何从检测信号中提取早期故障特征信号和对早期故障特征信号进行分离、放大、识别等进行了分析和研究,并通过实验证明了所提方法的有效性。结果表明,虚拟仪器强大的图形化功能与小波分析良好的多分辨率时频局部化特性,能够从复杂的微弱信号中提取出早期故障特征信号,并能有效地消除噪声,对早期故障进行快速识别。

关 键 词:小波分析, 飞机发动机, 早期故障, 特征提取与识别

中图分类号: TP277

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2006)01-0068-04

发动机是飞机的核心,发动机的安全性和可靠性将直接影响飞机的安全飞行和性能。如何在发动机发生故障早期,即故障刚刚萌生,或还未对发动机的性能和工作状态造成危害之前,就能将其检测出来,并采取有效措施将其消除,对保障发动机安全可靠工作更具有重要意义。

关于飞机发动机的故障诊断,人们进行了广泛地研究,并取得了许多研究成果^[1~3]。但关于发动机早期故障诊断,目前还是人们研究的一个难点。由于飞机发动机工作环境的特殊性,早期故障信号往往被噪声信号所淹没。因此,如何从微弱信号中或已被噪声淹没的信号中提取出早期故障特征信号,是早期故障识别的关键。本文将虚拟仪器与小波分析相结合用于飞机发动机早期故障的特征提取和识别,并通过实验对所提方法进行了验证,为提高飞机发动机的安全性和可靠性及对早期故障的识别、预示与防护能力,提供了一种有效途径。

1 发动机早期故障分析

飞机发动机是集机、电、液、气等于一体的复杂系统。发动机在工作过程中,既要受到内部载荷和振动的冲击作用,还要承受外部气流、温度、压力和人

为误操作等的影响。发动机在内外条件 and 人为因素的作用下,不可避免地会发生故障。发动机转子系统的常见故障有转子不平衡、转子不对中、转子弯曲、转子裂纹、转子结构件损伤、转子动静件碰摩等,其故障特征如表1所示。

表1 发动机转子系统常见故障特征

故障名称	故障特征
转子不平衡	一阶主频为主;轴心轨迹近似为圆。
转子不对中	出现二倍频分量;振动波形呈周期性。
转子碰摩	工频成分较大,二、三阶谐波分量较小;具有宽频性,频带上常伴有分数倍频
转子裂纹	出现多个共振频率;工频分量的分散度较大;二倍频分量的幅值和相位不稳定。
转子弯曲	幅值和相位缓慢变化;基频成分突出。
转子结构件损伤	应变能发生变化;柔度发生变化。

这些故障在早期都有一定的先兆,只要及时捕捉和提取这些故障信息,并采取相应措施,就可以防患于未然。

2 发动机早期故障小波识别

小波实际上是一小段被谐波调制的信号波^[4]。小波良好的时频特性可以有效地提取特征信号,发

动机早期故障的小波识别就是基于这种思想进行的。

设时域信号为 $s(t)$, 其小波变换为

$$WT_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中, $a > 0$ 为尺度因子; b 为时移因子; $\psi(t)$ 为小波母函数(即基本小波函数), 它具有有限的时窗和频窗, 即双窗函数; $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 是由 $\psi(t)$ 经尺度伸缩和时间平移产生的函数族(即小波基函数), 因子 $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ 为了使变换结果归一化。 $a > 1$ 相当于使窗口时宽加大, 频率减小; $a < 1$ 相当于使窗口时宽减小, 频率加大。尺度参数 a 大, 对应于低频段频率分辨率高、时间分辨率低, 可用于分析低频成分并能提高低频成分的频率分辨率; 反之, 尺度参数 a 小, 对应于低频段频率分辨率低、时间分辨率高, 可用于分析高频成分并能提高高频成分的时间分辨率。

由于小波变换具有良好的多分辨率时频分析特性, 因此可用来分析非平稳信号。小波 Mallat 快速算法^[5]可将信号分解为低频逼近信号和高频细节信号, 这样每一频带的信号都可以看到其随时间变化的情况, 既能看到信号的概貌, 又能看到信号的细节。

为了从检测信号中提取早期微弱故障信号, 可以通过小波变换先将信号分解为位于不同频带和时段内的成分。若干扰信号与早期微弱故障信号位于不同频带内, 则只要将干扰信号所对应的那一段的小波系数置零, 然后重新合成信号, 就可以达到消除干扰和提取早期微弱故障信号的目的; 或是在了解所关心的频率成分的情况下, 通过小波分解, 只保留所关心频带的小波变换结果, 而使其余的变换结果置零, 然后再重新合成信号, 就可以从噪声信号中提取出微弱的早期故障信息。

对于局部奇异信号, 可根据小波变换模极大值特性^[6]

$$|W_j^n(t_0)| \geq W_j^n(t) \quad t \in \delta t_0 \quad (2)$$

来表征信号的突变, 再通过小波包分解, 就能以精细的频率分辨率来描述信号的奇异突变特性。式中, W_j^n 为小波包分解分量, t_0 为奇异突变点。

由于小波分析能够把任何信号映射到由一个小波母函数伸缩和平移(刻画时间)而成的一组基函数上去, 从而实现了信号在不同频率和不同时刻的合理分离。分辨率分析^[5,7](又称双尺度分析)相当于同时使用一个低通道滤波器和多个带通滤波器而不丢失任何信息, 为分离故障特征频率和提取微弱信号以实现早期故障诊断提供了高效有力的工具。对振动信号进行窄带滤波和希尔伯特变换, 就可以使低频段的谱幅能量被放大到原来的 4 倍^[8], 即

$$s_A(\omega) = 4s_y(\omega) \quad (3)$$

这样, 利用小波分析就能有效地对早期故障信号进行特征提取和识别。

3 实验及结果分析

实验是在本单位发动机转子试验台上进行。系统主要由直流伺服电机、驱动器、转子、转盘、前后支承、4 个压电式加速度传感器、转速传感器、电荷放大器、数据采集板、数据处理计算机等组成。

数据采集和转速控制程序用美国 NI 公司提供的 LabVIEW 图形化编程语言编写, 早期故障分析和识别软件用 Matlab 工具箱提供的小波分析软件和自行开发的应用软件来实现。

实验前先采集 1 组噪声信号(用以消除噪声), 然后采集了 3 组自由旋转时的振动信号、6 组水平碰摩信号、4 组垂直碰摩信号, 共 15 组信号, 每组信号均包含 4 个通道的数据。10 组碰摩实验特点如表 2 所示。

表 2 10 组碰摩实验特点

实验名称	实 验 特 点
水平碰摩 1	在水平方向上, 先每隔 2 s 共碰 3 次转盘, 再每隔 2 s 共摩 3 次转盘
水平碰摩 2	在水平方向上, 先每隔 2 s 共碰 3 次转盘, 再每隔 2 s 共摩 3 次转盘
水平碰摩 3	在水平方向上, 每隔 1 s 共摩 6 次转盘
水平碰摩 4	在水平方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘
水平碰摩 5	在水平方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘
水平碰摩 6	在水平方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘
垂直碰摩 1	在垂直方向上, 先每隔 2 s 共碰 3 次转盘, 再每隔 2 s 共摩 3 次转盘
垂直碰摩 2	在垂直方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘
垂直碰摩 3	在垂直方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘
垂直碰摩 4	在垂直方向上, 先每隔 1 s 轻微摩 4 次转盘, 再每隔 1 s 严重摩 4 次转盘

采集到的数据将自动保存到数据文件 DF 中, 然后用 Notepad 程序打开 DF 并将其复制到 Matlab 文件窗口, 再将数据保存为 .mat 格式, 这样就可以在 Matlab 命令窗口、文件窗口、小波分析工具箱图形用户界面调用这一数据。

图 1 和图 2 为水平碰摩 1 的振动信号(3CH)和垂直碰摩 1 的振动信号(2CH)用三阶 Daubechies 小波进行 5 层离散小波分解与重构后的部分结果。

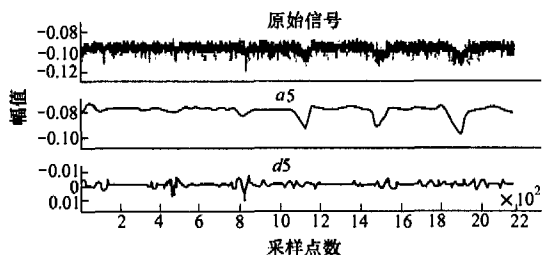


图 1 水平碰摩 1 信号的离散小波变换

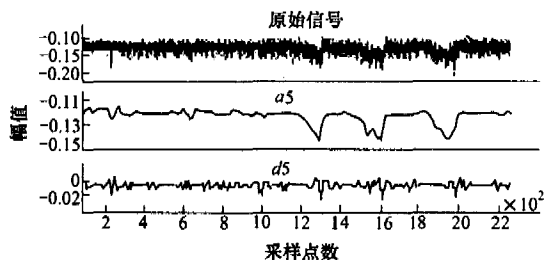


图 2 垂直碰摩 1 信号的离散小波变换

从图 1 可见, 水平碰摩的时域波形已有较明显的特征。前 3 次碰摩使得信号在碰摩的瞬间, 即横坐标为 1.0×10^2 、 4.5×10^2 、 8.0×10^2 处时, 振幅较大; 后 3 次碰摩使得信号在碰摩的时间段, 即横坐标为 $11.0 \times 10^2 \sim 11.5 \times 10^2$ 、 $14.5 \times 10^2 \sim 15.0 \times 10^2$ 、 $18.0 \times 10^2 \sim 18.5 \times 10^2$ 处时出现较大的奇异现象。在离散小波变换的多频带信号中, 低频逼近信号 a_5 ($f=0 \sim 2$ Hz) 上可看出碰摩使信号突变, 细节信号 d_5 ($f=2 \sim 4$ Hz) 可看到碰摩信号幅值较大, 细节信号 d_3 ($f=8 \sim 16$ Hz) 也可看到第 1 次和第 3 次碰摩引起的信号幅值较大(图略)。

从图 2 可见, 垂直碰摩 1 的时域波形也有较明显的特征。第 1 次和第 2 次碰摩使得信号在碰摩的瞬间, 即横坐标为 1.8×10^2 、 6.0×10^2 处时振幅较大, 后 3 次在碰摩的时间段, 即模型改为 $12.0 \times 10^2 \sim 12.5 \times 10^2$ 、 $15.5 \times 10^2 \sim 16.0 \times 10^2$ 、 $19.0 \times 10^2 \sim 19.5 \times 10^2$ 处时出现较大奇异现象。在离散小波变换的多频带信号中, 低频逼近信号 a_5 ($f=0 \sim 2$

Hz) 和细节信号 d_5 ($f=2 \sim 4$ Hz) 上出现突变, d_4 ($f=4 \sim 8$ Hz) 上第 1 和第 3 次碰摩也使信号发生突变(图略)。

用同样分析方法可以发现, 水平碰摩 2、3、4、5、6 和垂直碰摩 2、3、4 都具有图 1 和图 2 相似的特征。这说明转子系统早期碰摩故障用小波分析方法, 可以进行快速识别。

图 3 和图 4 分别为利用离散小波变换和利用小波包分解消除高频噪声信号后水平碰摩 1 的时域信号波形。

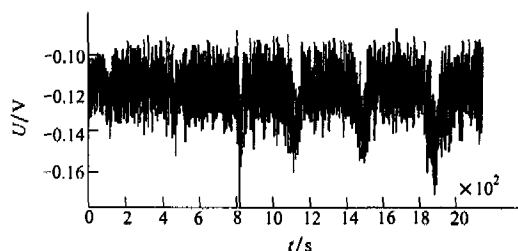


图 3 利用离散小波变换消噪后水平碰摩 1 的时域信号

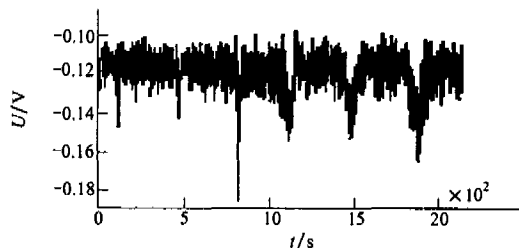


图 4 利用小波包分解消噪后水平碰摩 1 的时域信号

图 3、图 4 的信号与图 2 中最上面的原始信号相比, 可以看出利用小波或小波包消噪后的信号更能体现早期碰摩的特征和碰摩时刻, 且小波包比小波消噪效果更好。

用同样的方法, 也可以对转子不平衡、转子不对中、转子裂纹等早期故障进行特征提取和识别。

4 结 论

本文以飞机发动机转子系统为对象, 在对其早期故障特征进行分析的基础上, 提出了利用虚拟仪器和小波分析对其早期故障进行特征提取与识别的方法, 并通过实验证明了所提方法的有效性。通过分析研究, 可以得到以下结论:

(1) 利用小波分析在处理航空发动机转子系统振动信号时, 可以将振动信号分解到不同频段, 这样

就可以看到每一频段信号随时间的变化情况,它不仅能用来识别具有不同频率特征的各种早期故障,还可以看到早期故障发生的时刻。

(2) 小波分析中的离散小波变换和小波包分解与重构,能有效地消除噪声和对早期故障进行快速提取和识别。

(3) Daubechies 小波的时间分辨率随阶数的增

加而减小,频率分辨率随阶数的增加而增大。当要检测早期故障引起的信号奇异点时,需要有较高的时间分辨率,可选用三阶 Daubechies 小波。

(4) 小波包分解可能会产生频率错位现象^[9],因此在进行早期故障识别时,第 j 个频段的小波变换系数大,并不表明第 j 个频段的信号分量。

参考文献:

- [1] Alexander P, Singh R. Gas Turbine Engine Fault Diagnostics Using Fuzzy Concepts. AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, IL, USA; 2004, 1~15
- [2] Elsevier S L, Oxford F C. Fault Diagnosis of Internal Combustion Engines Using Visual Dot Patterns of Acoustic and Vibration Signals. NDT and E International, 2005, 38: 605~614
- [3] 杨建国,孙 杨,郑 严. 基于小波和模糊神经网络的涡喷发动机故障诊断. 推进技术,2001,22(2):114~117
- [4] 张贤达,保 铮. 非平稳信号分析与处理. 北京:国防工业出版社,1998
- [5] 彭玉华. 小波变换与工程应用. 北京:科学出版社,1999
- [6] Mallat S. Singularity Detection and Processing with Wavelets. IEEE Trans on IT, 1992, 38(2): 617~643
- [7] 何正嘉,曾艳阳,孟庆丰,赵纪元,高 强,张周锁. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用. 北京:高等教育出版社,2001
- [8] 王丽丽,王 超,蔡正敏. 滚动轴承早期故障的小波诊断方法. 应用力学学报,1999,16(2):95~99
- [9] 赵学智,陈统坚,叶彦邦,彭永红,陈文弋. 小波包分析在轴承早期故障诊断中的应用. 振动、测试与诊断,2003,23(4): 243~246

Exploring Effective Early Identification of Aero-Engine Rotor Faults

Wang Zhongsheng, He Hong, Chen Qian

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Existing methods, in our opinion, are not effective in early identification of aero-engine rotor faults, owing to the difficulty encountered in suppressing the dominant noise signal. We aim to present the promising results of our exploration of an effective method of such early identification. Our method for identifying early faults of aero-engine is based on analysis of aero-engine faults and makes use of Wavelet Analysis and Virtual Instrument. In the full paper, we explain our method in much detail; here, we give only a briefing. We extract early fault characteristic signal from detected signal and analyze the separation, enlargement and identification of early fault characteristic signal. We demonstrate the effectiveness of our method in the following three respects: (1) we show that not only early fault can be quickly identified but also we can determine the moment it happens; (2) noise can be effectively suppressed and singular signal of early fault can be detected by third-order Daubechies wavelets; (3) early fault characteristic signal can be extracted from complex weak signal by exploiting the strong graphical visualization power of Virtual Instrument and the high local magnification power of time-frequency wavelet analysis.

Key words: wavelet analysis, aero-engine, early fault, fault characteristic extraction and identification