

基于小波包分析和案例推理的 转子系统故障诊断方法

孙 涛,侯志强,张 贇

(海军航空工程学院 飞行器工程系,山东烟台 264001)



孙涛(1979),男,工程师,毕业于海军航空工程学院,从事航空发动机状态监测与故障诊断工作。

收稿日期:2009-11-27

1 引言

转子系统是典型的时变非稳态振动系统^[1],其故障多以振动的形式表现出来,对其进行分析可以诊断转子系统故障。

小波包方法可以将振动信号分解为一系列具有局部特性的小波函数,在低频和高频范围内均具有较好的分辨力。它对信号频带进行多层次划分,进一步分解多分辨分析所没有细分的高频部分,并能够根据被分析信号的特

摘要:将小波包分析与案例推理技术应用到转子系统故障诊断中,解决了复杂转子系统中小波包方法故障诊断结果可解释性差、分析判断需要专门经验的问题;用小波包技术所提取的故障特征表示转子系统故障案例,利用案例检索技术将以往相似案例应用到解决当前问题的过程中,提高了故障诊断结果的可解释性。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词:小波包;案例推理;转子系统;故障诊断

Rotor System Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet Analysis and CBR

SUN Tao, HOU Zhi-qiang, ZHANG Yun

(Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, Shandong, China)

Abstract: The poor explanation of fault diagnosis results and dependence of fault analysis on specialized experience for complicated rotor system wavelet packet method were solved by incorporating wavelet packet analysis and CBD into the rotor system fault diagnosis. The explanation of fault diagnosis results was improved by the case that rotor system fault was characterized with fault characteristic extracted using wavelet packet technology and in the process of dealing with the present problems using similar cases obtained from retrieval technique. The simulation results prove the validity of the method.

Key words: wavelet packet; CBR; rotor system; fault diagnosis

征,自适应地选择相应的频带,使之与信号频谱相匹配,信息量完整无缺^[2]。对信号在不同尺度上进行分解与重构,能得到原始信号在不同频段上分布的详细信息。但利用小波包方法诊断转子系统故障时,存在诊断结果可解释性

果具有较好的解释性,且诊断过程不需要专门经验。

本文提出1种基于小波包分析与案例推理技术的转子系统故障诊断方法,在振动信号小波包特征提取的基础上,利用案例推理技术将以往类似经验应用于当

前故障中,提高了诊断结果的可解释性,且推理过程不需要专门经验。

2 基于小波包的故障特征提取方法

对信号进行多尺度分析常用离散小波包方法。

离散信号按小波包基展开时,包含高、低通滤波2部分,每次分解就将上层j+1的第n个频带进一步分割,变细为下层j的2个子频带(第2n和2n+1)^[3]。

离散信号的小波包分解算法

$$\begin{cases} d_i(j,2n) = \sum_k a_{k-2j} d_k(j+1,n) \\ d_i(j,2n+1) = \sum_k b_{k-2j} d_k(j+1,n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_k, b_k 为小波分解共轭滤波器系数^[3]。

小波包重构算法

$$d_i(j+1,n) = \sum_k [p_{l-2k} d_k(j,2n) + q_{l-2k} d_k(j,2n+1)] \quad (2)$$

式中: p_k, q_k 为小波重构共轭滤波器系数^[3]。

小波包频带分析技术和Fourier频谱分析的理论依据均为Parseval能量积分等式。信号 $f(x)$ 在时域上的能量^[3]

$$\|f(x)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx \quad (3)$$

$f(x)$ 的小波变换为

$$d(j,k) = W(\mathcal{Z}^j, \mathcal{Z}^j k) = 2^{-j/2} \int_R \psi(2^{-j}x-k)f(x)dx \quad (4)$$

式中: $\psi(x)$ 为基小波。

二者由Parseval恒等式联系^[3]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx = \sum_k |d(j,k)|^2 \quad (5)$$

由式(5)可知,小波变换系数 $d(j,k)$ 的平方具有能量的量纲,可以用于故障诊断中的能量特征提取。一般用小波系数的平方计算小波包分解第j级分解水平上第k个子频带上的平均能量^[3]

$$E_i(j,k) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N |d_l(j,k)|^2 \quad (l=1,2,\dots,N) \quad (6)$$

假定原信号按某一小波包分解树分解后由M个子频带组成,这M个子频带不一定都在同一级分解水平上,由能量守恒定律可知信号总能量等于各子频带能量之和^[3],即

$$E(0,0) = \sum_{i=1}^M E_i(j,k) \quad (7)$$

对式(6)的特征因子进行能量归一化可得到小波包提取的特征向量^[3]

$$e = \{E_1, E_2, \dots, E_M\}^T / E(0,0) \quad (8)$$

在利用小波包提取特征向量时,由于所得的子频带数M与分解层数L成2的指数关系,即

$$M=2^L$$

如进行5层分解,则可以得到32个子频带;如果对所有子频带进行能量统计,再进行故障特征向量提取,势必造成故障特征向量维数过大,所以一般选择用于小波包分解的分解树,如图1所示。

$$r_i(j) = \Gamma(\gamma_0(j), x_i^j(j))$$

$$d(0,0) = d(5,0) + d(5,1) + d(5,2) + d(5,3) + d(5,4) + d(5,5) + d(4,3) + d(2,1) + d(1,1) \quad (9)$$

这样,只需选择9个频带进行分

析,大大减少了所提取故障特征的维数。

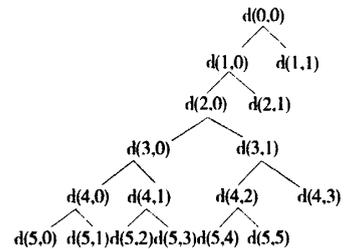


图1 小波包分解树

3 案例推理技术

案例推理技术可以利用以往经验解决当前问题。其推理过程可归纳为4个步骤:检索、重用、修正和存储^[4],如图2所示。其中,案例表示和案例检索是案例推理技术的基础和核心。

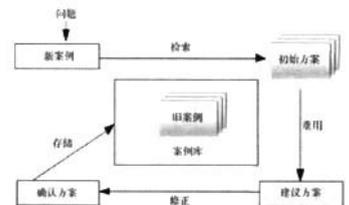


图2 CBR的过程描述

3.1 案例表示

案例表示又称案例的特征抽取,一般包括:案例结构和内容的确定,案例特征属性,权值的确定^[4]。案例的特征属性和权值是计算案例相似度的基础。对于转子系统的振动故障来说,其案例表示就是要确定哪些内容要存入案例,尤其是确定哪些特征属性可以表示转子系统的振动故障,以及各特征属性的权值。小波包分析所提取出的故障特征无疑比较适合作为案例的特征属性。

3.2 案例检索

案例检索就是从案例库中找

出与当前问题在特征上最相似,并对当前问题的求解最具有帮助或指导意义的案例。案例检索过程一般分为2个步骤,即案例索引与案例匹配。首先,根据当前问题的特征,按照案例组织的索引机制,从案例库中快速缩小案例匹配的范围;然后,在通过索引初步筛选出的案例集中,根据一定的相似度计算方法进行匹配,以找出与当前问题最相似的1个或多个案例^[4]。

案例匹配的过程就是先计算案例之间的相似度,再进行相似度的比较。常用的案例相似度计算方法主要有Tversky匹配法、最近邻匹配法和基于灰色理论的相似度算法^[9]。灰色相似度算法^[6,7]表示为:记 (S, Ψ) 为灰色关联空间, Γ 为特定关联映射, $r_i(j)$ 为当前故障征兆向量 y_0' 与第 i 个故障案例征兆向量 y_i' 在第 j 个征兆上的灰关联系数, $r_i(j) = \Gamma(y_0'(j), y_i'(j))$, 则有

$$r_i(j) = \min_{i \in m} \min_{j \in n} |y_0'(j) - y_i'(j)| + \lambda \max_{i \in m} \max_{j \in n} |y_0'(j) - y_i'(j)| + \lambda \max_{i \in m} \max_{j \in n} |y_0'(j) - y_i'(j)| \quad (10)$$

式中: $\min_{i \in m} \min_{j \in n} |y_0'(j) - y_i'(j)|$ 、 $\lambda \max_{i \in m} \max_{j \in n} |y_0'(j) - y_i'(j)|$ 为 y_0' 与 y_i' 的比较环境, 含有点集拓扑信息; $|y_0'(j) - y_i'(j)|$ 为距离的测度; $\lambda \in [0, 1]$ 为分辨系数, 用于调整比较环境的大小, 一般取 0.5。

$r_i(j)$ 就构成了灰色关联系数矩阵 r , 即

$$r = \begin{bmatrix} r_1(1) & r_1(2) & \cdots & r_1(n) \\ r_2(1) & r_2(2) & \cdots & r_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_m(1) & r_m(2) & \cdots & r_m(n) \end{bmatrix}$$

若考虑到特征属性对案例的权重不同, 可得到局部灰色相似矩阵 s , 即

$$s = \begin{bmatrix} w_1 r_1(1) & w_2 r_1(2) & \cdots & w_n r_1(n) \\ w_1 r_2(1) & w_2 r_2(2) & \cdots & w_n r_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 r_m(1) & w_2 r_m(1) & \cdots & w_n r_m(n) \end{bmatrix}$$

式中: $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, 为特征属性的权重向量。则当前故障 y_0 与案例 y_i 之间的灰色相似度由下式确定

$$\text{sim}(y_0, y_i) = \sum_{j=1}^n w_j r_i(j)$$

3.3 案例重用和修正

根据当前问题的特征属性、问题背景等, 从检索出来的案例(集)中获取若干求解方案, 判别是否符合当前问题的求解要求。若符合, 则重用这些案例提供的解决方案; 否则转入案例修正环节。在检索出相似案例并试图重用之后, 发现还存在问题或不适用, 应当进行案例修正^[8,9]。

4 转子系统故障诊断方法

基于小波包分析和案例推理技术的转子系统故障诊断方法的核心是在小波包分析的基础上, 提取转子系统振动信号故障特征作为故障案例的特征属性, 再通过案例检索技术查找以往类似案例解决当前问题, 其原理如图3所示。

4.1 转子系统故障案例表示

定义转子系统的故障案例为

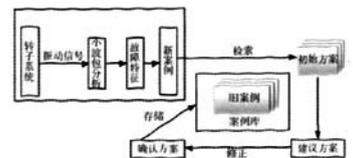


图3 基于小波包分析和案例推理技术的故障诊断方法

1个4元组

$$C = \langle F, Q, R, W \rangle$$

式中: F 为基本信息, 包括故障案例的编号、名称、所属的故障种类; Q 为故障描述, 包括案例的特征属性和响应权值; R 为故障原因; W 为排故方案。

案例表示采用面向对象的知识表示方法, 即每个转子系统故障案例均采用以下对象结构表示。

Class case:

```
{
    ID// 故障案例标识 ID
    Type// 故障所属案例种类
    Symptom// 故障特征属性集合
    Causation// 故障原因
    Process// 排故方案
    ...
}
```

其中, Symptom 为故障案例的特征属性集合。本文将经小波包分析提取的能量特征向量式(8)作为 Symptom 的特征属性, 即案例具有如下形式

$$\{E_1/E(0,0), E_2/E(0,0), \dots, E_M/E(0,0)\}$$

每个特征属性用1个2元组 \langle 属性名, 属性值 \rangle 表示。因此, 利用小波包分析方法表示故障案例的步骤如下。

步骤1: 选取共轭正交滤波器 $h(k)$ 和 $g(k)$, 令 $g_k = (-1)^{k-1} h_{1-k}$, 选定分解层数 L 。

步骤2: 利用小波包分解树确

定感兴趣的频段和所选的特征频段,并提取归一化的能量特征。

步骤 3:确定各特征属性的权重值。

步骤 4:确定其它需要存入案例的信息,形成典型故障案例。

在案例检索时,需要考虑各特征属性对案例的权重,不同的特征属性对于案例匹配的重要程度也不同,权重值可通过专家打分或层次分析法确定。

4.2 案例检索

案例检索主要通过案例匹配完成。案例匹配就是要先计算案例之间的相似度,再比较相似度之间的大小,选择最相似的案例作为当前问题的解决方案。为了避免在总体相似度过小时选择了相似度较小的案例,可以设置相似度阈值,即认为当具有最大相似度的案例不超过阈值时,便认为当前案例为 1 个新案例。本文选用基于灰色理论的相似度计算方法。

综上所述,基于小波包分析和案例推理技术的转子系统故障诊断方法的操作过程如下。

步骤 1:按照选定的共轭正交滤波 $h(k)$ 和 $g(k)$,以及分解层数 L ,利用小波包分析技术对当前振动信号进行分解,并提取选定频段的能量特征,进行归一化处理。

步骤 2:将得到的归一化后的能量特征,以及相应的权重值代入灰色相似度计算公式,计算当前故障与各案例的相似度。

步骤 3:比较所得的相似度。首先判断最大相似度是否超过给定相似度阈值,如果超过阈值则作为最匹配案例来解决当前问题;如果低于阈值,则转入案例修

正环节。

5 仿真实证

本文利用转子动力学实验台在转速为 2000 r/min、采样频率为 2000 Hz 的条件下,测得不平衡和不对中故障数据各 2 组,每组数据各 1024 个点,分别如图 4、5 所示。

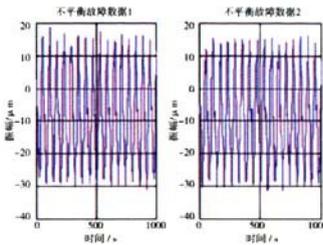


图 4 转子不平衡故障振动数据

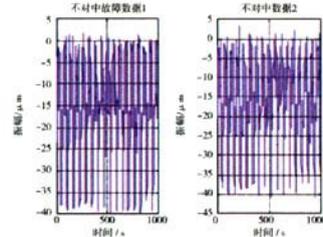


图 5 转子不对中故障数据

根据转子系统振动故障的特点,决定采用 db4 基小波进行 5 层小波包分解,利用小波包分解树选取式(6)确定的 9 个频段为特征频段,提取并归一化后的故障能量特征见表 1。

可以用其中 1 组数据作为转子系统故障案例库中的典型故障案例,另外 1 组数据作为待检的故障。用 C_1 表示不平衡故障 1,为不平衡故障的以往案例, C_2 表示待检的不平衡故障 2; C_3 表示不对中故障 1,为不对中故障的以往案例, C_4 表示待检的不对中故障 2。

由小波包分析可确定转子系统故障案例的特征属性,表示形

表 1 使用小波包提取的故障特征

故障	频段 1	频段 2	频段 3
不平衡 1	0.5587	0.3963	0.0086
不平衡 2	0.5642	0.3870	0.0108
不对中 1	0.7173	0.1269	0.0724
不对中 2	0.7363	0.1182	0.0723
故障	频段 4	频段 5	频段 6
不平衡 1	0.0216	0.0003	0.0013
不平衡 2	0.0208	0.0001	0.0038
不对中 1	0.0511	0.0007	0.0015
不对中 2	0.0418	0.0005	0.0010
故障	频段 7	频段 8	频段 9
不平衡 1	0.0099	0.0016	0.0017
不平衡 2	0.0094	0.0024	0.0015
不对中 1	0.0267	0.0018	0.0016
不对中 2	0.0267	0.0017	0.0015

式为 $C = \langle E_1, E_2, \dots, E_9 \rangle$ 。对于不平衡和不对中故障,其能量主要集中在低频部分,即分解后的低频段对案例区分的重要度较高,因此通过专家打分的方法可得到各特征向量的权重向量,为

$$W = [0.2667, 0.2667, 0.0667, 0.0667, 0.0667, 0.0667, 0.0666, 0.0666, 0.0666]$$

设定案例相似度阈值为 0.8。以灰色相似度算法计算案例之间的相似度,见表 2。

表 2 案例之间的相似度

	不平衡故障 C_1	不对中故障 C_3
C_2	0.9685	0.6348
C_4	0.6357	0.9476

选取相似度超过阈值 0.8 的案例中具有最大相似度的案例,则由表 3 可知 C_2 与 C_1 相似, C_4 与 C_3 相似,这与预先设置的故障模式,即 C_2 为不平衡故障数据, C_4 为不对中故障数据相一致。计算结果表明了该方 (下转第 62 页)

形式,是燃烧室的主流发展方向。

(4)超跨声速、高负荷、低稠度、无导叶、大转折角对转涡轮技术,附以流动控制技术,是高效涡轮的发展方向。

(5)采用漩流叶片在其后方建立离心力场组织燃烧的漩流加力方案是值得重视的加力燃烧方式。

(6)基于射流控制技术的推力矢量喷管,将在高推重比发动机设计中得到应用。

参考文献

- [1]Selles J F,Denice C J. DYNGEN-A Program for Calculating Steady-state Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines [R]. NASA TND-7901,1975.
- [2]王永明,乔渭阳,李立君. 计算机模拟技术在航空发动机设计中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2005,18(1): 1-8.
- [3]Keith Beker, Patrick Biltgen. A Single Stage to Orbit Turbine Based Combined Cycle Propulsion System [C]. Undergraduate Thesis. Georgia Institute of Technology. June,6,2003.
- [4]陈懋章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. 航空动力学报, 2002,17(1):1-15.
- [5]Kandebo S W. General Elective Tests Forward Swept Fan Technology [Z]. Aviation Week &Space Technology, 1996.
- [6]陈光. 航空发动机发展综述[J].航空制造技术,2000(6):24-27.
- [7]Lejambre C R, Zacharias R M, Biederman A J, et al. Development and application of a multistage Navier-Stokes flow solver, Part II : application to a high pressure compressor design [J]. ASME Journal of Turbomachinery,1998, 120 (4) : 215-223.
- [8]李继保,胡正义. 高温升高热容燃烧室技术分析 [J]. 燃气涡轮试验与研究,2000,17(4):5-8.
- [9]刘思永,王屏,方祥军,等. 无导叶对转涡轮新技术在高推比航空发动机中的运用[J]. 航空动力学报,2002,17(10):495-499.
- [10]Guillermo Paniagua, Szabolcs Szokol, Richard Varvill. Contrarotating Turbine Aerodesign for an Advanced Hypersonic Propulsion System [J]. Journal of Propulsion and Power, 2008, 24 (6):1269-1277.
- [11]Walston S, Cetel A, MacKay R, et al. Joint Development of a Fourth Generation Single Crystal Superal [R]. NASA/TM-2004-213062.
- [12]Gilbert B. Directional Control of Large Mass Flows by Fluidics. ASME 3rd Triennial International Symposium on Fluid Control [C]. Measurement, and Visualization, August 1991.
- [13]Reginald G W. Fluidic Thrust Vectoring and Throat Control Exhaust Nozzle[R]. AIAA 2002-4060, 2002.
- [14]Anderson C J, Giuliano V J. Investigation of Hybrid Fluidic / Mechanical Thrust Vectoring for Fixed-Exit Exhaust Nozzles[R]. AIAA 97-3148, 1997.
- [15]Xu Longxiang, et al. Development of Magnetic Bearing for High Temperature Suspensions [C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings. Zurich, Switzerland, 177-122, 2000.

(上接第30页)法的有效性。

6 结束语

提出了1种基于小波包分析和案例推理技术的转子系统故障诊断方法,利用小波包提取转子系统振动信号的故障特征表示转子系统故障案例,再借助案例检索技术将排故的历史经验应用到当前问题的求解过程中,提高了转子系统故障诊断结果的可解释性,减少了诊断推理过程对专门经验的依赖。利用转子动力学实验台搭建了仿真实验平台,所测数据的计算结果证明了该方法的

有效性。

参考文献

- [1]赵荣珍,张优云. 转子系统振动信号的小波分析原理与应用研究 [J]. 振动测试与诊断, 2004,24 (3): 179-183.
- [2]祝晓燕,王继选,刘小贞,等. 基于小波包特征向量弹性BP算法的故障诊断 [J]. 汽轮机技术,2008,50(6): 437-439.
- [3]荆双喜,冷军发,李臻. 基于小波包分析的机械故障特征提取方法研究 [J]. 煤矿机械,2003 (3):92-94.
- [4]王东,刘怀亮,徐国华. 基于案例推理在故障诊断中的应用[J]. 计算机工程,2003,29(12):10-12.
- [5]徐明,胡守仁. 基于案例属性特征的相似度计算模型[J]. 武汉理工大学学报,2003,251(1):24-27.
- [6]邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002:112-202.
- [7]吴祖堂,李岳,温熙森. 灰关联分析在机械设备故障诊断中的应用[J]. 系统工程理论与实践,1999,19(6): 126-132.
- [8]Feliz T S Chan. Application of a hybrid case-based reasoning approach in electroplating industry [J].Expert Systems,2005(29):121-130.
- [9]Simon C K Shiu, Sankar K Pal. Case-based Reasoning: Concepts, Features and Soft Computing[J].Applied Intelligence, 2004(21):233-238.