



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110146156 B

(45) 授权公告日 2021.02.09

(21) 申请号 201910566648.8

(22) 申请日 2019.06.27

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110146156 A

(43) 申请公布日 2019.08.20

(73) 专利权人 南昌航空大学
地址 330063 江西省南昌市东湖区丰和南
大道696号

(72) 发明人 刘晓波 梁春辉 钟荣升

(74) 专利代理机构 赣州智府晟泽知识产权代理
事务所(普通合伙) 36128
代理人 姜建华

(51) Int. Cl.
G01H 11/06 (2006.01)
G01M 15/02 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 108731945 A, 2018.11.02
CN 105651504 A, 2016.06.08
CN 107506709 A, 2017.12.22
CN 108760327 A, 2018.11.06

CN 107063427 A, 2017.08.18

CN 103279813 A, 2013.09.04

CN 108550116 A, 2018.09.18

WO 2019061006 A1, 2019.04.04

KR 101549983 B1, 2015.09.03

刘晓波 等. 基于广度优先搜索的小波聚类
算法.《振动与冲击》.2016,第35卷(第15期),第
178-183页.

申江江 等. 基于改进粒子群算法的直升机
振动信号盲分离.《电子测量与仪器学报》.2016,
第30卷(第9期),第1372-1378页.

Lu Zhenyu, et al. An improved FCM
method for Image segmentation based on
Wavelet transform and Particle swarm.
《IEEE》.2018,第112-117页.

Hong Lianhuan, et al. Compound fault
diagnosis of rotating machinery based on
adaptive maximum correlated kurtosis
deconvolution and customized multiwavelet
transform.《MEASUREMENT SCIENCE AND
TECHNOLOGY》.2018,第29卷(第11期),第1-19页.

审查员 李鑫

权利要求书2页 说明书8页 附图2页

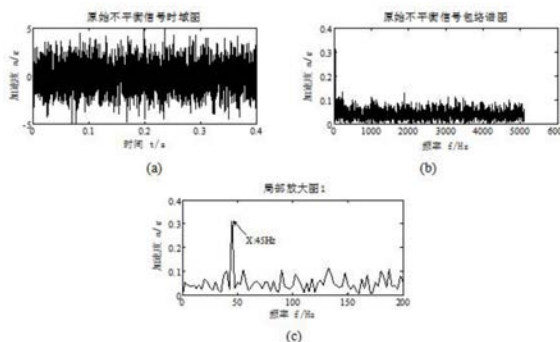
(54) 发明名称

一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法

(57) 摘要

本发明公开了一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法,该方法先采集航空发动机转子的碰摩振动信号,并将信号进行重复行滤波处理和最优阈值,再将粒子群算法通过迭代寻优所寻找到的次优解赋值给禁忌搜索算法中的初始解,然后计算适应度值,通过将初始值的邻域的不断搜索,同时灵活使用禁忌表和特赦准则,使得禁忌搜索算法能在一定程度上接受一些低质量的劣质解,防止算法陷入局部极值,增强算法的全局寻优能力,有效的解决了粒子群算法后期收速度放慢的问题,相比较而言,虽然混合

粒子群算法相的收敛速度有一定的下降,但是能够有效的避免群体过早的陷入局部最优解,增大种群寻得全局最优解的可能性,总体上提高了算法的优化性能。



1. 一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法,其特征在于,具体的步骤为:

步骤一、通过电涡流位移传感器,按确定的时间间隔或采样频率测取一定数量的航空发动机转子在某个采样时段的碰摩振动信号;

步骤二、将采集得到的航空发动机转子碰摩振动信号进行重复行滤波处理,并对重复行滤波处理后的信号进行多小波分解和重构,得到多小波系数,多小波分解和重构为由下式进行,

$$\begin{cases} \mathbf{c}_{j-1,n} = \sum_k \mathbf{H}_{k-2n} \mathbf{c}_{j,k} \\ \mathbf{d}_{j-1,n} = \sum_k \mathbf{G}_{k-2n} \mathbf{c}_{j,k} \end{cases}$$

$$\mathbf{c}_{j,k} = \sum_n (\mathbf{H}_{k-2n}^* \mathbf{c}_{j-1,n} + \sum_n \mathbf{G}_{k-2n}^* \mathbf{d}_{j-1,n})$$

式中, $\mathbf{c}_{j,k} = (c_{1,j,k}, \dots, c_{r,j,k})^T$ 为r维的低频分量, $\mathbf{d}_{j,k} = (d_{1,j,k}, \dots, d_{r,j,k})^T$ 为r维的高频分量,*为共轭转置运算;

步骤三、设定混合粒子群优化算法中的常数因子,其中,设定学习因子 $c_1 = c_2 = 1.4995$,粒子群的数量 $m = 40$,最大迭代次数 $T = 200$,权重系数的最大值 $\omega_{\max} = 0.9$,权重系数的最小值 $\omega_{\min} = 0.4$,粒子的最大速度 $v_{\max} = 0.2 \cdot \lambda_{\max}$,粒子群位置参数 λ 的最大值 λ_{\max} 和最小值 λ_{\min} 由下式进行,

$$\lambda_j = (2 \cdot \log n_j) / q$$

式中, n_j 为多小波系数的长度,当q分别取0.1和1时,即可分别得到 λ_{\max} 和 λ_{\min} ;

步骤四、通过基于GCV准则适应度的函数得到最优阈值,得出群体中每个粒子的适应度值,基于GCV准则适应度的函数为下式,

$$\text{GCV}(\lambda) = \frac{\frac{1}{N} \sum (D - D_\lambda)^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2}$$

式中,D和 D_λ 分别为含噪多小波系数和阈值 λ 规则处理后的多小波系数,N为多小波系数的总个数, N_0 为多小波系数在阈值处理过程中被置为0的个数;

步骤五、对每个粒子将其适应度值与其经历过的最好位置 p_i 的适应度值作比较,如果较好,则将 x_i 作为当前的最好位置 p_i ,之后,再将其适应度值与所有粒子经历过的最好位置的适应度值作比较;如果较好,则将其作为当前所有粒子的最好位置 p_g ;

步骤六、通过步骤五获得个体极值和全局极值之后,再分别通过下式更新种群中粒子的速度和位置,

$$v_{ij}(t+1) = w \cdot v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)]$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

式中,w表示惯性权重系数, c_1 和 c_2 代表学习因子(也称作加速度常数), $i = 1, 2, \dots$, D , v_{ij} 表示粒子的速度, $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, v_{\max} 是常数, r_1 和 r_2 均为0-1之间的均匀随机数, r_1 和 r_2 用来增强粒子搜索的随机性;

步骤七、判断步骤六的算法是否达到了最大迭代次数,如未达到则返回至步骤四继续运行,如已达到则输出最优值 λ_{best} ;

步骤八、启用禁忌搜索算法,并设置最大迭代次数,且置空禁忌表,将混合粒子群优化算法生成的最优解 λ_{best} 作为禁忌搜索算法的初始解,并把初始解赋值给当前解;

步骤九、利用当前解邻域函数产生若干邻域解,并且从中确定若干个候选解;

步骤十、通过基于GCV准则适应度函数得到该算法的最优阈值,得出群体中每个粒子的适应度值,并以此判断当前候选解是否满足特赦准则,如果满足则用满足特赦规则的最佳候选解取代当前解,并将最佳候选解作为禁忌对象替换最早进入禁忌表的对象,同时用满足特赦规则的最优候选解替换当前最优解,然后直接跳转至步骤十二运行;如果不满足则接着向下执行步骤十一;基于GCV准则适应度的函数为下式,

$$GCV(\lambda) = \frac{\frac{1}{N} \sum (D - D_\lambda)^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2}$$

式中, D 和 D_λ 分别为含噪多小波系数和阈值 λ 规则处理后的多小波系数, N 为多小波系数的总个数, N_0 为多小波系数在阈值处理过程中被置为0的个数;

步骤十一、在候选解优于当前解而劣于当前最优解时,确定候选解的禁忌属性,若候选解不在禁忌表中,则将候选解赋值给下一次迭代的当前解,同时用其替换最早进入禁忌表的对象;在候选解劣于当前解且也劣于当前最优解时,用当前解重新产生新的邻域解;

步骤十二、判断算法是否达到了结束条件,如果达到则输出最优解并终止算法;如果没有达到则跳转至步骤九继续运行;

步骤十三、按照阈值规则对多小波系数进行处理,并对经过处理后的系数进行多小波重构,得到航空发动机转子系统故障振动的去噪信号。

一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种信号特征信息的提取方法,尤其涉及一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法。

背景技术

[0002] 随着现代科学技术的不断发展和进步,旋转机械一方面朝着高速、高效的方向发展,同时又面临着更加苛刻的工作和运行环境的挑战,从而导致故障发生的潜在风险相应升高,其核心部件转子系统更是故障发生率最高的部位之一。尤其是飞机的航空发动机转子系统,其是航空机械设备中故障率最高、调整最复杂、维护工作量最大的系统,其工作状态的好坏直接影响到飞机的安全可靠与运行;如果一旦发动机在运行中出现了故障,就可能导致飞机无法正常飞行,危及人身安全,造成重大的社会、经济损失。

[0003] 据统计,航空发动机的故障发生率约占整个飞机故障的30%,飞机因机械原因发生的重大飞行事故中40%左右是由于发动机故障导致的,发动机由于自身特点不同于一般机械,即使非常轻微的一些机械缺陷或损伤都会引起转子系统的振动,包括从几乎小得微不足道的振动到大得足以导致发动机破坏的振动。由于航空发动机转子系统的复杂性,往往多种故障会表现为相同的振动,而同一故障又会表现为不同的振动,所以会导致漏报和误报,严重影响了航空发动机转子系统故障诊断的可靠性,因此,为了提高航空发动机转子系统故障诊断水平,需要发展实用、准确、高效的特征信息提取方法。

[0004] 目前,小波分析因为能够从时域和频域的角度对信号的突变分量和噪声分量进行分析,从而可以有效地消除信号中的背景噪声;因此,小波分析在信号处理领域中得到了广泛的应用,但在小波消噪中存在小波基函数难以选取的不足。多小波变换是小波理论的进一步发展,多小波因其能同时具有正交性、紧支性、对称性和高的逼近阶等信号处理所需要的重要特性,可以弥补单小波的缺点,单小波只有一个尺度函数,而多小波同时具有多个尺度函数。因此,多小波能够具备单小波不能同时具备的对称性、正交性、紧支性和高阶消失矩等重要特征,所以可以在信号处理领域取得更好的效果。

[0005] 授权公告号为CN101968379B的专利和申请公布号为CN107506709A的专利申请分别公开了两种航空发动机转子系统故障信号特征信息的提取方法,这两种方法都是利用电涡流位移传感器测取振动信号,并分别采用构思不同的小波聚类进行分析,从大量振动位移信号中挖掘隐含的特征信息,实现工况特征的提取,前一种方法在提取精度和速度上仍然存在一定的不足,后一种提取方法在前一种的基础上进行了突破性改进,但其和前者仍然都存在一共性问题,即在提取结果中噪声背景频谱得不到有效的滤除,且弱故障特征信息与故障特征信息频率频谱冲击振幅接近,在一定程度上影响了转子故障特征的合理提取,所以,为了去除噪声干扰并更加合理地对航空发动机转子系统故障进行诊断和信号特征提取,还需通过其他方向做进一步的改进;所以,对转子系统故障振动信号进行降噪研究,对预防突发性重大事故的发生有重要意义。

发明内容

[0006] (1) 要解决的技术问题

[0007] 针对现有技术的不足,本发明的目的在于提供一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法

[0008] (2) 技术方案,

[0009] 为了解决上述技术问题,本发明提供了这样一种航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法,该方法具体为基于混合粒子群优化的多小波相邻系数去噪方法,通过该方法对航空发动机转子系统故障信号进行降噪处理的大致步骤为:首先对预处理之后的信号进行多小波变换,然后通过分解系数计算混合粒子群优化算法所需要的参数,再根据适应度函数的最小化原则通过混合粒子群优化算法来求取最优阈值,并对分解系数进行相应的阈值处理,之后进行多小波重构及后处理,获得去噪信号。

[0010] 混合粒子群优化算法也称PSO算法,其首先要根据待求解的优化问题中自变量的个数来确定算法的维数,之后再随机赋予种群中所有粒子一个初始位置和初始速度,经过算法的迭代搜索,在每一次的迭代寻优过程中,粒子们主要通过跟踪两个参数来指导自己的飞行位置和飞行速度,其中一个参数是指是粒子个体本身在迭代过程中所经历的的最好位置,称作为“个体极值”,另一个参数是指整个群体所经历过的最好位置,又称作“全局极值”。

[0011] 粒子群优化算法是新兴的仿生智能优化技术。该算法能以较大概率收敛于全局最优解,实验结果表明,它适合在单目标优化、约束目标优化等环境中寻优,与其他智能优化算法相比,粒子群优化算法实现步骤较为简单,寻优收敛能力强。

[0012] 禁忌搜索算法是对人类智力过程的一种模拟,即人在搜索一片未知的区域时,对于已经搜索的区域会自动的避免二次搜索,进而能够在最短的时间内搜索完整片未知空间,如果没搜索到,则再对去过的区域重新搜索,禁忌搜索算法正是基于这种思想,从一个初始解出发,确定若干特定的搜索方向(或称为移动)作为试探,然后选择使适应度函数值减小最多的方向进行搜索,为了防止算法陷入局部极值,禁忌搜索算法采用了一种灵活的“记忆”技术,来对改进的移动进行记录,以此来指导算法的下一步搜索方向,即编制禁忌表,通过禁忌表保存迭代过程中已经实现的移动,避免算法陷入循环,而造成搜索效率的降低。同时采用“特赦准则”允许将某些状态解禁,使得算法具有接受一些低质量的劣质解的可能性,防止算法陷入局部极值。

[0013] 禁忌搜索算法是以邻域迭代搜索为基础,通过单入单出的禁忌表来避免一些重复的搜索,并利用特赦准则(藐视准则)来赦免一些之前被禁忌表禁忌的优良状态,借此来保证搜索的多样性。其中邻域结构的选择、初始解的获取、禁忌长度的确定、藐视准则、终止准则的制定都会对禁忌搜索算法的性能产生关键性影响。邻域函数继承了局部邻域搜索的特点,用于对执行对当前解的邻域搜索;禁忌表、和特赦准则的灵活使用不仅使算法能够避免重复搜索,而且保证了算法多样化的有效搜索,使算法最终实现全局寻优。

[0014] 该航空发动机转子系统故障振动信号的去噪方法具体的步骤为:

[0015] 步骤一、通过电涡流位移传感器,按确定的时间间隔或采样频率测取一定数量的航空发动机转子在某个采样时段的碰摩振动信号;

[0016] 步骤二、将采集得到的航空发动机转子碰摩振动信号进行重复行滤波处理,并对

重复行滤波处理后的信号进行多小波分解和重构,得到多小波系数,多小波分解和重构为由下式进行,

$$[0017] \quad \begin{cases} c_{j-1,n} = \sum_k H_{k-2n} c_{j,k} \\ d_{j-1,n} = \sum_k G_{k-2n} c_{j,k} \end{cases}$$

$$[0018] \quad c_{j,k} = \sum_n (H_{k-2n}^* c_{j-1,n} + \sum_n G_{k-2n}^* d_{j-1,n})$$

[0019] 式中, $c_{j,k} = (c_{1,j,k}, \dots, c_{r,j,k})^T$ 为r维的低频分量, $d_{j,k} = (d_{1,j,k}, \dots, d_{r,j,k})^T$ 为r维的高频分量,*为共轭转置运算;

[0020] 步骤三、设定混合粒子群优化算法中的常数因子,其中,设定学习因子 $c_1 = c_2 = 1.4995$,粒子群的数量 $m = 40$,最大迭代次数 $T = 200$,权重系数的最大值 $\omega_{\max} = 0.9$,权重系数的最小值 $\omega_{\min} = 0.4$,粒子的最大速度 $v_{\max} = 0.2 \cdot \lambda_{\max}$,粒子群位置参数 λ 的最大值 λ_{\max} 和最小值 λ_{\min} 由下式进行,

$$[0021] \quad \lambda_j = (2 \cdot \log n_j) / q$$

[0022] 式中, n_j 为多小波系数的长度,当q分别取0.1和1时,即可分别得到 λ_{\max} 和 λ_{\min} ;

[0023] 步骤四、通过基于GCV准则适应度的函数得到最优阈值,得出群体中每个粒子的适应度值,基于GCV准则适应度的函数为下式,

$$[0024] \quad GCV(\lambda) = \frac{\frac{1}{N} \sum (D - D_\lambda)^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2}$$

[0025] 式中,D和 D_λ 分别为含噪多小波系数和阈值 λ 规则处理后的多小波系数,N为多小波系数的总个数, N_0 为多小波系数在阈值处理过程中被置为0的个数;

[0026] 步骤五、对每个粒子将其适应度值与其经历过的最好位置 p_i 的适应度值作比较,如果较好,则将 x_i 作为当前的最好位置 p_i ,之后,再将其适应度值与所有粒子经历过的最好位置的适应度值作比较;如果较好,则将其作为当前所有粒子的最好位置 p_g ;

[0027] 步骤六、通过步骤五获得个体极值和全局极值之后,再分别通过下式更新种群中粒子的速度和位置,

$$[0028] \quad v_{ij}(t+1) = w \cdot v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2(t) [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)]$$

$$[0029] \quad x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

[0030] 式中,w表示惯性权重系数, c_1 和 c_2 代表学习因子(也称作加速度常数), $i = 1, 2, \dots, D$, v_{ij} 表示粒子的速度, $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$, v_{\max} 是常数;通过人为设定对粒子速度进行限制,参数 r_1 和 r_2 是范围在0到1之间的均匀随机数,用来增强粒子搜索的随机性;

[0031] 步骤七、判断步骤六的算法是否达到了最大迭代次数,如未达到则返回至步骤四继续运行,如已达到则输出最优值 λ_{best} ;

[0032] 步骤八、启用禁忌搜索算法,并设置最大迭代次数,且置空禁忌表,将混合粒子群优化算法生成的最优解 λ_{best} 作为禁忌搜索算法的初始解,并把初始解赋值给当前解;

[0033] 步骤九、利用当前解邻域函数产生若干邻域解,并且从中确定若干个候选解;

[0034] 步骤十、通过基于GCV准则适应度函数得到该算法的最优阈值,得出群体中每个粒子的适应度值,并以此判断当前候选解是否满足特赦准则,如果满足则用满足特赦规则的最佳候选解取代当前解,并将最佳候选解作为禁忌对象替换最早进入禁忌表的对象,同时用满足特赦规则的最优候选解替换当前最优解,然后直接跳转至步骤十二运行;如果不满足则接着向下执行步骤十一;基于GCV准则适应度的函数为下式,

$$[0035] \quad GCV(\lambda) = \frac{\frac{1}{N} \sum (D - D_\lambda)^2}{\left| \frac{N_0}{N} \right|^2}$$

[0036] 式中,D和 D_λ 分别为含噪多小波系数和阈值 λ 规则处理后的多小波系数,N为多小波系数的总个数, N_0 为多小波系数在阈值处理过程中被置为0的个数;

[0037] 步骤十一、在候选解优于当前解而劣于当前最优解时,确定候选解的禁忌属性,若候选解不在禁忌表中,则将候选解赋值给下一次迭代的当前解,同时用其替换最早进入禁忌表的对象;在候选解劣于当前解且也劣于当前最优解时,用当前解重新产生新的邻域解;

[0038] 步骤十二、判断算法是否达到了结束条件,如果达到则输出最优解并终止算法;如果没有达到则跳转至步骤九继续运行;

[0039] 步骤十三、按照阈值规则对多小波系数进行处理,并对经过处理后的系数进行多小波重构,得到航空发动机转子系统故障振动的去噪信号。

[0040] 通过对比实验,结果表明:基于混合粒子群优化的多小波相邻系数去噪方法与传统的多小波相邻系数去噪方法相比,背景噪声去噪效果方面得到了明显提高,并比Db2单小波、GHM多小波方法在去噪效果上更具优势,为后期的特征提取及故障诊断提供了技术支持。

[0041] 其中,在现有技术下常见的阈值选取方法有DJ统一阈值、基于零均值正态分布的置信区间阈值、理想阈值和GCV阈值。在众多的小波阈值去噪算法中,多数是利用噪声的统计特性来实现去噪的。但在很多实际应用中,有关噪声的先验知识却是未知的,需要对其进行估计。而利用GCV函数来确定阈值,他只依赖于输入和输出数据,和噪声能量及其真实数据无关。而且经过目前的试验已证明,利用广义交叉确认(GCV)所求得的阈值是一种最小均方误差意义上的渐近最优解。因此,利用GCV原理来求阈值,无需预先获取噪声的任何信息,而且在去噪的同时也能较好地保持原图像的细节特征。

[0042] 通过实际去噪方法进行对比,并结合信噪比参数(SNR)和均方差(MSE)联合可以看出,降噪效果最好的是本发明提出的降噪方法,其次是多小波相邻系数去噪法,而Db2单小波阈值降噪效果最差;并且从对同一种去噪方法采用不同的阈值函数取得的去噪效果上来看,各去噪方法中的软阈值去噪效果明显要优于硬阈值去噪。综合上述可知,本发明提出的降噪方法具有最大的信噪比参数(SNR)同时均方误差(MSE)值最小,说明本发明的方法信噪比最高,同时信号失真程度低,降噪效果最好。

[0043] 通过对比可以明显看出,混合粒子群优化算法操作简单,具有较强的全局群有能力,但是在算法的后期收敛速度和精度会逐渐降低,而且还很容易掉入早熟,使得算法只能

获得次优解；而禁忌搜索算法在初始阶段对初始解有较强的依赖性，初始解的质量往往会直接影响到算法能不能收敛到全局最优解，因此本发明突破性地将禁忌搜索和粒子群优化算法相融合，即混合粒子群算法，本发明的方法将粒子群算法通过迭代寻优所寻找到的次优解赋值给禁忌搜索算法中的初始解，然后计算适应度值，通过将初始值的邻域的不断搜索，同时灵活使用禁忌表和特赦准则，使得禁忌搜索算法能在一定程度上接受一些低质量的劣质解，防止算法陷入局部极值，增强算法的全局寻优能力，有效的解决了粒子群算法后期收敛速度放慢的问题，相比较而言，虽然混合粒子群算法收敛速度有一定的下降，但是能够有效的避免群体过早的陷入局部最优解，增大种群寻得全局最优解的可能性，总体上提高了算法的优化性能。

[0044] (3) 有益效果

[0045] 与现有技术相比，本发明的有益效果在于：本发明的去噪方法通过将混合粒子群优化算法与多小波相邻系数去噪方法相结合，将矢量化后的多小波分解系数，通过混合粒子群优化算法进行阈值寻优，可以获取比传统的统一阈值方法更加准确的阈值，并通过该阈值处理，利用多小波重构及后处理恢复成一维降噪信号，能够显著的降低背景噪声的干扰，因此降噪滤波效果极佳。

附图说明

[0046] 为了更清楚的说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案，下面将对具体实施方式或现有技术中描述所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一种实施方式，对于本领域普通技术人员来说，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0047] 图1为本发明具体实施方式中转子不平衡信号时域图及其包络解调谱。

[0048] 图2为本发明具体实施方式中转子不对中信号时域图及其包络解调谱。

[0049] 图3为本发明具体实施方式中转子碰摩信号时域图及其包络解调谱。

具体实施方式

[0050] 为使本发明实现的技术手段、创作特征、达成目的与功效易于明白了解，下面对本发明具体实施方式中的技术方案进行清楚、完整的描述，以进一步阐述本发明，显然，所描述的具体实施方式仅仅是本发明的一部分实施方式，而不是全部的样式。

[0051] 航空发动机是航空器上的关键组成部分，被誉为为航空工业上的一颗“明珠”目前所有的航空大国都把航空发动机维修技术列为最需要保守的机密之一。而航空发动机由于其零部件组成的精密和复杂性，故而发生故障的概率较高，故障类型也是花样百出，具体故障类型可见如下表1的航空发动机常见故障类型及特征频率，有关研究统计表明，航空发动机转子系统故障发生率远高于其它种类的故障，而转子系统是航空发动机的关键组成部分，因此转子系统的维修保养直接影响到航空器的使用寿命，是飞行安全和生命财产安全的重要保证。转子系统故障是引起航空发动机停机的主要原因，根据航空发动机转子系统发生故障的不同，其表现出来特征频率也不同。

[0052] 表1航空发动机常见故障类型及特征频率

序号	故障类型	特征频率 (ω_0 为基频)
1	转子不平衡	$1 \omega_0$
2	转子不对中	$2 \omega_0$
3	转子碰摩	$2 \omega_0$ $3 \omega_0$
[0053] 4	转子裂纹	半临界点的 $2 \omega_0$
5	转子支撑零件松动	基频 分数谐波
6	密封间隙气体激振	小于 $0.5 \omega_0$ 的次谐波
7	结构共振	ω_0 或 ω_0 相关谐波
8	油膜振荡	$(0 \sim 1 \omega_0)$

[0054] 本实施案例为航空发动机转子系统故障信号特征信息的提取方法实施案例,包括如下过程:

[0055] A. 对可能存在航空发动机转子不平衡、不对中以及碰摩故障的系统中,将转子转速调至2700r/min时进行数据样本的采集,通过传感器得到转速为2700r/min的数据,采样频率设置为10240Hz,信号均为转子故障试验器两端轴承处水平方向上的传感器所采集到的离散振动加速度信号;鉴于信号在首尾端点处可能存在误差,故而在对三种故障信号处理与计算之时,只采用数据中段的4096个数据,也就是采用转子综合状态比较稳定的数据。

[0056] B. 将所采集到的转子系统不平衡故障振动信号进行时频分析,得到如图1中图1所示的转子不平衡信号时域图及其包络解调谱;为了更加清楚方便的识别不平衡信号中的故障特征频率以及噪声等大量干扰成分的存在特点,对信号进行包络分析,得到不平衡故障信号的包络解调谱,如图1中 (b) 所示;由航空发动机转子系统不平衡故障机理可知,转子不平衡的振动特征表现为:基频(转频)振动明显,无其他明显的特征频率,所以再对不平衡信号包络解调谱中的低频部分进行了局部放大处理,如图1中 (c) 所示。

[0057] 通过下图中的航空发动机转子系统不平衡故障信号的时域波形图可以看处,时域波形杂乱无章,没有明显的由于转子系统不平衡故障所产生的周期性冲击,被强烈的背景噪声所掩盖,而通过包络解调谱的图1中 (c) 可以看到,在不平衡故障振动信号的低频段内(频率范围)存在转速频率的基频冲击响应,即不平衡故障的特征频率,但是同时可以看到,在特征频率带簇的周围存在大量的噪声干扰频率成分,故需对不平衡故障信号进行降噪处理。

[0058] 此后,再分别采用Db2单小波、GHM多小波、多小波相邻系数以及本发明提出的基于混合粒子群优化的多小波相邻系数降噪方法对转子系统不平衡故障振动信号进行降噪分析;可以看出,经过上述四种降噪方法对转子系统不平衡故障信号进行降噪处理之后的时

域信号比原始不平衡故障振动信号的时域波形都更加清晰,说明四种方法均具有一定的去噪效果,所以通过包络解调谱对四种方法的降噪效果进行对比分析可以看到,在不平衡故障振动信号的低频段内(频率范围),四种降噪方法都明显存在转速频率的基频冲击响应,而且在基频周围的噪声背景信号比起原始不平衡故障信号都得到了一定程度上的抑制。但是通过对比四种去噪方法可知,本文提出的基于混合粒子群优化的多小波相邻系数去噪方法的基频周围虽然仍存在的一些小的噪声信号分量,但是无论从噪声次谐波的数量以及波峰大小上,本文提出的去噪方法比起Db2单小波、GHM多小波以及多小波相邻系数去噪方法得到了更加显著的降低,说明本文提出的降噪方法能做到转子不平衡故障信号的有效滤波,且降噪效果比起其他三种降噪方法更具优势。

[0059] 同样,利用上述的航空发动机转子系统进行不对中故障实验,将所采集到的转子系统不对中振动信号进行时频分析,得到如下图2所示的转子不对中信号时域图及其包络解调谱;由航空发动机转子系统不对中故障机理可知,转子不对中故障的振动特征主要表现为:2倍频和4倍频等偶次倍频明显,为此本案例对信号包络解调谱中的高频部分进行了局部放大处理,如图2中(c)所示。

[0060] 通过包络解调谱对四种去噪方法的降噪效果进行对比分析,由包络解调谱的图2中(c)可以看到:在不对中故障振动信号的高频段内(频率范围),四种降噪方法都可以很容易找到转速频率的基频冲击响应,含有一定冲击幅值的倍频冲击响应以及倍频冲击响应,通过将倍频冲击响应周围的噪声背景信号受抑制程度作比较可知,本发明提出的基于混合粒子群优化的多小波相邻系数去噪方法倍频冲击响应周围的噪声背景信号比起原始多小波相邻系数去噪方法得到了一定程度的降低,说明本发明方法在对转子系统不对中故障信号的降噪效果上比起原始多小波相邻系数降噪方法有所提升,而且在噪声次谐波的抑制上也比起其他两种降噪方法更具优势。

[0061] 最后,对由转子系统碰摩故障实验所采集到的碰摩振动信号进行时频分析,得到如图3所示的转子碰摩信号时域图及其包络解调谱。原始碰摩故障信号中的周期性冲击,被强烈的背景噪声所掩盖而无法识别,而通过包络解调谱的图3中(c)可以看到:在碰摩故障振动信号的低频段内(频率范围)存在转速频率的基频冲击响应以及冲击幅值不是特别明显的倍频冲击响应,这是因为转子碰摩信号的低频段有着强烈的噪声干扰。而通过包络解调谱图3中(d)可以看到:在碰摩故障振动信号的高频段内(频率范围)可以看到四组间隔相等的频率带簇,间隔频率为转速频率45Hz,但是在四组等间隔的频率带簇的周围存在大量的噪声干扰频率成分。

[0062] 有上述分析可以看出,降噪处理之后的时域信号比GHM多小波去噪的时域波形更加清晰,周期性冲击明显,说明具有一定的去噪效果,而通过各包络解调谱区域可以看到:在降噪信号低频段内(频率范围)存在转速频率的基频冲击响应以及冲击响应,而且在基频的周围不存在波峰明显干扰成分,说明低频段内的噪声背景信号得到了有效地抑制,而从Db2单小波、GHM多小波、多小波相邻系数降噪后信号可以看出,倍频冲击响应都不明显,无法有效识别,同时,在降噪信号高频段内(频率范围),由此可以得出最终的去噪结果分析,即对含有噪声的转子系统不平衡、不对中以及碰摩故障信号,分别通过降噪处理以后,四种降噪方法均能够有效地减少信号中的背景噪声干扰成分的影响,提高故障信号的信噪比。但本发明提出的降噪方法在不同的频段对噪声次谐波的抑制上都优于其他三中去噪方法,

故本发明提出基于混合粒子群优化的多小波相邻系数降噪方法的去噪效果更好,能够做到转子故障信号的有效降噪。

[0063] 以上描述了本发明的主要技术特征和基本原理及相关优点,对于本领域技术人员而言,显然本发明不限于上述示范性具体实施方式的细节,而且在不背离本发明的构思或基本特征的情况下,能够以其他的具体形式实现本发明。因此,无论从哪一点来看,均应将上述具体实施方式看作是示范性的,而且是非限制性的,本发明的范围由所附权利要求而不是上述说明限定,因此旨在将落在权利要求的等同要件的含义和范围内的所有变化囊括在本发明内。

[0064] 此外,应当理解,虽然本说明书按照各实施方式加以描述,但并非每个实施方式仅包含一个独立的技术方案,说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见,本领域技术人员应当将说明书作为一个整体,各实施方式中的技术方案也可以经适当组合,形成本领域技术人员可以理解的其他实施方式。

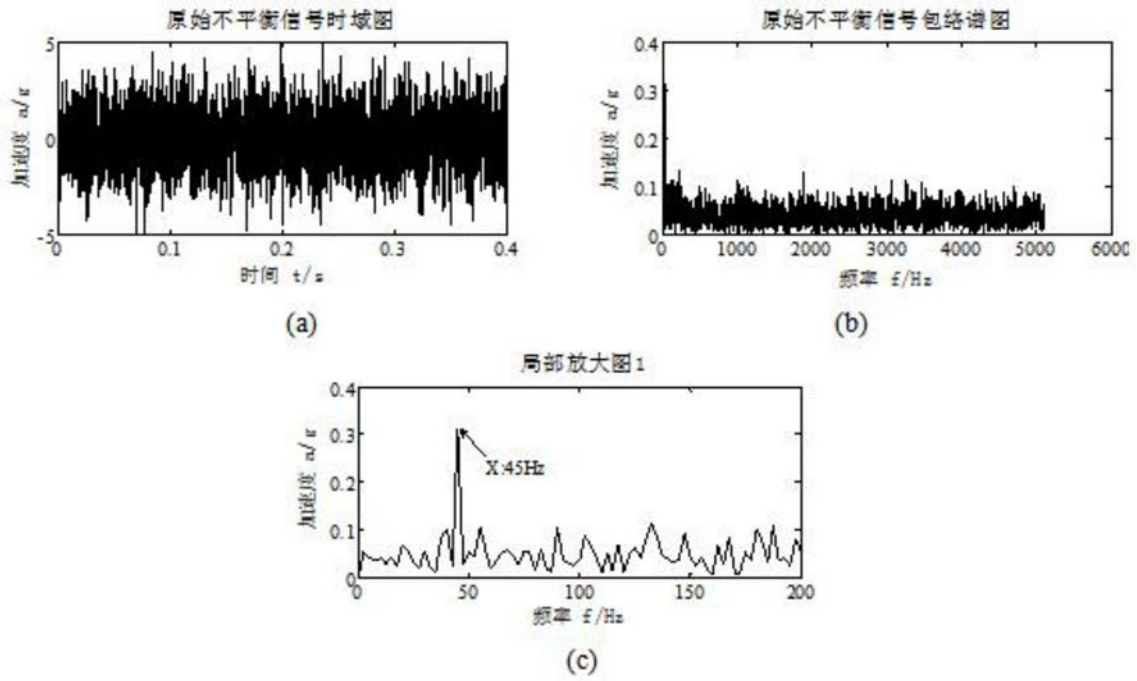


图1

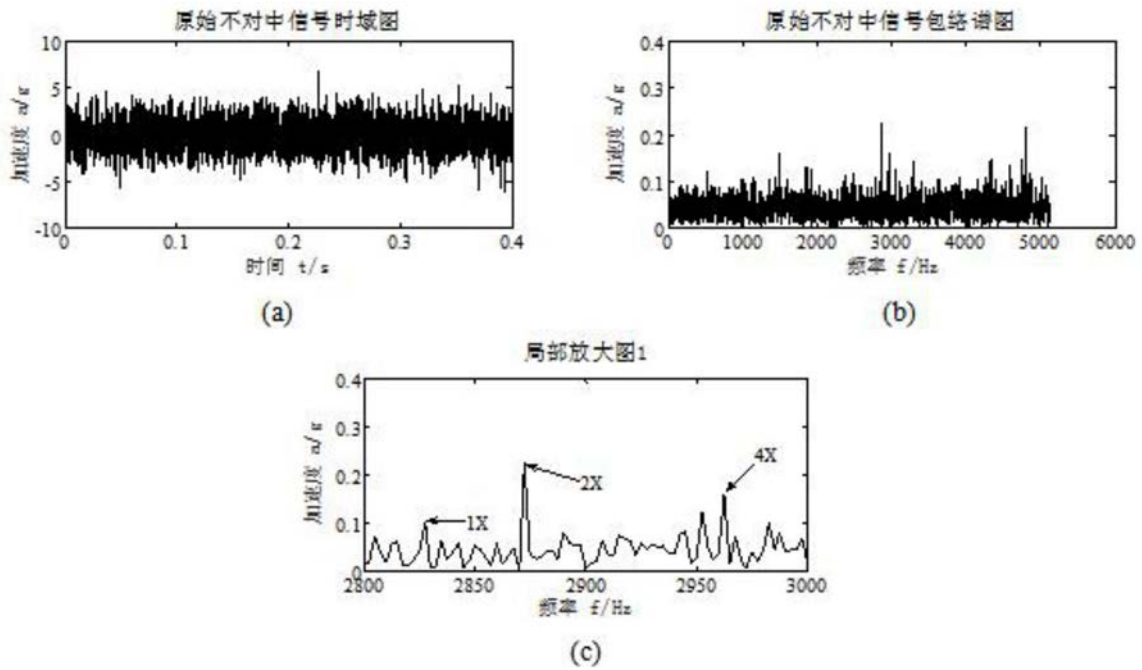


图2

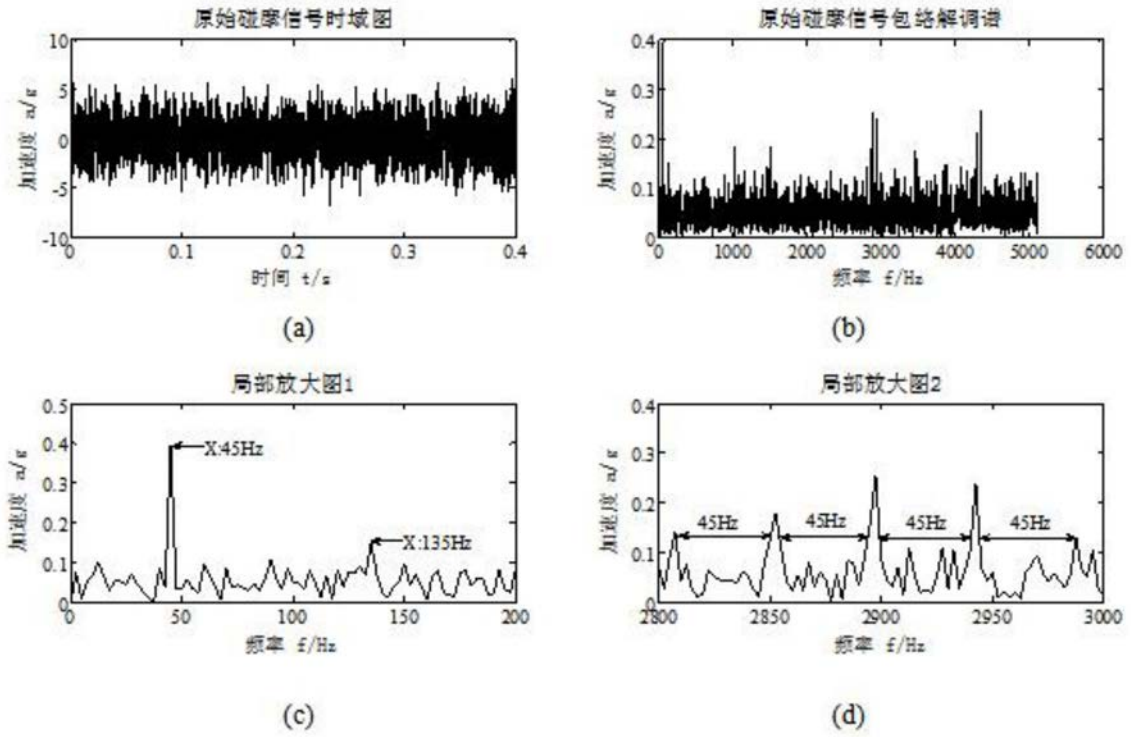


图3