

基于稀疏编码和禁忌优化的故障信号抽取方法

周 晏, 王 璐

(安阳工学院 计算机科学与信息工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要: 为了克服经典正交匹配算法获取原子集时遍历冗余字典具有较大时间开销的缺点, 提出了一种基于压缩感知理论和禁忌优化算法的稀疏故障信号特征提取方法; 首先引入了压缩感知模型并描述了基于信号稀疏表示的故障诊断原理, 设计了满足 RIP 准则以最小化 l_1 范数为目标的稀疏信号解的求解方法, 然后定义了一种基于正交匹配算法的稀疏信号重构算法, 并以最小化余量为目标函数, 采用改进的禁忌搜索算法在原子空间中搜索满足目标函数的最优原子集, 最后, 给出了基于稀疏编码和禁忌优化混合模型的故障信号提取算法; 在 Matlab 仿真环境下对滚动轴承故障信号进行试验, 仿真结果表明: 文章方法能有效地对具有强噪声的故障信号进行稀疏重构, 不仅具有较高的信噪比, 而且具有较小的余量误差和仿真时间, 与其它方法相比, 具有较大的优越性。

关键词: 信号提取; 稀疏编码; 压缩感知; 正交匹配; 噪声

Fault signal Extraction Method Based on Sparse Encoding and Tabu Optimization Algorithm

Zhou Yan, Wang Lu

(Computer Science & Engineering Department, AnYang Institute of Technology, AnYang 455000, China)

Abstract: In order to conquer the defects of the classic orthogonal matching algorithm obtaining the atom set having the much time consumption, a feature extraction method based on compressed sensing theory and Tabu Optimization Algorithm is proposed. Firstly, the compressed sensing theory is introduced and the fault diagnosis principle is described, the sparse signal solving method using the l_1 norm as the goal and satisfying the RIP rule. Then a sparse signal reconstruction method based on orthogonal matching is defined, and using minimizing remain value as the goal, the improved tabu optimizing algorithm is used to find the optimizing atom set in the atom space. Finally, the fault signal extraction algorithm is given by combining sparse encoding and tabu optimizing. The simulation experiment of rolling bearing fault signal is simulated in the Matlab simulation environment, and the result shows the method in this paper can effectively realize the sparse reconstruction for fault signal with strong noise, the method in this paper not only has higher signal noise rate, and also has the less remain error and simulation, and compared with the other methods, it has big priority.

Keywords: signal extraction ; sparse encoding; compressed sensing; orthogonal matching; noise

0 引言

在系统或设备的故障诊断中, 由于受环境噪声或信号衰减影响, 在系统和设备的早期故障中, 冲击脉冲信号微弱并淹没在自身强噪声背景中, 不易被察觉, 由于瞬态冲击信号中包含了系统和设备的早期故障信息^[1-3]。

目前已有的对故障信号^[4-5]进行提取的方法主要有: 文献 [6] 设计了一种对非平稳信号的双重 Q 因子^[7]的非线性信号系数稀疏分解法, 并根据分解后得到的高共振成分和低共振成分, 采用低 Q 因子提取故障冲击成分, 以降低故障征兆信号中的强噪声。文献 [8] 在计算振动信号中各组成成分差异后, 实现对谐振分量和冲击分量的能量算子解调分析, 并确定具体的故障类别。文献 [9] 为了实现微弱信号的特征提取, 设计了一种基于循环魏格纳滤波和包络谱结合的模型, 用于滚动轴承全寿命周期的故障诊断。文献 [10] 针对强背景噪声下的滚动轴承故障特征的信号微弱性特征, 设计了一种基于最小熵解卷积和稀疏分解结合的故障诊断特征微弱信号提取方法, 采用 MED 对故障信号进行降噪处理并通过实验证明了所提的方法。

上述工作在对信号降噪时, 没有考虑到最大程度地对信号进行稀疏表示, 为此, 文中设计了一种基于稀疏编码和禁忌优化算法的故障诊断方法。

1 基于压缩感知和稀疏表示的诊断

1.1 压缩感知概述

压缩感知理论 (Compressed Sensing, CS) 在香农-奈奎斯特采样定理的基础上发展起来的, 由于香农-奈奎斯特采样定理规定任何一个连续带宽的有限信号, 只有当信号采样频率大于或等于信号带宽的 2 倍时, 才能保证的无损重构, 因此待处理信号的带宽增大时香农-奈奎斯特采样定理面临着存储资源、传输资源和计算资源等硬件成本的增加以及资源利用率降低问题。

压缩感知理论能突破香农-奈奎斯特采样定理的限制, 使其采样频率不仅受限于信号频率, 而与信号结构相关。因此, 能有效避免无用数据采集并节省采样时间和资源。

1.2 基于稀疏表示的故障诊断原理

将训练样本组成一个训练集, 其他样本作为一个测试集, 测试集中的样本可以由训练样本来稀疏表示, 假设故障种类为 m , 第 i 类样本 X_i 可以表示为:

$$X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n_i}] \in \mathbf{R}^{m \times n_i} \quad (1)$$

测试样本 $y \in \mathbf{R}^m$ 可以表示为与 X_i 同类的训练样本的线性组合:

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-04-11。

基金项目: 国家重大科技专项项目 (2012ZX04011-012)。

作者简介: 周 晏 (1979-), 女, 河南安阳人, 硕士, 讲师, 主要从事软件工程, 数据挖掘, 网络方向的研究。

$$y = a_{i,1}x_{i,1} + a_{i,2}x_{i,2} + \dots + a_{i,j}x_{i,j} \quad (2)$$

其中: $a_{i,j} \in \mathbf{R}, j = 1, 2, \dots, n_i$ 。

将 m 类的 n 个训练样本的组合在一起构成训练集矩阵 \mathbf{A} , 如下所示:

$$\mathbf{A} = [A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_k] = [x_{1,1}, \dots, x_{1,n_1}, \dots, x_{i,1}, \dots, x_{k,n_k}] \quad (3)$$

$\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 的测试样本 $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ 可以表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (4)$$

对式 (4) 进行求解得到 x , 如果 x 的形式如下:

$$\mathbf{x} = [0, \dots, 0, a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n_i}, \dots, 0] \quad (5)$$

从式 (5) 中可以看出, x 只有第 i 类为非 0 元素, 那么可以判断测试样本即属于第 i 类, 因此, 测试样本根据求解的 x 能诊断发生了哪类故障。

1.3 信号稀疏构造

在式 (4) 中, 由于 $m \leq n$, 从而是欠定的, 即对应了无穷解, 由于信号 \mathbf{x} 的稀疏性, 因此, 可以构造一个与变换基 \mathbf{A} 无关的测量矩阵 Φ , 其满足有限等距性质 (Restricted Isometric Property, RIP 准则), 即:

$$\begin{cases} (1 - \delta_k) \|z\|_2^2 \leq \|\mathbf{A}b\|_2^2 \leq (1 + \delta_k) \|z\|_2^2 \\ \delta_k \in (0, 1) \end{cases} \quad (6)$$

选取 m 个观测值构成 $m \times 1$ 的向量 \mathbf{y} , 则式 (4) 可以表示为:

$$\mathbf{Y} = \Phi\mathbf{X} = \Phi\mathbf{A}\mathbf{x} \quad (7)$$

其中: Φ 为 $m \times n$ 的测量矩阵。

为了寻求原始信号 x 的最好的稀疏解 x' , 可以通过求解最小 l_0 范数来根据测量值重构信号:

$$\begin{cases} \alpha = \operatorname{argmin} \|x\|_0 \\ s. t. \mathbf{y} = \Phi\mathbf{x} = \Phi\Psi\alpha \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\|x\|_0$ 表示向量 x 中非零元素的个数, 根据最小 l_0 范数在一定程度上与最小 l_1 范数具有等价性, 将 (4) 可以修改为:

$$\begin{cases} \alpha = \operatorname{argmin} \|x\|_1 \\ s. t. \mathbf{Y} = \Phi\mathbf{X} = \Phi\Psi\alpha \end{cases} \quad (9)$$

2 基于禁忌优化正交匹配算法的故障信号重构

2.1 基于正交匹配的故障信号重构

式 (5) 的求解是一个 NP 难题, 通常采用正交匹配追踪 MP (Matching Pursuit, MP) 算法对其进行重构, 通过寻求训练样本矩阵 \mathbf{A} 与残差具有最大相关性的原子用于更新索引及索引集, 计算测试样本 x 在索引集上的最优投影来逼近原始信号, 使得式 (10) 的稀疏解对应的残差最小。

在每轮迭代中进行原子选择和余量计算更新, 选择测量矩阵 Φ 中与余量内积绝对值最大的原子作为匹配原子, 然后将信号正交投影到原子张成的索引集中, 并重新计算残差, 直到循环满足约束条件。

算法可以描述如下:

(1) 初始化: 余量 r 的初始值 $r_0 = y$, 索引集 $U = \text{NULL}$, 迭代次数初始值 $t = 1$, 残差阈值 θ ;

(2) 从训练集矩阵 \mathbf{A} 中选择与余量 r 具有最大相关性的原子:

$$e_i = \operatorname{arg} \max_{i=1,2,\dots,N} \langle r_{i-1}, r_i \rangle \quad (10)$$

(3) 对已选择的原子集进行更新:

$$U_t = U_t \cup v_{e_t} \quad (11)$$

(4) 以最小化残差为目标, 采用最小二乘法获得观察向量在原子集上的最优投影, 对稀疏系数值 x' 进行更新:

$$x' = \operatorname{argmin} \|y - Ux'\| \quad (12)$$

(5) 对信号的余量进行更新:

$$r_t = y - Ux' \quad (13)$$

(6) 迭代次数 $t = t + 1$, 判断信号余量 r_t 的值:

如果 $r_t < \theta$, 则算法停止, 输出信号的稀疏重构解 x' ;

否则, 转到 (2) 继续执行。

2.2 禁忌优化原子集

由于 MP 算法能在迭代过程中保证余量与选择的匹配原子的正交, 但不能保证余量与原来选择的所有匹配原子正交, 因此, 需要较多的迭代次数才能保证重构精度。

为了克服其缺点, 文中从全局角度出发, 提出了一种基于禁忌优化的原子集求解方法, 以最小化式 (13) 的残差为目标, 通过不断迭代获取较优解。

禁忌优化算法 (Tabu Search, TS) 是由 Glover 于 1986 年提出的一种全局优化算法, 它扩展了经典模拟退火算法的全局寻优能力, 具有较强的局部邻域搜索能力。TS 算法采用线性表来存储禁忌对象, 采用禁忌准则避免迂回搜索并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态, 从而保证探索解的多样性, 使得算法具有较强的全局搜索能力。

禁忌算法的最大优点是通过线性表存储了被局部最优解, 并在下轮迭代中尽量避开被禁忌的解, 从而保证了搜索过程的多样性, 具有较强的“爬山”能力, 因此, 目前禁忌优化算法已经在优化控制、生产调度和神经网络等方面都获得了成功的应用。

采用禁忌优化算法来获取原子集的主要过程是: 将训练样本矩阵 \mathbf{A} 的所有原子作为候选原子集, 由于 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 因此, 可以通过禁忌算法从中选择若干原子作为原子集, 其编码方式可以定义为:

$$(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (14)$$

其中: $x_i = 1$ 表示第 i 个原子被选中作为原子集中的原子。

适应度函数定义为:

$$f(t) = 1/(y - U_t x') \quad (15)$$

其中: U_t 为当前迭代次数 t 对应的原子集。

采用禁忌算法寻求最优原子集的流程可以描述为:

3 基于禁忌优化和最小二乘的最优原子集求解

3.1 算法工程设计原理

文中基于禁忌优化算法和稀疏编码的主要思想为: 在采集了故障原始信号后, 首先构造观察矩阵, 然后从观察矩阵中随机选择初始原子, 以最小化重构误差即式 (15) 为目标, 通过禁忌优化算法即图 2 所示的优化流程, 不断优化最优原子集的选取, 直到达到最大的迭代次数或者寻找到全局最优解, 将求得的全局最优原子解代入式 (12), 将求取的解作为故障信号的稀疏表示, 从而得到了原始故障信号的稀疏表示特征信号。

3.2 算法设计流程

文中基于禁忌优化算法和最小二乘稀疏编码的信号重构算法可以描述为:

初始化: 余量初值 $r_0 = y$, $M \times N$ 的测量矩阵 \mathbf{A} , 余量当前值 $r = r_0 = y$, 当前迭代次数 $t = 1$, 余量收敛性阈值 θ ,

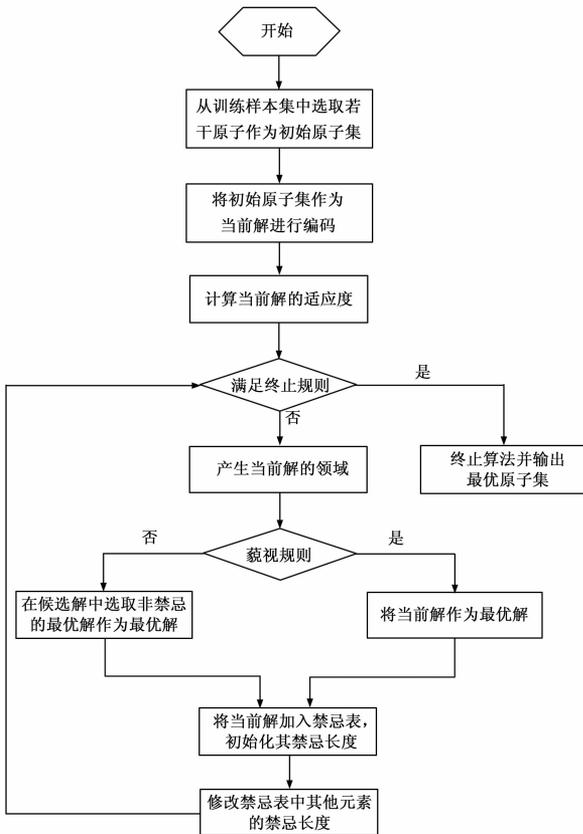


图 1 禁忌优化算法获取最优原子集

禁忌表 l , 禁忌长度 len , 禁忌表的大小 l_s , 邻域大小 l_n ;

步骤 1: 从观测矩阵中随机地选出若干原子, 根据式 (14) 对其进行编码, 并将其作为当前解 x ;

步骤 2: 计算当前解的适应度 $f(t)$, 并判断当前解的适应度 $f(t)$ 是否大于收敛性阈值 th ;

如果大于阈值 th , 则将当前解作为最优原子集, 根据式 (13) 更新余量 r , 并根据式 (12) 所示的最小二乘法来获取信号的重构稀疏表示;

如果小于阈值, 则寻求当前解的邻域, 当前解的邻域可以由当前解经过变异生成, 将某些位由 0 变为 1 或者由 1 变为 0, 如:

$$(x_1, x_2, \dots, x_m) = (0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, \dots, 0)$$

$$\downarrow$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_m) = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, \dots, 1) \quad (16)$$

直到生成 l_n 个邻域解。

步骤 3: 根据式 (15) 计算所有邻域解的适应度, 并按适应度从大到小进行排序, 选择具有最优适应度的解作为候选解;

步骤 4: 判断候选解是否满足禁忌准则, 即当前解虽然出现在禁忌表中, 但其较以往的任何状态更优;

若满足, 则无视其禁忌属性, 选择其为当前解, 将其加入到禁忌表 l 中;

否则, 将未被禁忌的最优候选解作为当前解加入到禁忌表中;

步骤 5: 重新初始化当前解的禁忌长度为 len , 将禁忌表中禁忌长度为 0 的禁忌解移出禁忌表 l ;

步骤 6: 判断迭代次数是否已经达到最大值;

如果达到最大值, 则算法结束, 根据式 (12) 所示的最小二乘法来获取信号的重构稀疏表示 x' , 并输出稀疏解 x' 。

否则当前迭代次数 $t = t + 1$, 并返回步骤 2 继续迭代。

4 仿真实验

4.1 仿真验证平台构建

在 Matlab 仿真环境下进行实验, 采用滚动轴承故障模型在强噪声背景环境下的内圈点蚀故障进行仿真模拟, 故障诊断的数据模型如下所示:

$$\begin{cases} x(t) = s(t) + n(t) = \\ \sum_i B_i h(t - iT - \tau_i) + n(t) \\ B_i = B_0(2\pi f_r t + \varphi_B) + C_B \\ h(t) = \exp(-Bt)\cos(2\pi f_n t + \varphi_w) \end{cases} \quad (17)$$

其中: τ_i 表示第 i 次冲击对于平均周期 T 的微小波动的影响。

4.2 数据设置与说明

文中算法参数设置如下: 系统固有频率 $f_n = 5 \text{ kHz}$, 采样频率 $f_s = 26.4 \text{ kHz}$, 转频 $f_r = 15 \text{ Hz}$, 内圈故障通过频率 $f_i = 58 \text{ kHz}$, 随机滑动服从正太分布, 标准差可以设置为转速的 0.5%, 当前迭代次数 $t = 1$, 余量收敛性阈值 $th = 3$, 禁忌表 $l = null$, 禁忌长度 $len = 5$, 禁忌表的大小 $l_s = 4$, 邻域大小 $l_n = 3$ 。

4.3 结果分析

原始信号和加入信噪比为 -14dB 后的加噪信号的时域波形分别如图 2 和图 3 所示。

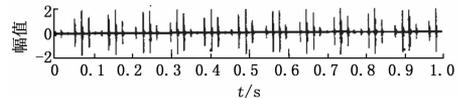


图 2 原始信号

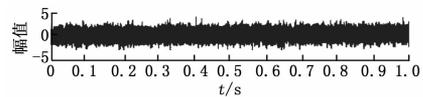


图 3 加噪仿真信号

从图 3 可以看出, 由于背景噪声很强, 因此, 无法看到微弱的故障特征信号, 图 3 所示的滚动轴承仿真信号的包络谱进行仿真, 结果如图 4 所示。

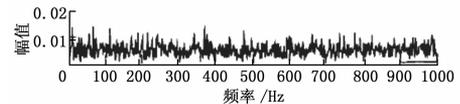


图 4 加噪仿真信号包络谱

从图 4 的加噪仿真信号的包络谱可以看出, 无法提取出通过频率为 $f_i = 58 \text{ kHz}$ 的滚动轴承仿真故障信号。

此时, 采用文中基于改进的稀疏编码和禁忌优化的故障信号提取算法来对图 3 所示的加噪仿真信号进行稀疏分解, 得到的稀疏信号如图 5 所示。

从图 6 所示的加噪仿真信号的包络谱可以看出, 其能很好地提取出通过频率为 $f_i = 58 \text{ kHz}$ 的滚动轴承仿真故障信号,

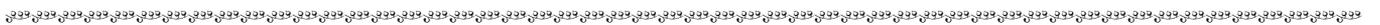
(下转第 2181 页)

济南: 山东大学, 2012.

[2] 蒋代梅, 刘洋, 周小兵. 基于 GPS/GIS 的物流运输管理系统的实现技术 [J]. 北京工业大学学报, 2005, 31 (4): 443-448.
 [3] 闫光辉, 孟杰. 基于 3G 的货物动态跟踪管理信息系统的设计 [J]. 交通标准化, 2007, (4): 189-190.
 [4] 金波, 台毅柱, 王逸乔, 等. 基于无线传感器技术便携式仓储管理系统的设计 [J]. 传感器与微系统, 2011, 30 (7): 79-81.
 [5] Vi swanadham N. The past, present, and future of supply-chain automation [J]. IEEE robotics & Automation Magazine, 2002.
 [6] Roenblatt DB. The impact of selective availability on precise relative

position with static GPS [J]. Journal of the Geodesic Society of Japan, 2001, 38 (1): 29-44.

[7] 冯飞, 刘培学, 姜宝华. MCU 控制基于 3G 及低功耗自组网图像传输、信息采集、远程控制系统 [J]. 计算机科学, 2012, 11 (A): 400-401.
 [8] 李 隰, 韦佳洵. 基于网络 GPS 的货物动态跟踪系统研究与实现 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 37 (2): 396-399.
 [9] 金作涛. 一种仪表仓库自动识别管理系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 28 (11): 2743-2745.



(上接第 2166 页)

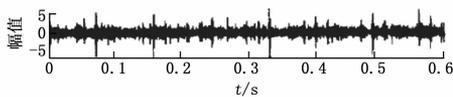


图 5 稀疏信号

同时还能提取出谐频和调制频率信号, 其对应的分解余项如图 7 所示。

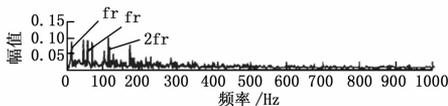


图 6 稀疏信号对应的包络谱

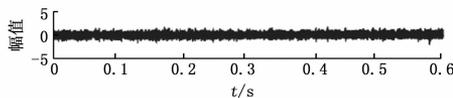


图 7 分解余项

从图 7 所示的分解余项可以看出, 余项的波动范围非常小, 在 $(-0.1, 0.1)$ 之间波动, 收敛性非常好, 这表明了文中方法求取的原子集选取的优越性。

为了进一步验证文中方法的优越性, 将文中方法与文献 [9] 和文献 [10] 方法进行对比, 从峰值信噪比、余量误差 2 范数和运行时间 3 个方面进行仿真, 结果如表 1 所示:

表 1 不同算法稀疏表示结果

算法名称	峰值信噪比(dB)	余量误差 2 范数	运行时间(s)
文中方法	31.323	0.045 2	12.35
文献[9]	22.724	0.134 2	15.12
文献[10]	28.334	0.097 3	13.78

从表 1 中可以看出, 文中方法提出的故障特征信号最好, 这表现在文中方法具有最大的峰值信噪比和最小的余量误差 2 范数, 同时由于其避免了在获取原子集时遍历冗余字典中的所有原子, 因此, 计算开销较小, 具有较少的运行时间, 显然, 综合上述指标, 文中方法最优。

5 结论

正交匹配算法是压缩感知理论中的一种经典的信号重构方

法, 其通过贪婪迭代思想不断搜索满足条件的原子, 但由于其在获取原子集时遍历冗余字典中的所有原子具有较大的时间开销, 因此, 文中提出了一种基于稀疏编码和禁忌优化的故障信号提取方法, 采用禁忌优化算法来寻求具有最小余量的原子集, 然后再通过最小二乘方法来获得信号的稀疏表示, 仿真实验证明了文中方法能实现信号的精确重构, 在强噪声背景下仍然具有较高的信噪比, 同时具有较小的余量误差和重构时间, 较其他方法具有较大优越性。

参考文献:

[1] Liang M, Bozchalooi I S. An energy operator Approach to Joint Application of Amplitude and Frequency-demodulations for Bearing Fault Detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24 (5): 1473-1494.
 [2] 吴 斌, 于春梅, 李 强. 过程工业故障诊断 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
 [3] Selesnick I W. Resonance-based signal decomposition: A New Sparsity-enabled signal analysis method [J]. Signal Processing, 2011, 91 (12): 2793-2809.
 [4] 于春梅. 稀疏特征选择在过程工业故障诊断中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2013.
 [5] Li H, Zhang Y P, Zheng H Q. Application of Hermitian wavelet to crack fault detection in gearbox [J]. Mechanical systems and signal processing, 2011, 25 (4): 1353-1363.
 [6] 莫代一, 崔玲丽, 王 婧. 基于双重 Q 因子的稀疏分解法在滚动轴承早期故障诊断中的应用 [J]. 机械工程学报, 2013, 9 (49): 37-41.
 [7] Selesinck I W. Wavelet transform with tunable Q-factor [J]. IEEE Transactions on Signal processing, 2011, 59 (8): 3360-3575.
 [8] 李 蓉, 于德介, 陈向民. 基于形态分量分析与能量算子解调的齿轮箱复合故障诊断方法 [J]. 中国机械工程, 2013, 13 (24): 1787-1795.
 [9] Ming Y, Chen J, Dong G M. Weak fault feature extraction of rolling bearing based on cyclic wiener filter and envelope spectrum [J]. Mechanical System and signal Processing, 2011, 25: 173-1785.
 [10] 王宏超, 陈 进, 董广明. 基于最小熵解卷积与稀疏分解的滚动轴承微弱故障特征提取 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (1): 88-94.