

检测与诊断齿轮裂纹故障的一种方法

陈汉新, 刘 岑, 杨诗琪

武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205

摘要:基于径向基函数(RBF)网络优化的粒子滤波降噪与序贯概率比检验相结合的原理,提出了一种检测与诊断齿轮裂纹故障的方法,并采集一种无裂纹与另外两种存在差异裂纹齿轮的水平方向振动信号,对该方法进行验证.首先,运用RBF网络优化的粒子滤波程序对原始振动信号进行降噪预处理,将振动真实值从中提出;然后,利用时域分析法提取振动真实值的特征参数(峭度值)序列;最后,将特征值序列输入序贯概率比检验程序,根据结果图综合分析对不同齿轮故障进行区分.结果表明建立的优化粒子滤波程序对原始振动信号降噪处理效果良好,获得了细致、准确和稳定的振动信号;序贯概率比检验能比较与区分齿轮不同的故障,改进了齿轮箱故障检测与诊断效果.

关键词:粒子滤波;序贯概率比检验;齿轮箱;故障诊断

中图分类号:TH165⁺.O3;212.3

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.09.011

0 引言

齿轮的作用主要体现在齿轮箱传递动力和连接的过程中,齿轮箱的故障诊断是对其中的零部件进行诊断,例如齿轮、转子和滚动轴承.根据统计,由齿轮问题引起的故障占到机械传动中所发生的故障至少有60%,因此对齿轮箱中的齿轮进行故障诊断的深入研究势在必行.

粒子滤波是在20世纪90年代出现的滤波计算方法^[1],他主要是通过利用随机的样本来对概率分布加以描述,其中被描述的样本就叫做“粒子”,再根据测量情况,适当调整每个粒子其权值的数据以及每个样本的具体方位,来近似实际概率分布. Merwe^[2]等提出了无迹粒子滤波算法,但实时性不佳;文献[3]在粒子滤波方法中引入径向基函数网络(RBFN)学习方法,即在采样的时候对粒子集中的所有粒子聚类,及时更新粒子状态,提高先验概率密度分布估计精度,消除犹豫过程噪声引起的误差,将粒子滤波的性能提高.

Wald^[4]在1947年提出了序贯概率比检验算法,近年来,该检验方法在故障诊断方面有了广泛的运用,但在齿轮箱故障诊断时必须事先确定好样本的数目.从文献[5]中可知序贯概率比检验

算法比传统抽样检测所需要的样本量更少.由文献[6-7]可以知道在所有故障模式中,齿轮裂纹最易模拟,因此选择齿轮裂纹来进行诊断分析是可行的,但是实验中得到的信号不仅包括有用信号同时还夹杂着噪声等干扰,影响了系统的稳定性.

基于参数序贯概率比检验的齿轮裂纹故障诊断方法,是将每个假设检验数据与设定值进行比较,具有不预先规定观测样本群数量的优点;因此,文中提出的将RBF网络优化的粒子滤波与序贯概率比检验相结合的方法,即首先运用RBF网络优化粒子滤波算法对信号进行降噪处理,获得稳定信号;然后采用对冲击性振动极其敏感的峭度值作为特征参数,利用时域分析法来处理对信号加以降噪处理之后的特征数值;最后利用序贯概率比检验算法来分析齿轮裂纹的故障.实验研究表明,文中提出的方法对齿轮裂纹故障诊断是有效与可靠的.

1 RBF网络优化的粒子滤波原理

RBF网络优化的粒子滤波原理就是利用径向基函数网络能以任意精度逼近任意连续函数的性能来优化粒子滤波的采样过程.通过RBFN对初始化后的目标状态进行完整性的全局估计,利用

收稿日期:2014-07-17

基金项目:国家自然科学基金(61273176);教育部新世纪优秀人才支持计划(201010621237);湖北省教育厅科学技术研究重大项目(Z20101501);教育部留学回国人员科研启动基金(20091001)

作者简介:陈汉新(1969-),男,湖北武汉人.教授,博士.研究方向:机械故障诊断及控制.

径向基函数神经网络学习算法更新各粒子状态,从而获取新的重要性权值.基本步骤如下:

步骤 1:初始化.在 $k=0$ 时刻,根据 $p(x_0)$ 分布采样得到 $\{x_0^i, i=1, 2, \dots, N\}$ 即 $x_0^i \approx p(x_0)$.

步骤 2:构建 RBF 网络.根据状态方程和观测方程构建径向基函数网络训练的样本,利用径向基学习算法得到新的样本 \hat{x}_k^i :

$$\hat{x}_k^i = \sum_{j=1}^m w_j \exp\left(-\frac{|x_0^i - c_j|^2}{2\sigma^2}\right) \quad i=1, 2, \dots, N$$

步骤 3:重要性权值计算.采样 $\{\hat{x}_k^i, i=1, 2, \dots, N\} \sim q(x_k | x_{k-1}^i, z_k)$, 计算新的重要性权值,完成权值归一化.

步骤 4:重采样.依照新出现的权值对 $\{\hat{x}_k^i, i=1, 2, \dots, N\}$ 加以采样.

步骤 5:输出.得到更新后的状态估计.

2 序贯概率比检验原理

文献[8]中序贯概率比检验算法可总结为:设 x_1, x_2, \dots 为一组满足独立同分布的随机变量序列. x_i 在这里代表的是样本集 $\{x_i\}$ 中任意的观察数值,假设 $\{x_i\}$ 是离散型随机变量,其条件概率分布假定为 $f(x/\theta)$, 其中, $\{x_i\}$ 之分布由 θ 确定.

就二元变量序贯概率比检验而言,初假设是 $H_0: \theta = \theta_0$, 备择假设是 $H_1: \theta = \theta_1$.

它们的联合分布密度函数为:

$$f_1(x) = p(x_1, \dots, x_n / H_j) = \prod_{i=1}^n f(x_i / \theta_j), \text{ 其中 } j=0, 1.$$

序贯概率比检验的似比 λ 为:

$$\lambda_n(x) = \lambda_n(x_1, \dots, x_n) =$$

$$\frac{p(x_1, \dots, x_n / H_1)}{p(x_1, \dots, x_n / H_0)} = \frac{\prod_{i=1}^n f_1(x_i / \theta_1)}{\prod_{i=1}^n f_0(x_i / \theta_0)}$$

依照假设检验里面的一类错误概率 α 以及二类概率 β 得出阈值 A 与 B ($A > B$). 在这里 x_1 为集合里面的首个观察数值,把它代进上一个公式里面求出似然比,即 $\lambda_1(x_1)$. 之后同之前设置的阈值加以对比,最终判断故障模式.如果似然比满足:

$$\lambda_1(x_1) < B$$

则终止检测,按照初假设 H_0 处理,放弃 H_1 ; 如果似然比满足:

$$\lambda_1(x_1) > A$$

依然终止抽样,拒绝初假设 H_0 . 同时接受备择假设 H_1 ; 如果似然比为:

$$B \leq \lambda_1(x_1) \leq A$$

接着使用下一个观察数值求出似然比 $\lambda_2(x_1, x_2)$. 假如似然比符合 $\lambda_2(x_1, x_2) < B$, 停止检测,按照初假设 H_0 处理,放弃备择假设 H_1 . 如果满足 $\lambda_2(x_1, x_2) > A$, 停止检验,接受备择假设 H_1 , 拒绝初假设 H_0 . 假如符合 $B \leq \lambda_2(x_1, x_2) \leq A$, 那么应该接着选择其他观察数值加以检测,直到最终的检测结果符合阈值范围. 上述整个流程就叫做序贯概率比检验.

整个系统允许出现的错误概率 α 与 β 直接确定检验当中的主要的边界常数 A, B . α, β 同 A, B 两个常数有着以下的密切联系:

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha}, \quad B = \frac{\beta}{1-\alpha}$$

3 齿轮箱故障诊断试验

为检验所设计的新检测方法对于故障的确定是否有效,模拟了齿轮箱振动实验,这里有三种情况组成,分别为非故障情况下的 F_1 与故障情况下的 F_2, F_3 . 所谓的非故障就是不存在裂纹,用 F_1 代表;故障情况的是用 F_2 与 F_3 代表,亦即存在裂纹. 在这里的 F_2 代表裂纹的深度和宽度分别是裂纹全深度和全宽度的 25%, 而 F_3 代表的裂纹分别为全深度和全宽度的 50%. 其中裂纹全深度 a 为 2.4 mm, 是弦齿厚度的 50%, 裂纹全宽度 b 为 25 mm, 厚度是 0.4 mm, 压力角均为 45° . 将齿轮箱设定为空载状态下运行, 转速为 800 r/min, 设定的三个故障情况如表 1 所示.

表 1 三种故障模式
Table 1 Three fault modes

故障模式	裂纹参数/mm		
	深度	宽度	厚度
F_1	0	0	0
F_2	0.25a	0.25b	0.4
F_3	0.5a	0.5b	0.4

图 1 表示齿轮箱工作结构, 齿轮 3、4 由于冲击力会导致振动, 可任意选择其一来对故障情况进行模拟. 本实验中选取齿轮 3 来模拟.

把 2 个加速传感器装到齿轮箱水平垂直方向, 利用动态模拟器收集它的振动信号, 应用频谱分析仪, 对收集到的信号数据加以传输存储. 本文仅就水平方向的信号加以处理分析, 其中, 使用 S_1 代表非故障情况下的信号, S_2 表示 25% 裂纹齿轮下采集到的振动信号, 而 S_3 表示 50% 裂纹齿轮下采集到的原始振动信号.

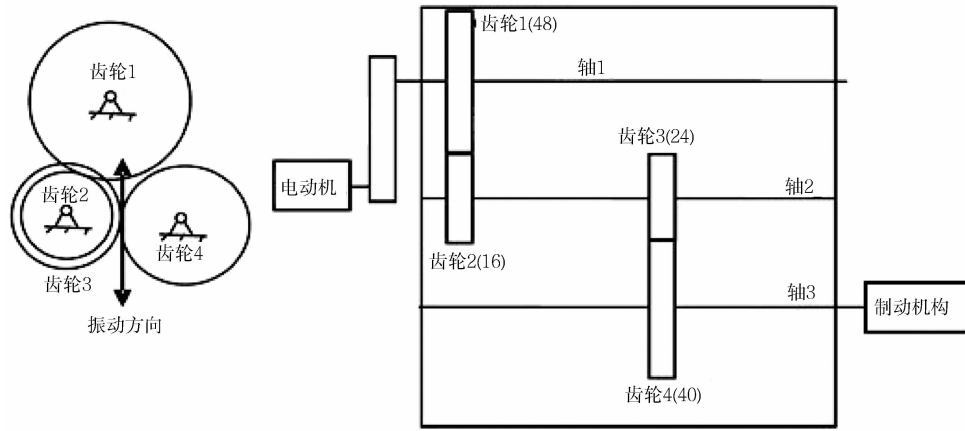


图1 齿轮箱工作结构图

Fig. 1 The diagram of gearbox working structure

4 齿轮裂纹的序贯概率比检验

4.1 RBF 网络优化粒子滤波降噪

通过 RBFN 的优化,各粒子状态更新将趋向于真实状态,更加符合实际情况.同时也提高了对目标状态的概率分布估计精度,减少了粒子更新过程中误差累计对状态估计的影响.它不再利用固定的状态方程更新目标状态,而是根据对目标状态预测的实际需要,通过前若干时刻测量值的干预,避免粒子状态估计受到积累误差的影响,增强粒子状态估计过程的适应能力,从而获得更细致、准确的平稳信号,用以序贯概率比检验.

4.2 特征参数提取

特征参数能够反映振动信号的特征信息,将原始振动信号进行优化粒子滤波降噪得到接近真实值的数据集合,再从中提取相关特征参数,实验中的离散待检信号 $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, $N=8192$,每组取 1024 个检验点,这样就可以得到 7169 组检验数据.能够使用下列方式就算出不同的参数.

$$\text{均值: } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\text{峭度值: } k = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)^2}$$

峭度值集合 $k_i = [k_1, \dots, k_n]$ 是研究中需要的离散检验信号,其均值和标准差分别为:

$$\text{均值: } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i$$

$$\text{标准差: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2}$$

峭度值对于振动信号非常敏锐,因此序贯概率比检验参数选择峭度值来进行计算.

4.3 Wald 序贯检验

通过似然比计算发现,方差以及平均值对其结果有很大的影响.通过 RBF 优化粒子滤波降噪,发现提取出的振动真实值序列符合高斯分布.当齿轮箱为正常状态时,这一信号序列符合初假设 $H_0: \mu = \mu_0$; 当处于故障情况时,这一信号序列符合备择假设 $H_1: \mu = \mu_1$. 其标准差 σ 不发生变化,均值产生变动,如果上述两个假设都能成立,那么这一序列联合密度如下.

$$p_{0i} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (k_i - \mu_0)^2\right)$$

$$p_{1i} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} (k_i - \mu_1)^2\right)$$

式中, p_{0i} 表示初假设条件下的概率密度函数, p_{1i} 表示备择假设条件下的概率密度函数. 其似然比能够用下面式子进行表示:

$$\lambda_i = \frac{\prod_{i=1}^n p_{1i}}{\prod_{i=1}^n p_{0i}} = \frac{p_{11}(k_1) * p_{12}(k_2) * \dots * p_{1i}(k_i)}{p_{01}(k_1) * p_{02}(k_2) * \dots * p_{0i}(k_i)} * \frac{p_1}{p_0}$$

其中, p_0 为初假设条件下的先验概率, p_1 为备择假设条件下的先验概率. 在现实处理时,应当把公式作如下处理,从而使得计算更精确简便.

$$\Delta = \ln \lambda_i = \ln \frac{\prod_{i=1}^n p_{1i}}{\prod_{i=1}^n p_{0i}} = \sum_{i=1}^n \ln \frac{p_{1i}}{p_{0i}}$$

此时, 阈值 $a = \ln A, b = \ln B$.

假如似然比符合 $\Delta < b$, 那么应当终止采样, 同

时接受初假设 H_0 , 判断齿轮箱为正常状态. 假如似然比满足不等式 $\Delta > 0$, 同样停止采样, 拒绝初假设 H_0 . 而接受备择假设 H_1 并且判定齿轮箱发生故障. 假如似然比符合 $b < \Delta < a$, 那么就无法确定处于何种故障情况, 应当继续采样, 直至使得上面 2 个状态中出现一个, 最终停止采样并加以判定. 故障判断流程如图 2 所示.

5 结果与分析

图 3 是正常模式以及两种故障模式下所采集到的原始振动信号. 其中 S_1 为正常模式, S_2 表示裂纹为 25% 的齿轮振动信号, S_3 为 50% 的裂纹齿轮振动信号. 将上述信号输入滤波运算程序, 即用 RBF 优化粒子滤波去噪, 得到最终的稳定信号, 如图 4 所示.

峭度值对振动信号反应非常敏锐, 其均值的变化对于检验时间、精确性及似然比影响甚大. 假设 H_0 与 H_1 两种情况下其对应的犯第一类错误和第二类错误概率是一致的, 取 $\alpha = \beta = 0.005$, 同时确定观测所得的信号的先验概率一致.

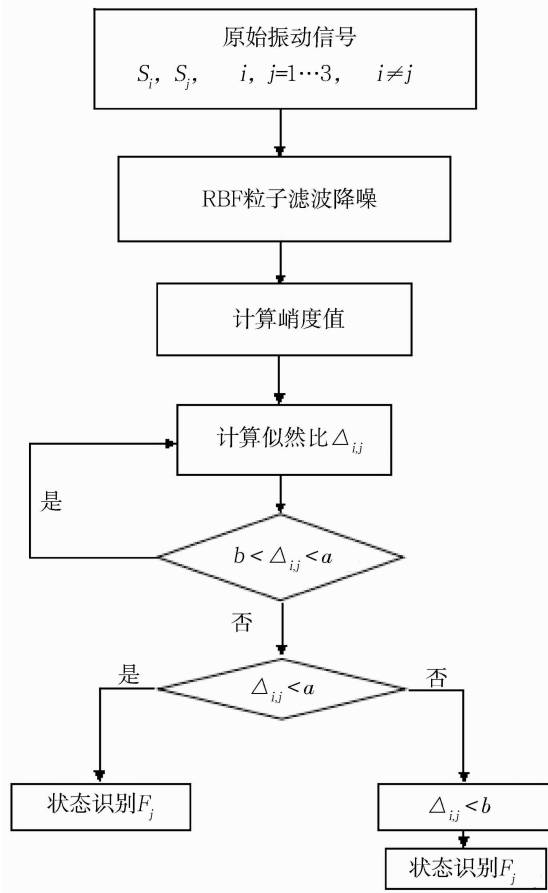


图 2 序贯概率比检验流程图

Fig. 2 Sequential probability ratio flow chart of sequential probability ratio test

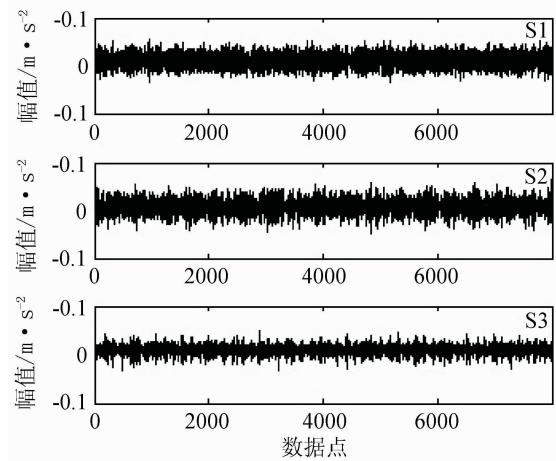


图 3 实验中得到的三组振动信号

Fig. 3 Three sets of vibration signals obtained in the experiment

通过似然比计算公式可知, 均值的偏差对于计算结果 Δ 的影响很大. 非故障情况信号 S_1 的平均值记为参数 μ_0 , 故障情况 S_2 与 S_3 的平均值记为参数 μ_1 , 检验其信号, 可得到图 5.

S_1 的平均值记为 μ_0 , S_2 的平均值记为 μ_1 , 代入似然比公式计算, 得到图 5(a). 从图 5(a) 可知, 将真实振动序列 S_1 输入序贯检验程序时, 计算结果满足 $\Delta < b$, 可判断齿轮箱处于正常状态. 将信号 S_2 输入程序时, 计算结果满足 $\Delta > a$, 即齿轮箱发生故障. 以 S_1 的均值作为参数 μ_0 , S_3 的均值作为参数 μ_1 , 当输入 S_1 时, 似然比计算结果为 $\Delta < b$, 表明齿轮箱正常; 将信号 S_3 输入计算程序, 似然比计算结果满足 $\Delta > a$, 可判断出齿轮箱发生故障, 如图 5(b) 所示.

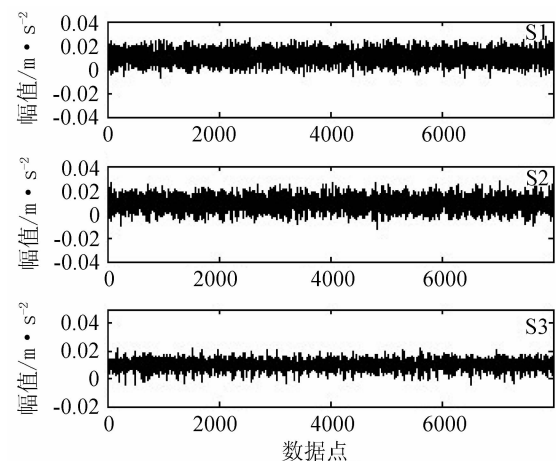


图 4 RBF 优化粒子滤波去噪后的振动信号

Fig. 4 RBF optimized particle filter Vibration signal of after de-noising

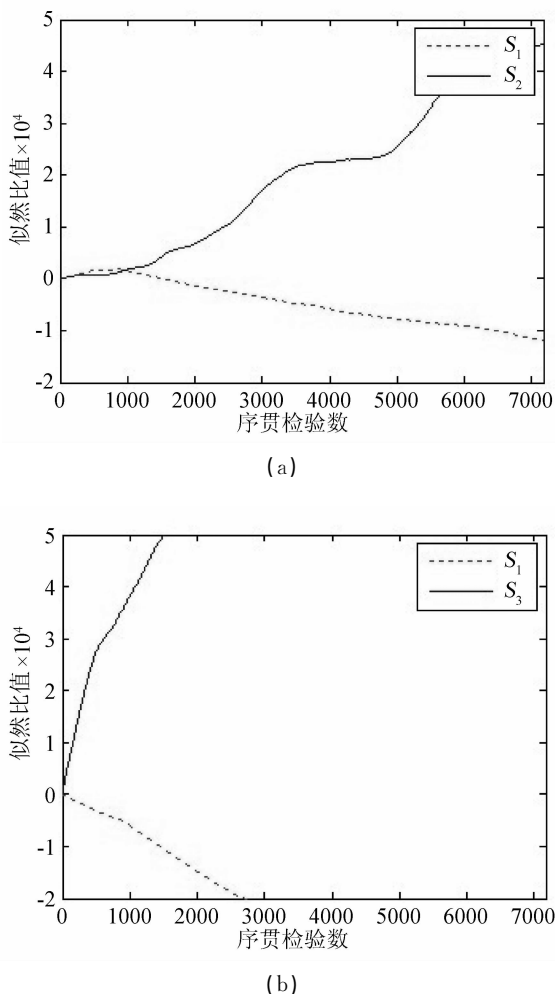


图5 序贯概率比检验结果

Fig. 5 Test results of sequential probability ratio of the

值得注意的是,对不同程度的齿轮裂纹信号也可以运用序贯概率比检验算法进行区分.对于 S_2 与 S_3 ,将 S_2 的平均值记为 μ_0 ,将 S_3 的平均值记为 μ_1 ,构建检验模加以计算,可得到图6.

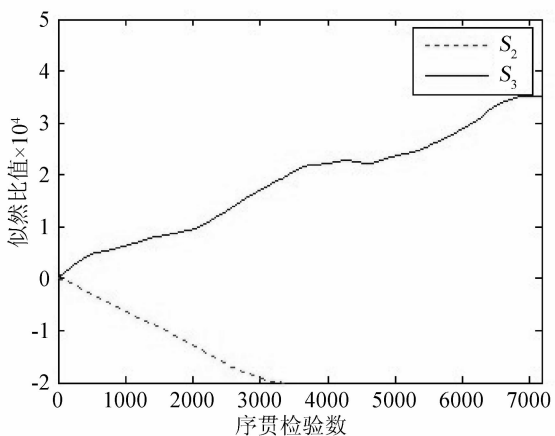


图6 序贯概率比检验结果

Fig. 6 Consistent sequence probability ratio of the test results

由图6可知,将 S_2 的均值记为参数 μ_0 , S_3 的

均值记为 μ_1 ,将信号 S_2 输入似然比计算程序时,计算结果满足 $\Delta < b$;输入信号 S_3 时,似然比计算结果为 $\Delta > a$,即可以清晰的将故障状态 S_2 (25%裂纹)和故障状态 S_3 (50%裂纹)区分开来.

6 结 语

基于RBF网络优化的粒子滤波降噪与序贯概率比检验相结合的原理,提出了一种对齿轮箱故障进行诊断与检测的方法.将正常齿轮和两种故障齿轮的状态进行对比,最终识别不同齿轮箱状态,证实文中提出的方法能有效可靠地对齿轮进行故障的分析与诊断;研究成果可供复杂旋转机械的故障检测与诊断参考.

致 谢

感谢国家自然科学基金(61273176),教育部新世纪优秀人才支持计划(201010621237),湖北省教育厅科学技术研究重大项目(Z20101501)和教育部留学回国人员科研启动基金(20091001)对本研究的资助.

参考文献:

- [1] GORDON N J, SALMOND D J, SMITH A F M. A novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IEE Proceedings on Radar and Signal Processing, 1993, 140(2): 107-113.
- [2] MERWE R V, DOUCET A, FREITAS N D, et al. The unscented particle filter[R]. Technical Report CUED/F-INPENG/TR 380, Cambridge University Engineering Department, 2000.
- [3] CHEN Hanxin, TU Ling, SUN Kui, et al. Noise reduction method based on RBF network optimized particle filter[C]//Key Engineering Materials Vols, (589-590)2014:629-633.
- [4] WALD A. Sequential Analysis[M]. New York: Wiley, 1947.
- [5] WALD A. Sequential tests of statistical hypotheses [J]. Ann. Math. Statist. 1945, 16(2): 117-186.
- [6] STANDER C J, HEYNS P S, SCHOOMBIE W. Using vibration monitoring for local fault detection on gears operating under fluctuating local conditions [J]. Mechanical Systems and Signal Processing. 2002, 16(6):1005-1024.
- [7] FAKHFAKH T, CHAARI F, HADDER M. Numerical and Experimental Analysis of a Gear System with Teeth Defects[J]. International Journal of Ad-

- vanced Manufacturing Technology, 2005, 25(5-6): 542-550.
- [8] YU Chenggang, SU Bingjing, A non-parametric sequential rank-sum probability ratio test method for binary hypothesis testing [J]. Signal Processing, 2004(84): 1267-1272.

Gearbox fault diagnosis of sequential probability ratio based on radial basis function optimized particle filter

CHEN Han-xin, LIU Cen, YANG Shi-qi

School of Mechanical and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: A method for the detection and diagnosis of gear crack was put forward based on the principles of radial basis function (RBF) network optimized particle filter and sequential probability ratio test. The horizontal vibration signals of a crack-free and two different crack gears were collected to verify the method. Firstly, the true vibration value was extracted from the original signals after the RBF optimized particle filter operating. Then, the time domain analysis was used to extract characteristic parameter sequence (kurtosis value). Finally, failure mode was determined according to the result map of which the kurtosis value sequence was put into the sequential probability ratio test procedures. The results show that the established procedure for optimized particle filter has a good effect on noise reduction with detailed, accurate and stable vibration signals; gears' different failures can be compared and distinguished by sequential probability ratio test, which improves the effect of gearbox fault detection and diagnosis.

Keywords: sequential probability ratio test; gearbox; fault diagnosis

本文编辑:陈小平