

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.011

基于自适应免疫检测器的变速器轴承故障诊断研究

李红芳¹, 张清华²

(1. 山西经贸职业学院 电子工程系, 山西 太原 030024;

2. 广东省石化装备故障诊断重点实验室, 广东 茂名 525000)

摘要:针对变速器轴承振动信号不平稳、特征难以提取等问题,以对振动信号的幅值和频率的变化不敏感的5种无量纲参数为特征参数,将这5种特征参数分为自我模式和非我模式,并基于人工免疫原理设计了一种自适应免疫检测器来克服传统变速器轴承故障诊断方法的局限,重新定义了自适应变异和抑制阈。在变速器轴承实验台上,首先对变速器轴承6种状态下的振动加速度信息进行了测量;然后计算了这些振动信息的无量纲指标;再用所得到的5种无量纲特征参数训练免疫检测器,使之成为成熟检测器;最后采用训练好的成熟检测器对变速器轴承的故障状态进行了诊断。试验结果表明:利用自适应免疫检测器进行变速器轴承故障诊断是可行的,而且该检测器具有较强的故障识别能力。

关键词:故障诊断;无量纲参数;自适应免疫检测器;变速器轴承

中图分类号:TH133.3;TP18;TP306

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1350-04

Transmission bearing fault diagnosis based on adaptive immune detector

LI Hong-fang¹, ZHANG Qing-hua²

(1. Department of Electronic Engineering, Shanxi Vocational College of Economic and Trade, Taiyuan 030024, China; 2. Guangdong Provincial Key Lab of Fault Diagnosis of Petrochemical Equipment, Maoming 525000, China)

Abstract: Aiming at the non-stationary characteristics of transmission bearing fault vibration signals and the difficulty to extract the feature, the dimensionless parameters are not sensitive to be changed in the amplitude and frequency of vibration signal of as the characteristic parameter, and the characteristic parameters were divided into self-model and non-self-model. An adaptive immune detector was designed to overcome the limitations of conventional diagnosis method based on the artificial immune principle. The adaptive mutation and suppression threshold were redefined. In the transmission bearing test rig, firstly, vibration acceleration information of bearing under the six states were measured. Secondly, five dimensionless characteristic parameters were obtained by calculating the dimensionless index of vibration information. And then, the detectors generation by utilizing those feature parameters were matured to train the proposed detector. Finally, the five bearing faults were diagnosed by mature detectors. The experimental results indicate that, the adaptive immune detector presented to diagnose transmission bearing faults is feasible and effective.

Key words: fault diagnosis; dimensionless parameter; adaptive immune detector; transmission bearing

0 引 言

轴承是发动机与变速箱的承力单元,在旋转机械中被广泛使用,其运转性能的优劣直接影响整个机械设备的运行性能。当变速器轴承出现故障时,冲击造

成实际测量信号中含有系统特征或噪声污染,而使得信息难以分辨。有些信号是不规则的,很难提取常用的频谱或能量等特征。Tony Boutros^[1]将隐马尔科夫模型引入到轴承和切割工具的故障检测与诊断中。Bubathi Muruganatham^[2]提出了利用振动信号奇

异谱分析进行轴承故障特征提取。崔逊波^[3]基于区分性权重概率神经网络对齿轮箱进行故障诊断。陆森林、张玲玲等^[4,5]通过小波包来获得变速器轴承故障特征参数。

无量纲诊断是一种将“无量纲参数”用于设备故障诊断的技术方法,无量纲指标对外部干扰不敏感,性能较为稳定,即使会存在波动,但波动范围小,而对信号的幅值和频率的变化不敏感。岑健^[6]构建了敏感的无量纲指标免疫检测器,通过免疫编程优化策略获得最佳识别能力的新特征指标。本研究中采用多个无量纲参数相融合的办法获得故障独有特征。

人工免疫系统具备自适应、自学习、记忆、噪声忍耐等优秀特性,具有强大的信息处理能力,能与常规的分类器融合进行故障诊断,解决了故障诊断中缺少故障样本的难题。Fafa Chen、姜万录等^[7-9]融合了免疫算法、小波分析、支持向量机等进行故障诊断。

本研究基于免疫识别机理,设计一种自适应免疫检测器,应用于对变速器轴承故障诊断中。

1 故障特征无量纲处理

故障特征处理是把采集到的故障数据进行无量纲化计算。所谓无量纲指标是由两个具有相同量纲的量的比值组成。现有的无量纲指标有:波形参数、峰值参数、裕度参数、脉冲参数、峭度参数。

(1) 波形参数(shape factor):

$$S_f = \frac{[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^2 p(x) dx]^{\frac{1}{2}}}{[\int_{-\infty}^{+\infty} |x| p(x) dx]} = \frac{X_{rms}}{|\bar{X}|} \quad (1)$$

(2) 脉冲参数(impulse factor):

$$I_f = \frac{\lim_{l \rightarrow \infty} [\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^l p(x) dx]^{\frac{1}{l}}}{[\int_{-\infty}^{+\infty} |x| p(x) dx]} = \frac{X_{max}}{|\bar{X}|} \quad (2)$$

(3) 裕度参数(clearance factor):

$$CL_f = \frac{\lim_{l \rightarrow \infty} [\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^l p(x) dx]^{\frac{1}{l}}}{[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^{\frac{1}{2}} p(x) dx]^2} = \frac{X_{max}}{X_r} \quad (3)$$

(4) 峰值参数:

$$C_f = \frac{\lim_{l \rightarrow \infty} [\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^l p(x) dx]^{\frac{1}{l}}}{[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^{\frac{1}{2}} p(x) dx]^{\frac{1}{2}}} = \frac{X_{max}}{X_{rms}} \quad (4)$$

(5) 峭度参数:

$$K_v = \frac{\beta}{X_{rms}^4} \quad (5)$$

式中: β —峭度。

2 自适应免疫检测器生成

2.1 免疫疫苗

免疫疫苗的生成可看作是抗体初始化的过程。在现有的模式识别方法中初始群体通常是随机生成的。为了使抗体的多样性达到较高水平,并且避免某种抗体局部相似的情况大量存在,本研究引入了抗体初始抑制环节^[10]。

为了充分利用已知故障状态模式,本研究将采集的特征参数分为两类:自我模式和非我模式,将其统一作抗原,自我模式看作 I 型抗原;非我模式看作 II 型抗原。按照阴性选择算法来产生初始抗体集合。

2.2 免疫学习

定义 1:亲和度。

设: D 为抗原与抗体之间的欧式距离, f 为 II 型抗原与初始抗体之间的亲和度。两者之间的距离越小,则匹配程度越高,亲和力越大。

即:

$$D_i = \sqrt{\sum_{k=1}^n (Ag_k - Ab_{ik})^2} \quad (6)$$

$$f_i = 1/\sqrt{D_i} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

定义 2:自适应变异。

自适应变异是为了使抗体集合拥有丰富的个体。方法是尽可能地与抗原相匹配。变异的原则是:变异的速率与抗原的激励水平有关,激励水平越强,变异越慢;反之亦然。

即:

$$C' = C_k + \beta_k (Ag_i - C_k)$$

$$\beta_k \sim N(0, \sigma^2) \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{1/f_i} (k = 1, 2, \dots, N_c)$$

式中: C' —变异后的抗体集; β_k —一个体自适应变异率,均值为 0,标准差为 σ 的正态分布随机变量。

式(7)说明抗体的变异程度和亲合度成反比,亲合度越低,个体的变异率越高。

定义 3:抑制阈。

即:

$$\theta = a \cdot NAT, a \in (0, 1);$$

$$NAT = \frac{2}{m(m-1)} \sum_i^{m-1} \sum_{k=i+1}^m f_{ab_i, ab_k} \quad (8)$$

式中: θ —抗体抑制阈, NAT —抗体集 Ab 中所有个体两两之间距离的平均值, m —当代抗体总数。

2.3 免疫应答

生成成熟检测器,用无量纲化的加速度特征参数训练检测器,计算成熟检测器与待测抗原的欧式距离。根据欧式距离公式计算检测器中抗体志待测抗原之间的欧式距离。欧式距离最小的抗体的类型即为该待测抗原的类型。

2.4 自适应免疫检测器生成流程图

自适应免疫检测器生成流程图如图 1 所示。

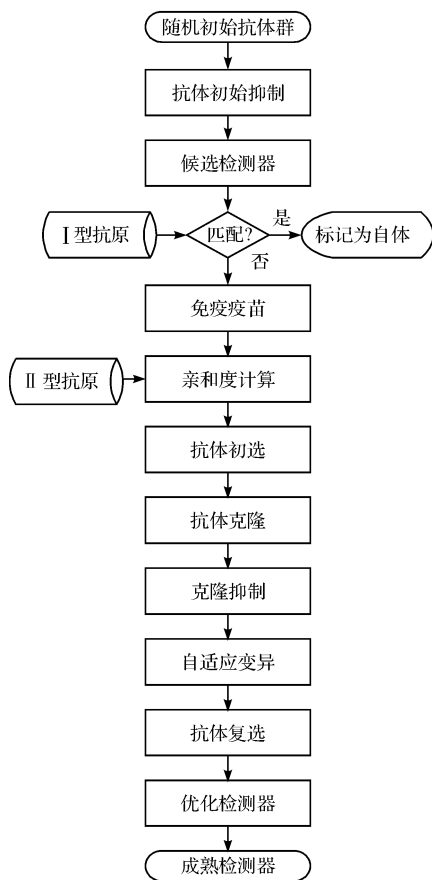


图 1 自适应免疫检测器流程图

3 变速器轴承故障诊断试验

3.1 试验设备及参数

该试验采用功率为 1.5 kW 的森力玛 YP 变频三相异步电动机为试验提供动力输入,用 EMT390 测振系统测得振动信号的时域波形。

变速器轴承实验台构成:电动机、齿轮箱、轴承座、负载、底座。

3.2 信息采集及特征处理

对旋转机械振动信息进行测量时,可获得的幅值参数有位移、速度、加速度 3 种。选择合适的振动测量

参数时应该考虑频率的成份和振动后果两方面的因素。位移参数对低频振动敏感,加速度参数对高频振动敏感,速度参量居中。本研究综合考虑后,采用加速度参数。信号的采样频率按 1 024 点为一组进行采样,每个指标各取 50 个组,按各指标 50 个组中的最小值与最大值作为该指标的取值范围。将采集到的数据进行无量纲化处理,处理过的特征数据分为两组:训练样本集和检测样本集,训练集中样本数 480 个,检测集中样本数为 320 个。其中,正常模式数据有 40 个。

本研究采用波形参数、峰值参数、裕度参数、脉冲参数、峭度参数 5 种无量纲指标相融合的方法。各种状态下无量纲参数如表 1 所示。试验时采用加速度参数下的 5 种指标生成的检测器进行检测。

表 1 轴承 6 种状态下的 5 种无量纲参数值

	波形	峰值	脉冲	裕度	峭度
正常	1.355 3	1.474 7	2.582 9	1.998 6	3.753 3
	1.372 7	1.424 6	2.568 4	1.955 5	4.087 1
少滚珠轴承	1.246 9	0.946 8	1.411 5	1.180 5	2.744 2
	1.289 0	0.940 3	1.462 3	1.212 0	3.612 0
滚珠磨损轴承	1.250 5	0.935 1	1.380 9	1.169 3	3.332 2
	1.298 8	0.963 1	1.520 3	1.250 8	3.384 6
外圈磨损轴承	1.274 6	1.025 3	1.565 6	1.306 9	3.322 2
	1.231 4	1.046 1	1.515 4	1.288 2	2.725 6
滚珠裂纹轴承	1.355 3	0.989 3	1.659 2	0.881 5	4.884 9
	1.484 0	0.995 6	1.939 0	1.096 3	7.631 1
内圈刮痕轴承	1.285 6	1.020 3	1.587 1	1.311 7	3.384 7
	1.253 0	1.040 8	1.555 6	1.304 1	3.185 6

3.3 训练、检测诊断、数据分析

Step1: 试验时,首先安装正常轴承,并测量此时的振动参数;然后依次安装少滚珠轴承、滚珠磨损轴承、内外圈磨损轴承、滚珠裂纹轴承、内圈刮痕轴承并分别测量不同故障下的振动参数。

Step2: 对采集到的信息进行处理,主要方法是通过无量纲化特征参数来获得有效特征信息。

Step3: 把无量纲化处理后的特征数据分为两组,一组作为训练抗原集,一组作为待测抗原集。

Step4: 用生成的成熟检测器来诊断待测抗原,由成熟检测器中记忆抗体的类型来确定待测抗原的类型。

试验结果如表 2 所示。从表 2 中可以得知,本研究设计的检测器对故障诊断有很好的效果。

表 2 试验结果

项目	少滚珠	滚珠磨损	外圈磨损	滚珠裂纹	内圈刮痕
训练样本个数	120	120	200	180	180
成熟检测器个数	25	24	40	45	50
压缩比	24:5	5:1	5:1	4:1	18:5
测试样本个数	80	80	120	100	100
诊断正确率/(%)	96.8	92.6	91.4	93.5	94.3

4 结束语

(1) 本研究的意义与价值: 笔者针对实际测量的变速器轴承振动信号特征提取困难的问题, 对实测的加速度振动信息进行了无量纲运算, 得到了 5 种无量纲指标作为特征参数。本研究按照免疫疫苗、免疫学习、免疫应答的顺序设计了一种自适应免疫检测器, 用 5 种无量纲特征参数训练该检测器并进行了故障模式识别。研究表明, 自适应免疫检测器具有较强的故障识别能力, 说明了利用自适应免疫检测器进行变速器轴承故障诊断是可行而且有效的。

(2) 本研究中的不足:

① 不同故障的无量纲指标之间存在一些交叉现象, 寻找更加合理的约简和聚类方法显然很迫切;

② 笔者设计的自适应免疫检测器虽然对变速器故障诊断有一定效果, 但还未从理论上进行性能分析, 后续还需要进行更深入的研究。

参考文献 (References):

- [1] BOUTROS T, LIANG M. Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2011, 25(6): 2102-2124.
- [2] MURUGANATHAM B, SANJITH M A, KRISHNAKUMAR

B. Roller element bearing fault Diagnosis using singular spectrum analysis [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2013, 35(1-2): 150-166.

- [3] 崔逊波, 邹俊, 阮晓东, 等. 基于加权概率神经网络的齿轮箱抗噪故障诊断[J]. 机电工程, 2010, 27(2): 54-56.
- [4] 陆森林, 张军, 和卫星, 等. 小波包能量特征法在汽车变速器轴承故障诊断中的应用[J]. 汽车工程, 2007, 29(6): 537-539.
- [5] 张玲玲, 赵懿冠, 肖去魁, 等. 基于小波包-AR 谱的变速器轴承故障特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 492-495.
- [6] 岑健, 胥布工, 张清华. 免疫检测器证据理论集成的机组复合故障诊断[J]. 控制与决策, 2011, 26(8): 1248-1252.
- [7] CHENG Fa-fa, TANG Bao-ping, CHEN Ren-xiang. A novel fault diagnosis model for gearbox based on wavelet support vector machine with immune genetic algorithm[J]. **Measurement**, 2013, 46(1): 220-232.
- [8] 姜万录, 牛慧峰, 刘思远. 免疫支持向量机复合故障诊断方法及试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 177-180.
- [9] 张清华, 钱宇, 胥布工. 基于人工免疫系统的复合故障诊断技术研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3): 56-59.
- [10] 李红芳, 张清华, 谢克明. 一种新型免疫网络学习算法在故障诊断中的应用[J]. 智能系统学报, 2008, 3(5): 447-454.

[编辑: 张翔]

本文引用格式:

李红芳, 张清华. 基于自适应免疫检测器的变速器轴承故障诊断研究[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1350-1353.

LI Hong-fang, ZHANG Qing-hua. Transmission bearing fault diagnosis based on adaptive immune detector[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(11): 1350-1353.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>