

文章编号:1001-8360(2013)02-0032-05

# 基于定子电流小波包分析的牵引电机 轴承故障诊断

杨江天<sup>1</sup>, 赵明元<sup>2</sup>, 张志强<sup>3</sup>, 李平康<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044; 2. 中国北车集团大同电力机车有限责任公司, 山西 大同 037038;  
3. 中国南车集团青岛四方机车车辆股份有限公司 国家工程实验室, 山东 青岛 266111)

**摘 要:**滚动轴承失效是机车牵引传动系统的主要故障源之一。轴承失效引起电机振动增加,导致定子电流发生调制。本文根据轴承失效对电机运行参数(振动、电流)的影响,将牵引电机轴承故障分为单点局部损伤和整体磨损。分析两种滚动轴承故障对振动和电机定子电流频谱的影响。定子电流分析可在不影响电机运行的情况下,检测电机的工作状况。小波包变换适应于处理瞬变、非平稳信号,用于电机定子分析能获得较高的频率分辨率,有效提取故障征兆。本文提出一种基于定子电流小波包分析的机车牵引电机轴承在线故障检测方法。HXD2型机车线路运行试验证明,该方法能有效诊断电机轴承早期故障。

**关键词:**牵引电机; 轴承; 故障诊断; 定子电流分析; 小波包变换

**中图分类号:**U264.1;TM343 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2013.02.006

## Traction Motor Bearing Fault Detection Via Wavelet Packet Analysis of Stator Currents

YANG Jiang-tian<sup>1</sup>, ZHAO Ming-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>3</sup>, LI Ping-kang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. CNR Datong Electric Locomotive Co., Ltd., Datong 037038, China;

3. National Engineering Laboratory, CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

**Abstract:** Rolling element bearing failures account for a large majority of mechanical faults in a locomotive traction system. Bearing failures induce motor vibration, resulting in modulation of stator currents. In this paper, according to the effect of bearing failures on operating parameters of motor (e. g., vibration and current), bearing failures of traction motor were classified into single-point defects and generalized roughness. The influence of both types of rolling element bearing faults on the vibration and induction motor stator current spectrum was analyzed. Motor current signature analysis was introduced to provide a nonintrusive way to assess the health of a motor, being integrated with wavelet packet transform which offered an efficient decomposition of signals containing both transient and non-stationary components. Thus, fine frequency resolution was achieved and fault features were extracted via wavelet packet analysis of motor currents. The online locomotive traction motor diagnostic method using motor current signature analysis was presented. The proposed method was effectively applied to the operation tests of Locomotive Type HXD2, and the incipient bearing faults of traction motor were diagnosed successfully.

**Key words:** traction motor; bearing; fault diagnosis; motor current signature analysis; wavelet packet transform

收稿日期:2011-12-06;修回日期:2012-06-04

基金项目:国家自然科学基金(61074104)

作者简介:杨江天(1971—),男,河南焦作人,副教授,博士。

E-mail:jtyang@bjtu.edu.cn

牵引电机是铁道机车车辆驱动装置的关键部件之一,其运行状况直接关系到行车安全和运输效率。牵

引电机工作条件十分恶劣:经受灰尘、雨雪的侵袭,环境温度变化剧烈;负载变化频繁;动力作用大,承受来自轮轨的冲击和振动。这使得牵引电机易发生损坏,是铁道车辆故障诊断的重点<sup>[1]</sup>。

有关研究表明,滚动轴承是电机最易发生故障的零件,轴承损坏约占电机故障总数的 44%<sup>[2]</sup>。当前,牵引电机轴承故障诊断普遍采用振动信号分析方法<sup>[3-4]</sup>。随着电力电子技术的发展,我国新型铁道机车车辆已全部采用交流牵引电机,使得电机轴承故障诊断可以采用更为简便易行的定子电流分析法<sup>[5-6]</sup>。

异步电机定子电流中蕴藏着电机运行状况丰富的信息,定子电流分析法已经广泛运用于电机定子绕组、转子断条、气隙不匀等电气类故障的检测和故障交互影响研究<sup>[5]</sup>。滚动轴承发生局部损伤或磨损会使轴承出现异常振动,因而测试分析轴承振动信号无疑是故障诊断最有效的方法。电机轴承异常振动会引起定子和转子间的相对运动,改变定子与转子间的气隙。由于异步电机的气隙原本就很小,气隙的微小变化也会使定子电流特征发生变化。基于定子电流分析的电机轴承故障诊断方法已成为当前研究的热点<sup>[7-8]</sup>。与振动信号分析法相比,定子电流分析法的优点体现在以下几个方面<sup>[8]</sup>:①真正的非接触测量,不影响电机运行;②由于控制和电机保护的需要,机车行驶时要对牵引电机三相供电中的两相电流进行监测。因此,定子电流分析法相当于无传感器故障诊断;③电机整体振动不影响定子电流,只有定子与转子间的相对振动才对电流有影响,因此定子电流分析法诊断几乎不受铁路轨道、转向架与车体状况等因素的干扰;④定子电流对电机故障很敏感,几乎所有的电机故障都会引起定子电流特征发生变化,因此定子电流分析能有效监测电机的工作状况;⑤电流传感器(互感器)价格低廉,易于实现对电机的连续监测。

电机轴承故障引发定子电流变化一般比较微弱,故障诊断需要采用先进信号分析方法提取故障特征。小波包变换是一种多分辨率的时频分析方法,具有较好的局部特性,适用于电机电流信号的特征提取<sup>[6-7]</sup>。本文以定子电流分析和小波包变换为工具,开发了机车牵引电机轴承工况监测与故障诊断系统,成功用于HXD2型电力机车牵引电机轴承故障检测,指导机车维修。

1 定子电流分析

电机定子电流分析目前已经成为电机轴承工况监测与故障诊断的重要方法之一。轴承故障引起转轴振动,转轴振动又引起电机腔内气隙变化,使气隙磁通受

到调制,调制的磁通又在定子绕组中感生出响应的谐波电流。因此,通过分析定子电流,提取与故障相对应的谐波分量,就能实现轴承故障的检测。为了说明滚动轴承故障对电机振动和定子电流的影响,本文将轴承故障分为局部损伤与整体磨损两种类型。

1.1 局部损伤轴承

滚动轴承局部损伤是指轴承外圈、内圈、滚动体或保持架表面某一点发生点蚀或剥落。发生局部损伤的轴承在受载运转过程中,损伤点撞击与之相接触的其他元件表面而产生低频振动,称为轴承的“通过振动”。通过振动发生的频率称为故障特征频率,由轴的转速、轴承几何尺寸及损伤发生的位置确定。Schoen<sup>[9]</sup>研究转子中心的径向运动对气隙偏心的影响,得出电机定子电流谐波频率与滚动轴承故障特征频率间的映射关系为

$$f_{bf} = |f_s \pm k f_c| \tag{1}$$

式中: $f_{bf}$ 为定子电流谐波频率; $f_s$ 为电机供电频率; $f_c$ 为轴承故障特征频率; $k=1,2,3,\cdots$ 。式(1)被广泛引用并成功用于轴承诊断。式(1)没有考虑轴承故障也会引起扭转振动,而某些情况下,如机车运行时牵引电机的扭振,不能忽略<sup>[1]</sup>。Blodt<sup>[10]</sup>总结 Schoen 等的研究成果,同时考虑转子径向偏心和扭转运动,提出了更为精细的电机轴承故障-定子电流谐波映射模型。表1为轴承故障引起的电机定子电流谐波频率(两种模型对比)。

表 1 轴承故障引起的电机定子电流谐波频率

损伤点位置	Schoen 模型	Blodt 模型	
		径向偏心	扭转运动
外圈	$f_s \pm k f_o$	$f_s \pm k f_o$	$f_s \pm k f_o$
内圈	$f_s \pm k f_i$	$f_s \pm f_r \pm k f_i$	$f_s \pm k f_i$
滚动体	$f_s \pm k f_b$	$f_s \pm f_{cg} \pm k f_b$	$f_s \pm k f_b$

表中, $f_s$ 为电机供电频率; $f_r$ 为电机轴转动频率; $f_{cg}$ 为轴承保持架旋转频率; $f_o$ 、 $f_i$ 和 $f_b$ 分别为轴承外圈、内圈和滚动体故障特征频率; $k=1,2,3,\cdots$ 。

从表1可以看出,两种模型的共同点是:当电机轴承出现局部损伤后,都会定子电流中感生出根据式(1)计算的谐波分量;而不同点是:根据 Blodt 模型,轴承故障还会感生出更多的频率分量。

1.2 磨损轴承

机器设备实际运转时,滚动轴承磨损失效是一种常见的故障。由于磨损是一个相对缓慢的发展过程,其危害程度不如轴承局部损伤大,相关诊断方法的研究也比较少。一般而言,当轴承磨损到接近失效时,可以用多种方法检测出来。工业用工况监测系统能够在故障初期就有效检测出各种轴承故障。

电机轴承磨损直接改变轴承振动并使定子电流发生变化,但作用方式与局部损伤故障不同。局部损伤轴承振动故障特征频率可以根据轴承几何尺寸和转速准确计算出来,进而通过表 1 推算出故障引起的电机定子电流谐波频率。而到目前为止,还没有找到从轴承磨损到定子电流谐波频率映射的数学表达式。

Stack<sup>[11]</sup>等研究表明,轴承磨损所引起的电机振动和定子电流频谱的变化通常是宽带的,具体频率难以确定。轴承磨损使电机全频带振动增大,进而引起定子电流频谱低频段某些频带能量增加。因此,电机轴承磨损故障监测可采用定子电流分频带分析的方法,即将定子电流频谱分为多个频带,逐个频带分析电流信号能量,如某几个频带能量比正常状况明显增大,则可判定轴承出现磨损。

从上述分析中可以看出,用定子电流法诊断电机轴承故障需要高精度的频谱分析方法,能从整体到局部逐步观察信号。小波包变换由于在时域和频域内同时具有良好的局部化特性,符合上述要求。

## 2 小波包变换

### 2.1 连续小波变换

给定连续时间信号  $x(t)$ , 如果其满足平方可积条件, 即  $x(t) \in L^2(R)$ , 则  $x(t)$  的连续小波变换为

$$\text{CWT}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中:  $\psi(t)$  为小波基函数;  $a$  为尺度因子;  $b$  为时移因子;  $\frac{1}{\sqrt{a}}$  为归一化因子。根据式 (2) 可以判定, 小波变换是时间-频率分析, 或者说是时间-尺度分析。

### 2.2 离散小波变换

为了在计算机上实现小波变换, 将式 (2) 中的  $t$ 、 $a$ 、 $b$  取离散值,  $a = a_0^m$ ,  $b = na_0^m b_0$ ,  $t = kT$ 。  $k$ 、 $m$ 、 $n$  取整数,  $T$  为采样间隔, 归一化处理,  $T=1$ 。连续小波变换成为离散小波变换, 有

$$\text{DWT}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} \sum_k x(k) \psi^* \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3)$$

式中:  $n$  为时移步长;  $m$  为尺度步长。通常情况下, 取  $a_0=2$ ,  $b_0=1$ , 成为二进正交小波变换。

### 2.3 多分辨率分析与小波包变换

根据多分辨率分析, 可用式 (4) 重构信号  $x(t)$

$$x(t) = \sum_k c_{J_0}(k) \Phi_{J_0, k}(t) + \sum_{j=1}^{J_0} \sum_k d(j, k) \Psi_{j, k}(t) \quad (4)$$

式中:  $\Phi(t)$  为尺度函数;  $c(k)$  为概貌系数;  $d(k)$  为细节

系数;  $k$  为小波变换节点号。式 (4) 表明小波变换与反变换可以通过由一个低通滤波器  $h$  和一个高通滤波器  $g$  组成的滤波器组滤波实现。

尺度函数表达式为

$$\Phi_{j-1, k}(t) = \sum_{l \in Z} h_{l-2k} \Phi_{j, k}(t) \quad (5)$$

小波基函数为

$$\Psi_{j-1, k}(t) = \sum_{l \in Z} g_{l-2k} \Phi_{j, k}(t) \quad (6)$$

小波变换可以看作是使用低通滤波器和高通滤波器将信号分解成概貌系数(低频分量)和细节系数(高频分量), 然后对概貌系数进行再分解, 而细节系数保持不变。由于其尺度是按二进制变化的, 每次分解得到的概貌系数和细节系数平分被分解信号的频带, 二者等宽。小波变换的这种分解方式, 高频信号频率分辨率低, 低频信号频率分辨率高。小波包变换提供了一种更精细的信号分析方法, 它在全频带对信号进行多层次的频带划分, 对小波变换没有再分解细节系数也做二分分解, 从而提高了频率分辨率。由于正交分解, 每一个频带分解后的两个频带不交叠, 输出的两个频带的带宽减半, 因此每次分解信号频率分辨率提高一倍。小波包变换提供了一种很好的频谱细化分析方法, 成为故障监测诊断的有效手段。

研究电机定子电流信号的频率特性, 需要用高分辨率的小波基函数。研究表明, dmey 小波滤波器截止性能最好<sup>[12]</sup>, 因而被用来分析电机定子电流。

## 3 牵引电机轴承诊断实例

HXD2 型电力机车是中国北车集团大同电力机车有限责任公司生产的 8 轴 10 000 kW 交流传动货运机车, 最高时速 120 km/h, 用于大秦铁路运煤专线。

HXD2 型机车采用 YJ90A 型三相 6 极鼠笼式异步牵引电机, 由 VVVF 逆变器系统驱动。电机功率 1 275 kW, 额定电压 1391V, 额定电流 620A, 以鼻式悬挂方式安装在机车转向架上。电机传动端轴承型号为 NU2322 单列圆柱滚子轴承, 非传动端为 NJ2218 + HJ2218 单列圆柱滚子轴承(含斜挡圈)。

为了检测机车装配质量, 在工厂试验线进行双机运行试验。一台机车牵引, 另一台机车制动模拟负荷。机车运行速度 35 km/h。图 1 与图 2 分别为采集到的 4 轴牵引电机定子 a 相电流信号及其功率谱。

从图中可以看出, 由于电机结构、电网谐波以及噪声的作用, 机车牵引电机定子电流中存在诸多谐波分量。功率谱图上电机供电频率 25 Hz 两侧有边频带, 是定子电流频谱最基本的特征。

用 dmey 小波对定子电流信号做 3 层小波包分

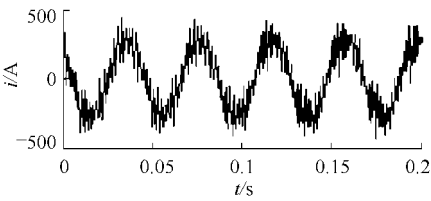


图 1 牵引电机定子电流波形

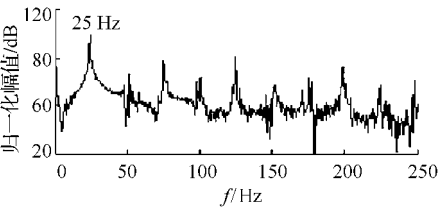


图 2 牵引电机定子电流功率谱

解,结果如图 3 所示。左侧为各结点小波包系数,右侧对应功率谱。各结点对应频带见表 2。小波包变换是二进正交分解,因此各结点对应频带确定且无重叠。

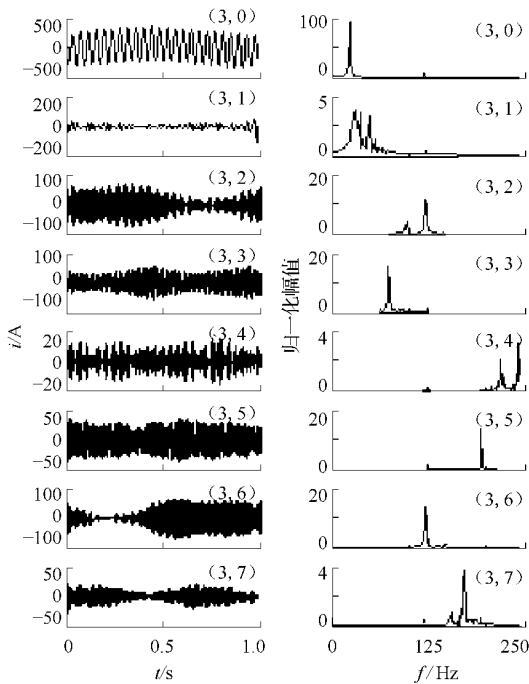


图 3 定子电流信号小波包分解

表 2 小波包分解各结点对应频带

结点	频带/Hz	结点	频带/Hz
3,0	0~31.25	3,4	218.75~250.00
3,1	31.25~62.50	3,5	187.50~218.75
3,2	93.75~125.0	3,6	125.00~156.25
3,3	62.50~93.75	3,7	156.25~187.50

为了监测各子频带电流的变化,计算小波分解各结点系数的均方根值和峭度两个指标。均方根值是平均能量的度量,如果有几个子频带均方根值增大,则可判断电机轴承发生磨损。峭度对脉冲很敏感,如果某频带峭度增大,则提示该频带可能出现新的频率分量。

HXD2 型机车运行速度 35 km/h,转速148 5 r/min,传动比 120:23,牵引电机转速775 r/min。在此转速下,电机轴承故障特征频率见表 3。

表 3 牵引电机轴承故障特征频率 Hz

频率	传动端轴承	非传动端轴承
电机轴旋转频率	12.9	12.9
外圈故障特征频率	73	93.2
内圈故障特征频率	108	126
滚子故障特征频率	64.8	83.7
保持架公转频率	5.22	5.48

试验时发现结点(3,2)小波包系数峭度比正常值增大 20%,提示该结点对应频带 93.75~125.0 Hz 有可能出现新的频率分量。将图 3 中结点(3,2)小波系数功率谱放大,如图 4 所示。图中找到 98 Hz 频率分量。该频率是电机传动端轴承外圈故障特征频率在定子电流频谱中的映射(参见表 1,取  $k=1$ )。

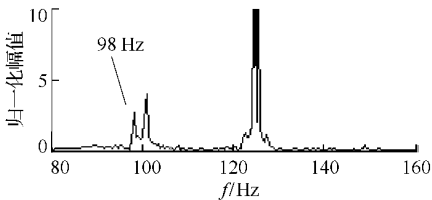


图 4 结点(3,2)小波包系数功率谱

图 5 为结点(3,7)小波包系数的功率谱图,从中可找到轴承外圈故障特征频率的又一个映射值 171 Hz (取  $k=2$ )。由此,初步判断此牵引电机传动端轴承外圈存在局部损伤。

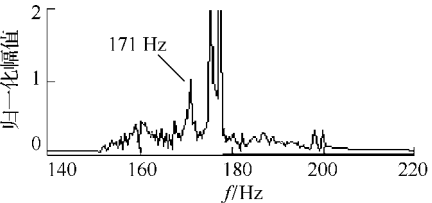


图 5 结点(3,7)小波包系数功率谱

将机车运行速度提高到 46 km/h,图 6 为采集到的电机 a 相定子电流功率谱,电机供电频率 31.7 Hz,转速 1 019 r/min。在此转速下传动端轴承外圈故障特征频率为 96 Hz。根据表 1,定子电流中感生出频率为 128 Hz,224 Hz,... 的谐波分量。

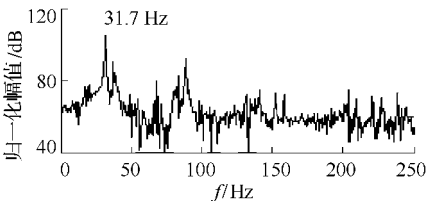


图 6 牵引电机定子电流功率谱

对定子电流信号进行小波包 3 层分解。图 7 为结点(3,6)小波包系数功率谱,从图中可以找到 128 Hz 频率分量。图 8 为结点(3,4)小波包系数功率谱,谱图上存在 224 Hz 频率分量。定子电流出现这两个频率成分表明轴承外圈出现损伤。同时基于振动信号的轴承故障诊断系统<sup>[3]</sup>也提示该轴承外圈存在故障。经拆解电机轴承,发现外圈有划伤,证实了诊断结论。

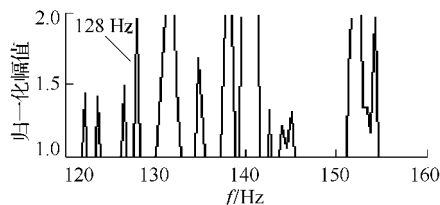


图 7 结点(3,6)小波包系数功率谱

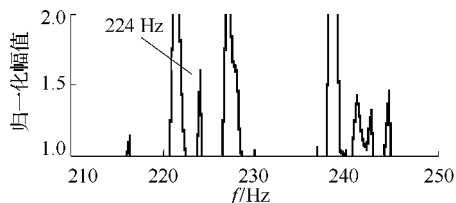


图 8 结点(3,4)小波包系数功率谱

#### 4 结论

电机轴承故障会引起定子电流频谱发生变化,轴承局部损伤导致电流频谱出现某些频率的谐波分量,而磨损使定子电流频谱几个频带的能量显著增加。小波包变换有很强的频谱细化分析能力,是处理电机定子电流信号、提取故障征兆的有力工具。

基于定子电流小波包分析开发机车牵引电机轴承故障诊断系统,具有非接触测量、易实现连续监测、受轨道和机车其他零部件状况影响小、对早期故障敏感等优点。用于机车运行时牵引电机工况监测,能有效排除电机轴承故障,保障行车安全。

#### 参考文献:

- [1] HENAO H, HEDAYATI KIA S, CAPOLINO G A. Torsional Vibration Assessment and Gear Fault Diagnosis in Railway Traction System[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1707-1717.
- [2] NANDI S, TOLİYAT H A, LI Xiao-dong, et al. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors-a Review [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(4): 719-729.
- [3] 杨江天, 赵明元. 基于车辆总线和 Laplace 小波的机车轴承诊断系统[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 23-27.
- [4] 黄采伦, 樊晓平, 陈春阳, 等. 基于小波系数提取及离散余弦包络分析的机车牵引齿轮故障诊断方法[J]. 铁道学报, 2008, 30(2): 98-102.
- [5] HUANG Cai-lun, FAN Xiao-ping, CHEN Chun-yang, et al. Fault Diagnosis Method of Locomotive Driven Gear Based on Envelopment Analysis of Wavelet Coefficients Extraction and DCT[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(2): 98-102.
- [6] JUNG J H, LEE J J, KWON B H. Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(6): 1842-1852.
- [7] LAUENZO C C, NGAN H W. Detection of Motor Bearing Outer Raceway Defect by Wavelet Packet Transformed Motor Current Signature Analysis[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(10): 2683-2690.
- [8] Teotrakool Kaptan, Devaney M J, Eren Levent. Adjustable-speed Drive Bearing-fault Detection via Wavelet Packet Decomposition[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 2747-2754.
- [9] Immovilli Fabio, Bellini Alberto, Rubini Riccardo, et al. Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2010, 46(4): 1350-1359.
- [10] SCHOEN R R, HABETLER T G, KAMRAN F, et al. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring [J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1995, 31(6): 1274-1279.
- [11] Blodt Martin, Granjon Pierre, Raison Bertrand, et al. Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 45(4): 1813-1822.
- [12] STACK J R, HABETLER T G, HARLEY R G. Fault Classification and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 2004, 40(3): 735-739.
- [13] 赵林海, 王永和. 一种基于正交小波包技术的机车信号记录器数据快速压缩方法[J]. 铁道学报, 2009, 31(6): 102-106.
- [14] ZHAO Lin-hai, WANG Yong-he. A Fast Compression Method Applicable to Cab Signaling Recorder Data Based on Orthogonal Wavelet Package Technique[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(6): 102-106.

(责任编辑 聂清立)