

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.02.007

## 基于定子电流的无刷直流电机轴承故障诊断

卞 皓, 王晓琳, 邓智泉

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 211106)

**摘要:** 为了在无刷直流电机发生轴承故障早期检测出轴承故障特征, 本文就无刷直流电机轴承故障信息的提取提出了一种新的方法。该方法选择电机的母线电流和三相电流最大值作为轴承故障信息的提取对象, 避免了相电流由于谐波含量过大及不连续带来的诊断效果不佳的后果。同时, 本文选择小波包算法作为轴承故障信号提取的方法, 能够更好地对轴承故障信息进行辨识。实验结果证明, 通过对母线电流和三相电流最大值进行小波包分解能够很好地进行无刷直流电机轴承故障信息的提取。

**关键词:** 无刷直流电机; 轴承故障; 特征频率; 母线电流

**中图分类号:** TM351; TH133.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2020)02-0224-08

## Bearing Fault Detection for Brushless DC Motors Based on Stator Current

BIAN Hao, WANG Xiaolin, DENG Zhiquan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

**Abstract:** For detecting the bearing fault of the brushless DC motor at the early state, this paper proposes a new method to abstract the bearing fault information. The proposed method chooses the bus current and the forward envelope of three phase current as the signal extraction object, avoiding the disadvantages of the phase current for its rich harmonic and discontinuous. Meanwhile, current signal is decomposed by wavelet package transformation. In this way, the bearing fault information can be abstracted clearly. The experiment result shows that the bearing fault information can be abstracted from the bus current and the forward envelope of three phase current by wavelet package transformation.

**Key words:** brushless DC motor; bearing fault; characteristic frequency; bus current

随着工业的发展推进, 无刷直流电机的应用范围越来越广泛, 其安全工作状态也越来越受到重视。在所有电机故障类型中, 轴承故障所占比重约为 40%<sup>[1]</sup>, 是电机的主要故障形式之一。轴承故障会引起电机转子堵转、扫膛等毁灭性问题, 所以, 在轴承发生故障初期检测到相关故障信息, 对电机的工作安全、及时维护等都有着重大意义。

电机轴承故障有很多种, 总体来说可分为两类: 磨损故障和点蚀故障。这两类故障形式的区别在于, 磨损故障下电机转轴会发生不规律振动, 点蚀故障下电机转轴会发生与轴承参数及电机转速

相关的规律性振动。

影响故障检测的因素很多, 如故障程度、故障部位、检测信号类型以及检测方法等。当发生点蚀故障时, 电机转轴会发生规律性的径向振动, 故而可以通过振动信号检测轴承工作情况。文献[2-6]中提出了以振动信号作为轴承故障检测对象, 通过在振动信号中提取出故障信息进行诊断。文章中采用了多种信号提取方法, 如小波分析<sup>[2-3]</sup>、Hilbert-Huang 变换<sup>[4]</sup>和参数估计模型<sup>[5]</sup>等, 并获得了较好的诊断结果。然而这种方法需要在转轴上安装额外的加速度传感器, 增加了额外的成本以及装配

**基金项目:** 国家自然科学基金(51677087)资助项目。

**收稿日期:** 2018-03-22; **修订日期:** 2018-08-08

**通信作者:** 王晓琳, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wangxl@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 卞皓, 王晓琳, 邓智泉. 基于定子电流的无刷直流电机轴承故障诊断[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 224-231. BIAN Hao, WANG Xiaolin, DENG Zhiquan. Bearing fault detection for brushless DC motors based on stator current[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 224-231.

难度。

电机轴承发生故障后,电机的径向振动会带动电机气隙发生变化,且负载转矩也同时发生波动,从而使得电流发生变化。故很多学者以电流为对象,进行电机轴承故障诊断的研究。在文献[7-8]中,作者提出建立了轴承故障的数学模型,并进行了理论分析及实验验证;而在早期的研究中,频谱分析是一种较为普遍的诊断方法,文献[9-11]中利用频谱分析法对异步电机的轴承故障进行了诊断。然而在故障早期时,故障信号十分微弱,直接进行频谱分析可能会使得故障信号被湮没,故更多的人将目光放在小波分析、形态滤波器等更为先进的信号提取算法上。文献[1,12-14]中使用小波、小波包分析来对电机相电流进行分解,从而获得特征频率处的谐波能量来进行轴承故障诊断,同时结合了线性回归算法、峭度分析等方法来提高分析的准确性,降低小波包分析算法的复杂程度。

无刷直流电机由于其控制简单、功率密度高等优点,已经广泛应用于工业领域<sup>[15]</sup>。然而在现有的研究中,针对无刷直流电机轴承故障的研究却不多。上述文献中的通过电流提取故障信息研究方法基本都是针对正弦波电流电机,而无刷直流电机由于其相电流纹波很大,上述方法在应用中不能达到很好的效果。文献[16-17]中利用振动信号对无刷直流电机进行了轴承故障分析,文献[18-19]中应用人工智能算法对无刷直流电机的轴承故障进行了仿真分析和实验验证。这几种方法在无刷直流电机的轴承故障诊断中取得了很好的效果,但都不能脱离机械上的振动信号,这意味着检测成本会大大增加。本文的研究重点在于探索一种通过电机电流特征来获取轴承故障信息的诊断方案。一旦这种方案在某种故障形式下有效(本文以点蚀为例),无论是磨损故障还是点蚀故障,对于该类型电机的轴承故障信号均可以通过本文所提方案判别轴承故障状态,而算法改进和轴承故障模型建立等研究,非本文的研究重点,因此就不再赘述。

传统的电流诊断方法均使用相电流进行故障诊断,而无刷直流电机的相电流为方波,且仅导通2/3个电周期,这导致相电流自身包含大量谐波,使得轴承故障谐波提取时易被相电流自身谐波湮没。这决定了无刷直流电机的相电流并不适合作为分析对象。

针对该问题,本文提出了利用母线电流和三相电流正向包络线作为信号提取对象的诊断方法,并将该方法与传统的相电流分析法用相同的信号提取算法进行了实验对比。第2部分分析了无刷直

流电机的电磁数学模型,并研究了轴承故障在电流中的表现形式,第3部分对小波包分析的原理进行了简单的介绍,第4部分介绍了实验平台,对相电流、三相电流包络线和母线电流利用小波包算法进行了信号提取,验证了包络线分析和母线电流分析的有效性。

## 1 故障电流信号分析

### 1.1 轴承故障特征频率

如图1所示,为轴承示意图。当轴承内圈、外圈发生点蚀故障时,电机转子的振动频率可由式(1)和式(2)计算得到<sup>[20]</sup>,即

$$f_{\text{IRF}} = \frac{N}{2} \left( 1 + \frac{d_b}{d_c} \cos \alpha \right) \cdot f_r \quad (1)$$

$$f_{\text{ORF}} = \frac{N}{2} \left( 1 - \frac{d_b}{d_c} \cos \alpha \right) \cdot f_r \quad (2)$$

式中: $N$ 表示滚珠数目; $d_b$ 表示滚珠直径; $d_c$ 表示保持架直径; $\alpha$ 表示滚珠与轴承外圈的接触角; $f_r$ 表示电机转子的转动频率。

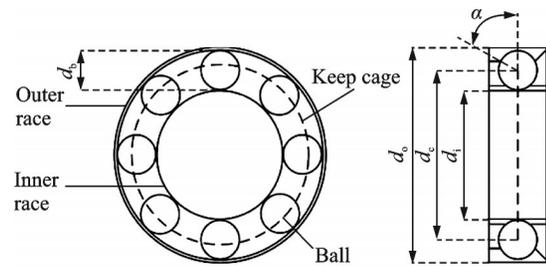


图1 轴承示意图

Fig.1 Diagram of the bearing

### 1.2 电流中故障信号特征分析

从1.1节可知,当电机轴承发生单点故障时,电机的负载转矩会发生变化,故而电机负载转矩可以用脉冲函数 $\delta(t)$ 表达为<sup>[21]</sup>

$$T_L = T_{L0} + \Delta T \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_c} \right) \quad (3)$$

式中: $T_{L0}$ 表示负载转矩的恒定部分;冲击函数部分表示由轴承故障产生的转矩波动; $f_c$ 表示轴承故障特征频率。

根据运动方程可以得到

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_c} \right) \quad (4)$$

式中: $\omega_0$ 表示电机转速的恒定部分,冲激函数部分表示转速的波动。

由转速可得,电机的反电势为

$$e = e_0 \sin(P \cdot 2\pi f_r t) + \Delta e \sin(P \cdot 2\pi f_r t) \cdot \sum_{k=0}^{+\infty} \delta \left( t - \frac{k}{f_c} \right) \quad (5)$$

对单位脉冲函数进行傅里叶分解,由电路原理可知

$$I = \frac{U - e}{R + j \cdot P \omega_r L} = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(2\pi P k \cdot f_r t + \varphi_0) + \Delta I_k \sin(2\pi(P \cdot f_r \pm k f_c)t + \varphi_k) \quad (6)$$

从式(7)中可以看出,电机发生轴承故障时,定子电流中某几次与振动频率相关的谐波的能量会发生改变,定子电流中的轴承故障特征频率为: $P \cdot f_r \pm k f_c$ ,其中 $k$ 为正整数。根据傅里叶分析特性可知, $\Delta I_k$ 随着 $k$ 的增大而减小。

## 2 定子电流选取

相比于易受自身谐波影响的相电流,本文选择三相电流包络线和母线电流作为轴承故障分析对象,并对相电流、包络线和母线电流进行谱分析。

图2,3分别为相电流波形和相电流频谱分析图,可以看出,无刷直流电机相电流是一种带有畸变的方波,在低频段含有大量的谐波。由于轴承故障引起的故障信息也是处于低频段,故而相电流自身包含的谐波含量对故障分析会造成很大的干扰。这表明相电流并不适合作为分析轴承故障的对象。

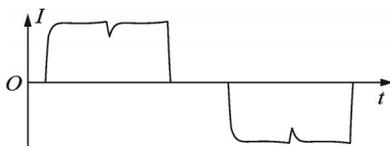


图2 相电流波形

Fig.2 Diagram of the phase current

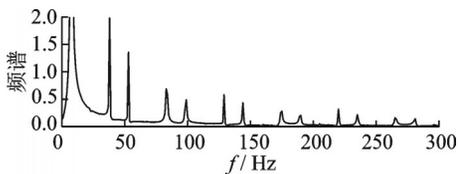


图3 相电流频谱图

Fig.3 Spectrum of the phase current

为了解决相电流由于谐波含量过大引起的信号干扰问题,对三相电流进行整合,取三相电流包络线为分析对象。由于三相电流包络线是对相电流的整合,所以包络线中包含的故障信息与相电流中包含的故障信息相同。三相电流包络线如图4所示,并对包络线进行傅里叶分析,可得频谱图如图5所示。可以看出,三相电流包络线低频段的谐波含量较相电流要少很多,且谐波幅值很小,其造成的干扰也相应的会小很多。从而可知,三相电流包络线比相电流更适合作为故障分析

对象。



图4 三相电流正向包络线

Fig.4 Envelope of the three phase current

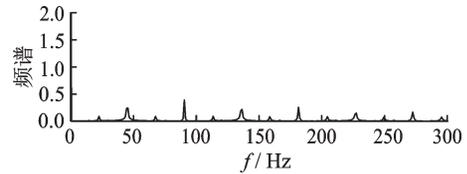


图5 三相电流包络线频谱图

Fig.5 Spectrum of the envelope of the three phase current

在最大限度利用母线电流下,无刷直流电机一般采用自然换相算法,这时母线电流波形及其频谱分析图如图6,7所示。可以看出,母线电流包含的谐波含量少,且谐波幅值小,对故障信号提取产生的干扰也较小。

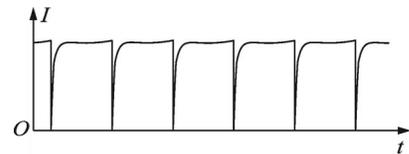


图6 母线电流波形

Fig.6 Diagram of the bus current

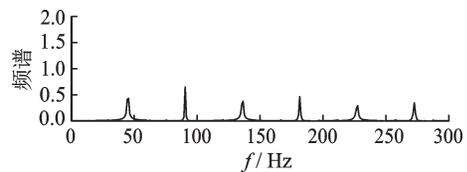


图7 母线电流频谱图

Fig.7 Spectrum of the bus current

从上述分析可知,三相电流包络线和母线电流更适合于无刷直流电机轴承故障信号的提取。

## 3 小波包算法

小波包是一种基于小波分析而来的具有良好时频特性的信号提取算法。下面对小波包算法在故障信号提取中的原理进行简单介绍。

### 3.1 连续小波分析

电流信号是一个在时域上连续的信号,当电流信号 $i(t)$ 在一段时间内平方可积,即 $i(t) \in L^2(R)$ 时,其连续小波变换为

$$\text{CWT}_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R i(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (7)$$

式中: $a$ 表示小波变换尺度因子, $b$ 表示小波变换的

平移因子,  $1/\sqrt{a}$  为归一化因子,  $\psi(t)$  表示小波基函数。从连续小波分析函数中可以看出,小波分析是一种时频分析。

### 3.2 离散小波分析

为了便于计算处理,通常需要对小波基函数进行离散化。令尺度因子  $a=a_0^m$ , 平移因子  $b=na_0^m$ ,  $t=nT$ ; 为了方便计算,通常取  $a_0=2, T=1$ , 这种小波变换称为二进小波变换

$$DWT_x(a,b) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum i(n) \psi^* \left( \frac{n - n \cdot 2^m}{2} \right) \quad (8)$$

二进小波可以视为一个高通滤波器 H 和低频滤波器 G 的组合。当电流信号  $i(t)$  经过小波分析后,被分解为低频概貌部分和低频细节部分。

### 3.3 小波包分析

将二进小波分析视为一个模块,将多个模块进行级联,对低频概貌和高频细节都进行分解,则得到小波包分析。设电流采样频率为  $f_s$ , 其示意图如图 8 所示。

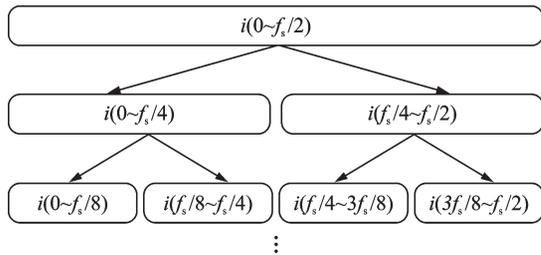


图 8 小波包分析原理框图

Fig.8 Diagram of wavelet package transform

可以看出,对电流信号进行  $n$  层小波包分析后,可以得到  $2^n$  个小波包节点,每个节点有相同的频率范围。

### 3.4 小波包检测轴承故障信号

由第 2 节的分析可以得知,当轴承发生故障时在电流上会反应出故障信息。从式(7)中可以看出,轴承故障在电流中表现出的谐波频率为  $Pf_r \pm kf_c$ 。由于谐波能量随着  $k$  的增加而减小,根据 1.2 节中的分析可知,  $k$  值相同时对应的两个节点的均方根接近,且均方根的值随着  $k$  的增大而减小。

将电流信号通过小波包算法进行  $n$  层分解,每个小波包节点对应的频率范围为  $f_s/2^n$ 。此时轴承故障节点处的小波包重构信号便可用来表征轴承故障信号。对重构信号求取均方根,则可得到故障信号能量。算法流程图如图 9 所示。

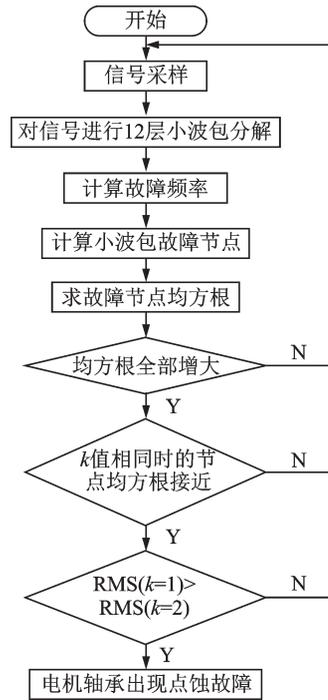


图 9 算法流程图

Fig.9 Diagram of algorithm

## 4 实验分析

本文用永磁同步电机、故障轴承及磁粉制动器搭建了实验平台,实现了轴承故障检测的验证。由于电机轴承故障时故障情况会通过转矩(电流)波动表征出来,无论是故障轴承外置还是内置,两者在特征频率上的表现是一致的。而且故障轴承外置时在电流脉动信息中隐含的故障信号要弱于电机内部轴承发生故障时的信号,检查更为困难,故而可以通过外置的故障轴承模拟电机轴承故障来验证本文所提检测方案的正确性和有效性。同时,关于轴承故障检测的论文在实验方案中也采取了类似方案,如文献[8, 22]等,因此这种也是大家较为认可的一种切实可行的方案。实验平台和故障轴承分别如图 10, 11 所示。

本次实验以轴承外圈故障为例,进行轴承故障分析,分析方法见本文 3.4 节。实验故障轴承参数、电机参数及故障特征频率如表 1 所示。

电流信号的采样频率为 25 kHz,为了提高信号提取的精度,设定小波包分解层数为 12 层,每个

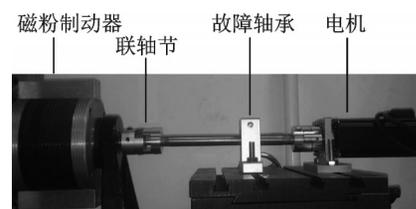


图 10 实验平台

Fig.10 Experimental stage



图11 故障轴承

Fig.11 Fault bearing

表1 轴承参数及故障频率

Table 1 Parameters of bearing and the fault characteristic

参数	值
滚动体直径 $d_b$ /mm	27
保持架直径 $d_c$ /mm	4.32
接触角 $\alpha$ /rad	$\pi/6$
滚动体数目 $N$	13
电机额定	
转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	480
电机极对数 $P$	4
外圈故障频率 $f_{\text{ORF}}$ /Hz	44.79
$Pf_r - f_{\text{ORF}}$	12.79
$Pf_r + f_{\text{ORF}}$	76.79
$Pf_r - 2f_{\text{ORF}}$	57.58
$Pf_r + 2f_{\text{ORF}}$	121.58

小波包节点对应的频率范围为 3.05 Hz。可以计算出  $Pf_r - f_{\text{ORF}}$  对应的小波包节点为 12.6,  $Pf_r + f_{\text{ORF}}$  对应的小波包节点为 12.23,  $Pf_r - 2f_{\text{ORF}}$  对应的小波包节点为 12.26,  $Pf_r + 2f_{\text{ORF}}$  对应的小波包节点为 12.61。

下面对相电流、母线电流和母线电流包络线分别进行故障信号提取。

#### 4.1 相电流分析

相电流实验波形如图 12 所示。

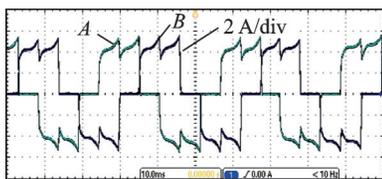


图12 A, B相电流波形

Fig.12 Current waveforms of phases A and B

对健康状态和故障状态下的相电流进行小波包分析,并对相应的小波包节点进行信号重构。小波包分析下相电流故障节点处重构信号如图 13—16 所示,故障节点处的能量如图 17 所示。从图中可以看出,相电流分析下的故障节点处的波形能量很杂乱,并不能作为轴承故障的判断依据。这是由

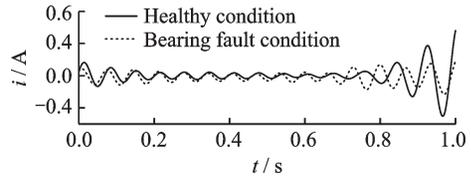


图13 相电流小波包节点12.6处波形

Fig.13 Diagram of the wavelet package node 12.6 analyzed with phase current

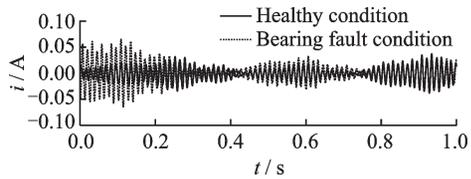


图14 相电流小波包节点12.23处波形

Fig.14 Diagram of the wavelet package node 12.23 analyzed with phase current

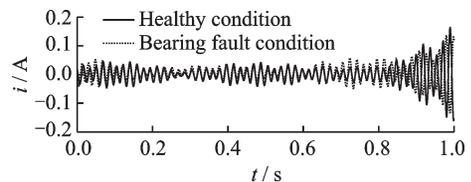


图15 相电流小波包节点12.26处波形

Fig.15 Diagram of the wavelet package node 12.26 analyzed with phase current

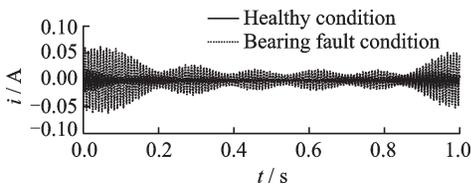


图16 相电流小波包节点12.61处波形

Fig.16 Diagram of the wavelet package node 12.61 analyzed with phase current

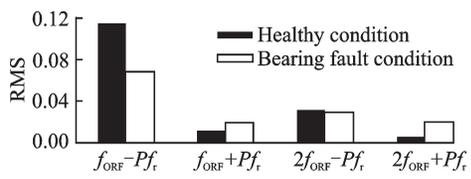


图17 相电流分析下点蚀故障节点均方根图

Fig.17 Histogram of RMS of the bearing fault node analyzed with phase current

于在 1 个电周期内,相电流仅导通 2/3 个周期,且相电流波形为略带畸变的方波,谐波含量过大,对故障信号提取造成很大干扰。

#### 4.2 三相电流包络线分析

从实验中可知,对相电流直接进行小波包分析很难得到理想的效果。若仅取三相电流取导通区间,能很大程度上降低电流的谐波含量,从而能降低相电流谐波很大带来的困难。三相电流正向包

络线波形如图 18 所示,其小波包分析结果如图 19—22 所示。

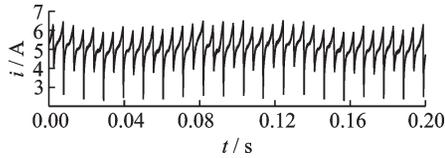


图 18 正向相电流包络线波形

Fig.18 Diagram of the envelope waveforms of the forward three-phase current

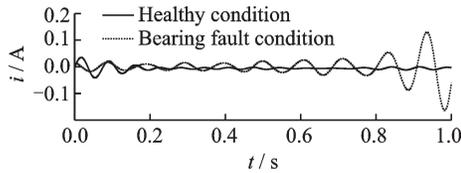


图 19 三相电流正向包络线小波包分析节点 12.6 处波形  
Fig.19 Diagram of the wavelet package node 12.6 analyzed with the envelope of three-phase current

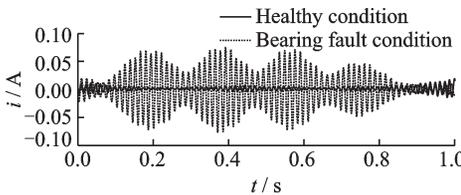


图 20 三相电流正向包络线小波包分析节点 12.23 处波形  
Fig.20 Diagram of the wavelet package node 12.23 analyzed with the envelope of three-phase current

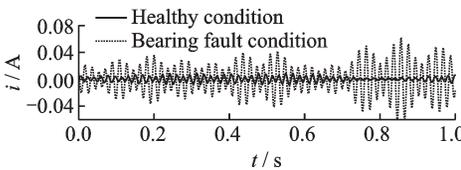


图 21 三相电流正向包络线小波包分析节点 12.26 处波形  
Fig.21 Diagram of the wavelet package node 12.26 analyzed with the envelope of three-phase current

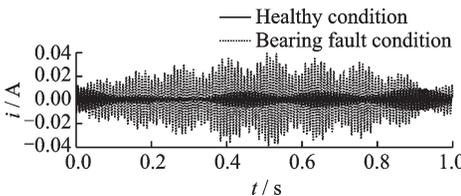


图 22 三相电流正向包络线小波包分析节点 12.61 处波形  
Fig.22 Diagram of the wavelet package node 12.61 analyzed with the envelope of three-phase current

图 23 为三相电流包络线分析下的故障节点均方根柱状图,从图中可以看出,在相同的故障节点处,故障状态下的节点能量明显高于健康状态下的节点能量,同时,故障状态下,前两个节点能量接近,后两个节点能量接近,且  $k=1$  处的能量大于  $k=2$  处的能量,与理论分析相符。

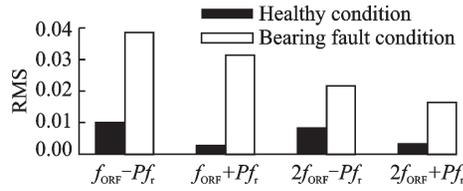


图 23 三相电流包络线分析下点蚀故障节点均方根图  
Fig.23 Histogram of RMS of the bearing fault node analyzed with the envelope of three-phase current

### 4.3 母线电流分析

为了最大限度地利用母线电压,无刷直流电机一般会选择工作在自然换相状态。在这种状态下,母线电流保持连续,且母线电流的幅值与正向导通的相电流幅值相等。从而可知,母线电流中包含的故障信息与相电流保持一致。同时,母线电流可直接由一个传感器测得,降低了成本。母线电流波形如图 24 所示,小波包分析结果图如图 25—28 所示。

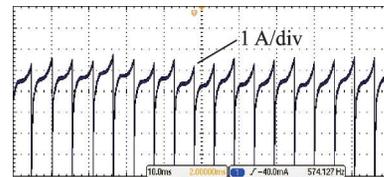


图 24 无刷直流电机母线电流波形

Fig.24 Diagram of the bus current of the brushless DC motor

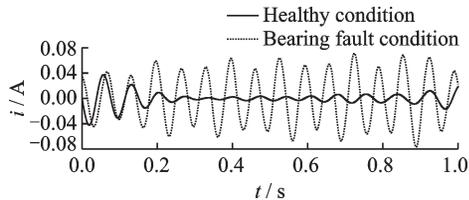


图 25 母线电流小波包分析节点 12.6 处波形  
Fig.25 Diagram of the wavelet package node 12.6 analyzed with bus current

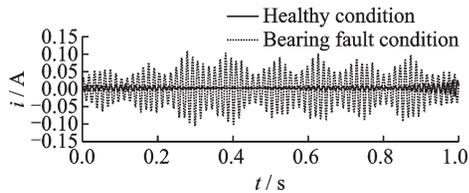


图 26 母线电流小波包分析节点 12.23 处波形  
Fig.26 Diagram of the wavelet package node 12.23 analyzed with bus current

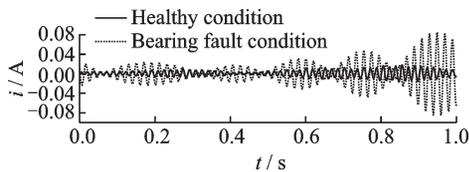


图 27 母线电流小波包分析节点 12.26 处波形  
Fig.27 Diagram of the wavelet package node 12.26 analyzed with bus current

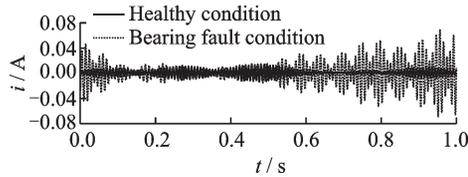


图28 母线电流小波包分析节点12.61处波形  
Fig.28 Diagram of the wavelet package node 12.61 analyzed with bus current

图29为以母线电流作为分析对象的小波包节点能量柱状图。从图29中可以看出,故障时,在相应的特征节点处的能量明显高于健康状态下的节点能量,且当 $k=1$ 时节点能量明显高于 $k=2$ 时的节点能量, $k$ 取相同值时,对应的两个节点的能量很接近,与4.2节中的实验结果一致,与之前的理论分析相符。

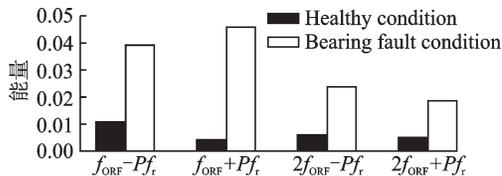


图29 母线电流分析轴承点蚀故障节点能量图  
Fig.29 Histogram of RMS of the bearing fault node analyzed with bus current

## 5 结 论

本文主要针对无刷直流电机轴承点蚀故障检测进行了研究,分析了传统相电流检测方法在无刷直流电机中的局限性,针对相电流谐波含量大,易造成故障信号被湮没等缺点,提出了使用三相电流包络线和母线电流这两种方法进行轴承故障信息提取。三相电流包络线和母线电流由于其波动小,谐波含量少,对故障信号提取影响较小,是良好的轴承故障分析对象。本文对相电流、包络线和母线电流用小波包算法分解12层,对故障节点进行信号重构,通过计算重构信号均方根判断轴承故障情况。实验证明,相比于相电流,三相电流包络线和母线电流更适用于无刷直流电机的轴承故障检测。

### 参考文献:

[1] LAU E C C, NGAN H W. Detection of motor bearing outer raceway defect by wavelet packet transformed motor current signature analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2010, 59(10): 2683-2690.  
[2] 马伦, 康建设, 孟妍, 等. 基于Morlet小波变换的滚动轴承早期故障特征提取研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 920-926.

MA Lun, KANG Jianshe, MENG Yan, et al. Research on feature extraction of rolling bearing incipient fault based on Morlet wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 920-926.  
[3] 李辉, 郑海起, 唐力伟. 基于改进双树复小波变换的轴承多故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 53-59.  
LI Hui, ZHENG Haiqi, TANG Liwei. Bearing multi-faults diagnosis based on improved dual-tree complex wavelet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 53-59.  
[4] OSMAN S, WANG W. A morphological Hilbert-Huang transform technique for bearing fault detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(11): 2646-2656.  
[5] 李宏, 王崇武, 贺昱曜. 基于参数估计模型的对转永磁无刷直流电机实时故障诊断方法[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(5): 732-737.  
LI Hong, WANG Chongwu, HE Yuyao. Real-time fault detection of anti-directional-twin-rotary brushless DC motor (BLDCM) using least squares parameter estimation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(5): 732-737.  
[6] 陈超, 沈飞, 严如强. 改进LSSVM迁移学习方法的轴承故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 33-40.  
CHEN Chao, SHEN Fei, YAN Ruqiang. Enhanced least squares support vector machine-based transfer learning strategy for bearing fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 33-40.  
[7] SIDDIQUI K M, SAHAY K, GIRI V K. Modelling and detection of bearing fault in SPWM inverter fed squirrel cage induction motor drives[C]//Proceedings of International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-9.  
[8] 侯捷. 基于电机电流的转子轴承系统故障诊断方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.  
HOU Jie. Research on diagnosis method of rotor bearing system fault based in stator current[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.  
[9] JUNG J H, LEE J J, KWON B H. Online diagnosis of induction motors using MCSA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(6): 1842-1852.  
[10] OBAID R R, HABETLER T G, STACK J R. Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. [S.l.]: IEEE, 2003:

- 182-187.
- [11] ROSERO J, CUSIDO J, ESPINOSA A G, et al. Broken bearings fault detection for a permanent magnet synchronous motor under non-constant working conditions by means of a joint time frequency analysis[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.]: IEEE, 2007: 3415-3419.
- [12] WANG J, HE Q. Wavelet packet envelope manifold for fault diagnosis of rolling element bearings[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(11): 2515-2526.
- [13] SINGH S, KUMAR N. Detection of bearing faults in mechanical systems using stator current monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016(99): 1341-1349.
- [14] 杨江天, 赵明元, 张志强, 等. 基于定子电流小波包分析的牵引电机轴承故障诊断[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 32-36.  
YANG Jiangtian, ZHAO Mingyuan, ZHANG Zhiqiang, et al. Traction motor bearing fault detection via wavelet packet analysis of stator currents[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 32-36.
- [15] HE Y, ZHENG S, FANG J. Start-up current adaptive control for sensorless high-speed brushless DC motors based on inverse system method and internal mode controller[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(1): 358-367.
- [16] BIANCHINI C, IMMOVILLI F, COCCONCELLI M, et al. Fault diagnosis of linear bearings in brushless AC linear motors[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-6.
- [17] BIANCHINI C, IMMOVILLI F, COCCONCELLI M, et al. Fault detection of linear bearings in brushless AC linear motors by vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1684-1694.
- [18] ABU-RUB H, AHMED S M, IQBAL A, et al. Incipient bearing fault detection for three-phase brushless DC motor drive using ANFIS[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives. [S.l.]: IEEE, 2011: 620-625.
- [19] ABED W, SHARMA S, SUTTON R. Diagnosis of bearing fault of brushless DC motor based on dynamic neural network and orthogonal fuzzy neighborhood discriminant analysis[C]//Proceedings of UKACC International Conference on Control. [S.l.]: IEEE, 2014: 378-383.
- [20] IMMOVILLI F, BELLINI A, RUBINI R, et al. Diagnosis of bearing faults in induction machines by vibration or current signals: A critical comparison[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1350-1359.
- [21] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [22] ZOUBEK H, VILLWOCK S, PACAS M. Frequency response analysis for rolling-bearing damage diagnosis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4270-4276.

(编辑:孙静)