

盲信号处理在感应电动机复合故障诊断中的应用研究

向东阳, 吴正国, 胡文彪, 侯新国

(海军工程大学, 湖北 武汉 430033)

摘要: 感应电动机定子短路和轴承故障一起发生时, 由于故障机理不同, 通常需要同时采集定子电流和振动信号才能进行有效诊断。研究了一种通过振动信号同时诊断两种故障的方法, 以两种故障一起发生时的低频振动信号为研究对象, 采用最小均方盲提取算法对故障信号进行提取, 得到了信噪比提高的故障信号, 做频谱分析后两种故障的特征频谱能够很好地分辨。通过实验平台模拟了定子相间短路和轴承外滚道缺损的复合故障, 诊断结果表明该方法能够提取故障信号, 减少噪声干扰, 实现了利用振动信号对感应电动机复合故障的诊断。

关键词: 盲信号处理; 感应电动机; 复合故障; 定子短路; 轴承故障

A composite fault diagnosis method of induction motor based on blind signal processing

XIANG Dong-yang, WU Zheng-guo, HU Wen-biao, HOU Xin-guo

(Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: When the stator winding fault and the roller bearing fault occur simultaneously, only the simultaneous acquisition of the stator current signal and the vibration signal is effective for the diagnosis of the composite faults because the mechanism of fault is different. A composite fault diagnosis method based on blind Least Mean Square is proposed to extract the fault signal from the low-frequency vibration signal of the induction motor. Utilizing this method the fault signal is denoised and the characteristic components for fault detection can be identified effectively. The stator phase short circuit fault and the outer raceway fault are simulated in experiment platform. Experimental results show that the proposed method is effective to extract the fault signal and improve the signal-to-noise ratio, and the composite fault diagnosis by using the vibration signal is feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677069).

Key words: blind signal processing; induction motor; composite fault; stator winding short circuit; roller bearing fault

中图分类号: TM346; TP277 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0103-07

0 引言

定子绕组短路和轴承部分的故障是感应电动机最常见的早期故障^[1], 通过定子电流或振动信号进行诊断是目前的主要方法。由于故障机理各异, 定子绕组短路故障在振动信号中的特征分量较弱, 而轴承故障时定子电流中能反映振动故障的特征分量的幅值也很小。因此, 定子绕组故障一般通过分析定子电流来诊断^[1-3], 而轴承故障则通过分析振动信号来诊断^[4-5]。上述各种方法都主要集中在电动机发生单个故障时的诊断, 如果出现定子短路和轴承故障同时发生的情况, 定子电流或振动信号中的故障特征可能会交叉、重叠或被噪声淹没, 很难提取,

此时只有同时采集定子电流信号和振动信号才能对两种故障进行有效的诊断, 增加了操作的复杂性。为此, 本文研究了一种通过振动信号同时诊断两种故障的方法。该方法以感应电动机定子相间短路和轴承外滚道故障同时发生时的振动信号为研究对象, 在故障特征集中的低频段采用最小均方盲提取算法对故障信号进行提取, 得到了信噪比较高的故障信号, 频谱图上两种故障的特征频谱能够很好地分辨, 实现了利用振动信号对感应电动机复合故障的诊断。实验结果证明了该方法的有效性。

1 基于最小均方盲提取算法的复合故障检测方法

1.1 定子短路和轴承故障振动特性分析

感应电动机作为一个整体, 其定子线圈故障将

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677069)

会引起气隙磁场的畸变,产生不同于正常运行的气隙电磁力波,从而激发电动机定转子的振动^[6]。文献^[6]指出,当定子出现短路故障时,其电磁力波中应当有如下的频率分量:

$$0, 2\omega, 2\omega_r, \omega_r, 2\omega + \omega_r, 2\omega - \omega_r, 2(\omega + \omega_r), 2(\omega - \omega_r) \quad (1)$$

其中: ω 为三相定子电流的基波角频率; ω_r 为转子旋转角速度 (rad/s)。

电磁力波作用于电动机的定子和转子,使电动机产生振动,但其振动特性与电磁力特性、电动机的转频以及电动机的固有振动频率等因素有关,当定子短路时上面所述的频率分量可能只会出现一部分,不会全部出现。

滚动轴承的故障表现为:外滚道缺损、内滚道缺损及滚珠缺损等。不同故障形式会导致电动机以不同的特征频率振动,其中外滚道故障振动特征频率可由式(2)计算^[6]:

$$f_o = \frac{Z}{2} f_m \left[1 - \frac{d_{BD}}{d_{PD}} \cos \alpha \right] \quad (2)$$

式中: f_o 为轴承外滚道故障特征频率; Z 为轴承滚珠数; f_m 为电机转频; d_{BD} 为轴承滚珠直径; d_{PD} 为轴承节径; α 为接触角。

由上可知,定子短路和轴承故障的振动特征频率较低,由于低频段信号受到的干扰因素较多,因而利用低频段振动信号诊断常得不到满意的结果。常用的高频信号包络检波法只能用来提取轴承故障的特征频率,不能提取定子短路的特征频率,并且解调的有效性取决于分析频段的选择,频段选择不当会影响故障特征的提取^[7]。

1.2 最小均方盲提取算法

最小均方盲提取算法 (Blind Least Mean Square, BLMS)^[8]是由 Lambert 提出的。该方法可以理解为设计一组滤波器,使输出信号的非高斯性极大。信号的非高斯度量采用与其具有相同均值和方差的高斯变量之间的 Kullback-Leibler 距离来表示,其定义为:

$$KLD(p(\hat{s}_i), p(\hat{s}_{i\text{gauss}})) = \int p(\hat{s}_i) \log \frac{p(\hat{s}_i)}{p(\hat{s}_{i\text{gauss}})} d\hat{s}_i \quad (3)$$

然后利用各分离信号的 KLD 之和构建盲反卷积的目标函数,其学习规则为:

$$\Delta w_{ij} = \mu \frac{\partial J}{\partial w_{ij}} = (\hat{s}_i(k) - g(s_i(k))) x_j(k) \quad (4)$$

$$\hat{s}(k+1) = \sum_{j=1}^M w_{ij}(k+1) x_j^T(k+1) \quad (5)$$

式中: w_{ij} 表示长度为 L 的 FIR 滤波器参数; \hat{s} 为分离的信号。由式(4)、(5)可知,该算法一次只能提取出一个信号。由于 KLD 的计算非常复杂,并且估算信号的概率密度也不容易,因此常用 Gray 变量范数对 KLD 进行估计,如式(6)。

$$KLD(p(\hat{s}_i), p(\hat{s}_{i\text{gauss}})) \approx \frac{E|\hat{s}_i|^2}{(E|\hat{s}_i|^\alpha)^{2/\alpha}} \quad (6)$$

并且有:

$$g(\hat{s}_i(n)) = \frac{E|\hat{s}_i|^2}{(E|\hat{s}_i|^\alpha)^\eta} \hat{s}_i(n) |\hat{s}_i(n)|^{\alpha-2} \quad (7)$$

式中: η 的取值取决于信号是亚高斯还是超高斯信号,当要提取超高斯信号时, $\eta = 1$; 而要提取亚高斯信号时, $\eta = 4$ 。

1.3 基于最小均方盲提取算法的复合故障检测方法

经过前面的分析可知,定子短路和轴承故障均会引起电动机的振动,并且有各自的故障特征频率。在对电动机进行振动监测时,测量点与振动源之间不可避免地存在着传输介质,传感器测量到的信号实际上是各个部件振动源信号的混合信号。研究发现,对于机械设备而言,振动源信号与传感器信号之间可用卷积混合的数学模型来描述^[7],但是由于源信号和模型的参数均未知,一般的方法不能对振动源信号进行提取。

本文以定子相间短路和轴承外滚道缺损同时发生时的故障诊断为例进行研究。当两种故障同时发生时,传感器测量到的是故障信号、电机固有振动、噪声等卷积混合后的信号,直接做频谱分析后故障特征频率会和其他噪声干扰频率交叉、重叠甚至被淹没,无法识别。由于盲信号处理技术可以在源信号和传输通道均未知的情况下对源信号进行分离或提取,因而可利用盲分离技术先从传感器测量信号中提取出故障信号,再做频谱分析,这样就可以减少噪声及其他因素的干扰,使两种故障的特征频谱能够很好地分辨。

最小均方盲提取算法可以在源信号数目未知的情况下对信号进行提取;感应电动机振动信号中包含的信号源成分较多而且复杂,因此采用该方法处理比较合适。由于定子相间短路和轴承外滚道故障的特征频率都在低频段,因此先对采集的振动信号进行低通滤波,再采用最小均方盲提取算法对低频段信号中的故障信号进行提取。

具体检测方法如下:

- 1) 采集电动机在故障状态下运行时的三路振动信号;
- 2) 对三路振动信号进行低通滤波;
- 3) 采用最小均方盲提取算法对低通滤波后的信号进行处理, 提取故障信号;
- 4) 对提取的故障信号进行频谱分析, 根据故障特征频率进行诊断。

2 实验结果及分析

2.1 实验系统的建立

实验平台采用如图1所示的变频调速系统。电机选用Y132M-4型感应电动机, 其同步转速为1 500 r/min (25 Hz)。变频器接电动机带动交流发电机及电阻箱负载, 定子绕组线圈之间可接短路电阻 R_x , 模拟线圈绝缘下降造成的非金属性短路, 同时也可限制实验时的短路电流, 以保护电机不至完全破坏(如图2所示); 电机轴承型号为6308-2Rs, 滚珠数目 $Z=8$, 滚珠直径 $d_{BD}=15$ mm, 接触角 $\alpha=0^\circ$, 节径 $d_{PD}=65$ mm。振动加速度传感器采用美国PCB公司生产的M603C01型传感器, 其灵敏度为100 mV/g。三个振动传感器按垂直径向分别安装于电机的两个轴承盖及基座上, 以检测电机的径向振动。

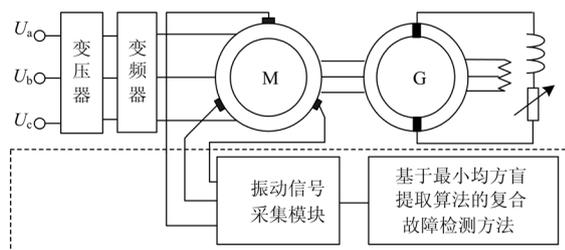


图1 实验测试方案图

Fig.1 The experiment scheme of detecting faults

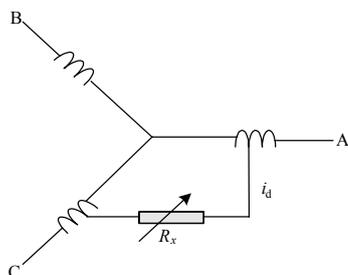


图2 定子线圈短路限流电路

Fig.2 The short-circuit current limiting circuits of the stator windings

2.2 实验结果及分析

根据上述实验方案, 在电机 A、C 两相之间接

入 $R_x=15$ K 的电阻, 模拟定子相间短路故障, 同时在轴承外圈内侧线切割一条深 5 mm, 宽 0.5 mm 的线槽, 模拟外滚道故障。电机在两种故障下运行, 转速为 1 306 r/min (转频 $f_m=21.8$ Hz), 变频器输出频率 45 Hz, 负载电流 8.5 A, 采集运行时的三路振动信号, 为防止频域混迭, 采样频率设为 20 kHz, 采样时间 10 s。根据 1.1 节中的公式计算可得振动信号中外滚道故障特征频率为 $f_0=67.1$ Hz, 而定子短路故障特征频率也可由式(1)计算。对采集的三路振动信号进行低通滤波, 截止频率设为 150 Hz。图 3 为低通滤波后三路振动信号的频谱图, 从图中可以看出, 电机转频 f_m 及其倍频可清晰分辨; 轴承故障的特征频率在第一振动信号中可见其二倍频, 在第二路振动信号只有很微弱的分量, 不容易分辨, 在第三路振动信号中二倍频较明显, 特征频率也不容易分辨; 定子短路故障特征频率由于本身幅值较小, 再加上干扰严重, 几乎不能有效地分辨。总的说来, 三路振动信号滤波后的频谱图上噪声分量较多, 故障特征分量不明显, 不能对定子短路和轴承故障进行有效的诊断。

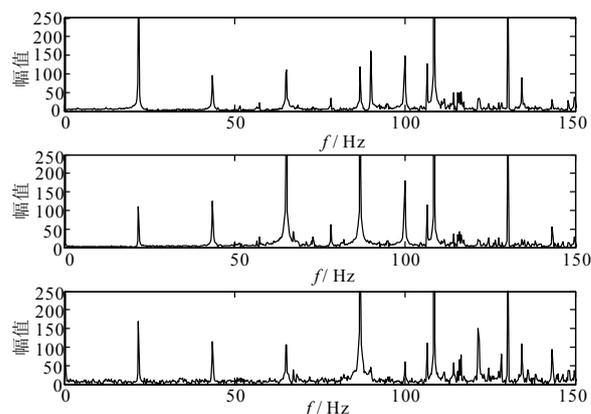


图3 三路振动信号滤波后的频谱图

Fig.3 The frequency spectrum of filtered vibration signal

采用最小均方盲提取算法从三路低通滤波后的振动信号中对故障信号进行提取, 取 $\beta=4$, 对数据进行分段, 每段长 1 024 点, 重叠 512 点, FIR 滤波器阶数为 $L=104$, 学习步长为 $\mu=0.000 1$, 训练步数为 50 步。图 4 为 KLD 的收敛曲线。图 5 为本文方法提取故障信号的频谱图。图上对出现的故障特征频率进行了标注, 主要分量如表 1 所示。由图 5 和表 1 看出, 经过本文的方法对故障信号进行提取后, 减少了噪声和干扰, 频谱图上两种故障的特征频率能够很好地分辨, 可以同时实现定子相间短路和轴承外滚道故障的有效诊断。

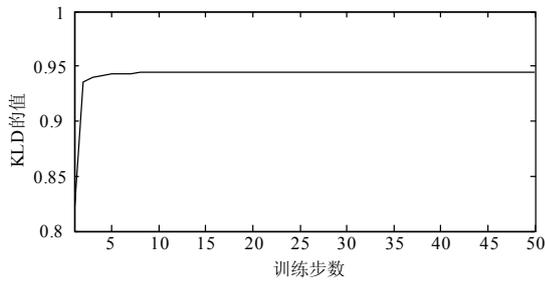


图4 算法收敛曲线

Fig.4 The convergence curve of the method

表1 主要的故障特征频率分量

Tab.1 The main characteristic components

频率分量		频率/Hz
轴承故障特征频率	f_o	67.1
	$2f_o$	134.2
定子短路特征频率	$\omega_r (f_r)$	21.8
	$2\omega_r$	43.6
	$2(\omega - \omega_r)$	46.4
	$2\omega - \omega_r$	68.2
	2ω	90

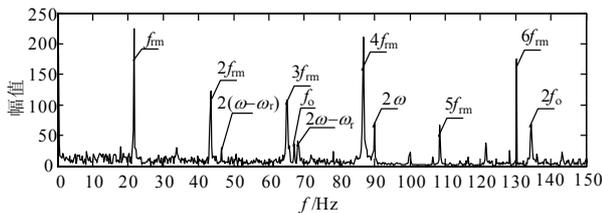


图5 本文方法提取的故障信号频谱图

Fig.5 The frequency components extraction of the faulty motor

为了便于比较, 本文对电动机无故障时相同工况下采集的振动信号也进行了上述同样的处理, 所提取信号成分频谱图如图6所示, 图中主要的频率分量为电动机转频及其倍频, 没有出现可用于故障诊断的故障特征频率。

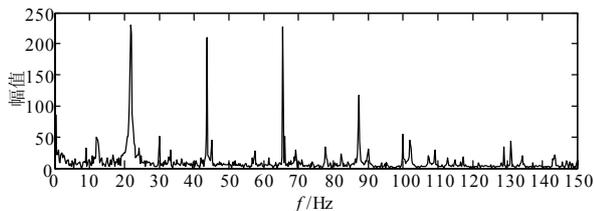


图6 电动机无故障时本文方法提取的信号成分频谱图

Fig. 6 The frequency components extraction of the healthy motor

3 结论

本文采用最小均方盲提取算法对感应电动机定子相间短路和轴承外滚道故障同时发生时的振动信号进行处理, 减少了干扰, 抑制了噪声, 使频谱图上两种故障的特征频谱能够很好地可辨, 实现了利用振动信号对感应电动机复合故障的诊断。实验结果证明了该方法的有效性, 为感应电动机复合故障的诊断提供了一条新的思路。

参考文献

- [1] Toliyat H A. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-a review[C]. //Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting. Phoenix(AZ): 1999 : 197-204.
- [2] Thomson W T. On-line MCSA to diagnose shorted turns in low voltage stator windings of 3-phase induction motors prior to failure[C]. // IEEE IEMDC'01. 2001: 891-898.
- [3] Tallam R M, Habetler T G, Gharly R. Neural network-based on-line stator winding turn fault detection motors[C]. // Conference Records of IEEE-IAS. Annual Meeting. 2000: 375-380.
- [4] Luo Z H, Xue X N, Wang X Z, et al. A new time domain approach to detecting tiny damage of structure based on empirical mode decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (14) : 125.
- [5] Gao Q, Du X S, Fan H, et al. An empirical mode decomposition based method for rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20 (1) : 15.
- [6] 侯新国, 吴正国, 夏立, 等. 基于相关分析的感应电机定子故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4) : 83-86.
HOU Xin-guo, WU Zheng-guo, XIA Li, et al. Stator winding fault diagnosis method of induction motor based on coherence analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4) : 83-86.
- [7] 樊永生. 机械设备诊断的现代信号处理方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
FAN Yong-sheng. Machine fault diagnosis using signal processing methods[M]. Beijing : National Defense Industry Press, 2009.
- [8] Lambert R H. Multichannel blind deconvolution: FIR matrix algebra and separation of multipath mixtures[D]. University of Souther California, 1996.

收稿日期: 2010-03-10; 修回日期: 2010-05-30

作者简介:

向东阳 (1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为现代信号处理算法、电力系统故障诊断; E-mail: xdylyx@sohu.com
吴正国 (1943-), 男, 博导, 教授, 研究方向为信号处理、电力电子技术。