

基于Ansoft的电动机故障特征分析

针对电动机部分故障状态难以通过实验模拟、特征值难以定量获取等问题,利用有限元分析软件Ansoft,建立异步电动机在不同状态下的有限元模型,提取不同位置的电动机导条断裂状态、不同短路匝数的定子匝间短路以及不同偏离程度的气隙偏心等故障状态下的定子电流,分析得到不同程度故障状态下的定子电流故障特征。最后建立异步电动机故障诊断实验台,通过对实验数据与有限元模型得到的故障特征值的比较,验证了利用Ansoft提取故障特征的合理性。

王加军/华电国际电力股份有限公司十里泉发电厂
樊露丹 张晓蕾 马晓伟/中国矿业大学信息与电气工程学院

0 引言

异步电动机结构简单,使用和维护方便,在各类电气传动系统及电网总负载中得到了很好的应用与推广。其一旦发生故障将直接影响生产质量,甚至威胁到工作人员的安全,造成重大损失,因此有效预防与及时发现并排除故障尤为重要。

异步电动机故障主要有:转子断条、定子绕组匝间短路和气隙偏心。当前国内外对电动机各类故障的研究方法分为两种:一种是基于数据分析的;一种是基于数学模型的。基于数据分析的故障诊断方法主要分为图形化方法,例如Park矢量变换^[1]。数据分析法是通过检测物理特征信号,根据特征信息与状态的关系来识别电动机运行状态,从而实现电动机故障的诊断。但是数据分析法对电动机部分故障(气隙偏心故障)状态难以通过实验模拟,特征值无法定量

获取。基于数学模型的方法^[2-4]需要对电动机进行等效电路变换、参数归算后建立数学方程。但是对于故障电动机,电磁关系较正常电动机更加复杂,因此难以建立准确的故障电动机数学模型。基于磁场分析的Ansoft软件采用有限元离散形式计算、建立各种电动机模型,参数调整方便,设计准确可靠,能够准确定性、定量地建立各种状态的电动机模型。

本文应用Ansoft软件建立不同故障类型不同故障程度的异步电动机模型,应用有限元分析法对故障模型进行计算,总结不同故障状态下定子电流中的故障特征量,最后与实验数据进行对比,验证了故障特征分析的正确性。

1 理论分析

根据电动机学原理^[5],异步电动机负载后,为保持气隙内的主磁通基本不变,定子电流中除励磁分量 I_m 外,还将出现一个补偿转子磁动势的“负载分量” I_{l1} 。定子磁动势 F_1 可以分为两部分:一部分是产生主磁通的励磁磁动势 F_m ;另一部分是抵消转子磁动势的负载分量 $-F_2$,即

$$F_m + F_2 = F_1 \quad (1)$$

此式为异步电动机的磁动势方程。图1为负载情况下转子磁动势间关系以及定子电流、励磁电流与转子电流间的关系。负载时转子磁动势的基波对气隙磁场的“转子反应”使气隙磁场的大小和空间相位发生变化,从而引起定子感应电动势 E_1 和定子电流 I_1 发生变化。当转子发生不同类型断条故障时,转子机械



王加军/工程师

关键词/Keywords

电动机·
有限元分析·
Ansoft·
故障诊断·

教育部科学技术研究重大项目(311021)。

结构不再对称。受电磁感应作用,转子磁动势随之发生改变,在“转子反应”的影响下,定子电流也将发生不同程度的改变。当定子发生匝间短路时,电磁场的对称性发生变化,在定子电流中会感生出特定频率的谐波成份。气隙偏心时,主磁通发生改变。定、转子电流相量图和磁动势的空间矢量图原理如图1所示,气隙偏心造成的不对称会在定子电流中感应出不同频率的谐波。

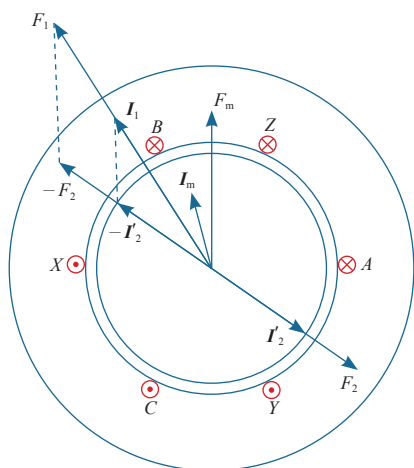


图1 定、转子电流相量图和磁动势的空间矢量图

定子电流中的故障特征量的大小与故障造成电动机不对称程度的大小有关。

2 有限元模型及故障特征量

本文使用Ansoft建立异步电动机的有限元模型,基本参数为:额定功率 $P_N=7.5\text{ kW}$,额定电压 $U_N=380\text{ V}$,极数 $P=4$,定子槽数36,转子槽数26,每槽线圈匝数100,气隙长度0.4 mm。

2.1 转子断条

本文在Ansoft中分别进行了轻载和满载两种情况下断条一根、以及相对位置不同时断条两根和三根的有限元分析,模型如图2所示。图2a为正常电动机,图2b为一根断条模型。建立两根断条模型时,首先固定一根断条位置,然后使另一根断条分别出现在第一根断条的同极、邻极和对极以此模拟故障造成的不同对称性,红色标记为断条位置。同理断条三根时,分别使断条出现在一极、两极和三极,来模拟不同对称程度。图3和图

4分别为轻载和满载情况下不同断条故障电动机模型对应的定子电流频谱图。

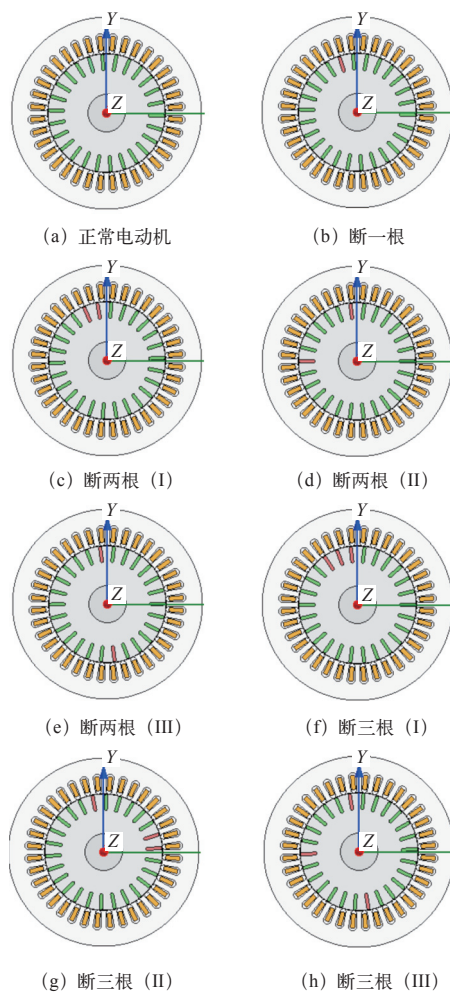


图2 断条故障原理图

由图3和图4可知:

- 1) 同种故障在不同负载情况下定子电流中故障特征量不同,负载越大,故障特征越明显。
- 2) 断条根数相同时,断条位置引起电动机不对称性越大,故障特征越明显。
- 3) 相同故障情况下,断条位置不同,转差率 s 不同,故障特征量在频谱中出现的位置就会不同,其幅值也不同。

2.2 定子匝间短路

有限元模型中完好的电动机每槽的线圈匝数为100,故障电动机中减少每槽线圈匝数分别模拟A相定子绕组15匝、20匝、25匝、30匝、50匝和70匝线圈匝间短路故障。图5为6种短路情况下定子

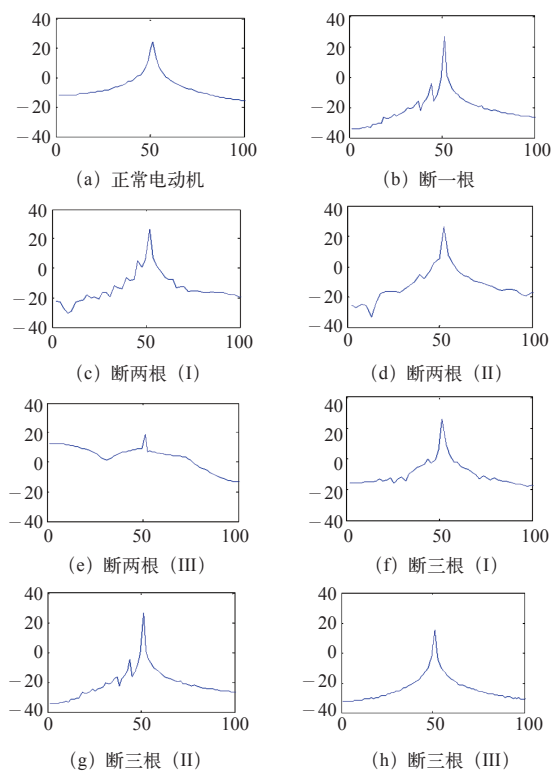


图3 轻载故障模型定子电流频谱图

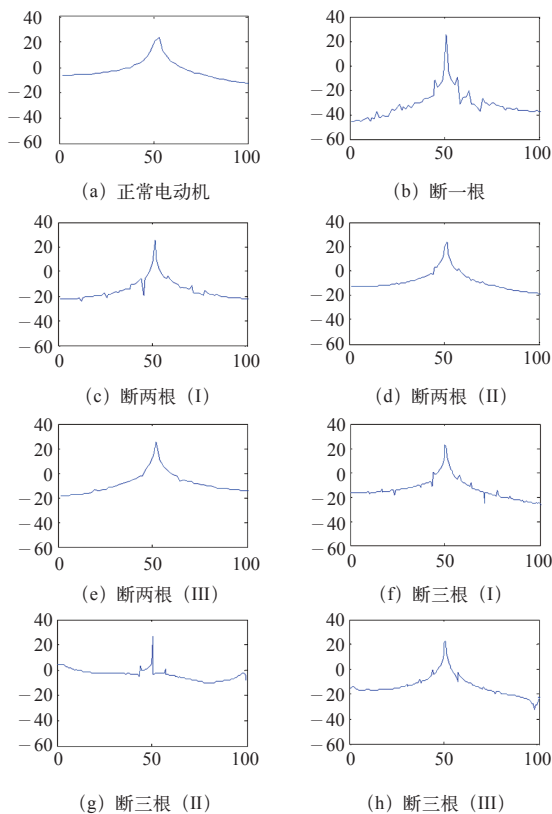


图4 满载故障模型定子电流频谱图

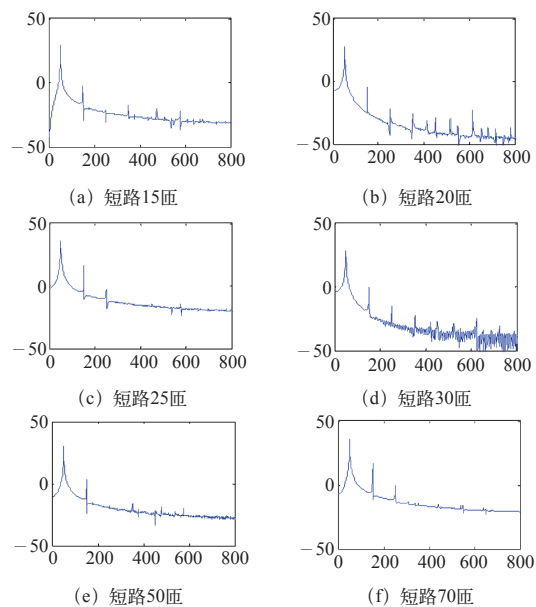


图5 不同短路情况下定子电流频谱图

电流频谱图，表1为满载情况下定子电流中各次谐波含量。

表1 匝间短路模型定子电流各次谐波含量

谐波含量 (%)	短路匝数 /匝						
		15	20	25	30	50	70
谐波次数/次							
3		-5	-4.4	-3	3.5	16.3	16.5
5		-22	-23	-18	-15	-2.6	-0.1
7		-26	-19	-22	16	-14	-14.2
9		-30	-23	-27	-21	-15	-15.1
11		-36	-28	-48	-23	-19	-15.5
13		-48	-35	-55	-27	-23	-23.5

由图5和表1可知：

- 1) 不同故障程度下，定子电流中各次谐波含量发生变化。
- 2) 随短路程度加深，3、5和7次谐波含量明显增加。

2.3 气隙偏心故障

气隙偏心分为静态偏心和动态偏心两种类型。静态偏心时，转子以本身的几何中心为轴进行旋转，偏心位置固定；动态偏心时，转子以定子的几何中心为轴进行旋转，偏心位置随时变化，两种气隙偏心示意图如图6所示。图6中空心圆点为转子几何中心，实心圆点为定子几何中心，箭头方向的圆点为转子旋转中心^[6]。实际电动

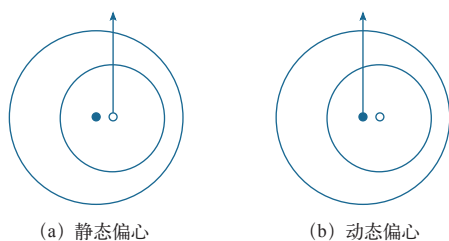


图6 两种气隙偏心示意图

机中多为两种偏心的混合故障。

(1) 静态偏心

有限元模型中气隙长度为0.4 mm, 分别设置气隙静态偏心0.1 mm和0.3 mm, 并在轻载和满载的情况下进行实验。图7为不同情况下静态偏心定子电流频谱图。

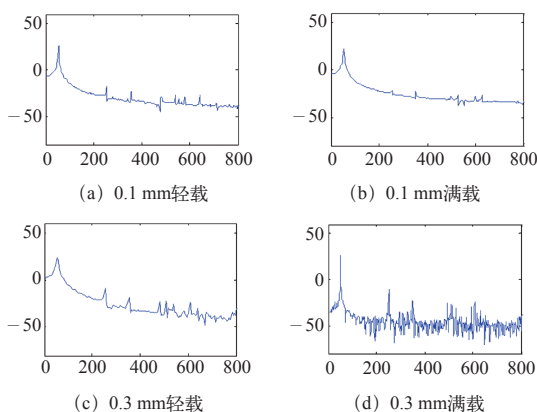


图7 不同负载静态偏心定子电流频谱图

(2) 动态偏心

在有限元模型中分别设置气隙动态偏心0.1 mm和0.3 mm, 并在轻载和满载的情况下进行实验。图8为不同情况下动态偏心定子电流频谱图。

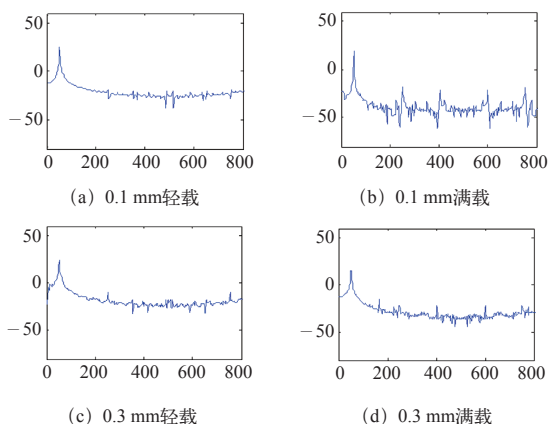


图8 不同负载动态偏心定子电流频谱图

由图7、图8可知:

1) 有限元分析结果表明, 电动机静态偏心时定子电流中会出现25 Hz、75 Hz的边频, 5、7、10和12次谐波增加。偏心越严重, 负载越大, 故障特征越明显。

2) 动态偏心时定子电流中出现25 Hz、75 Hz边频, 2、5、7、8、10、12、13和15次谐波。偏心越严重, 负载越大, 故障特征越明显。

3 实验

为验证通过Ansoft有限元分析得到的电动机故障特征的正确性, 建立异步电动机故障诊断实验台, 如图9所示。实验电动机型号为YM132-4, $P_N = 7.5 \text{ kW}$, $U_N = 380 \text{ V}$, 定子槽数36, 转子槽数26, 气隙长度0.4 mm。分别在不同故障情况的电动机上进行实验, 采集定子电流获得故障特征量, 与有限元分析结果对比。



图9 实验台

3.1 断条实验

在实验台上分别对1、2和3根断条故障电动机在轻载、满载情况下进行实验, 两根断条时取不同的相对位置, 图10、图11为轻载、满载情况下不同断条状态的定子电流频谱图。

图10和图11结果表明, 断条故障特征量 $(1 \pm 2k_s) f$ 的大小与断条数和断条相对位置都有关系。与有限元模型分析结果一致。

3.2 匝间短路实验

在实验电动机上, A相绕组外接一个滑动变阻器作为短路电阻, 通过调整变阻器阻值大小, 来模拟不同程度匝间短路故障^[7]。实验原理图如图12所示。图13为滑动变阻器阻值分别为15 k Ω 、

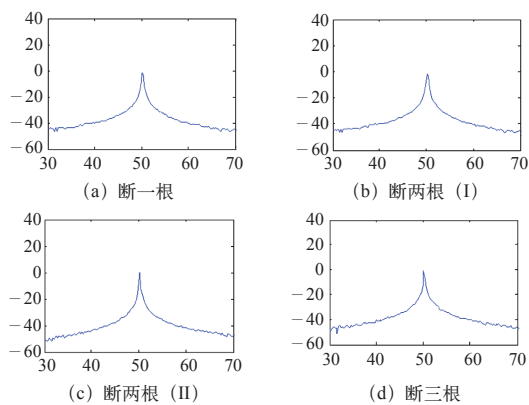


图10 轻载断条故障定子电流频谱图

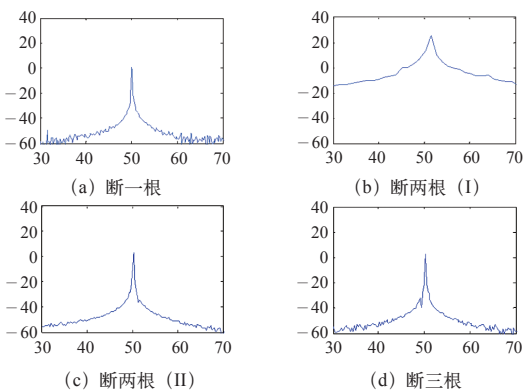


图11 满载断条故障定子电流频

16.7 kΩ、20 kΩ、30 kΩ和100 kΩ时定子电流频谱图，表2为各次谐波含量。

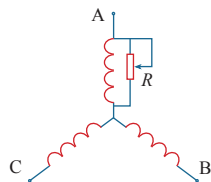


图12 匝间短路实验原理图

图12和表2结果同有限元模型分析结果所示，定子电流中各次谐波含量随匝间短路故障程度变化而变化。

3.3 气隙偏心实验

图14为在不同偏心故障程度电动机上进行实验获得的定子电流频谱图。

由图14故障可知：电动机发生混合型气隙偏心时，定子电流中会出现25 Hz和75 Hz的边频，2、10和12次偶次谐波，3、5、7、13和15次奇次谐波明显增加。谐波含量随故障程度的不同而不同。

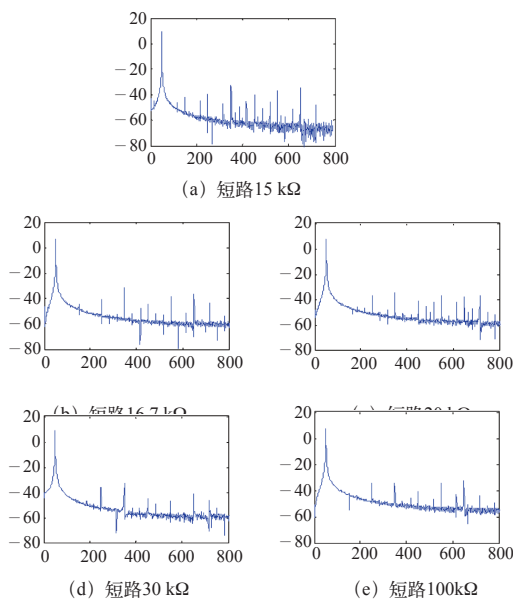


图13 不同短路情况下定子电流频谱图

表2 匝间短路定子电流各次谐波实测含量

谐波含量 (%)	短路阻值 /kΩ					
		15	16.7	20	30	100
谐波次数/次						
3		17.8	20.6	21.9	23	24.5
5		16.7	22.1	22.7	25.1	26.6
7		25.1	27.5	27.4	28.8	29.2
9		18.8	23	14.5	18.9	20.3
11		20.9	22.8	18.6	2.1	23.9
13		28.2	24.4	20.2	21	24.8

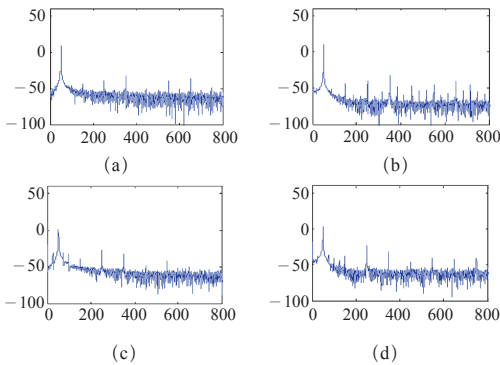


图14 不同偏心程度电动机定子电流频谱图

4 结束语

本文使用有限元分析软件Ansoft建立异步电动机不同程度断条、匝间短路及气隙偏心故障模型，获得定子电流中故障特征量，并通过实验的

(下转第74页)

本文中的诊断软件系统采用面向对象模块化的设计思想，将各种不同功能封装成相互独立的功能模块。该系统根据实际应用需求划分为通信管理模块、实时显示模块、参数设置模块、报警管理模块和数据库管理模块，根据模块内容可完成登录、添加、删除、参数查询及修改等基本功能。该软件系统流程图如图4所示。

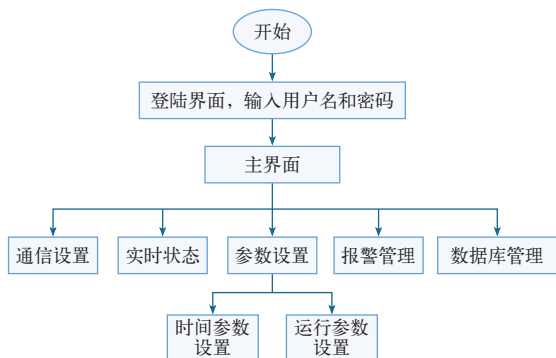


图4 软件系统流程

3 结束语

本文介绍了一种基于GPRS网络的立体车库远程诊断系统，以C/S和B/S结构相结合的方式实现了车库厂家管理人员随时随地对设备现场的远程诊断，能够有效地减少故障排查的时间，同时也可以方便地对多个车库项目进行检测，根据车库使用状况提前给出维保意见，为立体车库的正常运行提供了有力的技术支持。

参考文献

- [1] 黄建伟. 通过GPRS网络进行数据的无线传输 [J]. 发电设备, 2008 (3) .
- [2] 何会民, 石磊娜, 张志刚. 基于GPRS和Internet的远程控制系统设计 [J]. 微计算机信息, 2008, 24 (3) .
- [3] 胡先智, 梁艳. 基于GPRS的无线远程数据采集系统实现 [J]. 软件开发与设计, 2010 (12) .

(收稿日期: 2015-06-10) **EA**

(上接第49页)

方法进行对比分析，验证了基于Ansoft有限元分析的故障特征分析的正确性，并得出以下结论：

1) 断条故障时，定子电流中 $(1 \pm 2ks)f$ 故障特征量的大小不仅与断条根数有关，还与断条位置有关，故障造成电动机不对称性越大，故障特征量越大。

2) 不同短路故障程度下，定子电流各次谐波含量不同。随短路程度加深，3、5和7次谐波含量明显增加。其他谐波含量也有所增加但增长趋势不单调，当故障加深到某一程度时，谐波含量开始减小，然后再随故障程度加深而增大。

3) 静态偏心时，定子电流中出现25 Hz和75 Hz以及5、7、10和12次谐波成分；动态偏心时，定子电流中出现25 Hz和75 Hz以及5、7、8、10、12、13和15次谐波成分。

以上结论为判断电动机故障类型、故障程度及其发展趋势提供了相应依据。

参考文献

- [1] 邵英. 采用Park变换异步电机转子复合故障检测

[J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (3) : 57-61.

- [2] 何玉灵, 万书亭, 唐贵基, 等. 基于定子振动特性的汽轮发电机气隙偏心故障程度鉴定方法研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (22) : 53-57.
- [3] 李建军, 盛洁波, 王翠, 等. 异步电机定转子参数的辨识方法研究 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1) : 70-74.
- [4] 汤蕴璆, 史乃. 电机学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2005: 163-192.
- [5] Alberto Bellini, Fiorenzo Filippetti, et al. On-line experience with online diagnosis of large induction motors cage failures using MCSA [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38 (1) : 1045-1053.
- [6] 鲍晓华, 吕强. 异步电机气隙偏心故障研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (6) : 93-98.
- [7] 王攀攀, 史丽萍, 苗长新, 等. 利用骨干微粒群算法诊断电机定子故障 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17 (2) : 48-54.

(收稿日期: 2015-09-15) **EA**