

改善三相大电流母线桥工作噪音的研究

许 莎, 金先龙, 庞 峰, 申 杰, 张晓云

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 徐汇区 200030)

STUDY ON APPROACHES OF REDUCING THE WORKING NOISE FOR THREE-PHASE HEAVY CURRENT BUSBAR BRIDGE SYSTEM

XU Sha, JIN Xian-long, PANG Feng, SHEN Jie, ZHANG Xiao-yun

(School of Mechanical and Power Eng., Shanghai Jiaotong University, Xuhui District, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT: In order to study the working noise of three-phase low voltage and heavy current busbar bridge systems, the 3D finite element model of a certain busbar bridge system is established first, and then the edge finite element method is used to calculate the eddy current field of the system. The distribution characters of magnetic flux density and electromagnetic force are obtained. After that, the improvement methods are proposed to reduce the noise, and the numerical simulations and experiments are performed to study every improvement method. Through the comparison between the calculated results and the measured ones, the reliability of the calculation and the validity of the improvement methods are verified.

KEY WORDS: Heavy current; Three-phase busbar bridge; Working noise; Edge finite element; 3D eddy current field; Numerical simulation

摘要: 研究了三相大电流母线桥的工作噪音问题。首先建立了某型号母线桥的三维有限元模型,采用棱边有限元法对原始工况下的母线桥进行了三维涡流场计算,得到了磁感应强度和电磁力等在母线桥中的分布规律。根据涡流场计算结果并结合振动噪音分析,提出了改善母线桥工作噪音的措施,并对各项措施进行了数值模拟和实验研究。通过计算结果与实验测量的对比,验证了数值计算的可靠性和降噪措施的有效性。所提降噪措施可以推广应用到其它类型的母线设备。

关键词: 大电流; 三相母线桥; 工作噪音; 棱边有限元; 三维涡流场; 数值模拟

1 引言

大电流母线桥是一种低压电力设备,广泛应用

于发电厂、中小型发电机送电、工矿企事业配电以及二次变电所的受电和送电等场合,其电气性能和可靠性都获得了良好的市场反响,创造了较好的经济效益。但是,此类母线设备正常运行过程中工作噪音较大,尤其当负荷增大时噪音更加明显,成为电力行业一直未能很好解决的一个问题。

根据现场调查,正常运行过程中母线桥的工作噪音主要为电磁噪声和通风噪声。其产生途径有三种:交变电流通过时产生的交变电动力引起的母线和箱体的振动;大电流母线桥中发热量较大,引起箱体内气体对流强烈而产生的微风振动;母线桥系统中的导磁部分在较强的交变磁场中磁致伸缩引起的振动。

为了研究噪音的产生机理并提出合理降噪措施,首先需要对母线桥中的涡流场进行分析,得到母线桥中磁场及电磁力的分布情况,这是研究母线桥工作噪音的基础,对确定母线布置方式、箱体及其构件的结构形式起着重要的作用。

文献[1-2]对离相式封闭母线系统的磁场—温度场做了较详细的工作;文献[3-4]对密集型母线槽进行了二维涡流场的数值模拟;文献[5-6]针对气体绝缘型母线系统做了大量工作,但针对母线桥系统工作噪音方面所做的研究目前还很少。本文首先建立了某型号三相大电流母线桥系统的三维有限元模型,并采用棱边有限元法^[7-8]对原始工况下的母线桥进行了三维涡流场的计算,得到了磁感应强度、电磁力等参数的大小和分布规律;然后,根据涡流场计算结果并结合振动噪音分析,在考虑可行性和经济性的基础上,提出了降低母线桥工作噪音的措施,并针对各种措施进行了数

基金项目: 国家自然科学基金项目(60273048)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(60273048).

值模拟和实验研究；最后，通过计算结果与实验结果的对比，验证了计算模型的可靠性和降噪措施的有效性。

2 理论基础

描述涡流场最基本的方程组是 Maxwell 方程组。大电流母线桥正常工作时，母线上通入 50Hz 交流电，因此母线桥内的涡流场是似稳涡流场^[9]，可以使用准静态涡流场方程组来近似描述，则 Maxwell 方程组演变为^[10-11]

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

为方便涡流场的求解，引入矢量磁势 \mathbf{A} 定义为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4)$$

则可以导出

$$\nabla \times m(\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (5)$$

在导电介质中涡流密度为

$$\mathbf{J}_e = \mathbf{s}_e \mathbf{E} \quad (6)$$

因此，可将式(1)用源电流密度 \mathbf{J}_s 和涡流密度 \mathbf{J}_e 改写为

$$\nabla \times m(\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e = \mathbf{J}_s - \mathbf{s}_e \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (7)$$

式中 \mathbf{B} 为磁感应强度； \mathbf{H} 为磁场强度； \mathbf{J} 为总电流密度（源电流密度与涡流密度之和）； \mathbf{E} 为电场强度； m 为磁阻率； \mathbf{s}_e 为电导率。

3 有限元计算

母线桥的实体模型如图 1(a)所示，主要由箱体、三相母线排、绝缘金具以及各种支撑构件组成。由于工作电流较大，每相母线均由双层铜导体构成。整个母线排通过绝缘金具与箱体相连，母线桥中间截面示意图如图 1(b)所示，母线截面尺寸为 120mm×10mm。为了散热的需要，母线桥箱体的部分封板上开有百叶窗形式的通风口。母线桥总长为 6m，总宽为 1m，总高为 1m。箱体各封板由 2.5mm 厚的冷轧钢板制成。

根据母线桥实体模型建立有限元计算模型，计算区域包括 4 部分：母线导体区，母线各导体间以及母线与箱体间的空气区，母线桥箱体区和母线桥箱体外部远场区。

为了简化模型，计算中做了几点假设^[1]：不考虑空间电荷和位移电流的影响；认为媒质的磁导率都是线性的；忽略谐波影响。为了提高求解精度，

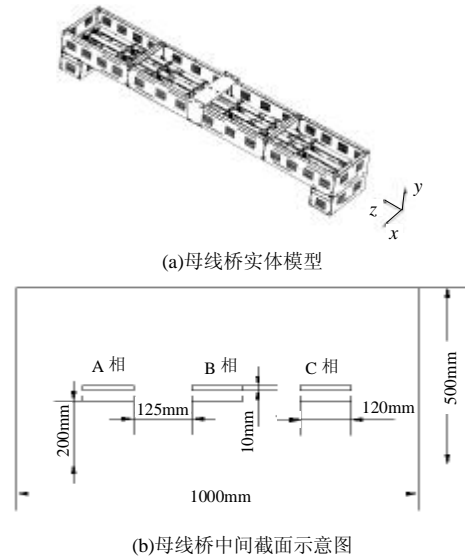


图 1 母线桥实体模型和截面示意图

Fig. 1 Solid model and Cross-section sketch of busbar bridge system

模型全部用六面体单元划分，采用棱边有限元法进行三维稳态涡流场计算。对母线加载正序电流，即 A, B, C 三相分别通电流 $I_A=I\angle 120^\circ$, $I_B=I\angle 0^\circ$, $I_C=I\angle 240^\circ$ ，其中， I 为额定电流有效值。

图 2 为工作电流 2000A 时箱体上电磁力的分布情况。电磁力沿母线桥长度方向上呈对称分布，箱体上所受电磁力的最大值在下封板两端与桥墩连接处，这是水平母线和垂直母线产生的交变磁场在此处叠加的结果。

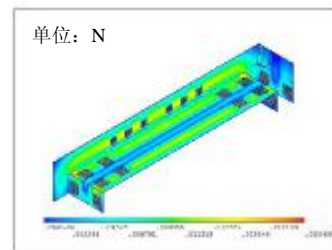


图 2 2000A 时母线桥箱体上电磁力分布

Fig. 2 Electromagnetic force distribution on the steel box

图 3 给出了工作电流分别为 1000A, 2000A 和 3500A 时母线 A 相水平段上的磁感应强度沿母线桥长度方向上的分布情况。随工作电流的增大，导体上磁感应强度明显增大。磁感应强度沿母线长度方向呈对称分布，且在母线中部分布比较均匀，在两端由于受端部效应和垂直段母线磁场的影响变化比较大。不同工作电流下母线桥箱体右侧板上磁感应强度的分布情况如图 4 所示。随工作电流的增大，箱体内部的磁感应强度也增大。侧板上磁感应强度呈周期变化且沿长度方向对称分布。

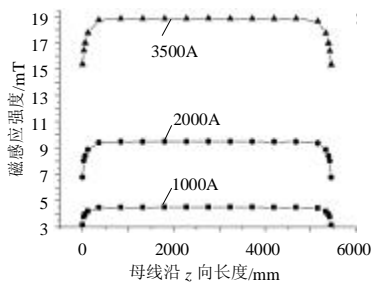


图3 导体A上表面磁感应强度的分布
Fig. 3 Magnetic flux density on phase A

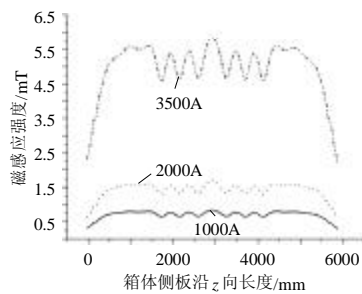


图4 箱体侧板表面磁感应强度的分布
Fig. 4 Magnetic flux density on side box plates

4 改善工作噪音的措施与分析

根据涡流场计算结果,对母线桥中电磁力的分布及箱体各封板的振动情况有了初步的了解。在此基础上,可以考虑从两方面降低母线桥系统的工作噪音^[12],一方面可以减小电磁力大小并调整电磁力的频域结构,另一方面可以改变主要声辐射部件的结构形式及尺寸参数。

(1) 改变母线摆放方式

在对原有设计母线桥进行涡流场分析的过程中发现,箱体的下封板所受电磁力较大。因此,从减小下封板上电磁力的角度出发,探讨了母线整体水平上移、母线品字形摆放及母线竖直摆放对母线桥内电磁力分布的影响。不同母线摆放形式如图5所示。

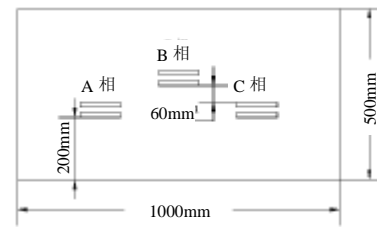
由于用来支撑母线的绝缘金具限制,每相母线上移的最大距离只能为60 mm。表1中列出了不同母线摆放形式下,箱体及母线上所选点的电磁力对比情况。其中,箱体上所选点为各板振动较大位置处的点。

由表1可见,导体整体上移时箱体和母线上的电磁力分布较好。品字形摆放时箱体上板所受电磁力较大。母线竖直摆放时,由于各相母线间及母线与侧板的相对面积增大,因此箱体和导体上的电磁力都有所增加。但是,改变母线的摆放形式可能使母线桥系统的整体模态发生变化,从而影响母线桥

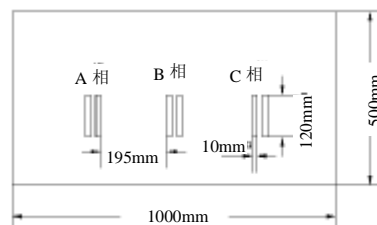
系统整体的振动情况。因此单从改变母线布置方式上很难来评价减小噪音的效果,还需要和结构改进相结合。

表1 不同母线摆放形式下电磁力/N
Tab. 1 The comparison of electromagnetic forces under different busbar models 单位: N

	箱体 左侧板	箱体 右侧板	箱体 上板	箱体 下板	母线上 最大值
原始模型	0.709×10^{-1}	1.104×10^{-1}	0.564×10^{-2}	0.347×10^{-2}	0.0558
母线上移	0.476×10^{-1}	0.752×10^{-1}	0.783×10^{-2}	0.253×10^{-2}	0.0537
品字形摆放	0.695×10^{-1}	1.124×10^{-1}	1.825×10^{-2}	0.109×10^{-2}	0.0584
竖直摆放	0.857×10^{-1}	1.224×10^{-1}	1.279×10^{-2}	1.203×10^{-2}	0.0851



(a) 母线品字形摆放



(b) 母线竖直摆放

图5 不同母线摆放形式示意图
Fig. 5 Different arrangements of busbars

(2) 箱体封板增加百叶窗

母线桥箱体为薄钢板拼接而成,每块钢板面积较大、内阻尼较小、刚度较差,因此振动强烈,是主要的辐射声源。分析中发现,箱体各块封板的振动情况不同,振幅较大的地方正好是封板上没有开百叶窗的地方。因此,考虑在未通风百叶窗的箱体封板上增开百叶窗。一方面,从能量守恒的角度来说,增开百叶窗后从母线桥内泄漏到外部空间的磁场增加,母线桥内部磁场能量减小,从而使箱体各板上的电磁力相应减小;另一方面,因为冲压百叶窗使平板结构有截面突变,改变了原有的平薄板结构。

工作电流为3500A时母线桥中部箱体下封板沿x方向所选点的电磁力对比情况如图6所示。图中3个波峰的位置分别是下封板上对应母线A、B、

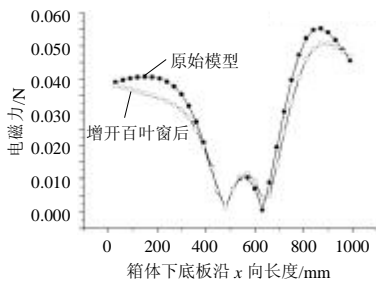


图 6 原有设计与增开百叶窗后电磁力的对比
Fig. 6 The comparison of electromagnetic forces between two models

C 三相的地方。可以看出，箱体增加百叶窗后下封板上电磁力比原有设计的有所减小。

(3) 箱体封板压制凹槽

在箱体相应位置压制凹槽，图 7 为在箱体上封板上压制凹槽的示意图。这种措施从增加整体刚度这个角度达到降低工作噪音的目的。

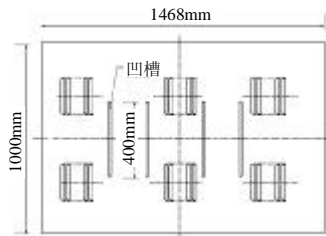


图 7 箱体上压制凹槽
Fig. 7 Grooves on steel box

由于母线桥的结构参数有较严格的标准规定，不易改变，同时，经济性和可行性也限制了降噪措施的选择范围，如采用阻尼材料、箱体上铆接 L 型角板、增加钢板厚度及改变箱体截面尺寸等经计算都有一定的降噪效果，但在实际生产中因需要增加成本或较多工艺而难以实施。

5 实验研究与结果讨论

5.1 实验模型

为验证计算模型的可靠性及降噪措施的有效性，在实验室中对母线桥系统的磁场及振动噪声进行了测量^[13]。根据数值计算结果，最终确定实验方案有五种，分别为：①原有设计；②母线整体水平上移 30 mm；③箱体上相应位置增开百叶窗；④箱体上相应位置压制凹槽；⑤箱体上相应位置铆接 L 型角板。

实验所用的母线桥样机与实际生产中的母线桥具有相同的尺寸和电气性能，共有 3 台，分别为：原有设计母线桥；增开百叶窗后的母线桥；压制凹槽后的母线桥。实验的第 1, 2 种方案在第一台样

机上进行，第 3 种方案在第二台样机上进行，第 4, 5 种方案在第三台样机上进行。为尽可能接近工厂所用母线桥的实际工作状态，母线桥样机两端架在两米多高的开关柜上。实验过程中样机的母线上通入频率为 50Hz 大小分别为 1000A, 2000A, 3500A 的三相交流电。图 8 所示为三台实验样机中的一台。



图 8 母线桥样机

Fig. 8 Prototype of the busbar bridge system

5.2 结果讨论

原始设计模型下，工作电流为 2000A 时母线 B 相水平段上表面的磁感应强度的对比情况如图 9 所示。工作电流为 3500A 时对应于 A 相母线下方的箱体下封板磁感应强度的对比情况如图 10 所示。

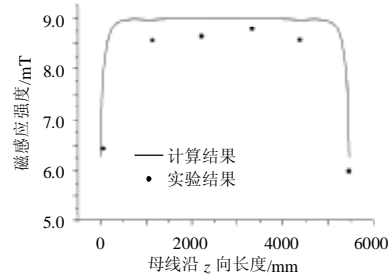


图 9 母线上磁感应强度分布对比
Fig. 9 The comparison graph on phase B

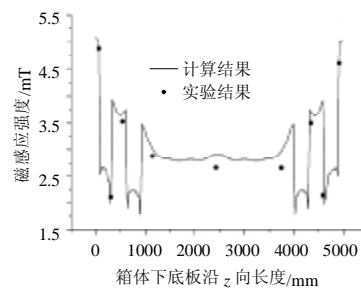


图 10 箱体下板磁感应强度分布对比
Fig. 10 The comparison graph on the lower box plates

从图 10 中可看出在下封板两端磁感应强度有突变，而在中间部分磁感应强度分布比较均匀。这主要是因为下封板两端开有百叶窗形式的通风口，在通风口附近箱体表面的磁阻急剧增大而使磁场在有通风口的位置产生了畸变。

由图 9、10 可见，磁场计算结果与测量结果在磁感应强度的分布趋势上具有较好的一致性，验证

了计算的可靠性。计算结果和测量结果之间存在一定的误差，测量结果普遍小于计算结果。经分析，误差产生的原因主要有以下两个方面。

从测量误差上看：测点定位不是很准确；高斯计探头的三维坐标相对于母线桥的三维坐标存在着一定的偏差；测量过程中，很难保证霍尔元件平面处处与磁感应强度 B 完全正交，测得的是 B 矢量的一个分量^[14]。

从计算误差上看：计算模型和实际模型上存在差异。如母线桥中有大量用于连接的螺栓，计算中为了简化模型未对这些螺栓逐一建模；计算中箱体的磁导率取为常数，实际上箱体的磁导率会随温度的升高而发生变化^[15]；计算中忽略了谐波的影响，实际工作过程中电流和电压有所波动。

母线桥外部噪声测点示意图如图 11 所示。表 2 列出了 5 种实验方案的 A 声级^[16]噪声测量结果。

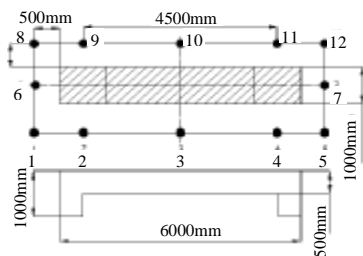


图 11 母线桥噪声测点位置示意图

Fig. 11 The sketch of noise measuring positions

表 2 母线桥噪声测量结果

Tab. 2 Measured results of noise under different methods

测点 编号	单位: dB				
	原有 设计	母线水 平上移	增开 百叶窗	压制 凹槽	铆接 L 型角板
1	64.3	67.7	62.8	60.8	61.1
2	70.2	69.8	58.3	62.5	59.6
3	69.6	66.0	58.5	62.7	62.3
4	65.0	71.9	55.8	62.0	65.6
5	64.4	65.4	55.8	59.8	63.4
6	64.5	66.7	63.6	60.2	62.0
7	64.0	65.0	57.9	62.2	57.0
8	66.1	64.0	59.0	57.6	62.3
9	68.1	66.8	62.4	60.8	61.5
10	65.5	64.2	59.3	63.6	61.0
11	69.5	65.3	61.1	64.0	65.0
12	63.5	66.2	56.3	63.4	61.6

从表 2 中可看出，采取的 4 种措施对降低工作噪声有不同程度的效果。从总体趋势上来说，母线水平上移 30mm 的结构改动方案降噪效果不是很好，这是因为母线上移后使得母线桥系统的整体模态发生了变化。箱体上增开百叶窗、压制凹槽和增

加 L 型角板有较好的降噪效果。其中，增开百叶窗的效果最为明显，与原有方案相比，各测点 A 声级大多可下降 7dB 左右，在实验现场人的听觉可以明显感觉到噪音的减小。由于原有设计中已有百叶窗结构，因此该措施不增加工序，对母线桥系统的整体改动也较小。同时，还可以提高母线桥系统的通风散热性能，可行性和经济性都很好，是一种可取的降噪措施。

6 结论

(1) 本文建立了某型号三相大电流母线桥的三维有限元模型，并采用棱边有限元法对原始工况下的母线桥系统进行了三维涡流场计算。与实验结果的对比表明两者具有相同的变化趋势，从而验证了有限元模型的正确性。

(2) 根据涡流场计算结果结合振动噪音分析，在考虑可行性和经济性的基础上，提出了降低母线桥系统工作噪音的措施，并针对每种措施分别进行了数值模拟和实验研究。研究表明所提措施对降低母线桥工作噪音有不同程度的效果，所得结论可以推广应用到其它类型的母线设备。

参考文献

- [1] 张兴娟, 曹乃承, 杨春信, 等. 垂直布置的母线温度场计算及分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 11-14.
Zhang Xingjuan, Cao Naicheng, Yang Chunxin *et al.* The temperature calculation and analysis of the long vertical buses[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 11-14.
- [2] Ho S L, Li Y, Lo E W C *et al.* Analyses of three-dimensional eddy current field and thermal problems in an isolated phase bus[J]. IEEE Trans. on Magn., 2003, 39(3): 1515-1518.
- [3] Hwang C C, Chang J J, Jiang Y H *et al.* Analysis of electromagnetic and thermal fields for a bus duct system[J]. Electric power systems research, 1998, 45(1): 39-45.
- [4] 武安波, 王建华, 耿英三. 密集型母线槽磁场-温度场综合有限元分析[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 7-11.
Wu Anbo, Wang Jianhua, Geng Yingsan. Finite element analysis of coupled magneto-thermal fields for compact busbar trunking system [J]. High voltage apparatus, 2003, 39(4): 7-11.
- [5] Takeuchi T, Yoshizawa T, Kuse Y *et al.* 3-D nonlinear transient electromagnetic analysis of short circuit electromagnetic forces in a three-phase enclosure-type gas insulated bus[J]. IEEE Trans. on Magn., 2000, 36(4): 1754-1757.
- [6] Benato R, Dughiero F. Solution of coupled electromagnetic and thermal problems in gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Trans. on Magn., 2003, 39(3): 1741-1744.
- [7] 余海涛, 邵可然, 周可定. 迎风一线性棱边单元法[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 92-95.
Yu Haitao, Shao Keran, Zhou Keding. Upwind-Linear edge elements method[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 92-95.

- [8] 张秀敏, 苑津莎, 崔翔. 用棱边与节点有限元耦合的 $E-E-y$ 法计算三维涡流场[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 70-75.
Zhang Xiumin, Yuan Jinsha, Cui Xiang. Edge-Nodal coupled $E-E-y$ method for computing 3D eddy current problems[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(5): 70-75.
- [9] 汤蕴璆. 电机内的电磁场(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 梁艳萍, 陆永平, 朱宽宁, 等. 汽轮发电机失磁异步运行时转子端部漏磁参数与涡流损耗的分析计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 112-116.
Liang Yanping, Lu Yongping, Zhu Kuanning *et al.* Calculation of leakage reactance and eddy current losses in the rotor end region of large turbogenerator at asynchronous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 112-116.
- [11] 雷银照, 熊华俊, 王书彬. 线性瞬态涡流场定解问题中的法向边界条件与解的唯一性[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 81-86.
Lei Yinzhao, Xiong Huajun, Wang Shubin. The normal interface condition and the uniqueness of solution to the linear transient eddy current definite-solution problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 81-86.
- [12] 商德江, 何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析[J]. 声学学报, 2001, 26(3): 193-201.
Shang Dejiang, He Zuoyong. The numerical analysis of sound and vibration from a ring-stiffened cylindrical double-shell by FEM and BEM[J]. ACTA Acustica, 2001, 26(3): 193-201.
- [13] 傅正财, 杜亚平. 母线槽工频阻抗的数值计算和测量[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 36-41.
Fu Zhengcai, Du Yaping. Numerical calculation and measurement of power frequency impedance for busbar trunking systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 36-41.
- [14] 冯乃祥, 孙阳, 冷正旭, 等. 贵州铝厂 160KA 大型预焙阳极铝电解槽磁场测量与计算[J]. 轻金属, 2000, (11): 41-47.
Feng Naixiang, Sun Yang, Leng Zhengxu *et al.* Magnetic measurement and calculation of 160KA prebake cell in GuiZhou aluminum smelter[J]. Light Metal, 2000, (11): 41-47.
- [15] Vong PK, Rodger D. Coupled electromagnetic-thermal modeling of electrical machines[J]. IEEE Trans. on Magn., 2003, 39(3): 1614-1617.
- [16] Cunefare K A, Currey M N, Johnson M E *et al.* The radiation efficiency grouping of free-space acoustic radiation modes[J]. Acoustic. Soc. Am, 2001, 109(1): 203-215.

收稿日期: 2005-09-08。

作者简介:

许 莎 (1977-), 女, 博士研究生, 研究方向为低压大电流开关设备电磁场理论与数值计算;

金先龙 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高性能计算、CAD/CAE 技术在大型工程中的应用;

庞 峰 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为低压大电流开关设备振动噪声理论与数值;

申 杰 (1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为 CAD/CAE 技术在大型工程中的应用;

张晓云 (1975-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为 CAD/CAE 技术在大型工程中的应用。