

磁力联轴器隔离套涡流场与温度场的数值计算

王梦文

(鸡西大学 电气与信息工程系, 黑龙江 鸡西 158100)

摘要: 为了满足永磁磁力联轴器(PMSC)转矩传递过程中的介质无泄漏要求,在 PMSC 内外转子间增加了隔离套,隔离套处在变化的磁场中,其内部将产生涡流,导致涡流损耗和隔离套的发热问题,采用二维有限元法对 PMSC 隔离套区域涡流场进行了计算,得到了隔离套内的涡流和涡流损耗。在此基础上结合流体相似理论得到了散热系数,并对所建立的 PMSC 三维暂态温度场进行了数值计算,分别得到了隔离套内涡流损耗、隔离套平均温度与隔离套材料电阻率及 PMSC 转速之间的关系曲线,为磁力联轴器的设计提供了参考依据。

关键词: 磁力联轴器;隔离套;涡流场;暂态温度场

中图分类号: TH131;TH123

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)08-0039-05

Calculation and analysis of eddy-current field and temperature field for insulation shell of permanent magnet shaft coupling

WANG Meng-wen

(Department of Electrical and Information Engineering, Jixi University, Jixi 158100, China)

Abstract: In order to solve the problem of medium leakiness of permanent magnet shaft coupling (PMSC) at its running, an insulation shell was mounted between the inside rotor and outside rotor of PMSC. When PMSC was working, the magnet field in insulation shell would alternate and resulted in the eddy current, which led to the problem of eddy current loss and temperature rise of insulation shell. The eddy current field of PMSC insulation shell was calculated, using 2D finite element method, and the eddy current distribution and eddy current loss of insulation shell were obtained. Based on the analysis, using the coefficient of heat emission obtained according to the theory of fluid similarity, the 3D transient temperature field of PMSC was calculated. The curves between eddy loss, temperature of insulation shell and material resistivity of insulation shell, and rotate speed of PMSC were gained. The research proves the reference for the design of the PMSC.

Key words: permanent magnet shaft coupling(PMSC); insulation shell; eddy-current field; temperature field

0 引 言

永磁磁力联轴器(PMSC)主要利用磁体之间存在超距磁力作用的特性,实现了在完全没有机械联系的情况下传递运动和转矩,应用磁力联轴器的磁传动装置的结构示意图如图 1 所示,主要部件有 3 部分:主动(外)转子与工作机械(如水泵叶轮、风机叶片、搅拌桨等)相连,从动(内)转子及隔离套。主、从动转子间设置隔离套,使轴端的动密封变为静密封,实现零泄漏,这一特性使其在密封传动领域有着重要的应用。

非金属材料的隔离套受输送介质温度、压力的制约,应用范围有一定的限制,所以隔离套一般采用金属材料。PMSC 正常工作时,金属隔离套内部将产生涡流,涡流效应一方面减弱了原来的工作磁场,降低了传递扭矩;另一方面产生的涡流发热,将造成相当大的功率损失,使磁力传动效率大幅度下降,某些情况下涡流损耗功率甚至超过总传递功率的 50%,尤其是高转速、大功率的 PMSC 涡流损耗在数值上更大^[1-3]。这不仅是能源的浪费,而且它所转化的大量热量,需要及时而充分地冷却,否则热量积累导致的温升可能使磁钢

退磁失效,也可能造成其它故障。所以,磁力联轴器的涡流问题不但影响磁力联轴器的运行经济性,也会影响磁力联轴器的运行可靠性。

因此,如果不能定量的掌握磁力联轴器的涡流问题,就无法准确地确定磁力联轴器的效率和合理的动力配套,更无法进行磁力驱动器冷却系统的设计。所以,本研究对磁力联轴器金属隔离套涡流问题进行研究,分析各因素对涡流的影响,为磁力联轴器的设计提供参考依据。

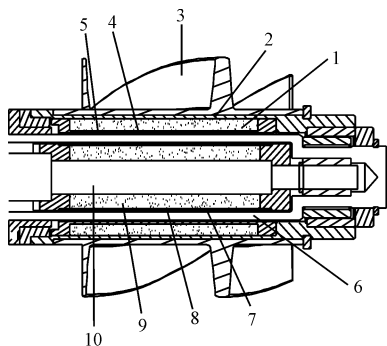


图1 PMSC结构示意图

1—叶轮;2—叶轮壁;3—外磁钢;4—外磁钢套;5—外气隙;6—隔离套;7—内气隙;8—内磁钢套;9—内磁钢;10—轴

1 二维涡流场的有限元计算

根据PMSC的结构特点,忽略轴向磁场的变化,本研究建立了PMSC求解区域涡流场的二维有限元求解模型,如图2所示。主要研究隔离套中的涡流场分布,并考虑集肤效应的影响,隔离套处的网格剖分要细。并利用矢量磁位 A 分析PMSC中瞬变电磁场的定解问题:

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right] = -J_{Mi} - J_{Mo} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \\ s_1: A = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 J_{Mi} 、 J_{Mo} —PMSC内、外转子永磁体等效电流密度; $\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$ —导电区域的感应涡流密度; A —矢量磁位; s_1 —PMSC的外边界; ν —磁阻率; σ —电导率。

在进行PMSC瞬变电磁场求解时,单独考虑隔离套区域的磁场计算方程应为^[4-8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_1 \frac{\partial A}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_1 \frac{\partial A}{\partial y} \right] = J_w = \sigma_1 \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

式中 J_w —隔离套中感应的涡流密度; ν_1 、 σ_1 —隔离套材料的磁阻率和电导率。

因而,在一个电周期内应用时步有限元法并根据式(1)和式(2),可得到在每一时间步隔离套内的涡流

密度为:

$$J_{i_n} = \nu_1 \text{rot}(\text{rot}A_{i_n}) \quad (3)$$

1个电周期隔离套内的平均涡流密度为:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |J_{i_n}| \quad (4)$$

式中 N —时步有限元求解步数。

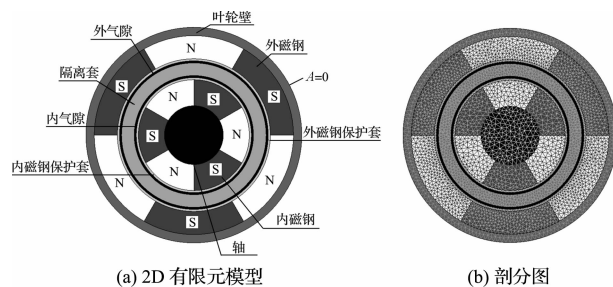
隔离套的涡流损耗密度为:

$$p_e = \frac{1}{\sigma_1} J^2 \quad (5)$$

隔离套的涡流损耗为^[9-10]:

$$P_E = \int_{V_c} p_e dv \quad (6)$$

式中 V_c —隔离套体积。



(a) 2D有限元模型

(b) 剖分图

图2 PMSC数值计算模型及剖分图

2 三维温度场有限元计算

2.1 边值问题与基本假设

根据传热学理论,暂态运行的PMSC三维热传导方程为:

$$\begin{cases} K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_1} = 0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{s_2} = \alpha(T - T_e) \end{cases} \quad (7)$$

式中 T —PMSC的温度, $^{\circ}\text{C}$; K_x, K_y, K_z —PMSC各介质 x, y, z 方向的导热系数, $\text{W}/(\text{mm} \cdot ^{\circ}\text{C})$; q —热源密度, W/mm^3 ; c —热容, $\text{W} \cdot \text{s}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; γ —密度, kg/mm^3 ; τ —时间, s ; S_1 —PMSC绝热边界面; S_2 —PMSC散热边界面; T_e — S_2 周围介质的温度(时间的函数), $^{\circ}\text{C}$; α — S_2 面的散热系数, $\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; K — S_1 和 S_2 面法向热传导系数。

取PMSC整个轴向长度为三维温度场计算区域,如图3所示。温度场网格剖分时,考虑到温度梯度不同时,隔离套处剖分单元尽可能较小。为了简化计算,本研究作了如下基本假设:

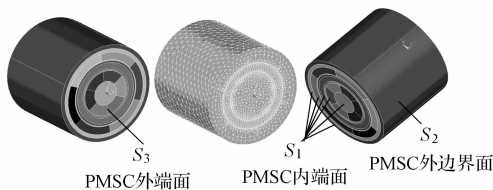


图 3 3D 温度场计算模型及剖分图

3.1 隔离套涡流场计算结果分析

为了清楚地反映 PMSC 隔离套内的涡流分布, 这里只显示隔离套内各场量的分布情况。PMSC 初始时刻磁极内涡流和涡流损耗密度的分布图分别如图 4、图 5 所示。

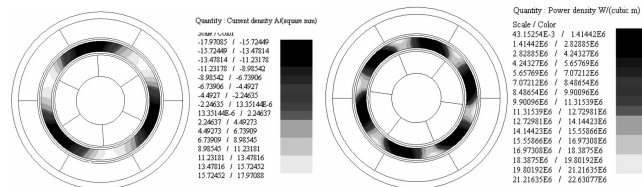


图 4 初始时刻 PMSC 隔离套的涡流密度分布

图 5 初始时刻 PMSC 隔离套的涡流损耗密度分布

由图中可看出, 磁极内的涡流和涡流损耗密度沿隔离套的周向不均匀分布, 但沿着隔离套径向涡流和涡流损耗密度的分布变化较小, 这主要是由于 PMSM 实际运行时磁场分布相对固定, 即 PMSC 额定工作时, 内、外转子间磁场夹角恒定, 使径向磁场分布相对均匀而造成的。

隔离套内涡流损耗与隔离套材料电阻率的关系曲线如图 6 所示, 隔离套材料电阻率为 $0.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 时, 隔离内损耗与 PMSC 转速的关系曲线如图 7 所示。从图可见, 涡流损耗 P_E 随着隔离套的电阻率增加而减少, 而随着 PMSC 的转速增加而增加, 这主要是因为涡流损耗与导电介质的导电率及磁场变化频率的二次方成正比而引起的。

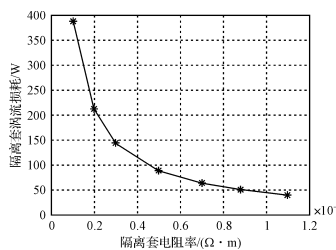


图 6 隔离套内损耗与隔离套材料电阻率的关系曲线

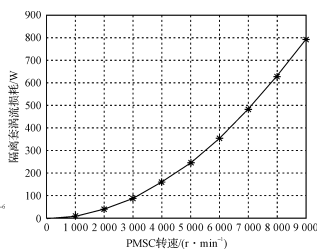


图 7 隔离套内损耗与 PMSC 转速的关系曲线

3.2 PMSC 温度场计算结果分析

由式(9)和式(10)计算得到的散热系数和热源密度值, 以及各材料的传热系数作为已知值和 PMSC 周围介质温度 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 作为初始条件, 即可以计算 PMSC 暂态温度场^[11-13]。PMSC 材料电阻率为 $0.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 时 PMSC 温度场分布图和 PMSC 隔离套温度场的分布图如图 8、图 9 所示, 内转子磁极的温度场分布情况如图 10 所示。

- (1) 仅考虑 PMSC 外转子管壁的对流换热, 忽略管壁与叶轮片间的热传递;
- (2) PMSC 外边界散热面 S_2 上各点环境温度相同;
- (3) 隔离套内的涡流损耗均匀分布且不随温度变化;
- (4) PMSC 内、外端面 S_1 和 S_3 为散热面。

2.2 表面散热系数的确定

根据流体相似理论, 磁力联轴器的散热边界属于流体横向冲刷管壁流动, 即流体沿与管轴线垂直方向流过管外。为简化计算, 可用如下准则方程式计算 PMSC 外边界的平均散热系数:

$$Nu = CR_e^n P_r^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中 Nu —努谢尔数, $Nu = \frac{\alpha_c d}{\lambda}$; P_r —普朗特数, $P_r = \frac{\gamma \rho c_p}{\lambda}$; R_e —流体的雷诺数, $R_e = \frac{Vd}{\gamma}$; d —PMSC 边界外径; V —流体与 PMSC 相对速度; γ —流体运动粘度; λ —流体导热系数; ρ —流体密度; c_p —流体热容; C , n —与雷诺数相关的系数, $C = 0.683$, $n = 0.466$ 。

因此, 磁力联轴器外边界的平均散热系数为:

$$\alpha_c = \frac{0.683 R_e^{0.466} P_r^{\frac{1}{3}} \lambda}{d} \quad (9)$$

2.3 热源密度的确定

在 PMSM 温度场计算中, 发热热源为隔离套的涡流损耗 P_E , 因此, 隔离套内平均热源密度为:

$$q = \frac{P_E}{V_c} \quad (10)$$

式中 V_c —隔离套体积。

3 数值计算结果与分析

通过上述涡流场与温度场的分析, 本研究计算了额定工况为转矩 $3.0 \text{ N} \cdot m$ 、转速 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 PMSC 采用不同材料、厚度的隔离套时的涡流损耗及温升情况, 以及 PMSC 工作在不同转速下的隔离套涡流损耗与温升, 得到了隔离套内涡流损耗、隔离套平均温度与隔离套材料电阻率、厚度及 PMSC 转速之间的关系曲线。

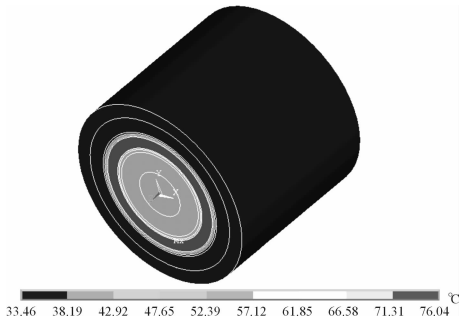


图 8 PMSC 温度场分布



图 9 PMSC 隔离套温度场分布

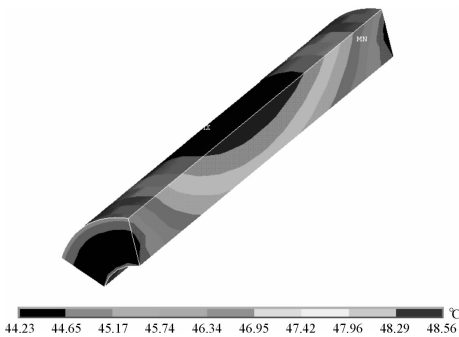


图 10 PMSC 内转子磁极温度场分布

由图 8 可以明显看出,PMSC 各部件间的温度分布有较大的差异,最高温度点出现在隔离套上,而且隔离套的温度明显高于其他各部件的温度。这主要是因为 PMSC 的发热热源很集中,而且隔离套两边均为热导率很小的气隙,PMSC 正常工作时,隔离套的热量主要是通过这两个气隙向外传导的,因此,造成了隔离套有较高的温升。

图 9 表明了 PMSC 隔离套的温度沿周向均匀分布,但沿轴向分布并不均匀,主要因为隔离套的两端面与外部相连,都向外散热。而从图 10 中可以看到,永磁体内的温度沿轴向是对称分布的,最高温度出现在轴向中点处,这是由于内、外转子磁体沿轴向是完全对称的,且热量主要来源于热传导。

PMSC 隔离套的温度随着隔离套电阻率的增加而减少,而随着 PMSC 的转速增加而增加,如图 11、图 12 所示,PMSC 转速对温升的影响较隔离套材料电阻率

对 PMSC 温升的影响更加剧烈,这是因为隔离套的热源与 PMSC 转速的二次方成正比,而仅与电阻率的一次方成正比。

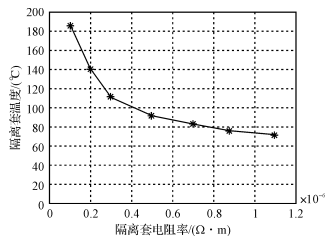


图 11 隔离套最高温度与隔离套材料电阻率的关系曲线

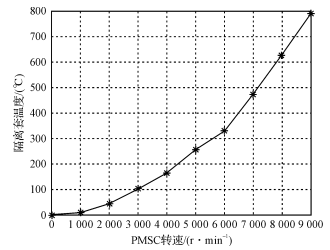


图 12 隔离套最高温度与 PMSC 转速的关系曲线

4 结束语

(1) 通过对 PMSC 隔离套涡流场的数值计算可知,隔离套内涡流和涡流损耗密度的分布是比较复杂的,隔离套的材料选择及 PMSC 的转速对涡流损耗的影响较大,其值随着隔离套电阻率的增加而减少,随着 PMSC 的转速增加而增加,这主要是因为涡流损耗与导电介质的导电率及磁场变化频率的二次方成正比而引起的。

(2) PMSC 各部件间的温度分布有较大差异,最高温度点出现在隔离套上,而且隔离套的温度明显高于其他各部件的温度。这主要是因为 PMSC 的发热热源很集中,且隔离套两边均为热导率很小的气隙所造成的。永磁体内的温度沿轴向对称分布,最高温度出现在轴向中点处,这是因为内、外转子磁体沿轴向是完全对称的,且热量主要来源于热传导。

(3) PMSC 隔离套的温升与隔离套材料及 PMSC 转速密切相关,随着隔离套的电阻率增加而减少,随着 PMSC 的转速增加而增加,且 PMSC 转速对温升的影响较隔离套材料电阻率对 PMSC 温升的影响更加剧烈,这是因为隔离套的热源与 PMSC 转速的二次方成正比,仅与电阻率的一次方成正比引起的。

(4) 从限制温升与损耗的角度考虑,PMSC 隔离套应采用电阻率较大、不导磁的材料,而且 PMSC 的极数要设计的较少,以降低隔离套中的交变频率。

参考文献 (References) :

[1] 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):112-115.

[2] 周 封,熊 斌,李伟力,等. 大型电机定子三维流体场计算及其对温度场的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(24):128-132.

(3) 粒径大的颗粒将会以大碰撞角与后盖发生碰撞;粒径小的颗粒随气流运动趋势明显,与工作面发生多次碰撞,表现为滑动或滚动;粒径越大,与叶轮的碰撞速度越小。

(4) 数值模拟计算结果与文献[22-23]的试验现象相吻合。表明采用雷诺应力湍流模型计算的结果能准确描述超高速离心叶轮中固体颗粒的运动轨迹,有利于对超高速离心叶轮磨损问题做进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 潘应康,陈康民. 离心风机叶轮内气固两相流动的理论及数值解法[J]. 华东工业大学学报,1996,18(2):27-34.
- [2] 胡桂荣,李意民,贾晓娜. 离心风机内气固两相流的数值模拟[J]. 煤矿机械,2008,29(3):37-39.
- [3] 潘海波,郭宏伟,虞维平,等. 离心除尘风机气固两相流动的数值模拟[J]. 流体机械,2005,33(6):11-13.
- [4] 吴俊峰,朱晓农,陈启明,等. 通风机内部流场和性能的数值模拟及其分析[J]. 流体机械,2009,37(9):19-22.
- [5] 崔晓钰,翁建华,陈善年. 离心通风机内气固两相流动计算[J]. 风机技术,2001(4):44-47.
- [6] 陈慎宇,眭曦,王灿星. 离心式通风机内部流场的数值模拟[J]. 流体机械,2007,35(9):22-25.
- [7] 陆耀军,周力行,沈熊. 不同湍流模型在液-液旋流分离管流场计算中的应用及比较[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41(2):28-33.
- [8] 王海刚,刘石,姜凡. 用雷诺应力模型计算旋风分离器中气-固两相流动[C]. 中国工程热物理学会燃烧学学术会议,2003:232-239.
- [9] 魏新利,张海红,王定标,等. 旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(3):14-17.
- [10] BRUNO C. Reynolds stress transport modeling for high-lift airfoil flows[J]. *AIAA Journal*,2006,44(10):2390-2403.
- [11] COKLJAT D, SLACK M. Reynolds-stress model for eulerian multiphase[J]. *Progress in Computational Fluid Dy-*

- namics*,2006,6(1):168-178.
- [12] GEROLYMOS G A, VALLET I. Wall-normal-free feynolds-stress model for rotating flows applied to turbomachinery[J]. *AIAA Journal*,2002,40(2):199-208.
- [13] GEROLYMOS G A, NEUBAUER J. Improved prediction of turbomachinery flows using near-wall reynolds-stress model[J]. *Journal of Turbomachinery*,2002,124(1):86-99.
- [14] FREDRIKSSON C. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder[D]. Luleå: Luleå Tekniska University,1999.
- [15] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclone[J]. *Chemical Engineering Science*,1999,54(4):2055-2065.
- [16] HANJALIC K. Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects[J]. *Heat Fluid Flow*,1994,15(3):178-203.
- [17] 周力行,廖昌明,陈涛. 强旋气-粒两相湍流的统一二阶矩封闭模型[J]. 工程热物理学报,1994,15(3):327-330.
- [18] ZHOU L X. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-particle Flows and Combustion[M]. Florida: Science press and CRC press. INC,1993.
- [19] 梅丹,幸福堂. 颗粒在离心风机内运动轨迹可视化预测的实现[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,2007,30(5):518-521.
- [20] 柏占伟,裴江红,杨川. 6-u 式离心流场的数值模拟[J]. 机械,35(12):24-26,48.
- [21] 王红利,宋鹏云,赵龙. 固液旋流泵固体颗粒分布的数值模拟研究[J]. 机械,2008,35(12):9-12,40.
- [22] 田爱民,田爱杰,许洪元,等. 离心泵叶轮中颗粒轨迹与磨损的关系[J]. 水力电力机械,2000,2:48-50.
- [23] 陈汝刚,张春梅,金立文,等. 含尘离心风机不同叶型磨损特性的可视化实验研究[J]. 流体机械,2000,28(1):5-8.
- [24] 王冠军,袁丹青,刘吉春,等. 叶片形状对旋涡泵性能的影响[J]. 轻工机械,2009,27(2):27-31.
- [25] 刘路,姜献峰. 多翼离心风机主要部件对风机流动特性影响的研究现状[J]. 轻工机械,2009,27(5):4-7.

[编辑:张翔]

(上接第42页)

- [3] 张洪亮,邹继斌. 考虑旋转磁通的 PMSM 铁心损耗数值计算与分析[J]. 电机与控制学报,2007,11(4):340-344,348.
- [4] 邹继斌,张洪亮,江善林,等. 电磁稳态条件下的力矩电机三维暂态温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(21):66-70.
- [5] 刘志珍,励庆孚,王美琴. 解析法计算任意形状薄钢板的涡流损耗[J]. 电工技术学报,1999,14(4):69-72.
- [6] 陈存武,杨超君. 磁力泵隔离套中的有限元分析及优化设计[J]. 排灌机械,2003,21(1):9-11.
- [7] 施卫东. 磁力驱动泵的功率损失分析[J]. 水泵设计,1992(2):10-13.
- [8] 刘芳,任振林. 磁力驱动离心泵隔离套的设计[J]. 甘肃科学学报,2007,15(2):114-116.
- [9] 魏永田,孟大伟,温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

- [10] 杨超君,马宏亮,蒋生发. 电磁感应式磁力联轴器中隔离套的涡流分析与计算[J]. 机械设计与研究,2005,21(5):63-65.
- [11] 付敏,邹继斌,魏静薇,等. 基于三维有限元法 U 型单相自启动永磁同步电机涡流场与温度场的分析计算[J]. 上海交通大学学报,2006,40(4):572-576.
- [12] YOSHIDA K, HITA Y, KESAMARU K. Eddy-current loss analysis in PM of surface-mounted-PMSM for electric vehicles[J]. *IEEE Trans. Magn.*,2004,36(2):1941-1944.
- [13] FU W N, LIU Z J. Estimation of eddy-current loss in permanent magnets of electric motors using network-field coupled multislice time-stepping finite-element method[J]. *IEEE Trans. Magn.*,2002,38(2):1225-1228.

[编辑:柴福莉]