

自带风扇冷却的永磁电机热计算方法对比分析

杨金霞, 李伟业, 邹煜林, 吴江权

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为了对比分析不同热计算方法在电机热设计和工程应用上的可行性, 文章以一款自扇风冷永磁电机为研究对象, 对其风扇工作流量、电机流体场和电机温升进行分析。分别采用解析法与有限体积法对电机风扇的额定工作风量进行计算, 并通过有限体积法得到了电机整体流体域的速度分布; 基于流体计算, 分别采用等效热路法与有限体积法对电机温升进行预估。通过对比计算值与实测值, 说明两种方法均有一定的可信度, 其中有限体积法方法更适于电机设计改进与优化, 解析法可用于派生电机设计和方案初步评估。

关键词: 永磁电机; 风扇冷却; 流体场; 等效热路; 温度场; 解析法; 有限体积法

中图分类号: TM351

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2016)06-0007-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2016.06.002

Comparison and Analysis of Thermal Calculation Methods for Fan-cooled Permanent Magnet Motor

YANG Jinxia, LI Weiwei, ZOU Yulin, WU Jiangquan

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to comparatively analyze the feasibility of different thermal calculation methods on thermal design and engineering application of motor, based on a fan-cooled permanent magnet motor, it analyzed the flow of fan, the fluid field and temperature-rising of motor. Moreover, it calculated the rated air flow of motor fan with analytic method and finite volume method (FVM) and then the achieved velocity distribution of fluid field. On the basis of fluid calculation, it respectively used equivalent thermal path method and FVM to estimate the temperature rising of motor. Through comparing calculation value and practical value, it proved that the two methods had certain reliability. FVM is more suitable for the improvement and optimization of motor design, and thermal model method can be used for subseries motor design and preliminary design evaluation.

Keywords: permanent magnet motor; fan cooling; fluid field; equivalent thermal model; temperature field; analytic method; FVM

0 引言

随着经济和社会的发展, 低碳环保、高效节能成为各行各业关注的焦点, 其中稀土永磁电机由于结构简单、体积小、质量轻、效率高, 得到了广泛的关注与应用^[1-2]。在轨道交通领域, 为了有效保护永磁体, 永磁电机一般采用全封闭结构, 这导致电机散热环境条件恶劣; 加之电机功率密度的提高, 使得电机在工作时产生的单位体

积损耗增加, 会加剧电机各部分温度的提升。较高的温度一旦使永磁体发生不可逆失磁, 会对电机安全运行造成严重影响。电机作为轨道交通车辆核心部件, 其内部温度场的准确计算和预估为保证电机的安全运行、设计成本的节约及研发周期的缩短奠定了坚实基础。电机热设计方法主要有简化公式法、等效热路法、热网络法及数值计算法等, 在计算精度和设计周期方面, 这些方法各有优劣^[3-6]。

为了研究不同计算方法在电机热设计和实际工程应用上的可行性和有效性, 本文以一款自带风扇冷却的全封闭式永磁同步牵引电动机为研究对象, 对电机热设计

收稿日期: 2016-06-26

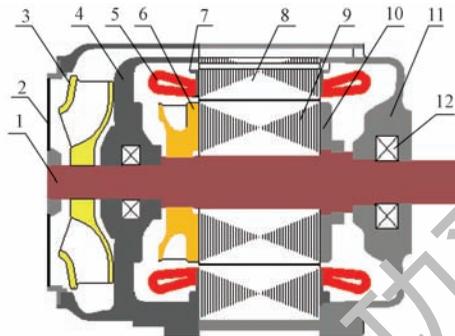
作者简介: 杨金霞(1982-), 女, 工程师, 主要从事永磁电机设计及电机通风发热计算与研究工作。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAG12B01)

方法进行对比分析。本文分别采用解析法与仿真计算的方法对电机温升进行计算和对比分析,首先对电机风扇及其流道进行解析计算与三维流体场仿真分析,由此得到额定工况下,风扇所能产生的风量;然后基于流体场计算结果,分别通过热路法与有限体积法^[7-9],对电机温升进行计算和分析。永磁电机转子基本不发热,采用基于等效二热源热路的解析法,计算方法简单,可快速预估定子绕组温升,初步判断电机电磁方案设计是否合理;基于有限体积法的仿真计算,可以对电机全域流体场与温度场进行分析评估,更有利于电机方案的改进和优化。

1 永磁电机结构

本文所述的永磁电机采用全封闭结构,它主要包括定子、转子、转轴、风扇、前后端盖、定子压圈及转子压圈等零部件,图1示出其轴向截面示意。电机端盖、定子压圈与定子冲片外侧通风孔形成的通风道,构成包括风扇在内的外循环风路;气隙、定子冲片内侧通风孔构成的风路,构成包括转子后压圈在内的内循环风路。



1—转轴; 2—网板; 3—风扇; 4—后端盖; 5—定子绕组; 6—转子后压圈; 7—定子压圈; 8—定子铁心; 9—转子铁心; 10—转子前压圈; 11—前端盖; 12—轴承

图1 永磁电机轴向结构示意图

Fig. 1 Axial schematic diagram of the PM motor

该电机被要求能够双向旋转,由此采用离心式风扇。风扇被安装在电机转轴上,其叶片径向均布,具体结构见图2。当电机工作时,风扇随电机的旋转而转动,空气由进风口被风扇吸入电机内,经设置在电机内的通风道对电机进行冷却后,由出风口排出至外部大气中。风扇对电机的冷却效果受电机转速的影响较大。

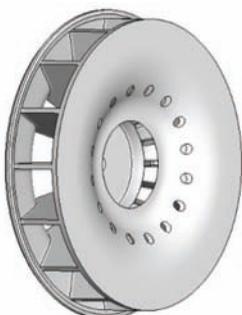


图2 风扇结构图

Fig. 2 Structure diagram of the fan

电机内循环风路的主要作用是通过对电机腔体内气体的扰动,加速电机内热量的传递,不但可使电机内因损耗产生的热量能够迅速输送到外循环风路,而且能有效均衡电机内部温度场的分布梯度。

2 风扇流量计算与流体场仿真

2.1 基于经验公式的风扇叶片与流量计算

风扇叶片尺寸可根据电机风扇安装空间大小而确定,风扇叶片参数和工作流量则依据叶片外径 D_1 、叶片内径 D_2 和叶片轴向长度 b 以及电机额定转速 n_N 而确定。叶轮外径划过的气体圆柱形表面积 S 、叶轮外径线速度 v_1 、叶轮内径线速度 v_2 、径向叶片风扇能够产生的最大风量 Q_M 及其叶片数 N 的计算公式如式(1)~式(5)所示:

$$S = 0.92\pi D_1 b \quad (1)$$

$$v_1 = n_N \pi D_1 / 60 \quad (2)$$

$$v_2 = n_N \pi D_2 / 60 \quad (3)$$

$$Q_M = 0.42 S v_1 \quad (4)$$

$$N = [8.5 / (1 - D_2 / D_1)] \quad (5)$$

根据上述公式进行计算,得到该永磁电机风扇 $S=0.056 \text{ m}^2$, $v_1=22.765 \text{ m/s}$, $v_2=10.501 \text{ m/s}$, $Q_M=0.538 \text{ m}^3/\text{s}$, $N=16$ 。因此将风扇叶片数设置为16片;风扇工作流量按最大风量的40%进行计算,则风扇所能产生的工作流量约为 $0.215 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

电机风扇工作时流过风扇的风量大小对电机温度场的准确计算至关重要。为了得到较为准确的风扇工作流量和电机定子通风孔内风速数值,基于FLUENT软件,对其外循环风路进行数值模拟与计算^[10]。

2.2 风扇流体场仿真分析

该电机的流体求解域模型如图3所示,冷却介质为空气,由于电机内马赫数较小,因此按不可压缩流体处理。为了兼顾计算准确性与模型网格剖分质量,忽略部分加工圆角与倒角,并将进风口与出风口分别定义为电机结构意义上的进风口与出风口。

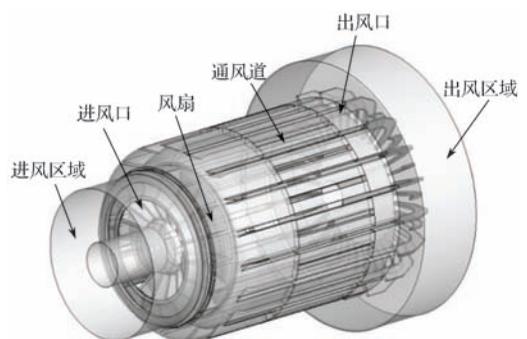


图3 三维流体场求解域

Fig. 3 Computational domain of 3D fluid field

流体域模型较为复杂，因此对不同部位采用不同的网格类型进行剖分，网格剖分尺寸不超过 3 mm。在进行求解时，选择基于压力的隐式稳态求解器。电机内流体雷诺数较大，为了精确模拟旋流效果，选择“RNG $k-\epsilon$ ”模型^[11-12]为湍流模型、“Swirl Dominated Flow”为 RNG 选项 (RNG Options)，近壁面符合标准壁面函数要求；进出口的湍流强度为中等湍流强度 (5%)。风扇旋转利用多重旋转坐标系模拟^[13-14]，风扇区域设置旋转流体域，旋转速度同电机额定转速，风扇叶片及风扇轮毂壁面相对旋转速度设置为 0，其他区域为静止流体域；进风口与出风口均设置为压力出口，其值为一个标准大气压 (即：101 325 Pa)。压力-速度耦合采用 SIMPLE 方法，所有方程中的对流项均采用一阶精度格式离散，求解精度设置为 10^{-6} 。仿真计算时，监测进出风口风量直至收敛为止。图 4 示出电机外循环流体域的迹线，图 5 示出电机外循环流体速度场分布。

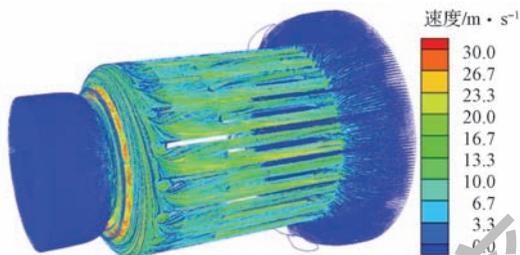
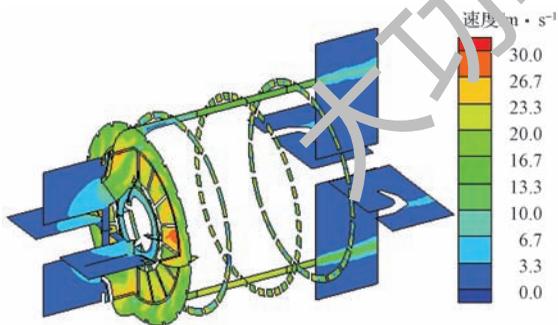
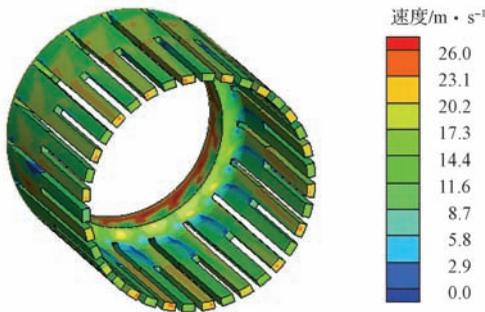


图 4 流线图
Fig. 4 Distribution of streamline



(a) 不同截面速度场



(b) 定子通风孔速度分布

图 5 速度场分布

Fig. 5 Distribution of velocity field

风扇旋转使端盖和压圈内同一通风孔内的风速不

均匀，导致相邻定子通风孔内的风速不一致 (图 5)，这与风扇的旋转方向有关，定子通风孔内的平均风速为 17 m/s。由计算结果可知，该电机风量约为 $0.221 \text{ m}^3/\text{s}$ ，与利用风扇参数计算校核得到的工作风量值基本一致；进风口平均风速为 2.6 m/s，出风口平均风速为 12 m/s。

3 电机温升计算与分析

3.1 基于等效热路法的温升计算

电机内的热源较多且不易精确计算，传热路径复杂，且电机本身涉及不同材质的结构件，因此对电机温升进行计算时，常根据需要做一些适当的假设，以使求解过程简化。电机等效热路模型的建立基于以下假设条件和依赖关系：

- (1) 定子绕组和定子铁心为等温发热体。
- (2) 定子槽内各导线均匀排列，径向温差忽略不计；铜线的绝缘漆分布均匀；绕组的浸渍漆完全填充。
- (3) 绕组中电流在截面上分布均匀，忽略漏磁场在线圈中引起的集肤效应。
- (4) 永磁电机的转子不发热，采用包括定子绕组铜耗与定子铁耗在内的二热源热路进行计算。

电机稳态二热源等效热路如图 6 所示，其中 P_{Cu} 为定子线圈内的热损耗， P_{Fe} 为定子铁心内的热损耗， R_{CF} 为绕组与定子铁心之间的绝缘传导热阻， R_{Cu} 为绕组端部与空气之间的散热热阻， R_{F1} 为定子铁心通风道对空气的散热热阻， R_{F2} 为定子铁心内圆与空气的散热热阻， R_{F3} 为定子铁心外圆与空气的散热热阻， ΔT_{Cu} 为定子绕组温升， ΔT_{Fe} 为定子铁心温升。

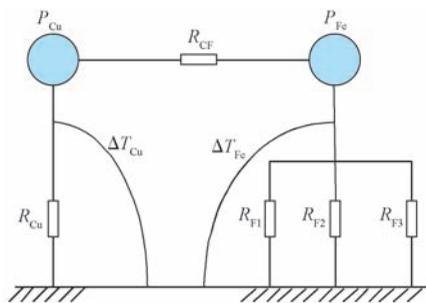


图 6 电机二热源热路

Fig. 6 Thermal model of the motor

电机内的热阻主要分为传导热阻 R_{t1} 与散热热阻 R_{t2} ，具体计算如式 (6) 和式 (7) 所示：

$$R_{t1} = \frac{\delta}{\lambda A} \tag{6}$$

$$R_{t2} = \frac{1}{\alpha A} \tag{7}$$

式中： δ ——导热体在热流方向上的长度，m； λ ——导热体的导热系数，W/m·K； A ——垂直于热流的导热面

积, mm^2 ; α ——表面对流散热系数, $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ 。

根据电机结构和材料特性,由式(6)和式(7)计算得到各部分的热阻值: $R_{\text{CF}}=0.01118 \text{ K}/\text{W}$, $R_{\text{Cu}}=0.35371 \text{ K}/\text{W}$, $R_{\text{F1}}=0.04131 \text{ K}/\text{W}$, $R_{\text{F2}}=0.15674 \text{ K}/\text{W}$, $R_{\text{F3}}=0.32154 \text{ K}/\text{W}$ 。忽略机械损耗与杂散损耗的影响,电机定子绕组铜耗为 2 125 W,定子铁耗为 968 W。根据图 6 并结合各热阻计算值,可得到电机定子绕组平均温升为 103.6 K,定子铁心平均温升为 62.3 K。

利用简化的等效热路法来计算电机温升,方法简单,计算速度快,但是只能得到电机定子绕组的平均温升,无法得知电机内整体温度场的分布情况,尤其是无法获取电机最高温度点数值。为了保证电机热设计的可靠性和电机的安全运行,需对电机三维流固耦合温度场进行仿真分析。

3.2 基于有限体积法的温度场仿真

电机温度场仿真分析基于以下基本假设条件:

- (1) 模型中涉及到的材料其物性参数不随温度变化。
- (2) 几何建模时,忽略风扇部分,根据电机结构,建立简化 1/8 模型,端盖与转轴进行简化;各接触的固体部件紧密接触。
- (3) 定子线圈沿轴向作直线棒处理;浸渍漆完全填充;定子槽内绝缘按一体化处理,热性能相同且各向同性。
- (4) 电机辐射散热与表面自然散热通过电机表面对流散热系数表征。
- (5) 转子旋转通过多重旋转坐标系模型进行模拟。
- (6) 忽略外循环风路定子通风孔内风速的不均匀性。

除去电机风扇部分,电机结构沿周向对称,通过对包括风扇在内的外循环风路的流体域仿真计算,获取了电机工作时的流量。建立温度场求解域时,根据电机实际结构,基于假设条件,选取电机的 1/8 周向截面建立电机三维温度场求解域模型(图 7)。模型中主要包括定子铁心、定子绕组及其绝缘系统、转子铁心、转子压圈、内风扇、轴承、端盖和转轴。

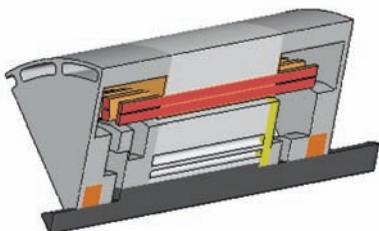


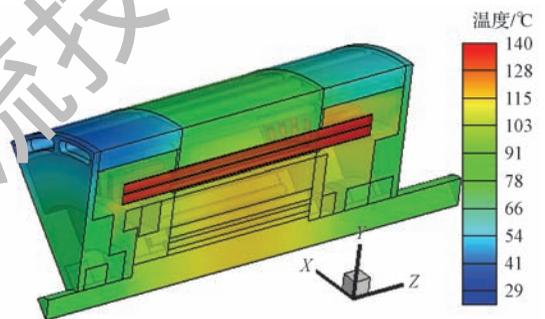
图 7 三维温度场求解域

Fig. 7 Computational domain of 3D temperature field

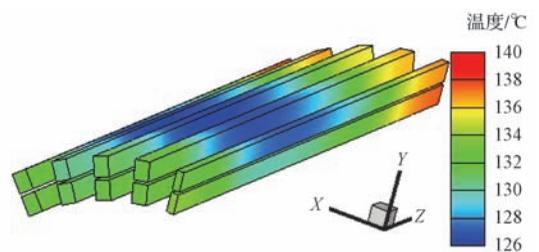
电机端盖、线圈铜线、绝缘、槽楔、永磁体和转轴为各向同性材料,导热系数分别设置为 38 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 387 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 0.18 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 0.22 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, 12 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 和 48 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。定子和转子铁心采用各向异性的硅钢片材料,导热系数沿径向为 40 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$,沿轴向为 1.6 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 。

在进行求解时,环境温度为 29 $^{\circ}\text{C}$,各部分损耗均匀加载在各个部分。其中,绕组铜耗为 2 125 W;定子铁耗为 968 W;杂散损耗为 480 W,按 1:1 比例分配给定子与转子;两端轴承损耗为 80 W。求解器选择为基于压力的隐式稳态求解器。选择“Standard $k-\epsilon$ ”模型为湍流模型,近壁面符合标准壁面函数要求。进风口设置为速度入口,根据流体场计算结果,按端盖通风孔内平均风速设置,其值为 12 m/s ;出口为压力出口,其值为一个标准大气压。进出口的湍流强度均为中等湍流强度,设置为 5%,水力直径为 0.026 m 。

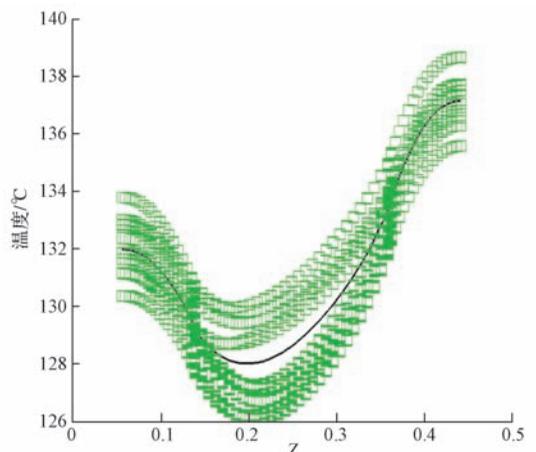
图 8 示出了温度场部分计算结果。可以看出,电



(a) 电机温度场分布



(b) 定子绕组温度场分布



(c) 某槽内定子线圈沿 Z 向（轴向）的温度曲线

图 8 温度场计算结果

Fig. 8 Simulation results of the motor temperature field

机定子绕组温度最高，其最高温度出现在电机出风端的下层绕组端部，为 138.7 ℃；定子绕组的平均温度为 131.2 ℃，则平均温升为 102.2 K。由于电机采用全封闭结构，定子有效段温度低，端部温度高，且出风端的绕组端部温度高于进风端绕组端部的，两端最高温差约为 8.5 K（图 8（b）和图 8（c））。这是由于冷却空气在从进风口到出风口的过程中，在带走热量的同时其自身温度升高，因此进风端的冷却效果要优于出风端的。根据计算结果，电机温升达到稳态后，电机进风口的平均温度为 29.8 ℃，电机出风口的平均温度为 43.1 ℃，则进出风口的温差为 13.3 K。

3.3 温升计算值与试验结果对比

对电机样机进行温升试验（环境温度为 29 ℃），同时对电机进风口与出风口的风速进行测量，以估算电机工作风量。试验时，通过热阻法得到定子绕组平均温升，定子铁心和传动端轴承的温度通过温度传感器 PT100 测得。

额定工况时，电机进风口平均风速测试值为 2.8 m/s，出风口平均风速测试值为 13.0 m/s。根据电机进风口面积，估算出电机风扇工作风量为 0.237 m³/s。通过解析法与有限体积法计算得到的风扇风量，与实测值的相对误差分别为 9.2% 与 6.7%，两者均满足工程需要；但有限体积法的计算精度更高，主要原因在于解析法根据经验公式计算，存在一定的不准确性。

表 1 示出了温升计算值与试验值结果。绕组仿真计算值以绕组平均温升值为准，铁心和轴承的仿真计算值以实测点位置处的平均值为准，相比热路法计算值，通过仿真计算得到的设计值误差更小。等效热路法采取将电机内复杂的传热过程用较少的等效热阻代替方式，且在计算过程中涉及到较多的参数选取，因此会造成较大的误差；仿真计算能得到电机全域温度场分布，但是其计算周期长。根据数据对比可知，两种热设计方法均可满足电机设计实际工程需要。

表 1 计算值与样机试验值对比

Tab. 1 Comparison between computation results and prototype test results

	热路法计算值/K	仿真计算值/K	试验值/K	相对误差/%
绕组	103.6	102.2	99.6	4/2.6
铁心	65.3	62.2	57.8	12.9/7.6
轴承	—	65.4	59.2	—/10.5

4 结语

本文以一款自扇风冷永磁电机为研究对象，分别采

用不同的方法对电机的流场和电机温升进行计算。在分析电机风扇工作风量时，分别采用解析法和有限体积法对其进行计算和仿真；而后分别采用等效热路法与有限体积法对电机的温升进行计算与仿真分析。通过与试验数据对比，发现两种方法在分析电机风量与平均温升方面都有一定的可信度。有限体积法的计算精度更高，并且能得到电机全域速度场与温度场的分布，尤其是电机最高温度点的数值和部位，便于电机的优化设计与改进；但由于其计算周期较长，对计算机硬件资源要求高，对于派生电机研制和市场类电机项目来说，将花费较高的时间和成本。通过经验公式和等效热路法对电机进行热设计，只能粗略得到电机绕组的平均温升，但可在极短的时间内完成计算，对计算机资源要求低，可用于电机设计方案的快速评估和派生电机温升预估。具体采用哪种电机热设计方法，需要根据项目的具体性质来进行选择。

参考文献

- [1] 李钟明, 刘卫国, 刘景林, 等. 稀土永磁电机 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 183-189.
- [2] 詹任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 1-11.
- [3] 杨金霞, 元均平, 王健, 等. 永磁同步牵引电动机温度场仿真分析 [J]. 大功率变流技术, 2012(3): 43-47.
- [4] KROK R. Electric mine motor thermal models aiding design and setting thermal protections [J]. Bull. Pol. Ac: Tech., 2012, 60(1): 103-110.
- [5] STATON D A, AVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2008, 50(10): 3509-3516.
- [6] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, PARVIS M, et al. Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors [J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 2006, 42(3): 688-693.
- [7] 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: 251-356.
- [8] KATHIRAVAN R, KUMAR S. Thermal Simulation of Hybrid System [D]. Linköping: Linköping University, 2011.
- [9] 刘伟亮. 电动车用感应电机损耗及热系统的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [10] 李光宇, 袁立强, 赵争鸣, 等. 基于计算流体动力学的高效交流电机风扇优化 [J]. 电工电能新技术, 2014, 33(11): 24-28.
- [11] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 347-353.
- [12] 唐家鹏. FLUENT14.0 超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 30-38.
- [13] 丁杰, 张平, 李益丰, 等. 永磁同步电机的三维流场温度场耦合计算 [J]. 大功率变流技术, 2014(6): 46-50.
- [14] 路义萍, 付余, 张万全, 等. 一种新型无刷励磁机的三维热流场分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4699-4705.