

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.014

基于场路耦合方法的永磁同步电机温度场研究

时培成, 夏仙阳, 陈晨, 张荣芸

(安徽工程大学汽车新技术安徽省工程技术研究中心, 芜湖 241000)

摘要: 针对永磁同步电机温度场精确求解问题, 提出了一种场路耦合法来计算电机的温度场。以一台永磁同步电机为研究对象, 利用 MATLAB/Simulink 搭建电机的控制策略, 再通过有限元分析软件 ANSYS Maxwell 和 ANSYS Simplorer 搭建电机的二维电磁场模型和控制电路模型组成场路耦合模型。基于场路耦合模型计算电机的损耗, 并将损耗导入到电机的三维磁热耦合模型中, 观测电机在基速工况和弱磁范围内温度场的变化。通过样机实验测试, 验证了该方法的精确度, 为精确求解电机的温度场提供了依据。

关键词: 场路耦合; 磁热耦合; 最大转矩电流比; 弱磁控制; 永磁同步电机

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2021)03-0425-10

Temperature Field of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Coupled Field-Circuit

SHI Peicheng, XIA Xianyang, CHEN Chen, ZHANG Rongyun

(Automotive New Technology Anhui Engineering and Technology Research Center, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to accurately obtain the temperature field of permanent magnet synchronous motor, we propose a field-circuit coupling method. This study takes a permanent magnet synchronous motor as the research object, uses MATLAB/Simulink to build the control strategy of the motor, and then deploys the finite element analysis software ANSYS Maxwell and ANSYS Simplorer to build the two-dimensional electromagnetic field model and control circuit model of the motor to form the field-circuit coupling model. The field-circuit coupling model calculates the loss of the motor, and imports the loss into the three-dimensional magneto-thermal coupling model of the motor. Thus, the change of the temperature field of the motor can be observed in the base speed and weak field. The prototype test verifies the accuracy of the method. This method provides a basis for accurate calculation of the temperature field for motors.

Keywords: field-circuit coupling; magneto-thermal coupling; maximum torque per ampere; field weakening control; permanent magnet synchronous motor

永磁同步电机 (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) 因其高功率密度、高效率的特性在电动汽车上作为驱动电机得到广泛应用^[1]。

但是, 由于电动汽车对电机的运行环境以及安装空间的限制, 导致电机内部散热条件较差^[2], 电机内部存在局部过热点现象, 会导致电机发生故障, 存

基金项目: 国家自然科学基金(51575001)资助项目; 安徽高校科研平台创新团队建设项目(2016-2018)资助项目; 安徽省新能源汽车产业发展创新支持项目(2020WF071)资助项目。

收稿日期: 2020-07-14; **修订日期:** 2020-12-29

通信作者: 时培成, 男, 教授, E-mail: shipeicheng@126.com。

引用格式: 时培成, 夏仙阳, 陈晨, 等. 基于场路耦合方法的永磁同步电机温度场研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 425-434. SHI Peicheng, XIA Xianyang, CHEN chen, et al. Temperature field of permanent magnet synchronous motor based on coupled field-circuit[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 425-434.

在安全隐患。为解决这一问题,需要准确地模拟、计算电机内部温升变化。

目前针对电机温度场计算的方法主要有3种:简化公式法、等效热网络法以及有限元法。简化公式法是研究电机温度场最简单的方法。通过简化的公式得到电机的平均温升,该方法只有在电机内部温差较小时成立,计算出的温升准确度较差。等效热网络法采用图论原理,以热路为基础并采用网络拓扑结构对电机温度场进行计算,但也只能得到电机内部某一部分的局部平均温度。相比简化公式法,有一定的进步,但在精确捕捉电机的温度过热点仍不理想,过热点的温度是影响电机平稳运行的重要因素。文献[3]采用等效热网络法对永磁同步电机的温升进行了计算,得到了电机内部各细分部分的平均温升,但是无法准确定位电机过热点的位置。文献[4]采用等效热网络法研究了双定子单转子轴向磁通永磁同步电机的温度场,分析了不同转速与装配间隙对电机温升的影响,给出了电机的平均温升与转速和装配间隙之间的关系。文献[5]研究潜水电机的温升问题,利用改进的经验公式计算了模型中的等效热阻并建立电机的等效热网络模型,但没有准确定位电机内部过热点位置。文献[6]研究感应电机的温升问题,提出了一种用于计算定子绕组温升的热等效网络方法;但只给出定子绕组的过热点位置,没有给出电机内部过热点的位置。

有限元法不但能完成对电机的电磁场和温度场的单向以及双向求解,也能实现电机的应力场、噪声和温度场等多种情况的耦合计算。利用有限元法来研究电机的温度场,能够分析整个温度场区域的分布情况以及过热点的位置,准确度高,是目前专家学者最推崇的方法。文献[7]采用磁热耦合方法对不同工况下的电动汽车轮毂电机的温度场进行了分析,但该文没有考虑外电路对电机温度场的影响。文献[8]采用场路耦合法对电动汽车轮毂电机的控制策略进行设计分析,论证了场路耦合法在电机控制电路中的应用可行性,但该文只涉及磁场,未涉及温度场。文献[9]采用时步有限元法,研究了内置式永磁同步电机,建立了有限元电机本体模型与控制电路模型相结合的场路耦合模型,仿真计算了不同工况下的电机损耗,没有将损耗导入电机的温度场中,观察电机温度场变化。文献[10]采用磁热耦合法分析了电机各细分部分的温升,但没有考虑外电路对电机各部分温升的影响。文献[11]采用时步有限元法对永磁同步电动机各工况下的工作效率进行了优化分析,论证了有限元法在电

机效率计算中的应用。文献[12]研究高速永磁同步电机的铁损,采用多物理场仿真的方法对铁耗进行计算,但没有考虑外电路对电机铁损的影响。文献[13]研究永磁同步电动机的电磁和热特性,并建立了电机的集参数热模型,没有考虑电机外电路的影响。文献[14]研究永磁同步发电机的性能,采用场路耦合时步有限元方法对电磁场和电路的物理量同时求解,考虑了外电路对电机电磁场的影响,但没有考虑外电路对电机温度场的影响。

综上,不同学者利用有限元法对电机进行的仿真分析体现在两个方面:(1)对电机本体进行多物理场仿真;(2)对电机的驱动控制系统进行场路耦合仿真。本文首先通过场路耦合仿真方法研究电机的最大转矩电流比(Maximum torque per ampere, MTPA)控制和弱磁控制对电机损耗的影响,并计算出电机在基速下和弱磁范围内电机的损耗。然后将电机损耗导入到电机的磁热耦合模型中,求解、模拟电机的温度场,并捕捉出电机的过热点。最后通过电机台架试验验证仿真结果的正确性。相对于其他方法,在研究电机的温度场时,本文考虑了电机的外电路对电机的温度场的影响。

1 场路耦合模型的搭建

本文以一台内置式永磁同步电机为研究对象,电机的具体参数见表1,防护等级IP54,散热方式为风冷,电机绝缘等级F级。

表1 电机参数

Table 1 Motor parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	10	极数	8
定子槽数	48	定子内径/mm	145.2
定子外径/mm	230	转子内径/mm	100
气隙长度/mm	1.2	铁心长度/mm	140

利用ANSYS Maxwell、ANSYS Simplorer和MATLAB搭建场路耦合模型,对其进行建模和电磁仿真,具体过程为:首先在ANSYS Maxwell中搭建PMSM的二维电磁场模型,然后在MATLAB/Simulink中搭建电机驱动系统的控制策略,最后在ANSYS Simplorer中搭建PMSM的外电路模型,并进行3个软件的联合仿真。根据电机结构,在ANSYS Maxwell中建立的二维电磁场模型如图1所示,电机是8极48槽结构,主要由定转子、永磁体、绕组以及转轴组成。

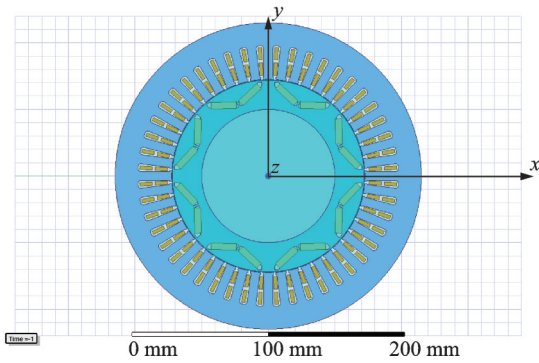


图 1 永磁同步电机二维电磁场仿真模型

Fig.1 Simulation model of two-dimensional electromagnetic field of permanent magnet synchronous motor

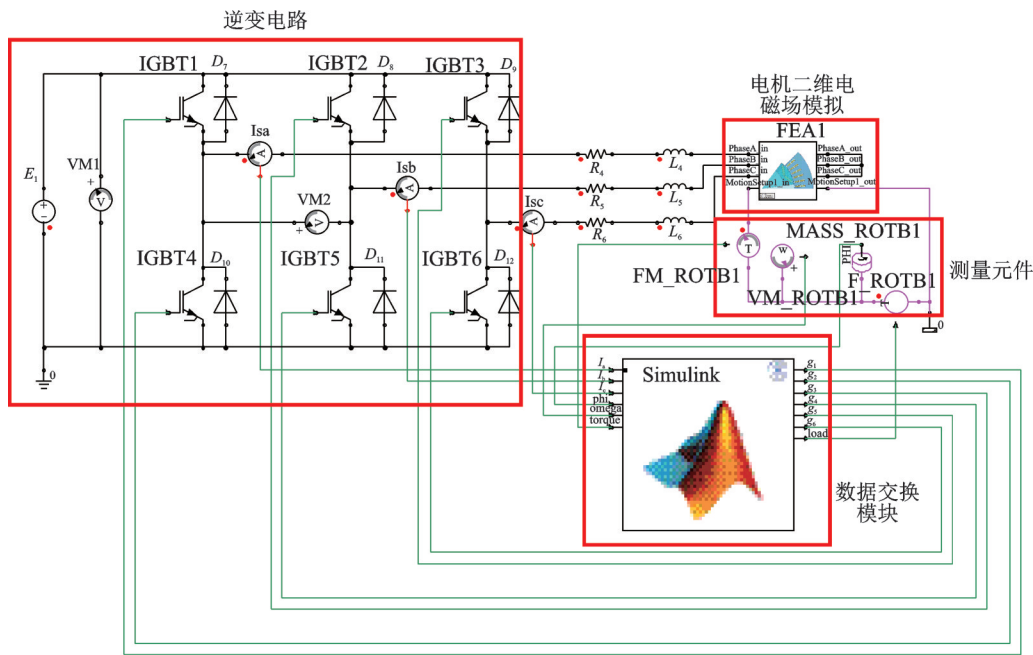


图 2 在 ANSYS Simpler 中搭建的场路耦合联合仿真模型

Fig.2 Co-simulation model of field-circuit coupling built in ANSYS Simpler

2 内置式永磁同步电机控制策略

图 3 是内置式 PMSM 的定子电流 i_s 轨迹,其中,OA 段属于 MTPA 曲线轨迹,AB 段属于弱磁控制的轨迹。当电机的转速达到 MTPA 最大值

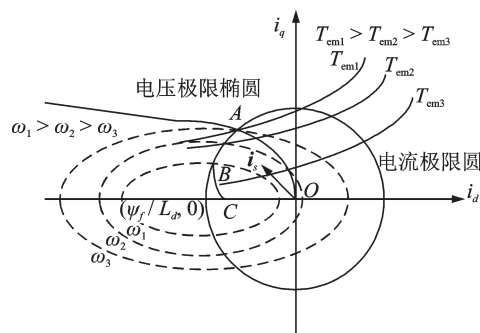


图 3 内置式永磁同步电机定子电流矢量轨迹

Fig.3 Stator current vector trace of built-in permanent magnet synchronous motor

图 2 为在 ANSYS Simpler 中搭建的场路耦合仿真模型。其既与 ANSYS Maxwell 中搭建的永磁同步电机的电磁场模型建立联系,也与 MATLAB/Simulink 中搭建的电机控制策略建立联系。场路耦合仿真模型包括电机的逆变电路模型、二维电磁场模型以及驱动控制模型。仿真时,逆变器直流电压设为 360 V,功率开关器件采用 IGBT,逆变路中还加入了电流、电压和转矩测量模块,其中,IGBT 的开关信号来源于在 MATLAB/Simulink 中搭建控制策略。

时,往往为了进一步提高电机的转速,会通过调节直轴的电流来削弱永磁体产生的励磁磁场,此时交轴的电流也会发生改变。

图 3 中, T_{em1} 、 T_{em2} 、 T_{em3} 为不同时刻电机的转矩, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为对应时刻的电机转速。

2.1 dq 轴电机数学模型

对于永磁同步电机的控制策略研究一般在 dq 轴坐标系下进行,电机定子电压方程和电磁转矩方程,如式(1)和式(2)所示

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 ψ_d 、 ψ_q 为定子电压、定子电流、定子磁链的 dq 轴分量; R_s 是定子每相电阻; L_d 、 L_q 是

定子电感的 dq 轴分量; T_e 为电磁转矩; ψ_f 为永磁磁链; P_n 为极对数。

2.2 最大转矩电流比控制

为实现 MTPA 控制策略, 需要求解 MTPA 轨迹上的 i_d, i_q 的解析值, 定子电流矢量 i_s' 与 q 轴的夹角为转矩角 β , 设 i_s 的幅值为 i_s , 则 d, q 轴电流表达式为

$$\begin{cases} i_d = i_s \cos \beta \\ i_q = i_s \sin \beta \end{cases} \quad (3)$$

代入式(2), 可得

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_s \sin \beta + \frac{3}{4} P_n (L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\beta \quad (4)$$

根据式(4), 可得到单位电磁转矩关于电流相位角的关系为

$$\frac{T_e}{i_s} = \frac{3}{2} P_n [\psi_f \sin \beta + 0.5(L_d - L_q) i_s \sin 2\beta] \quad (5)$$

电流 i_s 的幅值保持不变, 则单位电流电磁转矩取最大值时, 即 $\partial \left(\frac{T_e}{i_s} \right) / \partial \beta = 0$, 可得

$$\cos \beta = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q) i_s} \quad (6)$$

把式(6)代入式(3), 可得

$$\begin{cases} i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q)} \\ i_q = \sqrt{i_s^2 - i_d^2} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 弱磁区域的确定

本文采用反馈法弱磁控制, 使得 PMSM 的控制从 MTPA 策略平稳地过渡到弱磁控制策略。其中 MTPA 控制策略是根据电磁转矩和交、直轴之间的关系推导得到的, 转换框图如图4所示。

图5是 MTPA 和弱磁控制转换框图, 其主要包括3个部分, 分别是模块 I MTPA 区域, 模块 II 弱磁计算模块, 模块 III 电流指令计算模块。

模块 I 是根据式(7)搭建而成的, 其原理是将给定转速和反馈转速的静差, 经过 PI 调节器后, 计算得到转矩 T_e , 再通过 MTPA 公式计算得出直、交轴的电流分量 i_{ds} 和 i_{qs} 。

模块 II 为弱磁计算模块, 利用的是直流电压反馈方法将电压解耦后的输出指令 u_{sd} 和 u_{sq} 作为反馈, 通过反馈电压同参考电压比较来判断电机是否进入弱磁阶段。当 $\sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \leq \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}$ 时, 电机按照

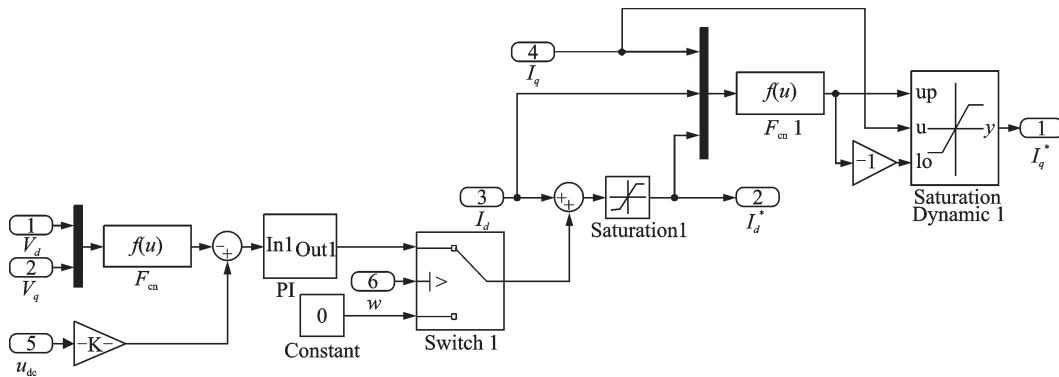


图4 永磁同步电机弱磁控制模块

Fig.4 Weakening control module for permanent magnet synchronous motor field

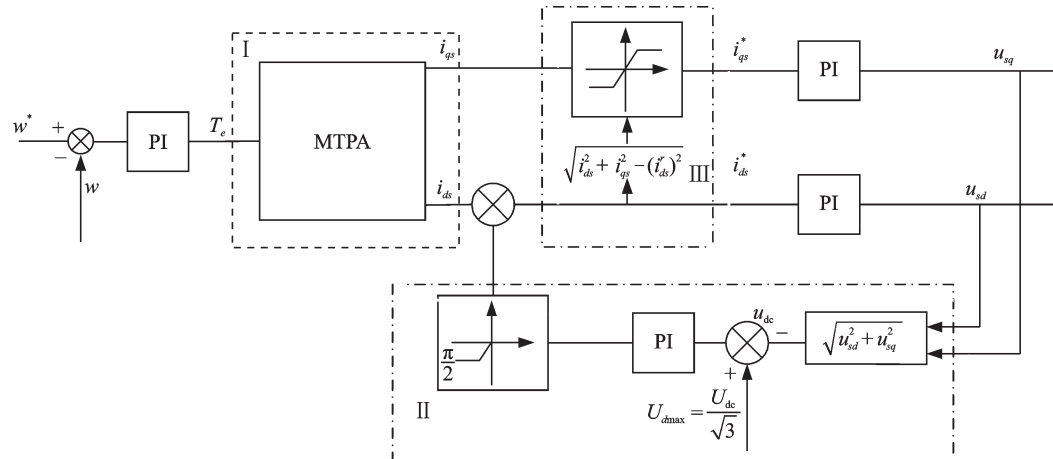


图5 MTPA 和弱磁控制转换框图

Fig.5 MTPA and field weakening control conversion block diagram

MTPA 运行;当 $\sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} > \frac{u_{dc}}{\sqrt{3}}$ 时电机会使用弱磁控制运行。

模块 III 是提供弱磁电流模块,当电机通过模块 II 判断电机进入弱磁控制时,通过模块 II 计算出电机的负向弱磁电流,依据电流极限圆约束条件 $i_d^2 + i_q^2 = i_{max}^2$,计算出 q 轴电流。图 5 是根据模块 II 和模

块 III 搭建的电机的弱磁控制模块。

在 MATLAB/Simulink 建立的 PMSM 的控制策略如图 6 所示。采用矢量控制,在基速下,使用 MTPA 控制,在弱磁范围内,使用弱磁控制。控制策略模型主要由电流环、转速环、MTPA 模块、弱磁控制、SVPWM 以及与在 ANSYS Simpler 中搭建的场路耦合模型(图 2)进行数据交换模块组成。

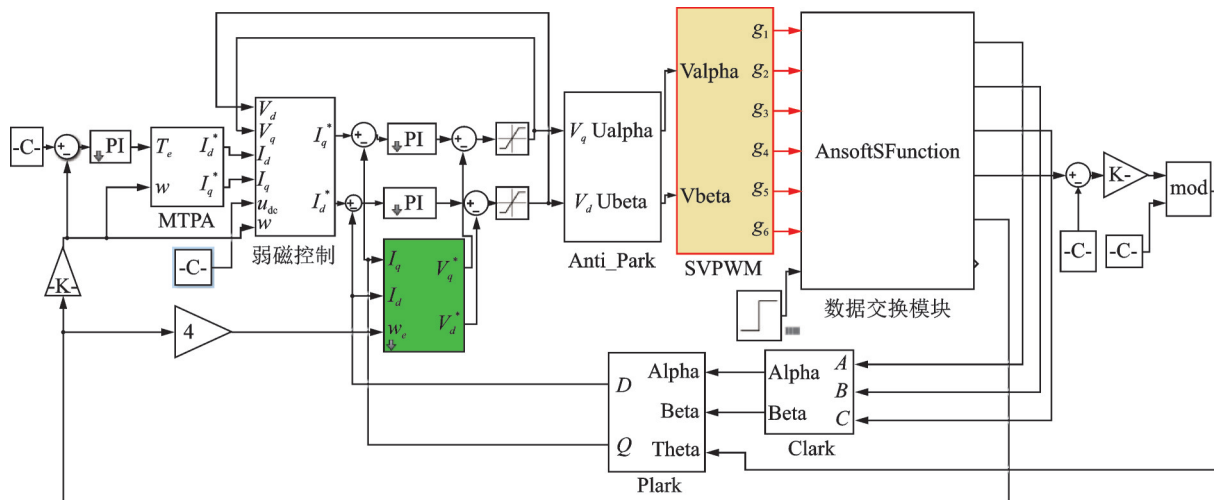


图 6 永磁同步电机控制策略

Fig.6 Motor control strategy for permanent magnet synchronous

3 电机损耗分析

温升会导致电机运行时,产生的损耗增加,因此对电机损耗进行准确的分析至关重要。电机运行时产生的损耗,主要包括:绕组铜耗、定转子铁耗、永磁体涡流损耗以及机械损耗。这些损耗基本上都会转成热能,会在电机内部各个部件之间传递,进而影响电机内部温度场的分布。电机的总体损耗 P_z 表达式如式(8)所示

$$P_z = P_{cu} + P_{Fz} + P_{me} + P_{mf} \quad (8)$$

式中: P_{cu} 为绕组铜损耗; P_{Fz} 为铁心损耗; P_{me} 为永磁体涡流损耗; P_{mf} 为机械损耗。

下文设定基速工况仿真条件为:转速 1 000 r/min,时间达 0.12 s 时,给定负载为 30 N·m。弱磁范围内仿真条件为:转速 5 300 r/min;时间达 0.6 s 时,给定负载为 30 N·m。

3.1 铜耗

电机的绕组铜耗是由电机的电流引起的,其产生主要与绕组相数、电流的有效值以及绕组的电阻值有关^[15]。绕组铜耗的表达式为

$$P_{cu} = mI^2R \quad (9)$$

式中: m 为绕组相数; I 为电流有效值; R 为每相绕组的电阻值。

由于永磁同步电机功率密度高,其在工作的过

程中温升较快,而这会引起绕组阻值的增加,电阻随绕组温度变化的关系为

$$R = R_0[1 + \alpha_0(t - t_0)] = \rho_0 \frac{l}{S} [1 + \alpha_0(t - t_0)] \quad (10)$$

式中: R_0 为参考电阻值; α_0 为导体温度系数; ρ_0 为参考电阻率; l 为导线长度; S 为导线横截面积。

3.2 铁耗

铁耗与永磁同步电机内部的磁场密切相关,其计算相对其他损耗较为复杂,比如定、转子的加工工艺、铁磁材料等都会影响其大小,但对电机的定转子铁耗进行准确计算对电机温度场的分析十分重要^[16]。电机中定转子在正弦交变磁场的激励下会产生铁耗,其包括磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗^[12]。

对于单位质量的铁心损耗可表示为

$$P_{Fz} = P_c + P_h + P_e = K_c f B_m^2 + K_h (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (11)$$

$$f(K_1, K_2) = \sum [P_{vi} - (K_1 B_{mi}^2 + K_2 B_{mi}^{1.5})]^2 \quad (12)$$

$$\begin{cases} K_c = \pi^2 \sigma d^2 / 6 \\ K_h = (K_1 - K_c f_0^2) / f_0 \\ K_e = K_2 / f_0^{1.5} \end{cases} \quad (13)$$

式中: f 为磁场频率; B_m 为最大磁通密度; K_c 、 K_h 、 K_e 分别为涡流损耗系数、磁滞损耗系数和剩余损耗系

数; σ 为冲片的电导率; d 为冲片的厚度; P_{vi} 、 B_{mi} 为损耗曲线上的第*i*点数据; f_0 为损耗曲线实验的频率。

3.3 永磁体涡流损耗

本文采用的是内置式永磁同步电机,其永磁体放置在转子内部,散热较差,易发生高温退磁。因此,需要对永磁体涡流损耗进行准确预测,防止其对电机的运行造成影响。电机永磁体的涡流损耗的计算公式如下式所示^[17]。

$$P_{me} = \int_V \frac{J^2}{2\sigma} dv \quad (14)$$

式中: J 为涡流密度; σ 为电导率。

表2是在给定的仿真条件下,通过场路耦合模型计算出的电机损耗,从中可以看出,在基速工况和弱磁范围内,电机的铜耗都较小,且基本持平,但定转子铁耗和永磁体涡流损耗的变化范围较大,增加的明显。

表2 电机在基速工况和弱磁范围内的损耗

Table 2 Motor losses in base speed and weak field

转速状态	绕组铜耗	定转子铁耗	永磁体涡流损
	P_{cu}/W	P_{Fz}/W	耗 P_{me}/W
基速工况	43.7	494.1	154.5
弱磁范围内	42.8	900.7	300.1

4 永磁同步电机磁热耦合模型及温度场分析

4.1 电机磁热耦合模型

相对于电机的二维模型,三维模型能够更全面地对电机进行温度场分析。图7是PMSM三维仿真磁热耦合模型,由定子、转子、永磁体、绕组以及转轴组成。利用前文搭建的永磁同步电机场路耦合模型(图2)计算出不同工况的电机损耗,并将这些损耗导入到电机三维模型中,再进行电机温度场分析,形成电机的磁热耦合模型。

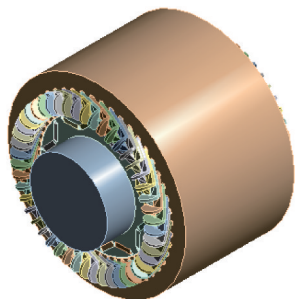


图7 永磁同步电机磁热耦合仿真模型

Fig.7 Magneto-thermal coupling simulation model of permanent magnet synchronous motor

4.1.1 热传导系数

电机材料的设置对于电机温度场计算至关重要,电机材料会随着电机温度的升高引起其自身材

料属性发生改变,进而影响电机的运行。常温25℃时,电机常用材料的导热系数如表3所示。

表3 电机材料导热系数

Table 3 Thermal conductivity of motor materials

电机结构	导热系数/(W·(m·k) ⁻¹)
硅钢片(DW310-35)	43
永磁体(NdFe35)	8.9
铜导线	416
转轴	61
空气	0.026
绝缘材料	0.31

(1) 绝缘材料的等效导热系数

绝缘材料的导热系数计算比较复杂,需要对其进行假设:绕组部分的绝缘层分布均匀,同时绕组的组内导线也分布均匀,不考虑电机运行时内部导线之间的温差^[18]。则电机内部绝缘材料的导热系数计算表达式为

$$\lambda_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (15)$$

式中: λ_{cp} 为绝缘材料的等效导热系数; λ_i 为各种材料的导热系数; δ_i 为绝缘材料等效厚度。

(2) 气隙的等效导热系数

计算气隙的导热系数时,假设以下条件:电机定子的内表面、转子的外表面都是理想的圆柱面,不考虑加工的影响。则气隙中的雷诺数计算公式为

$$Re = \frac{\nu \delta}{\mu} \quad (16)$$

式中: ν 为转子外圆周的圆周速度; δ 为气隙长度; μ 为空气黏度。

临界雷诺数的表达式如下

$$Re_{ecn} = 41.2 \sqrt{r_{st}/\delta} \quad (17)$$

式中 r_{st} 为电机定子内半径。

确定气隙的等效导热系数时,还需要判断气隙中空气处于层流状态还是紊流状态。当 $Re < Re_{ecn}$ 时,气隙的空气处于层流状态,气隙等效导热系数与空气相等。否则,气隙中的空气处于紊流的状态,此时气隙导热系数由下式计算^[19]

$$\lambda = 0.0019 \cdot \eta^{-2.9084} \cdot Re^{0.4614 \ln(3.333617)} \quad (18)$$

式中 η 为转子的外径和定子的内径之比。

4.1.2 换热边界对流系数

气隙对电机内部各部件间的传热有较大影响,其与转子外表面和定子内表面、槽楔之间存在热量对流传导;定子外表面与机壳之间也存在热量传递;这些接触面之间的对流系数对电机温升都有一定

影响。

气隙内表面与转子外表面之间的对流系数为^[20]

$$\lambda_{ar} = \frac{1 + 0.04v}{0.045} \quad (19)$$

式中 v 为转子表面的旋转线速度。

气隙外表面与定子内表面、槽楔之间的对流系数为

$$\lambda_{as} = 28(1 + \sqrt{0.45v}) \quad (20)$$

假设机壳初始温度与外界温度都为初始温度,则定子外边面与机壳之间的对流系数为

$$\lambda_m = \lambda_0(1 + k\sqrt{v_0}) \sqrt{\frac{\alpha}{25}} \quad (21)$$

式中: λ_0 为发热体在初始温度中的对流系数; v_0 为外界空气流动的速度; k 为初始温度空气流动效率; α 为机壳、空气初始温度。若机壳为自然冷却,则定子外表面与机壳之间的对流系数为

$$\lambda_m = 14 \sqrt[3]{\frac{\alpha}{25}} \quad (22)$$

4.2 温度场仿真

针对永磁同步电机温度场仿真,主要分基速工况和弱磁范围内两种工况下,通过场路耦合模型(图 2)计算出电机损耗,将电机损耗导入到电机三维温度场中,进行温度场计算仿真得到电机的温度场分布。电机场路耦合温度场仿真过程如图 8 所示。为使电机温度场达到稳态,仿真时间设为 1 800 s。

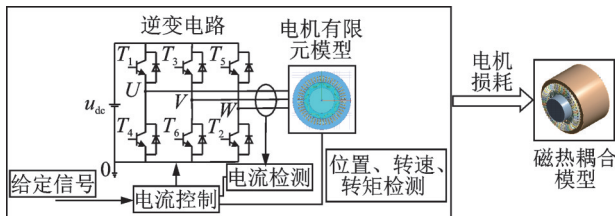


图 8 电机场路耦合温度场仿真流程图

Fig.8 Simulation flow chart of electric coupling temperature field

(1) 基速工况下电机温度场分析

图 9~12 分别是在基速工况下和弱磁范围内电机内整机及各部件温度场的变化。

(2) 弱磁范围内电机温度场分析

表 4 是对图 9~12 的总结。从表 4 中可以看出:电机在基速工况下的温度要低于电机在弱磁范围内的温度,可能是电机的定转子铁耗以及永磁体涡流损耗增加引起的。根据图 10、12 可以看出,电机各部件温度最高点一般都是出现在中间部位。电机温度最高点出现在绕组,出现这种情况的可能由于绕组部位的散热差。绕组散热主要通过两个途径:(1)从绕组端面散热,其散热面积较小;(2)通过定子再经

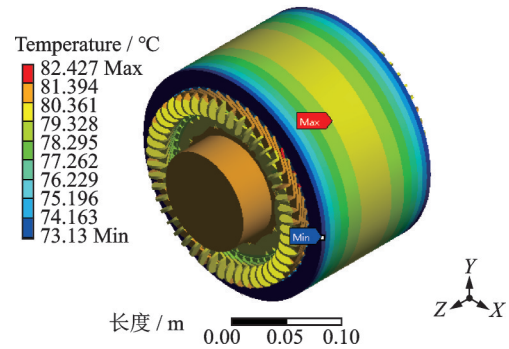
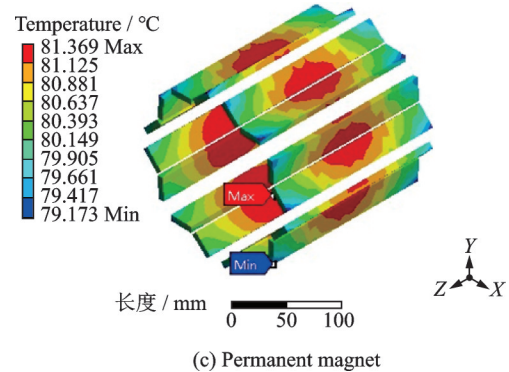
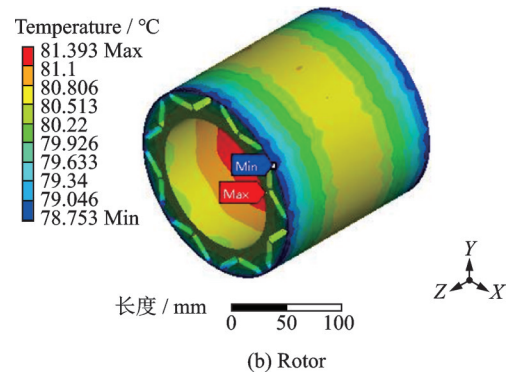
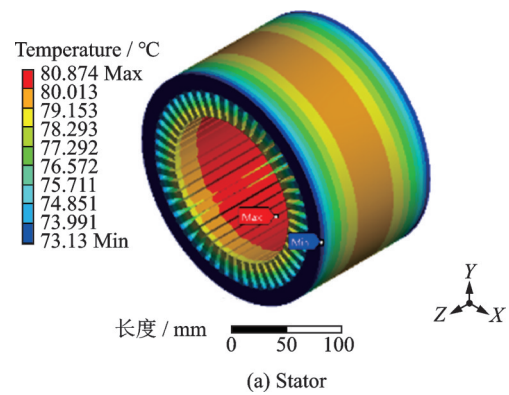


图 9 基速工况下电机整体温度场变化

Fig.9 Changes in the overall temperature field of the motor under base speed conditions



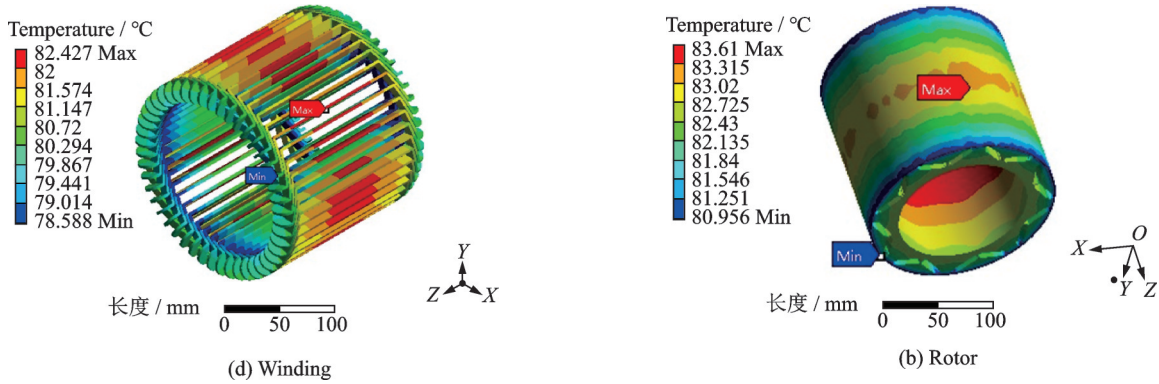


图10 基速工况下电机内部各部件温度场变化

Fig.10 Temperature field changes of various components inside the motor at base speed

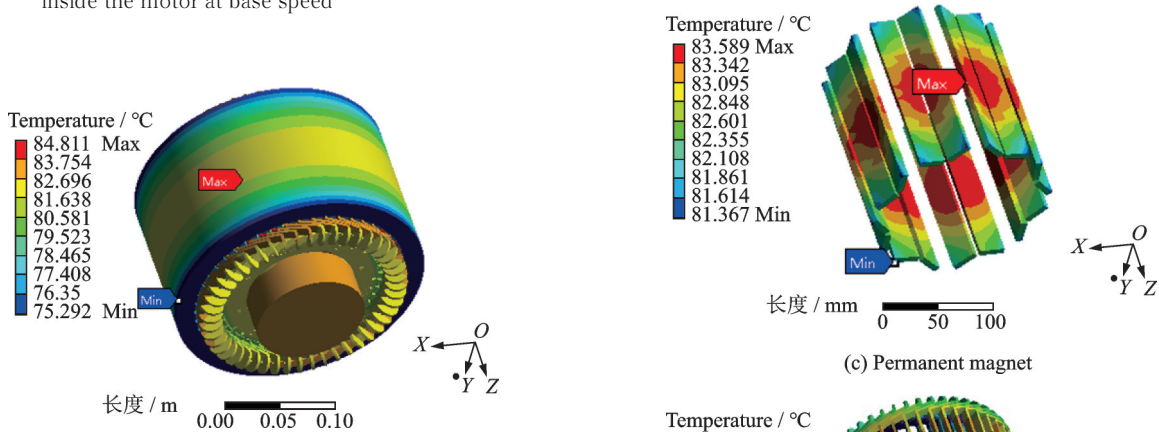


图11 弱磁范围内电机整体温度场变化

Fig.11 Changes in the overall temperature field of the motor in the field weakening range

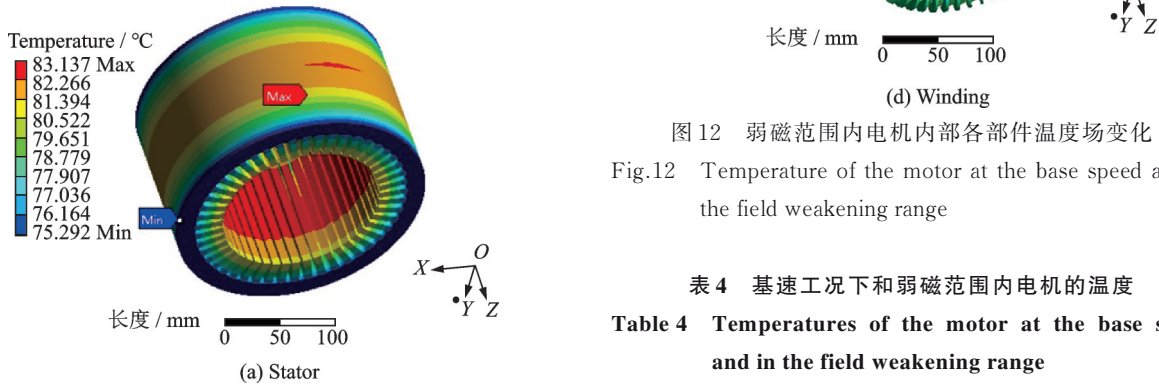


图12 弱磁范围内电机内部各部件温度场变化

Fig.12 Temperature of the motor at the base speed and in the field weakening range

表4 基速工况下和弱磁范围内电机的温度

Table 4 Temperatures of the motor at the base speed and in the field weakening range °C

不同转速状态	定子	转子	永磁体	绕组	电机整体温度
基速工况	73.1~80.8	78.7~81.3	79.1~81.3	78.9~82.4	73.1~82.4
弱磁范围内	75.2~83.1	80.9~83.6	81.3~83.5	80.8~84.8	75.9~84.8

过外壳将热量传递出去,散热路径太长,而且电机绕组的绝缘层传热系数比较小,热量传递出去较为困难。因此,电机的绕组温度要高于其他部位。同时可以看出定子的温度变化范围相比较于电机其他部位较大,这是由于定子与绕组相接触,且定子与外界环境接触较为密切,散热较快。

图13是基速工况和弱磁范围电机的温度变化曲线,从中可以得到结论:在基速工况下电机的温

度要低于弱磁范围内电机的温度。

5 实验验证

为进一步验证上述仿真计算结果,利用实验室

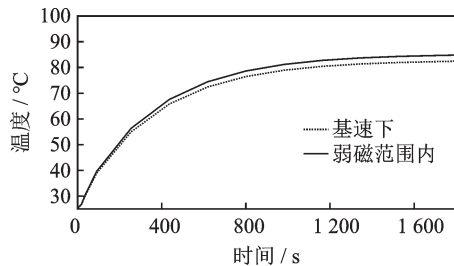


图13 基速工况和弱磁范围电机的温度变化曲线

Fig.13 Temperature change curves of the field weakening range motor under base speed operating conditions

设备搭建如图14所示的电机温升测试台架。台架主要由永磁同步电机、电机驱动箱、磁粉制动器、转速转矩传感器、上位机、转速转矩功率测量仪以及热成像仪等仪器组成。通过热成像仪测得电机在各个时段电机的温度,并将测量的温度绘制成电机的温升变化曲线,如图15所示。

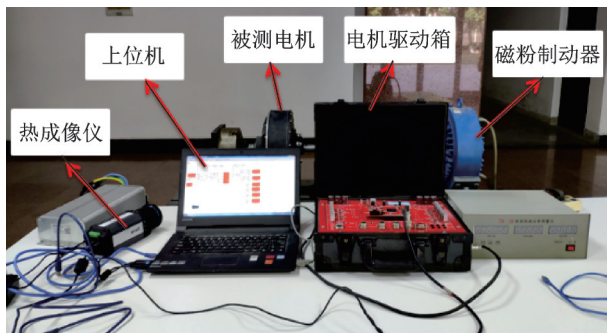


图14 电机台架

Fig.14 Motor stage

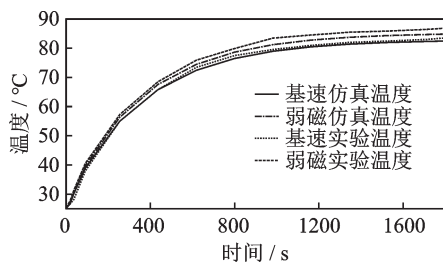


图15 基速工况和弱磁范围内电机仿真与实验的温度曲线图

Fig.15 Temperature curves of motor simulation and experiment in the base speed operating condition and the field weakening range

实验条件:基速工况,给定电机转速为1000 r/min;开始后0.12 s时给定电机加负载30 N·m;弱磁范围内,给定转速为5300 r/min,在0.6 s时给定负载30 N·m。通过实验获得电机在基速工况和弱磁范围内电机的温度变化。

图15是基速工况和弱磁范围内电机仿真与实验的温度曲线图,从中可以看出:在基速工况下,实验温度曲线图与仿真图变化趋势基本一致,误差在

5%以内,但在变化过程中,温升曲线有部分重合交叉的部分,可能的原因是:基速状态下,电机给定的转速较低,外界环境对电机的运行影响较小,因此,实验温度曲线与仿真曲线接近。在弱磁范围内,实验温度变化曲线图与仿真图变化趋势也基本一致,误差在10%以内,仿真的温升曲线在整个过程中要低于实验测得温升曲线,可能的原因是:弱磁范围内,电机给定转速较高,外界环境影响要高于低速状态下。总体上,仿真计算的结果与实验结果非常接近,表明本文提出的仿真模拟方法能够更逼近电机的实际温升变化。

6 结 论

本文采用场路耦合方法求解电机温度场,通过ANSYS Maxwell、ANSYS Simplorer软件搭建电机二维电磁场模型和外电路模型,利用MATLAB/Simulink搭建的电机控制策略,在基速工况下,采用MTPA方法控制电机的运行,在弱磁范围内,采用弱磁控制方法控制电机的运行,模拟电机在基速工况和弱磁范围内电机温度变化,经实验和仿真得到如下结论:

(1)采用场路耦合方法将电机本体与外电路结合在一起,可以考虑电机的控制策略对电机损耗的影响,使计算的损耗更加精确。

(2)电机在基速工况和弱磁范围内的损耗对比可以看出,绕组铜耗的变化较小,而定转子铁耗以及永磁体涡流损耗的变化较大。

(3)采用场路耦合方法将电机的外电路与电机本体结合在一起,能够精确地模拟电机的温度变化,计算出的电机温升与实验结果非常接近,验证了场路耦合方法求解电机的温度场可信,为精确求解电机的温度场提供了依据。

参考文献:

- [1] 王硕,康劲松,钟再敏,等.电动汽车用永磁同步电机转矩脉动抑制方法综述[J].电源学报,2016,14(5): 24-32.
WANG Shuo, KANG Jinsong, ZHONG Zaimin, et al. Overviews of torque ripple suppression method with permanent magnet synchronous motor used in electric vehicles[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14 (5): 24-32.
- [2] 朱永彬,林珍.电动汽车用永磁同步电动机弱磁研究综述[J].电气技术,2015(10): 1-7,67.
ZHU Yongbin, LIN Zhen. Summarization for flux-weakening performance of permanent magnet synchronous motors applied in electric vehicle[J]. Electrical Engineering, 2015(10): 1-7, 67.

- [3] 周晓燕,孙立翔,王金平.基于等效热网络法的永磁同步电机温升计算[J].微电机,2019,52(11):21-26.
ZHOU Xiaoyan,SUN Lixiang,WANG Jinping. Temperature rise calculation of permanent magnet synchronous motor based on equivalent heat network method [J].Micromotors,2019,52(11):21-26.
- [4] 韩雪岩,张华伟,贾建国,等.基于等效热网络法的轴向磁通永磁电机热分析[J].微电机,2016,49(4):6-10.
HAN Xueyan,ZHANG Huawei,JIA Jianguo, et al. Thermal analysis of axial flux permanent magnet motor based on equivalent thermal network method[J].Micromotors,2016,49(4):6-10.
- [5] XU Y, AI M, YANG Y. Heat transfer characteristic research based on thermal network method in submersible motor[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018, 28(3): e2507.
- [6] WANG D, LIANG Y, LI C, et al. Thermal equivalent network method for calculating stator temperature of a shielding induction motor[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 147: 106149.
- [7] 张帅,秦利燕,杨列宸.不同工况电动汽车轮毂电机磁场温度场分析[J].汽车实用技术,2018(19):1-4.
ZHANG Shuai,QIN Liyan,YANG Liechen. Temperature field analysis of hub motor of electric vehicle under different working conditions[J].Automobile Applied Technology,2018(19):1-4.
- [8] 汤劲松,胡梦凡,肖寅.电动汽车轮毂电机场路耦合协同仿真研究[J].内燃机与配件,2018(23):4-7.
TANG Jinsong,HU Menghua,XIAO Yin. Field-circuit coupling simulation of electric vehicle in-wheel motor[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2018 (23): 4-7.
- [9] 陈博,王淑红.基于场路耦合的永磁同步电机性能分析[J].电机与控制应用,2020,47(3):45-50.
CHEN Bo,WANG Shuhong. Field-circuit coupled performance analysis of permanent magnet synchronous motor[J].Electric Machines & Control Application,2020,47(3):45-50.
- [10] 李昂,邓承浩,尹福利,等.基于磁-热耦合的永磁同步电机冷却系统优化[J].微特电机,2019,47(5):12-16.
LI Ang,DENG Chenghao,YIN Fuli, et al. Optimization of cooling system of permanent magnet synchronous motor based on magneto-thermal coupling method[J].Micromotors,2019,47(5):12-16.
- [11] WU J, WANG J, GAN C, et al. Efficiency optimization of PMSM drives using field-circuit coupled FEM for EV/HEV applications[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15192-15201.
- [12] LIU G, LIU M, ZHANG Y, et al. High-speed permanent magnet synchronous motor iron loss calculation method considering multiphysics factors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5360-5368.
- [13] LUU P T, LEE J Y, LEE J H, et al. Electromagnetic and thermal analysis of a permanent magnet motor considering the effect of articulated robot link[J]. Energies, 2020, 13(12): 3239.
- [14] CHAN T F, LAI L L, YAN L T. Analysis of a stand-alone permanent-magnet synchronous generator using a time-stepping coupled field-circuit method[J]. IEE Proceedings: Part B, Electric Power Applications, 2005, 152(6): 1459-1467.
- [15] 孙立翔,周晓燕.永磁同步电机的损耗分析[J].电工技术,2019(20):159-161.
SUN Lixiang,ZHOU Xiaoyan. Loss analysis of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Engineering, 2019(20): 159-161.
- [16] 佟文明,孙静阳,段庆亮,等.永磁同步电动机空载铁耗研究[J].电机与控制学报,2017,21(5):51-57.
TONG Wenming,SUN Jingyang,DUAN Qingliang, et al. No-load iron loss of permanent magnet synchronous motors[J].Electric Machines and Control, 2017, 21(5): 51-57.
- [17] 张洪兵,杨思雨,康娟,等.纯电动客车用高速永磁轮边电机损耗分析方法研究[J].微电机,2019,52(5):11-15.
ZHANG Hongbing,YANG Siyu,KANG Juan, et al. Loss analysis method of high speed permanent magnet wheel edge motor for electric bus[J]. Micromotors, 2019,52(5): 11-15.
- [18] 张琪,鲁茜睿,黄苏融,等.多领域协同仿真的高密度永磁电机温升计算[J].中国电机工程学报,2014,34(12):1874-1881.
ZHANG Qi,LU Xirui,HUANG Surong, et al. Temperature rise calculations of high density permanent magnet motors based on multi-domain cosimulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (12) : 1874-1881.
- [19] 侯富余.高速永磁同步电机转子结构对多物理场的影响研究[D].北京:北京交通大学,2019.
HOU Fuyu. Influence of rotor structure of high-speed permanent magnet synchronous motor on multi-physics field[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [20] 王琳.离心机用高速永磁同步电机温度场及水冷分析[D].长沙:湘潭大学,2018.
WANG Lin. Analysis of temperature field and water cooling of high speed permanent magnet synchronous