

基于多软件联合的车用电机变工况 多物理场仿真方法

贾美霞, 胡建军, 肖 凤

(重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

摘要:提出了一种基于多软件联合的车用电机变工况多物理场仿真方法,结合有限元及集总参数法可以实现有限元及变工况仿真的同时进行,从而使仿真过程更加接近实际工作过程。在分析电机温度场和电磁场的基础上,分解多物理场耦合的数学模型,利用 Maxwell-Simplorer-Simulink 建立了多软件联合仿真模型,并利用等效电流抽取方法对有限元模型进行降阶,大大提高了模型的运算速度。本文的联合仿真模型为完全耦合模型,可以实现不同软件模型之间的数据交互传递,从而实现电机在不同工况下的瞬态仿真。采用本文联合仿真方法,可以同时获得多个物理场的同步仿真,实现联合仿真模型的实时数据交互,避免非完全耦合模型模拟过程因不同步而产生的误差。最后,通过试验对电机输出转矩进行验证,模型与试验两者之间的转矩误差小于 3%,证明了该多场耦合多软件联合仿真方法的有效性和准确性。

关键词:车辆工程;多物理场耦合;等效电流抽取方法;联合仿真模型

中图分类号:TM341 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)06-1862-11

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230968

Multi-physics simulation method of vehicle motor under varying working conditions based on multi-software combination

JIA Mei-xia, HU Jian-jun, XIAO Feng

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A multi software based multi physics simulation method for automotive motors under variable operating conditions was proposed. By combining finite element and lumped parameter methods, both finite element and variable operating condition simulations can be carried out simultaneously, making the simulation process closer to the actual working process. On the basis of analyzing the temperature field and electromagnetic field of the motor, a mathematical model coupling multiple physical fields was decomposed. A multi software joint simulation model was established using Maxwell Simplorer Simulink, and the finite element model was reduced using the equivalent current extraction method, greatly improving the computational speed of the model. The joint simulation model is a fully coupled model that can achieve data exchange and transmission between different software models, thereby realizing transient simulation of

收稿日期:2023-09-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(52172364).

作者简介:贾美霞(1982-),女,博士研究生.研究方向:新能源汽车电机设计及控制.E-mail:jiameixia23@163.com

通信作者:胡建军(1973-),男,教授,博士.研究方向:新能源汽车电驱动.E-mail:hujianjun@cqu.edu.cn

the motor under different operating conditions. By using the joint simulation method, synchronous simulations of multiple physical fields can be obtained simultaneously, enabling real-time data exchange of the joint simulation model and avoiding errors caused by asynchronous simulation of non fully coupled models. Finally, the output torque of the motor was verified through experiments, and the torque error between the model and the experiment was less than 3%, proving the effectiveness and accuracy of the multi field coupled multi software joint simulation method.

Key words: vehicle engineering; multi-physics coupling; equivalent current extraction method; joint simulation method

0 引言

永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)工作时受电磁场、温度场及机械场的相互作用而呈现强非线性^[1]。工作过程中电机损耗使电机温度升高,造成永磁体失磁和绕组绝缘层熔化等后果,严重影响电动汽车行驶的可靠性和安全性^[2]。目前常用的电机温升计算方法主要是有限元法^[3]。有限元法可获得电机求解区域内电磁场、温度、损耗等的分布,仿真结果直观清晰且仿真精度很高^[4],文献[5-7]均应用有限元方法分别对电机的电磁-热单向耦合热性能以及温升分布特性进行了分析。但是,有限元法计算对硬件的要求较高,且无法实现变工况连续仿真。集中参数法可以实现变工况的连续仿真。目前控制策略的研究基本为集中参数方法^[8],集中参数方法一般假定在电机工作过程中电磁参数是恒定的,这与电机的实际工作过程不相符^[9,10]。为此,有的策略通过电磁参数辨识对电机进行控制,但基本忽略了温度变化对电磁参数的影响^[11]。为了提高控制策略的动态特性,有的学者采用动态内模解耦^[12]、超前角控制^[13]等方法,但是建模过程均未考虑电磁参数随温度的变化。

针对单个仿真软件和单个物理场仿真方法的不足,本文基于多软件联合仿真,建立了某款在用电机的多软件多物理场联合仿真模型。通过等效电流抽取(Equivalent circuit extraction, ECE)方法对有限元模型进行降阶建立ECE模型,可以大大提高模型仿真速度,然后通过Simplorer的外部主电路模型与Simulink中建立的电机MTPA控制策略联合,此联合仿真模型可实现多物理场及多个软件之间的完全耦合,完成有限元电磁场及变工况控制策略的同步仿真。最后通过电机台架试验对模型的精度和有效性进行了验证。通过多软

件联合仿真方法可实现变工况运行过程电磁场及控制策略的同步仿真,更加接近电机的实际运行状态,可以用于电机及电驱动系统设计、改进及验证,以减少产品开发试验次数,节省开发费用。

1 永磁同步电机参数

本文所分析的电机为某款车型上在用的分数槽永磁同步电机,其具体参数如表1所示。

表1 电机参数

Table 1 Motor parameters

参数	值	参数	值
极对数	4	母线电压/V	380
相数	3	永磁体材料	N35UH_100
槽数	42	铁芯材料	B35AV1900
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	绕组材料	铜
峰值功率/kW	70	峰值扭矩/(N·m)	201
额定功率/kW	25	额定扭矩/(N·m)	90

2 电机多物理场耦合模型建模

2.1 电机工作过程中的电磁损耗

2.1.1 铜损

永磁同步电机中绕组的直流铜损功率主要与通过的相电流和绕组电阻有关,其计算公式为:

$$P_{Cu} = mI^2R \quad (1)$$

式中: m 为电机的相数,本次电机模型中 $m=3$; I 为流过绕组的电流值; R 为每相绕组的直流相电阻,其随温度的变化为:

$$R = \frac{R_0(235 + T)}{235 + T_0} \quad (2)$$

式中: R_0 为温度是环境温度 T_0 时绕组的电阻。

本次试验开始的环境温度为29℃,即 $T_0=29℃$,可以得到:

$$R = R_0(0.89 + 0.0037879T) \quad (3)$$

由式(3)可知,铜损是温度的线性函数,随温度升高而不断增大。

随着电机设计及运行转速越来越快,工作电流的频率也越来越高,电流的集肤效应也越来越严重。集肤效应的透入深度为:

$$\delta_c = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma u}} \quad (4)$$

式中: f 为工作电流频率; σ 为绕组的电导率; u 为绕组的磁导率。

集肤效应使绕组电流的流通面积减小,增大了绕组的电阻而增加了交流附加铜损。附加铜损的计算公式为:

$$P_{C_{u,Ad}} = \frac{B^2 \omega^2 n d^2 l}{32 \rho \delta_c} \quad (5)$$

式中: B 为绕组处的磁密; ω 为电机的转速; d 和 l 分别为绕组导线的直径和长度; n 为导线的股数; ρ 为绕组的电阻率。

电机工作过程中,考虑永磁同步电机磁路、定子槽结构及绕组排布的复杂性,相比于其他方法,有限元建模得到的电机铜损更为准确。

2.1.2 铁耗

外界环境变化时,铁磁材料内部的微观结构会发生变化而产生损耗。永磁同步电机运行过程中,铁芯因旋转交变的磁场而产生铁耗。目前,电机铁耗计算方法一般采用 Bertotti 提出的铁耗分立三项式模型,表达式如下:

$$P_{Fe} = K_h f B_m^\alpha + K_e f B_m^2 + K_a f B_m^{1.5} \quad (6)$$

式中: K_h 和 α 为磁滞损耗系数,与材料特性有关; K_e 为涡流损耗系数; K_a 为附加损耗系数; B_m 为磁感应强度幅值。

铁磁材料的涡流损耗和磁滞损耗随着温度呈非线性变化。

2.1.3 永磁体涡流损耗

当电机高频工作时,还有一类不可忽视的损耗就是永磁涡流损耗。PMSM的永磁涡流损耗产生的原因主要有3种:一是由于永磁磁场旋转过定子开槽时磁路磁阻发生变化而引起的涡流损耗;二是绕组不对称性造成空间谐波磁场变化产生的涡流损耗;三是由于IGBT高频供电产生的高次谐波磁场中含有大量的空间和时间谐波。高频电磁场在永磁体单位体积内产生的涡流损耗可表示为:

$$P_M = \frac{1}{8} V \sigma_p \omega^2 b B_{av}^2 \Delta \frac{\sinh \frac{b}{\Delta} - \sin \frac{b}{\Delta}}{\cosh \frac{b}{\Delta} - \cos \frac{b}{\Delta}} \quad (7)$$

式中: V 为永磁体的体积; σ_p 为永磁体的电导率; ω 为电机的电角速度; b 为垂直于磁场方向的永磁体的厚度; B_{av} 为穿过永磁的平均磁密; Δ 为涡流在永磁体上的透入深度,其计算公式为:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega u \sigma}} \quad (8)$$

目前,与理论模型相比,有限元方法减少了对诸多影响因素的忽略,是计算永磁体涡流损耗最合适的方法^[14]。

2.2 电机电磁场数学建模

电机电磁场的计算一般是对具有特定边界条件的偏微分方程进行求解。永磁同步电机的电磁特性基于麦克斯韦方程组,采用微分方程和有限元离散形式,将电磁场计算转化为矩阵求解。

麦克斯韦方程组的微分形式如下:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{J}}{\partial x} \\ \nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial x} \\ \nabla \times \vec{D} = \rho_A \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: \vec{H} 为磁场强度; J 为电流密度; \vec{E} 为电场强度; \vec{D} 为电位移矢量; ρ_A 为电荷密度。

介质的本构关系为:

$$\begin{cases} D = \epsilon H \\ B = \mu H \\ J = \sigma E \end{cases} \quad (10)$$

式中: ϵ 为介电常数。

2.3 永磁同步电机的有限元模型

随着温度的变化,电机的电磁参数也发生变化。图1为不同频率下B35AV1900材料的铁耗

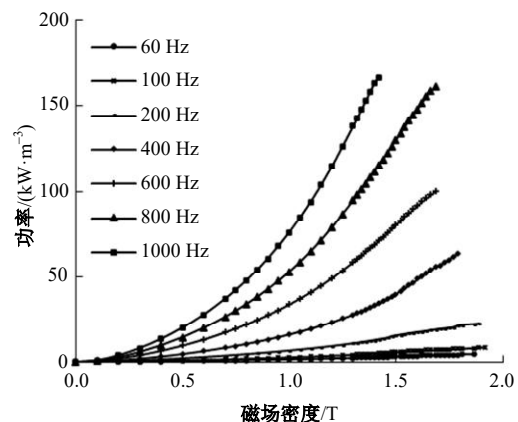


图1 硅钢片的铁耗

Fig. 1 Iron consumption of silicon steel

随磁场密度变化曲线,可以拟合得到式(6)中各个系数。

2.4 电机不同温度时的内部磁场仿真

通过有限元模型设置电机各部件的温度,获得不同温度时电磁场磁感应强度和矢量磁位的分布云图以及铁耗云图分别如图 2 和图 3 所示。

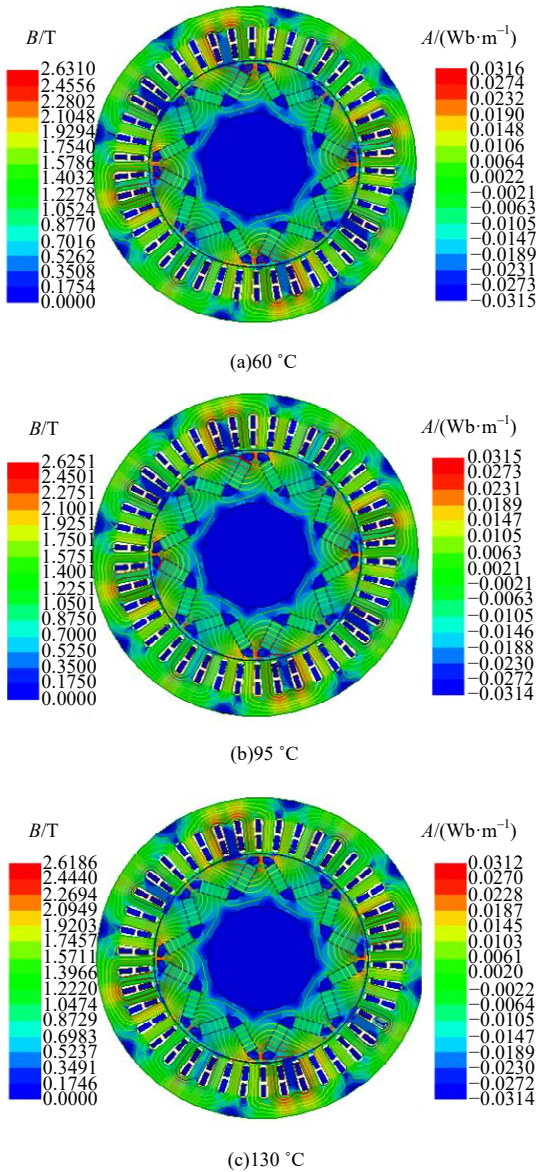


图 2 磁感应强度和矢量磁位的分布云图

Fig. 2 Distribution of magnetic induction intensity and vector magnetic potential

由图 2 可知,在靠近气隙一侧的永磁体端部存在漏磁并出现磁饱和。定子轭部部分区域也出现了磁饱和,这些结果可以为电机结构设计及改进提供依据。图 3 表示的是 3 个温度时电机的铁耗分布云图,由图可以看出转子侧靠近定子齿槽轭部的铁芯损耗最大,相比于转子侧,定子铁芯的

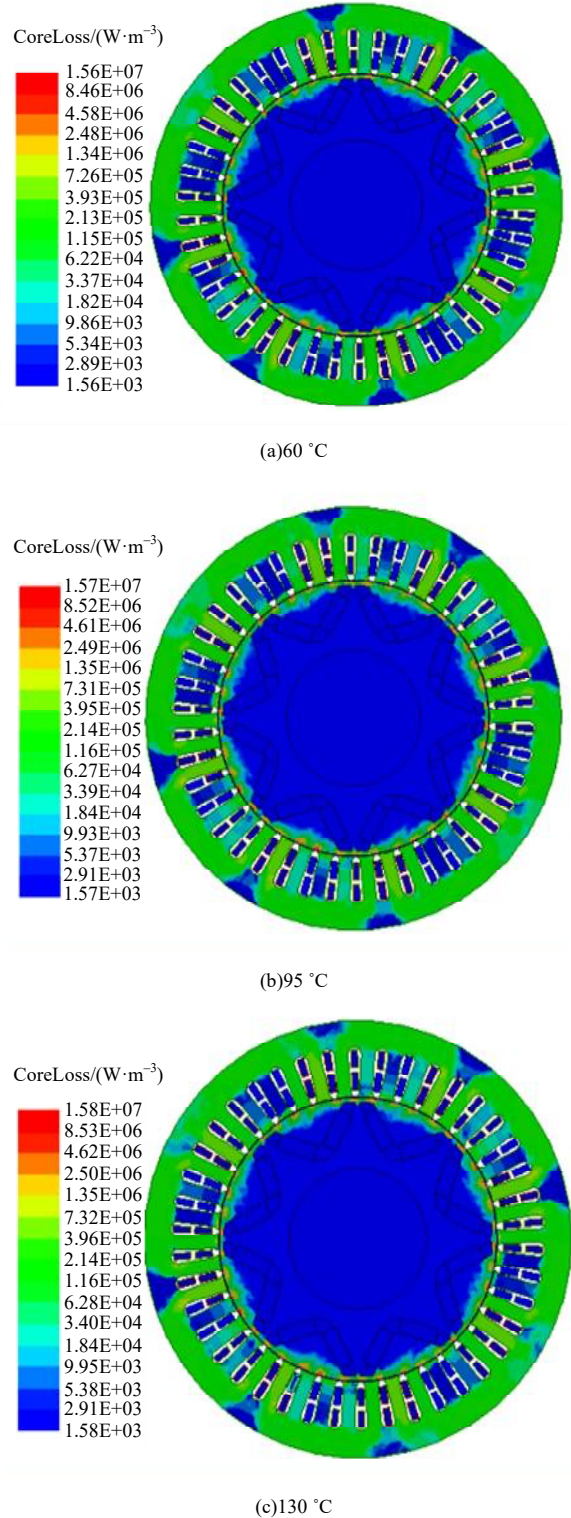


图 3 不同温度下电机铁耗的分布云图

Fig. 3 Distribution cloud of motor iron consumption at different temperatures

铁耗明显较高。这主要是因为定子绕组通过电流时在定子上产生的交变磁场主要作用于定子,同时变频供电时产生的大量谐波将在定子铁芯内产生大量的涡流损耗,而在转子侧主要为永磁体的

涡流损耗,其值较小。不同温度时的电机磁密、磁矢位及铁耗的最大值对比如表 2 所示。

表 2 不同温度时的电磁参数最大值

Table 2 Maximum value of electromagnetic parameters at different temperatures

参数	60 °C	95 °C	130 °C
磁密/T	2.631 0	2.625 1	2.618 6
磁矢位/(Wb·m ⁻¹)	0.031 6	0.031 5	0.031 2
铁耗率/10 ⁷ (Wb·m ⁻¹)	1.56	1.57	1.58

由图 2、图 3 和表 2 可知,随着温度升高,电机的磁感应强度、矢量磁位分布基本相同,但其数值随着温度升高而降低。铁耗则随着温度升高不断增加。在相同转速情况下,随着温度升高,电机的磁感应强度降低和铁耗增加都会影响电机的输出能力。

有限元模型可以实现电磁-温度场的有效仿真,其获得的随温度变化的电磁参数可以为后续的集中参数模型提供数据。有限元虽然对电磁场分布具有强大的计算能力和很高的计算精度,但无法实现变工况模拟,也无法反映控制策略对电机实际工作过程的影响。为了实现电机控制策略的仿真,研究人员一般选择在 Simulink 中建立电机的集中参数模型,并设计电机的控制策略来模拟仿真电机的变工况运行过程。

3 电机控制策略分析

本文基于有限元仿真可以得到电磁参数随温度的变化规律,并计算得到电机的实时损耗和实际电流表现,将其以数据流的形式传递给电机数学模型可以有效减少电机假设,提高仿真分析与实际工作过程的接近程度。现有研究在建立电机数学模型时都采用同步旋转坐标系,此时定子电压方程可以表示为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dx} i_d - \omega L_d i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dx} i_q + \omega(L_q i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (11)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为电机 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为电机 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为电机 d 、 q 轴定子电感; ψ_f 为永磁体磁链。

在同步旋转坐标系下,永磁同步电机的电磁转矩可以写作:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (12)$$

式中: p_n 为极对数。

电机输出特性除受本身电磁特性的影响,还受到逆变器提供的电压和电流的限制。在限制的电压和电流范围内,控制电机使其输出特性满足以最小的定子电流矢量输入获得最大输出转矩的控制方法为最大转矩电流比控制(MTPA 控制)。由于电流矢量的大小与永磁同步电机运行过程中的铜损、铁耗直接相关,该控制方法也被认为是损耗最小控制。本文建模过程采用的也是 MTPA 控制策略。若要实现 MTPA 控制,电机的电流矢量应满足如下方程:

$$\begin{cases} \min i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\ \text{cons. } T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (13)$$

由于逆变器元件的承载电流能力和运行温度的限制,逆变器的电流供给能力存在极限值,因此,电机定子目标电流存在如下约束:

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq i_{im} \quad (14)$$

式中: i_s 为永磁同步电机的定子电流矢量; i_{im} 为电机最大电流限值。

利用数学中的拉格朗日定理,引入辅助函数以求得参数的极值,拉格朗日方程式为:

$$H = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} + \lambda \left\{ T_e - \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \right\} \quad (15)$$

对参数求极值可得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial i_d} = \frac{i_d}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} + \frac{3}{2} \lambda p_n (L_d - L_q) i_q = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial i_q} = \frac{i_q}{\sqrt{i_d^2 + i_q^2}} - \frac{3}{2} \lambda p_n [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial \lambda} = T_e - \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = 0 \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)作为转速环的输出计算,得到的便是某一转矩对应的最小 d 、 q 轴电流。根据式(1),减小电流可以有效减小电机铜损。

电机集中参数模型在建模过程中进行了很多假设,未考虑电磁损耗的影响,以及电磁参数随温度变化对电机控制精度的影响。因此,无法反映电磁参数随温度的变化规律,对电磁损耗的忽略也会造成电机实际过程与模拟结果的差异。为了得到电机工作过程中的电磁参数变化,利用有限元和集中参数联合建模将是一种行之有效的方法。

4 Maxwell-Simplorer-Simulink联合仿真降阶模型建模

4.1 联合仿真的物理基础及建模

传统的集中参数PMSM数学模型具有仿真速度快、能分析复杂工况和控制策略控制效果等优点,但其建模过程忽略温度变化、铁芯饱和、交叉耦合、涡流损耗等影响因素,因此,无法精确模拟电机实际工作过程。有限元方法可以将温度变化、铁芯饱和、交叉耦合等影响因素考虑在内,可模拟分析电机电磁-热耦合下的电磁特性并获得相应分布,但有限元计算对计算机硬件要求较高,计算工作量大,仿真耗时长,也不能实现变工况仿真以及反映控制策略对电机运行过程的影响。但电机实际运行过程是多物理场相互作用、相互影响的过程。电机性能的好坏受本身电磁参数的影响,也受控制策略的影响。电机运行过程中绕组电流流过时气隙中产生的磁场满足:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{u} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = - \left(J - \sigma \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (17)$$

式中: x 、 y 为二维直角坐标轴。

该磁场是由绕组电流和永磁体共同产生的。电机运行过程中的电路方程如下:

$$Ri_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \frac{L}{S} \left(\iint_{\alpha^+} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega - \iint_{\alpha^-} \frac{\partial A}{\partial t} d\Omega \right) = u_s \quad (18)$$

电磁场产生的能量最终会以机械能的方式传递给传动机构,以起到电机动力机械的作用,电机工作过程中的机械运动方程可写为:

$$\begin{cases} J_m + \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_l \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \end{cases} \quad (19)$$

式中: J_m 为转动惯量; T_l 为负载转矩; θ_m 为转子的电角度。电机运行过程中的能耗除对外做的机械功外,其余功耗全部转化为热量使电机各零部件出现不同程度的温升。工作过程中电机内部的热平衡方程可写为:

$$\Phi_i = cM \frac{d(\Delta T)}{dt} + \alpha_i A_1 (\Delta T) \quad (20)$$

式中: Φ_i 为某个部件所产生的热量,即某个部件所产生的损耗; A_1 为部件表面的散热面积; α_i 为表面的散热系数; ΔT 为部件的温升; M 为部件的质量; c 为部件材料的比热容。

为了实现模型有限元及控制策略的同步仿真,将有限元模型(FEA模型)每次采样时间内获得的电磁转矩、转速、电流、电压及磁通等参数通过两个模型链接端向Simulink模型进行传递,通过Simulink的电机集中参数模型对电机的性能进行动态仿真,得到的逆变器开关控制参数用于实现对电机外电路模型的电流进行控制,通过外电路调制获得三相电流并最终返回给有限元模型。

利用上述模型对多软件耦合模型进行建模,并合理设置两个软件之间的数据接口,可以实现多软件的联合仿真。为了缩短有限元模型的计算时间,通过对不同电流、转子位置的扫描,建立电流、位置和磁链、转矩之间的映射关系,以计算外部激励及运动部件位置组合的场量数据,将该映射关系做成查询表格后形成等效的电路模型(ECE模型),实现有限元模型的简化处理,对有限元计算进行有效的降阶。结合多物理场模型方程之间的相互关联及数据交互需求,建立了Maxwell-Simplorer-Simulink联合仿真降阶模型,其结构如图4所示。

ECE模型是对有限元模型的降阶,为了验证ECE降阶模型的仿真精度,将图4的电机ECE模型替换为未降阶的有限元模型后进行了两次仿真对比。仿真温度设置为25℃,Simulink模型的仿真时间为80ms,时间步长为10μs,转速为2000r/min,负载为20N·m。两次在同一台计算机上进行,采用ECE降阶模型的仿真耗时为48.6s,而Maxwell未降阶模型的仿真耗时为13056s,ECE模型比有限元模型快268倍,证明ECE模型可以大大缩短系统仿真时间,模型的仿真精度对比结果如图5所示。

由图5可以看出,用ECE降阶模型的转矩转速输出与有限元模型吻合,因此,使用ECE降阶模型可以大幅缩短仿真时间,并能保证仿真精度。

4.2 Maxwell-Simplorer-Simulink联合仿真分析

本文搭建的Maxwell-Simplorer-Simulink联合降阶模型充分利用有限元分析精度高和Simulink可实现控制策略仿真的优势,在有限元模型降阶不影响精度的情况下,大大缩短仿真时间。采用Simplorer作为中介,利用其与Maxwell、Simulink良好的连接特性,实现了对电路、磁场及控制策略的联合仿真。联合仿真模型通过Simulink模型的工况(转速及负载)设定,将控制得到的IGBT开关信号送至Simplorer主电路的IGBT

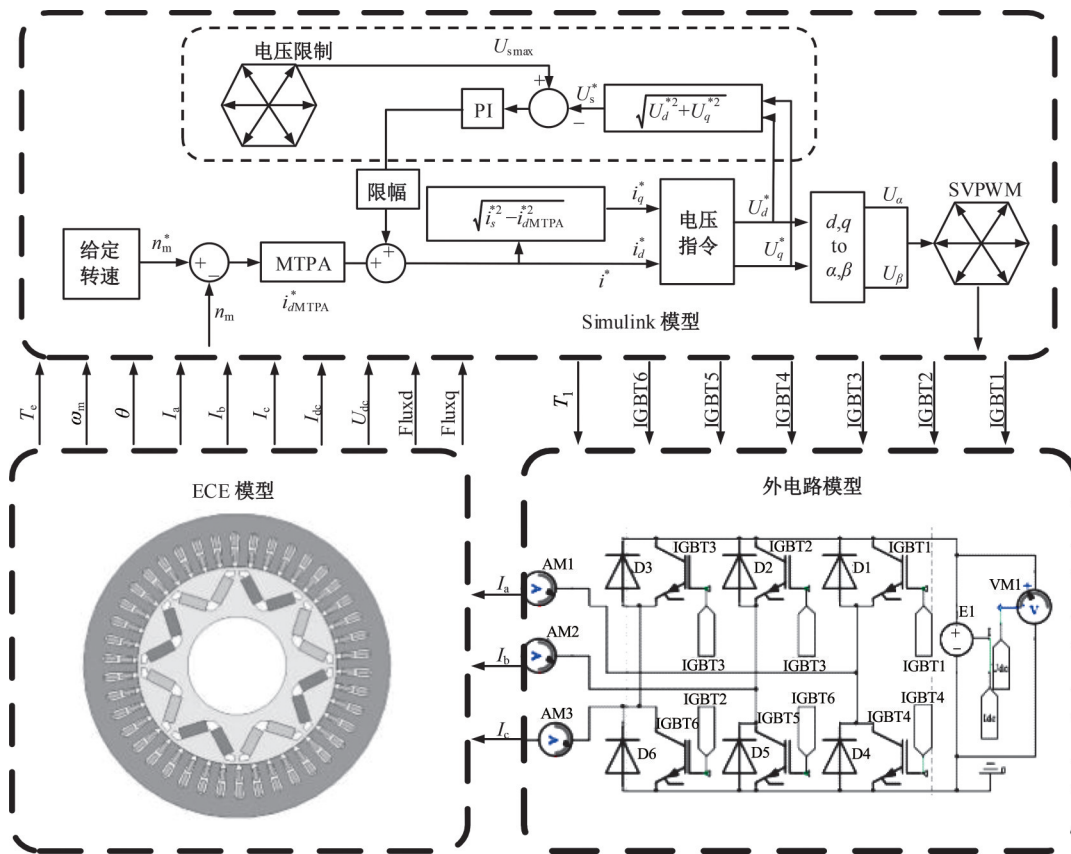


图 4 Maxwell-Simplorer-Simulink 联合模型
Fig. 4 Maxwell-Simplorer-Simulink joint model

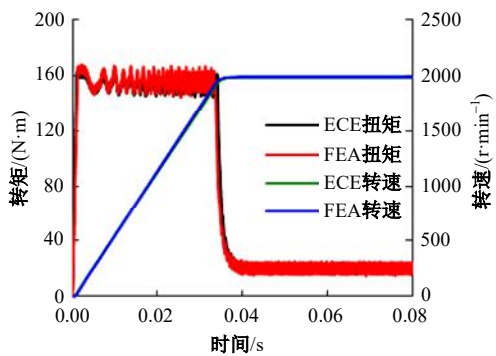


图 5 转矩及转速对比
Fig. 5 Comparison of torque and speed

中,实现对 IGBT 的开关控制并得到电机所需电流。电流通过 Simplorer 与 Maxwell 接口输入 ECE 降阶电磁模型中,通过电磁分析得到电机的转子位置、电磁转矩、磁链等信号并实时传递至 Simulink 中的控制模型。控制模型再次计算 IGBT 信号,如此往复可实现整个电机系统的动态联合仿真。联合仿真既能对电机的本体性能进行仿真,利用磁场云图及瞬态结果展示电机的场域特性,分析电磁性能随温度的变化情况;又能同时实现控制策略的仿真,模拟变工况工作过程,评估

控制策略的优劣并为改进控制策略提供参考。

通过上述联合仿真模型可以得到变工况运行时电磁参数。在 Maxwell 中设定电机各部分的温度为 25 °C,在 Simulink 中设定的电机运行工况如下:电机的初始目标转速为 2 500 r/min,负载转矩为 80 N·m;0.2 s 后目标转速为 4 000 r/min,负载转矩为 40 N·m,总的仿真时长为 0.5 s。从 Simulink 模型可以得到电机设定运行工况的转速和转矩如图 6 所示。

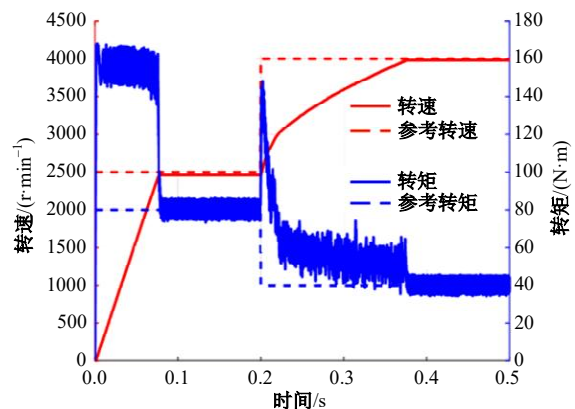


图 6 电机变工况瞬态数据
Fig. 6 Transient data of motor of transient process

IGBT 控制信号从 Simulink 模型传递至 Simplorer 外电路模型中,控制 Simplorer 主电路中开关的通断,产生相应的三相电流并传递给 ECE 模型。ECE 模型则主要是输出与运行工况相对应的电磁及损耗数据,在上述变工况条件下,得到的电机铜损和铁耗分别如图 7 和图 8 所示。

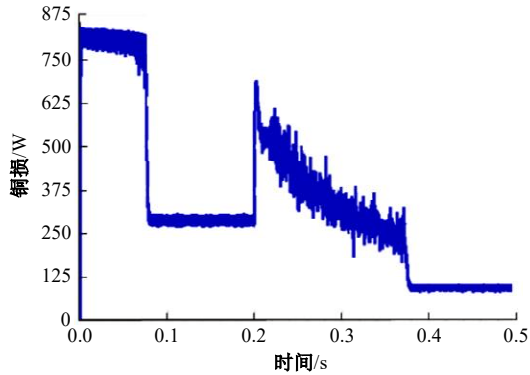


图 7 设计工况的铜损

Fig. 7 Copper loss under design conditions

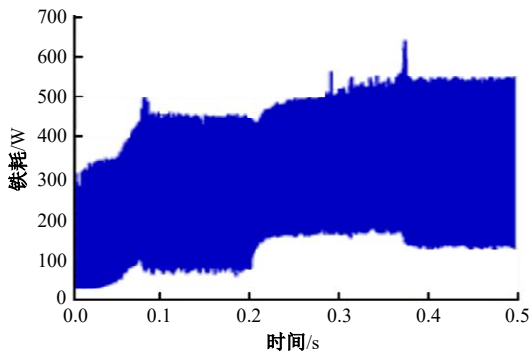
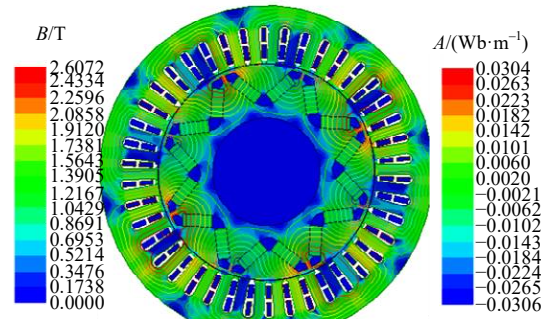


图 8 设计工况的铁耗

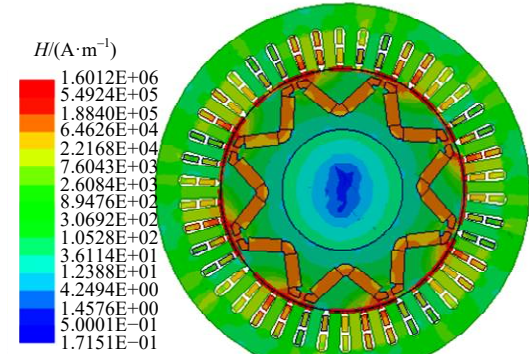
Fig. 8 Iron loss under design conditions

由图 7 可知,启动过程中电机的铜损较大,启动过程电机所需电流大,铜损是电流的二次函数,所以也较大。同理,在工况由 2 500 r/min 上升至 4 000 r/min 的过程中,电流波动较大导致铜损的波动也较大。而铁耗是频率和磁场密度的函数,由图 8 可知,随着转速变化,磁场频率发生变化导致铁耗发生变化,说明本文模型动态仿真效果较好。

由图 6~图 8 可以看出,电机运行过程中受电流齿槽转矩及电流谐波影响,电机运行电磁转矩存在较大波动。与集中参数模型不同的是,联合仿真过程减少了对模型的假设,更加接近电机的实际工作过程。与此同时,利用联合模型还可以得到不同工况时的电磁场分布,2 500 r/min、80 N·m 和 4 000 r/min、40 N·m 稳态运行时的磁场分布如图 9 和图 10 所示。



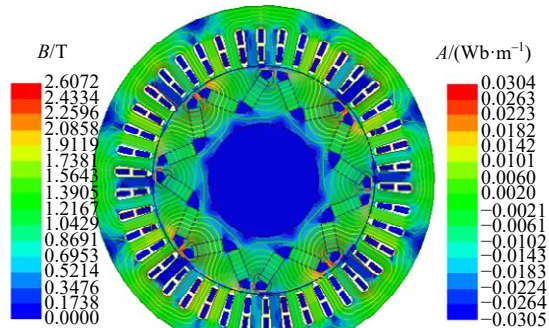
(a)磁密及矢量磁位云图



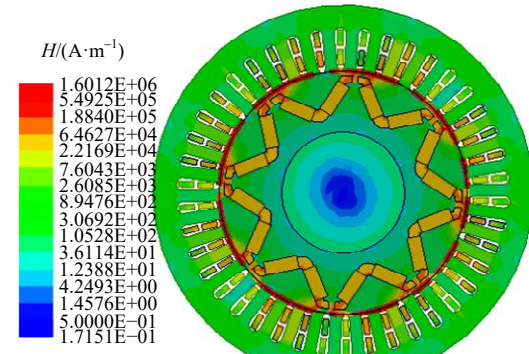
(b)磁场强度云图

图 9 2500 r/min 时的电机电磁场分布

Fig. 9 Motor electromagnetic field distribution at 2500 r/min



(a)磁密及矢量磁位云图

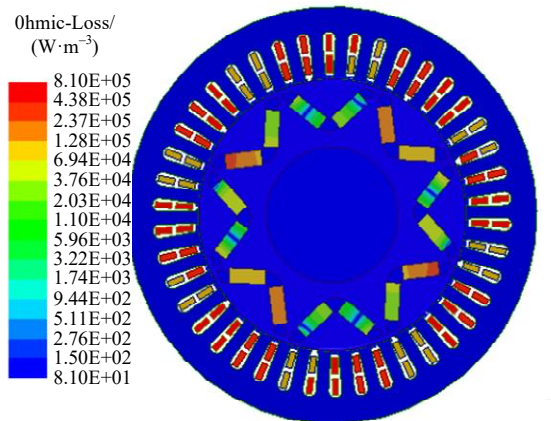


(b)磁场强度云图

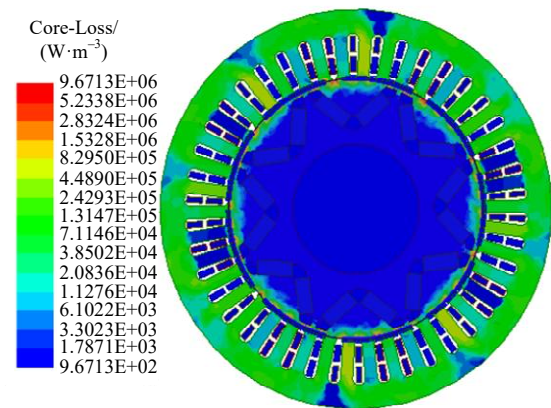
图 10 4 000 r/min 时的电机电磁场分布

Fig. 10 Motor electromagnetic field distribution at 4 000 r/min

由图 9 和图 10 磁场分布云图对比可知,与 4 000 r/min、40 N·m 工况运行相比,2 500 r/min、80 N·m 运行时的电机磁场密度及磁场强度比较高,转子中永磁体的磁场强度明显较高,这是因为 2 500 r/min、80 N·m 工况的需求扭矩较大,因此需要较大的电流来实现。同时,除可以得到与电机运行工况相对应的损耗曲线外,利用该多软件联合多物理场仿真方法还可以得到每个运行工况的损耗具体分布云图,如图 11 和图 12 所示。



(a)铜损分布云图



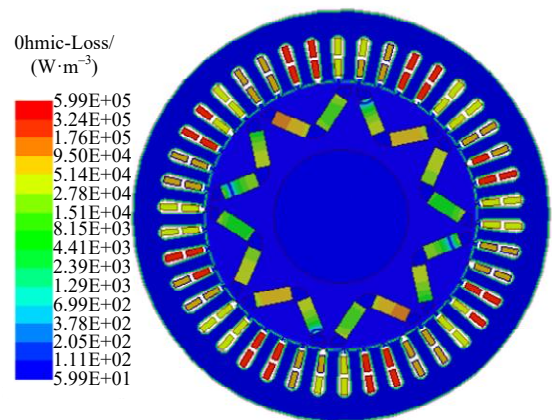
(b)铁耗分布云图

图 11 2 500 r/min 时的电机损耗分布

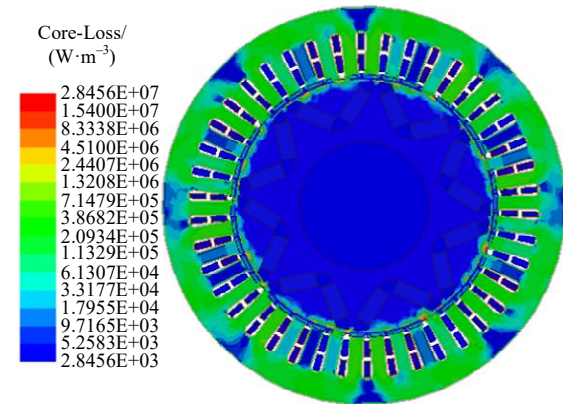
Fig. 11 Motor loss distribution at 2 500 r/min

由图 11 和图 12 可以看出,2 500 r/min、80 N·m 运行时的铜损明显高于 4 000 r/min、40 N·m 运行时铜损;铁耗则相反。这与图 7 和图 8 的结果是相符的。通过云图分析可以得到直观电磁参数及损耗分布情况,为电机设计和改进提供参考。

将 ECE 模型各零件的温度改变后,便可以通过与温度相联系的电磁参数改变而实现不同温度下的联合仿真,这里不再赘述。



(a)铜损分布云图



(b)铁耗分布云图

图 12 4 000 r/min 时的电机损耗分布

Fig. 12 Motor loss distribution at 4 000 r/min

5 试验验证

为了验证模型的有效性和准确性,对电机试验台架进行搭建并完成了相应测试。测试台架及安装如图 13 所示。

台架试验过程中,控制电机转速及输出输入电流,可得转矩随温度的变化情况。对低速

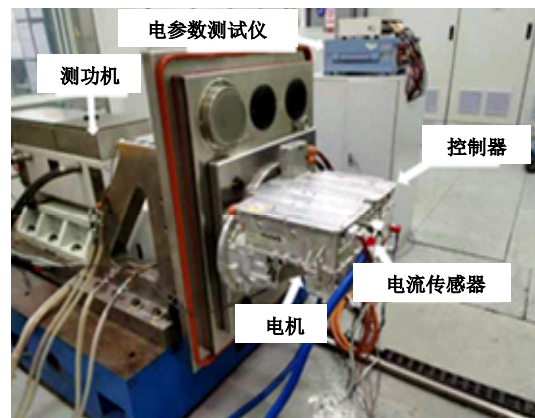


图 13 测试台架安装

Fig. 13 Test bench installation

大扭矩 4 000 r/min、300 A 工况和高速低扭矩工况 8 000 r/min、180 A 进行了试验,其试验结果与同工况的模拟结果对比如图 14 所示。

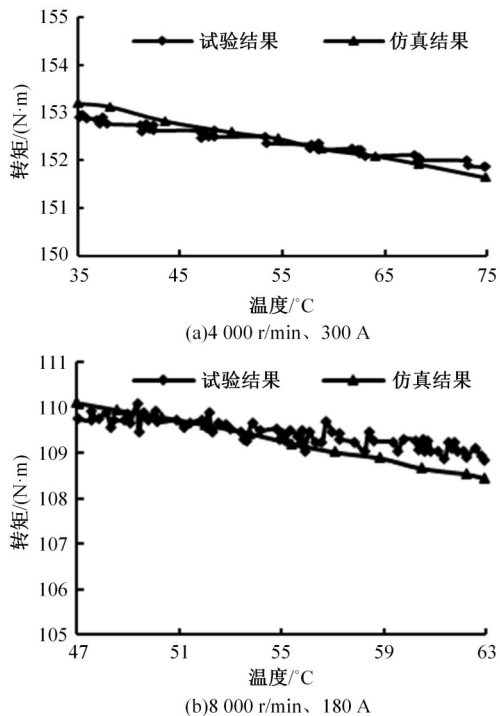


图 14 转矩随温度的变化情况对比

Fig. 14 Comparison of torque changes with temperature

由图 14 可知,在 4 000 r/min 试验测试稳态运行过程中随着电机温度升高,温度由 35 °C 升高至 75 °C 的过程中,电机的输出扭矩由 149.3 N·m 下降至 148.6 N·m。联合仿真模型温度由 35 °C 升高至 75 °C,扭矩则由 153.2 N·m 下降至 151.7 N·m,两者的误差小于 3%。模拟结果略高于试验结果的原因主要是模拟过程忽略了机械损耗,导致输出扭矩略大于实际测试扭矩。在 8 000 r/min 运行时,电机的扭矩变化趋势也基本吻合。由此证明,本文所建立的模型可以模拟电机实际运行过程,也验证了本文联合模型的有效性及其仿真精度。

6 结束语

本文利用 Maxwell-Simplorer-Simulink 建立了永磁同步电机的多物理场多软件联合仿真模型。既可以利用有限元较精确地仿真电磁场特性,又利用 Simulink 仿真变工况的优势,实现了变工况过程的多软件联合仿真。本文采用等效电路抽取方法对电机有限元模型进行了降阶,并仿真证明了等效电路抽取方法可以在保证精度的情况

下,大大缩短仿真所需时间。多物理场多软件联合仿真模型可以实现电磁-热场多场耦合、变工况运行模拟和电机控制策略的仿真。试验验证结果表明:本文构建的联合仿真模型的仿真结果与试验结果基本接近,扭矩随温度变化的趋势一致,误差小于 3%,可以为电机电磁场、冷却系统设计及控制策略设计及改进提供参考,缩短电机设计及试验周期和降低试验成本。

参考文献:

- [1] Emma A, Torbjorn T, Joachim L, et al. Thermal capability of electric vehicle pmsm with different slot areas via thermal network analysis[J]. eTransportation, 2021, 8: No. 100107.
- [2] Boglietti A, Cavagnino A, Staton D, et al. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 871-882.
- [3] 寇宝泉, 赵晓坤, 张浩泉, 等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7126-7140.
Kou Bao-quan, Zhao Xiao-kun, Zhang Hao-quan, et al. Review and analysis of electromagnetic structure and magnetic field regulation technology of the permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7126-7140.
- [4] 张洪亮. 永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电力工程及自动化学院, 2010.
Zhang Hong-liang. Iron losses and transient temperature field of permanent magnetic synchronous motor [D]. Harbin: School of Power Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 2010.
- [5] 刘蕾, 刘光复, 刘马林, 等. 车用永磁同步电机三维温度场分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(11): 1438-1444.
Liu Lei, Liu Guang-fu, Liu Ma-lin, et al. Analysis on three-dimensional temperature field of permanent magnet synchronous motor in vehicles[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(11): 1438-1444.
- [6] Liu X, Yu H, Shi Z, et al. Electromagnetic-fluid-thermal field calculation and analysis of a permanent magnet linear motor[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 802-811.
- [7] 王礼恒, 庄明, 袁恺. 基于智能控制算法的高速电机功率转换系统设计[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(4): 934-941.

- Wang Li-heng, Zhuang Ming, Yuan Kai. Design of high speed motor power conversion system based on intelligent control algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(4): 934-941.
- [8] 张厚升, 李震梅, 边敦新, 等. 电动汽车用三相开绕组永磁同步电机的控制及容错运行[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2020, 50(3): 784-795.
Zhang Hou-sheng, Li Zhen-mei, Bian Dun-xin, et al. Control and fault-tolerant operation of TPOW-PMSM for electric vehicle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3): 784-795.
- [9] 孙晓东, 张瑶, 陈龙. 电动汽车永磁同步轮毂电机无差拍预测电压补偿控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(10): 2213-2224.
Sun Xiao-dong, Zhang Yao, Chen Long. Deadbeat predictive voltage compensation control for permanent magnet synchronous hub motors of electric vehicles [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 52(10): 2213-2224.
- [10] Ding X, Guo H, Xiong R, et al. A new strategy of efficiency enhancement for traction systems in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2017, 205: 880-891.
- [11] Guo Q, Zhang C, Li L, et al. Design and implementation of a loss optimization control for electric vehicle in-wheel permanent-magnet synchronous motor direct drive system[J]. Applied Energy, 2017, 204: 1317-1332.
- [12] Viswanathan V, Seenithangom J. Commutation torque ripple reduction in the bldc motor using modified sepic and three-level npc inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 535-546.
- [13] 成传柏, 陈卫兵, 尹康, 等. 内埋式PMSM模糊PI超前角弱磁控制算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 485-487.
Cheng Chuan-bai, Chen Wei-bing, Yin Kang, et al. A study of fuzzy pi leading angle flux-weakening control algorithm applied at interior permanent magnet synchronous motor[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 485-487.
- [14] 乔振阳, 李丹丹, 杨娜, 等. 电工磁材料磁滞数学模型的研究综述[J]. 电工材料, 2020(1): 8-12.
Qiao Zhen-yang, Li Dan-dan, Yang Na, et al. A review of research on magnetic hysteresis mathematical model of magnetic materials in electrical engineering[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(1): 8-12.