

混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的 温升特性分析

王宇婷, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机(HEFSLMSM)的特殊结构, 深入分析不同工况下的温升特性。研究 HEFSLMSM 的结构及其运行原理, 建立三维稳态温度场数学模型和边界条件方程。考虑电动机各部分热交换的情况, 确定各材料的导热系数以及电动机不同部分的对流换热系数。通过有限元方法计算电动机的铜耗与铁耗, 并求出相应的生成热。在有限元软件中计算出自然散热情况下空载及负载时的温度变化。在原模型的基础上进行冷却系统的设计, 分别计算安装冷却装置后不同工况下的温度场分布。通过自然风冷和强制水冷条件下的温度对比, 证明了冷却装置设置的合理性和可行性。

关键词: 混合励磁; 磁通切换; 直线磁悬浮电动机; 稳态温度场; 有限元方法

中图分类号: TM359.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)12-0060-07

doi: 10.12177/emca.2022.135

Analysis of Temperature Rise Characteristics of Hybrid Excitation Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

WANG Yuting, LAN Yipeng

(School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the special structure of hybrid excitation flux switching linear magnetic suspension motor (HEFSLMSM), the temperature rise characteristics under different working conditions are analyzed deeply. The structure and operating principle of HEFSLMSM are studied. Three-dimensional steady-state temperature field mathematical model and boundary condition equation are established. Considering the heat exchange of each part of the motor, the thermal conductivity of each material and the convective heat transfer coefficient of different parts of the motor are determined. The copper loss and iron loss of the motor are calculated by using the finite element method, and the corresponding heat of formation is obtained. The temperature variation under the condition of no load and load with natural heat dissipation is calculated in the finite element software. The cooling system is designed on the basis of the original model, and the temperature field distribution under different working conditions after the installation of the cooling device is calculated respectively. The rationality and feasibility of the cooling device are proved by comparing the temperature of natural air cooling with forced water cooling.

Key words: hybrid excitation; flux switching; linear magnetic suspension motor; steady-state temperature field; finite element method

0 引言

混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机

(HEFSLMSM) 主要应用于磁悬浮列车的牵引系统。该电动机的励磁绕组、电枢绕组和永磁体都位于动子上, 其动子结构比普通直线电动机复

收稿日期: 2022-06-25; 收到修改稿日期: 2022-09-06

作者简介: 王宇婷(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

蓝益鹏(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制、数控技术。

杂^[1]。其定子仅由铁心构成,结构简单,成本低廉,适用于长距离的轨道交通系统^[2]。

由于励磁绕组和电枢绕组均位于动子上,绕组线圈通电产生的热量也集中在动子上,导致电动机动子温升过高。过高的温度还会使永磁体发生不可逆退磁现象,从而影响电动机性能。电动机过热还会引发运行故障,缩短电动机的使用寿命^[3]。为保证电动机可以长期稳定工作,需要将电动机温度维持在合理的范围内。文献[4]通过热网络分析和多物理场耦合方法建立无铁心永磁同步直线电机三维温度场仿真计算模型,有效抑制了电机温升并提高了电磁推力。文献[5]建立高推力密度永磁直线电机瞬态温度场的数学计算模型,同时给出基本假设和边界条件,并对其求解,最后依据求解结果对电机的瞬态温升和温度分布规律进行分析。文献[6]为减小电机的规模和计算量,选择电机初级的 1/2 作为温度场的计算模型,采用试验方法,对电动机的热特性和温度分布进行了分析,并据此进行相应的水冷结构设计,以达到降低绕组线圈温度的目的。综上所述,国内外还缺少对 HEFSLMSM 温度场的研究。

本文综合考虑了 HEFSLMSM 结构的特殊性,推导三维稳态温度场数学模型以及边界条件方程,确定各材料的导热系数以及对流换热系数,计算电动机的损耗,以此作为热源进行温度场有限元计算的依据,通过分析 HEFSLMSM 在自然散热条件下不同工况的温度分布,设计冷却系统以及验证冷却效果。

1 HEFSLMSM 结构及运行原理

1.1 HEFSLMSM 结构及其参数

HEFSLMSM 的结构与尺寸如图 1 和表 1 所示。永磁体、励磁绕组和电枢绕组均分布在短动子上,永磁体充磁方式为横向交替充磁。动子铁心采用 U 型结构,电枢绕组缠绕在 U 型铁心相邻的两个槽中,励磁绕组缠绕在 U 型铁心槽上。长定子仅为铁心材料,为保证运行安全可靠,采用抱轨结构。

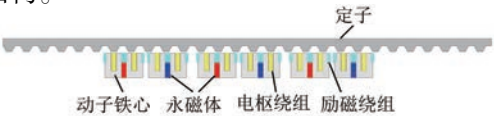


图 1 HEFSLMSM 结构

表 1 电动机结构参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
气隙长度/mm	3	动子齿宽/mm	10.5
定子齿高/mm	12	动子齿高/mm	36
定子齿宽/mm	10.5	额定频率/Hz	10
永磁体尺寸/mm	30×10×80	相数	3

1.2 磁通切换原理

磁通切换原理就是使绕组呈现出磁通既能从正向穿入,也能从负向穿出的双极性特点^[7]。如图 2 所示,以 A 相为例,动子移动到磁链最大位置时,永磁磁场穿入 A 相电枢绕组。图 3 显示的位置为第一平衡位置,永磁磁场通过定子,但不经过 A 相绕组,磁链为 0。如图 4 所示,动子移动到磁链反向最大位置,此时永磁磁场穿出 A 相电枢绕组,磁链极性变反。动子继续移动到如图 5 所示的第二平衡位置,永磁磁路又发生变化,磁链变回 0。

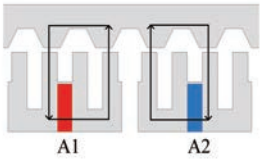


图 2 磁通正向最大位置

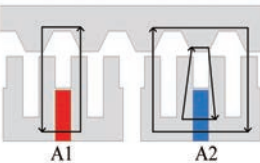


图 3 磁通第一平衡位置

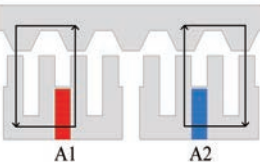


图 4 磁通负向最大位置

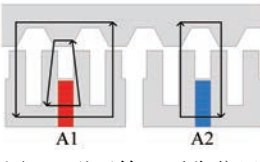


图 5 磁通第二平衡位置

1.3 磁场调节

混合励磁指电动机中既有永磁磁场又有电励磁磁场,两种磁场的存在可以对电动机的气隙磁场进行调节^[8]。HEFSLMSM 的混合励磁原理如图 6 和图 7 所示,其中实线代表永磁体的磁通轨迹,虚线代表直流励磁绕组的磁通轨迹。

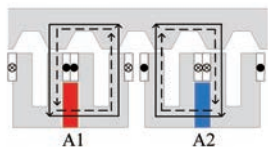


图 6 增磁原理图

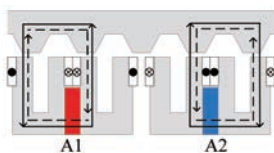


图 7 弱磁原理图

1.4 悬浮力产生原理

电动机气隙中的磁场由永磁体和励磁绕组共同产生,该磁场对定子铁心的单边磁拉力使动子悬浮。当悬浮力与磁悬浮列车自身重力相等时,即可达到稳定悬浮的状态。

2 温度场模型以及热参数计算

2.1 三维温度场数学模型以及边界条件

依据传热学理论,热能可以通过热传导、热对流和热辐射进行传递^[9]。电动机内热量空气交换的过程主要是热对流和热辐射,但热辐射产生的热量微乎其微,因此计算该电动机温度场时只考虑热传导和热对流两种传热过程。根据傅里叶定律、能量守恒定律以及经典传热理论,建立 HEFSLMSM 的数学传热模型以及边界条件:

$$\begin{cases} \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = 0 \\ T|_{S_1} = T \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_2} = \alpha(T - T_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 为材料导热系数,对于各向同性材料 $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$; S_1 为温度边界面; S_2 为热对流边界面; T 为电动机表面温度; T_0 为周围介质温度; q 为热源密度; α 为对流换热系数。

2.2 导热系数

导热系数的大小与温度和材料的性质等因素有关,随着电动机温度的升高,电动机材料的自身属性会改变,进而影响电动机的运行。绝大多数材料未熔化或汽化以前,可近似认为导热系数随温度呈线性规律变化^[10]:

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (2)$$

式中: λ_0 为 0 °C 时的导热系数; b 为由试验确定的材料常数; t 为环境温度。

设定电动机所处的环境温度为 25 °C,并保持恒定,材料的导热系数如表 2 所示。

表 2 电动机材料的导热系数 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

电动机材料	导热系数		
	x 方向	y 方向	z 方向
定子(DW310-35)	42	42	1.2
定子(Steel_1010)	45	45	45
永磁体	9	9	9
绕组	385	385	385
空气	0.026	0.026	0.026

2.3 对流换热系数

固体和流体之间的对流换热是通过热传导和热对流实现的。本文研究的电动机中有以下几个部分存在对流换热现象:定子外表面、定子槽口、气隙表面和转子外表面。因此换热系数的选择也是不同的,具体可以根据流体的流动形式来选择不同的经验公式进行计算。

(1) 定子外表面对流换热系数。在 5 ~ 25 m/s 的空气流速范围内时,空气流速 v_1 和外表面对流换热系数 α_1 的关系可用下式表示^[11]:

$$\alpha_1 = \alpha_0(1 + k\sqrt{v_1}) \quad (3)$$

式中: α_0 为在平静大气中热表面的换热系数; k 为气流效率存在时的系数。

由于本文研究的电动机定子固定不动,其外表面处于自然散热状态,所以取对流换热系数 $\alpha_1 = 14.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 。

对于其他外表面的换热系数可由下式计算:

$$\begin{cases} Re = \frac{Vd}{\nu} \\ Nu = 0.228Re^{0.731}Pr^{\frac{1}{3}} \\ \alpha_2 = \frac{Nu\lambda}{d} \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 为导热系数, 25 °C 时, $\lambda = 2.63 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$; ν 为空气运动粘度, 25 °C 时, $\nu = 1.554 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; V 为电动机运行速度; d 为电机宽度; Pr 为普朗特数。

(2) 气隙换热系数。计算气隙处的对流换热系数时, 可以用式(5)和式(6)先算出雷诺数和努塞尔数^[12]:

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (5)$$

$$Nu = 0.06Re^{0.7} \quad (6)$$

式中: l 为气隙长度。

根据下式可以计算出气隙表面的对流换热系数^[13]:

$$\alpha_3 = Nu\lambda/l \quad (7)$$

根据以上计算过程, 电动机对流换热系数如表 3 所示。

表 3 电动机对流换热系数 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

表面名称	对流换热系数
定子外表面	14.20
转子外表面	27.10
气隙表面	3.47

3 热源计算

3.1 绕组损耗

绕组损耗是指电流作用于绕组线圈上而引起的损耗, 可依据焦耳-楞次定律计算:

$$\begin{cases} P_D = mI_D^2 R_D \\ P_L = I_L^2 R_L \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_D 为电枢铜耗; P_L 为励磁铜耗; m 为相数; I_D 为电枢电流; I_L 为励磁电流; R_D 为电枢绕组阻值; R_L 为励磁绕组阻值。

根据式(8)可知, 通入绕组线圈的电流对绕组损耗的影响很大, 也是使电动机发热的因素之一。其中阻值依据下式计算:

$$R = \frac{\rho L_a N}{a \pi r^2} \quad (9)$$

式中: ρ 为电阻率; a 为绕组并联支路数; L_a 为线圈全长; r 为线圈半径; N 为绕组匝数。

经计算电枢绕组阻值为 7.78 Ω , 励磁绕组阻值为 3.65 Ω 。铜耗的 ANSYS 仿真计算结果如图 8 和图 9 所示。

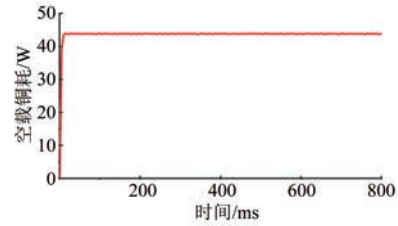


图 8 空载铜耗

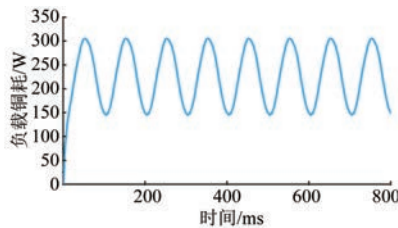


图 9 负载铜耗

通过仿真结果可以看出, 空载情况下, 只通入励磁电流时, 铜耗全部由励磁绕组产生, 当电动机到达稳定时, 铜耗在 44 W 上下波动, 平均值为 43.82 W; 负载情况下, 励磁电流与电枢电流共同作用, 铜耗在 150~310 W 之间波动, 铜耗平均值为 228.61 W。

3.2 铁心损耗

铁心损耗主要包括基本铁耗和附加铁耗。其中基本铁耗可分为磁滞损耗和涡流损耗, 附加铁耗则是导电材料在交变的漏磁场和谐波磁场作用下产生的损耗^[14]。本文采用有限元法进行电动机铁耗的计算, 有限元法的优势就是无论电动机处在何种工况下, 均可采用分离铁耗模型计算铁耗^[15]:

$$P_{Fe} = K_h (fB_m)^2 + K_e (fB_m)^2 + K_c (fB_m)^{1.5} \quad (10)$$

式中: K_h 为磁滞损耗系数; K_e 为涡流损耗系数; K_c 为附加损耗系数; f 为电动机运行频率; B_m 为磁密幅值。

图 10 和图 11 为使用 ANSYS 仿真所得的铁耗结果。

经仿真计算可得, 空载情况下, 电枢电流为 0 A, 电动机运行频率为 0, 电动机稳定运行后, 铁耗趋近于 0; 负载情况下, 电动机运行达到稳定后, 铁耗在 0.10~0.26 W 之间波动, 有限元计算平均值为 0.175 9 W。

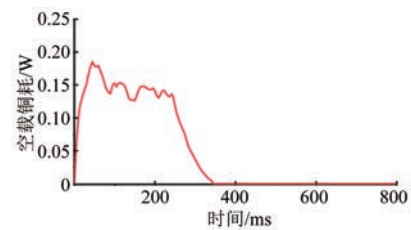


图 10 空载铁耗

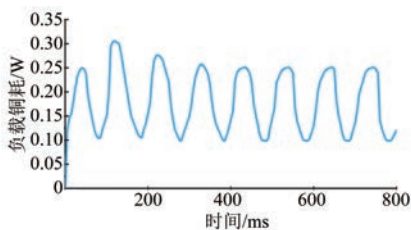


图 11 负载铁耗

3.3 生成热

电动机中各部分损耗产生的热将作为热源施加到电动机上,用生成热表示单位体积内产生的热量。将电动机的各部分损耗作为生成热导入温度分析模型中,生成热的公式为

$$Q = \frac{W}{V_m} \tag{11}$$

式中:Q 为生成热;W 为电动机各部分损耗;V_m 为电动机各部分体积。

依据上文有限元方法得到的各部分损耗结果,求出电动机各部件的生热率如表 4 所示。

电动机部件	生热率	
	空载	负载
电枢绕组	0	6.84×10 ⁶
励磁绕组	5.64×10 ⁶	5.64×10 ⁶
定子铁心	0	852

4 温度场有限元计算

以本文研究的 HEFSLMSM 为例,分析空载和负载两种工况下的稳态温度场,将上文 ANSYS 有限元软件中计算出的损耗结果导入温度场中进行电动机温度的分析计算。为了简化仿真分析,做如下假设:

- (1) 周围空气温度为 25 ℃ 并保持恒定;
- (2) 忽略定子与转子表面的辐射散热;

(3) 由于槽内材料、绝缘分布情况比较复杂,故忽略绝缘材料对温度的影响;

(4) 电动机中各种材料的导热系数均为常数,且不会随着周围环境温度的变化而发生改变。

4.1 空载温度

基于上文所建立的三维有限元分析模型,计算得到了电动机各材料的导热系数、对流换热系数以及生成热。利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件分析空载情况下的温度分布。有限元仿真结果如图 12~图 14 所示。

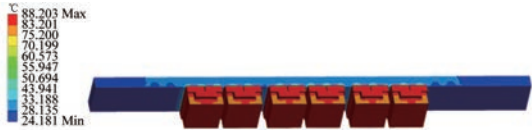


图 12 空载电动机温度分布

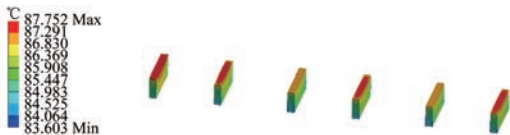


图 13 空载时永磁体温度分布



图 14 空载时绕组温度分布

从图中可以看出,空载时热量主要集中在电枢绕组、励磁绕组和永磁体上。空载工况下,永磁体最热点达 87.752 ℃,绕组最热点达 87.881 ℃。电动机的热量主要由励磁绕组产生,此时只通入直流励磁电流,励磁绕组产生的热量大部分通过热传导传递到电枢绕组、定子铁心和永磁体,小部分的热量则由电动机运行时带动的气隙位置的空气一起运动,使气隙与定子发生对流换热,从而把热量传递到定子,定子温度从中间向两端逐渐降低。

4.2 负载温度

负载情况下温度分布的有限元仿真结果由图 15~图 17 所示。

负载运行时,电枢绕组产生的热量大于励磁绕组产生的热量,此时最高温度仍在绕组处,这是因为电枢绕组与励磁绕组均位于定子上,散热比

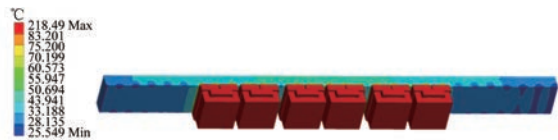


图 15 负载电动机温度分布

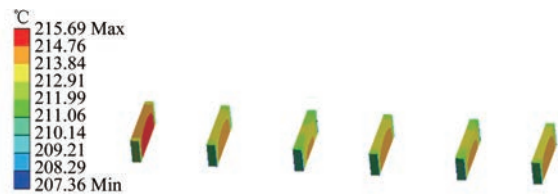


图 16 负载时永磁体温度分布



图 17 负载时绕组温度分布

较困难。这一原因也使绕组的最高温度达到 218.49℃,永磁体处达到 215.69℃。在电动机自然冷却条件下,电动机各部件的温度已经超过了绝缘材料的绝缘极限,会造成永磁体不可逆转的退磁,从而影响电动机的稳定运行。

5 冷却系统

5.1 冷却方式选择及冷却系统设计

根据上文的仿真结果以及分析可知,该电动机需要冷却的部分为定子绕组、永磁体和定子铁心,即电动机运动的部分。电动机通常采用水和油两种液体冷却介质,两者相比,水具有绿色环保、容易获取和冷却效果好等优点,因此本文采用水冷方式对电动机进行冷却。冷却系统的设计需要遵循以下原则:

- (1) 冷却装置的表面应尽量光滑以减少液体冷却介质流动阻力;
- (2) 为了更好地散热,冷却装置与电动机的接触面要大;
- (3) 冷却装置安装方便;
- (4) 冷却装置不影响电动机的运行性能。

为了减少冷却装置对定子铁心的槽满率和磁

路特性的影响,本文选择把冷却装置安装在定子铁心处,采用 S 型管道。这样既增加了散热面积,又保证了永磁体的正常工作。冷却装置水管直径 10 mm,同相水管间距 45.25 mm,异相水管间距 57.75 mm。冷却水管采用导热性能良好的铝材,这样有利于降低铁心表面和永磁体表面温度,简化冷却结构和制造工艺。冷却装置如图 18 所示。

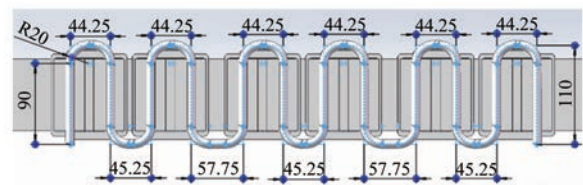


图 18 水冷装置示意图

冷却装置的结构提高了电动机的空间利用率,并且不影响电动机的强度。电动机运行时绕组产生的热量通过热传导传递到定子铁心,再由水冷系统带走定子铁心处大部分的热量,从而保持电动机运行的持续性以及稳定性。

5.2 水冷后电动机的温度场分析

添加水冷装置后,除了电动机与空气的对流换热以外,还增加了冷却水的作用,电动机的各项对流换热系数保持不变,各项边界条件保持不变,冷却水的流速为 0.2 m/s,入水口水温 25℃。采用 Fluent 软件对电动机进行热流耦合分析,结果如图 19~图 21 所示。



图 19 水冷后空载电动机温度分布



图 20 水冷后空载永磁体温度分布

从图中可以看出,与自然散热相比,增加水冷



图 21 水冷后空载绕组温度分布



图 24 水冷后负载绕组温度分布

装置后,电动机各部分温度得到了不同程度的下降。励磁绕组铜耗产生的热量被水冷系统带走,加快了热量传递的速率,从而达到了降温效果。冷却后,励磁绕组的温度降低到 36.08 ℃,比自然散热情况下的温度降低了 50% 以上,初级动子处的永磁体的温度下降超过 60%。自然散热和强制水冷的条件下,最高温度对比如表 5 所示。

表 5 电动机最高温度对比 ℃			
电动机部位	自然散热	水冷装置	温差
绕组	87.881	36.08	51.801
永磁体	87.752	35.50	52.252

当电动机在负载工况下长时间运行时,电动机的温度会远高于空载时电动机的温度,此时对散热能力的要求更高。负载情况下的散热分布如图 22~图 24 所示。



图 22 水冷后负载电动机温度分布



图 23 水冷后负载永磁体温度分布

从图中可以看出,负载运行时绕组最高温度为 48.28 ℃,远离冷却水管的绕组部分温度稍高,靠近冷却水管的动子铁心因与水管发生强制对流换热,通过热传导使铁心与绕组的接触面温度降低,水管

带走大部分热量,使永磁体的最高温度降低到 47.85 ℃。电动机冷却装置采用强制对流换热,相比于自然对流换热,该方式降温效果明显,且绕组和永磁体都在其稳定运行的温升范围之内。

6 结 语

本文首先分析了 HEFSLMSM 的结构以及运行原理。其次建立了三维温度场传热数学模型和对流换热模型并确定了各材料的导热系数,对不同工况下的电动机损耗进行了仿真分析。最后基于三维温度场有限元法,分别建立自然冷却方式和水冷冷却方式的仿真模型,通过计算结果和冷却前后温度场仿真分析,验证了水冷冷却方式抑制直线电动机温升的有效性和可行性,为后续研究打下一些基础。

【参考文献】

[1] 艾春洋,蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机电磁力的有限元计算[J]. 电机与控制应用, 2021,48(3): 49.

[2] 张明利. 电梯用磁通切换永磁直线电机的驱动控制系统研究[D]. 南京:东南大学,2018.

[3] 程树康,李翠萍,柴凤. 不同冷却结构的微型电动车用感应电机三维稳态温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30): 82.

[4] PEI Z, ZHAO J, SONG J, et al. Temperature field calculation and water-cooling structure design of coreless permanent magnet synchronous linear motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021,68(2): 1065.

[5] LI L, HUANG X, KOU B, et al. Analysis of 3D transient temperature field for permanent magnet linear synchronous motor with high thrust density[C] //2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference,2009.

(下转第 73 页)