

六相横向磁场磁通切换直线磁悬浮电机温度场有限元分析

张 乐*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Finite Element Analysis of the Temperature Field of a Six-Phase Transverse Magnetic Field Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

ZHANG Le*, LAN Yipeng

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

Abstract: This study focused on the six-phase transverse magnetic field flux switching linear magnetic suspension motor (SPTMFFSLMSM) used in rail transit. The armature windings, excitation windings, and permanent magnets are all located on the mover iron core, enabling the motor to achieve traction, levitation, and guidance simultaneously. Due to the unique structure of the SPTMFFSLMSM, heat dissipation is challenging, which can lead to significant temperature rise and negatively affect the motor's operating characteristics. To address the issue of severe temperature rise in the mover iron core, a cooling system was designed to ensure normal motor operation. First, a three-dimensional steady-state temperature field mathematical model was established based on the motor's structure, and the boundary conditions were derived. Then, the thermal parameters of various materials inside the motor were determined, and the motor's heat sources and losses were analyzed, with the corresponding heat generation rates calculated. Finally, the motor's temperature field was analyzed using a three-dimensional finite element method under both natural cooling and forced water cooling conditions, and the temperature distributions of the two cooling methods were compared. The results showed that the water cooling system effectively reduced the temperature of the mover iron core, verifying the effectiveness and feasibility of the designed cooling system.

Key words: transverse magnetic field; flux switching; linear magnetic suspension motor; steady-state temperature field; cooling system

摘 要: 以用于轨道交通的六相横向磁场磁通切换直线磁悬浮电机(SPTMFFSLMSM)为研究对象。该电机电枢绕组、励磁绕组以及永磁体都在动子铁心上,可同时实现

牵引、悬浮与导向。由于 SPTMFFSLMSM 结构特殊,因此电机散热比较困难,极易引起电机的温升,从而影响电机的运行特性。为解决动子铁心温升严重的问题,设计了一套冷却系统,确保电机正常运行。首先,根据电机的结构建立了三维稳态温度场数学模型,并推导出边界条件;然后,确定电机内部各种材料的热参数,对电机的热源和损耗进行分析,计算得到对应的生热率;最后,采用三维有限元法分析电机在自然散热和强迫水冷下的温度场,并对比两种散热方式下的温度分布。结果表明采用水冷装置降低了动子铁心的温度,验证了所设计冷却系统的有效性和可行性。

关键词: 横向磁场; 磁通切换; 直线磁悬浮电机; 稳态温度场; 冷却系统

0 引言

随着我国城市化进程的加快,中心城市人口急剧增长,同时也带来了严重的交通拥挤问题。发展轨道交通能有效缓解当前城市的交通拥挤。直线电机近年来得到了很大发展,被广泛应用于轨道交通领域。六相横向磁场磁通切换直线磁悬浮电机(Six-Phase Transverse Magnetic Field Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor, SPTMFFSLMSM)结合了横向磁场与磁悬浮的优点,并通过混合励磁的方式产生可调的励磁磁场实现稳定的磁悬浮^[1]。SPTMFFSLMSM 的次级长定子仅由铁心构成,尤其适用于长距离轨道交通领域^[2]。并且该六相绕组结构的电动机具有较好的容错能力。

由于绕组线圈和永磁体都置于动子铁心上,

与传统直线电机相比,散热比较困难,且多相结构会导致损耗增加,温度过高将引起永磁材料的不可逆退磁,使电机绝缘材料的寿命缩短,进而对电机的运行特性产生影响^[3]。因此,需要研究 SPTMFFSLMSM 的损耗、温度场以及冷却系统。

国内外学者针对电机温度场做了大量研究。文献[4]建立了印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)绕组盘式永磁同步电机温度场模型,并用有限元法分析了各部件的温升,研究了增加外壳与 PCB 定子的接触面积对温度场的影响,并对温升进行了优化。文献[5]分析了真空干泵驱动用电机的冷却结构,并进行了温度场仿真计算。文献[6]针对高速永磁电机转子过热问题,设计了冷却系统抑制转子部位的最高温升。文献[7]通过热网络分析、数值计算和热场多物理场耦合方法建立了确定水冷电机最大持续工作电流的快速计算仿真模型,设计并比较两种不同冷却通道拓扑结构的散热效果,提高了无芯永磁同步直线电机的冷却效率和可靠性。文献[8]采用基于有限元分析的场路耦合方法计算转子涡流损耗,评估电磁轴承支撑的高速永磁电机转子损耗分析和热性能,分析定子铁心温度对转子表面的影响。文献[9]建立电机传热数学模型,使用有限元法对永磁直线电机中的热场进行分析和模拟,将仿真结果与试验结果进行比较,验证理论模型和仿真方法的有效性和准确性。综上所述,国内外还缺少对 SPTMFFSLMSM 温度场的研究。

本文针对 SPTMFFSLMSM 因其特殊结构而引起的温升问题,建立了三维稳态温度场的数学模型,并推导出温度场边界条件;研究了电机内部各种材料的热导率和对流换热系数,对电机的热源和损耗进行分析计算,得到各部件的热生成率;并设计了一套电机冷却系统,开展电机在不同环境条件下的温度场有限元仿真研究,验证了冷却系统的可行性。

1 SPTMFFSLMSM 的结构及工作原理

1.1 SPTMFFSLMSM 的结构

SPTMFFSLMSM 由初级短动子和次级长定子两部分构成,如图 1 所示。2 个双 H 型动子并排

放置构成一相模组,12 个动子构成六相模组。



图 1 SPTMFFSLMSM 结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of SPTMFFSLMSM

图 2 为 SPTMFFSLMSM 的局部放大结构示意图。该电机采用交替排列的 U 型铁心构成次级长定子,由横梁连接的双 H 型铁心作为初级短动子。每个双 H 铁心上有 2 个励磁绕组、1 个电枢绕组和 4 个永磁体。励磁绕组分别在 2 个 H 的横梁上,且通入方向相反的直流电;电枢绕组在连接双 H 铁心的横梁上,通入交流电;永磁体粘贴在动子铁心齿部的表面,每个双 H 型铁心上有 1-3 齿和 2-4 齿两组永磁体,每组中两个永磁体的充磁方向相反。SPTMFFSLMSM 的基本结构参数如表 1 所示。

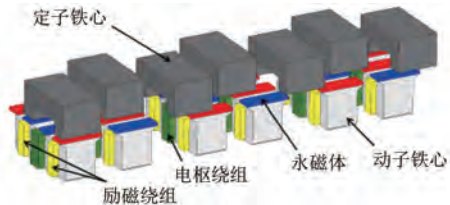


图 2 SPTMFFSLMSM 局部放大结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of local enlarged structure of SPTMFFSLMSM

表 1 SPTMFFSLMSM 结构参数

Tab. 1 Structural parameters of SPTMFFSLMSM

参数名称	参数值
相数	6
定子轴向长度/mm	135
定子纵向长度/mm	75
定子高度/mm	60
定子齿高/mm	24
定子极距/mm	109.8
动子轴向长度/mm	180
动子纵向长度/mm	57
动子高度/mm	72
动子齿高/mm	21
气隙长度/mm	4
永磁体长、宽、高/mm	27、5、81.6
额定频率/Hz	50
励磁绕组匝数	100
电枢绕组匝数	320

1.2 工作原理

1.2.1 磁通切换原理

磁通切换原理是指电枢绕组中的合成磁链出现正负交替的双极性特点^[10]。

以 A 相的一个初级为例,图 3(a)~图 3(d)为动子在不同位置时,一个电角度周期内磁通路径的变化情况。 0° 时,相应的定子齿与动子的第 2 个和第 4 个齿部完全对应,磁通完全经过右侧的次级形成闭合回路,磁通方向为逆时针,正向合成磁链最大; 90° 时,动子运动到两个定子铁心中间,与不同的定子齿都有重合,磁通方向一部分为逆时针,一部分为顺时针,二者相互抵消,合成磁链为 0,是第一平衡位置; 180° 时,相应的定子齿与动子的第 1 个和第 3 个齿部完全对应,磁通完全经过左侧的次级形成闭合回路,磁通方向为顺时针,合成磁链为负的最大值; 270° 时,一部分磁通顺时针,一部分逆时针,二者相互叠加,合成磁链为 0,是第二平衡位置。

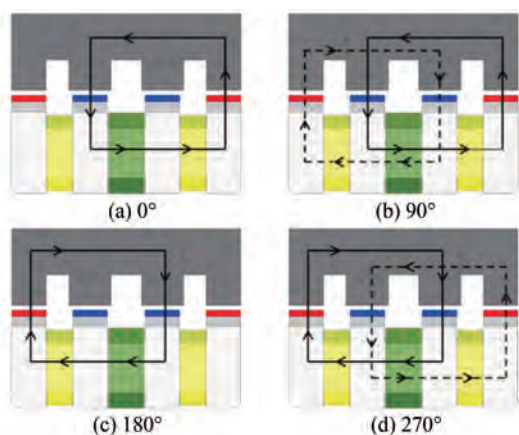


图 3 一个电角度周期内磁通路径的变化情况

Fig. 3 Variation of magnetic flux path during an electrical angle period

1.2.2 电磁推力原理

在电枢绕组中通入对称交变电流,交变电流会产生交变的电枢磁场,这个磁场会在气隙处分解成正弦变化的行波磁场。行波磁场与励磁线圈和永磁体产生的混合励磁磁场相互作用,从而使得动子产生水平方向的电磁推力,迫使整个运动平台在推力的作用下在水平方向作直线运动。

1.2.3 悬浮力原理

SPTMFFSLMSM 在工作过程中,可通过改变励磁线圈的直流电流大小来改变励磁磁场,进而

改变合成气隙磁场的大小。气隙合成磁场作用于定子铁心,对铁心产生单边磁拉力。定子固定不动,动子与运动平台固定,使得动子受到竖直向上的吸引力,即悬浮力,当悬浮力 F_y 与自身重力 G_m 相等时,可以实现稳定悬浮。在不同重力条件下,可通过调节励磁电流的大小,达到稳定悬浮的目的。悬浮力原理示意图如图 4 所示。

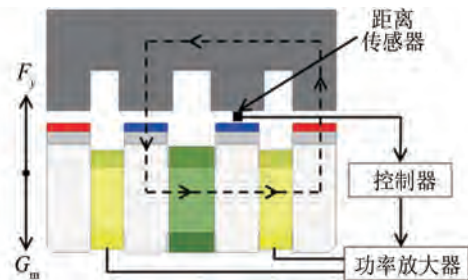


图 4 悬浮力原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the principle of suspension force

1.2.4 导向力原理

SPTMFFSLMSM 工作过程中,若动子部分发生侧向位移,会受到导向力的作用。根据“磁阻最小”原理,即磁通将沿着磁阻最小的路径闭合形成回路。因此动子发生侧向偏移时,动子将会受到动子铁心中轴线趋向于定子铁心中轴线的导向力。图 5 为导向力原理示意图。

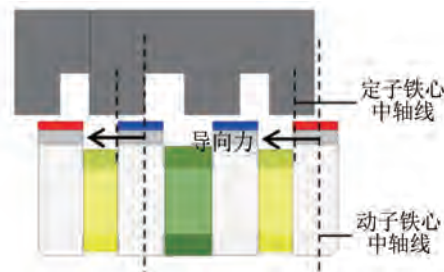


图 5 导向力原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the principle of guiding force

2 温度场数学模型及热参数计算

2.1 三维温度场数学模型

热量传递有热传导、热对流及热辐射三种基本方式。而这三种传热方式在电机的换热过程中会同时出现。电机内的换热过程较为复杂,但主要通过热对流与热辐射与大气进行换热,而热辐射相对于热对流散热较少,所以在对其

温度场进行分析时,仅从热对流和热传导两个方面来考虑热量传递^[11]。从能量守恒定律、牛顿冷却定律及傅里叶定律出发,建立 SPTMFFSLMSM 的三维导热微分方程,并推导其温度场边界条件^[12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi + \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \\ T|_{S_1} = T_a \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{S_2} = q \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{S_3} = \alpha(T - T_0) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: Φ 为产生的热源; λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别为材料在 x 、 y 、和 z 方向的导热系数; T 为电机边界面 S_1 的温度; c 为比热容; ρ 为密度; λ 为材料的导热系数; T_a 为假定的温度; $\mathbf{n}$ 为边界面的法向量; q 为电机边界面 S_2 的热流密度; α 为电机边界面 S_3 与周围流体间的表面散热系数; T_0 为电机边界面 S_3 周围流体的温度; S_1 、 S_2 和 S_3 分别为温度边界面、热流边界面对流换热边界面。

2.2 导热系数的计算

电机的导热系数受温度、材质和湿度等多种因素的影响,其本身特性也会随着电机工作温度的升高而发生变化,从而对电机的工作产生影响。绝大部分材料若未达到熔融或汽化的临界点,其导热系数与其温度近似成线性关系^[13],如式(2)所示:

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

式中: λ_0 为 0 °C 下的导热系数; b 为由试验测定的材料常数; T_s 为所处的周围环境温度。

假设电动机工作时周围环境温度保持在 25 °C,其导热系数在特定的温度区间内基本不变,通常假定其为常数。电机各部件的热物理性质如表 2 所示。

2.3 对流换热系数的计算

电机各表面是基于热传导和热对流与周围流体介质之间进行对流换热的。SPTMFFSLMSM 进行对流换热的主要有定子外表面、转子外表面和气隙表面,下面分别计算这三个表面的对流换热系数。

(1) 定子外表面对流换热系数

表 2 电机各部件热物理性质
Tab. 2 Thermophysical properties of motor components

部件名称	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
转子	$\lambda_x = \lambda_z = 44.2$ $\lambda_y = 1.3$	7 800	460
定子	45	7 810	446
绕组	387	8 933	385
永磁体	9	7 390	460
空气	0.027	1.29	1 007

当风速介于 5 m/s~25 m/s 时,定子外表面对流换热系数可以近似地看成是一个仅与气流速度相关的物理量。根据试验得出的经验公式如式(3)所示^[14]:

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

式中: α_1 为定子外表面对流换热系数; v_1 为表面气流速度; α_0 为静态空气下的对流换热系数, $\alpha_0 = 14.2$ W/(m²·K); k 为计及气流影响的比例系数。

因为 SPTMFFSLMSM 的定子是静止的,气流速度为 0,因此将定子外表面的对流换热系数 α_1 取为 14.2 W/(m²·K)。

(2) 转子外表面对流换热系数

转子外表面对流换热系数 α_2 可由式(4)得到^[15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Re = \frac{Vd}{\nu} \\ Nu = 0.228Re^{0.731}Pr^{1/3} \\ \alpha_2 = \frac{Nu\lambda}{d} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: Re 为雷诺数; V 为电机运行速度; d 为电机宽度; ν 为空气运动粘度,25 °C 时, $\nu = 1.554 \times 10^{-5}$ m²/s; Nu 为努塞尔数; Pr 为普朗特数。

将以上数据代入式(4),计算得到转子外表面散热系数 α_2 为 37.73 W/(m²·K)。

(3) 气隙表面对流换热系数

气隙表面对流换热系数 α_3 可由式(5)得到^[16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Re = Vl/\nu \\ Nu = 0.06Re^{0.7} \\ \alpha_3 = Nu\lambda/l \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: l 为气隙长度。

经计算,得到电机各表面的对流换热系数如

表 3 所示。

表 3 电机各表面对流换热系数

Tab.3 Convective heat transfer coefficient of each

表面名称	对流换热系数
定子外表面	14.20
定子内表面	37.73
气隙表面	13.28

3 热源及生热率的计算

3.1 绕组损耗

绕组损耗是由电流通过线圈所产生的损耗,在 SPTMFFSLMSM 中包括电枢线圈和励磁线圈。基于焦耳-楞次定律,励磁损耗 P_L 和电枢损耗 P_D 的计算式为^[17]

$$\begin{cases} P_L = I_L^2 R_L \\ P_D = 6I_D^2 R_D \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_L 为励磁电流平均值; R_L 为励磁线圈阻值; I_D 为电枢电流有效值; R_D 为电枢线圈阻值。

由式(6)可知,绕组铜耗受流入绕组线圈的电流的影响极大,电枢电流是影响铜耗的主要因素。本文将研究额定电枢电流工况下电机的发热情况。其中,绕组阻值 R 可由式(7)计算得出:

$$R = \frac{\rho_1 L_{av} N}{\pi r^2} \quad (7)$$

式中: ρ_1 为电阻率; L_{av} 为线圈总长度平均值; N 为线圈匝数; r 为导线半径。

经计算得出,励磁绕组阻值 R_L 为 4.83 Ω ;电枢绕组阻值 R 为 2.51 Ω 。基于 Ansys Maxwell 软件进行仿真,得到 SPTMFFSLMSM 满载铜耗如图 6 所示。

由图 6 可知,电机满载工况运行稳定后,铜耗在 562.965 6 W ~ 563.186 W 之间波动,平均值为 563.076 1 W。

3.2 铁心损耗

交变磁场作用于铁心内会产生铁心损耗,铁心损耗是不可避免的。铁心损耗会将部分电能转换成热能,导致电机效率下降。不计谐波磁场产生的额外损耗,根据铁耗分离计算模型,可得铁耗计算式为^[18-19]

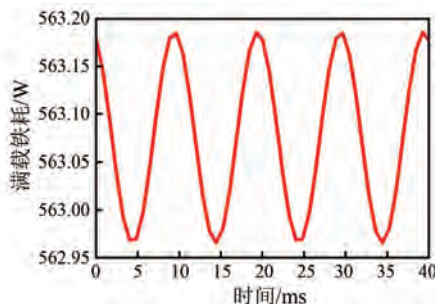


图 6 SPTMFFSLMSM 满载铜耗

Fig. 6 Full-load copper loss of SPTMFFSLMSM

$$\begin{cases} P_{Fe} = P_h + P_c + P_e \\ P_h = K_h f B_m^2 \\ P_c = K_c f^2 B_m^2 \\ P_e = K_e f^{1.5} B_m^{1.5} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_h 为磁滞损耗; P_c 为涡流损耗; P_e 为附加损耗; f 为定子铁心的磁化频率; B_m 为正弦磁密幅值; K_h 为磁滞损耗系数; K_c 为涡流损耗系数; K_e 为附加损耗系数。

基于 Ansys Maxwell 软件进行仿真,得到 SPTMFFSLMSM 满载铁耗如图 7 所示。

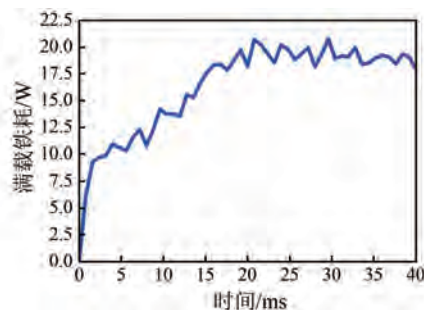


图 7 SPTMFFSLMSM 满载铁耗

Fig. 7 Full-load iron loss of SPTMFFSLMSM

由图 7 可知,电机满载工况运行稳定后,铁耗在 17.905 4 W ~ 20.772 4 W 之间波动,平均值为 19.263 3 W。

3.3 生热率

生热率是单位体积所产生的损耗,其计算式为

$$Q = \frac{W}{V_u} \quad (8)$$

式中: Q 为该部件的生热率; W 为该部件产生的损耗; V_u 为该部件的体积。

根据有限元仿真得到的损耗结果和每个部件的体积,经计算可得出电机满载运行时各部件生

热率,结果如表 4 所示。

表 4 电机各部件生热率

Tab. 4 Heat generation rate of motor components

components	生热率 $W \cdot m^{-3}$
部件名称	生热率
励磁绕组	17 224
电枢绕组	56 206
定子铁心	2 617.975
永磁体	7 962.282

4 自然散热温度场有限元仿真

将上文得到的导热系数、对流换热系数以及用生热率表示的损耗,导入温度场模型。利用 Workbench 软件模拟满载工况下的温度场分布。满载情况下温度分布的有限元仿真结果如图 8~图 10 所示。

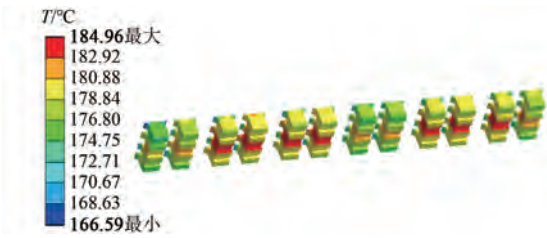


图 8 满载定子温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of the rotor at full load



图 9 满载绕组温度分布
Fig. 9 Temperature distribution of the winding at full load



图 10 满载永磁体温度分布
Fig. 10 Temperature distribution of the permanent magnet at full load

由图 8~图 10 可知,定子温度最高值为

184.96 ℃;绕组线圈温度最高值为 184.94 ℃;永磁体温度最高值为 183.07 ℃。满载运行时,发热主要聚集于初级铁心部分。当绕组通电发热时,其发热过程中所产生的热量也会向定子处聚集,使定子处的温度升高。自然降温过程中,绕组线圈已超过其绝缘承受能力,高温也会引起永磁材料的不可逆退磁,进而影响电机的运行特性。电机温度过高也会引起运转故障,降低其使用寿命。因此,对合理的冷却系统进行研究,十分必要。

5 SPTMFFSLMSM 冷却系统

5.1 冷却方案选择及冷却装置设计

由上述温度分布仿真结果可知,永磁体、定子铁心及绕组的温度过高,电机的初级短定子部分需要散热。不同于旋转电机,直线电机多采用液体冷却的方式。冷却介质分为水冷和油冷,由于水的价格低廉、绿色环保、易于获取且散热效果良好,所以本文选择水作为电机冷却系统的冷却介质。

设计冷却系统时,应遵守下列准则^[20]:

- (1) 为了减小冷却液的流动阻力,水冷装置的内壁表面应尽量采用光滑的结构;
- (2) 水冷装置与定子铁心部分应有较大的接触面积,这样才能充分地进行换热,以提高散热效果;
- (3) 水冷装置需运行可靠、安装简单且维护方便;
- (4) 冷却设备应对电机的性能没有任何影响。

冷却装置的水管选用具有优良导热性能的串联 S 型铝制材料,可有效降低铁心表面及永磁铁表面的温升,并使冷却结构及其加工过程更为简单。水冷装置和水冷却管尺寸分别如图 11 和图 12 所示。

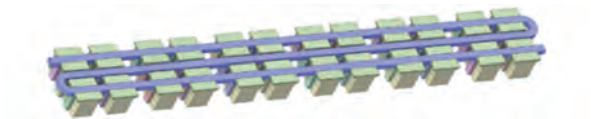


图 11 水冷装置示意图
Fig. 11 Schematic diagram of water cooling device

水冷装置嵌入初级铁心槽内,既可使电机的空间利用率得到有效提高,又不会影响电机正常工作。当电机工作时,线圈所发出的热量经热传导传递到定子铁心,再由水冷系统进行散热,从而

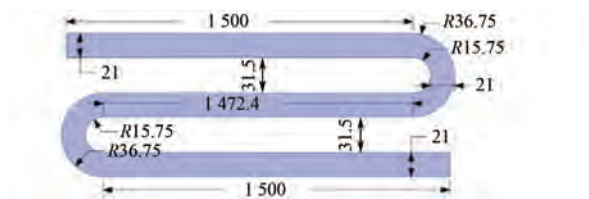


图 12 水冷却管尺寸图

Fig. 12 Dimension drawing of water cooling pipe

保证电机的持续稳定运行。

5.2 附加冷却系统后满载温度场仿真

将水流量的速度控制在 0.02 m/s, 进水口水温为 25 ℃, 出水口水温为 30 ℃。附加冷却系统后, 基于 Fluent 软件对电机的流-固-热耦合进行仿真分析, 结果如图 13~图 15 所示。



图 13 附加冷却系统后满载动子温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of the rotor at full load with additional cooling system



图 14 附加冷却系统后满载绕组温度分布

Fig. 14 Temperature distribution of the winding at full load with additional cooling system

由图 13~图 15 可知, 附加冷却系统后, 动子温度最高值降至 53.53 ℃; 绕组温度最高值降至 53.95 ℃; 永磁体温度最高值降至 51.49 ℃。可见, 加入冷却系统后, 电动机满载运行时, 经水冷却后水流带走绝大部分的热量, 降低了电机温度, 保证电机在正常温度下工作。

图 16 为动子铁心、绕组线圈及永磁体在自然散热和强迫水冷两种散热方式下的最高温度对比。



图 15 附加冷却系统后满载永磁体温度分布

Fig. 15 Temperature distribution of the permanent magnet at full load with additional cooling system

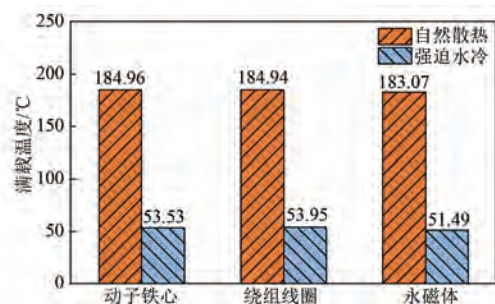


图 16 电机各部件满载最高温度对比

Fig. 16 Comparison of maximum temperature of motor components at full load

由图 16 可知, 相较于自然散热, 强迫水冷下电机各部件的温度由 185 ℃左右降至 53 ℃左右。电机强迫水冷装置的冷却效果更为显著, 使满载运行时动子铁心、绕组线圈及永磁体等部件的温度处于稳定运行的温度区间, 验证了水冷装置的有效性及其合理性。

6 结语

本文对 SPTMFFSLMSM 的结构及工作原理进行了分析; 构建了电机的三维温度场数学模型, 并计算了各部件的导热系数及对流换热系数。仿真分析了额定工况下电机的损耗, 并计算出对应的生热率; 设计了电机冷却系统, 基于有限元分析, 分别建立自然散热条件和强迫水冷条件的三维温度场仿真模型, 对比分析两种冷却条件下的温度分布。仿真结果表明: 加入水冷冷却装置后, 绕组最高温度从 184.94 ℃降至 53.95 ℃, 验证了冷却系统对降低 SPTMFFSLMSM 温升的合理性和有效性, 为进一步开展相关研究奠定一定的理论基础。

参考文献

[1] 刘伯涛, 蓝益鹏. 横向磁场磁通切换电励磁磁悬

- 浮直线电机的研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 37-43.
- LIU B T, LAN Y P. Research on transverse magnetic field flux switching electric excited magnetic suspension linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 37-43.
- [2] 李锴. 双边磁通切换永磁直线电机损耗分析与温度场研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- LI K. Loss analysis and temperature field study of bilateral flux switching permanent magnet linear motor [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [3] 朱志莹, 张巍, 朱海浪, 等. 轴向永磁磁悬浮飞轮电机损耗计算与温度场分析[J]. 电气工程学报, 2022, 17(4): 174-180.
- ZHU Z Y, ZHANG W, ZHU H L, et al. Analysis of loss and temperature field of axial permanent magnet magnetic suspension flywheel motor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(4): 174-180.
- [4] 王晓远, 周晨. 基于 PCB 绕组的盘式永磁同步电机温度场分析与冷却方式研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3062-3069.
- WANG X Y, ZHOU C. Thermal analysis and cooling approach design of axial flux permanent magnet synchronous machines with PCB winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3062-3069.
- [5] 张培一, 安辉, 胡玉勇, 等. 真空干泵用磁通切换永磁同步电机温度场仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 59-65.
- ZHANG P Y, AN H, HU Y Y, et al. Temperature field simulation analysis of flux switching permanent magnet synchronous motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 59-65.
- [6] 汪晓强, 佟文明. 高速永磁电机流固混合冷却结构流固耦合分析[J]. 微特电机, 2023, 51(10): 1-5.
- WANG X Q, TONG W M. Fluid-structure coupling analysis of fluid-structure hybrid cooling structure for high-speed permanent magnet motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(10): 1-5.
- [7] 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, 2020, 68(2): 1065-1076.
- [8] LIU X Q, FANG J C, HAN B C, et al. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent-magnet electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2027-2035.
- [9] 赖林松, 曹卉, 刘崇军, 等. 大推力永磁直线同步电机温度场计算与分析[J]. 微电机, 2016, 49(4): 35-37.
- LAN L S, CAO H, LIU C J, et al. Thermal field analysis and simulation by finite element method of permanent magnet linear motor [J]. Micromotors, 2016, 49(4): 35-37.
- [10] 黄晶晶. 混合励磁磁通切换电机的设计[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- HUANG J J. Design of hybrid excitation flux switching motor [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [11] 尹惠. 永磁同步电机损耗计算及温度场分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YIN H. PMSM loss calculation and temperature field analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [12] LI W L, QIU H B, YI R, et al. Three-dimensional electromagnetic field calculation and analysis of axial-radial flux-type high-temperature superconducting synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(1): 1-7.
- [13] 孙建宏, 丁文, 鱼振民. 扁平型直线异步电机温度场的计算与分析[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(1): 20-24.
- SUN J H, DING W, YU Z M. Calculation and analysis of thermal field for the flat linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2006, 33(1): 20-24.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- CHEN S K. Electric Machine Design [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [15] 宋守许, 胡孟成, 杜毅, 等. 混合定子铁心再制造电机三维温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 33-42.
- SONG S X, HU M C, DU Y, et al. Temperature field investigation analysis of remanufacturing motor with mixed stator core [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 33-42.

- [16] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 1版. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WEI Y T, MENG D W, WEN J B. Heat Exchange in Motor [M]. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [17] MO L H, ZHU X Y, ZHANG T, et al. Temperature rise calculation of a flux-switching permanent-magnet double-rotor machine using electromagnetic-thermal coupling analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-4.
- [18] 谢颖, 范伊杰, 蔡蔚, 等. 油冷式扁线电机油路结构优化设计及温度场计算[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 37-45.
XIE Y, FAN Y J, CAI W, et al. Oil circuit structure optimization design and temperature field calculation of oil cooled motor with hairpin winding [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 37-45.
- [19] LIU X, LIU G, HAN B C. A loss separation method of a high-speed magnetic levitated PMSM based on drag system experiment without torque meter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2976-2986.
- [20] 裴中良. 无铁芯永磁同步直线电机温升特性研究和水冷结构优化设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
PEI Z L. Research on temperature rise characteristics and water cooling structure optimization design of coreless permanent magnet synchronous linear motor [D]. Hefei: Anhui University, 2021.

收稿日期:2024-04-03

收到修改稿日期:2024-05-21

作者简介:

张 乐(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,634534473@qq.com;

*通信作者:张 乐(1999-),男,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,634534473@qq.com。

Finite Element Analysis of Temperature Field of a Six-Phase Transverse Magnetic Field Flux Switching Linear Magnetic Suspension Motor

ZHANG Le^{*}, LAN Yipeng

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

Key words: transverse magnetic field; flux switching; linear magnetic suspension motor; steady-state temperature field; cooling system

The armature windings, excitation windings, and permanent magnets of the six-phase transverse magnetic field flux switching linear magnetic suspension motor (SPTMFFSLMSM) are all located on the primary mover. Due to the unique structure of SPTMFFSLMSM, heat dissipation is challenging, and the multi-phase structure leads to increased losses. Excessive temperatures can cause irreversible demagnetization of permanent magnetic materials and reduce the lifespan of the motor's insulation, thereby affecting the motor's performance. Therefore, studying the motor's losses, temperature rise, and appropriate cooling methods is of great significance.

In this paper, based on the special structural characteristics of the SPTMFFSLMSM, the temperature rise under different operating conditions was studied, and a cooling system was designed to ensure the motor's normal operation. First, a three-dimensional steady-state temperature field mathematical model of the motor was established according to its structure, and the boundary conditions were derived. Then, the thermal conductivity and convective heat transfer coefficients of various materials in the motor were examined, and the motor's heat sources and losses were analyzed

and calculated, resulting in the heat generation rates of each component. Finally, a motor cooling system was designed, as shown in Fig. 1. Finite element simulations were conducted to analyze the motor's temperature field under natural cooling and forced water cooling. The results are presented in Tab. 1.

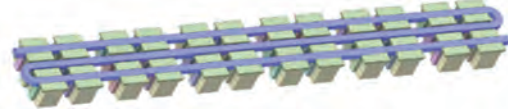


Fig. 1 Schematic diagram of water cooling device

As shown in Tab.1, the cooling system significantly reduced the temperature of all motor components. Notably, the highest temperature of the windings decreased from 184.94°C to 53.95°C, confirming the rationality and effectiveness of the cooling system in reducing the temperature rise of the SPTMFFSLMSM.

Tab. 1 Comparison of maximum temperatures of motor components at full load

Component name	°C		
	Natural heat dissipation	Forced water cooling	Temperature difference
Rotor core	184.96	53.53	131.43
Winding coil	184.94	53.95	130.99
Permanent magnet	183.07	51.49	131.58