DOI:10.12177/emca.2024.149 文章编号:1673-6540(2025)01-0084-10 中图分类号:TM 359.4 文献标志码:A

磁通切换磁悬浮直线电机热分析及冷却系统设计

孙煜昊*, 蓝益鹏
(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

Thermal Analysis and Cooling System Design of Flux Switching Magnetic Suspension Linear Motor

SUN Yuhao*, LAN Yipeng
(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: **[Objective]** The flux switching magnetic suspension linear motor (FSMSLM) has a limited heat dissipation space and concentrated heat sources, which can lead to significant temperature rise and adversely affect its operation. To address this, the losses in various motor components are calculated, and a temperature field simulation is performed to design a targeted cooling system that ensures efficient heat dissipation. **[Methods]** Firstly, the structure and operating principle of the FSMSLM were introduced, followed by the calculation of losses and heat generation rates for each motor component. A mathematical model of the temperature field was established, and the thermal conductivity coefficients of the motor components were obtained using empirical formula. The convective heat transfer coefficients for the relevant surfaces were derived by combining simulation results of the external flow field with the empirical formulas. Finally, finite element simulations were carried out to determine the overall temperature distribution of the FSMSLM under rated operating conditions, as well as the temperature distribution of key components. Based on these temperature distributions and the FSMSLM's structural characteristics, two cooling solutions were designed: A series-type water cooling pipeline and a parallel-type water cooling pipeline. CFD software was used to simulate the temperature field of the FSMSLM after the cooling systems were installed. **[Results]** The simulation results showed that the heat generation was concentrated in the winding part. Under rated operating conditions, the overall temperature of FSMSLM ranged from 200.29 ℃ to 209.68 ℃, exceeding the maximum allowable operating temperature of 180 ℃ for H-class insulating materials. After the installation of parallel-type and series-type water cooling pipelines with 10 mm nozzle height, the maximum temperature of the motor decreased to 79.70 ℃ and 61.48 ℃, respectively. A water cooling pipeline with a nozzle height of 20 mm demonstrated an 8% improvement in cooling performance compared to a 10 mm nozzle, while the pressure difference in the pipeline was reduced by more than 50%. Under the same inlet water flow velocity, the series-type water cooling pipeline provided better cooling performance, with its cooling performance about 8.7% higher than that of the parallel-type. However, the inlet-outlet pressure difference for the series-type cooling pipeline was 6 times to 8 times that of the parallel-type. **[Conclusion]** The simulation results confirm the necessity of the cooling system. Considering both cooling effectiveness and economic feasibility, a parallel-type water cooling pipeline with a nozzle height of 10 mm has been selected as the cooling solution for the FSMSLM.

Key words: flux switching; temperature field; magnetic suspension linear motor; loss calculation; cooling system

摘 要:**【目的】**磁通切换磁悬浮直线电机(FSMSLM)散热空间狭小、发热源集中,极易引起电机温升,从而影响其运行。通过计算电机各部件的损耗,对电机进行温度场仿真,以此有针对性地设计冷却系统以保证电机的散热。**【方法】**首先,介绍了 FSMSLM 的结构和工作原理,并通过计算得到了 FSMSLM 的各部件损耗和生热率。然后,建立了 FSMSLM 温度场数学模型,根据经验公式求得了电机各部件的导热系数,并通过外流场仿真分析结合经验公式得到了相关表面的对流换热系数。最后,通过有限元仿真得到了 FSMSLM 在额定工况下的整体温度分布和关键部件的温度分布,基于温度分布和 FSMSLM 结构特性分别设计了串联型水冷管道和并联型水冷管道两种冷却装置,并利用 CFD 软件对加装冷却系统后的 FSMSLM 温度场进行仿真。**【结果】**仿真结果表明:发热集中在绕组部分;额定工况下 FSMSLM 整体温度处于 200.29 ℃~209.68 ℃之间,超出 H 级绝缘材料的最高允许工作温度 180 ℃;加装管口高度为 10 mm 的并联型和串联型水冷管道后,电机的最高温度分

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

别降为 79.70 ℃和 61.48 ℃；管口高度为 20 mm 的水冷管道比 10 mm 的管道冷却效果提升了 8% 左右，管道内压力差降低了 50% 以上；在同一入口水流速度下串联型水冷管道冷却效果更好，冷却效果比并联型水冷管道提高了约 8.7%，但其进出口压差约为并联型水冷管道的 6 倍~8 倍。**【结论】**仿真验证了冷却系统的必要性，综合考虑冷却效果和经济性，选择管口高度为 10 mm 的并联水冷管道作为 FSMSLM 的冷却系统。

关键词：磁通切换；温度场；磁悬浮直线电机；损耗计算；冷却系统

0 引言

直线电机是一种不需要中间传动环节的给进驱动机构，由于其具有高精度、高效率和高可靠性等优点，在数控机床上应用广泛[1]。

磁通切换磁悬浮直线电机（Flux Switching Magnetic Suspension Linear Motor，FSMSLM）的定子仅由导磁性能良好的铁心构成，励磁绕组、电枢绕组都集中放置在动子铁心上，因此被用作轨道交通工具的驱动系统。由于其特殊的结构，绕组通电产生的热量都集中在动子凹槽内上，难以通过狭小的气隙有效地自然对流换热。电机在持续高温状态下运行会损坏绕组绝缘层、导致机械结构发生形变甚至影响电机运行[2]。文献[3]通过有限元法建立了双 V 型无铁心永磁同步直线电机的初级温度场三维模型，基于 CFD 软件对不同结构流道的流通性和冷却效果进行分析，验证了冷却结构的有效性，但未对水道进出口压力进行分析，缺少对冷却系统经济性的分析。文献[4]采用有限元法分析了电机在自然对流和强迫水冷下的温度场，并对两种散热方式下电机各部分温度分布情况进行了分析，但没有对不同结构的水冷管道进行对比。文献[5]通过热流固耦合有限元分析对无铁心永磁直线同步电机的温升特性进行了研究，并设计了适用于该电机的水冷结构。文献[6]通过有限元软件建立了横向磁场永磁直线电机的温度场计算模型，分析了整个电机的工作瞬态温升过程，但未对电机的具体温度分布进行分析。文献[7]重点分析了冷却水道的深度、宽度等尺寸以及冷却水流量、温度对电主轴温升和热变形的影响，对冷却参数进行了优化，但没有分析随时间变化的瞬态温度分布。文献[8]研究了水冷系统及其参数对永磁直线电机温升的影响。文献[9]对电机的水套和水冷系统进行了热流固耦合研究，分析了不同工艺下的电主轴温升，并对水冷系统的管道进行了合理优化。

本文主要采用有限元法对 FSMSLM 的温度场进行了分析。首先利用 Ansys Maxwell 有限元软件建立了电机的三维仿真模型，进行损耗计算并将损耗结果作为热源导入 Ansys Workbench 中进行温度场分析。结合 Ansys Fluent 流体仿真软件对电机外流场进行仿真分析，得到电机在自然散热情况下的温度分布。然后设计了两种水冷结构，通过比较不同尺寸参数水冷结构的冷却效果和经济性，以此选取合适的冷却系统。

1 FSMSLM 模型及热源计算

1.1 FSMSLM 结构

图 1 为 FSMSLM 的结构示意图，电机的励磁绕组和电枢绕组都分布在动子上，定子仅由导磁性能良好的硅钢片铁心构成。通过控制电枢电流的相序改变 FSMSLM 运动方向，使其进行往复运动。FSMSLM 应用于磁悬浮轨道交通，在额定电压下实行连续工作制，电机各部件长期发热[10]，其生热率变化幅度可忽略不计。本文研究的 FSMSLM 的主要参数如表 1 所示。

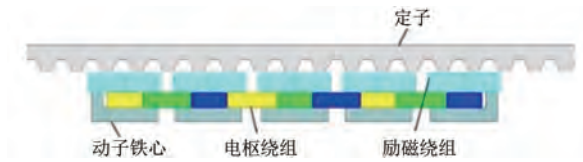

图 1 FSMSLM 结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of FSMSLM

表 1 FSMSLM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of FSMSLM

参数名称	参数值
额定功率/W	800
额定速度/（m·s^{-1}）	2.88
电磁推力/N	280
动子齿高/mm	36
动子齿宽/mm	10.5
轴向长度/mm	135
气隙长度/mm	3
相数	3
励磁绕组匝数	100
电枢绕组匝数	120
冷却方式	水冷

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1.2 FSMSLM 工作原理

1.2.1 磁通切换原理

磁通切换是指电枢绕组通入交流电后产生的磁链在动子和定子间作周期内双极性变换的过程[11]。在一个三相交流电周期中,磁通路径的变化情况如图 2 所示。电角度为 0°时,磁链自下而上穿过电枢绕组和定子齿部形成逆时针方向的闭合回路,此时合成磁通为正向最大值,反电动势为 0;电角度为 90°时,动子运动到 1/4 周期,动子中线与定子齿中线重合,此时磁通没有穿过电枢绕组,合成磁通为 0,是第一平衡位置,反电动势为负向最大值;电角度为 180°时,磁链自上而下穿过电枢绕组和定子齿部形成顺时针方向的闭合回路,此时合成磁通为负向最大值,反电动势为 0;电角度为 270°时,类似于第一平衡位置,称为第二平衡位置。当动子运动完一个周期后重复以上过程进入下一个磁通切换周期。

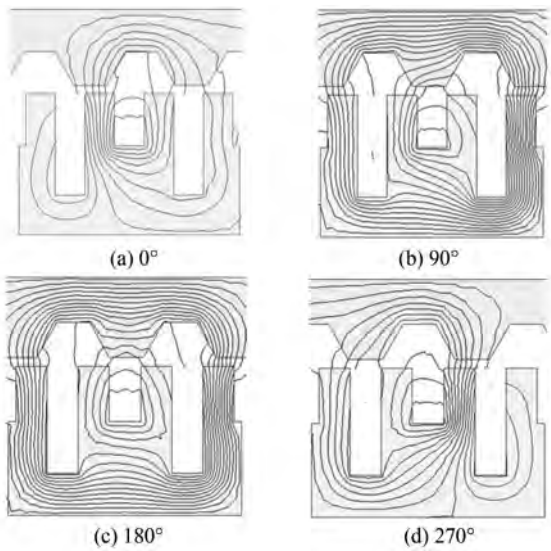

图 2 磁通切换示意图

Fig. 2 Flux switching diagram

1.2.2 电磁推力原理

当电枢绕组通入三相交流电流时,交变电流产生交变磁场。磁通会按照最小磁阻路径闭合并产生向右的力,当 A 相电流达到最大然后逐渐减小到达平衡位置时,B 相电流开始逐渐增大并且磁通随之增大,同样产生向右的力使动子运动;当到达第二平衡位置时,C 相电流同样逐渐增大保持动子向右运行。通过控制电流的导通与关断可以实现动子的定向运动。

1.2.3 悬浮力原理

FSMSLM 在工作过程中,励磁绕组通入直流电流会产生励磁磁场,励磁磁场与电枢绕组的磁场形成合成磁场,合成磁场作用于定子铁心,对铁心产生单边磁拉力从而使动子悬浮。通过控制电流强度可以调整励磁磁场强度,进而实现悬浮力的控制。

1.3 FSMSLM 热源计算

电机在运行过程中由于线圈导线中的热效应会产生损耗,这些损耗主要以热量的形式存在,一部分以空气为介质通过热辐射与热对流的方式传递到周围环境中,一部分滞留在电机内部导致其温度升高[12]。FSMSLM 运行产生的损耗可分为电枢绕组损耗、励磁绕组损耗和铁心损耗。由于电机的动子与定子之间存在较大的气隙,因此机械损耗可以忽略不计[13]。

1.3.1 绕组损耗

根据电流的热效应,电流流过电阻时消耗电能会产生损耗。绕组损耗计算式为

$$\begin{cases} P_{aw} = 3I_{aw}^2 R_{aw} \\ P_{ew} = I_{ew}^2 R_{ew} \end{cases} \tag{1}$$

式中:P_{aw}、P_{ew} 分别为电枢绕组、励磁绕组损耗;I_{aw}、I_{ew} 分别为电枢绕组、励磁绕组的电流有效值;R_{aw}、R_{ew} 分别为电枢绕组、励磁绕组的阻值。

1.3.2 铁心损耗

在正弦交变磁场的作用下,根据损耗产生的原理不同,铁心损耗分为涡流损耗、磁滞损耗和附加损耗。铁心损耗的计算式为[14]

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ex} = C_h f B_m^n + C_e f^2 B_m^2 + C_{ex} f^{4.5} B_m^{1.5} \tag{2}$$

式中:P_{Fe} 为铁心损耗;P_h 为磁滞损耗;P_e 为涡流损耗;P_{ex} 为附加损耗;C_h、n 为磁滞损耗系数;f 为磁场的交变频率;B_m 为正弦磁密幅值;C_e 为涡流损耗系数;C_{ex} 为附加损耗系数。

1.3.3 绕组阻值和生热率计算

绕组阻值 R 的计算式为[15]

$$R = \frac{\rho_{20} L_{av} N}{a\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}(1 + \alpha\tau) \tag{3}$$

式中:ρ_{20} 为铜导线在 20 ℃时的电阻率;L_{av} 为线圈平均长度;N 为每相串联匝数;a 为相绕组并联

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

支路数；d 为导线裸线直径；α 为导线电阻温度系数；τ 为导线温度。

生热率 Q 是单位体积内产生的热量，其计算式为

$$Q = \frac{W}{V_m} \tag{4}$$

式中：W 为各部件损耗；V_m 为各部件体积。

计算得到励磁绕组阻值为 5.78 Ω，电枢绕组阻值为 1.94 Ω。电机在额定工况下的各部件损耗与生热率如表 2 和表 3 所示。

表 2　额定工况下电机各部件损耗

Tab. 2　Losses of motor components under rated operating conditions

部件名称	损耗/W
励磁绕组	92.5
电枢绕组	145.7
铁心	6.21

表 3　额定工况下电机各部件生热率

Tab. 3　Heat generation rates of motor components under rated operating conditions

部件名称	生热率/(W·m^{-3})
励磁绕组	261 299.43
电枢绕组	590 835.36
铁心	3 191.98

2　FSMSLM 温度场数学模型

2.1　导热微分方程

根据能量守恒定律，单位时间内流入和流出电机的热量与电机的发热量相等[16]，即：

$$\mathrm{d}Q_{\mathrm{in}} + \mathrm{d}Q_{\mathrm{g}} = \mathrm{d}E \tag{5}$$

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z\mathrm{d}\tau + q_{\mathrm{v}}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z\mathrm{d}\tau = \rho c\frac{\partial T}{\partial \tau}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

式中：$\mathrm{d}Q_{\mathrm{in}}$ 为流入微元的净热量；$\mathrm{d}Q_{\mathrm{g}}$ 为微元内热源发热量；$\mathrm{d}E$ 为微元的热能总增量；λ 为材料导热系数；q_{v} 为单位时间单位体积微元的发热量；ρ 为材料密度；c 为材料比热容。

2.2　导热系数

FSMSLM 主要传热方式为热传导和热对流。热传导主要与材料的属性、尺寸、比热容和温度相关，本文研究的电机主要材料有绝缘材料、铜导线和硅钢片。

动子铁心由带有涂层的硅钢片冲片叠压而成，硅钢片之间的绝缘漆涂层使铁心平面方向的导热系数明显大于叠压方向的导热系数[17]。在假设硅钢片的表面涂层分布均匀且平坦的基础上求取其导热系数。

电机的线圈绕组是由铜导线绕制而成，由于导线之间存在绝缘层还有空气，直接建立温度场分析模型难度较高，可以根据文献[18]中提出的线圈绕组等效方法对其进行等效处理。等效绝缘层的导热系数通过式(7)计算得到。FSMSLM 各部件的导热系数如表 4 所示。

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^{n}\delta_i / \left(\sum_{i=1}^{n}\delta_i/\lambda_i\right) \tag{7}$$

式中：δ_i 为不同绝缘的等效厚度；λ_i 为不同绝缘的导热系数；n 为绝缘材料的数量。

表 4　FSMSLM 各部件的导热系数

Tab. 4　Thermal conductivity coefficients of FSMSLM components

部件名称	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
定子	45	45	45
动子	42	42	1.2
等效绕组	387.6	387.6	387.6
空气	0.026 7	0.026 7	0.026 7

2.3　对流换热系数

使用 Ansys Fluent 流体仿真软件对加装了铝制机壳的 FSMSLM 在运行中的外流场进行仿真，FSMSLM 外流场和流体迹线剖面图分别如图 3 和图 4 所示。

图 3　FSMSLM 外流场

Fig. 3　FSMSLM external flow field

由图 3 和图 4 可知，加装机壳后，FSMSLM 运行时气流大部分会从电机表面和机壳底部掠过，只有少量气流进入机壳内部与电机进行对流换热。

FSMSLM 在对流换热过程中存在层流和湍流两种情况，根据电机物理模型假设单方向来流，采

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

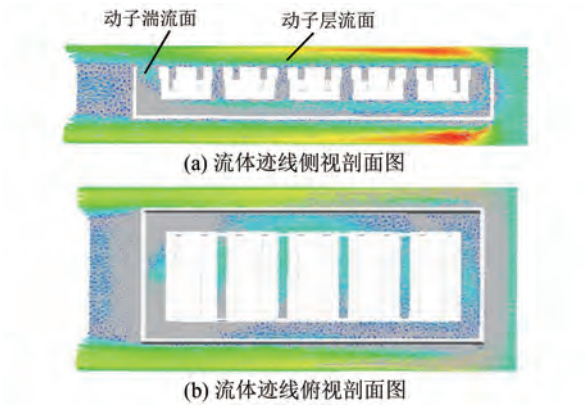

图 4 流体迹线剖面图

Fig. 4 Fluid streamline profile

用经验公式进行计算[19]。

流体流经平板的对流换热系数 h 为

$$h = \frac{Nu\lambda}{x} \tag{8}$$

式中:Nu 为努塞尔数;λ 为流体的导热系数;x 为特征长度。

层流和湍流时对流换热准则方程如下:

$$\begin{cases} Nu = 0.332Re^{1/2}Pr_f^{1/3}, & \text{层流} \\ Nu = 0.0288Re^{0.8}Pr_f^{1/3}, & \text{湍流} \end{cases} \tag{9}$$

式中:Pr_f 为流体普朗特数,25 ℃时取 0.707;Re 为雷诺数,其表达式为

$$Re = \frac{\rho_{air} vx}{\mu} \tag{10}$$

式中:ρ_{air} 为空气密度;v 为水平气流速度;μ 为空气动力粘度;x 为特征长度。

根据式(8)~式(10)得到 FSMSLM 各表面的对流换热系数,如表 5 所示。

表 5 FSMSLM 各表面对流换热系数

Tab. 5 Convective heat transfer coefficients of each surface of FSMSLM

表面名称	对流换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
机壳表面	10.2
动子层流面	7.6
动子湍流面	4.7

3 FSMSLM 温度场仿真

FSMSLM 的定子不产生热量且不与动子直接接触,所以定子温度始终较低,本节仅对电机发热部分进行分析。

利用有限元软件 Ansys Workbench 中的瞬态热模块,将第二章计算得到的电机各部件的生热率和边界条件等导入到模型中[20],得到额定工况下 FSMSLM 的整体温度分布和关键部件的温度分布,如图 5~图 7 所示。

图 5 FSMSLM 整体温度分布

Fig. 5 FSMSLM overall temperature distribution

图 6 FSMSLM 电枢绕组温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of FSMSLM armature winding

图 7 FSMSLM 励磁绕组温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of FSMSLM excitation winding

由图 5 可知,FSMSLM 的整体温度处于 200.29 ℃~209.68 ℃之间。由于设置电机前进方向向左,所以最左端先接触来流,其温度最低,温度最高的部分集中在电机的中心区域。由图 6、图 7 可知,励磁绕组和电枢绕组线圈的最高温度分别达到了 209.26 ℃和 209.68 ℃,都超出了电机 H 级绝缘的允许工作温度 180 ℃。若电机长时间处于高温工作状态将会损坏绕组绝缘,造成电机运行不稳定、速度降低,甚至损坏电机的后果[21]。

FSMSLM 主要用做轨道交通工具的驱动系统,其性质要求电机长时间运行。图 8 为电机在额定工况下连续运行 18 000 s 过程中的最低和最高温度走势图。由图 8 可知,当电机连续运行 12 000 s 左右时电机最高温度开始超过 H 级绝缘允许工作温度。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

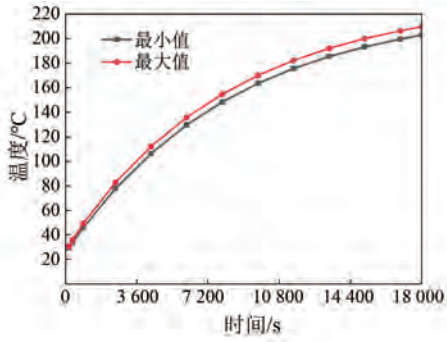

图 8　FSMSLM 温度走势图

Fig. 8　FSMSLM temperature trend

4　冷却系统对 FSMSLM 温度的影响

4.1　冷却系统选择

目前直线电机常用的冷却方式有液冷、自然风冷、强制风冷以及混合冷却等[22]。

针对 FSMSLM 的结构以及温度场分布特点，冷却系统的设计应满足以下几点[23]：

（1）冷却系统的加装不能影响电机的正常运行，不能降低电机的工作效率；

（2）冷却介质应具有良好的散热性和较好的经济性；

（3）冷却系统应便于安装和后续维修工作。

根据设计要求，本文设计了串联和并联两种水冷管道，每种冷却管道设计了两种尺寸：管口高度 10 mm 和管口高度 20 mm。水冷管道材料为不导磁的铝金属，管道宽度和管壁厚度相同。通过散热效果和经济性的对比以选取合适的冷却装置。

4.2　水冷管道设计

传统的流道结构分为并联型和串联型。并联型由多个直流道并联组成，冷却水从主流道进入各个分流道，最后汇集在出口排出；串联型为一个整体通路，冷却水从入口流入，通过流道从出口流出[24]。针对 FSMSLM 设计的并联型和串联型管道结构及其尺寸参数分别如图 9 和图 10 所示，图中单位为 mm。两种不同高度管口尺寸的示意图如图 11 所示。

4.3　加装水冷装置后 FSMSLM 温度场分析

本文采用 Ansys Fluent 流体仿真软件对加装水冷装置后的电机温度场进行仿真计算。对水冷管道及流体区域进行边界条件设置[25]，具体

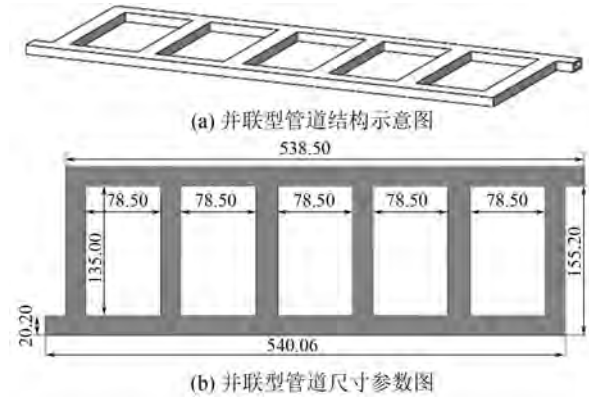

图 9　并联型管道

Fig. 9　Parallel-type cooling pipeline

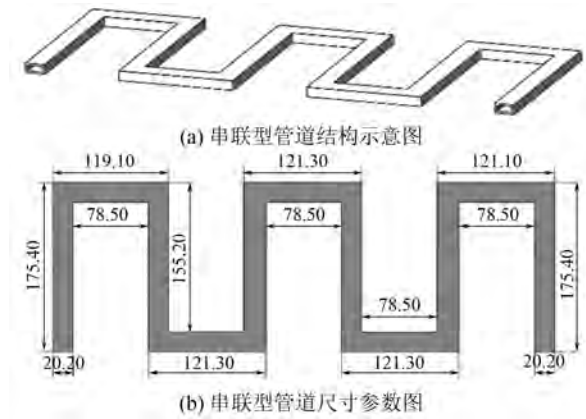

图 10　串联型管道

Fig. 10　Series-type cooling pipeline

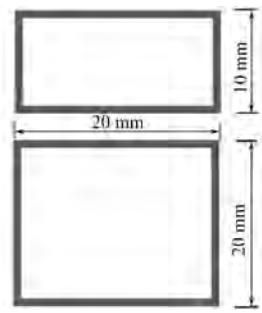

图 11　两种管口高度示意图

Fig. 11　Schematic diagram of two nozzle heights

如下：

（1）设置管道入口的水流速度为 0.01 m/s，出口边界条件为压力出口，水温设置为 25 ℃；

（2）粘性模型选取标准 $k-\varepsilon$ 模型[20] 和标准壁面函数进行求解；

（3）压力速度耦合计算方法选择 Coupled，能量方程残差和其他方程残差收敛标准都设置为 1×10^{-6}，采用混合初始化方法。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

通过有限元软件求解,得到分别加装两种不同管口高度的并联和串联水冷装置的 FSMSLM 温度分布,如图 12 和图 13 所示。

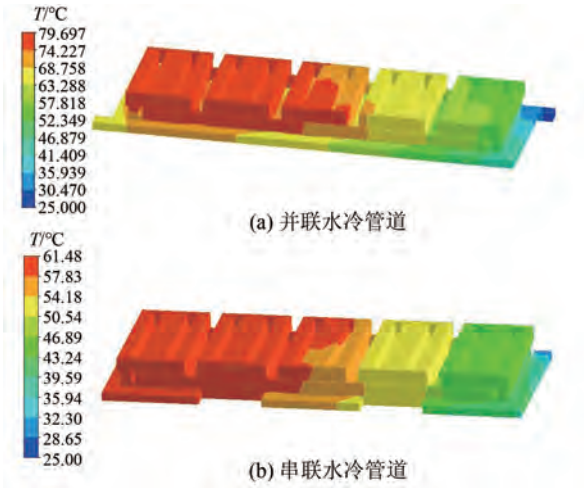

图 12 加装管口高度为 10 mm 的水冷装置后的 FSMSLM 温度分布

Fig. 12 Temperature distribution of FSMSLM after installing water-cooling device with 10 mm nozzle height

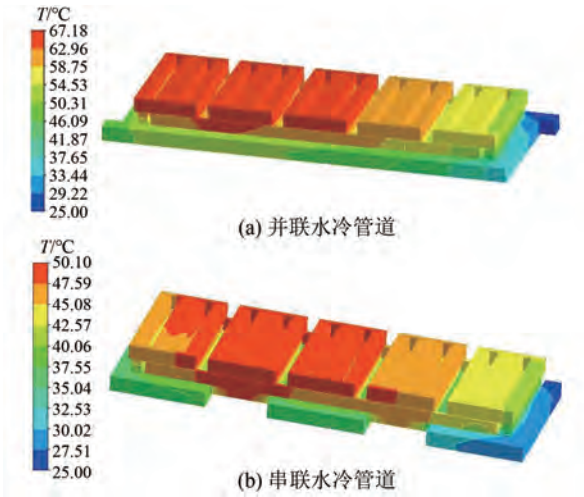

图 13 加装管口高度为 20 mm 的水冷装置后的 FSMSLM 温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of FSMSLM after installing water cooling device with 20 mm nozzle height

4.3 水冷管道压力场分析

水冷管道入口和出口之间的压力差对电机的散热效果也会存在影响。压力差小,冷却水在管道内的流动速度缓慢,导致电机的散热效率变低;压力差大,冷却水流阻变大,所需水泵功率增加,水冷装置的经济性变差[26]。入口水流速度为 0.01 m/s 时,两种管口高度的并联型和串联型管道的压力场分布如图 14 和图 15 所示。

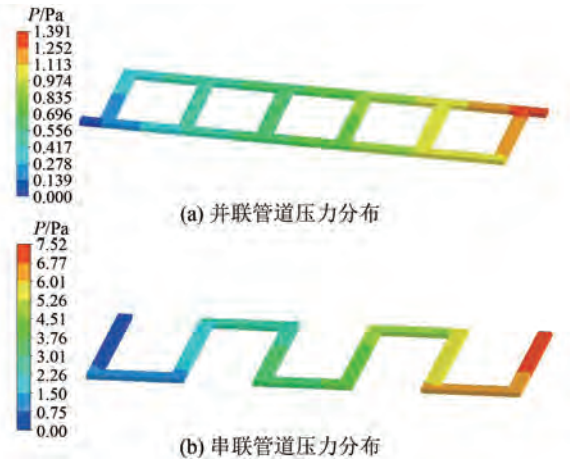

图 14 管口高度为 10 mm 时的管道内压力分布

Fig. 14 Pressure distribution in pipeline with 10 mm nozzle height

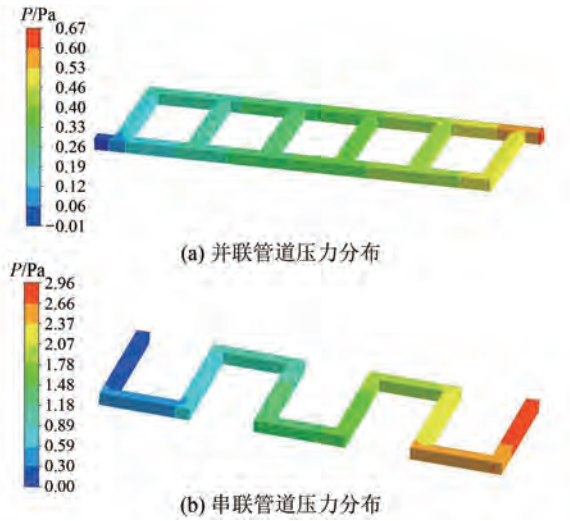

图 15 管口高度为 20 mm 时的管道内压力分布

Fig. 15 Pressure distribution in pipeline with 20 mm nozzle height

由图 14 和图 15 可知,两种管口尺寸的并联水冷管道压力差均小于串联水冷管道;10 mm 管口高度的并联型管道和串联型管道内最大压力差分别为 1.391 Pa 和 7.52 Pa;20 mm 管口高度的并联型管道和串联型管道内最大压力差分别为 0.67 Pa 和 2.96 Pa。不同管口尺寸的两种冷却管道的相关参数对比如表 6 所示。

由表 6 可知,相同结构下管口高度为 20 mm 的水冷管道比管口高度为 10 mm 的管道冷却效果提升了 8% 左右,管道内压力差降低了 50% 以上,但用水体积增大了约 2.67 倍。并且管道尺寸

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

增大，管道的生产成本和运行成本变高，经济性变差。综合考虑经济性和冷却效果，选取管口高度为 10 mm 的水冷管道。进一步对管口高度为 10 mm 管道的并联型和串联型两种结构进行对比分析。

表 6　两种冷却管道的相关参数

Tab. 6　Parameters of two types of cooling pipelines

参数名称	参数值			
	并联型		串联型	
管口高度/mm	10	20	10	20
电机最高温度/℃	79.7	67.18	61.52	50.1
管内压力差/Pa	1.39	0.67	7.52	2.96
用水体积/mm^3	189 510	505 370	145 380	387 680

设置入口水流速度范围为 0.01 m/s～0.05 m/s，且间隔 0.01 m/s 取值。仿真得到加装并联型和串联型两种结构的水冷管道后，FSMSLM 的最高温度和管道进出口压力差分别如图 16 和图 17 所示。

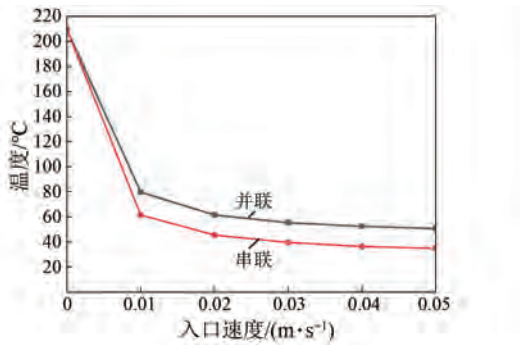

图 16　FSMSLM 最高温度对比

Fig. 16　Comparison of maximum temperatures in FSMSLM

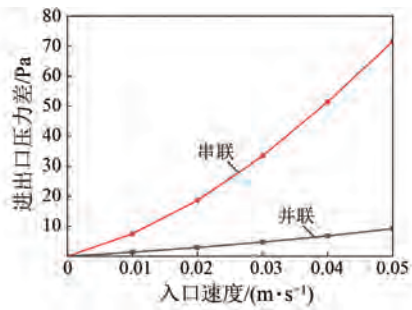

图 17　进出口压力差

Fig. 17　Inlet-outlet pressure differences

由图 16 可知，在同一入口水流速度下串联型水冷管道冷却效果更好，冷却效果比并联型水冷管道提高了约 8.7%。由图 17 可知，随着入口水流速度的增大两种结构的管道进出口压力差均增大，但相同入口速度下串联型水冷管道的进出口压力差约为并联型管道的 6 倍～8 倍。

综合考虑散热效果和经济性，选取管口高度为 10 mm 的并联型水冷管道作为 FSMSLM 的冷却装置。

5　结语

本文采用有限元法对 FSMSLM 的温度场进行了分析，设计了两种结构的水冷装置，综合分析了不同尺寸、不同结构的水冷装置的冷却效果和经济性，得出以下结论。

（1）通过有限元仿真得到 FSMSLM 的整体温度处于 200.29 ℃～209.68 ℃之间；发热集中在绕组部分，励磁绕组和电枢绕组线圈的最高温度分别达到了 209.26 ℃和 209.68 ℃，都超出了 H 级绝缘材料的极限允许工作温度 180 ℃，会影响电机运行状态和使用寿命，所以需要加装冷却装置。

（2）根据 FSMSLM 的结构设计了不同尺寸的并联型和串联型管道的水冷装置；对比分析加装水冷装置后的 FSMSLM 温度分布和水冷管道的压力场分布，综合考虑冷却效果和冷却装置的经济性，最终选取管口高度为 10 mm 的并联型水冷管道作为 FSMSLM 的冷却装置。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

孙煜昊进行了仿真建模分析、内容总结与论文撰写，蓝益鹏参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The simulation modeling analysis, content summary and paper writing were carried out by Sun Yuhao. The manuscript was revised by Lan Yipeng. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参 考 文 献

[1] 王会永，周保华，李向男，等. 直线电机的应用现状及发展趋势研究[J]. 微电机，2016，49(9)：

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

86-89+92.
WANG H Y, ZHOU B H, LI X N, et al. Study on development trend and application status of linear motor [J]. Micromotor, 2016, 49(9): 86-89+92.

[2] 林献坤, 张薇, 樊振华. 直线电机驱动进给轴热动态伪滞后建模与补偿方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19): 137-143.
LIN X K, ZHANG W, FAN Z H. Thermal dynamic hysteresis modeling and compensation for linear motor driven feed mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (19): 137-143.

[3] 张雪鹏. 双 V 型无铁芯永磁同步直线电机的冷却系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
ZHANG X P. Double V-type ironless permanent magnet synchronous linear motor cooling system design [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.

[4] 李佳雨, 蓝益鹏. 横向磁场电励磁磁通切换磁悬浮直线电机温度场有限元分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 54-61.
LI J Y, LAN Y P. Finite element analysis of temperature field of transverse magnetic field flux switched electric excited magnetic suspension linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 54-61.

[5] 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.

[6] 赵玫, 邹继斌, 张云亮, 等. 横向磁场永磁直线电机连续往复运行时温度场计算与分析[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(5): 77-83.
ZHAO M, ZOU J B, ZHANG Y L, et al. Computation and analysis of temperature field for transverse flux permanent magnet linear motor in continuous reciprocating running [J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(5): 77-83.

[7] 孙树文, 高振涛, 乔云飞, 等. 高速电主轴热特性建模与冷却系统参数优化方法研究[J]. 制造技术与机床, 2023, (10): 90-97.
SUN S W, GAO Z T, QIAO Y F, et al. Research on thermal characteristic modeling and cooling system parameter optimization of high-speed motorized spindle [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2023, (10): 90-97.

[8] LU Q F, ZHANG X M, CHEN Y, et al. Modeling and investigation of thermal characteristics of a water-cooled permanent-magnet linear motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (3): 2086-2096.

[9] 郑龙燕. 基于 170SD30-SY 型电主轴水冷系统数值分析与研究[J]. 制造技术与机床, 2022, (2): 164-168.
ZHENG L Y. Numerical analysis and research on water cooling system of 170SD30-SY motorized spindle [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022, (2): 164-168.

[10] 朱旭辉, 赵文祥. 高性能磁场调制永磁直线电机研究综述与展望[J]. 电机与控制应用, 2020, 47 (8): 1-12.
ZHU X H, ZHAO W X. Overview and prospect of high performance magnetic field modulation permanent magnet linear machine [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(8): 1-12.

[11] 杜爱赫, 解伟, 施振川, 等. 电动自行车用磁通切换电机研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 50-54.
DU A H, X W, SHI Z C, et al. Research on flux-switching machine for electric bicycle [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(8): 50-54.

[12] 郭剑雄, 马党国, 刘轩东, 等. 灵活调峰下发电机转子绕组的温度场及热变形分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 10-20.
GUO J X, MA D G, LIU X D, at al. Analysis of flexible peaking operation on temperature field and thermal deformation of the rotor winding of turbo-generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 10-20.

[13] FU Q, LV X J. Calculation of the thermal field of a linear induction motor (LIM) considering a discontinuous secondary plate [J]. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2023, 42(1): 241-249.

[14] CHEN Q P, SHAO H, HUANG J L, et al. Analysis of temperature field and water cooling of outer rotor in-wheel motor for electric vehicle [J]. IEEE Access, 2019, 7: 140142-140151.

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

[15] 祁欣. 绕组设计参数对扁线电机温度场影响分析[D]. 重庆:重庆理工大学，2022.
QI X. Analysis influence of winding design parameters on temperature field of hair-pin motor [D] Chongqing: Chongqing University of Technology，2022.
[16] 公晓彬. 基于热-流-磁耦合的永磁同步电机温度场分析[D]. 青岛：山东科技大学，2020.
GONG X B. Temperature field analysis of PMSM based on thermo-fliud-magentic coupling [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology，2020.
[17] 姜永泽. 车用永磁同步电机稳态温度场分析与冷却结构设计优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学，2022.
JIANG Y Z. Steady state temperature field analysis and cooling structure design optimization of vehicle permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology，2022.
[18] IDOUGHI L，MININGER X，BOUILLAULT F，et al. Thermal model with winding homogenization and FIT discretization for stator slot [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2011，47(12)：4822-4826.
[19] 孙磊. 通风式制动盘表面对流换热系数研究及散热性能优化[D]. 武汉：武汉理工大学，2018.
SUN L. Research on convection heat transfer coefficient on the surface of ventilated brake disc and optimization of heat dissipation performance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology，2018.
[20] 付豪，吴尧辉. 计及温度变化的潜油直线电机结构优化[J]. 电机与控制应用，2022，49(2)：41-46.
FU H，WU Y H. Structure optimization of submersible linear motor considering temperature variation [J]. Electric Machines & Control Application，2022，49(2)：41-46.
[21] 侯高林. 电动汽车驱动电机温度场分析及热管理系统研究[D]. 长春：吉林大学，2022.
HOU G L. Analysis on temperature field and thermal management system of electric vehicle driving motor [D]. Changchun: Jilin University，2022.
[22] 王小飞，代颖，罗建. 基于流固耦合的车用永磁同步电机水道设计与温度场分析[J]. 电工技术学报，2019，34(增刊 1)：22-29.
WANG X F，DAI Y，LUO J. Waterway design and temperature field analysis of vehicle permanent magnet synchronous motor based on fluid-solid coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2019，34(S1)：22-29.
[23] 刘显茜，李文辉，曾朴，等. 永磁同步电机机壳串并联混合流道液冷分析[J]. 兵器装备工程学报，2024，45(2)：109-116.
LIU X Q，LI W H，ZENG P，et al. Liquid cooling analysis of series-parallel hybrid flow channel of permanent magnet synchronous motor casing [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2024，45(2)：109-116.
[24] 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.
[25] 韩雪秋，安跃军，安辉，等. 真空干泵驱动电机冷却效果分析[J]. 电机与控制应用，2021，48(6)：69-76.
HAN X Q，AN Y J，AN H，at al. Analysis of cooling effect of drive motor for vacuum dry pump [J]. Electric Machines & Control Application，2021，48(6)：69-76.
[26] 唐琳，赖晨光，谭礼斌. 电机及控制器冷却流道散热性能分析及结构优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2023，37(2)：104-112.
TANG L，LAI C G，TAN L B. Heat dissipation performance analysis and structure optimization of cooling channels for motors and controllers [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Sciences)，2023，37(2)：104-112.

收稿日期:2024-09-07
收到修改稿日期:2024-10-18
作者简介：
孙煜昊(1998-)，男，硕士研究生，研究方向为电机及其控制，529658480@qq.com；
*通信作者：孙煜昊(1998-)，男，硕士研究生，研究方向为电机及其控制，529658480@qq.com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.