

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

李佳雨, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 研究用于轨道交通的横向磁场电励磁磁通切换磁悬浮直线电机特殊结构下的温升问题, 设计冷却系统以保证电机正常运行。分析电机的结构和运行原理, 建立了三维稳态温度场数学模型, 并推导出边界条件方程。考虑电机各部分热交换的情况, 确定各材料的导热系数以及电机不同部分的对流换热系数。通过有限元方法计算出电机的铜损耗与铁损耗, 并求出相应的生成热。利用三维有限元法对电机不同工况下的温度场进行计算, 得到了电机铁心、电枢、励磁绕组的温度场分布情况。最后, 设计冷却系统, 比较自然风冷和强制水冷的温度分布, 证明该冷却系统装置的可行性和合理性。

关键词: 横向磁场; 电励磁; 磁通切换; 磁悬浮直线电机; 稳态温度场; 三维有限元法

中图分类号: TM383 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)10-0054-08

doi: 10.12177/emca.2023.117

Finite Element Analysis of Temperature Field of Transverse Magnetic Field Flux Switched Electric Excited Magnetic Suspension Linear Motor

LI Jiayu, LAN Yipeng

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

Abstract: The temperature rise problem of magnetic suspension linear motor with transverse magnetic field, electric excitation and flux switching is studied, and the cooling system is designed to ensure the normal operation of the motor. The structure and operation principle of the motor are analyzed, and the three-dimensional steady-state temperature field mathematical model are established, and the boundary condition equation are derived. 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 finite element method, and the corresponding heat of formation is obtained. The three-dimensional finite element method is used to calculate the temperature field under different working conditions of the motor, and the temperature field distribution of the motor core, armature and excitation winding is obtained. Finally, the cooling system is designed, and the temperature distribution under natural air cooling and forced water cooling conditions is compared, which proves the feasibility and rationality of the cooling system.

Key words: transverse magnetic field; electric excitation; flux switching; magnetic suspension linear motor; steady temperature field; three-dimensional finite element method

收稿日期: 2023-06-12; 收到修改稿日期: 2023-06-27

作者简介: 李佳雨(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

蓝益鹏(1962—), 男, 教授, 博导, 研究方向为电机及其控制、数控技术。(通信作者)

0 引言

横向磁场磁通切换电励磁磁悬浮直线电机(TMFFSEEMSLM)主要应用于磁悬浮列车的驱动系统,将横向磁通与磁悬浮技术相结合,实现了进给、悬浮、导向一体化,电励磁形成的气隙磁场可调,有利于实现悬浮力的调节^[1]。TMFFSEEMSLM使用的是短定子、长定子结构,电枢绕组和励磁绕组都位于电机动子上,从而降低了电机的制造成本,特别适合长距离的轨道交通运输系统^[2]。

由于该电机励磁绕组和电枢绕组都在短定子这一特殊结构上,当绕组被加载时,该电机的发热将集中在定子侧,散热困难,从而引起各种故障,降低其使用寿命。因此,需要对其温度场进行研究。文献[3]以一种长定子短定子圆柱形直线电机为对象,针对其运行工况,选择不同的温度场计算区域,采用有限元方法构建其二维等效计算模型,给出其等效对流传热系数的确定方法。但相较于三维仿真可以模拟物体在三维空间中的运动,可以更准确地计算物体之间的相互作用力和运动轨迹,二维仿真不能更好地满足实际需求。温度场计算模型中,文献[4]给出基本假设和边界条件,对扁平型直线异步电机进行求解,通过计算得出在静止状态下的温升规律。但在工作过程中,由于定子与气隙之间的气流运动,以及定子和定子的相对位置等因素的影响,用这种静态方法来计算线性电机的温升,对不同工作状态下电机的温升有较大的限制,并不准确。文献[5]在时域温度场有限公式法数学模型的基础上,采用迭代弱耦合分别对简单几何体的三维感应电热问题进行了研究。文献[6]对一个简单微机电系统展开了温度场强耦合分析,由此看出,有限公式法在耦合场计算上,具有较小计算量的优点。文献[7]通过热网络分析建立高压永磁同步电机转子三维温度场仿真计算模型,以散热系数和构件温度之间的非线性关系为前提,提出了一种新的端部散热系数计算方法,为散热系数求解拓宽了思路。

因为本文所研究的 TMFFSEEMSLM 为横向磁场,其磁场在空间中为三维分布,其电枢绕组的绕制方向与电机的运动方向平行,所以在确定温

度场的求解域时也与常规直线电机不同,因此不能仅对定子与动子相耦合的区域进行单独的考虑,需要构建包括励磁线圈、电枢线圈及气隙在内的三维结构的温度场模型^[8]。同时,对电机各个部件的损耗进行了计算,并导入 Workbench 用有限元方法对其进行了温度场的模拟。基于其自然散热条件下的温度分布,设计了冷却系统并验证了冷却效果,为电机的实际应用提供了重要参考。

1 TMFFSEEMSLM 的运行原理

1.1 TMFFSEEMSLM 结构

图 1 为 TMFFSEEMSLM 电机结构示意图,动子铁心采用双 H 结构,电枢绕组安装在横梁上,接通正弦交流电;两个 H 型铁心的横梁上各安装一个励磁绕组,通入直流电形成两个相反充磁方向的永磁体;定子铁心采用交错排列的 U 型结构。TMFFSEEMSLM 电机的基本参数见表 1。

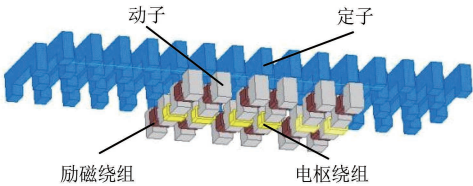


图 1 TMFFSEEMSLM 的结构示意图

表 1 TMFFSEEMSLM 电机参数

参数名称	参数值
相数	3
动子铁心横向长度/mm	336
动子铁心纵向宽度/mm	48
动子铁心高度/mm	80
动子齿高/mm	24
定子铁心横向长度/mm	240
定子铁心纵向宽度/mm	30
定子铁心高度/mm	60
定子齿高/mm	32
额定速度/(m·s ⁻¹)	1.6
励磁绕组匝数	270
电枢绕组匝数	240
气隙/mm	3

1.2 磁通切换原理

磁通切换指的是绕组里匝链的正负磁通极

性及值的大小,将按照转子所处的不同位置进行切换。初级磁通回路与 TMFFSEEMSLM 垂直,而励磁绕组的磁场则穿过初级铁心和气隙进入次级铁心和气隙,从而形成一条闭合的磁通回路。空载运行时,原动机拖动其做直线运动。图 2(a)~(d)为四种电角度下动子的磁通回路方向。

(1) 在电角度为 90° 时,第一个和第三个动子齿与其相对应的定子齿完全对应,励磁绕组的磁通完全经过左侧的一个定子形成磁通回路,方向为逆时针,合成磁链为正向最大。

(2) 在电角度为 180° 时,动子齿与不同的定子齿有重合,形成两个不同的磁通回路,一部分是顺时针,另一部分为逆时针,产生的磁链方向相反,幅值相同,经过叠加后相互抵消,故合成磁链为零,电机处于第一平衡位置。

(3) 在电角度为 270° 时,第二个和第四个动子齿与其相对应的定子齿完全重合,励磁绕组的磁通完全经过右侧的一个定子,磁通回路方向为顺时针,合成磁链为负向最大。

(4) 在电角度为 360° 时,此时动子齿与定子齿再次形成两个不同的磁通回路,一部分为逆时针,另一部分为顺时针,两者经过叠加后的合成磁链为零,电机处于第二平衡位置。

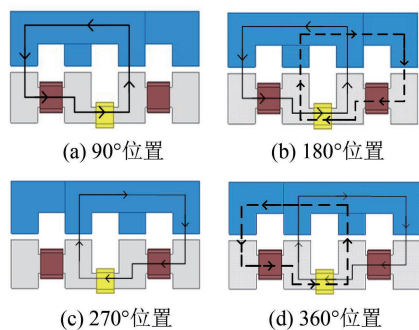


图2 不同电角度磁通回路方向

1.3 TMFFSEEMSLM 的电磁推力

在 TMFFSEEMSLM 负载运行时,电流通过电枢线圈。在电机的空气间隙内,由励磁电流引起的磁动势分别为 F_m 、 F_n ,由电枢电流引起的磁动势分别为 F_1 和 F_2 。如图 3 所示,在该位置时,通入正向电枢电流,合成磁动势满足 $F_1 + F_m > F_2 - F_n$,根据电机的“最小磁阻”原理,可以看出动子

铁心运动趋势为由 1 到 2。利用电枢电流与激励电流所形成的磁通交链,实现了电机在直线运动中的牵引。

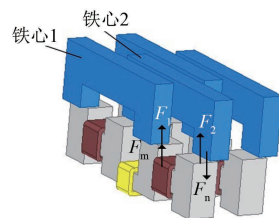


图3 动子运行位置

1.4 TMFFSEEMSLM 的悬浮力

TMFFSEEMSLM 的悬浮力来自于励磁线圈在空气间隙内产生的磁场和电机定子铁心之间的相互影响。只有在磁浮列车受到的引力等于这种磁拉力的情况下,才能达到悬浮的目的。另外,还可以通过调整激励电流,使其在各种重力条件下保持稳定的悬浮。

1.5 TMFFSEEMSLM 的导向力

如图 4 所示, TMFFSEEMSLM 的导向力产生是由于电机在运行时出现动子部分的横向偏移,最小磁阻理论是指磁通将沿磁阻最小的路径封闭,所以当动子铁心运动时,其中轴线会被驱使与磁场的中轴线重合。在此过程中形成的牵引力就是 TMFFSEEMSLM 的导向力。

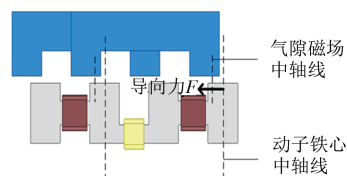


图4 导向力原理图

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

根据热传导理论,电机内部的热传输有导热、对流和辐射三种途径。空气中电机的热量交换主要涉及热对流和热辐射两种方式。但是在这种电机中,热辐射所产生的热能很少,所以在进行电机温度场的计算时,只有热传导和对流两种情况被考虑。在傅里叶定律、能量守恒定律和传统的热传导理论的基础上,构建了以下电机的热传导模型,并给出了其边界条件^[9]:

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

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。

为了在不影响计算精度的情况下缩短计算时间, 构建三维温度场的数学模型需要作以下几个基本假定^[10]:

- (1) 环境温度恒定为 25 °C, 不受电机散热的影
- 响;
- (2) 电机中热源随温度的变化忽略不计;
- (3) 机械损耗忽略不计;
- (4) 不考虑热辐射对电机的影响。

2.2 导热系数

随着电机温度的升高, 电机材料会发生属性上的变化, 这会对电机的运行产生影响。当材料没有到达熔化或蒸发的程度时, 其热传导率一般与温度成线性关系^[11]:

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

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。

将电机运行的环境温度设定为 25 °C 并维持不变, TMFFSEEMSLM 各部分的导热系数如表 2 所示。

表 2 电机材料的导热系数 W/(m·k)

电机材料	x 方向	y 方向	z 方向
定子 (DW310-35)	42	42	1.2
定子 (Steel_1010)	45	45	45
绕组	385	385	385
空气	0.026	0.026	0.026

2.3 对流换热系数

本文研究的 TMFFSEEMSLM 对流换热是通过热传导和热对流实现的。对流换热现象存在于定子外表面、定子槽口、气隙表面和转子外表面等部分。因此, 在选择换热系数时需要根据流体流动的形式来进行具体的选择, 采用不同的经验公式进行计算。

(1) 外表面对流换热系数

依据公式, 在 5~25 m/s 之间的空气流速 v_1 与外表面对流换热系数 α_1 之间的关系可以下式来表达^[12]:

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

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。

因为在本论文中, 电机的定子是静止的, 并且电机的外表面是自然的散热体, 因此将电机的对流换热系数取 $\alpha_1 = 14.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$ 。

其他外表面的换热系数可以通过下式计算^[13]:

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

式中: λ 为导热系数, 25 °C 时, $\lambda = 2.63 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$; 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 Re 和努塞尔数 Nu ^[14]:

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

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

式中: l 为气隙长度。

用式 (7) 可以计算出气隙表面的对流换热系数:

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

电机对流换热系数如表 3 所示。

表 3 电机对流散热系数 W/(m²·k)

参数名称	对流换热系数
定子外表面	14.2
定子外表面	39
气隙表面	29

3 热源计算

3.1 铁心损耗

电机的铁心损耗分为两种, 分别是基本铁耗

和附加铁耗。在此基础上,还可以将基本铁损耗划分为磁滞损耗和涡流损耗。在不考虑因磁场谐波而产生的额外损耗的情况下,采用了 50 Hz 的频率。在正弦磁通下,频率范围内的铁耗为^[15]

$$P_{Fe} = K_h f (B_m)^2 + K_e (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5} \quad (8)$$

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

利用 ANSYS 仿真软件对铁耗进行了模拟,如图 5 和图 6 所示。

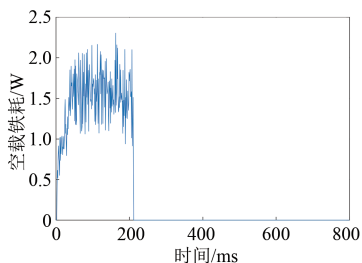


图 5 TMFFSEEMSLM 空载铁耗

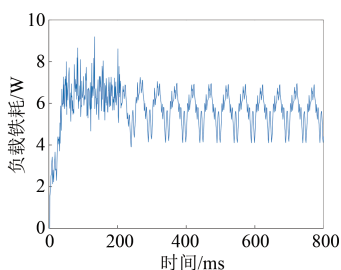


图 6 TMFFSEEMSLM 负载铁耗

对电机进行模拟计算,结果表明 TMFFSEEMSLM 空载运行时,平稳后的铁耗趋近于零;负载运行达到稳定后,铁耗在 4 ~ 7 W 范围内变化,用有限元方法计算平均为 5.75 W。

3.2 绕组损耗

TMFFSEEMSLM 有电枢绕组和励磁绕组,根据焦耳-楞次定律,分别得到电枢绕组的铜耗和励磁绕组的铜耗^[16]。

$$\begin{cases} P_D = 3I_D^2 R_D \\ P_L = I_L^2 R_L \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_D 为电枢铜耗, P_L 为励磁铜耗; I_D 为电枢电流有效值, I_L 为励磁电流; R_D 为电枢线圈电阻, R_L 为励磁线圈电阻。

由式(9)可以看出,绕组线圈的电流极大地影响了绕组损耗,并且还会导致电机工作发热。

其中阻值 R 可由计算得到:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (10)$$

式中: ρ 为电阻率; L 为线圈总长; S 为线圈横截面积。

经计算电枢绕组阻值为 4.262 Ω ,励磁绕组阻值为 5.328 Ω 。利用 ANSYS 仿真软件对铜耗进行了模拟,如图 7 和图 8 所示。

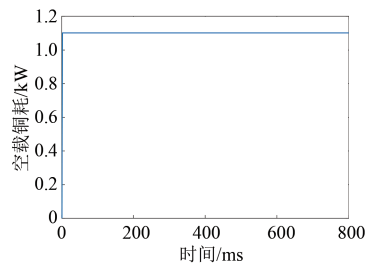


图 7 TMFFSEEMSLM 空载铜耗

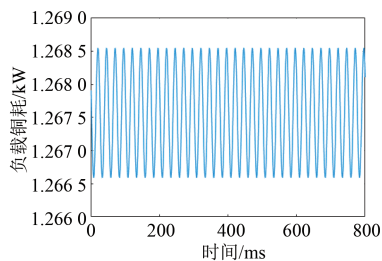


图 8 TMFFSEEMSLM 负载铜耗

由模拟结果可知,空载状态铜耗完全由励磁线圈生成,TMFFSEEMSLM 到达稳定后,铜耗平均值是 1.1 kW,见图 7;负载状态下,铜耗由励磁线圈和电枢线圈共同生成,铜耗为 1.266 65 ~ 1.268 5 kW,平均值为 1.267 5 kW,见图 8。

3.3 生热率

生热率是电机单位体积内产生的热量,计算式为

$$Q = \frac{W}{V_m} \quad (11)$$

式中: Q 为电机生热率; W 为其各部分损耗; V_m 为电机各部分体积。

结合 ANSYS 仿真软件模拟得到的铁耗和铜耗,求出 TMFFSEEMSLM 各部件的生热率如表 4 所示。

4 温度场有限元计算

将上文计算出的损耗结果导入 Workbench 软件

中分析空载和负载两种工况运行时的稳态温度场。

表 4 TMFFSEEMSLM 各部分生热率 W/m ³		
电机部件	空载	负载
电枢绕组	0	6.96×10^6
励磁绕组	1.57×10^6	1.57×10^6
定子铁心	0	1229

4.1 空载温度

在以上所建立模型的基础上,对TMFFSEEMSLM各部分的导热系数、对流换热系数和生热率进行了计算。采用Workbench有限元软件对空载情况下的温度场进行了分析,有限元仿真结果如图9所示。

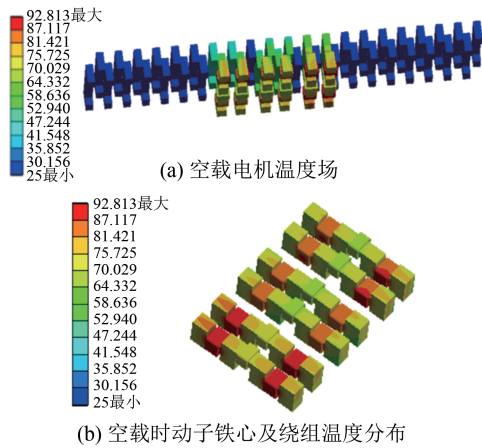


图9 空载有限元仿真结果

由图9可知,空载时热量主要集中在电枢线圈、励磁线圈和定子铁心。空载状态下,线圈最热点位于励磁线圈达92.813℃。

4.2 负载温度

负载情况下的有限元仿真结果如图10所示。额定负载运行时,最高温度仍处在绕组处,最高达到189.52℃,原因是电枢绕组与励磁绕组都位于定子上,使其散热相对困难。在自然降温的情况下,电机的各个部位的温度都已经超出了绝缘的极限,铁心的温度也超出常温,导致电机的热变形,进而影响电机的稳定性。

5 TMFFSEEMSLM 冷却系统设计

5.1 水冷装置设计

从上述有限元结果可以看出, TMFFSEEMSLM 需要在初级进行冷却。在电机

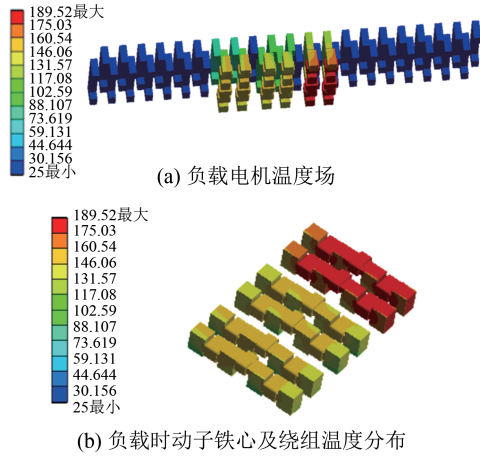


图10 负载电机温度场

中,常用的冷却剂为两种,一种为水,一种为油。在这两种介质中,水绿色环保,成本较低,并且具有良好的冷却效果,所以TMFFSEEMSLM采用水冷方法^[17]。

对于冷却系统的设计需要遵循以下原则:

- (1) 水冷装备的设计应该尽可能地平滑,以减小冷却液的流阻;
- (2) 水冷装备与初级接触面积大,以便增强散热性能;
- (3) 水冷设备易于安装;
- (4) 水冷设备对电机运行无影响。

本文选择把冷却装置镶嵌在定子铁心处,采用具有良好导热性能的铝制S形水冷管。冷却装置水管圆弧部分直径144 mm,同相水管间距96 mm,异相水管间距192 mm,冷却结构简单,制造成本较低。冷却装置如图11所示。

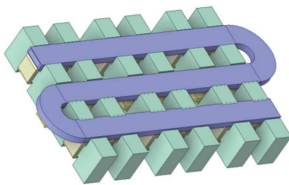


图11 水冷管示意图

该散热装置能不影响电机运行的情况下提高了电机的空间利用率。在电机运行过程中,绕组产生的热能经过热传导进入定子铁心,然后通过水冷装置将热量释放出去,以确保电机工作的连续稳定。

5.2 水冷后电机的温度场分析

在加入水冷设备之后,电机的各种对流传热

系数和各种边界条件都没有改变,水的流速为 0.2 m/s,入水口温度是 25 ℃,然后利用 Fluent 软件对 TMFFSEEMSLM 进行热流耦合计算,如图 12 所示。

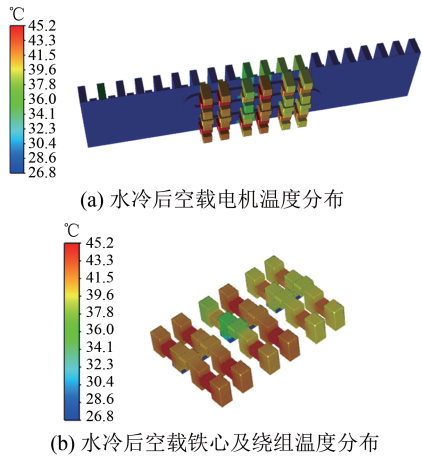


图 12 水冷空载有限元仿真结果

由图 12 可知,在电机内部加装水冷管后,温度降低,相对于自然冷却而言有所差别。加入水冷管后,由励磁线圈铜损耗引起的发热通过水冷却系统被排出,使换热速度加快,起到冷却作用。表 5 为自然散热与强迫水冷却的最高工作温度。

表 5 电机最高温度对比			
电机部位	自然散热	水冷装置	温差
绕组	92.813	45.2	47.613
定子铁心	81.421	41.5	39.921

电机在长期负荷下运转时,其工作温度比空载时高很多,需要有较强的散热性能。图 13 为负载条件下电机散热分布图。

与自然对流传热相比,电机冷却设备具有更显著的降温作用,并且电机的绕组、定子铁心均处于其稳定工作的温升范围内,这就证明了水冷系统是有效的。

6 结 语

论文研究了一种新型的横向磁场电励磁磁通切换磁悬浮直线电机温度场的分布,并设计了相应的冷却装置。

(1) 分析横向磁场电励磁磁通切换磁悬浮直线电机的结构与磁通切换原理,以及电磁推力、悬浮力及导向力产生原理。

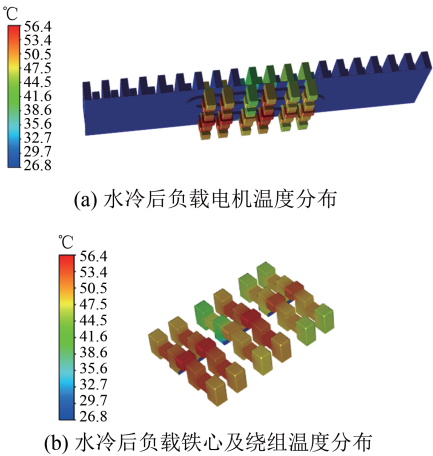


图 13 水冷负载有限元仿真结果

(2) 建立电机的三维温度场与对流传热模型,计算各种材质的导热系数,并模拟分析空载和负载下电机的损耗,从而得到各部分热生成率。

(3) 利用有限元法,分别建立自然对流状态和安装水冷管后电机的三维温度场仿真模型,对电机各部分的温度分布情况进行计算与分析。

(4) 设计冷却系统,结果显示电机负载运行时冷却系统可以将绕组最高温度从 189.52 ℃ 降到 56.4 ℃。验证了水冷却对 TMFFSEEMSLM 的有效性。

【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.

[2] 张发军,邓安禄,宋钰青,等. 基于动态柔顺永磁同步直线电动机的 PID 控制方法研究[J]. 制造技术与机床, 2019(8): 63-67.

[3] 黄旭珍. 高功率密度永磁电机的损耗及温升特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[4] 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.

[5] BULLO M,D'AMBROSIO V,DUCHIERO F,et al. A 3-D cell method formulation for coupled electric and thermal problems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1197-1200.

[6] ALOTTO P,FRESCHI F,REPETTO M. Multiphysics problems via the cell method: the role of Tonti Diagrams [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 2959-2962.

- [7] 李伟力, 陈婷婷, 曲凤波, 等. 高压永磁同步电动机实心转子三维温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 55-60.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王宇婷, 蓝益鹏. 混合励磁磁通切换直线磁悬浮电动机的温升特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(12): 60-66+73.
- [11] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 308-344.
- [12] STATON D A, CAVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(10): 3509-3516.
- [13] 鲍里先科. 电机中的空气动力学与热传递[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985, 12-20.
- [14] 王晓远, 高鹏. 电动汽车用油内冷永磁轮毂电机三维温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(3): 36-42.
- [15] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [16] 邓建国. 单相串励电动机换向器瞬态温度场的分析和计算[J]. 电机电器技术, 1998(2): 5-8.
- [17] 张玉秋. 永磁直线伺服电机及其冷却系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

(上接第 53 页)

- [11] 殷允飞, 上官凌霄, 侯福金, 等. 基于二阶滑模自抗扰控制的道路融冰除雪系统水泵电机优化策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 29-38.
- [12] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6725.
- [13] 袁雷. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [14] 傅琪. 基于自抗扰控制的永磁同步电机伺服系统研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2021.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| • 控制与应用技术 | • 研究与设计 | • 故障诊断与保护 |
| • 新能源发电与局域电网 | • 新能源汽车技术 | • 发电机组及其控制 |
| • 测试技术与测控系统 | • 材料与工艺 | • 电机生产及质量管理 |
| • 电力电子变流器技术 | • 智能制造 | • 节能应用 |
| • 实用技术成果 | | |