

基于场路耦合的牵引用直线感应电机温度场分析

薛雍鹏¹ 王淑红¹ 吴攀² 柴景棠¹

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 030024, 太原; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 030001, 太原)

摘要 [目的]城市轨道交通中直线感应电机因初级铁心开断、端部半填充,以及端部效应的影响,给其电磁性能分析、控制策略公式推导、各部件损耗计算以及温度场分析带来困难,实际工程中电机运行多结合控制系统,必须解决城市轨道交通驱动系统中直线感应电机在运行中温度场分析的困难问题。[方法]使用多仿真平台联合搭建了考虑横向和纵向端部效应的直线感应电机矢量控制系统场路耦合仿真模型,建立了一台 12 kW 直线感应电机的三维流固耦合温度场和有限元电磁仿真模型。采用有限体积法对该电机的流体场和温度场进行耦合分析,利用冰冻转子法,综合考虑了周围环境中空气流体和动子运动对电机稳态温升的影响。[结果及结论]通过样机的开环运行试验验证了该方法的准确性。在此基础上,结合仿真结果得出了该样机在矢量控制系统下不同牵引工况的运行性能,在给定速度下均可快速响应并达到稳定,控制效果较好。基于损耗曲线计算求得各部件的热源,进一步得出样机的温度场分布,可直观看出空气流体对温度分布的综合影响。

关键词 城市轨道交通车辆;牵引用直线感应电机;场路耦合;流固耦合;流体场;温度场

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.026

Temperature Field Analysis of Traction Linear Induction Motors Based on Field-circuit Coupling

XUE Yongpeng¹, WANG Shuhong¹, WU Pan², CHAI Jingtang¹

(1. School of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, 030024, Taiyuan, China; 2. Shanxi Electric Power Science Research Institute, 030001, Taiyuan, China)

Abstract [Objective] In urban rail transit systems, the analysis of LIM (linear induction) faces challenges due to factors such as primary core discontinuity, partial filling of the end region, and end effects. These factors complicate the analysis of electromagnetic performance, derivation of control strategy formulas, calculation of component losses, and temperature field analysis. In practical engineering applications, LIMs

typically operate in conjunction with control systems, necessitating solutions to the complex problem of temperature field analysis in LIMs used in urban rail transit drive systems.

[Method] A field-circuit coupling simulation model for an LIM vector control system is jointly built by using multiple simulation platforms, considering both transverse and longitudinal end effects. A 12 kW LIM is modeled using 3D fluid-solid coupling temperature field and finite element electromagnetic simulation methods. The finite volume method is employed for coupling the motor's fluid and temperature fields, and the frozen rotor method is applied to account for the effects of surrounding air flow and rotor motion on the steady-state temperature rise of the motor. [Result & Conclusion] The accuracy of the proposed method is validated through open-loop operation experiments on a prototype. Based on the simulation results, the performance of the prototype under different traction conditions with the vector control system is analyzed. The motor exhibits fast response and stability at given speeds, demonstrating effective control. By calculating heat sources from loss curves, the temperature field distribution of the prototype is determined, providing a clear visualization of the combined effects of air flow on temperature distribution.

Key words urban rail transit vehicle; linear induction motor for traction; field-circuit coupling; fluid-solid coupling; fluid field; temperature field

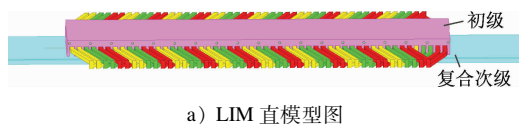
在城市轨道交通中,与传统旋转电机相比,直线感应电机(LIM)因无需传动转换装置且结构简单、易于维护、电磁牵引力大、噪声小等特点,已广泛应用于地铁、磁悬浮等交通运输领域。在有限元分析中,LIM二维模型只能考虑纵向端部效应对电机的影响,损耗计算结果误差大。轨道牵引电机一般采用变频器供电,电机会产生涡流损耗和谐波损耗,导致电机温升增大^[1]。文献[2]搭建了直线电机场路耦合模型,但电机本体采用二维有限元模型,损耗计算误差较大。文献[3]搭建了电机的流固耦合仿真模型,利用有限元法研究了通风孔径对牵引电机温度场的影响,但未计入动子旋转对温度

的影响且电机供电方式为正弦电源。在分析 LIM 稳态温升时,因电机运行速度高,空气流体以及动子运动对温升的影响不可忽略,因此需建立流固耦合的温度场仿真模型。本文以 1 台牵引用 12 kW 的单边短初级复合次级直线感应电机为对象,搭建了横向和纵向端部效应的场路耦合联合仿真模型,分析了多工况下的运行性能和各类损耗。在求解稳态温升时,搭建了流固耦合模型,通过样机开环运行测试验证了该温升分析手段的准确性,继而结合不同运行工况,仿真分析了轨道驱动用直线感应电机温度场。

1 LIM 样机及三维有限元仿真

1.1 样机参数

LIM 直模型图如图 1 a) 所示,本文分析及试验用轨道驱动 LIM 样机如图 1 b) 所示。该样机的牵引特性图如图 2 所示。



a) LIM 直模型图



b) 圆弧形 LIM 样机图

图 1 LIM 直模型图和圆弧形样机图

Fig. 1 Diagram of LIM direct model and photo of circular prototype

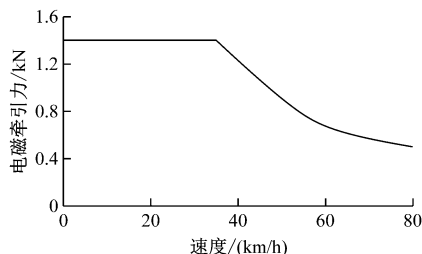


图 2 样机牵引特性图

Fig. 2 Diagram of prototype traction characteristics

因实际中次级轨道过长且无重复,该样机将初级弯折成圆弧以便试验测试,次级弯折成完整圆环以增大次级利用率。样机运行时,初级绕组固定,次级圆环旋转,相关物理参数转换为直模型,近似

等效实际中初级为运动部件。初级绕组采用双层叠绕,次级为铝板钢板复合次级,无外壳结构。样机的冷却方式为走行风自然冷却。该样机的基本参数如表 1 所示。

表 1 LIM 样机参数

Tab. 1 Parameters of LIM prototype

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	12	额定电压/V	220
额定电流/A	240	频率/Hz	44.5
速度/(km/h)	58	效率/%	69.4
功率因数	0.49	初级宽/mm	220
槽数	53	气隙/mm	9
次级铝板厚/mm	4	次级铝板宽/mm	240
次级钢板厚/mm	20	次级钢板宽/mm	240

1.2 有限元模型

因 LIM 结构特殊性,横向及纵向端部效应均对电机性能有较大影响,为了准确计算电机的性能及损耗,本文建立了如图 3 所示的样机三维全域有限元仿真模型。

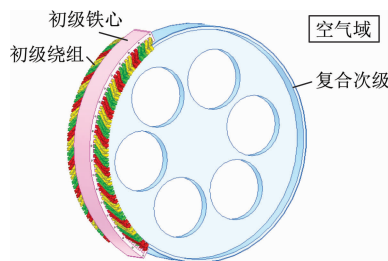


图 3 样机三维全域有限元仿真模型

Fig. 3 Prototype 3D global finite element simulation model

2 场路耦合仿真

2.1 考虑端部效应的 LIM 矢量控制系统

通过电磁场理论推导,LIM 横向端部效应对电机的影响可表示为式(1)次级电阻的修正系数 C_r 和激磁电感的修正系数 $C_x^{[4]}$:

$$\begin{cases} C_r = \frac{sG \{ \operatorname{Re}^2(T) + \operatorname{Im}^2(T) \}}{\operatorname{Re} T} \\ C_x = \frac{\{ \operatorname{Re}^2(T) + \operatorname{Im}^2(T) \}}{\operatorname{Im} T} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

s ——电机运行时的转差率;

G ——电机品质因数;

Re ——复数的实部;

Im ——复数的虚部;

T —— s 的某个函数, 详见参考文献[4]。

在计入横向端部效应影响后, LIM 修正后的次级电阻 R_{re} 和激磁电感 L_{mc} 可表示为:

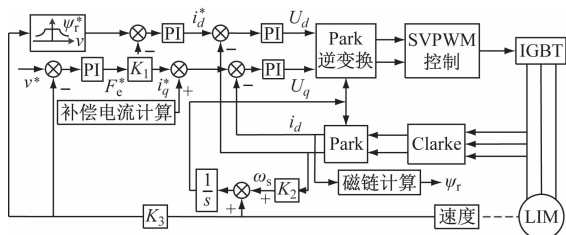
$$\begin{cases} R_{re} = C_r R_r \\ L_{mc} = C_x L_m \end{cases} \quad (2)$$

式中:

R_r ——不考虑端部效应时次级电阻值;

L_m ——不考虑端部效应时初次级绕组间互感。

在此基础上, 考虑动态纵向端部效应, 在 $d-q$ 旋转坐标系下, 次级磁链定向于 d 轴, 搭建 LIM 矢量控制系统如图 4 所示, K_1 、 K_2 、 K_3 是转换系数^[5]。与旋转异步电机矢量控制系统相比较, 引入补偿电流来弥补纵向端部效应对励磁回路的影响。



注: PI 为调节器; Park 和 Clarke 为坐标变换; SVPWM 为空间矢量控制; IGBT 为绝缘栅双极晶体管; $\frac{1}{s}$ 为积分; ψ_r^* 为次级磁链给定值; ψ_r 为次级磁链; v^* 为速度给定值; i_d^* 为 d 轴电流给定值; i_q^* 为 q 轴电流给定值; F_e^* 为电磁牵引力给定值; U_d 为 d 轴电压; U_q 为 q 轴电压; ω_s 为转差角频率。

图 4 LIM 矢量控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of LIM vector control system

2.2 场路耦合模型

多平台场路耦合仿真模型如图 5 所示。Simulink 软件提供矢量控制的电压信号, Simpler 软件和 Maxwell 软件提供接口电路及样机本体有限元仿真模型。

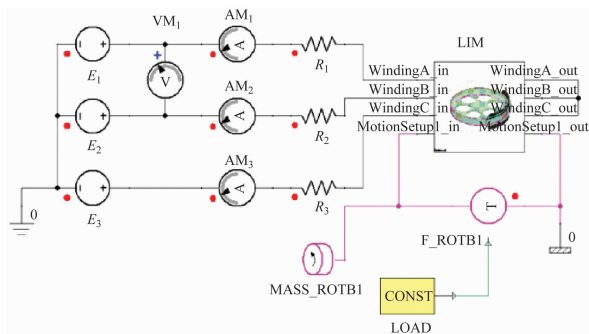


图 5 Simpler 软件中 LIM 仿真电路图

Fig. 5 Diagram of LIM simulation circuit in Simpler software

图 5 中: LIM 模块为 Maxwell 中样机的三维有限元模型; VM_1 为电压表; R_1 、 R_2 、 R_3 为每相绕组电阻; LOAD 和 F_ROTBI1 模块为电机负载; E_1 、 E_2 、 E_3 为经矢量控制系统计算后输出到电机的三相电压源信号; 电流表 AM_1 、 AM_2 、 AM_3 测得的三相电流值和 MASS_ROTBI1 模块测得的速度值返回控制系统实现电机双闭环矢量控制。

3 三维温度场仿真

分析过程采用了稳态温升的求解方法: 冰冻转子法是较为简易的多运动参考系模型, 利用不同部件的参考系相对位移来等效动子运动。

该方法能够考虑动子旋转对温升大小及分布的影响。与动网格手段相比, 在不失准确度的前提下, 该方法相对简单且计算量小。温度场仿真模型中, 在图 3 的外围空气静域与动子之间设置一层空气静域, 动域包裹整个动子, 其参考系运动速度为次级速度, 动域与外围空气静域的边界为内部面, 与次级的边界为传热面。

4 样机温升试验及仿真结果

4.1 场路耦合结果分析

所有仿真运行工况均为带负载直接启动。对应图 2 所示电机牵引特性, 图 6、图 7 分别为低速点 35 km/h、高速点 80 km/h 时的运行性能图。

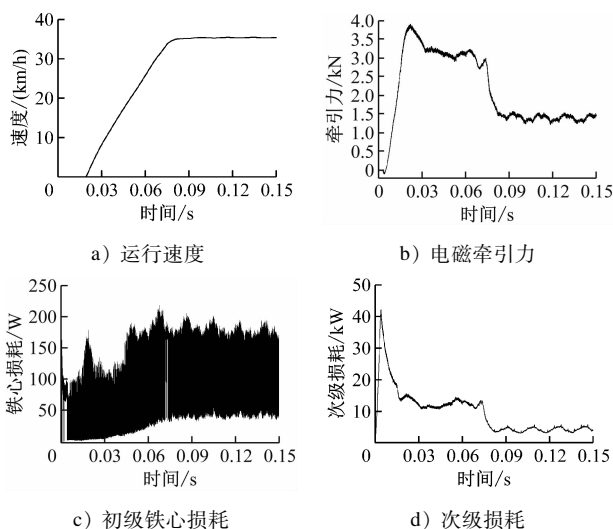


图 6 低速点 35 km/h 样机性能图

Fig. 6 Diagram of prototype performance at low-speed point 35 km/h

对比各个工况下的仿真结果, 运行速度均可以稳定在给定转速下, 稳态误差分别为 1 %、0.4 %,

认为该控制系统调节性能良好。

取各个工况下次级损耗和初级铁心损耗的平均值,以及根据稳态电流计算定子绕组铜损,作为温度场分析时的各部件热源给定(如表2所示)。

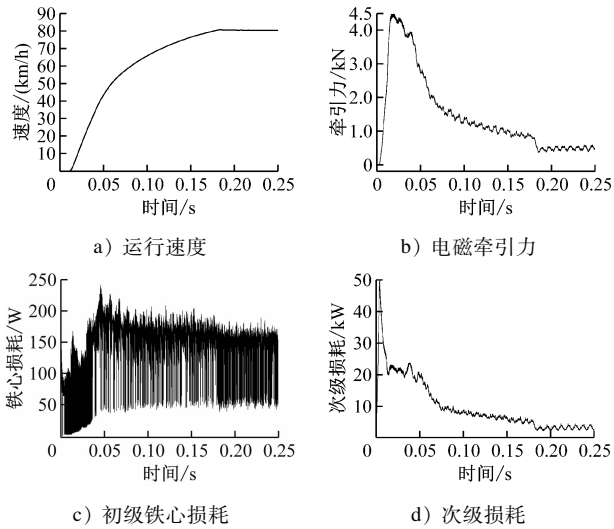


图7 高速点 80 km/h 样机性能图

Fig. 7 Diagram of prototype performance at high-speed point 80 km/h

表2 各部件损耗及生热率

Tab.2 Loss and heat generation rate of each component			
工况	位置	损耗/kW	生热率/(W/m ³)
35 km/h	初级铁心	0.133	6 932
	初级绕组	4.615	273 936
	复合次级	4.371	844 083
80 km/h	初级铁心	0.143	7 454
	初级绕组	1.942	115 290
	复合次级	3.118	602 193

4.2 场路耦合下温度场结果分析

仿真分析所得在低速点 35 km/h、高速点 80 km/h 的稳态温升分布如图8、图9所示。空气流动方向为样机轴向方向,风速给定 5 m/s,以模拟实际工况下冷却风扇的作用效果。

在轴向空气流体的作用下,样机整体温升分布表现为迎风面温度明显小于背风面。随着转速增大,轴向温升差距也在缩小。因电机初级绕组为端部半填充,端部散热要优于中部部分集中绕组,整体温升分布表现为绕组中部要略高于两端。

空气流线如图10所示,次级周围的空气流线呈圆环波浪状,可直观看出冰冻转子法考虑了次级旋转对周边空气的影响。

从温度场仿真结果中求解各部件不同工况下

的温度值大小如表3所示。

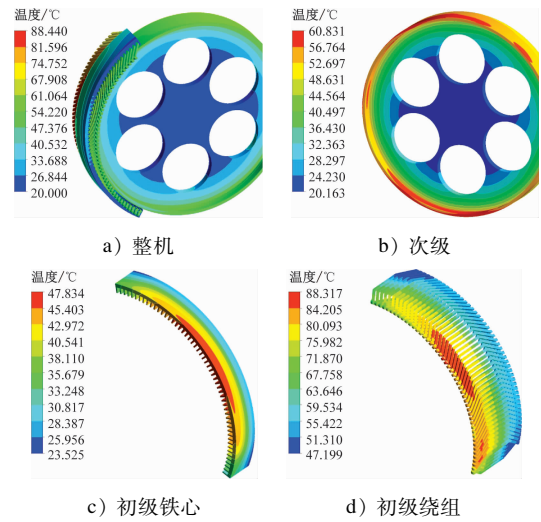


图8 低速点 35 km/h 温升分布图

Fig. 8 Diagram of temperature rise distribution at low-speed point 35 km/h

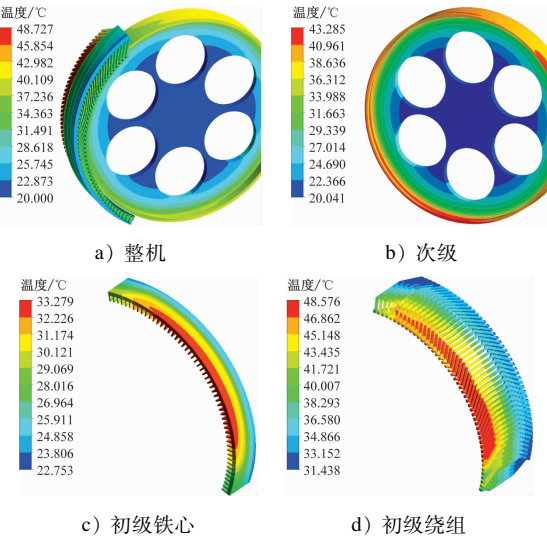


图9 高速点 80 km/h 温升分布图

Fig. 9 Diagram of temperature rise distribution at high-speed point 80 km/h

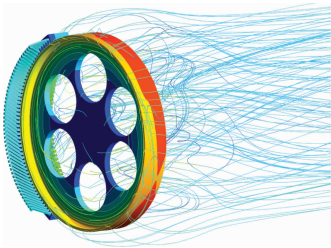


图10 空气流线图

Fig. 10 Air flow diagram

4.3 开环下样机运行温度验证

样机在正弦波供电下进行温升试验,温升限值

表 3 各部件温度值

Tab. 3 Temperature values of each component

工况	位置	温度值/℃		
		最大	最小	平均
35 km/h	初级铁心	47.834	23.525	36.391
	初级绕组	88.317	47.199	68.410
	复合次级	60.843	44.804	54.592
80 km/h	初级铁心	33.279	22.753	28.716
	初级绕组	48.576	31.438	40.062
	复合次级	43.294	35.529	39.874

按照连续运行进行试验。试验时在样机背面增加轴流冷却风扇,使吹到样机上的风量至少达到 5 m/s。不同运行工况下样机的次级温度试验值与仿真值的对比如表 4 所示。

表 4 次级温度值

Tab. 4 Air flow diagram

工况	试验值温度/℃	仿真值温度/℃	误差/%
20.2 km/h	41.0	43.4	5.8
34.8 km/h	58.0	56.3	2.9
89.9 km/h	36.0	37.6	4.4

对比结果可得,本文提出的稳态温升分析方法误差较小。将场路耦合下求取的损耗值应用于该温升分析法可用作工程实际运行下的温升分布的参考。

5 结语

本文在矢量控制系统下,结合城市轨道交通实际需求对 12 kW 的直线感应牵引电机的不同运行工况进行了场路耦合仿真分析,与单一仿真相比,该结果利用各仿真平台的优势,其结果更为精确且接近于实际工程环境。利用其求解的损耗,对样机的温度场进行流固耦合分析,得出以下结论:

1) 计入端部效应影响的矢量控制系统参数更加精确,控制效果更佳。场路耦合联合仿真验证了该样机在 35 km/h 低速点、80 km/h 高速点均可带载稳定运行,且加速过程平稳。整体来看,高速点

带载能力较弱,但各类损耗较低。样机铁耗在不同工况下差距很小,且在损耗整体占比中很小。造成电机温升的主要来源为绕组铜耗和次级损耗。

2) 通过空气流线图与样机开环运行试验验证可以看出,冰冻转子法求解稳态温度场符合样机真实运行环境,求解结果具备真实性。高速点的稳态温升明显小于中低速点,且在空气流体及动子旋转影响下,最高温度点有明显偏移,可针对此类位置采用强力冷却手段,以保证电机稳定高效运行。

参考文献

- [1] 黄海森. 地铁车辆直线感应电机烧损及槽楔下沉故障的原因分析及改善[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 185.
HUANG Haisen. Cause analysis and improvement of metro vehicle linear motor burnout and wedge sinking faults[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 185.
- [2] 李杭, 张昆仑, 梁达. 基于多仿真平台联合的直线感应电机场路耦合研究[J]. 电工技术, 2019(19): 15.
LI Hang, ZHANG Kunlun, LIANG Da. Research on field-circuit coupling of linear induction motor based on multiple simulation platforms[J]. Electric Engineering, 2019(19): 15.
- [3] 曹君慈, 闫华, 李栋, 等. 不同通风结构下高铁异步牵引电机温度场分析[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(2): 72.
CAO Junci, YAN Hua, LI Dong, et al. Temperature field analysis of asynchronous traction motor with different ventilation structures [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 72.
- [4] XU W, ZHU J, GUO Y, et al. Equivalent circuits for single-sided linear induction motors[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose: IEEE, 2009: 1288.
- [5] 王立强, 卢琴芬, 叶云岳, 等. 城轨交通用直线感应电机模糊 PI 矢量控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(7): 734.
WANG Liqiang, LU Qinfen, YE Yunyue, et al. Fuzzy-PI regulated field oriented control of linear induction motor in urban transit [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(7): 734.

· 收稿日期:2022-11-29 修回日期:2023-03-14 出版日期:2025-03-10

Received:2022-11-29 Revised:2023-03-14 Published:2025-03-10

· 第一作者:薛雅鹏,硕士研究生,807775715@qq.com

通信作者:王淑红,教授,wangshh_650@126.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com