

车用永磁同步电机电磁-热耦合分析

魏颖颖 王金昊 郭守仑 王斯博 王宇

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【摘要】以车用永磁同步电机为研究对象,根据电机定转子冲片的结构尺寸参数和性能参数,在电磁场有限元分析软件中建立二维仿真模型,求解出电机在特殊工况条件下的电磁场及损耗分布情况,将电磁场仿真得到的损耗密度导入温度场仿真软件,计算该工况条件下达到稳态的温度分布情况,由耦合仿真和单物理场仿真对比结果可知,耦合仿真的热点分布更集中,更有利于电机热风险的及时发现和改进。工况温升试验结果表明,耦合仿真温升数据与试验温升数据基本一致,证明了电机耦合仿真计算结果的准确性。

关键词: 永磁同步电机 电磁-热耦合 有限元分析

中图分类号: TM351

文献标志码: A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230126

Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicles

Wei Yingying, Wang Jinhao, Guo Shoulun, Wang Sibao, Wang Yu

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】In this paper, a permanent magnet synchronous motor for vehicles was used as the research object. According to the specific structural size parameters and performance parameters of the stator and rotor blades of the motor, a two-dimensional simulation model was established in the electromagnetic field finite element analysis software to solve the electromagnetic field and loss distribution of the motor under special operating conditions. The loss density obtained by electromagnetic field simulation was imported into the temperature field simulation software to calculate the temperature distribution reaching the steady state under the operating conditions. Through the comparison of coupled simulation and single-physics simulation, it is concluded that the hot spots distribution of the coupled simulation is more concentrated, and the thermal risk of the motor can be discovered and improved in time. The working condition temperature rise test of this motor indicates that the coupled simulation temperature rise data is basically consistent with the test data, proving correctness of the motor coupled simulation results.

Key words: Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Electromagnetic and thermal coupled, Finite element analysis

【引用格式】魏颖颖,王金昊,郭守仑,等. 车用永磁同步电机电磁-热耦合分析[J]. 汽车工程师, 2023(7): 32-36.

WEI Y Y, WANG J H, GUO S L, et al. Electromagnetic-Thermal Coupled Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicles[J]. Automotive Engineer, 2023(7): 32-36.

1 前言

永磁同步电机具有功率密度高、效率高、体积小、噪声低等特点,在混合动力汽车领域受到广泛关注。电机运转过程中产生的高温会直接降低电机的工作性能^[1]。对于永磁电机,载荷较大导致的高温可

能导致绕组和定子铁芯间的绝缘材料失效或者转子铁芯包裹的永磁体不可逆退磁,使电机功能性损毁^[2-3],因此,精准分析电机温度场分布非常重要。

电机多物理场耦合仿真计算已成为计算机辅助设计中的关键技术之一^[4-8]。国内外学者采用磁热耦合方法在电机的损耗和温升方面开展了大量研

究^[9-12]。本文利用电磁仿真软件建立二维有限元的电机几何模型,计算电机在特殊工况下的损耗密度分布情况,并在温度场仿真软件中建立三维仿真模型,将电磁仿真得到的损耗密度导入三维温度场仿真模型,计算特殊工况下达到稳定运行状态的温度场分布情况,最后,将电磁-热耦合仿真温升数据与试验实测结果进行对比,验证仿真结果的准确性。

2 电磁模型的建立及仿真

本文以永磁同步电机为研究对象,根据电机主要性能参数在电磁仿真软件中建立电磁模型。选取整车常用工况中不同转速下负荷较大的3个工况,根据电机损耗MAP表差值获得不同整车工况的具体参数,计算整车工况的铁损损耗密度分布情况。电机主要性能参数如表1所示,整车工况具体损耗参数如表2所示,其中,将3 196 r/min@35.1 N·m工况下的磁钢损耗设为 a ,其他损耗由 a 的倍数表征。

表1 电机主要性能参数

参数	数值
工作电压/V	350
峰值功率/kW	70
峰值扭矩/N·m	160
最高工作转速/r·min ⁻¹	15 500

表2 整车工况相对损耗

转速/r·min ⁻¹	转矩/N·m	定子铁损	转子铁损	铜损	磁钢损耗
3 196	35.1	113 a	7 a	187 a	a
5 000	49.4	170 a	10.5 a	328 a	1.5 a
10 000	30.7	266.5 a	22.5 a	284.5 a	4 a

采用JMAG电磁仿真软件计算得到3 196 r/min@35.1 N·m、5 000 r/min@49.4 N·m和10 000 r/min@30.7 N·m 3种工况下的电机铁损损耗密度,其中10 000 r/min@30.7 N·m工况下的电机铁损损耗密度分布如图1所示。

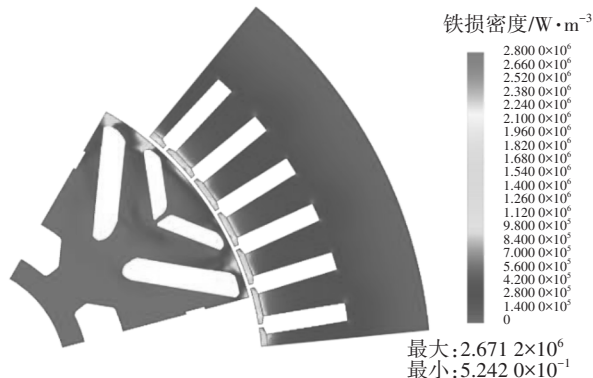


图1 10 000 r/min@30.7 N·m工况下电机铁损损耗密度分布

由图1可知,靠近气隙处的定子齿部和转子的损耗密度较大,远离气隙的定子轭部和转子的损耗密度非常小,定子和转子的整体损耗密度由靠近气隙侧向远离气隙侧逐渐减小。

3 损耗密度映射

耦合仿真分为单向耦合和双向耦合。单向耦合是将第1个求解器的求解结果作为条件,输入到第2个求解器,求解数据单向传递,具有计算速度快、节约资源和仿真效率高的优势。双向耦合是将各求解器的求解结果在求解器之间双向传递,反复迭代直到运行结果达到收敛后停止计算。相较于单向耦合,双向耦合计算结果更精确,但计算量显著增大,对计算机要求较高,计算速度低,不利于提高仿真效率,因此本文采用单向耦合的方法对电机的电磁场和温度场进行耦合仿真分析。通过JMAG电磁仿真软件仿真得到损耗结果,以表格形式输出定子铁芯和转子铁芯上的各坐标位置的损耗密度。

将JMAG电磁仿真软件导出的定子铁芯和转子铁芯的损耗密度导入STAR CCM+温度场仿真软件中,利用电磁仿真软件和温度场仿真软件中一致的模型坐标位置,将损耗密度映射到温度场仿真模型上,实现在温度场模型上加载损耗密度的效果。与温度场模型上均匀分布的损耗对比,温度场模型上映射损耗密度更能反映详细的热点位置。在不受其他热源影响的条件下,损耗密度越大的位置温度越高。因此,在其他热源不变的条件下,推测映射损耗密度的耦合仿真得到的温度将会比损耗均匀分布的单物理场仿真得到的温度高,本文对其进行仿真对比验证。

4 电机温度场仿真及分析

根据传热学基本理论,直角坐标系下电机的稳态温度场求解可以归结为如下边值问题^[13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v \\ \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 、 y 、 z 向导热系数; T 为温度; q_v 为热流密度,即电机各部件单位体积的损耗; n 为长度; λ 为导热系数; h 为对流换热系数; T_c 为环境温度

度。

输入给定损耗与边界条件,可以计算出电机内部温度场分布情况。

本文将一个定子槽中的多层方导线视为一个导线整体,导线与定子槽之间的绝缘材料包括导线漆皮、绝缘纸和灌封的绝缘漆。将绝缘材料等效处理为导线与定子铁芯热传导过程中的热阻。这些绝缘材料的等效导热系数为^[13-14]:

$$\lambda_{eq} = \sum_{i=1}^n \delta_i / \left(\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i \right) \quad (2)$$

式中, λ_{eq} 为等效导热系数; δ_i 为各绝缘材料的等效厚度; λ_i 为各绝缘材料的导热系数。

定转子铁芯是由多层硅钢片叠加形成的,所以在径向与轴向导热系数不同。在径向上,定转子铁芯是完整的硅钢材料,导热系数为硅钢材料的导热系数。在轴向上,由于定转子是由多层硅钢片叠加而成的,叠加的硅钢片之间存在空气、灰尘等,导热系数远小于径向导热系数。轴向等效导热系数为^[15]:

$$\lambda_r = \frac{\delta_{Fe} + \delta_0}{\frac{\delta_{Fe}}{\lambda_1} + \frac{\delta_0}{\lambda_0}} = \frac{1}{\frac{K_{Fe}}{\lambda_1} + \frac{1 - K_{Fe}}{\lambda_0}} \quad (3)$$

式中, δ_{Fe} 为铁心叠厚; λ_1 为硅钢片的导热系数; δ_0 为绝缘介质的净长度; λ_0 为绝缘介质的导热系数; K_{Fe} 为铁心的叠片系数。

电机机壳和端盖表面与外部环境进行自然对流换热,其换热系数为^[2,14]:

$$\alpha_c = 14 \times (1 + 0.5 \sqrt{\omega})^3 \sqrt{\frac{T_c}{25}} \quad (4)$$

式中, ω 为外部环境风速,本文设定为0; T_c 为外部环境温度。

转子转动时会引起电机内部空气扰动,从而增强端部绕组与内部空气之间的换热,其对流换热系数可由经验公式^[2,14]获得:

$$\alpha_s = \frac{1 + 0.04v_r}{0.045} \quad (5)$$

式中, v_r 为转子外径上的线速度。

转子端部与内部空气之间的对流换热系数的经验公式^[2,14]为:

$$\alpha_r = 28 \times (1 + \sqrt{0.45v_r}) \quad (6)$$

将电磁仿真得到的电机铁损损耗密度和其他损耗导入三维温度场仿真软件,施加到各零部件上。考虑电机中存在的热对流和热传导,在有接触的零部件之间建立接触热阻和对流换热面,将边界

条件设置到建立的接触热阻和对流换热面上。通过温度场仿真计算,得到如图2、图3所示结果。

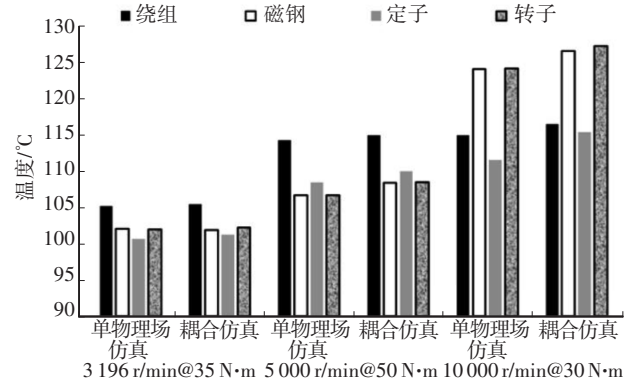
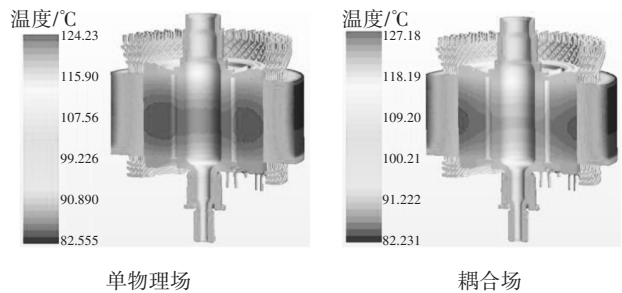
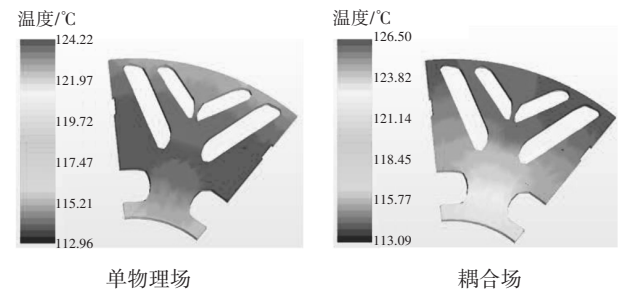


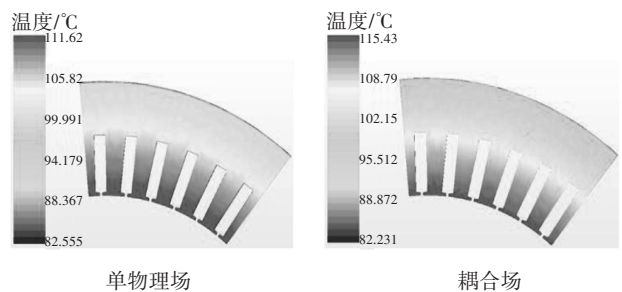
图2 温度场仿真计算结果对比



(a)电机结构剖面图



(b)转子剖面图



(c)定子剖面图

图3 10 000 r/min@30 N·m工况下电机温度场分布情况

由图2可知,低转速下,最高温度位于绕组处,高转速下,最高温度位于转子处。根据电磁仿真得到的损耗可知,随着转速升高,铜损逐渐降低,铁损逐渐升高,导致低转速时绕组温度高,高转速时转子温度高。同时,转子无有效的直接散热途径,导致热量集聚在转子内,转子温度升高。

由图2可知,耦合场仿真得到的零部件温度高于单物理场仿真得到的零部件温度,证明了在温度场中映射损耗密度的耦合仿真得到的温度更高的推论。这是因为单物理场中的铁损均匀分布在定转子铁心上,其各坐标位置的损耗密度一致,使其发热均匀。而耦合场中的铁损按损耗密度分布在定转子铁心上,其温度分布受到损耗密度分布的影响,损耗密度越大的位置温度也越高,使耦合仿真得到的热点温度更高。

由图3单物理场与耦合场仿真获得的温度分布情况对比可知,定子和转子的热点位置向气隙侧移动。从图1的电磁仿真结果来看,铁损不是均匀分布的,主要集中分布在气隙附近,温度分布与铁损损耗密度分布对应。与单物理场仿真相比,耦合仿真得到的温度分布热点更为集中,更能反映出电机的散热缺陷,以规避电机运行中的散热风险。

5 试验验证

本文开展试验对仿真结果进行验证。在电机台架上进行工况点稳态温升试验,运行至基本热平衡,在电机绕组端部布置K型温度热电偶进行测温。电机持续运行30 min,每隔1 s记录一次热电偶测温数据,热电偶测得的最高温度如表3所示。

表3 不同工况绕组温度仿真与试验实测对比

工况	绕组温度/°C	
	耦合仿真结果	试验实测结果
3 196r/min@35 N·m	105.5	100.9
5 000r/min@50 N·m	115.0	119.3
10 000r/min@30 N·m	116.5	119.8

耦合仿真计算结果与试验实测温度非常接近,误差小于4.5%,在可接受范围内。出现误差的原因是试验与仿真的损耗和边界条件存在差异,还需进一步优化。

6 结束语

本文针对某永磁同步电机在特殊工况下进行了电磁-热耦合仿真计算及稳态温升试验,通过对比分析,得到如下结论:

a. 电磁-热耦合仿真计算得到的温度场分布是与电磁仿真得到的损耗密度分布相映射的,热点主要集中分布在气隙附近。相比单物理场仿真中设置的均匀分布的损耗,映射损耗密度的耦合仿真得到了更为集中的热点分布,从而能够精确捕捉热点

位置,准确识别电机运行中的散热风险。

b. 电磁-热耦合仿真计算得到的温升数据与试验实测温升数据基本一致,电机耦合仿真计算结果能够作为电机热失效风险预判的重要依据。

下一步计划通过电磁-热-流体耦合仿真方法优化计算结果,进一步缩小仿真结果与试验结果的差距。

参考文献

- [1] 马媛,李建贵,刘璟轩. 基于混合动力电动汽车的永磁无刷电机热分析及研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(11): 2525-2531.
MA Y, LI J G, LIU J X. Thermal Analysis and Research of Permanent Magnet Brushless Motor Based on Hybrid Electric Vehicle Application[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(11): 2525-2531.
- [2] 兰志勇,王琳,徐琛,等. 高速永磁同步电机温度场及水冷分析[J]. 电气传动, 2018, 48(12): 81-85.
LAN Z Y, WANG L, XU C, et al. Analysis of Temperature Field and Water Cooling of High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Drive, 2018, 48(12): 81-85.
- [3] 刘威,刘慧娟,杜晋文,等. 定子水冷永磁同步电机多工况热特性的研究[J]. 微特电机, 2019, 47(4): 1-4+12.
LIU W, LIU H J, DU J W, et al. Thermal Performance Analysis of Water-Cooled PMSM Running in Multi-Conditions[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(4): 1-4+12.
- [4] 路义萍,李伟力,马贤好,等. 大型空冷汽轮发电机转子温度场数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 7-13.
LU Y P, LI W L, MA X H, et al. Numerical Simulation of Temperature Field in Rotor of Large Turbo Generator with Air-Coolant[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(12): 7-13.
- [5] GLIERE A, MASSE R H, FAUTRELLE Y. A Finite Element-Finite Difference Computation of Magnetic and Turbulent Flow Coupled Problem[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2002, 24(1): 252-255.
- [6] ALBERTI L, BIANCHI N. A Coupled Thermal-Electromagnetic Analysis for a Rapid and Accurate Prediction of IM Performance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3575-3582.
- [7] COULOMB J L. A Methodology for the Determination of Global Electromechanical Quantities from a Finite Element Analysis and Its Application to the Evaluation of Magnetic Forces, Torque and Stiffness[J]. IEEE Transactions on Magnetic, 1983, 19(6): 2514-2519.
- [8] 李伟力,赵志海,侯云鹏. 大型同步发电机定子同相槽和

- 异相槽的温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 1-6+92.
- LI W L, ZHAO Z H, HOU Y P. Calculation of Stator Temperature Field of Generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 1-6+92.
- [9] 刘奕新, 张志军. 油冷电机磁热耦合仿真研究[J]. 汽车技术, 2022(11): 41-46.
- LIU Y X, ZHANG Z J. Simulative Research on Magneto Thermal Coupling of Oil-Cooled E-Motor[J]. Automobile Technology, 2022(11): 41-46.
- [10] SI J K, ZHAO S Z, FENG H C, et al. Analysis of Temperature Field for a Surface-Mounted and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Adopting Magnetic-Thermal Coupling Method[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018, 2(1): 166-174.
- [11] TIKADAR A, KUMAR N, JOSHI Y, et al. Coupled Electro-Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles[C]// 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Orlando, FL, USA: IEEE, 2020.
- [12] 陈裕明, 陈鹏满, 王柱, 等. KX-ZM01 涵道风扇无刷直流电机磁热耦合仿真分析[J]. 机电工程技术, 2022, 51(9): 165-169.
- CHEN Y M, CHEN P M, WANG Z, et al. Magnetic Thermal Coupling Simulation Analysis of KX-ZM01 Ducted Fan BLDC Motor[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(9): 165-169.
- [13] 吴尧辉, 张建强, 刘思. 参数修正的场路结合仿真异步机起动性能[J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 188-194.
- WU X H, ZHANG J Q, LIU S. Simulation of Starting Performance of Asynchronous Machine Based on Parameter Modified Field-Circuit Combined Method[J]. Computer Simulation, 2017, 34(7): 188-194.
- [14] 刘慧军, 陈芬放, 黄瑞, 等. 车用驱动电机冷却系统仿真研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 2002-2012.
- LIU H J, CHEN F F, HUANG R, et al. Simulation Study on Cooling System of Automotive Driving Motor[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(7): 2002-2012.
- [15] 陈杰, 王明盛. 高速永磁同步电机冷却系统优化分析[J]. 微特电机, 2020, 48(5): 25-27+31.
- CHEN J, WANG M S. Optimization Analysis of Cooling System for High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2020, 48(5): 25-27+31.

(责任编辑 弦 歌)

修改稿收到日期为2023年6月8日。

《汽车工程师》征稿启事

《汽车工程师》于1974年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主管、中国第一汽车股份有限公司主办的国内外公开发行的汽车应用技术类学术期刊,国家新闻出版广电总局第一批认定的学术期刊。

《汽车工程师》以报道汽车产品开发领域的成果为主,专注于技术开发与应用,提供汽车设计创新解决方案。《汽车工程师》将把握电动化、智能化、网联化、共享化的汽车技术主流发展趋势,努力在电池技术、电驱技术、电控技术、高压技术、补能技术、燃料电池技术、智慧控制、智能驾驶、智享座舱、智能悬架、线控转向、线控制动、NVH、功能安全、预期功能安全、信息安全、数据安全、被动安全、高效动力、高效传动、低风阻、低滚阻、轻量化领域吸收优质稿源,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

热忱欢迎汽车行业的专家学者不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将优先发表,我们期待与您共同践行“把论文写在祖国大地上”的指示精神,为强大中国汽车工业作贡献!

本刊使用协同采编系统处理稿件,请登陆期刊网站注册后投稿,投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://tjqc.cbpt.cnki.net>。

《汽车工程师》编辑部