

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.030

面向电动燃油泵的电磁热耦合数值模拟

闫庆涛,王彬,叶志锋

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对电动燃油泵的生热问题,提出一种周期性平均损耗的分布式热源模型。建立永磁同步电机的电磁-热双向耦合模型,并数值模拟电机各部件的损耗特性和其在不同转速时的稳态温度分布。结果表明:电动燃油泵在转速为 6 000 r/min、供油压力为 8 MPa 时,其内部电机的最高温度可达 407.8 K,位于定子铁芯的齿部,且温度沿径向向外逐渐降低至 393.9 K;在高温环境中工作时,电动燃油泵的寿命与可靠性会随永磁体磁性的减弱而逐渐降低。

关键词:电动燃油泵;周期性平均损耗;电磁-热耦合;温度分布

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0144-04

Numerical Simulation of Electromagnetic-thermal Coupling for Electric Fuel Pump

YAN Qingtao, WANG Bin, YE Zhifeng

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper proposes a distributed heat source model with periodic average losses to address the heat generation problem of electric fuel pump. An electromagnetic-thermal coupling model of a permanent magnet synchronous motor is established, and the loss characteristics of each motor component and its steady-state temperature distribution at different speeds are numerically simulated. The results show that when the speed of electric fuel pump is 6 000 r/min and the supply pressure is 8 MPa, the highest temperature of the internal motor can reach 407.8 K, which is located in the teeth of the stator core, and the temperature gradually decreases to 393.9 K radially outward. The life and reliability of the electric fuel pump will gradually decrease with the demagnetization of permanent magnets when working in a high temperature environment.

Keywords: electric fuel pump; periodic average loss; electromagnetic-thermal coupling; temperature distribution

0 引言

电动燃油泵通过接收全权限数字电子控制器(FADEC)的输出信号,并通过控制驱动电机的转速来控制泵实际的供油量,这在一定程度上简化了燃油控制系统的结构,提高了效率,是未来电发动机燃油泵的主要发展方向^[1]。然而,电动燃油泵作为一种机电液一体化设备,在长时间的高压/高速旋转下,电机内部将产生过多热量而易引起退磁,导致电动燃油泵的性能和可靠性大大降低,进而影响了燃油供给。因此,为电机设计合理可靠的散热装置,进而提高电动燃油泵的可靠性显得尤为迫切。

在为电机设计散热结构前,首先需要对其产热机制以及产热大小来进行仿真计算,进而获得电机的热源和温度场分布。目前,对电机温度场的计算方法主要有等效热网络法和有限元法,相比之下有限元法具有更高的精度,然而过于庞大的计算量导致其成本较高。随着计算机技术的高

速发展,有限元算法已经成为主要手段^[2]。文献[3]计算了永磁电机中铁芯部件产生的铁耗和考虑趋肤效应的线圈铜耗,并以此为热源对电机的温度分布进行了仿真计算。文献[4]对永磁电机进行了磁-热耦合分析,获得了电机的温度分布。文献[5]从定子铁耗、铜耗、转子涡流损耗与风摩损耗等方面,总结归纳了电机中各项损耗及其计算方法,并概述了高速电机转子支承方式的发展情况。文献[6]首先计算了二维电磁场的损耗,并以此作为热源,建立了永磁电机的磁-热 3D 模型,进行了仿真计算。综上所述,学者们对电机中各项损耗进行了分析,研究了损耗转换成热量的机制,进而计算了电机的温度场。然而大部分的研究都将损耗的均值赋予给了对应部件,并未考虑损耗的空间分布或者只考虑了电磁场-温度场的单向耦合,所以精度较低。

本文针对电动燃油泵中电机的发热问题,提出了一种新的电磁-热双向耦合计算方法,用于提高计算精度的同时降低计算成本。利用该电磁-

第一作者简介: 闫庆涛(1998—),男,河北邯郸人,硕士研究生,研究方向为航空燃油系统及元件,binwang@nuaa.edu.cn。

热双向耦合计算方法,获得永磁电机的热源及温度场分布,为电机散热装置的设计奠定了基础。

1 结构和方法

1.1 电机结构

本文所研究的电动燃油泵的驱动电机为表贴式永磁同步电机,其内部组成及结构示意图如图1所示,主要尺寸和性能参数如表1所示。

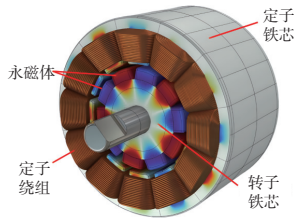


图1 永磁电机结构

表1 永磁电机主要参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	8	定子内径/mm	66
额定转速/(r/min)	6 000	定子外径/mm	120
效率/%	90	转子内径/mm	49
气隙长度/mm	1	转子外径/mm	64

1.2 传热方式

物体的传热方式分为3种:热传导、热对流和热辐射^[7]。永磁电机在旋转时,永磁体安装在转子铁芯上与转轴一起旋转,线圈缠绕在定子铁芯的齿部,转子与定子之间存在气隙,并不直接接触。因此可以得出结论:永磁电机主要的热传递方式为热传导,转子的高速旋转会产生一定的对流换热,通过热辐射产生的热传递则相对较少,可以忽略不计。

1.3 损耗计算方法

永磁电机运转时产生的损耗主要来源于两部分:电磁损耗和机械损耗。其中,电磁损耗是主要来源,主要包括铁芯的铁耗、绕组的铜耗和永磁体的涡流损耗。

1) 铁芯损耗

铁芯损耗是电机的主要损耗之一,在总损耗中占比较大。其主要是由铁芯内实时变化的空间磁场引起的,按照产生的机制,可以将其分为磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗。建立 Bertotti 的铁耗计算模型^[8],即

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{fe} = k_h f B_p^x + k_e f^2 B_p^2 + k_{fe} f^{1.5} B_p^{1.5} \quad (1)$$

式中: P_{Fe} 为铁耗; P_h 为磁滞损耗; P_e 为经典涡流损耗; P_{fe} 为异常涡流损耗; B_p 为磁通密度幅值; f 为频率; k_h 为磁滞损耗系数; k_e 为经典涡流损耗系数; k_{fe} 为附加损耗系数。

2) 线圈损耗

线圈铜耗是由基本铜耗和附加铜耗构成。基本铜耗是电流在绕组中产生的损耗;附加铜耗是集肤效应在绕组中产生的高频附加损耗。基本铜耗的计算表达式为^[9]

$$P_{Cu} = m I^2 R \quad (2)$$

式中: m 为电机的相数; I 为线圈电流; R 为线圈电阻。

3) 永磁体和转子损耗

永磁电机中,电枢反应的磁动势与永磁体的磁动势相互作用产生有效的输出转矩。然而,两者产生的不同步旋转速度会引起涡流损耗。涡流损耗的计算表达式为^[10]

$$P_v = \int \frac{J^2}{\sigma} dV \quad (3)$$

式中: σ 为电导率; J 为涡流密度; V 为损耗的积分区域。

4) 机械损耗

机械损耗主要包括转子表面的空气摩擦损耗和轴承转动引起的摩擦损耗,计算表达式为

$$P = k C_f \rho_{air} \omega_m^3 r^4 l \quad (4)$$

式中: k 为转子铁芯的表面粗糙度; C_f 为摩擦因数; ρ_{air} 为空气密度; ω_m 为电机转速; r 为转子半径; l 为转子轴向长度。

1.4 磁-热耦合方法

电动燃油泵在高速旋转时,电磁损耗不断转换成热量,致使整机温度升高;然而,温度的升高将会反过来影响材料的属性,这就是电磁场与温度场的双向耦合。电动燃油泵中,电磁循环发生在毫秒甚至纳秒的时间尺度上,而其温度的上升时间则需要几分钟甚至几小时,时间尺度相距甚远。如果采用直接瞬态耦合的计算方式来解决该类电磁问题,会导致计算成本非常高,这必然是效率低下且不可取的。永磁电机在稳定旋转时,电磁损耗随时间的变化而变化,且不同空间坐标产生的损耗也不相同,但其在一个周期内的损耗规律是不变的。本文利用该规律,首先计算电机各离散单元在 n 个(数值越大,精度越高)电周期(稳定旋转)的瞬态损耗曲线,再将损耗曲线进行时间积分得到 n 个电周期的总损耗,之后除以电

周期数 n , 获得该离散单元一个电周期的平均损耗, 最后将该平均损耗赋予给相应离散单元作为“电磁场”向“温度场”耦合的内热源。由于电机被离散为无数单元, 不同单元具有不同的周期平均损耗。因此, 本文提出的平均损耗热源模型具有分布式特点, 在降低电磁-热耦合计算量的同时, 提高了热源精度。

2 仿真结果与分析

2.1 网格划分

数值模拟的过程就是将几何结构离散再进行求解, 而几何的网格划分过程就是离散的过程。网格按照其形状, 分为结构化网格和非结构化网格。非结构化网格具有高适应性优点, 对于复杂的几何体能够快速划分出网格。永磁电机结构涉及的尺寸跨度较大, 故本文采用非结构化网格来进行离散, 结果如图 2 所示。

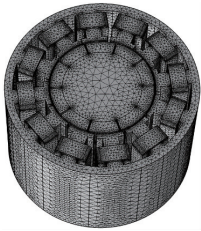


图 2 永磁电机的网格

2.2 电磁场分布

设定电动燃油泵在稳定工作时的转速为 6 000 r/min, 供油压力为 8 MPa, 计算其内部电机在 12 个电周期的瞬态结果。某一时刻的磁通密度云图如图 3 所示。由图 3 可知, 磁通密度主要分布于铁芯和永磁体上, 槽内绕组的磁通密度较小; 磁通密度沿电机的周向呈周期性变化, 但在电机轴向上的分布则基本保持不变。垂直于轴线对永磁电机进行切割, 得到其某一截面的磁通以及磁力线分布情况如图 4 所示。由图 4 可知, 电机中磁通量主要分布于定子铁芯上, 少量磁力线穿过定子槽内的绕组与空气; 磁力线在定子铁芯与永磁体之间闭合, 且随转子的旋转呈现周期性变化。

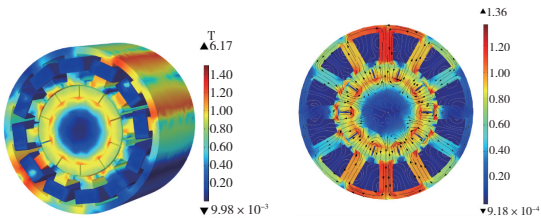


图 3 3D 磁通密度云图 图 4 电机横截面磁通云图

2.3 损耗分布

利用本文提出的电磁-热耦合方法, 将 12 个电周期的瞬态损耗进行时间积分, 获得电动燃油泵在转速为 6 000 r/min, 供油压力为 8 MPa 时的周期平均损耗。电机各部件的损耗分布如图 5 所示。

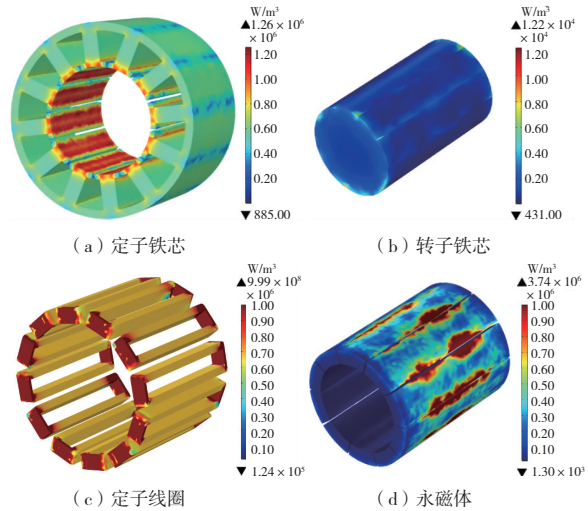


图 5 永磁电机各部件损耗云图

由图 5 可知, 定子铁芯的损耗集中分布在靴部, 最大值为 $1.26 \times 10^6 \text{ W/m}^3$; 转子铁芯的损耗较小, 保持在 $0.60 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ 以内; 线圈损耗主要分布在两端, 且最大值为 $9.99 \times 10^8 \text{ W/m}^3$; 永磁体的损耗主要分布在相邻磁体的交界面上, 其余位置相对较小。

将周期平均损耗进行体积积分, 得到电机各部件的总损耗, 结果如表 2 所示。表中数据表明, 各部件的损耗均会随转速的提高而不同程度增长。其中, 定子和转子的铁芯损耗与转速呈现倍数级增长; 线圈损耗与转速的增长呈现正相关; 永磁体损耗随转速的提高呈现指数级增长。

表 2 电机各部件总损耗

电机转速/ (r/min)	转子铁芯/ (W/m ³)	永磁体/ (W/m ³)	线圈/ (W/m ³)	定子铁芯/ (W/m ³)
1 500	0.035	0.566	55.937	58.523
3 000	0.067	2.199	67.684	116.960
4 500	0.097	4.816	80.550	175.310
6 000	0.126	8.352	94.534	233.560

2.4 温度分布

将周期平均损耗耦合为温度场仿真的内热源, 计算电机的稳态温度分布, 结果如图 6 所示。

由图6可知,电动燃油泵在转速为6 000 r/min、供油压力为8 MPa时,其内部电机的最高温度可达407.8 K,位于定子铁芯的齿部;在定子上,温度沿径向向外逐渐降低至393.9 K。

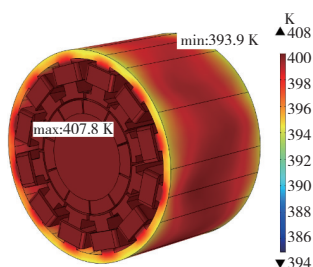


图6 6 000 r/min时稳态温度云图

分别计算电动燃油泵在转速为1 500 r/min、3 000 r/min和4 500 r/min及压力为8 MPa时的稳态温度分布,结果如图7所示。由图7可得,电机的最高温度随转速的提高而增大,且均位于定子铁芯的齿部,这是由于此处的铁耗与铜耗较大且集中分布。

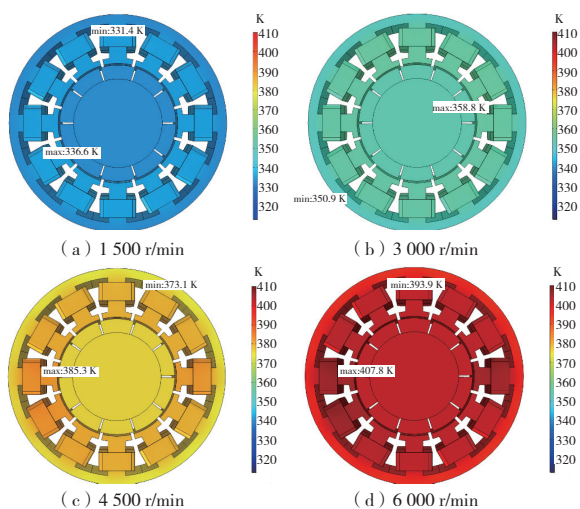


图7 永磁电机不同转速温度云图

在400 K的环境中工作时,永磁体的磁性强度会随着温度的提高而逐渐降低,而电动燃油泵的寿命与可靠性也会随之逐渐降低。因此,为电动燃油泵的永磁电机设计一种合理的冷却装置显得尤为重要。

3 结语

本文针对电动燃油泵的产热问题,建立了永磁电机的电磁-热双向耦合模型,并数值模拟了电机不同部件的损耗分布情况。由于电磁场与温度

场的直接双向耦合需要耗费较大的计算资源,本文提出了一种周期性平均损耗的分布式热源模型,这种模型具有更高的精度和较低的计算成本。仿真计算了永磁电机在不同转速时的稳态温度分布。结果表明,电动燃油泵在转速为6 000 r/min、供油压力为8 MPa时,其内部电机的最高温度可达407.8 K,位于定子铁芯的齿部,极大限制了电动燃油泵的热可靠性及功率密度提升。因此,为其设计一种合适的冷却装置尤为重要。

参考文献:

- [1] 吴博. 基于数值仿真的一体化电动燃油泵优化设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
- [2] KRAIKITRAT K, RUANGSINCHAIWANICH S. Thermal effect of unbalanced voltage conditions in induction motor by FEM [C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China: IEEE, 2011:1-4.
- [3] 张琪,王伟旭,黄苏融,等. 高密度车用永磁电机流固耦合传热仿真分析[J]. 电机与控制应用,2012,39(8):1-5.
- [4] 王晓远,杜静娟,谭明作. 车用永磁同步机设计与磁热耦合分析[J]. 微特电机,2017,45(4):16-19.
- [5] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 高速永磁电机设计与分析技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4640-4653.
- [6] 李伟力,伊然,李立毅. 超导同步电动机温度场计算与分析[J]. 电机与控制学报,2011,15(10):14-20.
- [7] (美)弗兰克 P. 英克鲁佩勒(F.P. Incropera), (美)大卫 P. 德维特(D.P. DeWitt), (美)狄奥多尔 L. 伯格曼(T.L. Bergman), 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石,叶宏译. 北京:化学工业出版社,2007.
- [8] DOU M F. High power density permanent magnet synchronous motor thermal design and thermal field analysis [J]. Small Special Electr Mach 2013, 41: 23-24, 31.
- [9] ARBAB N, WANG W, LIN C J, et al. Thermal modeling and analysis of a double-stator switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015,30(3):1209-1217.
- [10] CHEN L, ZHAN C H, LI G H, et al. An artificial neural network identification method for thermal resistance of exterior walls of buildings based on numerical experiments[J]. Building Simulation, 2019, 12(3): 425-440.

收稿日期:2023-03-03