

基于 Ansys 和 Motor-CAD 对交流伺服电动机性能的研究

陈金学^{1,2}, 赵飞^{1,2}, 朱志能^{1,2}, 谭耳^{1,2}, 崔浪浪^{1,2}

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 基于某型号导弹发射装置电机的设计指标要求, 运用 Ansys 有限元分析软件及 Motor-CAD 热分析软件分别进行性能优化分析, 得出合理的设计方案。通过实测数据的验证得出: 方案设计的准确率可达到 93.5% 以上, 电机表面温升最大为 19.2 K, 与仿真值接近, 方案设计合理。

关键词: 交流电动机; Motor-CAD; 输出性能; 热分析

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0051-05

Study on the Performance of Alternating Current Servomotor Based on Ansys and Motor-CAD

CHEN Jinxue^{1,2}, ZHAO Fei^{1,2}, ZHU Zhineng^{1,2}, TAN Er^{1,2}, CUI Langlang^{1,2}

(1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550081, China)

Abstract: Based on the motor design parameters of a certain type missile launch device, using of performance optimization analysis finite element analysis software Ansys and the Motor CAD thermal analysis software, a reasonable design scheme was given. And the validation of the measured data showed that the scheme design of accuracy could reach more than 93.5%, maximum surface temperature rise of motor was 19.2 °C, and the simulation value close to the scheme design was reasonable.

Key words: alternating current servomotor; Motor-CAD; output performance; thermal analysis

0 引言

Ansys Maxwell 作为世界著名的商用低频电磁场有限元分析软件之一, 在各个工程电磁领域都得到广泛的运用。其基于麦克斯韦微分方程, 采用有限元离散形式, 将工程中的电磁场计算转变为庞大的矩阵求解, 可针对不同的实际问题迅速建立数值模型并准确计算。

Motor-CAD 是世界上最先进的电子专业 3D 温度场分析软件, 采用等效热路模型, 可快速、精准、广泛地应用于电机温度场的计算。

本文基于 Ansys 和 Motor-CAD 仿真软件, 对用

于某型号导弹发射装置电机(简称“电机”)作了性能分析, 并通过实测数据验证了分析结果^[1-4]。

1 电机的工作原理

该电机工作方式与常规无刷直流电动机相比, 力矩产生过程基本一致, 反电势与电流同相位。在转速控制方面, 无刷电机根据转子位置传感器信号, 对特定绕组通电, 维持电机转矩输出, 定子通电相序随转子位置变化而变化, 通过脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)等效电压, 使得输入电压跟电机反电势与电压降之和匹配, 从而调节电机转速; 电机直接调节正弦波频率, 改变

旋转磁场转速,从而达到调节电机转速的目的;转子转速随定子通电频率变化而变化,通过 PWM 控制电机电压,使得输入电压跟电机反电势与电压降之和匹配,降低损耗,提高电机效率。交流伺服电机工作原理图如图 1 所示^[3-5]。

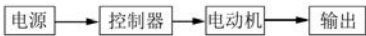


图 1 交流伺服电机工作原理图

2 电机仿真模型的建立

2.1 电机的性能及电磁参数

该电机电磁参数如表 1 所示。

表 1 性能及电磁参数尺寸

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	AC380	磁钢厚度/mm	8
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	电机极数	6
额定扭矩/(N·m)	11	电机槽数	18
定子铁心尺寸/mm	126×126	绕组匝数	34
定子铁心内径/mm	Φ62	绕组电阻/Ω	1.22
转子铁心内径/mm	Φ45	定子材料	35WW300
转子铁心外径/mm	Φ61	磁钢材料	XG28/20

要求电机在空载时,在额定电压、额定转速下的工作平均电流≤3 A;额定工作点时,在额定电压、额定扭矩下,能输出稳定的转速,平均工作电流≤10 A。

2.2 电机的模型建立

利用 Ansys Maxwell 软件,建立该电机的电磁场仿真模型如图 2 所示。对模型进行网格划分,永磁体 N、S 极分别用蓝色、灰色表示,N、S 极交替分布。从图 2 中可看出,在气隙处和磁钢处网格密度比定子轭部和转子轴上的网格密度密,能够满足计算的准确性。

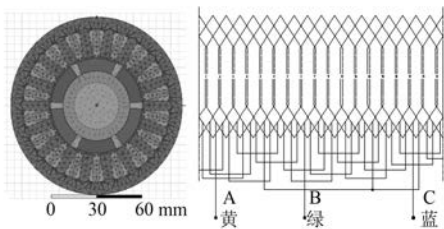


图 2 电机有限元分析模型及绕组接线图

用磁矢位 A 描述电磁场,瞬变电磁场的边界

问题可以表达为^[6-7]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z + \sigma\frac{\partial A_z}{\partial t} \\ A_z|_s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ ——磁导率;

A_z ——磁矢位轴向分量;

J_z ——电流源密度轴向分量;

σ ——电导率。

2.3 空载性能分析

对电机在空载工况下进行分析,可得电机磁密云图、线反电势波形、相反电势波形,如图 3~图 5 所示。

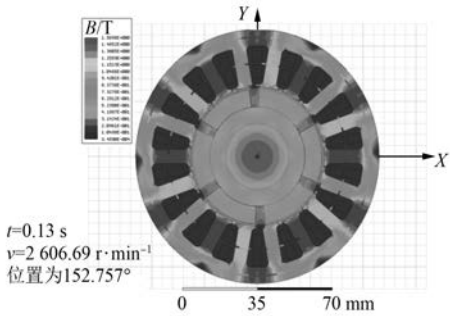


图 3 电机在空载下的磁密云

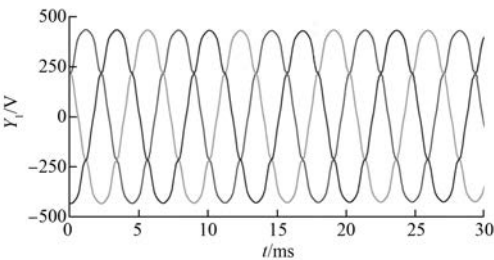


图 4 电机空载下线反电势波形

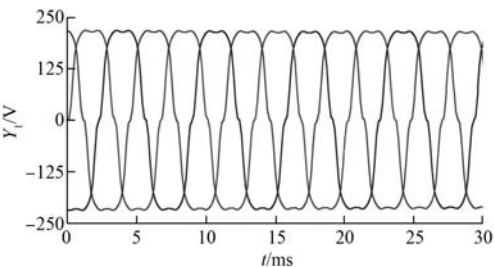


图 5 电机空载下相反电势波形

从图 3 可知,电机的材料未达到磁饱和状态,最大磁密为 1.569 T。从图 4 和图 5 可知反电势正弦性较好,能满足用户的正弦控制要求,且线反

电势最大值为 DC 432.4 V, 均方根值为 DC 288.4 V, 相反电势最大值为 DC 217.7 V, 均方根值为 DC 168.4 V; 用户指标为 AC 380 V, 转换为直流为 $380 \times 1.414 = 537.32$ V, 均能满足用户指标要求。

3 额定点的性能分析

3.1 额定点的力学分析

电机在额定工作点性能仿真结果如表 2 所示, 定子铜耗为 28.521 W, 定子铁心损耗为 32.330 4 W, 转子部分(包括转子轭、磁钢、磁极隔板、转子护套)涡流损耗为 2.979 5 W, 电机效率为 91.3%。

表 2 额定点指标仿真

参数名称	参数值	参数名称	参数值
转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	3 000	电流密度/($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$)	10.607 7
转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	11.934 1	线负荷/($\text{A} \cdot \text{mm}^{-1}$)	49.462
相电流/A	7.997 98	热负荷/(A^2)	52.467 5
相电势 max/V	235.56	铜耗/W	28.521
相电势 rms/V	182.5	铁耗/W	32.330 4
线电势 max/V	449.25	转子涡流损耗/W	2.979 5
线电势 rms/V	313.58	电机效率/%	91.3
K_T /($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$)	1.401 62	外加线电压 max/V	472.56
K_E /($\text{V} / \text{kr} \cdot \text{min}^{-1}$)	105.501 7		

电机在额定工作状态下的转矩波形、线反电势波形、相反电势波形、定子损耗和转子涡流损耗曲线分别如图 6~图 9 所示。

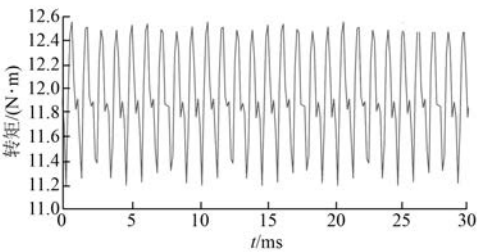


图 6 转矩与时间的关系

3.2 额定点的磁密分析

对电机磁路的各部分进行磁密分析, 分析结果如图 10~图 13 所示。

由图 10~图 13 可知, 定子齿尖的磁密最大, 为 1.81 T, 定子齿中和定子轭部磁密最大分别为

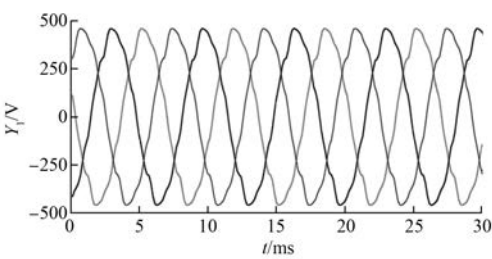


图 7 线反电势波形

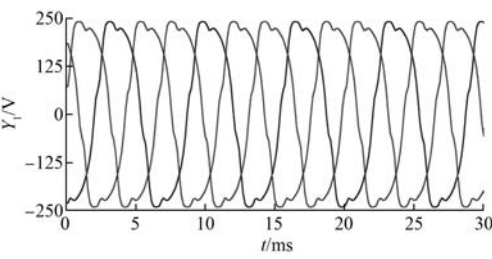


图 8 相反电势波形

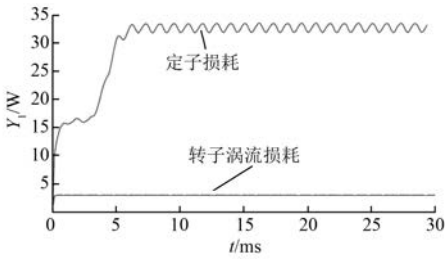


图 9 损耗曲线

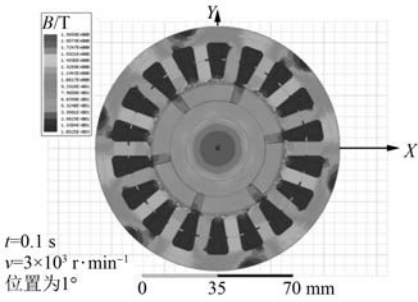


图 10 磁密分布云图

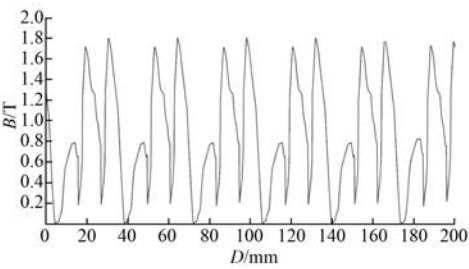


图 11 定子齿尖磁密曲线

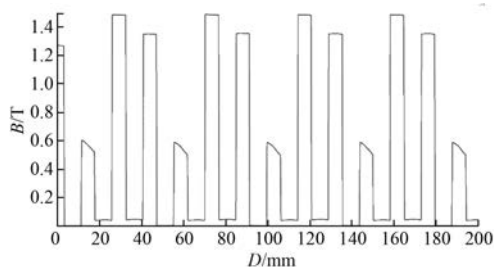


图 12 定子齿中磁密曲线

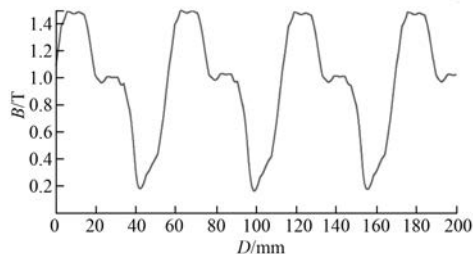


图 13 定子轭部磁密曲线

1.49 T 和 1.50 T, 说明硅钢片磁性能未达到饱和且充分利用。

3.3 额定点的电感分析

在电机空载时, 对电机的电感进行分析, 绕组的自感和互感分别如图 14、图 15 所示。

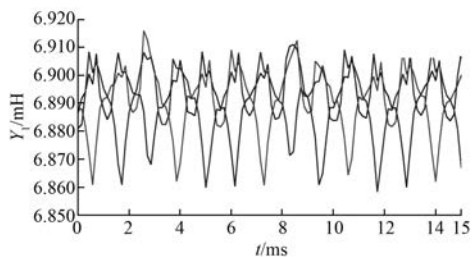


图 14 绕组自感

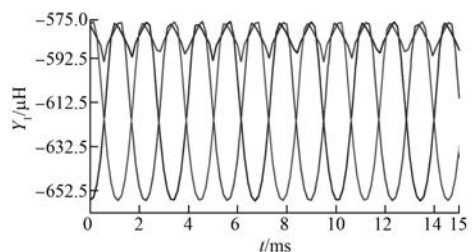


图 15 绕组互感

通过上述计算结果, d 、 q 轴电感 $L_d = L_q = 6.891\ 5 + 0.606\ 37 = 7.497\ 87\ \text{H}$, 电气时间常数 $\tau = L/R = 7.497\ 87/1.22 = 6.146\ \text{ms}$, 计算电感小, 电气时间长度短。

基于上述仿真分析, 电机满足用户在 $11\ \text{N}\cdot\text{m}$ 负载下的使用, 电机热负荷及电流密度较小, 能够满足用户的寿命使用要求; 冲片磁密未完全达到饱和, 说明电机冲片材料的选取合理, 设计可行。

3.4 热分析

电机的工作制是短时工作, 正向旋转 $20\ \text{s}$ 后, 再反向旋转 $20\ \text{s}$, 称为 1 个工作循环。按照满载工况最大允许连续工作时间: $\geq 5\ \text{min}$, 最高使用温度 $60\ ^\circ\text{C}$ 。在 Motor-CAD 中建立了热仿真模型, 分析电机各部分瞬态温度变化曲线如图 16 所示, 电机各部分温度分布如图 17、图 18 所示。各部件稳定后的最高温度如表 3 所示。

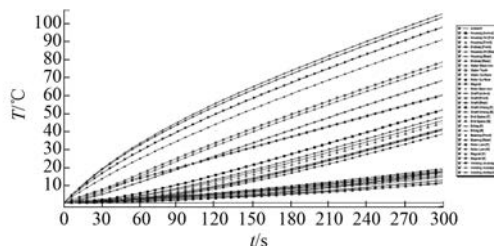


图 16 电机各部分瞬态温度变化



图 17 电机稳态径向截面温度

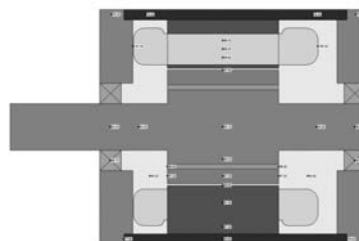


图 18 电机稳态轴向截面温度

从分析结果可看出, 电机的温度分布中, 最高温度产生在绕组部位为 $102.3\ ^\circ\text{C}$, 最大的温升值 $42.3\ \text{K}$, 电机的绝缘材料耐温性好, 完全能满足在此温度下的可靠工作。

表 3 各部件稳定后的最高温度

电机部件	环境条件/℃	仿真温度/℃	温升值/K
机壳	60	80.8	20.8
前端盖组件	60	76.3	16.3
机壳后端	60	76.6	16.6
定子轭	60	87.4	27.4
定子齿	60	91.5	31.5
定子表面	60	84.4	24.4
转子表面	60	67.2	7.2
转子导条	60	66.5	6.5
转子轭	60	65.1	5.1
前端盖轴承	60	66.7	6.7
后端盖轴承	60	66.9	6.9
定子绕组	60	102.3	42.3

4 实测性能与仿真对比

电机实物图如图 19 所示,用电涡流测功机 (GW320T) 和驱动器 (BMTUBG80SR, Elmo) 闭环测试,电机在额定电压、额定转速时,空载时的平均电流为 1.05 A,在额定扭矩时,能输出稳定的转速,且平均工作电流为 7.4 A,与仿真数据相比,准确率为 95.9%,具体如图 20、图 21 所示。



图 19 电机实物图



图 20 电机测试电流



图 21 电机负载下力矩参数

电机在常温下(无高温负载测试设备),负载运行 5 min 后的表面温升如表 4 所示(测试 5 次后取平均值)。电机短时工作时,最大温升值为 19.2 K,与仿真值接近。

表 4 电机表面温升

电机部件	环境条件/℃	仿真温度/℃	温升值/K
机壳	25	43.2	19.2
前端盖组件	25	37.2	12.2
机壳后端	25	35.9	10.9

5 结 语

本文基于 Ansys 建立交流伺服电机的电磁模型,给予 Motor-CAD 建立交流伺服电机的热学模型,应用该模型对用于某型号导弹发射装置的交流伺服电机进行了电磁性能和热场分布仿真。在此基础上研制工程样机,通过对样机的实测,得到模型对电机性能计算准确率可达到 95.9% 以上,电机机壳表面最大温升为 19.2 K,与仿真值 20.8 ℃接近,反向验证了仿真模型的有效性和适用性,对交流伺服电机的研制大有裨益。

【参考文献】

[1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.

[2] 宋先成.有限元法[D].天津:天津大学,2007.

[3] 谭建成.三相无刷直流电动机分数槽集中绕组槽极数组合规律研究(连载之一)[J].微电机,2007,40(12): 72-77.

[4] 刘鹏,郭颖达,王志芳.三相异步电动机空载试验特性曲线拟合[J].河南工业科技,2011,28(3): 157-159.

[5] 邹根华,梁得亮,鲁军勇,等.基于 Ansoft 多相多极电机的性能分析[J].微特电机,2003,31(6): 15-16.

[6] 刘艳君.基于 ANSYS 的永磁电机永磁体的优化设计[J].微特电机,2007,35(4): 8-10.

[7] NAGORNY A S, DRAVID N V. Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor/generator for flywheel applications[C] // International Electric Machines and Drives Conference, 2005: 635-641.

收稿日期: 2018 -01 -10