

基于 Ansys 多物理场仿真技术在电机设计中的应用

[卓 亮, 赵 飞]

[国家精密微特电机工程技术研究中心, 550089]

[摘 要] 航空航天用无刷直流电机具有高功率密度(>2kW/kg)、高热负荷(>1000A²/mm³)、高转速(>10000rpm)、高可靠性的特点, 基于 Ansys 软件对该类电机进行多物理场的仿真分析。通过电磁场仿真分析保证该电机电气性能满足指标要求; 通过温度场仿真分析保证该电机在工作时间内不会发生绕组绝缘熔化、磁钢退磁和位置反馈电路失效温问题; 通过静力结构分析保证该电机在最高转速输出最大转矩时不会发生护套损坏和轴断裂现象。提高电机的可靠性和稳定性的, 缩短武器装备研发周期具有重大意义。

[关键词] 航空航天; 无刷直流电机; 多物理场; 仿真

Technology in the application of the electric machine design

[zhuoliang;zhaofei]

[National Engineering Research Center for Small and Sspecial Precision Motors; 550089]

[Abstract] Brushless DC motor applied in the aerospace field, the advantages of which are high power density(>2kW/kg), high heat load (>1000A²/mm³), High speed(>10000rpm) and High reliability, based on Ansys software for simulation of multi-physical coupled fields. In order to satisfy the performance requirement of Brushless DC motor used in the aerospace field, this article carries out a series of simulations including electromagnetic simulation, temperature fields simulation and stress field simulation. It is of great significance to improve the reliability and stability of the motor, shorten weapons assembly cycle.

[Keywords]: Aeronautics and astronautics; Brushless DC motor; multi-physical fields; simulation

1 前言

电机是多物理场高度耦合的产品, 尤其对军用电机而言, 由于其高功率密度、高转速、高效率特点, 因此在设计电机时进行电磁场、温度场、力学结构仿真对保证电机性能指标, 提高电机的可靠性和稳定性的, 缩短电机的研发、生产、试验周期具有重大意义。以某型号电机为例, 介绍基于 Ansys 多物理场仿真平台在电机设计中的应用。

2 多物理场仿真平台介绍

多物理场仿真设计平台所采用的仿真软件如下表 1。

表 1 仿真平台软件设备

软件名称	厂家	版本号	功能
Ansys Maxwell	美国Ansys公司	2015	电磁仿真分析
Ansys Workbench	美国Ansys公司	16.0	温度场和静力学仿真分析

具体的仿真分析内容见下表 2。

表 2 仿真平台分析项目

仿真项目	分析内容
电磁场仿真	电磁转矩、转矩波动
	绕组铜耗、定子铁耗、转子涡流损耗、效率
	退磁校核、齿槽转矩、定转子各部分磁密
温度场仿真	机壳、定子、绕组、轴承、位置传感器温度分布
	电机主要散热途径分析
静力学仿真	转子护套、转子磁钢、转轴变形和应力分布

3 电磁场分析

针对该电机的性能指标（见下表 3）对该电机进行电磁场有限元分析。

表 3 该电机性能指标

额定电压	270VDC	最大转速	11000rpm
空载电流	<2A	调速范围	9000-11000rpm
最大输出功率	0.5kW	转矩(电流)波动系数	≧10%额定转矩
电机效率	≥90%		

图 1 为该电机电磁场有限元分析模型和网格剖分效果。

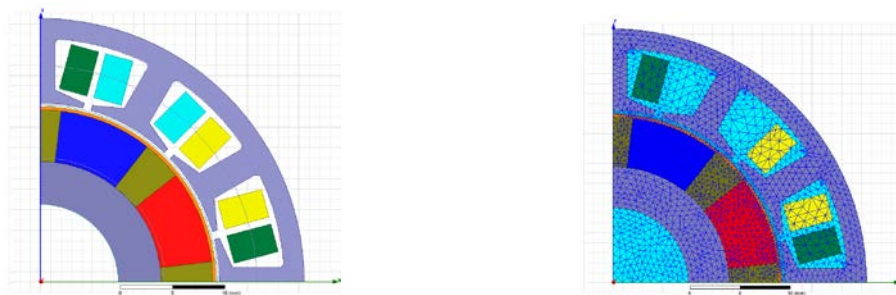


图 1 电机有限元分析模型和网格剖分效果

3.1 最大功率点性能仿真

电机在最大功率点的性能仿真结果见下表 4。电机在该工作点，定子铜耗为 24.28W，定子铁心损耗 12.2299W，转子部分(包括转子轭、磁钢、转子护套)涡流损耗为 2.0337W，电机的效率为 92.1%。满足指标要求。

表 4 最大功率点仿真结果

转矩	0.4438N.m	转矩波动	4.66%
转速	11000 rpm	定子铜耗150℃绕组	24.28W
相电流	1.9A	定子铁耗	12.2299W
转子涡流	2.0337W	风摩损耗	5W
效率 η	92.1%		

电机的转矩波形、线反电势波形、定子铁耗曲线、转子涡流损耗曲线、机械特性曲线分别见图 2 至图 5。

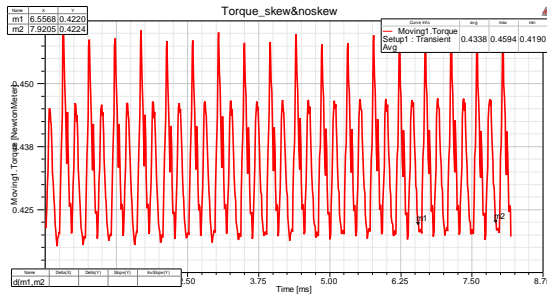


图 2 转矩-时间曲线

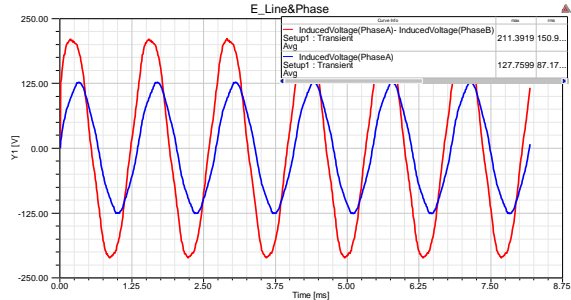


图 3 反电势波形 (线电势&相电势)

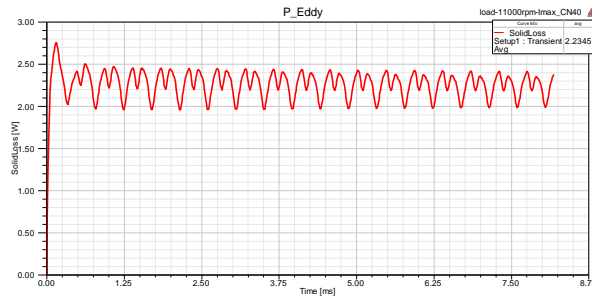


图 4 定子铁心损耗曲线

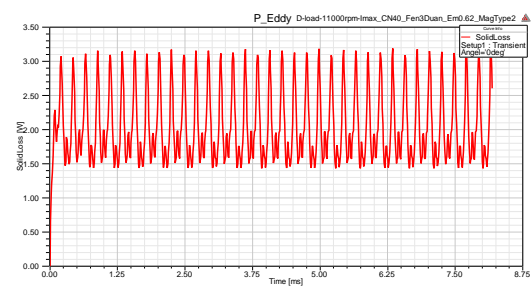


图 5 转子涡流损耗曲线 (铁心、磁钢、护套)

3.2 电机各部分磁密仿真分析

电机在最大功率点的性能仿真结果见下表 4。电机在该工作点，定子铜耗为 24.28W，定子铁心损耗 12.2299W，转子部分(包括转子轭、磁钢、转子护套)涡流损耗为 2.0337W，电机的效率为 92.1%。满足指标要求。电机磁密云图如下图 6 所示

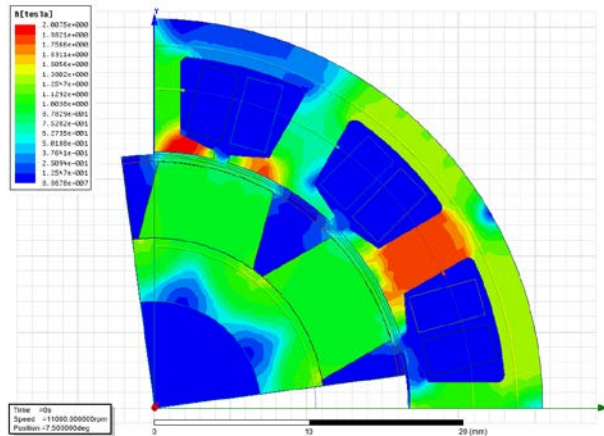


图 6 电机磁密云图

求解得到定、转子各部分磁密见下表 5，定子冲片采用 20WTG1500，铁心未饱和。

表 5 电机各部分磁密

定子齿磁密 (T)	1.8208
定子轭磁密 (T)	1.7083
转子轭磁密 (T)	1.2595

3.3 退磁校核

求解得到永磁体表面去磁磁势曲线，如图 7 所示，去磁磁势磁势最大值为 72.67kA/m，远小于永磁体的内禀矫顽力。因此不会发生退磁。

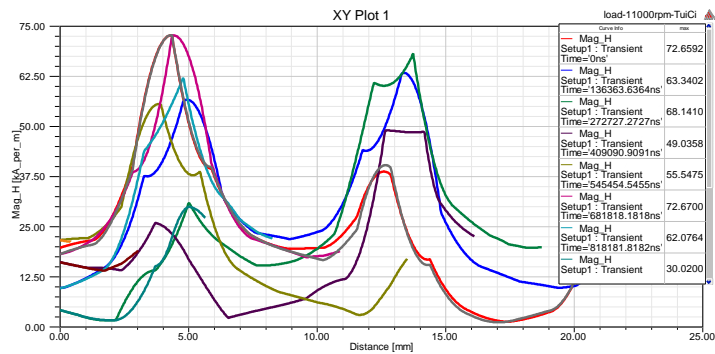


图 7 永磁体表面去磁磁势曲线

3.4 齿槽转矩仿真

该电机斜 0.5 个槽，斜槽后齿槽转矩峰峰值为 0.0350N.m，下图 8 为斜槽前后齿槽转矩对比。

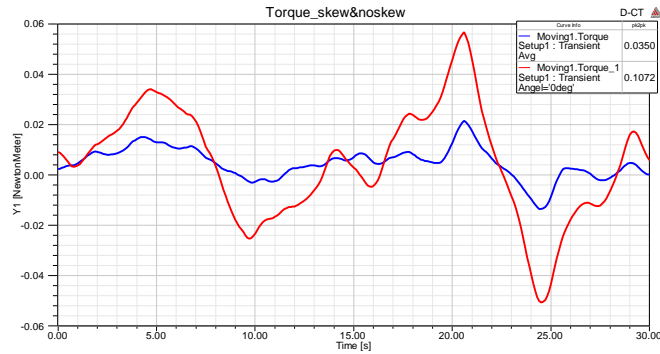


图 8 斜槽前后齿槽转矩对比

4 温度场仿真与分析

4.1 热源的确

正文电机主要热源有定子铁耗、绕组铜损耗、转子涡流损耗、轴承摩擦损耗和风损，见下表 6。

表 6 该电机主要热源

绕组	24.28W	轴承	4 W
定子铁心	12.2299W	气隙空气	1 W
转子	2.0337W		

4.2 边界条件的确定

该电机装在油泵上使用，油泵中燃油温度为 80 ℃，走油量很大，故假定电机与油泵接触的前端面温度恒定为 80 摄氏度，电机前端面与油泵之间为接触传热。电机使用高环境温度 80 ℃，机壳表面和周围环境为自然对流换热。

4.3 热分析模型和网格剖分

有限元模型的接触除轴承滚体与轴承内外圈为摩擦，其中轴承摩擦系数为 0.0015 其余全部按照绑定处理。网格的划分采用手动划分，分别采用多域法、扫掠法、主六面体并结合体尺寸控制对其细化，获得较好的网格单元，有限元模型的网格有 209830 个网格单元，633364 个节点数，网格划分的有限元模型如图 9 所示。

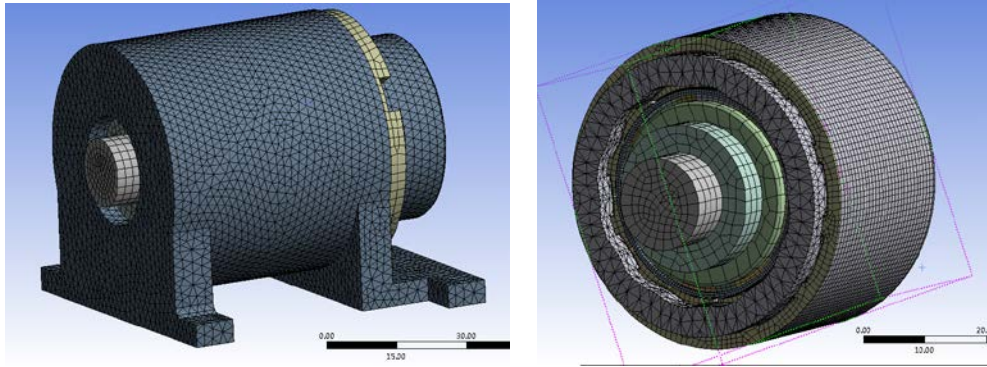


图 9 电机网格剖分模型

4.4 电机稳态热分析

用稳态温度场计算电机稳定后各部件的工作温度见下表 7。电机最高温度不超过 90 摄氏度，不会发生绝缘熔化、磁钢性能过度下降问题。

表 7 电机各部分温度

	最高温度(°C)	最低温度(°C)
机壳	84.355	80
绕组	84.194	81.136
磁钢	86.173	85.305
定子铁心	84.163	81.287
旋变	85.215	84.698
轴承	85.956	80.394

图 10-图 15 分别为电机机壳、绕组、磁钢、定子铁心、旋变、轴承的温度分布云图。

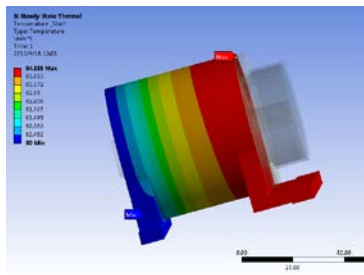


图 10 机壳温度分布云图

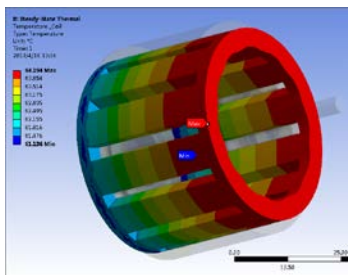


图 11 绕组温度分布云图

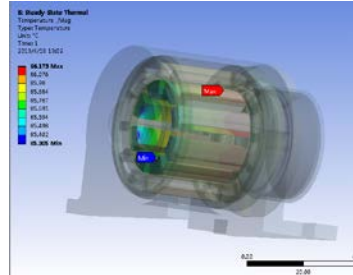


图 12 磁钢温度分布云图

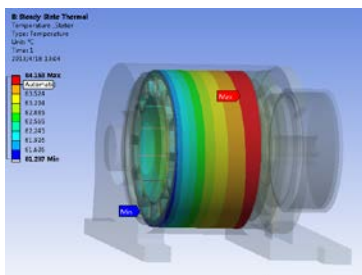


图 13 定子铁心温度分布云图

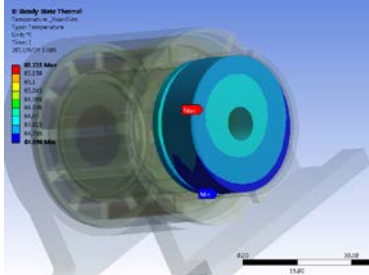


图 14 旋变温度分布云图

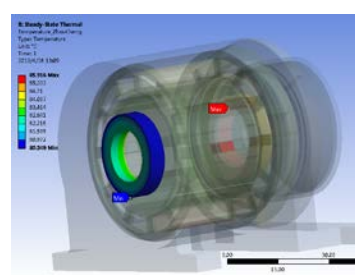


图 15 轴承温度分布云图

电机与与油泵连接端面散热量占电机总发热量的 97%，是电机主要的散热途径，见下表 8。

表 8 该电机传热途径及传热量

传热面	传热方式	传热量 (W)
机壳前端面	接触传热	46.566
机壳表面	自然对流换热	1.4473

5 静力学仿真分析

5.1 静力学仿真分析设置

力学分析全局参数设置见下表 9：

表 9 静力学分析全局参数设置

静力学分析全局参数设置				
单元总数量	电机网格数量为31558，节点数量66611			
负载条件/约束条件				
类型	负载条件		约束条件	
	负载位置	负载方向	约束位置	约束方向
静力学分析	电机：转子轴伸端	电机：转子轴伸端Z方向旋转自由度；	转轴安装轴承处；	转轴径向、轴向运动固定，切向自由旋转

5.2 转子旋转应力分析

电机转子工作转速为 11000rpm，电机转子 11000rpm 时变形及应力分布见下图 16 和图 17。

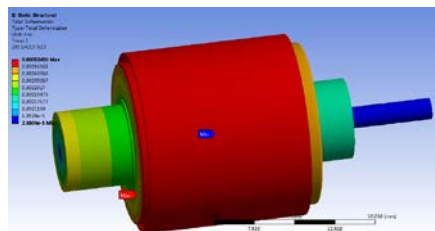


图 16 转子整体变形

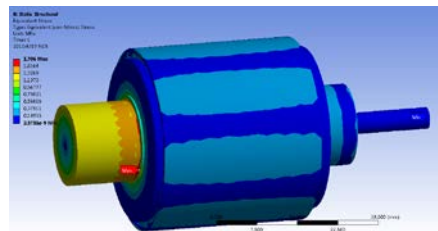


图 17 转子整体应力分布

从分析结果可以看出，电机转子在 11000rpm 时，变形最大为 0.00054258mm，变形量小，应力最大为 170.6MPa，远小于材料的屈服强度，而且转子各零部件之间采用粘胶紧密配合，转子满足可靠性要求。

5.3 电机关键零部件旋转应力分析

转子各部件最大变形和最大应力分析结果见下表 10。

表 10 转子零部件旋转应力分析

名称	最大变形(mm)	最大应力(Mpa)
转子护套	0.00052458	170.6
磁钢	0.00051475	87.373
转轴	0.00037582	35.989

转子护套、磁钢、转轴变形和应力分布效果见下图 18—图 23。

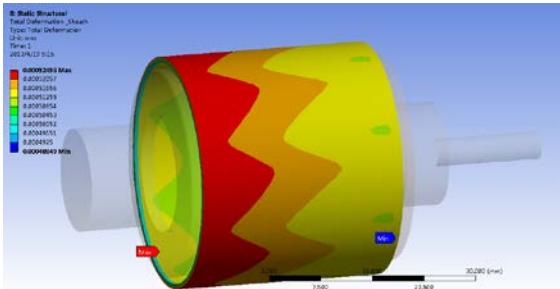


图 18 转子护套变形

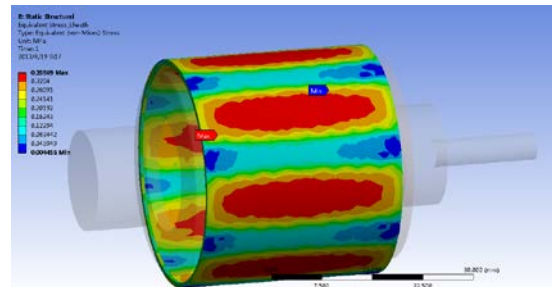


图 19 转子护套应力分布

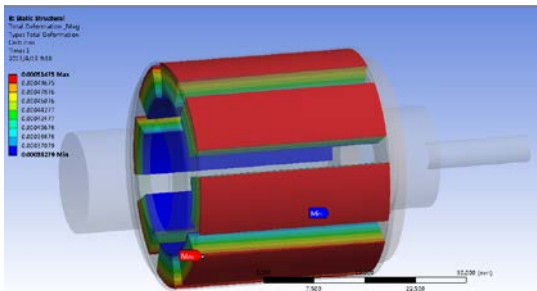


图 20 磁钢变形

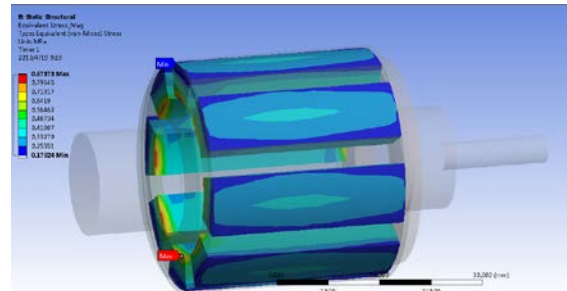


图 21 磁钢应力分布

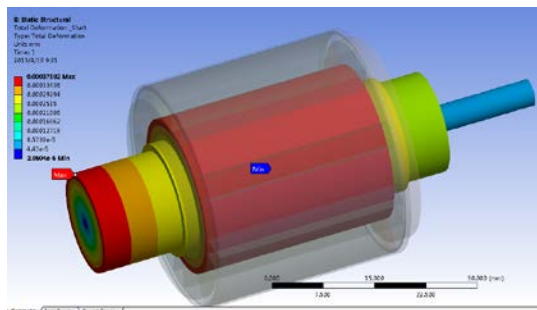


图 22 转轴变形

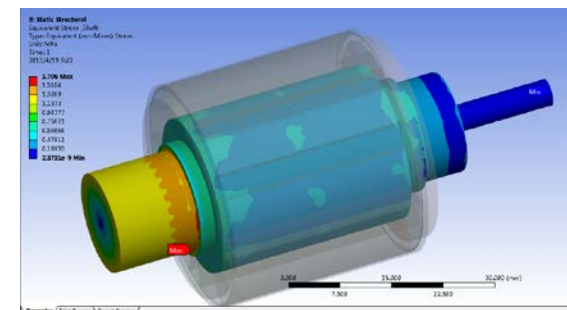


图 23 转轴应力分布

6 结论

通过对该电机进行电磁场仿真分析、温度场仿真分析和静力学仿真分析。电机电气性能、热稳定性和转子结构强度均能很好满足要求。

电机满足输出功率 500W、转速 11000rpm、效率 $\geq 90\%$ 的要求。该电机与与油泵连接端面散热量占电机总发热量的 97%，是电机主要的散热途径，在电机安装时，要保证接触面均匀且散且传热良好；电机绕组温度最高为 84.198 $^{\circ}\text{C}$ 磁钢温度最高为 86.173 $^{\circ}\text{C}$ 旋变最高温度为 85.215 $^{\circ}\text{C}$ 正常工作温度范围-55 $^{\circ}\text{C}$ ~165 $^{\circ}\text{C}$ 不会发生绕组绝缘熔化、磁钢

退磁和旋变失效问题。电机在高转速 11000rpm，输出转矩 0.5N.m 时，转子各部分应力及变形量小，不会出现转子护套损坏和轴断裂的现象；应力及变形小于材料的屈服强度，而且留有设计余量，转子结构强度满足要求。

多物理场仿真技术的应用提高电机设计准确性和可靠性，有效缩短武器装备研发周期。

[参考文献]

- [1] 唐任远，现代永磁电动机理论与设计[M]，机械工业出版社，1997；
- [2] 赵博 等.Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京：中国水利水电出版社，2010；
- [3] 凌桂龙，丁金滨，温正等.ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通[M].清华大学出版社。

作者简介：卓亮（1986-），男，硕士研究生，工程师，从事微特电机设计和多物理场仿真技术研究，zhuoliangd@163.com。