

一种弹载永磁同步电机的综合物理场计算

李 鹏, 王佳民, 王 卿, 胡锦涛

(中国航天科技集团十六研究所, 西安 710100)

摘 要:主要研究了一种 600 W, 13 000 r/min 的弹载永磁同步电动机的设计、综合物理场仿真分析及优化。电机主要结构尺寸以等效磁路法为基础进行确定, 然后通过有限元软件对电机电磁特性进行仿真分析和关键参数优化, 在根据有限元对电机温升进行计算, 最后根据优化结果制造样机, 对样机进行测试, 根据测试结果和电机的技术要求调整电机各参数至最佳状态。

关键词:永磁同步电动机; 有限元仿真; 优化设计; 综合物理场

中图分类号: TM351; TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7018(2015)11-0031-05

Calculation of Synthetic Physical Field in PMSM

LI Peng, WANG Jia-min, WANG Qing, HU Jin-yao

(The 16th Institute, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100)

Abstract: The design, simulation of synthetic physical and optimization of a 600 W and 13 000 r/min PMSM was discussed. The mainly structure parameters of PMSM were determined by the equivalent magnetic circuit method. The synthetic physical field in PMSM were analyzed by simulation. On the basis of this, the optimization of certain key parameters were done. Then, according to the optimization results the prototypes were built and tested. Finally, we adjusted certain key parameters according to test results and the requirements of customers to make the PMSM running in a better state.

Key words: PMSM; FEM simulation; optimal design; synthetic physical field

0 引 言

永磁同步电动机具有结构简单、体积小、重量轻、损耗小、效率高、转矩波动小等特点, 因而其应用领域越来越广。弹载设备中对体积的严格限制, 并且环境条件要求十分苛刻, 而且对于动力输出设备, 其驱动力必须充足稳定, 所以该弹载永磁同步电机设计及制造具有一定的难度。本文首先通过磁路计算法确定电机的关键部分尺寸, 然后利用电磁场有限元仿真软件 Ansoft, 建立适当的参数化模型, 对电机电磁特性进行计算并对设计参数进行优化, 再采用 ANSYS 对电机温度场进行计算, 最后制造样机对电机优化及仿真计算结果进行验证。

1 结构设计

1.1 设计要求

电机外形尺寸要求不大于 $\Phi 55 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 性能指标: 额定功率 600 W, 额定电压 270 V, 额定电流要求小于 3 A, 额定转速 13 000 r/min, 额定转矩 0.44 N·m, 电机最高工作环境温度 120℃。

1.2 关键尺寸选定

电动机的尺寸对电动机的性能起着决定性作

用, 它直接影响着电动机的转矩、功率、转速等重要性能。当电动机的功率和额定转速以及电动机的电磁负荷确定以后, 电动机的主要尺寸——定子铁心内径 D_{il} 及其轴向长度 L_l 就可以根据下式来确定^[1-3]:

$$D_{il}^2 L_l = \frac{6.1 \times 10^4}{\alpha_i K_B K_{w1} B_8 A} \cdot \frac{P'}{n}$$

式中: P' 为电动机的计算功率, $P' = P_N \frac{1+\eta}{2\eta}$, P_N 为电动机额定功率; η 为电动机额定工作点的效率; α_i 为计算极弧系数; K_B 为磁场波形系数; K_{w1} 为电枢基波绕组系数; n 为电动机额定转速; A 为电动机的电负荷; B_8 为磁负荷。电动机的电负荷和磁负荷对电机状态起着决定性作用, 选取时要综合考虑多方面因素。

1.3 结构设计结果

经过反复计算, 最终选取电机机构各部分尺寸参数如表 1 所示。

表 1 主要结构尺寸

参数	数值	参数	数值
定子槽数	15	转子内径 d_{ri} /mm	10
转子极数	4	铁心长度 l_c /mm	40
定子外径 D_{so} /mm	50	定子内径 D_{si} /mm	26

最终在上述所选结构尺寸情况下计算得出电机关键部分平均磁场密度, 如表 2 所示。

表2 关键部位磁场密度

定子齿 B_s/T	1.38	转子齿 B_r/T	1.15
定子轭 B_c/T	1.34	气隙 B_δ/T	0.7

2 有限元分析

在磁路法设计得到电机各部分结构参数的基础上建立电机几何模型,然后分别对电机进行电磁场和温度场有限元分析。

并利用电磁场有限元仿真软件 Ansoft 对电机电磁场进行分析计算,对于温度场的计算,本文采用 ANSYS 进行计算。

2.1 电磁场分析

对电机电磁场的分析采用二维电磁场分析,利用电磁场有限元仿真软件 Ansoft 对电机电磁场进行分析计算^[6]。

2.1.1 电磁场有限元模型的建立

在用有限元法分析电磁场时,常引入矢量磁位 A_z 作为求解变量,并对忽略交变磁场在电机定子和转子铁心中的涡流反应,于是结合麦克斯韦(Maxwell)方程组可得到电机电磁场计算的基本数学方程^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \Omega: \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} &= -\mu J_z \\ \Gamma_1: A &= A_0 \\ \Gamma_2: \frac{\partial A_z}{\partial x^2} &= -\mu H_\tau \end{aligned} \right\}$$

式中: J_z 为沿电机轴向的电流密度; Γ_1 为第一类边界条件; Γ_2 为第二类边界条件; A_0 为矢量磁位边界值; H_τ 为磁场强度的切向分量; μ 为磁导率。

2.1.2 气隙磁密计算

在 Ansoft 中为建立的电机几何模型各部分设置相应的材料,并设定电磁场计算的边界条件,静态磁场仿真可得到电机的磁力线和磁密云图如图1所示。在图1中可看出静态磁场强度最大值为1.72 T,各关键部位的平均磁密与磁路计算结果相吻合。

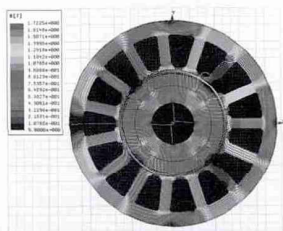


图1 磁力线和磁密云图

为了观测定子齿槽对气隙磁密波形的影响,在此特意建立一个无齿槽的定子,进行静态磁场计算,得到无齿槽时的气隙磁密波形,与有齿槽时气隙磁密波形的对比情况如图2所示。再分别对有齿槽和

无齿槽时的气隙磁密波形进行傅里叶分解,得到其频谱如图3所示。从图3中可看出有齿槽时和无齿槽时频谱图相差不大,这在一定程度上反映了极槽数选取较为合理。

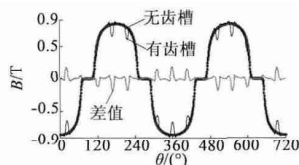


图2 气隙磁密波形

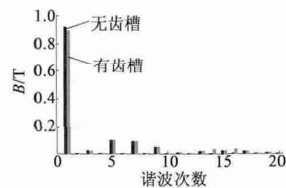


图3 气隙磁密频谱图

2.1.3 反电势计算

相反电势如图4所示。齿槽转矩如图5所示。

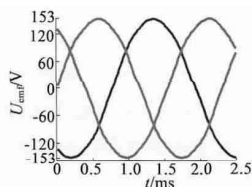


图4 相反电势波形

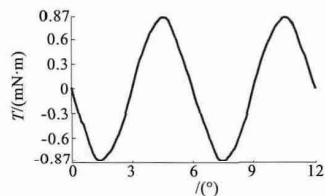


图5 齿槽转矩波形

2.1.4 齿槽转矩和电磁转矩计算

假设电机在额定状态下运行时相电流有效值为2.44 A,当给电机三相绕组中通以三相正弦交流电,通过调整电流初始相位,使电机电流只产生交轴磁场,其中电流的有效值为2.44 A,仿真得出此时电机的电磁转矩,再通过电机瞬时反电势和电流以及在特定位置处的齿槽转矩,可粗略计算出电机的瞬时转矩,并与仿真值相对比,结果如图6所示。从图6中可看出,计算值明显大于仿真值,这是因为计算

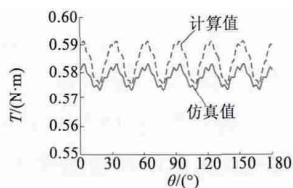


图6 电机电磁转矩

值是建立在电机无铁耗的基础上。仔细观察可发现,计算值与仿真值都以30°机械角度为周期波动,这是由反电势中幅值较高的七次谐波引起的,以

60°电角度为周期的正弦波动与其他高次谐波引起波动的及齿槽转矩的总和。观察还可发现,齿槽转矩幅值相对于转矩波动相差约一个数量级,对转矩波动影响较小,故不把齿槽转矩作为优化考虑的因素。

2.2 温度场计算

对于电机温度场的计算分析,采用三维温度场进行计算分析,本文采用 ANSYS 软件进行计算。

2.2.1 温度场有限元模型的建立

首先在 Pro/E 中绘制出电机各零件的零件图,然后把各零件按一定的顺序组装起来,完成电机的三维模型,接下来把电机的三维模型导入 ANSYS 软件进行温度计算^[10]。

为简化计算,此处对电机模型进行以下简化:将同一槽内的绕组简化为一根铜条;将电机铜耗和铁耗视为分别均匀分布于导线和铁心中;认为电机机壳各外表面的换热系数值相等;把电机气隙内的对流换热等效处理为与导热系数大于空气的材料的热传导。

根据三维有限元和传热学基本理论,可得三维稳态温度场的基本数学方程^[8-9]:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q &= 0 \\ T|_{s_1} &= T \\ -\lambda_n \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{s_2} &= h(t - t_0) \end{aligned} \right\}$$

式中: T 为节点温度; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 为各方向上的导热系数; λ_n 为沿热流方向的导热系数; q 为热源的产热密度; h 为对流换热系数; t 和 t_0 分别为物体表面温度和流体温度; s_1 为等温面; s_2 为对流换热面。

在进行计算之前首先查阅相关材料的导热系数、比热容和密度等参数,并分别为电机模型中各部分材料输入相关参数。

2.2.2 温升计算

温升测试时,电机安装在体积较大的钢材实验台上,此处假设电机机壳安装接触面温度为一恒定值,仿真得到电机额定工作状态下铁心损耗约为 22 W,绕组铜耗约为 52 W,其余条件与空载情况下状态相同。计算结果整体效果如图 7 所示。

从计算结果中可以看出,机壳表面最高温度约为 81.6℃,而电机最高温度约为 82.4℃,电机最高温度位于绕组上,结果如图 8 所示。仿真计算结果表明电机在负载状态下运行时温升约为 60℃,则当电机工作环境温度上升到 120℃时,其绝缘结构和磁钢必需要承受 180℃左右的高温,则绝缘结构材料的耐热等级必需选用 H 级及以上等级,才能保证电机在 120℃的高温工作环境下可靠运行,而磁钢

材料选为钕钴永磁合金,完全可以承受 180℃的高温。



图7 负载温升整体效果



图8 负载温升图(电机内部)

3 电机优化设计

本文仅对电机的磁钢极弧系数和绕组匝数两项设计参数进行最优化设计,通过调整极弧系数,使电机气隙磁密波形达到最接近正弦波的状态;通过调整绕组匝数,使电机的最高转速达到设计要求,从而使电机的性能达到与设计要求最接近的状态。

3.1 极弧系数优化

极弧系数的大小会直接影响气隙磁密的波形宽度,进而影响到主磁通的大小以及电机各部分的磁密大小,最终影响整个电机的力能指标。因此必需对极弧系数进行优化,调节电机磁路磁通大小,使电机有较好的工作状态。通过参数化建模,选择适当的参数,本文把每片磁钢圆弧对应的圆心角设置为模型参数,便于对极弧系数进行优化。例如本文对每片磁钢圆弧对应的圆心角从 60°以 1°为步长取到 80°,并对其气隙磁密进行仿真计算,并分析气隙磁密的频谱特性,气隙磁密波形如图 9 所示,从图 9 中可以看出,随着磁钢极弧角度的增大,其气隙磁密波形的宽度不断增加,各个波形的频谱特性如图 10 所示。

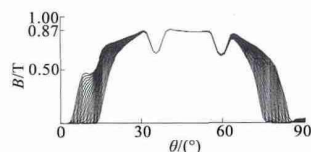


图9 气隙磁密波形

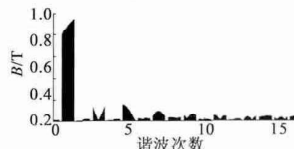


图10 气隙磁密频谱图

然后对其齿槽转矩进行仿真分析,其结果如图 11 所示。从图 11 中可看出,当极弧角度选取为特

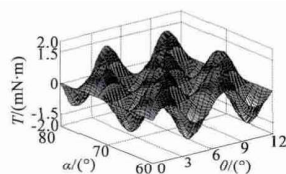


图11 齿槽转矩

定值时齿槽转矩的幅值可以取到最小值,齿槽转矩最大幅值在 $1.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 左右,对应的极弧角度约为 $62^\circ, 68^\circ$ 和 74° ;齿槽转矩最小值在 $0.065 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 左右,对应的极弧角度约为 $77^\circ, 71.3^\circ$ 和 65.3° 。

最后对其反电势进行仿真,其相反电势幅值随极弧角度的变化从 140 V 逐渐增加到 164 V ,随后对反电势进行频谱分析并计算谐波失真度(除基波外的所有次谐波的方均根值的方和根与基波方均根值之比):

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} \varphi_v^2}{\varphi_1^2}} \times 100\%$$

式中: φ_v 表示反电势中的 v 次谐波的方根均值。本文只计算了前 50 次谐波,结果如图 12 所示。极弧角度从 60° 逐渐增加到 80° 的过程中,反电势的谐波失真度在 $1.5\% \sim 2.0\%$ 之间变化。可看出,在此极槽数配合使用的结构中,磁钢极弧角度对反电势波形的谐波失真度影响较小,则可根据其他性能要求选择磁钢极弧角度,如凸极效应要求、转子铁心工艺性和机械强度要求、电机各部分磁密要求、永磁体的用量要求等。

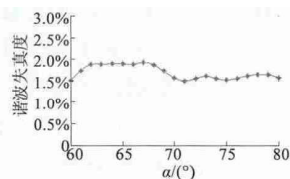


图 12 反电势的谐波失真度

电机电磁转矩和极弧角度的关系如图 13 所示,从图 13 中可看出,随着极弧角度的增加,电磁转矩从 $0.537 \text{ N} \cdot \text{m}$ 逐渐增加到 $0.615 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

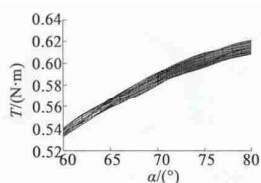


图 13 电磁转矩和极弧角度对应关系

在优化极弧系数的同时,对空载和负载情况下的关键部位的磁密进行统计,结果如表 3 所示。

表 3 电机空载和负载状态下各部分磁密

空载磁密	最大均值	负载磁密	最大均值
转子轭 B_r / T	1.2	转子轭 B_r / T	1.3
定子轭 B_e / T	1.55	定子轭 B_e / T	1.71
定子齿 B_s / T	1.586	定子齿 B_s / T	1.618

由于电机无位置传感器,电机控制要求电机具有较明显的凸极效应,故在保证电机各部分磁密接近饱和的情况下,电机的磁钢极弧系数最终选取为 0.78。

3.2 绕组匝数优化

绕组匝数会直接影响到电机力能指标和电机的

反电势的幅值,进而影响到电机最高转速的大小,因此对绕组匝数有必要进行优化分析。通过把绕线匝数设为参数,把匝数设为从 23 匝以 1 匝为步长增长到 30 匝为止,然后仿真分析其反电势,其结果如图 14 所示,从图 14 中可看出,随着匝数的增长,相反电势的幅值从 115 V 逐渐增加到 150 V ,计算从 25 匝到 28 匝的反电势系数分别为 0.158 9, 0.165 3, 0.171 6, 0.178 0。

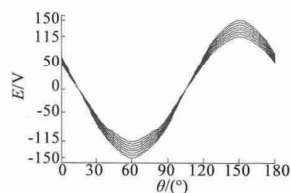


图 14 相反电势与随匝数的变化关系

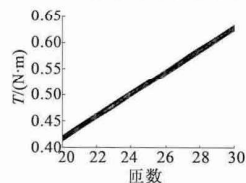


图 15 电磁转矩与匝数的对应关系

再仿真电机电磁转矩,其结果如图 15 所示。从图 15 中可看出随着匝数的增加,电磁转矩从 $0.42 \text{ N} \cdot \text{m}$ 逐渐增加到 $0.625 \text{ N} \cdot \text{m}$,结合电机额定指标,选取合适的匝数。

4 实验结果

为保证电机样机制造成本控制一定范围内,样机极弧系数均为 0.78,匝数为 25, 26, 27, 28 四种。对样机的测试包括:对拖电机测试反电势,观察反电势波形;在工控机上测试电机在几个关键状态下运行的转速以及输出转矩等参数。

对拖测得其三相反电势波形如图 16 所示,计算得到其反电势系数从 25 到 28 匝分别为 0.155, 0.158, 0.166, 0.175。与仿真结果进行对比可发现,实测值略低于仿真值,分析原因为铁心叠压系数取值不准确。

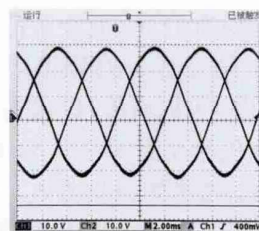


图 16 三相反电势波形图(截图)

电机在最高转速额定负载状态下测试得到的力能指标如表 4 所示(表 4 中,28 匝的样机测试数据是在电源电压升高到 280 V 情况下的测试得出)。

表4 电机最高转速状态

绕组匝数匝	电流 I/A	转矩 $T/(mN \cdot m)$	转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$
25	2.74	445	13 526
26	2.61	442	13 303
27	2.57	443	13 125
28	2.52	440	13 485

从表4.3可看出,只有匝数为25匝的样机,其最高转速可以达到13 500 r/min,匝数为28匝的样机在电源电压增加到280 V时,其转速才勉强达到13 500 r/min。综合考虑,为使电机具有较高的裕度,而25匝的样机在13 526 r/min转速额定转矩状态下,其控制器输入总电流为2.74 A小于3 A,符合设计要求,故最终确定电机的匝数为25匝。

温升测试方案为选用两台规格相同的电机,一个作为电动机,另外一个作为发电机,用电动机拖动发电机转动,发电机输出接到一个散热良好的大功率电阻和一个滑动变阻器串联的电路,使用滑动变阻器的目的是为了通过调节电路电阻,来调节电路上消耗的功率,改变发电机的工作状态,进而调节电动机对发电机提供的负载转矩,使电动机工作在额定状态下,两台电机均安装在体积较大的钢材料实验台上。

电机运转60 min后,位于绕组端部的热敏电阻阻值不再变化,记下此时热敏电阻的阻值,根据阻值查得电机绕组端部的温度为83℃,与计算值相差较小,验证了电机传热计算的正确性。

5 结 语

本文主要通过电机的设计要求和磁路法计算确定电机的关键尺寸参数,然后用有限元仿真软件Ansoft对电机进行仿真分析,验证由磁路法确定的

(上接第30页)

4 结 语

本文基于两相导通星形三相六状态的正弦波永磁无刷直流电动机的相绕组端电压平衡方程,推导了其相绕组电流的解析表达式,仿真计算了计及绕组电感的正弦波永磁无刷直流电动机的稳态特性。比较研究了正弦波永磁无刷直流电动机计及电感电路模型与传统忽略电感电路模型的性能参数计算差异,研究表明绕组电感对正弦波永磁无刷直流电动机的运行性能影响较大,不能忽略。

参考文献

- [1] NEHL T W, DEMERDASH N A. Impact of winding inductance and other parameters on the design and performance of brushless DC motor [J]. IEEE Trans. on Power App. and Syst., 1985, PAS104:

参数的合理性,再通过有限元仿真软件对电机各运行状态的磁场和温度场进行仿真计算。然后再通过仿真对极弧系数和绕组匝数进行优化,选取与设计指标相近的极弧系数和绕组匝数,最后根据优化分析结果,制造了匝数分别为25~28匝的4台样机,并对样机的电磁特性和温度特性进行测试,样机测试结果与仿真计算结果基本吻合,验证了仿真计算的正确性。最后根据实际样机的测试结果,最终确定了电机的绕组匝数为25匝。根据反电势系数计算得出,当电机工作在额定转速下,其线反电势幅值为211 V,额定工作状态下驱动器输入电流为2.545 A < 3 A,且在额定负载情况下,其最高转速可达到13 500 r/min,使电机转速具有一定的裕度。

参考文献

- [1] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机 [M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [3] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [4] 王秀和. 永磁电机 [M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [5] 王琇. 基于场路结合的永磁同步电机分析与优化 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [6] 赵博,张洪亮. 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.
- [7] 王玮. 永磁电机的设计与分析 [D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [8] 胡淑环. 永磁电机热计算研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2009.
- [9] 徐建国. 基于有限元温度与结构分析的电机优化与设计 [D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [10] 李兵,陈雪峰等. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化 [M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

作者简介:李鹏(1989-),男,硕士研究生,研究方向为电机设计。

2206-2213.

- [2] ZHU Z Q. Analytical prediction of dynamic performance characteristics of brushless drive [J]. Electrical Machine and Power System, 1992, 20 (6): 661-678.
- [3] 李鲲鹏,胡虔生,黄允凯. 计及绕组电感的永磁无刷直流电动机电路模型及其分析 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (1): 76-80.
- [4] 余莉,刘合祥. 永磁无刷直流电机电路计算模型及其换相分析 [J]. 微电机, 2010, 43 (10): 6-10.
- [5] 葛新,韩光鲜,王宗培. 无刷直流电动机的实用仿真模型 [J]. 微电机, 2004, 37 (2): 7-8.
- [6] 贺益康,严岚. 永磁无刷直流电机稳态特性的状态空间分析 [J]. 电工技术学报, 2002, 17 (1): 17-22.
- [7] 叶金虎. 现代无刷直流永磁电动机的原理和设计 [M]. 北京:科学出版社, 2007.

作者简介:赵鹏(1985-),男,硕士研究生,工程师,研究方向为新能源并网发电及电力电子技术。