

大力矩、低脉动交流永磁力矩电机设计^{*}

陈 强¹, 王 骞^{1,2}, 徐永向^{1,2}

(1. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550008

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 为满足超精加工等领域对高精度驱动控制系统的需要, 交流永磁力矩电机正逐渐向大力矩、低脉动方向发展, 但国内相关领域的研究相比于国外仍有很大的差距。根据实际需要, 分析研究了大力矩、低脉动交流永磁力矩电机的结构, 并根据技术要求对电机加以设计。最后利用有限元分析方法对提出的交流永磁力矩电动机进行分析, 用以验证所设计的电机在过载能力、定位力矩及波动力矩的抑制等方面的性能。仿真分析结果显示所设计的电机具有优良性能。

关键词: 交流永磁力矩电机; 定位力矩; 波动力矩; 电机设计

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)09-0039-05

Design of Direct Drive AC Permanent Magnet Motor^{*}

CHEN Qiang¹, WANG Qian^{1,2}, XU Yongxiang^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motor, GuiYang 550008, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to meet the needs of high precision drive control system in the field of ultra-precision machining, AC permanent magnet torque motor is developing towards high torque and low ripple, and there is still a big gap between domestic and foreign research. Therefore, according to the actual engineering needs, the structure of large torque, low pulsating AC permanent magnet torque motor was analyzed, and the motor based on the technical requirements was optimized. Finally, the method of finite element analysis was used to analyze the proposed AC permanent magnet torque motor, and verified the design of the motor overload capacity, the performance of cogging torque and the suppression of the ripple torque. The simulation results showed that the designed motor had excellent performance.

Key words: AC permanent magnet torque motor; cogging torque; ripple torque; motor design

0 引 言

对于超精加工、精密测量仪器中需要相关的主轴达到极高的回转精度, 如机床上的摆头和转台。传统的解决方法不仅价格昂贵, 而且很难满足对于精度的需要; 而通过对交流永磁力矩电机的分析可知, 其具有的精度高、结构简单、体积小、布置灵活、免维护等特点, 可以完全解决机床等加工和控制领域对于运动控制系统的响应和控制精度的需要。工业及国防的刚性需求使得交流永磁

力矩电机及其控制系统得到了非常大的发展。

目前, 在火炮驱动中常采用的电机加减速器的方案, 存在空回程, 影响控制精度。采用中空型永磁力矩电机直接驱动, 配合高精度位置传感器和高精度控制器, 能够从根本上解决目前系统随动精度低的问题。国外对于相关领域的研究已处于产品化阶段, 如美国的丹纳赫、德国的 Siemens、日本的 Fanuc 等。通过该项技术的应用, 随动精度可以提高到 0.1 密位 (21.6"), 甚至更高。

本文开展了大力矩、低脉动交流永磁力矩电

^{*} 基金项目: 大力矩、低脉动交流永磁力矩电机及其驱动与控制系统 (JPPT-125-GH-154)

作者简介: 陈 强 (1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为特种电机及风机技术。

机的电磁设计、高力矩密度与高过载能力设计、定位力矩和波动力矩的抑制等方面的研究,解决了力矩电机在大力矩、低脉动方面的关键技术问题。

1 交流永磁力矩电机数学模型

在对永磁力矩电机分析设计前,应先对其数学模型有清楚的认识,这主要是由于数学模型是电机设计的基础,可为以后的电机性能分析提供理论基础。在本文的电机设计过程中,主要关心的是电机的转矩输出能力,以及为满足控制精度的需要,其定位力矩和波动力矩尽可能小。

交流永磁力矩电机本质上是永磁同步电机。电机的交、直流电压方程为式(1)和式(2)。

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \quad (1)$$

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad (2)$$

式中: R_s ——定子电阻;

i_d ——直轴电流;

i_q ——交轴电流;

ψ_f ——转子磁链;

L_d ——直轴电感;

L_q ——交轴电感;

ω ——电机的电角速度。

永磁同步电机的电磁转矩公式:

$$T_m = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: p ——电机的极对数。

从式(3)可以看出,主要由两部分组成,公式右边第一项为永磁体产生的气隙磁场与定子电枢反应磁场相互作用产生的永磁转矩,右边第二项是由电机 d 、 q 轴磁路不对称产生的磁阻转矩。

对于表贴式永磁力矩电机, $L_d = L_q$, 于是式(3)可简化为式(4)。

$$T_m = p\psi_f i_q \quad (4)$$

此时转矩中不包含磁阻转矩,电磁转矩仅与定子电流的交轴分量有关。

电机的力矩平衡方程如式(5)所示。

$$T_m = J \frac{d(\omega/p)}{dt} + R_\Omega \frac{\omega}{p} + T_l \quad (5)$$

式中: J ——电机转动惯量;

R_Ω ——阻尼系数;

T_l ——负载阻力矩。

对于表贴式永磁力矩电机,当定子电流中直轴分量为零时($i_d = 0$),每单位定子电流产生的转矩值最大。

2 电机基本结构分析

根据实际应用的需求,交流永磁力矩电机应具有力矩大、转速低、定位力矩和波动力矩小、力矩系数非线性小、在自然冷却条件下电机温升小于允许值等特点。为实现以上对于交流永磁力矩电机的设计要求,应先对电机的基本结构进行分析。受到应用工况空间的限制,电机应采用内转子径向式磁路结构,电机的内径和外径均较大,而轴向长度小,形成一个薄环形结构。为了提高电机的出力,转子采用多极数。由上述对于电机定位力矩和波动力矩的需要可看出,此方案中宜采用分数槽技术。为改善电势波形的正弦性,合理控制磁路的饱和程度,对磁钢形状进行优化,从而达到抑制波动力矩的目的。通过调整电机的电负荷和磁负荷以及铜损和铁损,保证自然冷却方式下电机的性能。因此合理设计磁路,降低力矩系数的非线性;优化永磁体形状,提高磁场的利用率,可以提高电机的出力。

2.1 电机主要技术要求

表1给出了本文设计的交流永磁力矩电机应满足的主要性能参数。这些参数也是电机设计的主要依据。

表1 性能参数指标

参数名称	参数值
额定转矩/(N·m)	5 000
额定转速/(r·min ⁻¹)	20
力矩过载倍数	2.5

2.2 电机主要尺寸参数的确定

电机定子内径 D_{il} 和电枢长度 L_{eff} 是电机的两个基本尺寸。二者的大小及关系由式(6)确定^[1]:

$$6.1P = D_{il}^2 L_{eff} n A B \alpha \quad (6)$$

式中: P ——电机计算功率;

D_{il} ——电机内径;

L_{eff} ——电枢长度;

n ——额定转速,在本文取为 20 r/min;

A ——电负荷;

B ——气隙磁密;

α ——计算极弧系数。

在电机主要尺寸参数确定过程中,应同时兼顾对于过载点特性的要求。综合考虑电机中各项约束因素后,本文设计分析的电机内径 D_{il} 为 1 020 mm,电枢长度 L_{eff} 为 150 mm。

2.3 高力矩密度与高过载能力的平衡设计

通过对力矩电机的分析可知,高力矩密度和高过载能力是互相矛盾的两个指标。为兼具高力矩密度和高过载能力,应对电机进行合理的电磁设计、结构设计和工艺设计。

为提高电机电力矩密度,首先对电机的机械结构、磁路结构和电路系统进行合理设计,以提高电机的利用率,减小电机的体积。本文采用的分数槽绕组技术,可充分提高基波绕组系数并有效抑制谐波绕组系数,在提高力矩密度的同时能够显著降低转矩波动。

为提高电机的过载能力,必须考虑电枢反应和磁路饱和等因素的影响。通过分析可知随着电枢电流的不断增大,电机磁路的饱和程度不断增加,力矩电机的转矩-电流特性呈现出非线性关系。为了平衡高功率密度和高过载能力,就需要通过电磁场分析计算力矩输出特性及过载能力,分析电机各尺寸、参数对转矩-电流曲线非线性度的影响规律,进而进行调整和优化设计。为此本文给出了几种不同定子齿宽和槽口宽度条件下电机的最大力矩、平均转矩以及波动率的影响,其结果如表 2 所示。

表 2 电机齿宽和槽口宽度对电机转矩特性的影响

齿宽/ mm	槽口宽								
	4 mm			5 mm			6 mm		
	最	平	波	最	平	波	最	平	波
	大	均	动	大	均	动	大	均	动
	力	转	率	力	转	率	力	转	率
	矩/	矩/	%	矩/	矩/	%	矩/	矩/	%
	(N·m)	(N·m)		(N·m)	(N·m)		(N·m)	(N·m)	
15	5371	5260	2.11	5335	5242	1.77	5288	5224	1.22
16	5409	5305	1.96	5377	5294	1.57	5333	5270	1.20
17	5440	5336	1.95	5438	5331	1.91	5347	5290	1.08

定子采用不同齿宽时,电机的转矩-电流曲线结果如图 1 所示。对比分析表 2 和图 1 中不同齿宽和对电机转矩的影响,选择齿宽为 16 mm 的方案,可以很好地平衡力矩密度和过载能力,其在 2.5 倍过载时,非线性度为 5.3%。

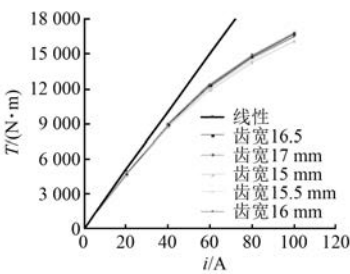


图 1 不同齿宽时 5 000 N·m 力矩电机的力矩-电流曲线

通过以上措施,本文设计的力矩电机在其他主要指标相同的情况下,力矩密度高达 28 421 N·m/m³,远高于国外同类产品。

2.4 定位力矩与波动力矩的抑制

在电机设计和制造过程中需要考虑定位力矩和波动力矩对电机驱动系统控制精度的影响。由于其产生的振动和噪声可能会造成低速状态下爬行和位置精度变差^[2],因此需要采取必要的措施对定位力矩加以抑制,如合理地确定磁路结构、磁极与齿槽的配合等方法。还需要考虑在实际电机中,由于制造、加工工艺或材料特性的偏差引起磁路不对称,所以会引起非理想定位力矩:其分为由定子缺陷导致的定位力矩和由转子缺陷导致的定位力矩。定子缺陷包括铁心偏心、椭圆或硅钢片材料特性不一致等,需要通过提高加工精度、选用一致性好的磁性材料、优化电机的加工制造工艺,来抑制定子缺陷引起的定位力矩。转子缺陷主要由磁钢性能离散引起,需要通过磁钢筛选技术、优化磁钢排列来抑制转子缺陷引起的定位力矩^[3]。

对于波动力矩的抑制,可通过合理控制磁路的饱和程度,优化磁极形状等,改善电势波形来达到。

3 电机性能参数仿真分析

3.1 主要设计参数和计算结果

基于以上设计,采用有限元分析方法^[4]对电机的电磁性能进行了分析。电机的主要电磁设计结果如表 3 所示。

表 3 电机主要尺寸

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电枢铁心外径/mm	1 180	电枢铁心内径/mm	1 020
电枢铁心长度/mm	150	极对数 p	55
定子槽数	120	气隙长度/mm	2

3.2 结果分析

根据上述确定的电机结构参数,利用有限元分析软件对本文设计的交流永磁力矩电机进行分析,其磁力线分布和磁感应强度分布分别如图2和图3所示。

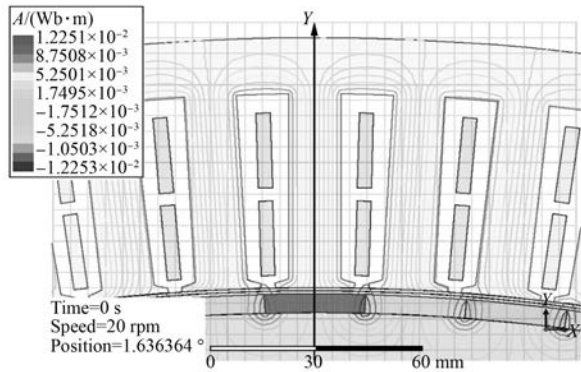


图2 力矩电机的磁力线分布

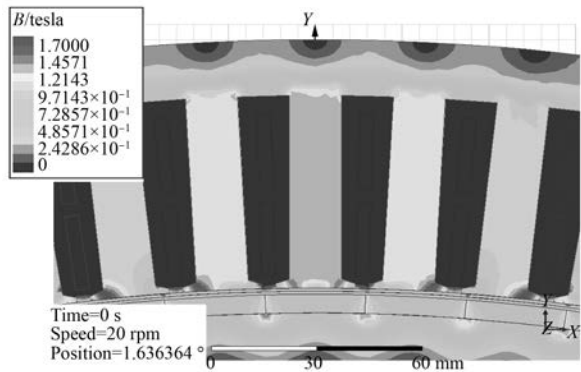


图3 力矩电机的磁感应强度分布图

电机气隙磁密波形如图4所示,经过FFT分析,可知该电机气隙磁密基波分量为0.835 T。

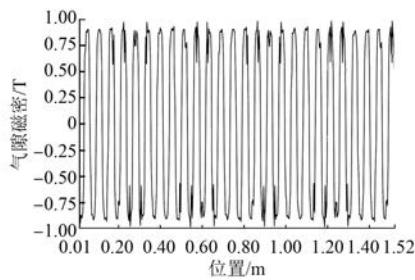


图4 电机气隙磁密波形

电机空载反电势波形计算结果如图5所示。相电势有效值为156 V,线电势有效值为271 V。电机的反电势波形基本为正弦波,有利于减小转矩波动。

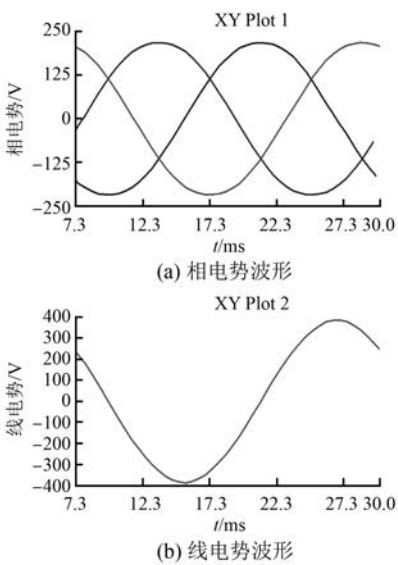


图5 电机空载反电势波形

定位力矩的计算结果如图6所示。电机的齿槽定位力矩计算值满足技术指标中不大于±0.5%的要求。

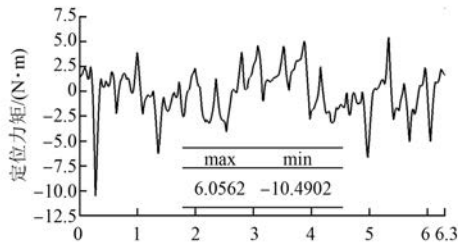


图6 电机齿槽定位力矩波形

电机通以三相对称交轴额定电流, $i_d=0$, 计算出的力矩波形如图7所示,转矩波动低于±2.5%。

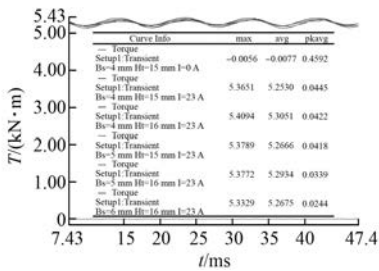


图7 电机通额定电流时的转矩曲线

电机力矩—电流曲线计算结果如图8所示。在2.5倍过载时,非线性度为5.63%。

用数值计算法计算电机额定输出时的温度场

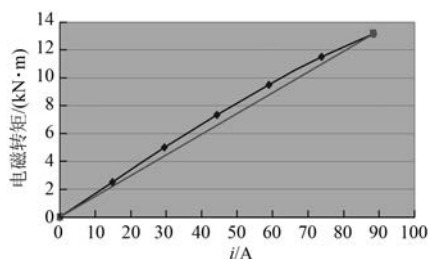


图8 力矩-电流曲线

结果如图9所示,电机运行2 h后,绕组温升94 K,稳态温度120 ℃。

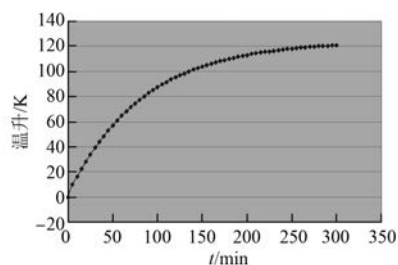


图9 绕组最热点温升-时间曲线

4 结 语

本文利用有限元分析方法对所设计的交流永磁力矩电机的空载特性、转矩线性度、定位力矩和转矩波动进行了仿真分析,并对其电磁设计、高力矩密度与高过载能力设计、定位力矩和波动力矩的抑制展开了研究。从分析结果可知本文设计的交流永磁力矩电机的相关技术指标完全符合技术要求。该电机设计方法,可为同类电机的设计与分析提供一定的指导。

【参考文献】

- [1] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 陈永校,诸自强,应善战.电动机噪声的分析和控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.
- [3] 邹继斌,王铁成,孙桂英,等.永磁力矩电机磁钢径向力的分析与计算[J].哈尔滨工业大学学报,1998(30): 125-128.
- [4] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

收稿日期: 2017-03-12

(上接第38页)

- [3] XIANG T, LIAO X, WONG K. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map[J]. Appl Math Comput, 2007, 190(2): 1637-1645.
- [4] 鲍晓华,群京,倪有源,等.爪极发电机建模及参数优化设计[J].中国电机工程学报,2006,26(21): 138-142.
- [5] KAVRHA A, SHEIKHOLESLAMI R, TALATAHARI S, et al. Chaotic swarming of particles: a new method for size optimization of truss structures[J]. Comput Struct, 2014, 67(1): 136-147.
- [6] COELHO L D S. A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator[J]. Chaos Solit Fract, 2008, 37(5): 1409-1418.
- [7] LIU B, WANG L, JIN Y H, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos Solit Fract, 2005, 25(5): 1261-1271.
- [8] MEESSEN K J, GYSEN B L J, PAULIDES J J H, et al. Halbach permanent magnet shape selection for

slotless tubular actuators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4305-4308.

- [9] 李立毅,唐勇斌,刘家曦,等.多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(15): 69-77.
- [10] COELHO L S, MARIANI V C. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve point effect[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 989-996.
- [11] WANG L, SMITH K. On chaotic simulated annealing[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(4): 716-718.
- [12] TALATAHARI S, FARAHMAND A B, SHEIKHOLESLAMI R, et al. Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2012, 17(3): 1312-1319.

收稿日期: 2016-12-19