

永磁同步力矩电机的多领域联合设计与分析*

李天宇, 代颖, 赵剑飞, 郑江

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 基于 Ansys、MATLAB/Simulink 等仿真软件, 对永磁同步力矩电机的工作特性进行多领域分析。以抑制转矩脉动和振动为目标对电机进行电磁仿真和模态分析; 仿真电机空载最高转速的转子离心应力和转子结构形变; 校核技术指标要求的最高转速工作点的运行可靠性; 基于 Ansys Simplorer 平台对电机控制系统的转矩特性进行联合仿真; 分析电机加工工艺对电机性能的影响。从而从整体系统角度出发, 寻求最优的电机设计方案。

关键词: 永磁同步力矩电机; 电磁场; 动力学特性; 联合仿真

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)02-0097-05

Multi-Physical Field United Design and Analysis of Permanent Magnet Synchronous Torque Motor*

LI Tianyu, DAI Ying, ZHAO Jianfei, ZHENG Jiang

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on Ansys, MATLAB/Simulink simulation software, the working characteristics of a permanent magnet synchronous torque motor on multi-physical field were analyzed. The motor electromagnetic simulation and modal to suppress the torque ripple and vibration; Simulate the centrifugal stress and rotor structure deformation of rotor in highest no load speed was analyzed. Check the technical index requirements of the reliability of the highest speed running point; United design the torque characteristics of motor control system based on Ansys Simplorer platform. Analyze the influences of the processing technology in motor performance, and sought the optimal design scheme of motor from the aspects of overall system.

Key words: permanent magnet synchronous torque motor; electromagnetic field; dynamic characteristic; united design

0 引言

力矩电机是把伺服电机和驱动电机结合而发展成的一种电机类型, 其直接拖动负载运行, 同时受控制信号的直接控制进行转速调节。永磁同步力矩电机因其具有低速大转矩特性, 同时具有响应速度快、机械特性与调节特性好、运行可靠、振动小等优点, 在数控机床、电梯曳引等需要低速平稳运行的场合得到了越来越多的应用^[1-2]。永磁

同步力矩电机通常工作在低速或堵转状态下, 甚至有时几天一转。由于其直接作用于负载, 所以对其转矩的平稳性要求较高, 转矩的波动对系统影响较大。具有高定位精度的永磁同步力矩电机是近些年研究的热点, 对永磁力矩电机进行设计及优化时需要考虑到电机结构的动力学特性。本文基于 Ansys、MATLAB/Simulink 等仿真软件, 对永磁同步力矩电机进行多领域分析, 保证电机系统的可靠运行, 从系统角度出发, 寻求最优的电机

* 基金项目: 国家自然科学基金-青年科学基金项目 (51007050); 台达环境与教育基金会《电力电子科教发展计划》资助项目 (DREG2016015)

作者简介: 李天宇 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机设计和多物理场分析。

代颖 (1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机振动噪声及多物理场分析。(通讯作者)

设计方案。

1 永磁同步力矩电机的电磁场分析和优化

永磁同步力矩电机是低速直驱电机,机械特性软,其输出动力方式为恒转矩输出而不是普通永磁同步电机的恒功率输出,电机一般长期工作在低速甚至堵转状态下,对降低转矩脉动要求较高。

电机转矩脉动的来源主要有两类:(1)电机存在电枢齿槽而产生的定位转矩;(2)电机定子电流中含有谐波分量而导致的转矩脉动^[3]。

定位转矩是永磁电机绕组不通电时永磁体与定子铁心之间相互作用产生的转矩,是永磁体与电枢齿之间作用力的切向分量引起的,即:

$$T_{\text{cog}} = - \frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (1)$$

进行傅里叶展开,可以得到永磁同步力矩电机的齿槽转矩表达式^[4]:

$$T_{\text{cog}} = \frac{\pi z L_a}{4 \mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{\frac{nz}{2p}} \sin n z \alpha \quad (2)$$

式中: z ——电枢槽数;

L_a ——电枢铁心的轴向长度;

R_1 、 R_2 ——电枢外径和定子内径;

n ——使 $nz/2p$ 为整数的最小整数。

根据式(2),可以通过削弱 B_m 及 G_n 的次数及幅值来削弱齿槽转矩。

本文电机选择 16 极、18 槽的极槽配合方案,利用永磁体与电枢齿的作用力切向分量互相补偿的作用削弱齿槽转矩,并通过对电枢槽口尺寸和极弧系数的优化改善电机气隙波形的正弦度。

Ansys 有限元电磁场仿真软件在电磁场方面的仿真准确性已经被证明^[5-7]。基于 Ansys Maxwell 2D 电磁场仿真软件建立电机的 2D 有限元仿真模型如图 1 所示。

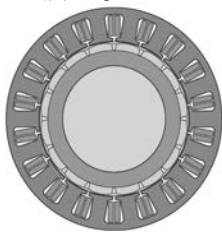


图 1 电磁场的 2D 有限元仿真模型

电机优化前后气隙磁密沿圆周方向分布的波形如图 2 所示。对其进行傅里叶分解后如图 3 所示,优化后电机气隙磁密 3 次谐波得到明显抑制。

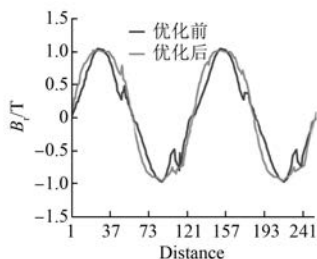


图 2 优化前后气隙磁密波形

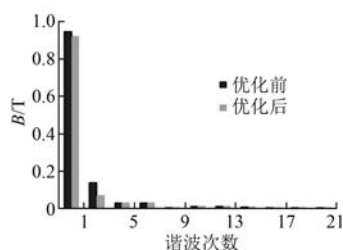


图 3 傅里叶分解优化前后气隙磁密

本文样机长径比较小,绕组端部对电机电磁性能的影响比普通电机大,因此采用 Maxwell 3D 仿真样机的电磁特性。电机 3D 仿真模型和有限元网格剖分如图 4 所示。



图 4 3D 仿真模型

技术指标要求电机的转矩脉动 < 5%, Maxwell 3D 仿真结果表明样机的转矩脉动为 1.92%, 满足技术指标要求;图 5 所示为电机转矩特性曲线的 3D 有限元仿真结果。

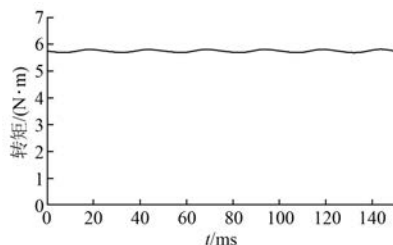


图 5 转矩特性的 3D 有限元仿真结果

2 永磁同步力矩电机的动力学特性

2.1 有限元振动模态分析

本文样机对定位精度要求较高,要求电机结构刚度好,在负载工况下不能存在较大的电磁振动^[8]。有限元模态分析可以考虑到电机模型的不规则性,通过合理的模型建立以及网格剖分可以较为准确地仿真出电机模型的径向模态振型及固有频率,对于电机振动噪声的研究及预测具有重要意义。

建立完全贴近实际的电机模型,有限元网格剖分难度较大且质量不高,对于仿真分析来说可能会导致分析结果变差。为简化分析,本文仅考虑电机振动模态的主体部分——定子铁心。本文样机结构扁平,径向模态更容易激振,建立电机定子铁心的有限元仿真模型,基于 Ansys Workbench 分析电机定子铁心的径向模态,定子铁心模态仿真的材料特性参数如表 1 所示。定子铁心的模态仿真模型及有限元网格剖分如图 6 所示。

表 1 定子铁心材料参数

属性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	剪切模量/ GPa	泊松比
定子铁心	7 650	$G_{xz} = 206$	$G_{xz} = 73$	0.3
		$G_{yz} = 206$	$G_{yz} = 73$	
		$G_{xy} = 150$	$G_{xy} = 80$	

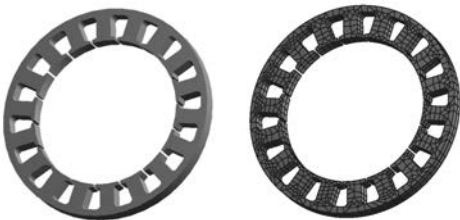


图 6 定子铁心有限元模态仿真模型及网格剖分图

电机定子铁心结构的径向模态振型及固有频率的有限元仿真结果,如图 7 所示。

电机负载工作状态下作用于电机结构的电磁力波频率不能与结构的固有频率接近^[9]。虽然电机定子铁心的低阶径向模态固有频率较低,但本文样机电机负载运行的转速低于 10 r/min,基频低于 1.3 Hz,其电磁力波频率与电机结构最低固有频率也相差较远,因此,不会在负载运行时产生较大电磁振动。

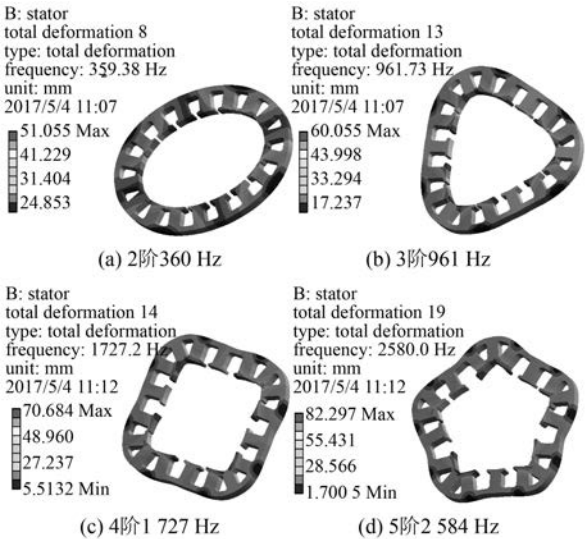


图 7 定子铁心径向模态振型及固有频率

2.2 转子离心力分析

电机高速运行时转子结构承受离心力较大,容易导致薄弱部位损坏,影响电机的运行可靠性和电机的寿命^[10]。技术指标要求样机能够实现在 10 000 r/min 下空载稳定运行。样机采用钕铁硼永磁材料,其抗拉强度明显低于抗压强度,电机在调速范围内运行时离心力大小可能会超出其承受范围,对电磁场产生影响。

本文基于 Ansys 有限元仿真软件,建立转子结构 2D 有限元离心力仿真模型,分析样机运行时转子结构中承受最大离心力的位置,分析最大形变量对电机电磁场和机械可靠性的影响,预测电机在调速范围内离心应力对电磁场和机械性能的影响。

仿真结果表明,电机旋转时转子结构的最大离心力和最大形变量位于永磁体上,不同速度下转子结构承受最大离心力及永磁材料最大形变量如图 8 所示。

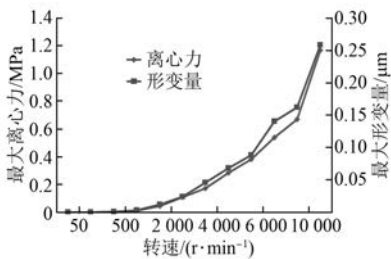


图 8 不同转速下转子结构承受最大离心力及形变量

由仿真结果可知,电机 10 000 r/min 时作用于永磁体的最大离心力为 1.17 MPa,远小于钕铁硼永磁材料的最大抗拉强度 80 MPa^[7];转子结构的最大形变量 0.26 μm ,不会发生塑性变形。因此,电机可以在 10 000 r/min 的转速下能长期可靠运行。

3 电机矢量控制分析及联合仿真

传统电机驱动系统通过齿轮箱或减速器实现对负载力矩的低速驱动,所以安装维护困难、系统的损耗大、控制精度受限。永磁同步力矩电机取消了传动装置,低速直驱动,减少了机械中间环节造成的损耗和误差。目前工业上永磁同步力矩电机主流控制方法为矢量控制^[11]。

矢量控制的基本思想是对电机定子电流矢量的相位和幅值进行控制,通过坐标变换,在转子磁链定向坐标中,用直流机的方法分别控制电磁转

矩与磁链^[12]。

根据永磁同步电机的应用领域不同,电动机电流矢量的控制方式也各不相同,通常可以使用的控制策略主要有: $i_d=0$ 控制、恒磁链控制、最大输出功率控制、弱磁控制、最大转矩电流比控制等。

本文样机采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法。 $i_d=0$ 矢量控制是一种最为简单的电流控制方式,通过控制使直轴电流保持为 0,永磁体不会因去磁电流而产生退磁问题;并且在产生要求转矩的情况下只需要最小的定子电流,降低铜耗,提高效率。

通过电磁场仿真可知电机本体设计引起的转矩脉动为 1.92%,为考虑电机驱动控制系统的非线性特性引起的谐波转矩,本文基于 Ansys Simplorer 平台,建立电机与驱动控制系统的联合仿真模型如图 9 所示。

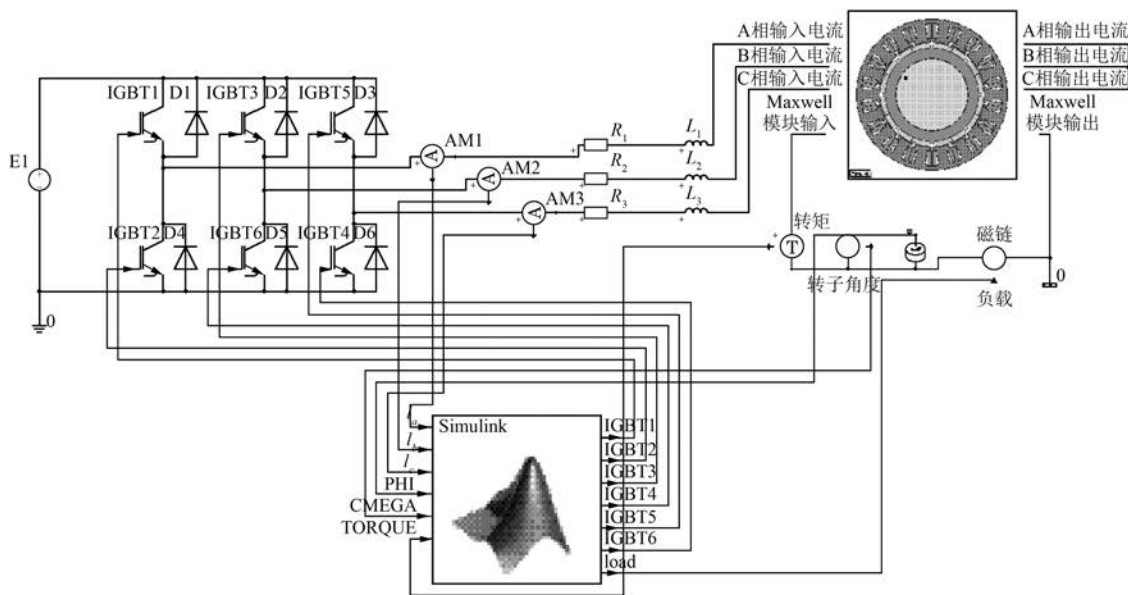


图9 Ansys Simplorer、Maxwell 2D及MATLAB/Simulink联合仿真

电机与控制系统的联合仿真结果如图 10 所示。电机的转矩脉动为 3.9%。对比上文 2D 电磁

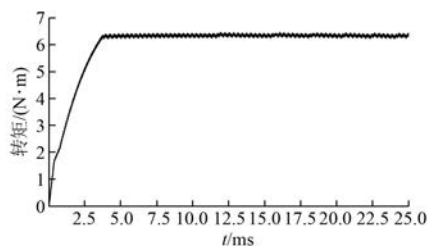


图10 电磁转矩联合仿真结果

场仿真结果可知,控制系统电力电子器件的非线性会导致电机输出电磁转矩的转矩脉动增大。

4 工艺分析

电机的工艺影响到电机制造出来的最终性能。不同的工艺处理对电机性能有不同的影响,使用先进的电机制造工艺可以在完成设计目标的基础上增大电机适用范围及运行可靠性。

为进一步提高电机运行的可靠性和安全性,

电机转子永磁体外表面采用多层无纬带绑扎,无纬带一般分为聚酯树脂浸渍型和环氧树脂浸渍型两种。无纬带是指使用上述材料加工制成的半干状预浸胶带,不导电、不导磁,不会对电机的电磁性能产生影响,并可增强电机转子结构的强度和刚度。定子绕组采用树脂灌封,提高电机定子结构的刚度,避免电机在运行过程中由于机械振动和电磁振动而引起电机定子绕组的松动,同时可以提高绕组绝缘可靠性,延长电机的使用寿命。

5 结 语

本文基于 Ansys、MATLAB/Simulink 仿真软件,对永磁同步力矩电机进行多领域分析。分析如何通过优化转子永磁体和定子开槽抑制电机转矩脉动,通过 Ansys Maxwell 3D 仿真电磁转矩脉动。基于 Ansys Workbench 对定子铁心进行模态仿真,预测结构的固有频率;仿真电机不同转速下转子结构的离心应力和形变量,校核电机空载最高转速运行时的可靠性;基于 Ansys Simplorer 平台对电机与控制系统的电磁性能进行联合仿真,考虑控制系统电子元器件非线性对电机牵引系统转矩脉动的影响。最后,分析介绍了样机采用的加工工艺,进一步提高电机的可靠性。

【参考文献】

- [1] 梁爽.低速永磁力矩电机转矩波动测试方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [2] BOJOI R, LAZZARI M, PROFUMO F, et al. Digital field oriented control for dual three-phase induction motor drives [C] // Industry Applications Conference, 2002 Ias Meeting Conference Record of the IEEE, 2003: 818-825.
- [3] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,2016.

- [4] 张宝振,彭宝营.永磁同步力矩电机转矩波动分析建模研究[J].制造业自动化,2017,39(2): 123-128.
- [5] ZHANG Y J, JING L B, LI C J, et al. Semi-analytical method for air-gap main magnetic field computation of direct drive permanent magnet torque motors [C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, 2011: 1-4.
- [6] LI Y X, WANG T, ZHANG W. Dynamic performance analyze of swing angle torque permanent magnet motor under different structure and winding parameters [C] // IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE, 2015: 1804-1807.
- [7] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速永磁电机转子不同保护措施的程度分析[J].中国电机工程学报, 2013,33(增刊1): 195-202.
- [8] ISLAM M, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses [C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2011: 3399-3405.
- [9] YIM K H, JANG J W, JANG G H, et al. Forced vibration analysis of an IPM motor for electrical vehicles due to magnetic force[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 2981-2984.
- [10] PAN Q, HUANG F, CHEN J, et al. High-speed, low-friction piezoelectric motors based on centrifugal force [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 2158-2167.
- [11] 陈伯时.矢量控制与直接转矩控制的理论基础和应用特色[J].电力电子, 2004(1): 5-9.
- [12] ZHANG Y, XIA B, YANG H. Performance evaluation of an improved model predictive control with field oriented control as a benchmark[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 677-687.

收稿日期: 2017-05-18

(上接第 65 页)

- [12] 夏长亮,郑尧,史婷娜,等.行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J].中国电机工程学报, 2001, 21(2): 25-28, 32.
- [13] 张铁民,刘落实,梁丽英.纵弯复合型直线超声电机振动模态有限元分析[J].中国机械工程, 2006, 17(3): 251-254.

- [14] 钱孝华.双向驻波型直线超声波电机[D].杭州:浙江大学, 2006.
- [15] 石斌,胡敏强,朱壮瑞.粘结层对超声马达定子振动特性的影响[J].中国电机工程学报, 2001, 21(7): 72-77.

收稿日期: 2017-05-09