

# 车用永磁同步电机性能仿真及斜极优化

苗贵银<sup>1</sup>, 冯国胜<sup>1</sup>, 崔博<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 张艳明<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 河北电机股份有限公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 为了降低电机振动, 优化电机性能, 以某物流车用内置式 50 kW 永磁同步电机为例, 分别分析电机在空载和额定负载 2 种工况下的运行特性, 对电机的齿槽转矩、线反电势、输出转矩进行斜极优化, 提高了电机的运行特性, 并对电机矢量控制中的电流控制角进行参数化求解得到最优控制角, 为改进设计提供理论依据。

**关键词:** 电动汽车; 永磁同步电机; 斜极优化; 齿槽转矩; 电磁转矩

**中图分类号:** U469.72; TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2022)01-0086-05

## 0 引言

当今, 发展节能、环保的新能源汽车已成为世界汽车工业技术创新的主要方向和汽车产业可持续发展的必然选择。纯电动汽车及混合动力汽车核心动力所采用的驱动电机主要是永磁同步电机。同时, 永磁同步电机还应用于汽车的电动车门、电动座椅、汽车空调等。因此, 电机的仿真及优化对指导电机的设计极其重要。永磁同步电机具有小尺寸、转速高、功率密度大、形状和尺寸灵活多样等优势<sup>[1]</sup>, 但汽车用永磁同步电机由于其特殊的运行环境, 如频繁地启动、停车、加速、减速以及其他恶劣条件, 使得电机的损耗、振动及噪声成为首要解决的问题<sup>[2]</sup>。

文献[3]以一台工业用永磁同步电机为例, 通过 Ansoft Maxwell 有限元分析软件进行仿真分析和验证, 对电机的电磁性能进行了细致研究。文献[4]以一台电动客车用永磁同步电机为例, 通过 Ansoft Maxwell 有限元分析软件对电机进行了斜极和斜槽研究, 并通过多场耦合分析了电机强度、振动、温度等各方面的性能。上述论文在电磁研究中多采用经验公式寻找最优设计方案, 并进行仿真验证, 都没有采用参数化对其进行优化。

以一台物流车用永磁同步电机为例, 首先从电机的矢量控制出发, 推导出电机的数学模型, 进而找到矢量控制中交直周电流与电机三相激励电流之间的关系, 准确推导出电机三相激励的函数表达式, 采用参数化求解计算出最优电流控制角, 并通过转子参数化斜极优化寻找最优优化方案, 提高电机的整体运行性能。

## 1 永磁同步电机的结构及参数

根据电机结构尺寸, 建立三维模型如图 1 所示, 主要由转轴、转子、定子、绕组、机壳等基本结构组成, 电机为“内置式 V 形布置”结构。通过磁路计算法验证并确定电机的主要参数如表 1 所示。

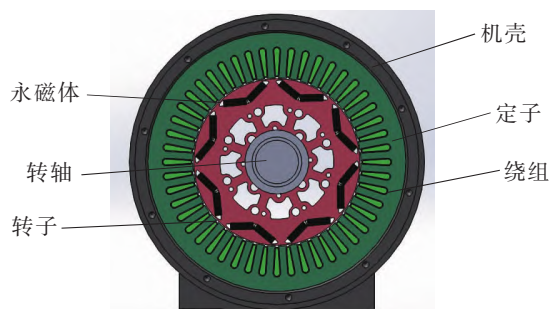


图 1 电机结构

收稿日期: 2021-10-25 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210228

基金项目: 河北省重点研发计划项目(20312206D); 石家庄市科研计划项目(201080191A)

作者简介: 苗贵银(1995—), 硕士研究生, 研究方向为车辆现代设计方法。E-mail: 1519371367@qq.com

苗贵银, 冯国胜, 崔博, 等. 车用永磁同步电机性能仿真及斜极优化[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2022, 35(1): 86-91.

表 1 电机主要参数

| 电机型号        | 额定功率/kW | 峰值功率/kW | 额定转矩/(N·m) | 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 额定电流/A |
|-------------|---------|---------|------------|-----------------------------|--------|
| TZ238XS5085 | 50      | 85      | 170        | 2 800                       | 117    |

## 2 永磁同步电机的数学模型

三相永磁交流同步电机是一个耦合型强,非线性、阶次高的多变量系统,它在三相静止坐标系里的数学模型相当复杂,因此采用坐标变换,按照磁动势和功率相等的原则,把三相交流的绕组等效变换成两相互相垂直的交流绕组或者旋转的两相直流的绕组。在电机分析中通常使用  $dq$  坐标系下的数学模型。

永磁同步电机在  $dq$  坐标系下的数学模型可表示为:

电压方程

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L_q \\ \omega L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $u_d$ 、 $u_q$  为  $dq$  轴电压;  $R$  为绕组电阻;  $\omega$  为转子旋转的电角速度;  $L_d$ 、 $L_q$  为  $dq$  轴电感;  $i_d$ 、 $i_q$  为  $dq$  轴电流;  $\psi_d$ 、 $\psi_q$  为  $dq$  轴磁链;  $\psi_f$  为永磁体基波磁场在定子绕组中产生的磁链。

磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为  $abc$  轴电流;  $\mathbf{C}$  为变换矩阵。

三相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换矩阵  $\mathbf{C}$  为

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\theta$  为转子  $N$  极与  $a$  相轴线( $a$  轴)的夹角。

电磁转矩方程

$$T_{em} = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

式中,  $p$  为极对数。

电机三相绕组得激励为

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2} i_s \sin(2\pi f t + \alpha) \\ i_b = \sqrt{2} i_s \sin(2\pi f t + \alpha + 2\pi/3) \\ i_c = \sqrt{2} i_s \sin(2\pi f t + \alpha - 2\pi/3) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $i_s$  为绕组电流相量;  $f$  为电流激励频率;  $t$  为仿真时间;  $\alpha$  为电流控制角。

空间矢量图如图 2 所示。其中,  $\alpha$  为绕组电流相量  $i_s$  与交轴  $q$  之间的夹角;  $\beta$  为绕组电压相量与交轴之间的夹角。通过数学模型推导出的式(6)可用去电磁仿真中电流的施加,后面也将通过分析求解出最佳电流控制角。

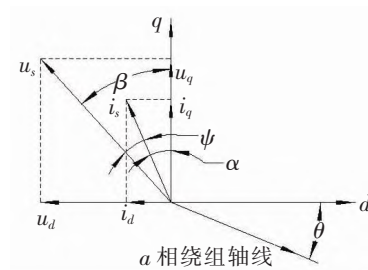


图 2 空间矢量图

### 3 基于 Maxwell 永磁同步电机电磁仿真及优化

#### 3.1 永磁同步电机电磁模型及前期处理

采用 Ansoft Maxwell 2D 和 Auto CAD 联合建模,首先在电磁仿真软件 Maxwell 2D 中建立了电机的电磁有限元模型<sup>[5-6]</sup>,为了减少分析时间,提高计算效率,取 1/8 模型进行电磁分析,对模型进行材料赋予及边界条件设置,如图 3 所示,图中 Master 为主边界条件,Slave 为次边界条件,Vector Potential 为零边界条件。

建立电机电磁仿真模型所需的主要结构尺寸如表 2 所示。定子和转子硅钢片材料为 30WGP1600。永磁体磁钢材料为 N38UH。绕组为单层链式结构,Y 型连接,材料为 Cu。定子槽为梨形槽,结构如图 3 所示。根据电机的机械尺寸,对电机各部分进行网格划分,定子和转子最大单元网格尺寸为 3 mm,永磁体和绕组最大单元网格尺寸为 1 mm,气隙的网格质量对电磁分析极为关键,气隙宽度为 0.9 mm,对气隙进行分 4 层处理,每层网格最大单元尺寸为 0.225 mm,网格划分结果如图 4 所示。

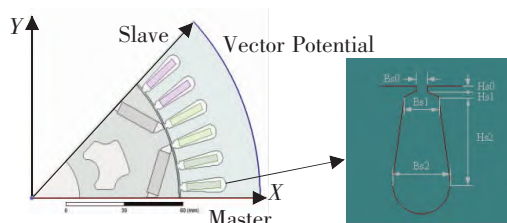


图 3 电磁模型边界设置及定子槽

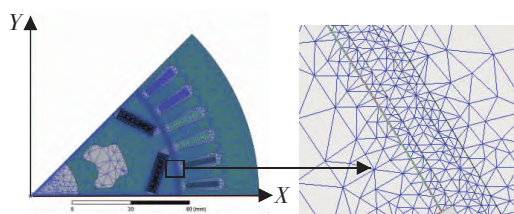


图 4 网格划分结果及气隙局部剖分图

表 2 电机结构尺寸

mm

| 定子内径 | 定子外径 | 气隙宽度 | 转子内径 | 铁芯长度 | Bs0 | Bs1 | Bs2 | Hs0 | Hs1 | Hs2  | 永磁体宽度 | 永磁体厚度 |
|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| 155  | 238  | 0.9  | 50   | 138  | 2.3 | 4   | 7   | 0.8 | 0.5 | 19.5 | 21    | 6     |

#### 3.2 永磁同步电机斜极优化设计

对电机定子进行斜槽优化或对电机转子进行斜极优化是优化电机整体性能非常有效的措施<sup>[7]</sup>。斜槽斜极优化不仅对齿槽转矩有优化作用,对反电动势和输出转矩的脉动也有优化作用,进而可以降低电磁振动。首先求出斜极的角度,再分别对电机进行空载和额定负载分析。文献[8]集中研究了电机的极槽配合,一般来说,斜极或斜槽角度  $\theta_{sk}$  的经验公式为

$$\theta_{sk} = \frac{1}{N_p} \frac{2\pi}{Z} \quad (7)$$

$$N_p = \frac{2p}{\text{GCD}(2p, Z)} \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{60}{n_N p} \quad (9)$$

式中,  $p$  为极对数;  $Z$  为齿槽数;  $N_p$  为齿槽转矩周期数;  $\text{GCD}(2p, Z)$  为取两者最大公约数;  $T$  为电机旋转 1 个电周期的时间;  $n_N$  为额定转速。

通过式(7)和式(8)计算得,最佳斜槽或斜极角度为  $7.5^\circ$ ,齿槽转矩周期数为 1,由式(9)得,电机旋转 1 个电周期的时间为 0.005 4 s,设置仿真周期为 1 个电周期。采用电机转子轴向斜极来优化电机性能,在额定工况下对斜极段数进行参数化求解,观察输出转矩,由图 5 可以看出,转子轴向分 5 段进行斜极优化最佳。斜极工艺如图 6 所示,转子在轴向平均分成 5 组,每组均匀错开一定角度。

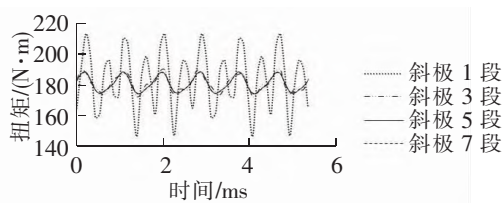


图 5 斜极段数参数化求解图

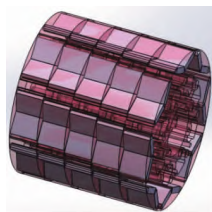


图 6 转子斜极图

### 3.3 空载特性分析

当电机空载运行时,可认为是电机绕组电流为零,永磁体单独提供磁场。在空载情况下,借助 Ansoft Maxwell 软件对电机进行斜极前后空载瞬态计算分析,获得电机各部分磁密、反电势等参数。

电机空载时永磁体单独提供磁场,从图 7 可以看出,电机磁力线从 N 极到 S 极形成一个闭环,磁力线分布均匀合理。从图 8 可以看到电机各部分磁密大小,定子槽口处局部略有饱和现象,其他部位磁密良好。磁力线图 and 磁密云图基本吻合,永磁体设计基本合理。

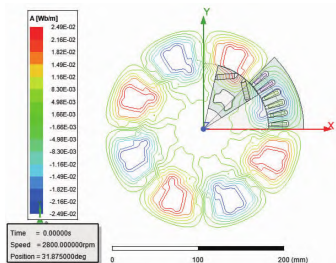


图 7 电机空载磁力线分布图

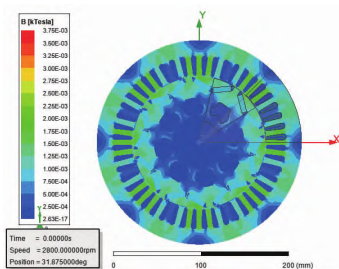


图 8 电机空载磁密云图分布图

电机斜极优化前和斜极优化后齿槽转矩图如图 9、图 10 所示。通过电机斜极优化,可以将齿槽转矩的最大值由  $8.77 \text{ N} \cdot \text{m}$  削弱到  $0.13 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,峰峰值由  $17.52 \text{ N} \cdot \text{m}$  减少到  $0.23 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,有效值由  $5.14 \text{ N} \cdot \text{m}$  减少到  $0.07 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,并削弱高次谐波,使齿槽转矩波形变缓,这对电机的平稳运行和降低振动等方面有改进作用。

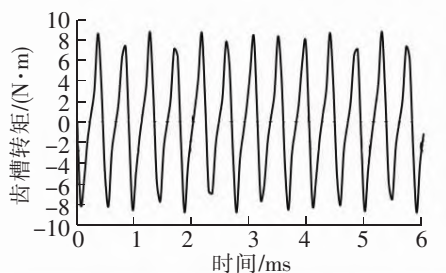


图 9 空载斜极前齿槽转矩

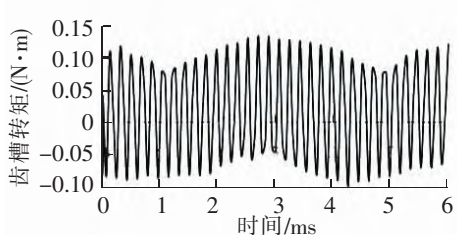


图 10 空载斜极后齿槽转矩

电机斜极优化前后 A、B 两相之间的线反电势如图 11、图 12 所示。斜极可以消除线反电势中的高次谐波,使电机线反电势趋于正弦性,减少电机电磁振动。由图 12 计算得到线反电势有效值为  $250 \text{ V}$ ,由于电机额定线电压为  $380 \text{ V}$ ,且电机连接方式为 Y 型连接,所以电机的额定线电压为  $220 \text{ V}$ ,电机线反电势接近电机线额定电压,因此电机在额定电压运行时效率较高。

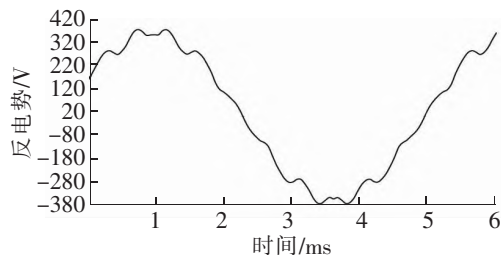


图 11 空载斜极前线反电势

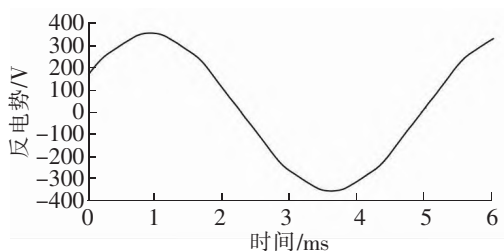


图 12 空载斜极后线反电势

### 3.4 额定负载特性分析

当电机在额定负载运行时,可以认为电机绕组流入额定电流,电机以额定转速转动,绕组激励为式(6),能通过改变电流控制角  $\alpha$  来改变三相电流的大小,进而改变电机的输出特性。

通过对电流控制角  $\alpha$  参数化求解,得到电机输出转矩与电流控制角的关系如图 13 所示。从图 13 可以看出当电流控制角约为  $30^\circ$  时,电机输出最大转矩,随着控制角的不断增大,电机的输出转矩不断减小,当  $\alpha=90^\circ$  时,电机的电流完全变为直轴弱磁电流,此时电机的输出转矩为  $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

电机斜极前后的输出转矩如图 14、图 15 所示。斜极前转矩的平均值为  $183.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、峰峰值为  $65.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、转矩的波动为  $36\%$ ,斜极后转矩的平均值为  $180.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、峰峰值为  $13.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、转矩的波动为  $7\%$ 。斜极后电机转矩平均值虽有些许削弱,但仍满足电机的设计要求,且斜极后电机转矩的波动减缓,具有良好的正弦性。

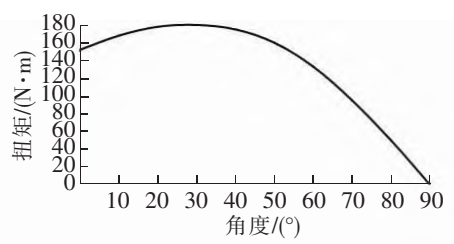


图 13 输出转矩与  $\alpha$  的关系

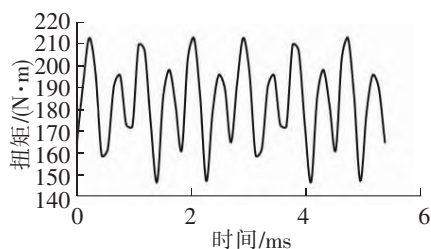


图 14 斜极前输出转矩图

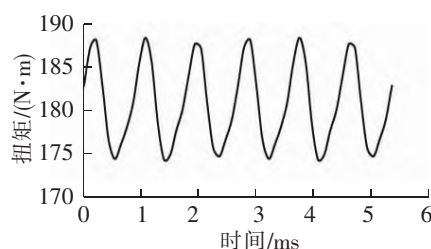


图 15 斜极后输出转矩图

## 4 结论

针对一物流车用永磁同步电机进行建模及电磁仿真,通过分析电机磁场分布可知电机基本结构设计合理;通过参数化求解和斜极经验公式计算得到转子斜极角度为  $7.5^\circ$ ,沿轴线方向分 5 段为最佳优化方案;通过参数化求解得到最佳电流控制角  $\alpha$  为  $30^\circ$ ;通过斜极优化了电机的齿槽转矩、电机反电势、输出电磁转矩等电机性能,改善了电机的设计方案。该优化方案可减少电机前期的电磁振动,可为电机的设计及优化提供参考依据,缩短产品的开发周期,提高设计的准确性。

## 参 考 文 献

- [1]张超,朱建国,韩雪岩,等.高速永磁电机综合设计与分析[J].电机与控制应用,2017,44(9):9-15.
- [2]何洪文,余晓江,孙逢春.电动汽车电机驱动系统动力特性分析[J].中国电机工程学报,2006,26(6):136-140.
- [3]邱岳.基于 ANSOFT 永磁同步电机电磁设计及性能研究[D].大连:大连理工大学,2015.
- [4]王晓杰.电动汽车用永磁同步电机的设计及优化[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [5]权晨龙,冯国胜,郝长生,等.车用永磁同步电机磁热耦合分析[J].石家庄铁道大学学报,2021,34(3):95-97.
- [6]Chen Y, Zhu X, Quan L. Performance analysis of a double-salient permanent-magnet double-rotor motor using electromagnetic thermal coupling method[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 1-5.
- [7]Letelier, Kellent, Summler. Cogging torque reduction in an axial flux PM machine viastator slot displacement and skewing[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2007, 43(3): 685-693.
- [8]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[J].微电机, 2007, 40(12): 72-77, 86.

## Performance Simulation and Skew Pole Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicle

Miao Guiyin<sup>1</sup>, Feng Guosheng<sup>1</sup>, Cui Bo<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>, Zhang Yanming<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Electric Motor Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** In order to reduce the vibration of the motor and optimize the performance of the motor. This research took a logistics vehicle built-in 50 kW permanent magnet synchronous motor as the example, the operation characteristics of the motor were analyzed under no-load and rated load conditions respectively, and the groove torque, line back potential and output torque of the motor were optimized by oblique pole, which improved the operation characteristics of the motor. The current control angle in motor vector control was parameterized to obtain the optimal control angle, which provided a theoretical basis for improving the design.

**Key words:** the electric car; permanent magnet synchronous motor; oblique pole optimization; cogging torque; electromagnetic torque

(上接第 12 页)

## Moving Loads Identification of Continuous Beam Based on Finite Element Method and Data Reconstruction

Hu Shuo<sup>1</sup>, Ren Jianying<sup>1,2</sup>, Zhang Yu<sup>1,2</sup>, Li Junliang<sup>3</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Engineering Training Centre, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Taking the continuous highway bridges as the research object, a moving load identification method based on finite element method and data reconstruction was proposed. The finite element method and the Newmark method were used to write the calculation program of the dynamic responses of the continuous beam under moving loads. The displacement responses of the bridge were obtained. Displacement responses were reconstructed by Chebyshev polynomials. The velocity and acceleration responses were reconstructed by the Newmark method. Then the moving loads were identified by regularization techniques using the reconstructed data. The effects of the loads moving speed, the loads value and the number of the bridge spans on the moving loads identification were studied.

**Key words:** load identification; continuous beam; data reconstruction; finite element method; Chebyshev polynomial; Newmark