

# 电动汽车用双层内置式永磁电机的设计与分析

杨磊, 黄金霖

(安徽机电职业技术学院, 安徽 芜湖 241002)

**摘要:** 永磁电机具有高效、高功率密度、高转矩密度等优点在车用驱动电机中得到广泛的关注。针对现有车用驱动电机的指标, 分析车用永磁电机的工作原理, 并设计一款100 kW 双层内置式车用永磁驱动电机, 利用有限元分析软件建立电机的二维有限元分析模型, 分析电机的空载气隙磁密、反电势及齿槽转矩, 初步验证了设计的合理性; 在此基础上, 计算电机的转矩电流特性、电机过载特性及转速-转矩特性, 结果表明, 所设计的电机的峰值转矩达1 100 N·m, 电机的峰值转速可达9 000 r/min, 弱磁扩速范围达到3倍以上, 满足指标需求。

**关键词:** 电动汽车; 永磁电机; 双层内置式; 齿槽转矩; 峰值转矩

**中图分类号:** TM306      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-1891(2020)01-0067-04

## Design and Analysis of Double-deck Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles

YANG Lei, HUANG Jinlin

(Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu, Anhui 241002, China)

**Abstract:** Permanent magnet motor has the advantages of higher efficiency, higher power density and higher torque density. With respect to indexes of existing driving motors, the working principle of permanent magnet (PM) motor for electric vehicles is analyzed, and a 100 kW double-deck interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) is designed. A 2-D finite element model is built based on ANSYS to calculate and analyze the air-gap flux density, cogging torque and back-EMF; meanwhile, the torque-current characteristics, overload characteristics and torque-speed characteristics are calculated. The results show that the peak torque can achieve 1 100 N·m, the peak speed can achieve 9 000 r/min, the range of weak flux is more than 3 times larger, and all the indexes can meet the needs for motor design.

**Keywords:** electric vehicle; PM motor; double-deck interior PM; cogging torque; peak torque

### 0 引言

随着汽车工业的迅速发展, 环境污染和能源危机已成为当前日益严重的问题。电动汽车由于其低成本、低消耗等优势逐渐代替传统的燃油车辆, 在军车、乘用车及商用车上得到大力推广。类似于发动机于普通燃油车辆, 驱动电机是纯电动汽车的心脏, 其性能优劣直接决定了纯电动车辆的动力性能及寿命, 相比较其他类型的电机, 永磁电机由于其高效率、宽转速运行范围及高功率/转矩密度成为电动汽车驱动电机的优选方案, 国内外各相关专家学者及企业对其进行了大量的理论研究和分析<sup>[1]</sup>。

定子槽数的选择对永磁电机的输出性能产生

较大的影响, 相关文献指出: 分数槽集中绕组具有端部长度短、绕组铜耗小、弱磁范围广等优点, 但其谐波磁场较丰富, 转子的损耗较大; 刘细平等<sup>[2]</sup>发现分数槽分布绕组可有效减小电机的转矩脉动, 可降低电机绕组的端部长度, 减小反电势的谐波; 而采用整数槽分布绕组结构, 电机的磁阻转矩较高、高速弱磁区的转子损耗较小。

相比较定子槽数, 永磁转子的结构对驱动电机的性能产生更加明显的影响, K.Kamiev 比较了传统分数槽集中绕组表贴式和集中绕组内置式“一”字磁钢永磁电机的性能差异, 结果表明: 内置式“一”字磁钢永磁电机过载能力更强, 弱磁扩速区域更宽, 但普通表贴式永磁电机的漏磁更小, 转矩密度

**收稿日期:** 2019-11-12

**基金项目:** 安徽省自然科学研究重点研究项目: HEV用磁通解耦型磁力变速永磁电机的基础理论研究及多场耦合分析(KJ2017A752);

安徽省自然科学研究重点研究项目: 基于TMS320F2812 DSP的电动机微机保护测控系统的研究(KJ2017A755)。

**作者简介:** 杨磊(1980—), 男, 安徽芜湖人, 实验师, 硕士, 研究方向: 自动控制与检测系统。

更高;樊英和谭超<sup>[9]</sup>对比分析了不同转子永磁体结构(一字型、V型和U型等)对电机性能的影响,得出了V型转子结构具有转矩密度高、弱磁性能好等优越的电磁性能优势,但该结构的磁阻转矩利用率有限。如何在合理设计转子永磁体的基础上,提高电机的过载能力和弱磁扩速能力成为相关专家学者研究的重点。

本文在根据相关车厂提供的设计指标,如表1所示。设计一款满足需求的永磁驱动电机,以实现电机的电磁性能满足车厂的需求。

表1 驱动电机的设计指标

参数	数值	参数	数值
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 800	最高转速/(r·min <sup>-1</sup> )	5 000
额定转矩/(N·m)	400	峰值扭矩/(N·m)	1 000
额定功率/kW	100	峰值功率/kW	150
母线电压/V	540	冷却方式	水冷

### 1 车用永磁电机的设计要求

依据普通乘用车辆的动力性能<sup>[4]</sup>,其对驱动电机的需求具体体现在以下2个方面:(1)满足长时间持续转矩和持续功率的需求;(2)峰值扭矩满足爬坡、过坑、启动等恶劣工况的需求,峰值功率满足加速性能的需求,其外特性曲线如图1所示。

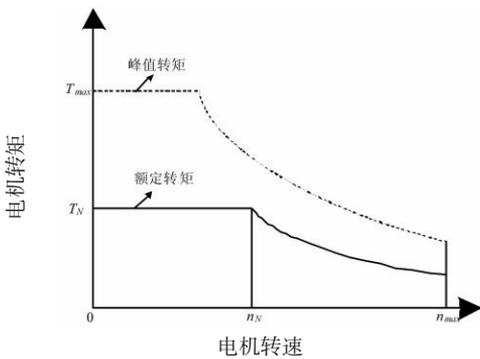


图1 车用电机的外特性曲线

对于车用永磁电机来讲,需要具有较大的过载能力使得电动汽车具有较强的启动和爬坡能力,需要有较宽的弱磁调速能力,以满足电动汽车的高速运行工况需求。因此,本文对驱动电机的峰值扭矩和弱磁扩速区域为设计指标,以满足乘用车辆的实际运行工况。

对于内置式永磁电机,其转子磁路可以分解为直轴和交轴磁路,其稳定运行的电压方程<sup>[9]</sup>为:

$$u_d = -\omega L_q i_q + R_1 i_d, \tag{1}$$

$$u_q = \omega L_d i_d + \omega \psi_f + R_1 i_q, \tag{2}$$

受限于纯电动车辆电池电压和控制器开关管的电流限制,车用永磁驱动电机的输出电压和峰值

电流不能超过其最大的限定值,即:

$$(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_f)^2 = (u_{lim} / \omega)^2, \tag{3}$$

$$i_{lim} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \tag{4}$$

式(1)~(4)中, $L_d$ 、 $L_q$ 分别表示直轴、交轴的电感, $u_d$ 、 $u_q$ 分别表示直轴、交轴的电压, $i_d$ 、 $i_q$ 分别表示直轴、交轴的电流, $\omega$ 、 $R_1$ 分别表示转速和定子电阻, $\psi_f$ 表示合成的转子磁链, $u_{lim}$ 表示电压输出极限, $i_{lim}$ 表示电流输出极限。

在电压和电流限制的条件下,得到车用永磁驱动电机的电压和电流极限圆的运行轨迹(图2)。

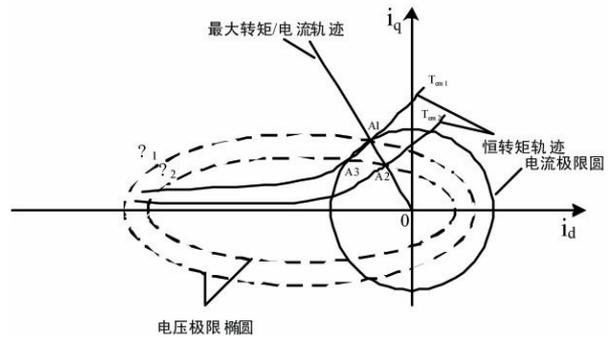


图2 电机电流矢量运行轨迹

由图2可知,车用永磁电机的电流矢量运行轨迹可分为3个阶段:(1)恒转矩区域( $0 \leq \omega \leq \omega_1$ ),从 $\omega=0$ 开始至 $\omega=\omega_1$ 为止,为了充分利用磁阻转矩,控制器通过调节交直轴电流矢量,使其运行于最大转矩电流比(MTPA)轨迹和电流矢量极限圆的交点A,此时电机达到峰值扭矩输出,A点一般为了满足爬坡、启动等恶劣工况的需求。当电机的转子转速进一步提升,定子绕组的输出电压呈线性增加的趋势,此时保证电流矢量不变,电机的转矩保持恒定,因此,电机的输出功率呈线性增加的趋势。当永磁转子的转速升高至图2中的 $\omega_1$ 时,此时电机的线电压接近电源的母线电压,若需要进一步提升电机的运行转速,需要收缩电压运行轨迹,调整交直轴电流矢量,使其进入弱磁扩速区域。(2)弱磁调速恒功率区域( $\omega_1 < \omega \leq \omega_2$ ),由(1)可知,此时电机的电压已达到其极限值 $u_{lim}$ ,但此时仍未满足车辆的高速运行工况的需求,若想进一步提高电机的转速,需要进一步调整交直轴的电流矢量,使其夹角增加,但此时电机的输出转矩呈逐渐减小的趋势,电机进入弱磁调速区域;而为了保持车辆的动力性能,此时驱动电机的输出转矩需要保持稳定,因此,定子电流矢量还需要工作于电流极限圆上,此时定子绕组电压和电流均位于极限圆上;当永磁电机的转子进一步提升时,定子绕组电流矢量从点A逐步往B点运行,为了保持高速后车轮的动力性能,电机需要保

持恒功率运行。(3)最大转矩电压比(MTPV)运行区域( $\omega > \omega_2$ ),此时定子电流矢量从B点逐步进入MTPV轨迹中,调整交直流电流的夹角已经不能满足弱磁的需求,电机的输出转矩直线下降,虽然转子转速线性上升,但转矩的下降比例高于转速上升的比例,不能满足恒功率输出的需求,直到电流矢量运行至C点时,此时交直流电流矢量呈 $90^\circ$ 电角度,产生转矩的交轴电流为0,定子电流全部为弱磁电流,全部用于弱磁。

## 2 电机的设计

### 2.1 电磁模型的初步建立

根据电机的转矩特性方程<sup>[6-7]</sup>,经过多次理论计算和对比可知,同时参考同类电机的等级尺寸方程,定子绕组采用分数槽分布绕组的形式,转子采用双层内置永磁体的结构形式,以提高电机的磁阻转矩,本文所需求的电机定转子结构参数如表2所示。

表2 驱动电机的尺寸参数

参数	数值	参数	数值
极对数	6	定子槽数	72
相数	3	定子外径/mm	270
轴向长度/mm	200	气隙长度/mm	1
绕组结构	单层	跨距/个	3
转子内径/mm	250	定子槽型	圆底槽

为了进一步验证电机的性能,利用ANSYS有限元软件建立电机的二维有限元分析模型,为了削弱电机气隙磁场的高次谐波,采用短距绕组的结构,电机的二维有限元分析模型<sup>[8]</sup>如图3所示。

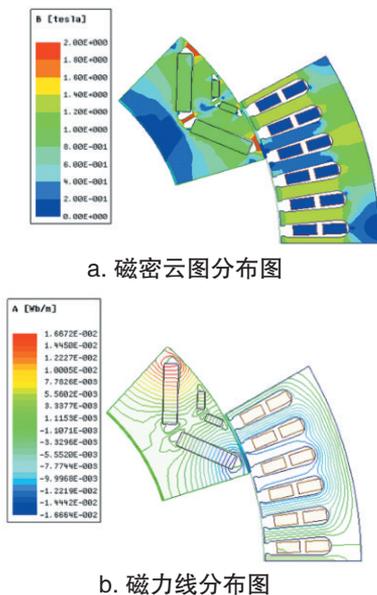


图3 电机空载云图及磁力线分布图

为了缩短开发的时间,选用电机的1/12模型进行仿真分析,电机的空载磁密云图和磁力线分布图如图4所示。由图4可知,电机的轭部磁密大约为1.2 T,齿部磁密大约1.5 T,磁力线分布合理,说明电机的转子结构设计合理,转子隔磁桥部分的漏磁较大,这是转子隔磁桥的漏磁产生。

### 2.2 空载磁场<sup>[9]</sup>分析

电机的空载气隙磁密波形及傅立叶变化曲线如图4所示。由图4可知,电机的空载磁密可达0.8 T,较高的气隙磁密可以进一步提升电机的功率/转矩密度。

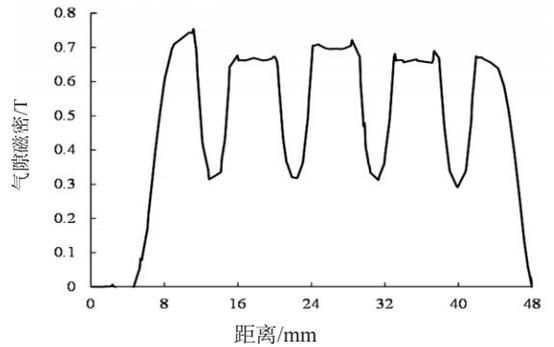


图4 电机的空载气隙磁密波形图

齿槽转矩是指电机的定子绕组不存在电流时,气隙磁场与定子槽口由于能量的变化产生的转矩,此转矩不存于异步电机和电励磁同步电机中,是永磁同步电机所固有的属性。齿槽转矩的大小影响电机的脉动转矩大小,进而影响电机的振动和噪声,较大的齿槽转矩会产生较大的噪声,不适用于车用永磁驱动电机。为了精确计算电机的齿槽转矩,对气隙部分进行精密剖分,得到本文所设计的车用永磁电机的齿槽转矩(图5)。由图5可知,本文所设计电机的齿槽转矩幅值大约为 $7.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,低于额定转矩的10%,设计合理。

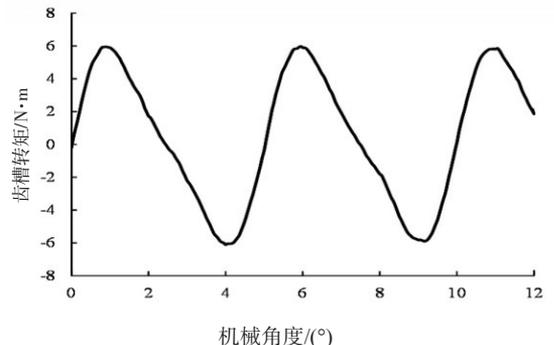
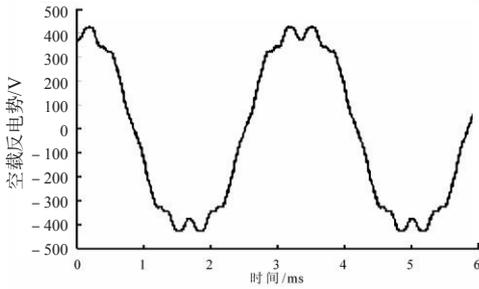


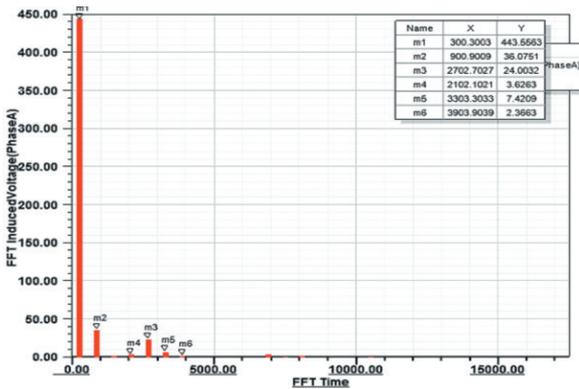
图5 电机的齿槽转矩波形图

电机运行于额定转速时,空载反电势波形图如图6所示。由图6可知,电机在额定转速 $3000 \text{ r/min}$ 时,电机的空载反电势基波幅值大约为 $443 \text{ V}$ ,空载

反电势的谐波主要包含 3 次和 9 次谐波,其 THD 含量大约为 15%,满足驱动电机的设计需求。



a. 空载反电势



b. 空载反电势谐波分析  
图 6 空载反电势波形图

### 2.3 电机的负载特性<sup>[10]</sup>分析

为了满足整车系统爬坡性能的需求,电机的转矩电流曲线如图 7 所示。由图 7 可知,电机的转矩电流比大约为 2.86,当相电流为 400 A 时,电机可达到的峰值扭矩大约为 650 N·m,此时电机的电流密度大约 23 A/mm<sup>2</sup>。

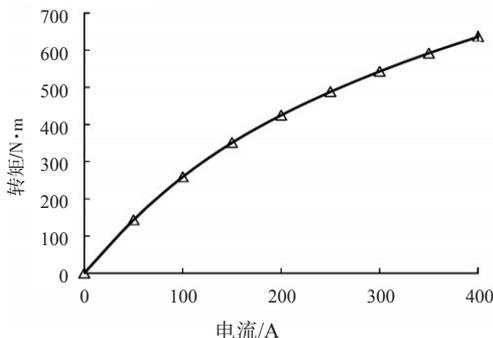


图 7 电机转矩特性曲线

为了进一步研究电机的过载能力,不同电流下的转矩随电流角的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,随着电流角度的增加,电机的电磁转矩呈先减小后增大的趋势,电机的峰值扭矩达到 1 100 N·m 左右。而随着电流的增大,产生峰值扭矩所对应的电流角也呈增大的趋势,该电机的电磁转矩中有较

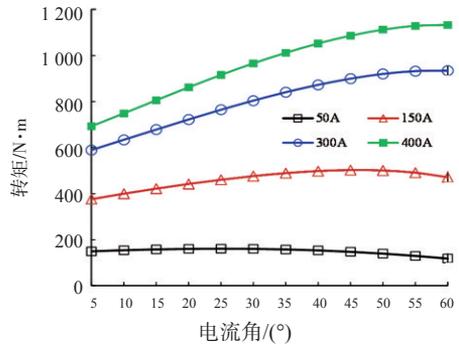


图 8 MTPA 转矩特性

大的磁阻转矩,电机的弱磁扩速能力较强,进一步可知,采用 MTPA 控制策略可以进一步提高电机的过载能力。

为了满足车辆驱动系统运行工况的需求,在母线电压为 540 V 的条件下,电机的外特性曲线如图 9 所示。由图 9 可知,在直流侧母线电压确定的条件下,电机的额定转矩大约为 2 400 r/min,额定转矩大约为 420 N·m,此时电机的相电流有效值大约为 240 A。电机可达到最大转速大约为 9 000 r/min,具有较宽的弱磁范围。

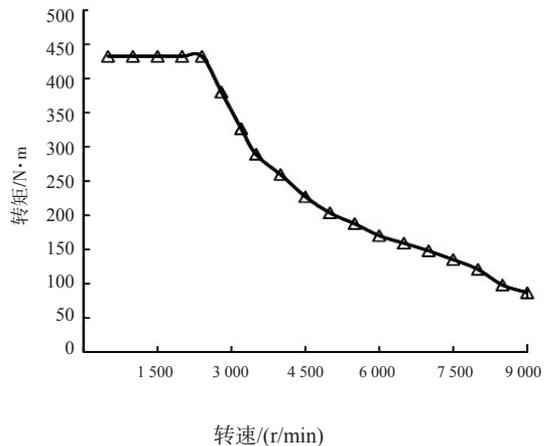


图 9 电机外特性曲线

### 3 结论

本文提出一种新型双层内置式永磁车用驱动电机,分析电机的工作原理,建立电机的有限元分析模型,分析电机的电磁特性<sup>[11]</sup>,得到以下结论:

- 1)电机的空载气隙磁密较高、齿槽转矩较低,满足车用高功率密度电机的需求。
- 2)电机的峰值扭矩可达 1 100N·m,具有较强的过载能力,且电磁转矩中磁阻转矩的占比较高。
- 3)电机的弱磁扩速能力可达 3 倍以上,满足车用永磁电机的高速工况需求。

述基础上继续加强软件工程课程思政案例库的建设,并认真总结教学方法和考核方式等相关经验,在全院示范推广,打造我院课程思政建设的品牌示范课程。

#### 参考文献:

- [1] 张丽,张克新.“大思政”教育下高校心理健康教育课程构建[J].内蒙古教育,2018(4):31-32.
- [2] 刘秀清,曲金玉,邹荣.“大思政”教育背景下汽车文化课程思政改革[J].大学教育,2019(2):90-92.
- [3] 顾晓英.创新思政课程 培育合格人才[J].思想政治工作研究,2017(1):23-24.
- [4] 田鸿芬,付洪.课程思政:高校专业课教学融入思想政治教育的实践路径[J].未来与发展,2018,42(4):99-103.
- [5] 王涵.高校专业课程思政教学改革与反思[J].管理观察,2017(30):138-140+143.
- [6] 陆道坤.课程思政推行中若干核心问题及解决思路:基于专业课程思政的探讨[J].思想理论教育,2018(3):64-69.
- [7] 余江涛,王文起,徐晏清.专业教师实践“课程思政”的逻辑及其要领:以理工科课程为例[J].学校党建与思想教育,2018(1):64-66.
- [8] 黄复贤,邵丽丽.计算机类专业课程思政的探索与研究[J].菏泽学院学报,2019,41(3):46-50.
- [9] 贺利坚.一种融入课程思政的理工类专业课教学设计方法[J].计算机教育,2019(11):7-10+15.

(责任编辑:蒋召雪)

(上接第70页)

#### 参考文献:

- [1] 抄佩佩,高金燕,杨洋,等.新能源汽车国家发展战略研究[J].中国工程科学,2016,18(4):69-75.
- [2] 刘细平,易靓,刁艳美,等.磁齿轮传动永磁同步风力发电机分析[J].微特电机,2013,41(7):34-37.
- [3] KAMIEV K, MONTONEN J, RAGAVENDRA M P, et al. Design principles of permanent magnet synchronous machines for parallel hybrid or traction applications[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(11):4881-4890.
- [4] 王晓远,高鹏,赵玉双.电动汽车用高功率密度电机关键技术[J].电工技术学报,2015,30(6):53.
- [5] 符荣,窦满峰.电动汽车驱动用内置式永磁同步电机直交轴电感参数计算与实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11):30.
- [6] YANG Y, CASTANO S, YANG R. Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications[J].IEEE Transactions on Transportation Electrification,2017,99(1):101-109.
- [7] YOSHINORI S, SHIGEAKI I, TAKAHITO O, et al. Development of high response motor and inverter system for the Nissan LEAF Electric Vehicle[R].SAE Technical Paper,2011,1:1-10.
- [8] 张岳,曹文平,JOHN.电动车用内置式永磁电机(PMSM)设计[J].电工技术学报,2015,30(14):108.
- [9] 樊英,谭超.内置式交替极永磁同步电机性能及机理研究[J].电工技术学报,2018,33(11):2414-2422.
- [10] 刘铭传,邹继明,胡建辉.表贴式永磁同步电动机转矩特性分析[J].微电机,2016,49(7):6-8.
- [11] 鲍晓华,吴长江,胡云鹏,等.一种优化表插式永磁电机性能的方法[J].电工技术学报,2018,33(2):238-244.

(责任编辑:蒋召雪)

(上接第101页)

- [3] 时武略.高职计算机软件专业现代学徒制教育模式及校企合作模式的探索与研究[J].2016(18):50-51.
- [4] 张献奇.高职种子与生产经营专业现代学徒制人才培养模式创新与实践[J].中国职业技术教育,2018(28):81-84.
- [5] 王天成,李晓琳,马利耕,等.高职土建类专业现代学徒制人才培养模式改革[J].哈尔滨职业技术学院学报,2018(6):92-94.
- [6] 贾文胜.英国现代学徒制运行机制研究[J].中国职业技术教育,2018(24):74-79.
- [7] 张瑶祥,何杨勇.我国职业教育现代学徒制构建中的关键问题分析[J].中国高教研究,2018(7):100-103.
- [8] 赵鹏飞.现代学徒制人才培养的实践与认识[J].中国职业技术教育,2014(21):150-154.

(责任编辑:蒋召雪)