

一种用于电动自行车的高性能开关磁阻电机系统

花 为 华 浩 赵 桂 书 程 明

(东南大学电气工程学院, 南京, 210096)

摘要:开关磁阻电机(Switched reluctance machine, SRM)凭借结构简单、可靠性高、起动转矩大、起动电流小等内在优势,正得到越来越广泛的关注。另一方面,随着能源危机与环境问题的加剧,采用电能作为动力的交通工具是各国的研究热点。而在中国,研究适合国情,且具有高性价比的纯电动自行车具有巨大的现实意义与示范价值。本文研究了一种应用于电动自行车的三相 12/16 开关磁阻轮毂电机系统,经过理论分析确定电机结构,进一步利用有限元软件完成样机设计,详细叙述了电机的设计方法,讨论了绕组方案对电机性能的影响,最终试制了样机。利用基于 ARM 芯片制作的专用控制器完成了对该电机性能的初步验证。

关键词:开关磁阻电机;有限元分析;绕组结构;电动自行车

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)01-0037-07

High-Performance Switched Reluctance Machine for Electric Bicycle

Hua Wei, Hua Hao, Zhao Guishu, Cheng Ming

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: The switched reluctance machine (SRM) has attracted increasing attentions in recent years due to its inherent simplicity, robustness, reliability and high starting torque. Meanwhile, with the aggravation of the energy dilemma and environment contamination, the research on electric vehicles is becoming the focus in a large number of counties. In China, the study on electric bicycle, which possesses high performance-price ratio and suits characteristic conditions, absolutely contains remarkable values. Here, an in-wheel three-phase 12/16 SRM-based drive system is investigated for electric bicycle. Firstly, the structure of the SRM is discussed and the prototype is designed based on finite element analysis. Then, the detailed design process of SRM is described. Also, the influence of winding configuration on the electromagnetic performance is discussed. Finally, a 350 W prototype is manufactured and the experimental test is conducted based on an ARM-based controller. The measured results verify the performance of the SRM.

Key words: switched reluctance machine (SRM); finite element analysis; winding configuration; electric bicycle

随着环境问题和能源问题的日益严峻,世界各国正大力推进清洁能源技术的开发与应用。其中,电能作为最高效可靠的二次能源,在当前科研领域

中占有重要地位。传统内燃机汽车使用石油作为基本能源,在车辆运行时会产生大量污染物,且噪声较大、效率不高。电动汽车采用电能作为动力

收稿日期: 2013-10-18; **修订日期:** 2013-12-16

作者简介: 花为,男,研究员,博士生导师,1978年4月生;研究方向:新型电机系统在可再生能源和电动汽车领域的基础理论与关键技术;研究成果:发表中英文学术论文 125 篇,被授权专利 20 个,主持国家自然科学基金 3 项(包括优秀项目 1 项),航空科学基金 1 项,江苏省产学研项目 1 项,入选“华英青年学者”,江苏省六大人才高峰,江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人,江苏省 333 人才工程等。

通信作者: 花为, E-mail: huawei1978@seu.edu.cn.

源,以高性能驱动电机作为能量转换装置,相比传统内燃机,其效率更高、舒适性更好,而且在车辆运行时可以实现零排放,有明显的环保价值。世界各国正投入大量资源用于电动汽车的开发研制,期望可以抢占汽车产业新变革的制高点^[1-3]。

在中国,电动自行车凭借其方便实用的特点拥有巨大的产销量,在普通居民的日常生活中占有重要地位。一款高效可靠、物美价廉的电动自行车产品将有很大的应用价值。而驱动电机系统作为电动自行车的核心部件,对整车的性能有决定性影响。目前,在电动自行车中使用最为广泛的是无刷直流永磁电机,电机设计为低速大转矩结构,可以省去繁琐的机械减速装置,实现直驱方式工作。无刷直流永磁电机不需要电刷和换向器,运行寿命长,且利用永磁体充当励磁源,功率密度和效率较高。但是,无刷直流永磁电机受到永磁材料的影响和限制,成本较高,高速弱磁能力较弱,而且永磁体面临高温和振动退磁的风险,在电动自行车这种可靠性要求高、工作环境较恶劣的应用场合中受到明显制约。

开关磁阻电机(Switched reluctance machine, SRM)作为一种新型电机类型,其定、转子为双凸极结构,且定、转子铁心上分布有数量不同的凸极齿,定子每相绕组由集中式线圈串联、并联或者混联组成,转子上既没有绕组也没有永磁体,结构非常简单,特别适用于高速、高温和恶劣环境场合。同时,其具有串激特性,过载能力强,依靠磁阻转矩工作,起动电流小、起动转矩大,整机没有永磁体,且该电机相间耦合少,互感很小,可靠性高,容错能力强。正是因为具备上述优势,开关磁阻电机驱动系统具有成为下一代主流驱动电机系统的巨大潜力。但目前,对于将开关磁阻电机应用于电动自行车的研究较少,市场上也并未见到采用开关磁阻电机的电动自行车产品^[4-5],实际上,将开关磁阻电机应用于电动自行车,可以充分发挥其起动能力强、可靠性高、结构简单、成本较低的优势,具有良好的理论意义与实践价值。

本文将较为系统地介绍电动自行车用开关磁阻电机系统的设计过程。首先,依据相关工况要求,比较并确定电机的齿槽数和基本结构。其次,对电机展开优化,在优化过程中,提出针对开关磁阻电机的优化原则和优化步骤,对于开关磁阻电机的设计工作有较好的指导意义。进而,分析电机绕组结构对性能的影响,确定电机尺寸结构。之后,利用场路耦合仿真软件完成整个电机驱动系统的

系统级仿真,验证电机稳态性能。最终,试制实验样机并基于所搭建的实验平台完成初步测试。

1 电机结构

需要研制的开关磁阻轮毂结构电机将直接安装于电动自行车的车轮上,采用外转子方式让转动的转子直接驱动车辆运行。电机的具体安装尺寸和额定工况如表1所示,铁心材料使用冷轧DW465-50硅钢片。另外,考虑到加工工艺问题,设计气隙单边长度为0.5 mm。实际上,较短的气隙长度有利于提高电机气隙磁密,可以增大电机的出力和效率。而另一方面,较长的气隙有利于削弱电机径向磁拉力,抑制电机的振动和噪声^[6]。

表1 开关磁阻电机主要设计参数

Tab. 1 Key specifications of SRM

功率/ W	额定转速/ (r · min ⁻¹)	额定电压/ V	外径/ mm	轴长/ mm
350	500	48	205	30

首先考虑电机的相数。SRM相数越少,控制器所需要的开关管和相应的驱动电路则越少,成本较低;然而,相数少也会造成每相绕组分担的功率负荷较大,使该相控制回路所需功率器件的容量较大,而且某一相绕组发生故障对系统的影响也更明显,不利于提高驱动系统的可靠性和容错性。因此,综合上述考虑,本方案最终选用最常见的三相结构。实际上,传统电动自行车驱动用无刷直流电机大多采用三相结构,这也有利于两者的比较研究。

确定相数后,需要进一步确定该SRM的定转子齿槽数。一般而言,SRM槽数越多,可以增加冲程数,有利于降低转矩脉动。然而,槽数多也会相应地提高电频率,增加功率器件的开关损耗和本体铁耗。此外,过多的齿槽数会减少电机槽面积,使导体数量减少,同时增加了绕组下线工作量。

综合考虑后,使用常见的三相定子12槽/转子8极结构,利用有限元软件建立该电机的二维模型如图1(a)所示。可以发现,由于外转子结构,转子齿处的直径较大,当转子极数较少时,其极弧宽度较大。而为了提高效率和材料利用率,SRM的定子极弧应与转子极弧的大小接近。由于该电机采用内定子结构,且定子齿数较多,会造成槽面积较小。另一方面,当定子极弧较大时(图1(a))所示可以发现,一个转子极会同时与两个定子齿有正对部分,使绕组互感大大增加,且多相循环导通时会产生负转矩。

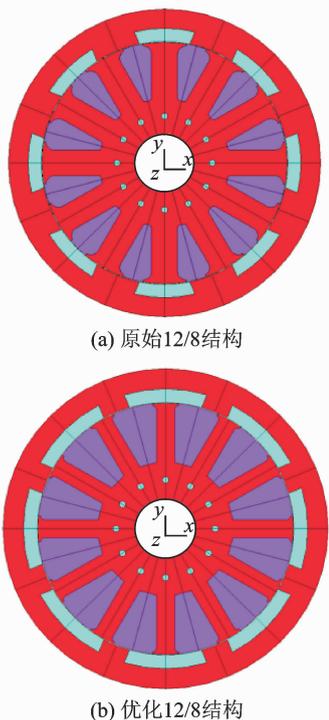


图 1 三相 12/8 结构外转子电机
Fig. 1 Three-phase 12/8 outer-rotor SRM

对上述电机进行定转子极弧的优化,设计槽满率为 0.49,向导体中通入电流密度为 5 A/mm^2 的恒定电流,观察半个电周期内的电磁转矩情况,从而得到一个最优的定转子极弧参数。此时,电机尺寸如图 1(b)所示,其在半个电周期内的转矩如图 2 所示。可见,由于该外转子电机转子极的距离较大,转矩波形中只有较窄的范围内有较大的转矩,即有效转矩区较小。此外,从图 3 所示的电机通电相与相应转子正对位置的磁密云图可发现,由于定转子的设计极弧较小,使电机的定子齿宽减小,造成整个定子齿部非常容易饱和,图中所示整个定子齿部磁密幅值已超过 1.77 T ,饱和严重。

因此,该外转子 SRM 采用定子 12 槽/转子 8 极结构很难得到较好的电磁性能。考虑采用转子极

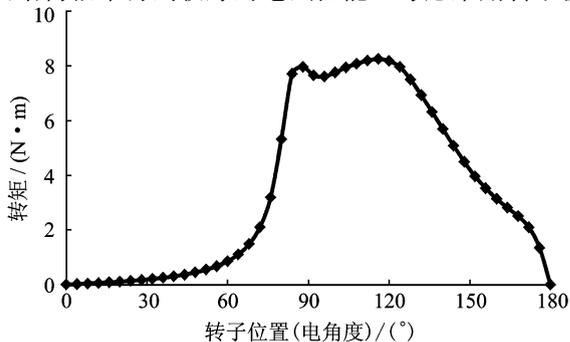


图 2 优化 12/8 结构电机的每相电磁转矩

Fig. 2 Phase electromagnetic torque of optimal 12/8 SRM

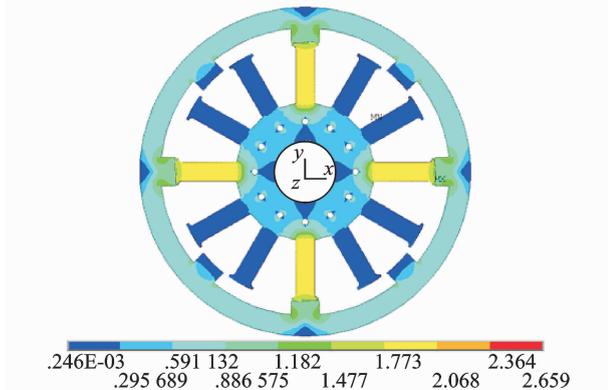


图 3 优化 12/8 电机在对齐位置的磁密云图

Fig. 3 Flux distribution of optimal 12/8 SRM at aligned position

数多于定子极数的结构,除去两相邻定子齿绕制同一相绕组或者一极多齿等非常规结构,最常见的方案是定子 12 槽/转子 16 极结构。对于此结构电机,冲程角为 7.5° ,一个电周期对应 22.5° 机械角度,该电机一个机械循环内有 48 个冲程,转矩脉动可以明显减小。在保证凸极率的情况下,电磁转矩可以超过转子 8 极结构,此外,考虑到该电机的额定转速为 500 r/min ,即使增大转子极数后电频率也只有 133 Hz ,不会使铁耗和开关损耗过大。

2 12/16 结构的优化

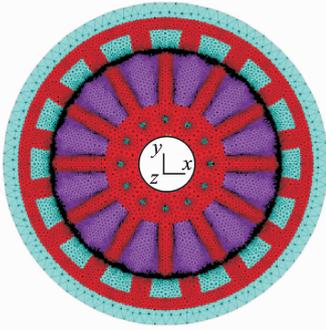
对于该三相外转子定子 12 槽/转子 16 极 SRM,有多个参数需要优化,包括:裂比(外转子内径与外径比值)、转子极弧、定子极弧、转子齿高、定子齿高等。此外,考虑到内定子结构,定子槽为开口槽,不利于绕组固定,故在定子齿尖增加极靴结构,既可以抑制齿尖饱和,也方便嵌入环氧树脂板以固定绕组^[7]。

基于有限元软件建立电机的原始尺寸模型,其整体剖分如图 4(a)所示,定子极靴与气隙局部剖分如图 4(b)所示。

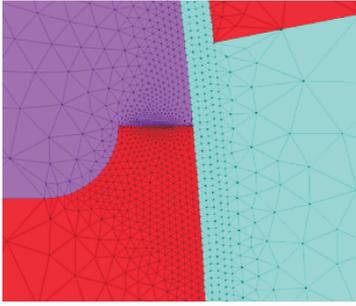
在优化过程中,发现定转子齿高对电机输出转矩的影响有限,即电机性能对这两个参数的敏感度较低。在不发生过饱和的情况下,定子齿高较大,有利于增大定子槽面积,以放置更多的线圈;在保证凸极率的情况下,转子齿较短,可以提高裂比,减小转子体积,降低转动惯量。

经过局部优化,确定定子齿高与定子外径的比值为 0.473、转子轭厚与转子极矩的比值为 0.273,此时电机有最佳的输出特性。

进一步开展对电机裂比、定转子齿极弧的优



(a) 12/16结构电机的全局剖分图



(b) 12/16结构电机的气隙局部剖分图

图4 三相12/16结构电机剖分图

Fig. 4 Meshed elements of three-phase 12/16 SRM

化。首先,在全电周期内固定给一相绕组通电,加载铜导体电流密度 5 A/mm^2 ,则输出电磁转矩及单个定子绕组线圈磁通波形见图5所示。可见,随着裂比的增加,输出转矩和磁通都逐渐增大。不同裂比下电机在一个周期内的平均输出转矩和相磁通如图5所示,可见随着裂比的增大,输出转矩会一直增大。实际上,随着裂比增大,定子槽面积增大,可以加载电流的槽面积变大,使激磁磁动势提高;但另一方面,裂比增加,转子的齿高相对减小,电机凸极率降低,造成电机的最大最小电感比值降低。因此,这种情况下转矩增大是依靠增加电流实现的,也就是说,电机本体的出力能力并不一定得到增加,而是以增大铜耗、损失效率为代价。

单纯看输出转矩评价电机的性能是不合适的,需要综合考虑实际电感变化率、效率、振动噪声等

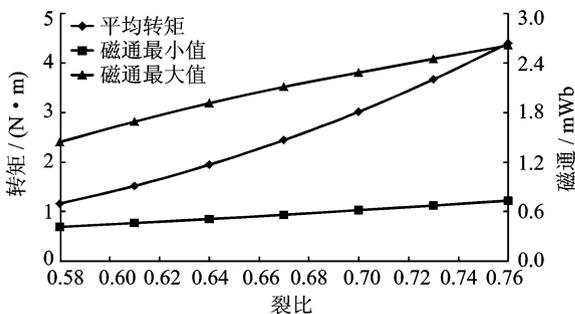
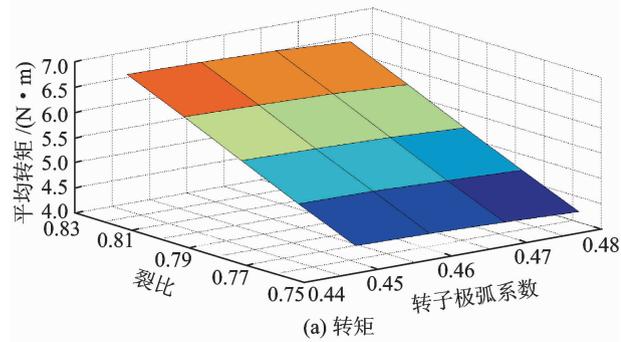


图5 不同裂比对SRM电机性能的影响

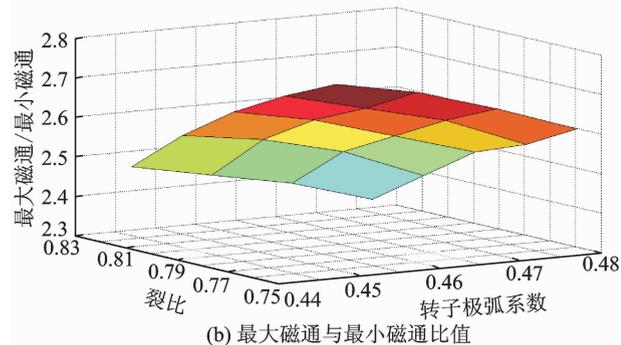
Fig. 5 Influence of split ratio on SRM

影响。继续增大电机裂比,输出转矩可以继续提高,但是此时电机转子已经非常薄,结构明显不合适,故需要同时考虑电感情况,选择一个适中的参数。在定子齿尖上加上极靴结构,对裂比和定子极弧作双参数优化,结果如图6所示。图6(a)是每组参数的电机模型在半个电周期的平均输出转矩。图6(b)给出了每组参数下电机最大磁通(转子对齐位置)与相最小磁通(非对齐位置)的比值,其可以表征该电机模型的凸极率。若电机凸极率越大,则其电感变化率越大,单位电流的输出转矩越大,同时效率和材料利用率较高。图6(c)为每组参数下电机平均输出转矩与通入电流平方的比值,其可以进一步表征电机本体的出力能力。

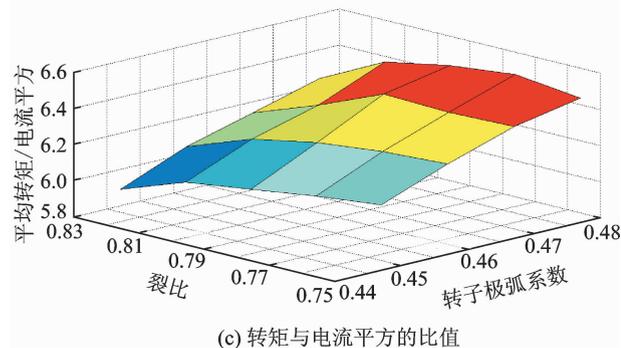
目标电机要求的额定工作点为 $500 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})/6.5 (\text{N} \cdot \text{m})$,在保证可以达到转矩要求且有足够裕量的情况下,希望电机所需的电流较小,铜耗较小,效率较高。最终综合考虑,选用裂比为



(a) 转矩



(b) 最大磁通与最小磁通比值



(c) 转矩与电流平方的比值

图6 裂比和转子极弧对电机性能的影响

Fig. 6 Influence of split ratio and rotor pole arc on SRM

0.81、转子极弧系数 0.467 的方案,且定子带有极靴结构,定子极弧比转子极弧稍小,其比值为 0.955。该电机结构在对齐位置单相通电的磁密云图如图 7 所示,在 500 r/min 转速下,电机的单齿磁通、单齿单匝感应电势、电磁转矩分别如图 8 所示。

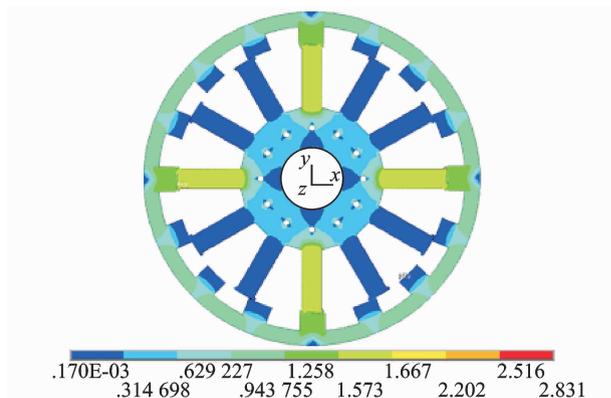
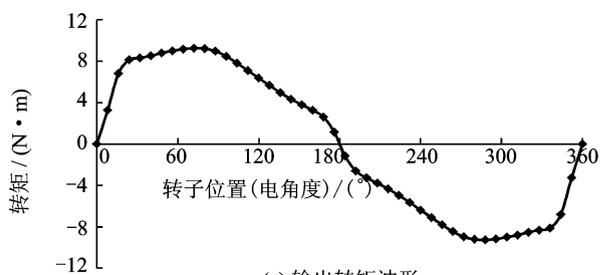
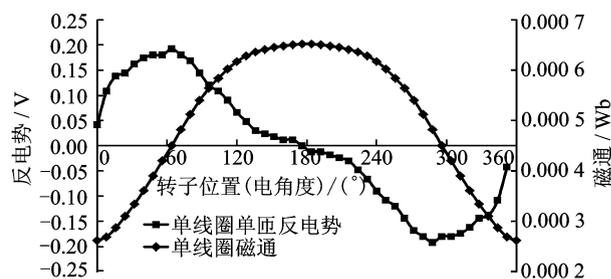


图 7 优化 12/16 电机在对齐位置的磁密云图

Fig. 7 Flux distribution of 12/16 SRM at aligned position



(a) 输出转矩波形



(b) 空载感应电势与磁通(转速为 500 r/min)

图 8 优化后 12/16 开关磁阻电机的输出特性

Fig. 8 Torque, flux and EMF of optimal 12/16 SRM

3 绕组设计

由图 8(b)所示的静态仿真数据可知,该电机在额定转速 500 r/min 时的单个线圈单匝感应电势峰值约为 0.19 V。三相定子 12 槽开关磁阻电机每相绕组由 4 个线圈组成,如图 9 所示。每相的 4 个线圈可以有多种连接方式,可将 4 个线圈依次串联,或者 4 个线圈依次并联,或者两两先串联再并联。当采用 4 个线圈串联的连接方式时,认为在

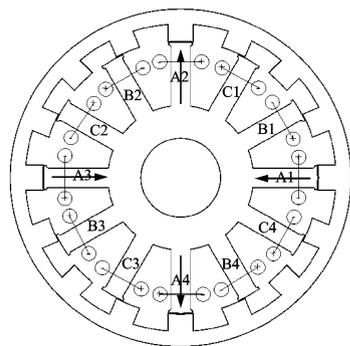


图 9 三相 12/16 开关磁阻电机的绕组接法

Fig. 9 Winding configuration of three-phase 12/16 SRM

额定工作点需要满足电压平衡方程式,考虑到额定电压为 48 V,忽略内阻压降可以估算匝数 $N = 48 \div 4 \div 0.19 \approx 63$ (匝)。

此外,由于 SRM 为单极性结构,需要仔细考虑每个线圈的进出线绕向。首先,一般对于一相绕组的 4 个线圈,有两种绕法:(1) 4 个线圈通电后的磁势极性分别为“NNSS”,(2) 磁势极性为“NSNS”(图 9)。实际上,后者可以利用短磁路优势,让磁通在 1/4 个铁心范围内闭合,会有更好的输出特性,所以这里采用“NSNS”绕组连接方式。其次,每相绕组之间的极性关系亦会对电机性能带来影响,一般采用互感增强型的绕组连接方式,即让电机的 12 个定子极通电后的磁势极性依次为“NSNSNSNSNSNS”,这样,每相绕组通电后产生的磁链对相邻绕组都有增磁作用,有利于提高电机的输出转矩^[8]。

需要强调的是,对于低压电机,每相绕组可以考虑采用先串后并或者 4 个线圈并联的连接方式,尤其是前者,可以实现电机绕组的双通道,即每相绕组有两条通路,实现互相冗余,提高电机的可靠性和容错性,在某条支路发生故障时,另一条支路仍能保证电机有一定的转矩输出能力^[9]。最终,电机的设计参数如表 2 所示。

4 耦合仿真验证

开关磁阻电机控制系统框图如图 10 所示。控制器根据位置信号、电压电流检测与保护信号,经过运算与逻辑处理发出控制信号;控制信号经驱动电路放大后驱动功率电路工作;将电源变换成不同的电流电压来控制开关磁阻电机的运行。为了进一步验证之上优化设计过程得到的电机模型,根据系统框图使用有限元磁场计算与控制电路计算相结合的场路耦合仿真。依据之上的电机参数,建立场路耦合仿真模型,控制单元采用固定开关角的电

表2 电机详细设计参数

Tab. 2 Key parameters and specifications of 12/16 SRM

参数	参数值
定子槽/转子极	12/16
额定功率/W	350
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	500
轴长/mm	30
外转子外径/mm	205
外转子内径/mm	166
内定子外径/mm	165
内定子内径/mm	48
气隙长度/mm	0.5
转子轭厚/mm	8.9
转子齿高/mm	10.6
转子极弧/($^\circ$)	10.5
定子齿高/mm	39
定子轭厚/mm	19.5
定子极弧/($^\circ$)	10.025
定子极靴长度/mm	1.3
定子极靴宽度/mm	14.42
定子齿宽度/mm	11.854
每个线圈匝数	63(4个线圈串联)

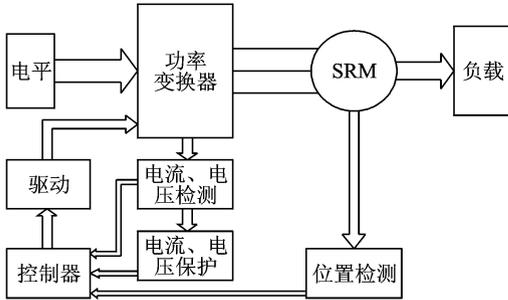
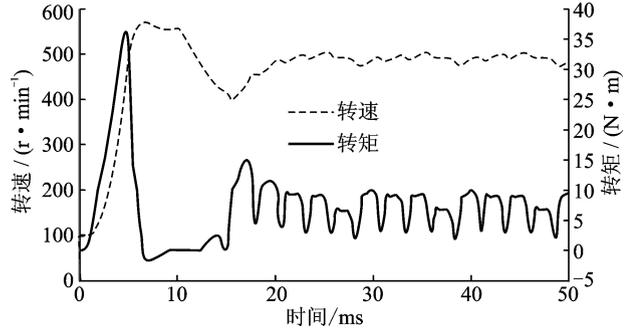


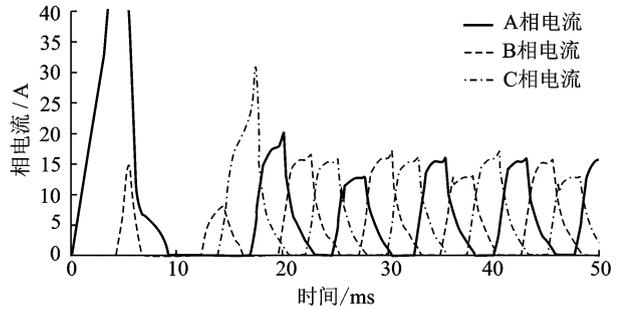
图10 SRM控制系统框图

Fig. 10 Control system block diagram of SRM

流闭环控制, PI 转速闭环, 脉冲宽度调制 (Pulse width modulation, PWM) 信号载波频率为 5 kHz。搭建控制电路模型和电机有限元模型, 在电机机械端接 $6.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的额定负载转矩, 给定系统转速为 500 r/min, 使电机驱动系统工作于额定状态。通过场路耦合仿真, 得到仿真的转矩与转速波形如图 11(a) 所示, 电机带额定负载时能够稳定运行在 500 r/min; 仿真相电流波形如图 11(b) 所示, 该额定工作点的仿真电流可以为硬件电路参数设计提供依据。从仿真结果可以看到, 系统可以稳定运行在 $6.5 (\text{N} \cdot \text{m}) / 500 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 状态, 即满足设计要求。需要强调的是, 该开关磁阻电机系统有许多可调的控制参数, 包括转速 PI 值、开通角、关断角和电流斩波限等, 通过对它们的合理调节可以进一步提高电机的输出性能。



(a) 转速与转矩波形



(b) 相电流波形

图11 12/16 开关磁阻电机的仿真结果

Fig. 11 Simulated torque, speed and phase current of 12/16 SRM

5 试制样机与实验

试制一台实验样机如图 12 所示, 为了测试电机性能, 搭建了基于 ARM 芯片和 MOSFET 的开关磁阻电机控制系统, 实验平台如图 13 (a) 所示, 电机的装车图如图 13 (b) 所示。

该实验样机在典型工作点 ($500 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1}) / 6.1 (\text{N} \cdot \text{m})$) 的转速和相电流波形如图 14 所示。转速波形为代码调试器 (Code composer studio, CCS) 中实时描绘, 转速很平稳; 其电流有效值约为 6 A, 峰值约为 10.6 A, 每个电周期相电流稳定, 从而电机实现平稳运行。



图12 三相12/16开关磁阻电机样机

Fig. 12 Prototype of manufactured three-phase 12/16 SRM



(a) 实验平台图 (b) 装车图

图 13 实验样机测试图

Fig. 13 Experimental platform of prototype and electric bicycle with proposed SRM

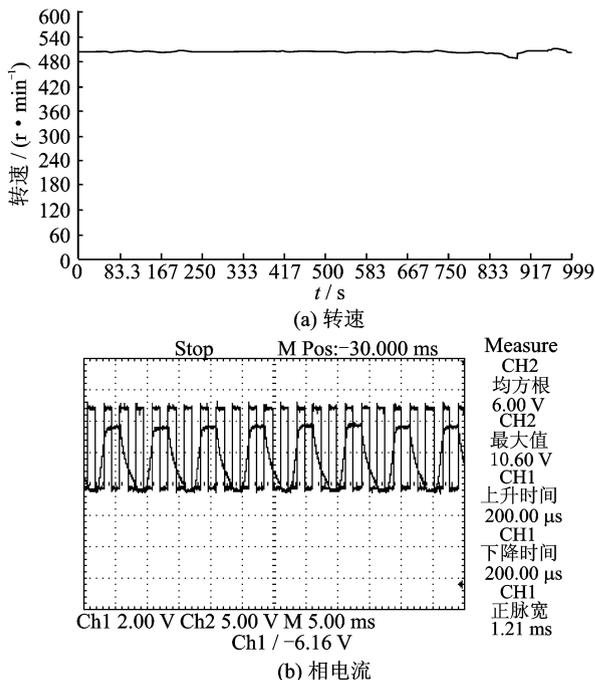


图 14 $500(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})/6.1(\text{N} \cdot \text{m})$ 的转速、相电流波形图

Fig. 14 Phase current and speed waveforms at $500(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})/6.1(\text{N} \cdot \text{m})$

6 结 论

本文分析了一台小功率电动自行车用外转子 SRM 的电磁设计过程, 并完成了该电机的有限元分析计算及电路-磁场系统耦合仿真。具体如下:

(1) 讨论 SRM 不同相数、不同定子转子数的优劣, 依据工况确定了电机的基本参数;

(2) 基于静态有限元, 确定目标量, 讨论电机的优化目标, 展开对 SRM 定子铁心尺寸与形状的优化;

(3) 基于电机单匝感应电势特性, 讨论绕组设计方案, 并初步确定电机匝数;

(4) 建立开关磁阻电机场路耦合仿真模型, 完成电机的动态有限元仿真, 验证之前设计方案的合

理性。

(5) 完成了一台样机的制造、测试、装车运行, 初步实测结果验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] Fahimi B, Emadi A, Sepe Jr R B. A switched reluctance machine-based starter_alternator for more electric cars[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(1): 116-124.
- [2] Chiba A, Takano Y, Takeno M, et al. Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2011, 47(3): 1240-1246.
- [3] Takeno M, Chiba A, Hoshi N, et al. Test results and torque improvement of the 50 kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2012, 48(4): 1327-1334.
- [4] Chen H, Su T, Xiao F, et al. The switched reluctance motor drive for application in electric drive bicycle based on 80C196KC single chip computer control[C]// 28th IEEE Industrial Electronics Society (IECON2002). Sevilla, Spain: Industrial Electronics Society, 2002, 3: 2149-2154.
- [5] 卢铭. 电动自行车用开关磁阻电机驱动系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [6] Miller T J. Optimal design of switched reluctance motors[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2002, 49(1): 15-27.
- [7] 王玉彬, 程明, 花为, 等. 双定子永磁无刷电机裂比的分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 62-67.
Wang Yubin, Cheng Ming, Hua Wei, et al. Analysis and optimization of split ratio for double-stator permanent magnet brushless machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 62-67.
- [8] 詹琼华, 吴莹, 郭伟. 开关磁阻电机绕组连接方式的研究[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(2): 94-100.
Zhan Qionghua, Wu Ying, Guo Wei. Analysis of winding connection types for switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Controls, 2002, 6(2): 94-100.
- [9] Hua Wei, Wu Zhongze, Cheng Ming, et al. A dual-channel flux-switching permanent magnet motor for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7): 07E736.