



三相 12/8 极开关磁阻电动机控制系统设计

孙建军, 孙长海, 张颖杰, 巴 宇

(大连理工大学 电气工程学院, 大连 116024)

摘要: 以三相 12/8 极开关磁阻电机作为研究对象, 设计了以 TMS320F28335 芯片作为主控单元的开关磁阻电机调速系统。调速系统由软件部分和硬件部分组成。软件部分采用双闭环 PI 进行控制, 电流为内环, 转速为外环, 在综合考虑速度给定信号、位置信号、保护信号的基础上, 计算得出对应导通相的 PWM 驱动信号; 硬件部分主要由开关磁阻电机、功率变换器、电流检测、位置检测、键盘和数码管显示屏组成。结合位置信号、速度信号、电流反馈信号, 对开关磁阻电机的控制策略进行调整, 让其在电压斩波控制方式下工作。经过参数调整实验, 最后选择合理的 PI 控制比例系数和积分系数。通过实验数据优化、对比、分析, 验证了此控制系统设计的合理性。

关键词: 开关磁阻电机; 半桥逆变; 开关磁阻电机驱动; 数字信号处理器

中图分类号: TM352

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190411](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190411)

Design of the Control System for Three-phase 12/8 Pole Switched Reluctance Motor

SUN Jianjun, SUN Changhai, ZHANG Yingjie, BA Yu

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Taking the three-phase 12/8 pole switched reluctance motor as the research object, the speed control system of the switched reluctance motor with the chip of TMS320F28335 as the main control unit is designed. The speed regulation system consists of software and hardware. The double closed-loop PI is used to control in the software part where the current is the inner loop and the speed is the outer loop. Based on the given speed signal, position signal and guard signal, the PWM driving signal corresponding to the conducting phase is calculated. The hardware part is primarily composed of switched reluctance motor, power converter, current detection, position detection, keyboard and LED segment display. Given a combination of position signal, speed signal and current feedback signal, the control strategy of switched reluctance motor is adjusted to work under voltage chopper control mode. After parameter adjustment experiment is completed, the reasonable proportional and integral coefficients of PI controller are selected. The rationality of the design of the control system is verified by the optimization, comparison and analysis of the experimental data.

Key words: switched reluctance motor; half-bridge inverter; switched reluctance drive; digital signal processor

开关磁阻电机控制参数很多, 如相电压、相电流、开通角、关断角等。同时开关磁阻电机本身存在着严重的非线性, 所以很难建立一个通用并且精确的数学模型。目前广泛使用在开关磁阻电机中的调速方法有 3 种^[1-4]: 角位置控制方式 (angular position control, APC)、电流斩波控制 (current chopper control, CCC) 方式以及电压斩波控制方式 (chopper voltage control, CVC)。控制算法有^[5-9]: PID 控制算法、神经网络控制算法、模糊

控制算法、在线寻优控制算法等。PID 控制算法是目前应用最为广泛的一种算法, 根据偏差给定比例 (proportion, 简称 P)、积分 (integral, 简称 I) 和微分 (differential, 简称 D), 从而实现系统的闭环控制。它的结构简单, 控制参数相对独立, 适用于各种过程的控制, 参数容易控制, 结构灵活多变, 使用时不需要精确的数学模型。因为这种控制策略比较适合本科实验的教学特点, 符合电气专业本科的教学大纲要求, 所以本文将基于 PID

收稿日期: 2019-11-01; 修回日期: 2019-11-26

基金项目: 大连理工大学教改基金 (DX2018009, JCX2018013)。

作者简介: 孙建军 (1972-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压技术, 控制技术方面的研究。

控制策略,以电压斩波的方式作为调速手段,研究速度为外环,电流为内环的开关磁阻电机双闭环 PID 控制的方法。最终得到稳定的控制系统。

1 磁阻电机调速系统总体设计方案

开关磁阻电机调速系统由软件部分和硬件部分组成。软件部分选择双闭环 PI 控制,分为电流内环和转速外环,整合速度给定信号、电流反馈信号、位置信号、保护信号等给出 PWM 驱动信号;硬件部分主要由开关磁阻电机(SRM)、功率变换器、电流检测、位置检测、键盘和数码显示等组成。控制系统总体结构框图如图 1 所示。

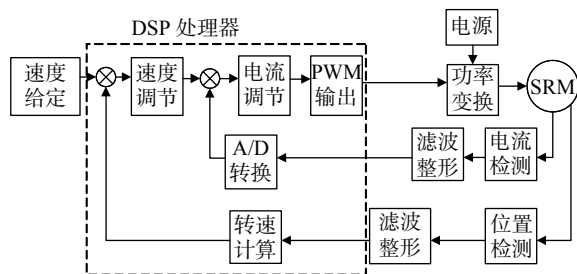


图 1 开关磁阻电机控制系统框图

功率变换电路相当于 SRM 中各相定子绕组的电力开关,通过对定子绕组的关断与导通来实现磁阻的变化,进而驱动转子转动,同时还增加了续流二极管,将储存的多余电能回馈至电源以保证效率。电流传感器采集的信号,输入至 DSP 控制器中进行 A/D 转换,处理后作为电流环的反馈参数和过电流保护依据。速度反馈信号和电流反

馈信号经过计算最终决定 PWM 波占空比,而功率变换电路的控制信息就是来自于 PWM 波,位置信号决定换相时间。

2 系统硬件电路设计

2.1 主电路设计

开关磁阻电机额定功率为 1.5 kW,电机极数为 12/8 极,电机相数为三相,电机电源为 DC 300 V。主电路可分为整流电路、启动电路、滤波电路和功率变换电路 4 个部分。主电路经全桥整流再滤波得到直流电压,送入功率变换电路驱动电机。主电路如图 2 所示。为了使设计的驱动电路与 SRM 相匹配,且达到效率高、方便控制、结构简单、成本低等要求,在保证系统稳定的前提下,尽可能地少用电力电子开关,故系统采用半桥作为功率变换器^[10-12]。半桥式功率变换器每一相由两个电力二极管和两个功率开关器件组成。当两个主开关 VT₁ 和 VT₂ 同时导通时, D₁、D₂ 关断,电源向绕组 A 供电;当 VT₁ 和 VT₂ 同时关断时, D₁、D₂ 正向导通,相电流经续流二极管 D₁ 和 D₂ 续流,将电机磁场储能迅速回馈电源。半桥结构^[13-14]的优点在于:主功率器件和续流二极管的最大承受电压均为电源电压;每相之间互相独立,保证了电机运行的可靠性;该功率变换器最大效率地使用了电源电压,使得主开关管的额定电压全部使用,以更好地控制相电流;电流不会频繁回馈至电容导致电容过热而影响寿命。

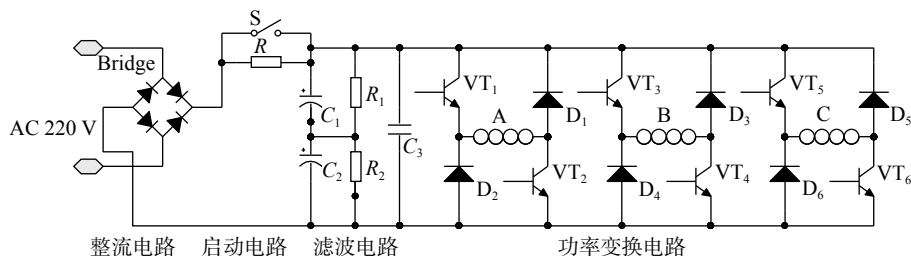


图 2 系统主电路

主电路的电路参数选择:整流过后直流母线电压峰值约为 300 V,该电压即为 IGBT 承受的最大电压,考虑到两倍的安全裕量,IGBT 选用额定电流为 50 A,额定电压为 1 200 V。整流桥选用 KBPC1010,它的额定电流为 10 A,额定电压为 1 000 V。启动电路中的充电电阻选用 60 Ω ,继电器选 DC24V,最大电压为 32 V,动作电压为 18 V。三相交流经过整流桥整流成直流后,仍旧带有交

流成分,同时负载的改变也会导致直流电压产生脉动,故在整流电路之后加入低通滤波环节,理论上滤波电容的容量越大越好,考虑到电容的体积和价格因素,最终采用两个容量和额定电压为 330 μF /450 V 电解电容串联的形式,同时每个电容并联一个电阻以平衡两个电容之间的电压值和放电作用。在母线两端并联一个吸收电容,最终滤波之后能够得到较为平滑的直流电压。

2.2 控制电路设计

控制电路主要由位置检测电路、电流检测电路、电压检测电路、通信电路、保护电路等组成。

位置检测电路如图3所示。低通滤波环节将

输入的位置信号进行滤波除毛刺、整形边沿,通过位置信号导通三极管,使得6N136光电耦合器工作,实现光电隔离,最后经过施密特反相器得到稳定波形,并最终输出标准位置信号给到DSP芯片中进行计算。

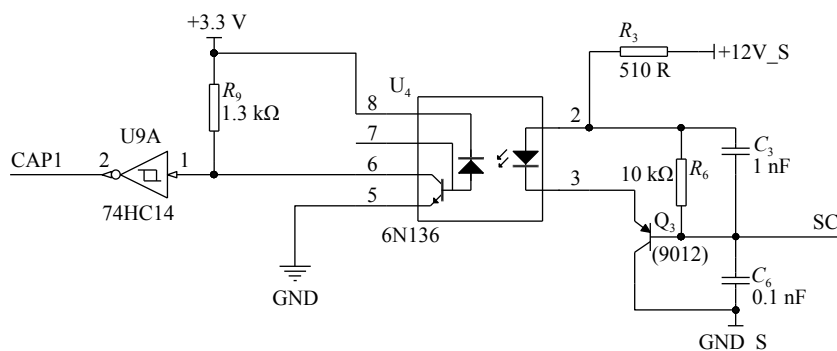


图3 C相位置检测电路(A, B两相相同)

电流检测电路如图4所示,传感器采用HP-20A-P,它能够检测最大20A的电流,输出50mA的电流。为满足DSP芯片AD模块只能采样0~3V的要求,对电流信号经过 R_{28} 与 R_{29} 分压, R_{29} 、

C_{15} 与TL084组成一阶有源低通滤波器,将干扰信号滤除,最终输出合适的电流检测信号至DSP芯片的AD模块中。为保护DSP芯片,设计了3.3V钳位电路。

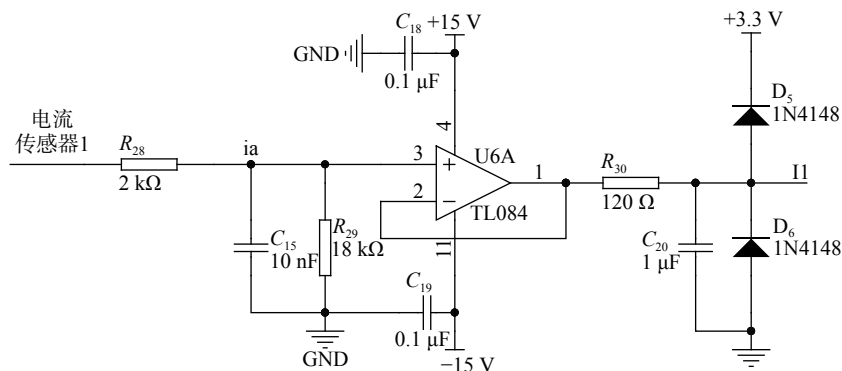


图4 电流检测电路

电压传感器采用ZM-BPT型号,该电压传感器额定输入电压为380V,额定输出电压为2.941V,

具体电压检测电路如图5所示。

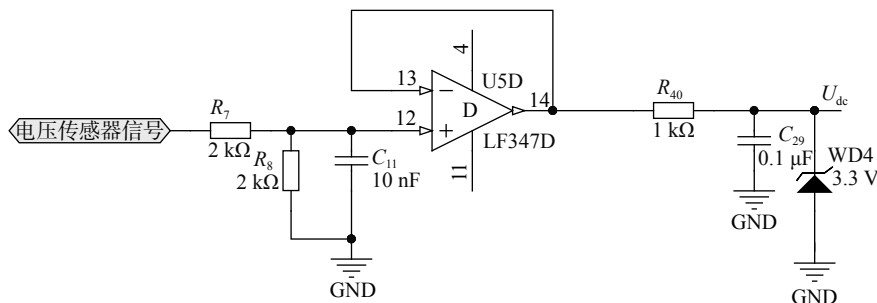


图5 电压检测电路

通信电路连接键盘、显示器与 DSP 芯片，将三者的发送和接收信号进行处理。由于 DSP 芯片

与键盘显示电路的电平信号标准不一样，需选用 MAX232 进行电平转换。电路设计如图 6 所示。

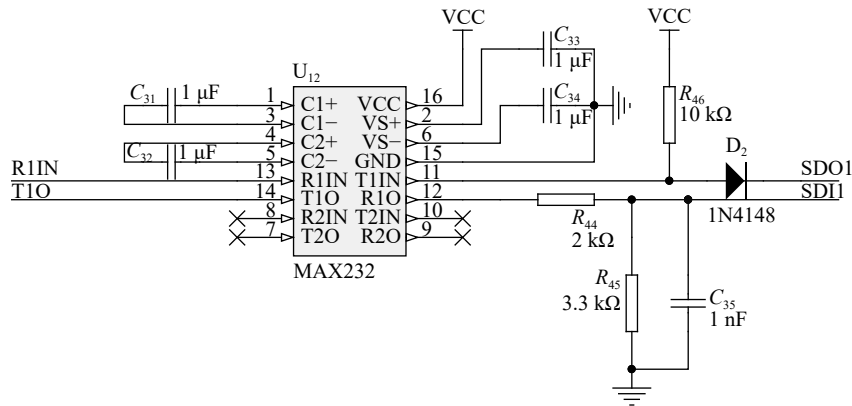


图 6 通信电路

故障电路包括：过流保护、过压保护、堵转保护、过载保护。其中过压信号、堵转信号和过载信号由 DSP 芯片计算所得。过电流保护电路如

图 7 所示。将故障信号输入至 SN74HC21 双重四输入与门芯片的输入端，故障信号均为低电平，相与后可输出总合成错误信号到 DSP 芯片中进行处理。

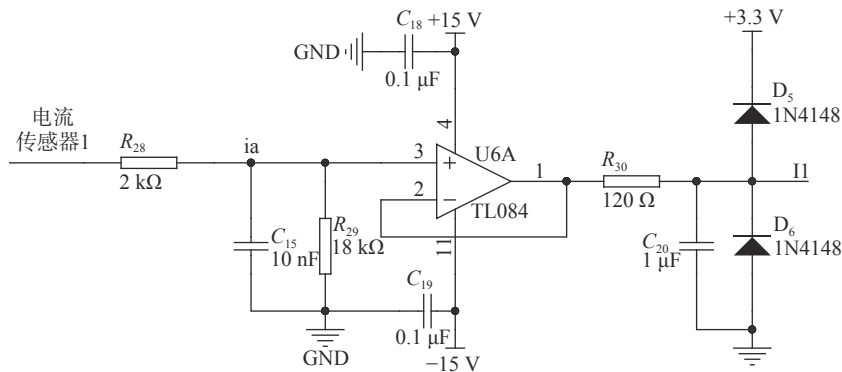


图 7 过流保护电路

3 系统软件设计

设计了以电流为内环，速度为外环的双闭环调速系统^[15]。程序结构图如图 8 所示。

软件设计思路：利用 ADC 采样相电流；利用 eCAP 对电机的位置信号采样，计算转速，同时输出换相信号；利用 PWM 单元输出 6 路 PWM 波，实现电机调速；键盘设定转速，数码管显示转速；出现故障时立即封锁 PWM 以保证电路的安全。

初始化程序主要实现对系统硬件初始化和参数初始化。初始化程序流程图如图 9 所示。

采用 T 法测速，设时钟频率为 f ，其原理为每个位置脉冲信号均触发中断，然后读取计数器中

的数值 m ，转子上有 8 个凸极，转动一周的时间为 $8m/60f(\text{min})$ ，所以转速 $n = 60f/8m$ 。高速时选用频率为 150 MHz，低速时选用 10 kHz。转速计算流程图如图 10 所示。

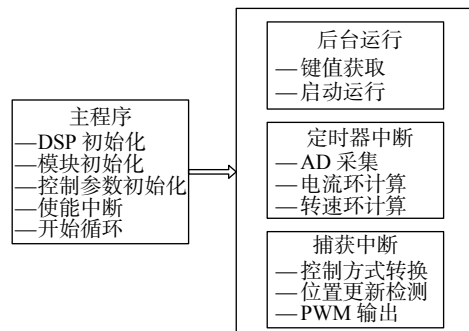


图 8 程序结构图

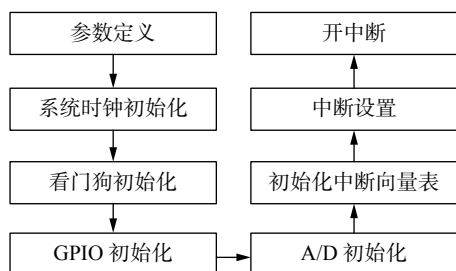


图9 初始化程序流程图

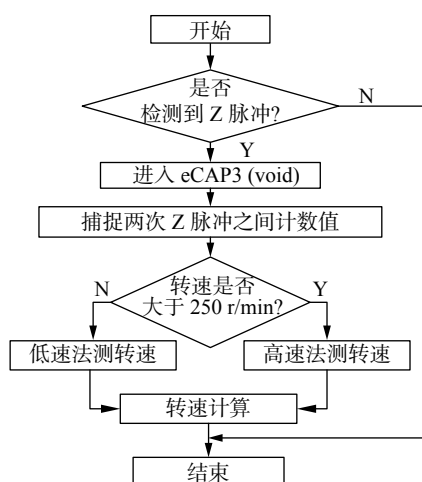


图10 转速计算流程图

主程序流程图如图11所示, 先将所需模块和外围设备进行初始化, 中断设置。之后进入一个无限循环程序。检测按键是否按下, 进入对应的按键程序, 通过判断键盘的输入值来选择相应的运转状态, 设计3种状态, 分别为正转、反转和停车。随后进入转速计算模块, 分为高速和低速两种计算方式, 紧接着进行检测堵转和通信功能。

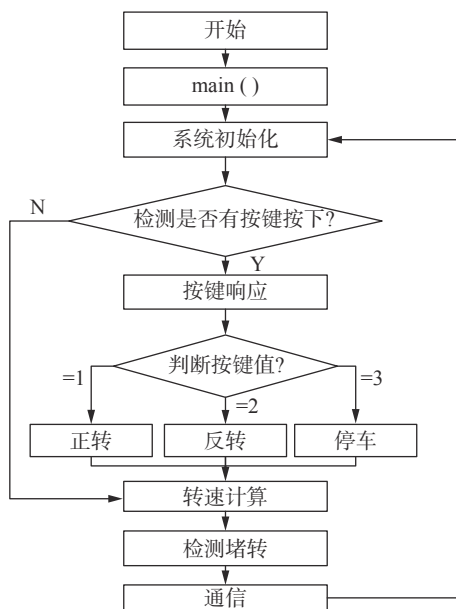


图11 主程序流程图

4 实验及结果分析

将所有实验装置正确连接后, 进行试验。位置信号实验结果如图12所示, 电机转速为750 r/min, 由图可知, 电机正常运行时, 转子三路的位置信号互相差120°。

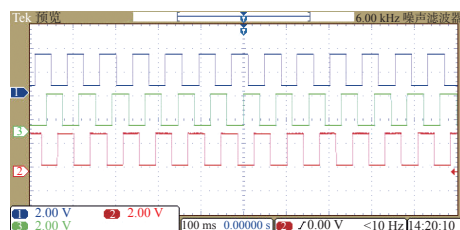


图12 转速 750 r/min 三路位置信号波形

三相电流如图13所示, 电机转速为1500 r/min, 由图分析可知在换相期间会有一段时间是两相均导通。在此期间, 两相的相电流由它们所需要承载的转矩有关, 随着转矩变大或减小而变化。

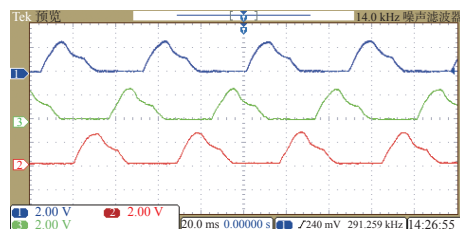


图13 额定转速下的三相电流波形

在速度一致的前提下, 图14与图15分别为较轻载和较重载下的相电流波形图。通过对比可知, 当增加负载时, 相电流平均值会上升, 以输出更大的转矩, 来达到转速恒定的目的。

系统采用PID调节方式, 调节时, 先比例、后积分、再微分的整定步骤。具体做法有以下3步。

1) 整定比例部分, 将比例系数由小变大, 并观察相应的系统响应, 直至得到反应快、超调小的响应曲线。

2) 如步骤1)不能满足要求, 加入积分环节。先将积分系数设置较小值, 并将步骤1)中比例系数缩小(如缩小为原值的0.8), 然后增大积分系数, 使得在保持系统良好动态的情况下, 静差得到消除。在此过程中, 可根据响应曲线的好坏反复改变比例系数和积分时间, 而得到满意的控制过程, 得到整定参数。

3) 若使用比例积分控制消除了静差, 但动态过程经反复调整仍不能满意, 则可加入微分控制。整定时, 微分系数先置零, 在步骤2)的基础

上增大微分系数, 同样相应的改变比例、积分系数, 逐步获得满意的调节效果和控制参数。



图 14 负载 10 N·m 下相电流波形



图 15 负载 20 N·m 下相电流波形

为测试该调速系统的速度精度和响应速度, 测试了系统在转速 1467 转时的响应曲线, 如图 16 所示。

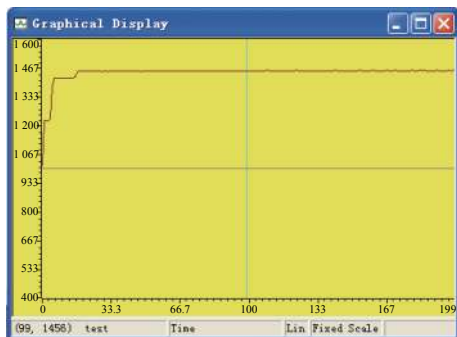


图 16 速度响应曲线

在空载和额定负载下分别给定转速 100 r/min 到 1 500 r/min, 每隔 200 r/min 做一次实验, 实验数据如表 1 和表 2 所示。由表可知, 调速系统的速度精度较高。

表 1 空载下速度实验结果

给定转速/(r·min) ⁻¹	实际转速/(r·min) ⁻¹	速度精度	启动时间/s
100	100	1	1.2
300	300	1	2.6
500	500	1	3.0
700	700	1	3.2
900	900	1	3.5
1 100	1 100	1	3.6
1 300	1 300	1	4.0
1 500	1 500	1	4.8

表 2 额定负载下速度实验结果

给定转速/(r·min) ⁻¹	实际转速/(r·min) ⁻¹	速度精度	启动时间/s
100	100	1	1.6
300	300	1	3.6
500	500	1	5.1
700	700	1	6.6
900	900	1	8.0
1 100	1 100	1	8.7
1 300	1 300	1	9.5
1 500	1 500	1	10.4

5 结束语

以三相 12/8 极、1.5 kW 开关磁阻电机作为被控对象, 设计了基于 TMS320F28335 型号的 DSP 芯片为控制器的开关磁阻电动机的调速系统, 整个系统采用双闭环 PI 控制, 速度外环和电流内环。完成了开关磁阻电机调速系统的调试工作, 实现了对电机转速的控制。调试中采集了位置信号对比图、三相电流对比图以及较轻载与较重载下相电流波形图, 将实验结果进行分析对比, 最终验证了本次设计的开关磁阻电机调速系统的可靠性。

参考文献

- [1] 孙建忠, 白凤仙. 特种电机及其控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 孙建忠, 王斌, 白凤仙. 开关磁阻电机磁-热耦合仿真分析[J]. 微特电机, 2018, 46(10): 66-69.
- [5] 王悦, 徐耀良, 陈鹏飞, 等. 基于电动汽车开关磁阻电机功率变换器的研究[J]. 山东工业技术, 2017(2): 64-65.
- [6] 王紫旂, 李春艳. 开关磁阻电机双闭环控制系统设计与调速性能优化[J]. 黑龙江大学学报, 2018, 9(3): 3-8.
- [7] 肖丽, 懂昊宇, 高峰, 等. 新能源汽车用新型开关磁阻电机驱动系统[J]. 电气传动, 2018, 48(7): 142-144.
- [8] 王永艳, 刘武发. 开关磁阻电机驱动控制系统设计[J]. 机械工程自动化, 2017(4): 176-178.
- [9] 刘世哲. 四相 8/6 极开关磁阻电机调速系统设计及优化[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [10] BURIKOVSKIY S, MASLII A, PASKO O. Research and development of an electric traction drive based on a switched reluctance motor[J]. Transport Problems: an International Scientific Journal, 2018, 13(2): 69-79.

(下转第 63 页)