

基于无刷直流电机的电动车控制器研究与设计^{*}

沈朝萍, 尚金秋, 胡超, 谢中敏

(江苏航空职业技术学院 航空工程学院, 江苏 镇江 212134)

摘要: 传统的电动车用无刷直流电机(BLDCM)控制器功率逆变电路, 为实时检测相电流, 通过电阻进行相电流采样并反馈给微控制单元(MCU)进行电流闭环控制, 然而, 在功率较大的控制器电路应用中, 大电流会导致功率损耗增加。为解决这一问题, 以 STM32 系列微型单片机为核心, 设计了一套电动车控制器控制电路。重点阐述 BLDCM 硬件控制。为改进电源短路保护电路, 提出了一种新型的 MOS 管内阻采样方法, 并制作铝基板 PCB。测试结果表明: 该控制电路测控性能稳定, 能够应用于工业生产中。

关键词: 电动车控制器; 无刷直流电机; MOS 管内阻; 铝基板

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)07-0076-06

Research and Design of Electric Vehicle Controller Based on Brushless DC Motor^{*}

SHEN Chaoping, SHANG Jinqiu, HU Chao, XIE Zhongmin

(Department of Aeronautical Engineering, Jiangsu Aviation Technical College, Zhenjiang 212134, China)

Abstract: In order to detect the phase current in real time, the traditional power inverter circuit for brushless DC motor (BLDCM) controller of electric vehicle sampled the phase current through the resistor and fed it back to the microcontroller unit (MCU) for current loop closed-loop control. However, when the controller was used in high power levels, the heavy current would cause some power loss. In order to solve the problem, a set of electric vehicle controller circuits with STM32 series microchip as the core was designed. The hardware controller of BLDCM was described in detail. To improve the short-circuit protection circuit of power supply, a new method for sampling internal resistance of MOS tube was especially proposed, and a PCB based on aluminum substrate was made. The test results showed that the designed circuits performed reliably and could be applied to industrial production.

Key words: electric vehicle controller; brushless DC motor (BLDCM); internal resistance of MOS tube; aluminum substrate

0 引言

随着经济社会发展, 生态环境保护深入人心, 基于无刷直流电机(BLDCM)的电动车成为人们出行首选。电动车用 BLDCM 控制器研究主要围绕控制器硬件电路设计和控制算法优化。文献[1]针对中小负载应用场景, 基于单片机和功率驱动模块, 完成控制器硬件设计。文献[2]通过设计双处理器电路, 提高了电机运行的可靠性。文献[3-5]将模糊控制算法应用到电机控制中,

优化了电动车速度调节性能。文献[6]采用计及等效电阻策略抑制 BLDCM 换相转矩脉动。

本文通过研究 BLDCM 原理和控制方法, 设计并实现一种 BLDCM 控制器。所使用的主芯片型号为 ST (意法半导体公司) 的 STM32F103C6T6。其灵活的 I/O 口配置, 内部集成了丰富的电机接口控制, 为电机控制提供了方便^[7-8]。在论述控制器电路的同时, 对中大功率的电路设计, 提出了一种新型 MOS 管内阻采样方法。

^{*} 基金项目: 江苏航空职业技术学院课题(JATC19010107, JATC17010102, JATC17010103)

作者简介: 沈朝萍(1990—), 女, 硕士, 研究方向为动力工程。

1 系统基本组成原理

BLDCM 基本控制原理^[9-10]是根据安装在电机的霍尔传感器信号逻辑状态,实时获得电机转子位置信息并反馈到单片机中,单片机再根据实时霍尔信号向驱动电路发出不同脉宽调制(PWM)波控制信号,经过逆变电路通向电机线圈形成旋转磁场带动电机转子的连续旋转。根据检测到的电流和转速值进行双闭环控制,改变 PWM 值控制电流、转速。

该系统的主要电路为电源电路、功率逆变电路、外围接口电路、电压检测电路、电流采样电路和保护电路。图 1 所示为系统总体结构框图。

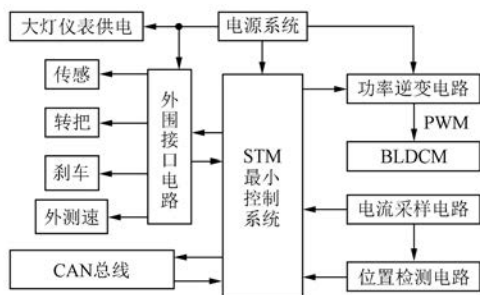


图 1 系统总体结构框图

2 BLDCM 硬件电路设计

2.1 电源小电流短路保护

电动车控制器主电源为动力锂电池,输出电压为 36 V,可为电动车大灯直接供电。经电源模块调节后输出 +15 V、+5 V 和 +3.3 V 电压。考虑到大灯短路会导致整个控制系统损坏的问题,设计了一种大灯工作闭环系统。

短路保护电路如图 2 所示。A 端口接微控制单元(MCU)控制信号,发出高电平后,使得 VT2 导通,VT2 导通后 VT1 导通,为大灯工作提供电流。当输出端短路后,控端端信号被二极管钳位到 0.7 V 后,经过 R_2 、 R_3 、 R_4 后的电压使 VT2 截止,同时 VT1 截止,起到保护作用。VT1 正常工作电流值需保证大灯正常工作,选择贴片三极管 2SA1013。VD1 选择肖特基二极管。

电源电路提供的 +5 V 电源为多种外围设备供电(如转把、霍尔传感器等),电源也需要电源短路保护电路。传统电源短路保护电路如图 3 所示。当负载发生短路,输入电流增加,VT1 导通,

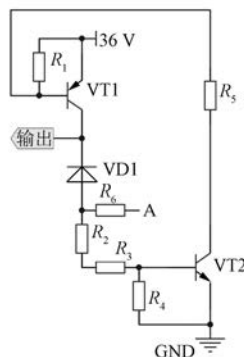


图 2 短路保护电路

VT2 关断^[11]。当控制器处于静态、额定和满载的情况下起到保护电路的作用,传统电路虽然能起到保护作用,但电路繁琐,因此需设计一种新的电源短路保护电路。

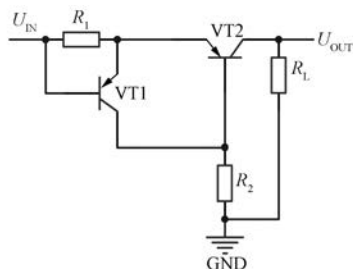


图 3 传统电源短路保护电路

图 4 所示为改进电源短路保护电路,电路主要在于三极管 VT2 与 VT1 的导通顺序。系统上电后,第一条通路 $U_{IN} \rightarrow VTS1 \rightarrow R_{S1} \rightarrow GND$,与第二条通路 $U_{IN} \rightarrow VTS2 \rightarrow R_{S2} \rightarrow R_L \rightarrow GND$ 相比,建立电势的速度快,VTS1 先导通,VTS2 截止。 C_{S0} 延长 VTS2 的导通时间。短路发生后, U_{OUT} 为零,VTS2 导通,VTS1 关断, U_{IN} 不输出。

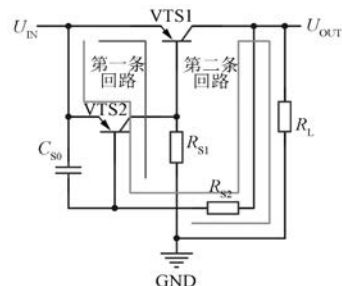


图 4 改进电源短路保护电路

与图 3 相比,图 4 电路在稳定性和可靠性上有所提升,但控制器常会受到速度快、峰值高的大

电流冲击,需要检测电路配合,才能对单片机进行综合保护。

2.2 驱动电路设计

驱动电路根据 MCU 接收的反映转子位置信息的 HALL 传感器信号对开关管发出 PWM 驱动信号电路。在满足电动车控制器功率要求的情况下,采用开关频率高、导通损耗小的 MOS 管作为开关元件^[12]。采用 IR 公司的集成驱动芯片 IR2103 及外围电路构成驱动电路,A、B、C 三相分别使用 1 个 IR2103。考虑到三相电路的一致性,

以如图 5 所示 B 相驱动电路为例进行说明,考虑到 MOS 管的驱动损耗问题。为保证 MOS 管的温度维持在稳定工作的状态下,开关频率设定为 17 kHz,选取 10 μF /50 V 贴片电容。

系统上电后,12 V $\rightarrow$ C_{1B} $\rightarrow$ R_{20B}给自举电容充电,调节 R_{20B}的阻值,改变充电电流值,分别向三相下桥发出 PWM 控制信号,此时电容充电回路为12 V $\rightarrow$ C_{1B} $\rightarrow$ 下桥 MOS,在正常起动前完成电容的自举。考虑到系统上电后,非导通相电平不确定的情况,避免三态的出现,将电阻 R_{20B}接在下桥 DS 间。

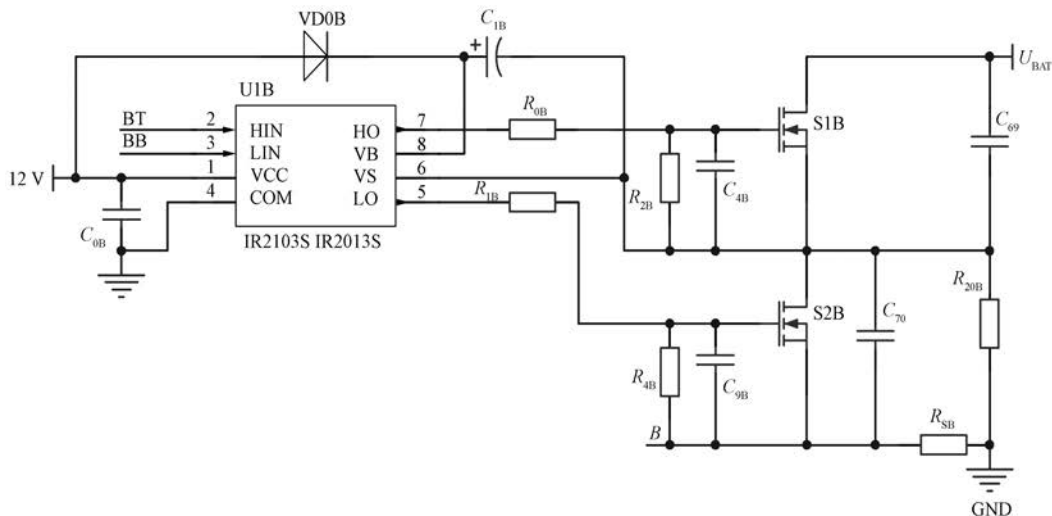


图5 B相驱动电路

2.3 电流采样电路的设计

通过对BLDCM数学模型研究,为了获得最大电磁转矩,将静止三相电子坐标变换成旋转坐标,对电机进行实时控制^[13]。通过霍尔传感器获知转子位置后,合成一个磁场,与转子合成的磁场相差90°,通过改变定子绕组线圈上的电流来实现闭环控制。BLDCM采集母线电流实现闭环控制。获得精确的自举电容充电一个通路,具有下拉电阻稳定电平的作用。MOS关断时,寄生电容的放电回路均是经过驱动芯片的开关管进行放电。为了防止功率管振荡,采用33 Ω 电阻进行端接,GS之间并联电容消除斩波后高频干扰,有利于MOS管快速翻越“米勒平台”,减少开关损耗。自举二极管在VD0B开通后,承担相应反向电压。

图5中B点位置通过对采样电阻R_{SB}的电压检测获得电流。由于相电流峰值大,为节省功耗,采用2 m Ω 采样电阻,所得电压信号小。为了便

于单片机采集和识别,需要将电压信号进行放大。为了减弱参考地平面环流信号对于B点参考电压所带来的干扰,使用差分放大器对信号进行放大,如图6所示。

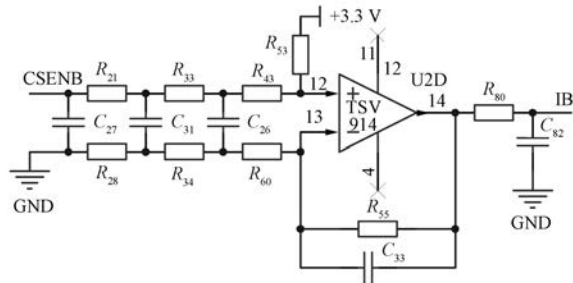


图6 电流采样电路

需要注意2点:(1)差分放大正端从采样电阻获取信号,负极从功率地采样。采样电阻两端走线需靠近,遵循差分采样的走线准则。(2)当电动车下坡时,无刷电机相当于发电机对电源充

电,相线上的电流是交流信号,对于单电源供电的差分放大器而言,为了避免其在放大信号时出现失真情况,需先对信号进行静态偏置。为使放大效果最理想,偏置电压应为电源电压的一半,然后进行信号放大。为了进一步降低共模信号以及高频信号的干扰,选择两级磁珠加两节电容滤波方法,保证信号准确性。

2.4 大电流短路电路的设计

由霍尔逻辑信号错误和死区保护失效所带来的 MOS 管上下直通大电流短路对控制器的损伤大。为了保证短路后及时切断驱动信号,使用 MCU 中断功能。A、B、C 三相电压通过运放放大反馈到 MCU 的 TRAP 脚,正常工作时 TRAP 脚为高电平,电流过大后,三极管 VT2 打开,电平翻转,触发中断,如图 7 所示。保护电流的值可以通过改变运放反馈电阻值进行设定。

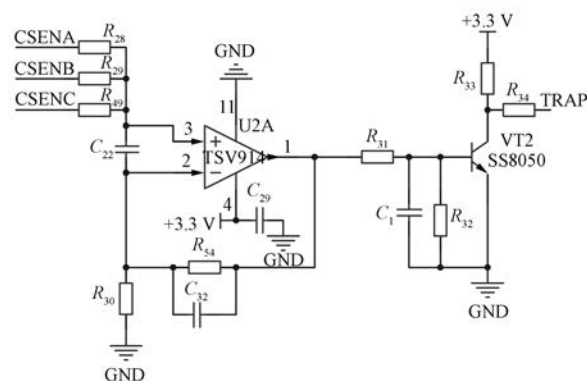


图 7 过流电路

3 MOSFET 内阻采样

控制器工作时相电流一般为母线电流的 3~5 倍。对于 500 W 的电机,控制器母线电流限流值可达 18~20 A,开关管电流大。电流检测通过放大采样电阻电压信号,但在大功率应用领域内,采样电阻由于通过的电流很大,使得功率损耗特别严重,控制器温度会较快上升,环境温度每升高 10 K,系统可靠性会下降一半,同时损耗增加。

传统方法^[14]是在大功率母线上安装霍尔互感器,但传感器成本高、体积大、安装不便。本文通过检测 MOSFET 导通时的内阻压降获得电流反馈值^[15-17]。内阻采样电路通过检测下桥驱动电平进行比较放大获得电流信号,对于三相信号来说,电路由于元器件多,需简化。

MOSFET 导通内阻小、开关速度快、无二次击穿等特性使其成为主流功率开关器件。MOSFET 流过通态电流,内阻会产生一个压降。伴随着半导体工艺技术发展,内阻值有数毫欧。内阻越小, MOSFET 所承受的耐压越低。因此,合理选择 MOSFET 参数有利于提高系统效率。MOSFET 内阻会随温度变化,不同的温度对应不同内阻值,即不同采样电流,对应关系如图 8 所示。



图 8 温度电流内阻关系图

采样所得的温度信息、MOSFET 内阻电压等信号,经处理可得流经开关管的电流信息,进行电流闭环控制。MOSFET 内阻采集电路如图 9 所示。

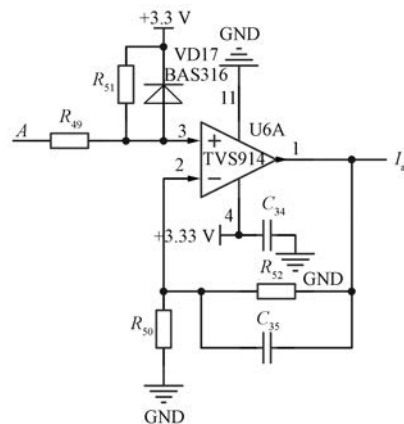


图 9 MOSFET 内阻采样电路

A 与 GND 分别从下管 MOSFET 中取差分信号。PWM 周期到来前,A 相所对应的上管与 B 相的下管导通,此时从 A 相进入运放的电压为母线电压,本设计为 +36 V,图 9 中用一个二极管钳位。当下管 PWM 周期到来开通时,由于信号较弱,此时二极管断开。 R_{49} 与 R_{51} 提供静态偏置电压,避免信号失真,同时能够消除放大器静态误差,保证正负两端所接的等效电阻相等^[18-19]。因为 MOSFET 内阻会随温度升高而增加,温度变化会导致采样不精确,所以将反映温度变化的温敏电阻置于电路中,通过分压方式连接到 MCU,感知信号温度变化进行实时补偿。

上桥导通时,下桥进入运放的电压被二极管钳位,放大后为定值。上桥关断时,下桥进行电压放大,电压随电流变化而变化。下桥导通后 MOSFET 内阻压降为定值。综上所述,该电路能够进行电流检测,且结构简单。

4 铝基板 PCB 的制作

工作温度对于开关功率器件特别重要,通常通过绝缘纸和螺丝将 MOSFET 与铝条相连进行散热。与 FR4 相比,选取散热性能更好的铝基板来放置发热器件,对普通信号走线用普通的 FR4 板材进行设计。

将 MOSFET、功率电阻、LM317 这些发热元器件放置在铝基板上,将驱动芯片、MCU 放置上板。PCB 实物图如图 10 所示。



图 10 PCB 实物图

5 软件的设计

该系统采用电流转速的双闭环控制系统调节电机转速。软件流程如图 11 所示。

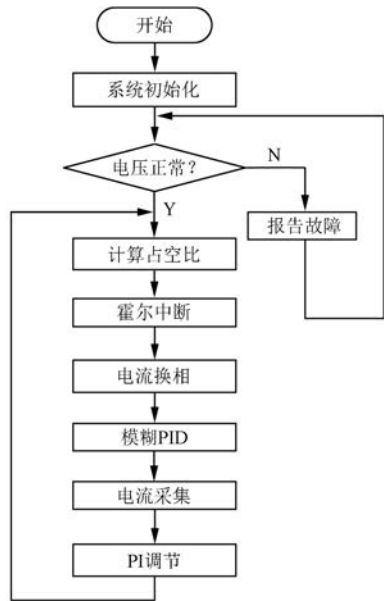


图 11 系统流程图

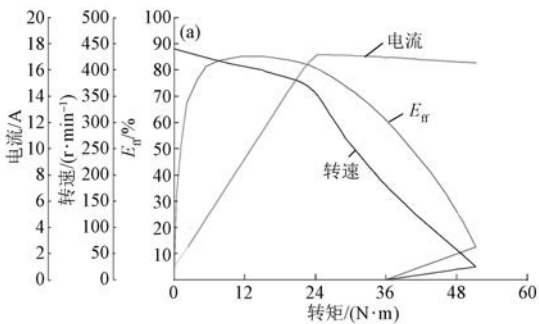
系统上电后,首先通过判断 A、B、C 三相电压经过运放放大后的偏置电压、霍尔信号电压反馈

值是否正常来决定是否起动。通过转子位置信息决定哪一组 MOSFET 导通^[20-21],同时通过转速环检测转速,与设定速度比较。通过模糊 PID 得出一个输出,作为电流环给定信号,通过检测电流值与给定信号比较,经 PI 调节得到最终值。

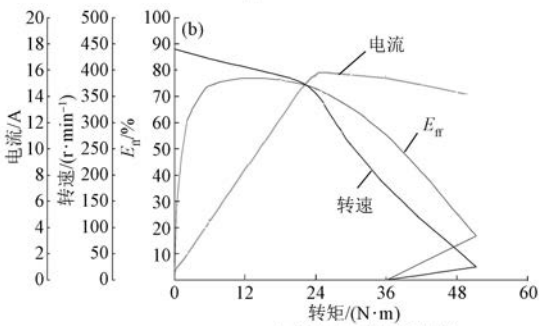
6 性能测试

使用测功设备对搭载该控制器的 BLDCM 进行效能测试。在测试过程中不断增加电机载荷,实时采集电流、转速、运行效能等信息,测试曲线如图 12(a) 所示。随着电机载荷的不断加,电机运行效能先升后降,当达到额定转速时,运行效率最高,随后逐渐下降,最高运行效能 E_{η} 为 85%。

为了对比该控制器效能,使用同型 BLDCM,对市场上某品牌电动车控制器进行效能测试,测试曲线如图 12(b) 所示,最高运行效能 E_{η} 为 76%,低于本文所设计控制器的效能。



(a) 所设计电动车控制器



(b) 某品牌电动车控制器

图 12 测试曲线

7 结 语

本文基于 STM32 设计了一款高性能电动车控制器,并给出了详细的硬件设计电路。对于传统大功率应用场景,采用 MOSFET 内阻采样方法,简化控制电路外围设备。基于改进后的硬件电

路,制成铝基板 PCB,并进行测试。测试曲线表明:该控制器运行效能高,能够应用于实际生产。

【参考文献】

- [1] 许晖,李执山,王莉,等.基于 STM32 的无刷直流电机控制驱动器硬件设计[J].测控技术,2012,31(12): 73.
- [2] 颜松祯,王炳文.基于双 DSP 的无刷直流电机控制器硬件设计和实现[J].电子技术,2015,44(6): 75.
- [3] 方力,张建华.电动车用无刷直流电机模糊自整定控制器设计[J].微电机,2012,45(3): 51.
- [4] 崔方,刘芳华,邱忠华,等.基于 DSP 的电动车用无刷直流电机控制器的设计[J].电机与控制应用,2014,41(4): 52.
- [5] 支长义,王瑞玲,唐道奎.无刷直流电动机模糊自适应 PID 控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(8): 35.
- [6] 杨成顺,葛乐,杜九江.计及等效电阻的无刷直流电机换相转矩脉动的分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2016,44(23): 115.
- [7] 吴大勇,贾敏智.STM32 在三相无刷直流电机控制系统中的应用[J].微电机,2014,47(3): 47.
- [8] 张修太,翟亚芳,赵建周.基于 STM32 的无刷直流电机控制器硬件电路设计及实验研究[J].电子器件,2018,41(1): 141.
- [9] 程明,张淦,花为.定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 5204.
- [10] 周尧.高转速无刷直流电机的无位置传感器控制技

- 术研究与实现[D].武汉:武汉工程大学,2015.
- [11] 杨广羽,马玉新,傅亚光,等.光电耦合 MOS 栅固态继电器回路研究与误触发改进措施[J].电力系统保护与控制,2016,44(15): 135.
- [12] CHOKHAWALA R, CATT J, KIRALY L. A discussion on IGBT short circuit behavior and fault protection schemes[J].IEEE Transactions on Industry Applications,1995,31(2): 256.
- [13] 蔡宝京.直流无刷电机自适应模糊控制系统设计[D].成都:电子科技大学,2016.
- [14] 李江,张永利,刘强,等.分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(23): 90.
- [15] 胡春,肖国龙,龚正平,等.LED 电源的短路保护电路设计[J].机电工程技术,2013,42(5): 71.
- [16] 潘依波.基于 MOSFET 低电压大电流逆变器设计与应用研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [17] CICHOWSKI A, NIEZNANSKI J. Self-tuning dead-time compensation method for voltage-source inverters[J].IEEE Power Electronics Letters,2005,3(2): 72.
- [18] 孟光,张文明.微机电系统动力学[M].北京:科学出版社,2008.
- [19] 陈策.静电微泵动态特性和流量分析[D].秦皇岛:燕山大学,2013.
- [20] 张东花,梁俊,屠秉慧.无刷直流电机电流检测新技术[J].电测与仪表,2011,48(6): 19.
- [21] 熊英英.车用低压大电流 MOSFET 模块驱动与保护研究[D].北京:北京交通大学,2012.

收稿日期: 2019-03-21

(上接第 71 页)

- [3] 张毅,刘慧娟,宋腾飞,等.300 MW 大型汽轮发电机多物理域耦合计算分析[J].西南科技大学学报,2017,32(2): 90.
- [4] LUAN R, GU G. Coupled electromagnetic and thermal analysis of stator insulating structure[C] // Sixth International Conference on Electrical Machines

and Systems (ICEMS),2003.

- [5] 汤蕴璆,梁艳萍.电机电磁场的分析与计算[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [6] 邢福超.直驱式永磁风力发电机的设计与研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.

收稿日期: 2019-02-26