

文章编号: 1674-9057(2020)02-0415-07

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2020.02.023

# 基于自适应模糊 PID 的电动车手套控温保暖系统

张声岚, 甘礼福, 汪 雕, 张烈平

(桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西 桂林 541006)

**摘 要:** 针对电动车保暖手套在电动车行车过程中受到行驶速度、气温、风速等非线性因素的影响, 传统 PID 的控制参数无法自适应调节, 难以满足电动车手套对温度自适应调节的需求, 提出了一种基于自适应模糊 PID 控制的电动车手套控温保暖系统。根据模糊规则对电动车手套实际温度与设定温度之间的误差和误差变化率进行模糊推理, 得到系统控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的增量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ , 从而进一步调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ , 以满足不同环境下手套对温度自适应调节的需求。该系统采用 STM32F103C8T6 单片机、语音识别播报模块、人体感应模块等进行硬件设计、软件开发和实验验证, 结果表明: 该系统相比传统 PID 控制显著提高了电动车手套对温度控制的精度, 且系统超调量少、鲁棒性强, 对提高不同环境下的实时温控系统的可靠性和提升电动车手套的穿戴舒适性具有重要意义。

**关键词:** 电动车手套; 实时温控系统; 自适应模糊 PID; 语音识别播放; 人体感应

**中图分类号:** TP272 **文献标志码:** A

保暖手套是人们在冬天驾驶电动车的重要辅助工具, 能够有效地提高驾驶舒适性和避免驾驶过程中因手部过冷反应灵敏度下降导致的交通事故<sup>[1]</sup>。而传统电动车保暖手套臃肿、厚重, 不利于驾驶, 因此研究电加热恒温保暖手套, 对提高驾驶电动车的安全性和舒适性具有重要意义<sup>[2]</sup>。

关于温度控制的方法较多, 位式调节控制方法较为简单, 但控制精度较差, 温度控制波动幅值较大<sup>[3]</sup>, 无法对电动车手套的温度准确调节; 神经网络控制方法较为复杂, 对硬件运算能力要求较高, 且成本较高, 无法大规模普遍应用<sup>[4]</sup>; 传统 PID 控制方法的控制参数表现为静态, 无法根据外界环境变化设置不同的控制参数, 且容易超调, 控制精度低, 无法满足电动车行驶过程中手套温度自适应调节的需求<sup>[5]</sup>。

针对上述问题, 本文提出了一种基于自适应模糊 PID 的电动车手套控温方法, 对系统的误差、误差变化率和系统控制参数建立模糊关系, 运用模糊

推理动态调整系统的控制参数, 以满足不同环境下系统精确调节温度对控制参数的要求, 克服行驶速度、气温、风速等因素影响<sup>[6]</sup>, 设计并实现电动车手套的硬件与软件, 通过实验验证本文设计的电动车手套温控系统。

## 1 系统硬件设计

硬件设计总体结构框图如图 1 所示。

本文设计的电动车手套控温系统具备自动感应穿戴、语音交互、循环充电使用以及自适应调节温度等基本功能。系统硬件电路通过保护壳体固定于

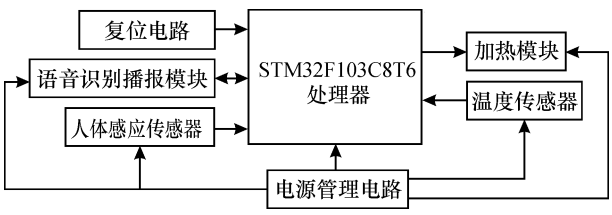


图 1 系统整体硬件结构框图  
Fig. 1 System diagram of overall hardware structure

手套表面, STM32F103C8T6 处理器作为控制核心, 接收人体感应传感器发送的穿戴信息, 自动启动和关闭系统, 并通过语音识别播报模块与用户进行语音交互获取操作命令, 完成调温、加热等操作。该设计主要是通过温度传感器检测的温度数据, 对每个节点进行模糊 PID 计算和分析, 调节 PWM 脉冲输出量, 控制电加热碳纤维发热, 实现自适应调节手套内部温度。系统中电源管理电路为系统的处理器、传感器模块以及加热碳纤维模块等提供额定工作电源, 保证系统正常工作。

1.1 手套温度检测与加热电路设计

手套温度检测与加热电路如图 2 所示。

手套固定于电动车把手, 通过手套上分别靠近手心和手背的面料夹层中的两个独立控温节点对手套内部均匀加热, 控温节点均包括 DS18B20 温度传感器和电加热碳纤维, 通过导线和外部电路连接。DS18B20 是单总线输出数字量的数字温度传感器, 具有多点组网功能, 测量范围 $-55\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 精度可达 $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>。电加热碳纤维是一种导电发热材料, 具有升温迅速、热转化效率高、发热时产生远红外、材质柔软、对人体危害小等优点<sup>[8]</sup>。将两个节点的 DS18B20 数据输出端口并联后与处理器 PBO 端口连接, 同时并联  $5.1\text{ k}\Omega$  上拉电阻, 实现两个 DS18B20 并联组网测温, 稳定数据传送时序电平。每个控温节点的电加热碳纤维和增强型 MOS 管漏极连接, 两个 MOS 管的控制端门极分别和处理器中定时器 2 的通道 1 和通道 2 端口连接, 实现通过 PWM 脉冲控制 MOS 管通断间接控制电加热碳纤维工作

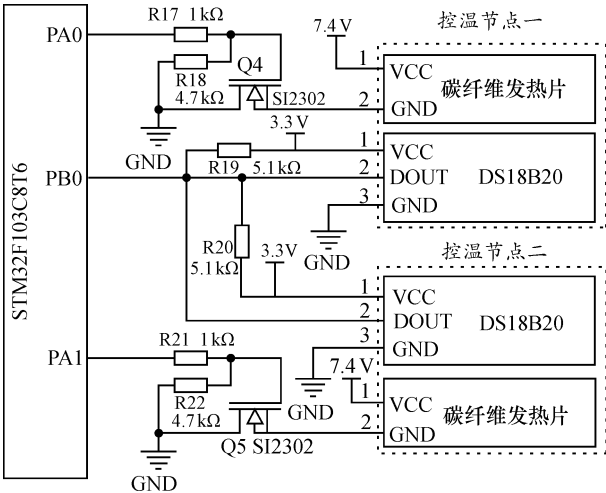


图 2 手套温度检测与加热电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of temperature measurement and heating

状态, 进而控制加热量, 准确调温。

1.2 人体感应检测电路设计

人体感应检测电路采用 HC-SR505 人体检测传感器。HC-SR505 是基于红外线计算的自动控制传感器, 具有灵敏度高、体积小、低电压工作模式等优点。将 HC-SR505 安装于电动车手套内部, 当穿戴手套时, HC-SR505 的红外探头检测到人体辐射的红外信号, 数据输出端口输出高电平; 反之, 当脱下手套时, 输出低电平, 将数据输出端口与处理器 PB1 端口连接, 处理器通过检测 PB1 端口高低电平状态感应穿戴情况, 进而根据穿戴情况自动控制系统的启动和关闭, 使系统更加方便和节能, 人体感应检测电路原理如图 3 所示。

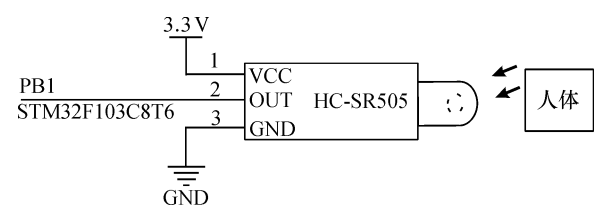


图 3 穿戴感应电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of wearable induction circuit

1.3 语音交互电路设计

语音交互电路采用 LD3320 一体化语音识别播报模块进行语音交互电路设计。LD3320 是 ICRout 公司设计的一款集语音识别和播报功能于一体的语音交互芯片, 该芯片采用了 ICRout 公司特有识别优化算法, 不用预先进行录音和训练就可识别语音, 并且集成了模、数信号相互转换接口, 具有独立的 550 mW 语音播报接口, 轻松驱动喇叭播报, 实现语音交互, 便于单片机开发控制。将该模块与处理器 SPI 总线端口连接, 处理器通过 SPI 总线发送控制指令进行语音文件的播报及接收语音识别信息, 便于驾驶过程中语音交互快速设定和查询手套加热温度, 提高手套的舒适性和行车安全性, 语音交互电路如图 4 所示。

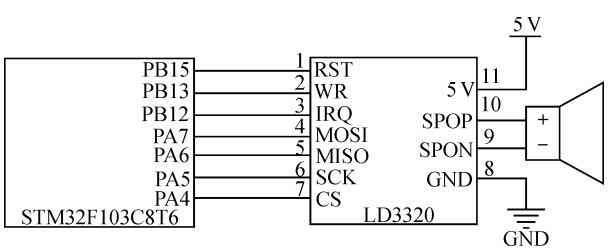


图 4 语音交互电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of voice interaction circuit

1.4 电源管理电路设计

以串联的两颗 3.7 V 锂电池作为电源，则电源的额定电压为 7.4 V，额定电流为 1 A，输出功率为 7.4 W。电源管理电路包括充电电路和 7.4 V、5 及 3.3 V 供电电路，其中充电电路主要是通过 SY6982C 升压充电芯片得到充电电压，再经 HY2213 均衡充电芯片对每颗电池均衡充电，电池采用 USB 充电接口，实现可充电循环使用。手套正常工作电源由电池提供，经 PL7022 锂电池输出保护芯片后得到 7.4 V 供电电压，再由开关电源芯片和线性稳压芯片降压依次得到 5 和 3.3 V 供电电压，为手套的加热碳纤维以及各模块提供工作电压，维持正常运行，电路如图 5 所示。

2 温度自适应模糊控制算法

手套在不同行驶速度、外界温度、风速等外界环境影响下，系统的误差和误差变化率不同，误差较大时应提高系统响应和反应速度，误差和误差变化率都较小时应减少静态误差和提高系统稳定性<sup>[9]</sup>。本系统引入基于自适模糊PID的智能控温

保暖系统，对不同环境下系统误差及误差变化率模糊推理动态调整系统控制参数，以满足不同非线性因素影响下系统精确调节温度对控制参数的要求，从而减少系统的调节时间和超调量，达到最优控制效果，实现多环境下自适应地调节手套温度。

2.1 控制原理

手套温度自适应控制原理是将自适应模糊控制器和 PID 控制器相结合，控制原理如图 6 所示。系统开启后，PID 控制器输出一定值，手套温度上升，手套上的温度传感器不断采集节点温度数据，得到各节点设定温度和实际温度的误差和误差变化率，模糊控制器根据得到的误差和误差变化率及时调整 PID 控制器中  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的值，使得 PID 控制器能够自适应调节加热量，自动调节手套温度<sup>[10]</sup>。

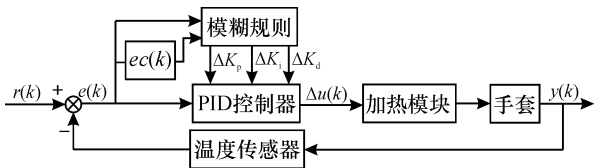


图 6 自适应模糊控制原理图

Fig. 6 Schematic diagram of adaptive fuzzy control

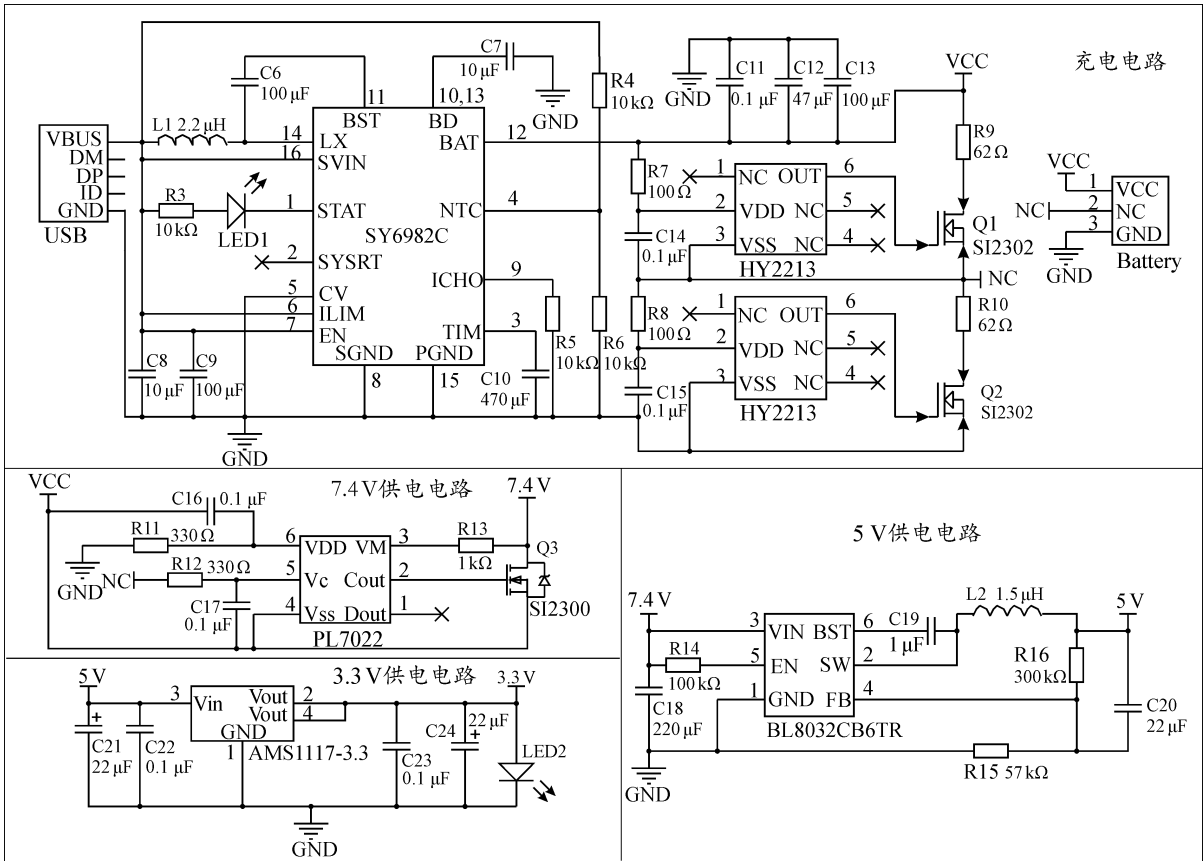


图 5 电源管理电路原理图

Fig. 5 Schematic diagrams of power management circuit

手套设定温度值  $r(k)$  与实际温度值  $y(k)$  之间的误差  $e(k)$  为

$$e(k) = r(k) - y(k).$$

(1)

误差变化率  $ec(k)$  为当前时刻误差值与上一时刻误差之差:

$$ec(k) = e(k) - e(k - 1).$$

(2)

通过式(3)的比例、积分、微分控制规律对手套温度进行连续性调节,使手套温度快速到达设定温度:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right],$$

(3)

式中,  $u(t)$  为 PID 控制器输出量;  $e(t)$  为当前误差量;  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数。对式(3)进行离散化得到式(4),便于单片机程序编程,以及更好地消除稳态误差:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k - 1)],$$

(4)

式中,  $u(k)$  为  $k$  时刻系统输出控制量;  $K_i$  为积分系数;  $K_d$  是微分系数。由式(4)递推得  $k - 1$  时刻系统输出控制量为

$$u(k - 1) = K_p e(k - 1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d [e(k - 1) - e(k - 2)].$$

(5)

式(4)和式(5)相减得到输出控制增量为

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k - 1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)].$$

(6)

2.2 模糊控制器设计

本文设计的模糊控制器先通过隶属函数对手套温度设定值和实际值之间的误差以及误差变化率进行模糊化得到输入量,然后依据制定的模糊规则库对输入量推理出增量系数模糊值,反模糊化得到增量系数的确定值,最后通过增量系数调整系统控制参数。

2.2.1 模糊论域 手套温度系统中输入量为温度误差  $e$  及其变化率  $ec$ ,输出量为比例增量系数  $\Delta K_p$ 、积分增量系数  $\Delta K_i$  以及微分增量系数  $\Delta K_d$ 。根据误差  $e$  和误差变化率  $ec$  的实际变化范围,并对系统温度控制进行综合分析后,将输入量和输出量量化在  $[-6, 6]$ ,得到模糊控制的论域均为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ,以及模糊量子集  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

2.2.2 模糊化 将输入量通过隶属函数从基本量转化模糊量,隶属函数的类型关系到手套控温系统温度响应的稳定性和快速性。为保证系统稳定性和模糊推理准确性,同时又不影响系统控制的灵敏度,对输入变量采用较为集中和尖锐的三角函数,输出变量采用较为稀疏和平坦的高斯函数<sup>[11]</sup>。输入和输出变量隶属函数曲线如图 7 所示。

2.2.3 模糊规则与推理 本文设计系统的控制器参数规则见表 1。在系统运行中控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、

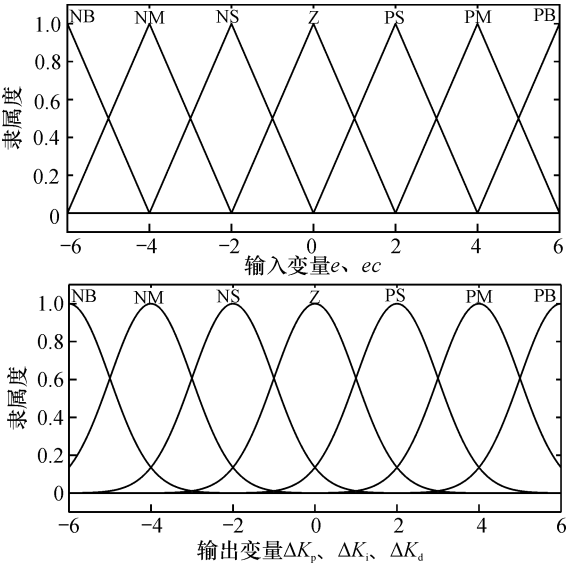


图 7 隶属函数曲线

Fig. 7 Membership function curve

表 1 模糊控制规则  
Table 1 Fuzzy control rules

误差 $e$	温度误差变化率 $ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NS	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB



$K_d$  的作用各不相同，分别能够提高系统响应速度，调节系统的稳态偏差，改善系统的动态性能<sup>[12]</sup>。基于 PID 控制参数的控制特性以及多次模拟电动车手套实际使用环境实验测试后发现：启动时，设定温度和实际温度的误差  $e$  较大， $K_p$  应取较大的值使得手套能够快速升温，满足实际使用中的需求，同时  $K_i$  和  $K_d$  应取小些，防止超调；当手套温度趋近于设定温度时，为消除稳态误差， $K_p$  和  $K_i$  应取大些；当外界环境变化较为明显时，手套温度误差变化率  $ec$  较大， $K_p$  和  $K_d$  宜取大些， $K_i$  取小些，以提高系统的动态响应，抑制环境变化引起的干扰；同理，当外界环境引起的误差  $e$  及其误差变化率  $ec$  为中等大小时，为减少超调，防止手套温度过高， $K_p$  和  $K_i$  要取小些， $K_d$  应取中等大小值。

2.2.4 解模糊 模糊控制器输出为模糊量，不能直接输出 PID 的控制参数，本设计采用重心法(加权平均法)对输出变量解模糊，得到 PID 控制参数增量系数  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的确定值，再通过式(7)得到 PID 控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的值，完成对 PID 控制器参数自适应调整，实现有效自适应控制手套温度，防止超调。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p; \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i; \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d. \end{cases} \quad (7)$$

式中： $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ 、 $K_{d0}$  是 PID 控制器初始值； $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  是调整后的控制参数。

### 3 系统软件设计

#### 3.1 单片机主程序设计

系统控制程序由主程序、6 个单片机初始化子程序、3 个传感器初始化子程序以及 6 个功能子程序组成。其中 6 个单片机初始化子程序分别是单片机时钟初始化子程序、单片机 I/O 端口初始化子程序、单片机中断初始化子程序、单片机定时器初始化子程序、单片机串口初始化子程序、PWM 脉冲初始化子程序；3 个传感器初始化子程序分别是 DS18B20 初始化子程序、HC-SR505 初始化子程序、LD3320 初始化子程序；6 个功能子程序分别是人体感应检测子程序、语音识别子程序、语音播报子程序、中断服务子程序、延时子程序、模糊 PID 计算子程序。编程语言为 C 语言，通过

Keil uVision5 完成程序编写和编译，并使用 J-Link 进行程序下载和仿真调试，完成对电动车手套智能控温保暖系统的总体软件设计和开发，主程序流程如图 8 所示。

#### 3.2 自适应模糊 PID 程序设计

自适应模糊 PID 程序流程如图 9 所示。通过定时器中断服务函数对每个控温节点周期性计算自适应模糊 PID，调整与更新每个节点的控制参数以及 PWM 输出值。程序采用指针结构体对各部分的模糊 PID 运算结果进行保存、传递以及更新，拟

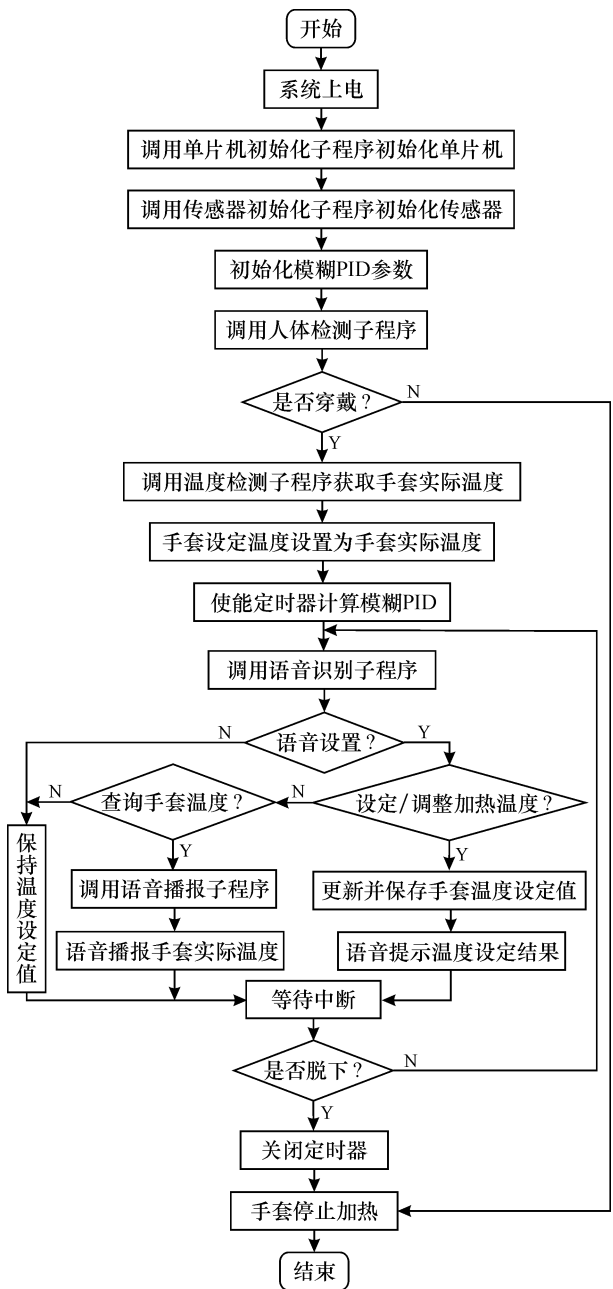


图 8 主程序流程图

Fig. 8 Flow chart of master program

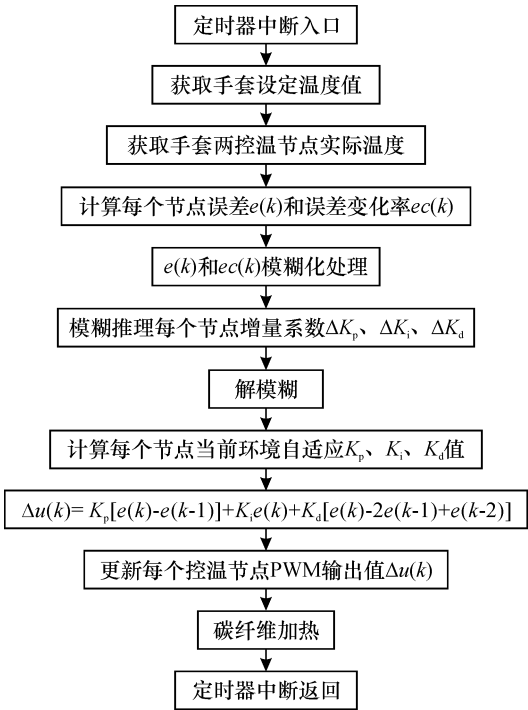


图9 自适应模糊PID程序流程图  
Fig.9 Flow chart of adaptive fuzzy PID program

指针访问传递的是地址，可以减少运算时间，加快运行速度与效率。

4 实验与分析

4.1 实验过程

自适应模糊PID电动车手套控温保暖系统的实物如图10所示。通过空调调节风速以及温度模电动车手套在冬天的使用情况，测试在不同温度、风速环境下手套的控温保暖效果，验证系统的有效性。测试由4人(A、B、C、D)进行，其中,A(实



图10 自适应模糊PID电动车手套控温保暖系统实物  
Fig.10 Electric vehicle gloves of temperature control and warming system based on adaptive fuzzy PID

验员A)负责穿戴传统PID控温系统手套,B(实验员B)负责穿戴自适应模糊PID控温系统手套,C负责调节空调送风速及温度,D负责记录手套温度以及模糊PID控制参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 数据的变化情况。两只手套除控制算法不同外,其余部分全部相同,穿戴手套的两名实验员将手套伸向空调送风口位置进行测试。

对手套温控保暖系统的响应性能进行测试,当前手套内部温度为12℃,实验员通过语音设置手套温度为19℃,设置完成后启动系统,测试并对比传统PID控制系统和本文设计的控制系统的阶跃响应情况。保持手套设定温度19℃不变,通过调节空调送风速度和温度,改变外界干扰环境,测试不同环境下手套控温效果并记录数据。

4.2 实验结果分析

传统PID控制系统和本文设计的控制系统的阶跃响应曲线如图11所示。传统PID控制调节时间和超调量较大,分别为173s和21.4%,而自适应模糊PID控制的调节时间为82s,超调量为4.2%。由此可得,模糊自适应PID控制优于传统PID控制,表明了该系统能够有效避免超调对手套佩戴舒适度的影响。

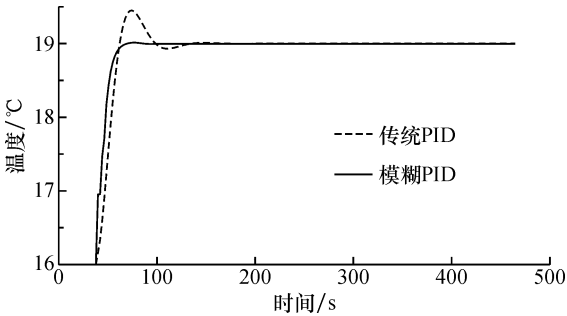


图11 不同算法下系统响应曲线  
Fig.11 System response curves of different algorithms

在不同测试环境下手套温度变化具体数据如表2所示。对比两种手套的测试数据可以发现,自适应模糊PID的控制响应速度快、调节精度高、超调量少、系统调节效果优于传统的PID控制。且在穿戴体验上,在长达1h的测试过程中,实验员B反映在整个测试过程手套温度舒适,没有出现过热情况,手部也未曾出现出汗情况,而实验员A反映在空调调节变化较为明显时,手套温度跳变剧烈,容易过热,测试过程中手部出汗。

综上所述，本文设计的电动车智能控温保暖能够抑制外界变化对控温系统的干扰，使电动车手套具有更好的穿戴舒适感。

表 2 不同算法和测试条件下温度测试数据  
Table 2 Temperature test data of different algorithm and condition

组员	组号	空调送风口温度/℃	空调送风风速挡位	调节时间/s	最大超调量/%
A	1	15	1	166	20.8
	2	15	2	168	19.6
	3	15	3	171	23.5
	4	12	1	173	21.4
	5	12	2	182	23.2
	6	12	3	187	24.3
B	1	15	1	71	3.8
	2	15	2	75	4.2
	3	15	3	72	4.5
	4	12	1	82	4.2
	5	12	2	87	4.6
	6	12	3	90	5.5

5 结 论

本文设计的基于自适应模糊 PID 电动车手套控温保暖系统，感应到外界环境变化时，根据误差和误差变化率的变化，能够及时自动调整 PID 参数，使系统迅速达到设定值并维持稳定，给穿戴用户提供良好的舒适感；硬件上采用了人体检测传感器作为系统感应开关，能够根据人们的穿戴情况自动切换系统工作状态，降低系统的功耗，

并且采用语音交互模块进行人机交互，极大地方便在驾驶过程中快速设定手套参数。综上所述，基于自适应模糊 PID 电动车手套智能控温保暖系统使用效果好，为电动车手套温度的准确控制提供了可行的解决方案。

参考文献：

[1] 马妮妮,许凡菲,卢业虎,等. 温控电热防护手套研制与性能评价 [J]. 现代纺织技术, 2018, 26 (5): 26-33.

[2] 陈桂清,陈冲,徐增波,等. 智能温控服装的开发需求调研及其分析 [J]. 毛纺科技, 2018, 46 (9): 55-60.

[3] 王子剑,李庆川. 基于模糊控制的螺杆挤出机温度控制系统设计 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45 (7): 80-85.

[4] 罗云芳. 一种 BP 网络校正算法的实验室智能温控系统研究 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (20): 84-87, 91.

[5] 温玉春,刘祺君. 基于模糊 PID 的包装机热封切刀温度控制 [J]. 包装工程, 2017, 38 (3): 109-113.

[6] 张宝峰,张耀,朱均超,等. 基于模糊 PID 的高精度温度控制系统 [J]. 传感技术学报, 2019, 32 (9): 1425-1429.

[7] 康燕萍,程小辉,黄鹏. 应用半导体制冷技术的智能水杯设计 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37 (4): 707-712.

[8] 方纾,刘皓,刘莉. 柔性电加热元件与智能加热服装服饰研究进展 [J]. 北京服装学院学报 (自然科学版), 2019, 39 (2): 83-94.

[9] 方永锋,方昱斌. 吹膜机的模糊自整定 PID 温度控制系统的设计及应用 [J]. 高技术通讯, 2017, 27 (2): 156-161.

[10] 王欣峰,任淑萍. 基于模糊 PID 的 AVR 单片机智能温度控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (15): 179-182.

[11] 彭继慎,温禄淳. 基于模糊自适应 PID 的皮带运输速度控制系统 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (11): 168-170.

[12] 陈涛,金仁成,张凤田,等. 基于 MATLAB 的微气压传感器测试系统的气压控制仿真 [J]. 传感技术学报, 2006, 19 (5): 1871-1874.

Temperature control and warming system  
based on adaptive fuzzy PID for electric vehicle gloves

ZHANG Sheng-lan, GAN Li-fu, WANG Diao, ZHANG Lie-ping  
(College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

**Abstract:** In the influence of driving speed, air temperature, wind speed and other nonlinear factors during driving, the traditional PID, with poor ability to adjust adaptively temperature, is difficult to meet the needs of self-adaptive temperature adjustment about the electric vehicle gloves. So a temperature control and thermal insulation system based on adaptive fuzzy PID for electric vehicle gloves is designed. According to the fuzzy rule, the error and the rate of error change between the actual temperature and the set value of gloves are deduced. The increment  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_d$  of  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  are obtained, then the PID control parameter  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  can be further adjusted to meet the needs of adaptive adjusting gloves temperature in different environments. The system adopts STM32F103C8T6 micro controller, voice recognition and player module, human body induction module and other sensors for hardware design, software design and experimental verification. Experimental result shows that compared with traditional PID control system, the new design significantly improves the temperature control accuracy of electric vehicle gloves, with less overshoot and stronger robustness. It is great significance to improve the reliability of the real-time temperature control system in different environments and the comfortable sensation of wearing electric vehicle gloves.

**Key words:** electric vehicle gloves; real-time temperature control system; adaptive fuzzy PID; voice recognition and player; human body induction