

基于 PSO 的模糊 PID 汽车空调控制策略优化^{*}

叶立, 张梦旻, 叶欢, 张文韬, 张志军
(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以人体热舒适性为目标, 综合考虑汽车空调控制系统的复杂性, 对某 SUV6 双蒸发器汽车空调系统的控制策略进行优化。在联合仿真的基础上, 建立了基于模糊 PID 调节的汽车空调闭环控制系统, 引入粒子群优化算法(PSO)优化 PID 控制器的参数, 对风机风速和压缩机开度进行调控。对比 PID、模糊 PID 和 PSO 模糊 PID 调节, 分析得出: PSO 模糊 PID 控制调节没有超调的缺陷, 可以使乘客舱温度更快、更平稳地趋向目标舒适温度, 有效降低汽车能耗, 满足节能减排要求。

关键词: 控制策略; 模糊 PID 控制; 汽车空调; 粒子群优化算法(PSO)

中图分类号: TH 43 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0032-06

doi: 10.12177/emca.2020.153

Fuzzy-PID Control Optimization of Automobile Air Conditioner Based on PSO^{*}

YE Li, ZHANG Mengya, YE Huan, ZHANG Wentao, ZHANG Zhijun

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,
Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the thermal comfort of human body and considering the complexity of air conditioner control system, the control strategy of double-evaporator air conditioning system of SUV6 is optimized. On the basis of joint simulation, the closed-loop control system of automobile air conditioner based on fuzzy-PID control is established. Particle swarm optimization (PSO) is introduced to optimize the parameters of PID controller and regulate the fan speed and compressor opening ratio. Compared with the PID control and the fuzzy-PID control, it is found that the fuzzy-PID control based on PSO can overcome the defect of overshoot, make the temperature in the passenger compartment approach to the target faster and more stably, reduce the temperature control error, effectively reduce the energy consumption of the car, and meet the requirements of energy saving and consumption reduction.

Key words: control strategy; fuzzy-PID control; automobile air conditioner; particle swarm optimization (PSO)

0 引言

随着现代社会家用汽车的普及, 人们对于汽车的经济性、舒适性和安全性提出的要求也越来越高。其中, 影响汽车舒适性的重要指标之一就是乘客舱热舒适性, 具有良好热舒适性的乘客舱环境能

够保证驾乘人员的身心舒适, 并在保障行车安全方面起到了积极作用^[1]。为了满足乘客舱内热舒适性要求, 车室内空气温度、湿度、出风口流速、空气清洁度等因素均需保持在人体舒适度的标准范围之内。汽车空调作为温度调节装置, 在营造良好的热舒适性环境中起到了重要作用。

收稿日期: 2020-08-12; 收到修改稿日期: 2020-09-25

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51736007); 上海理工大学科技发展项目(2018KJFZ179)

作者简介: 叶立(1976—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为传热传质、汽车空调控制、汽车热管理。

张梦旻(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为动力工程、汽车空调控制、汽车热管理。

一般空调通过单片机控制继电器的通断来控制风扇电机的起停,从而达到控制温度的目的,但控制效果比较差,不能满足温度稳定的趋于目标值^[2-3]。为了满足车室内环境的舒适性要求,针对车室温度、鼓风机风量、混合风门开度和压缩机开度等进行控制策略的研究和优化已有报道。文献[4-5]采用数值求解的过程对乘客舱内的温度进行调控,对汽车空调温降有一定的调节作用,但是并未改变超调的而缺陷。文献[6-9]采用模糊PID控制策略对乘客舱内温度进行调控,可以降低原始PID调节的缺陷,但温降不能平稳地趋向目标舒适温度。文献[10-11]分别引入热舒适节能控制算法和粒子群优化算法(PSO)对乘客舱温度变化进行调节,可以使乘客舱温降较快的到达目标舒适温度,但是并没有改善超调的问题。

基于上述研究,本文采用模糊PID控制乘客舱的温度,并引入PSO对模糊PID控制进行优化,改善了超调的缺陷,使乘客舱温度更加稳定地趋向满足乘客需求的舒适温度,同时对降低汽车能耗也有一定的作用,是一种较好的汽车空调控制方法。

1 模型的建立

使用某仿真模拟软件联合建立汽车空调的控制系统,如图1所示。汽车空调控制系统模型分3部分:双蒸发器空调系统、乘客舱系统、监测与控制系统。双蒸发器空调系统包括冷凝器、压缩机、2个膨胀阀、2个蒸发器。图2是双蒸发器空调系统一维模拟图。图3是乘客舱系统一维模拟图。该系统包括人体散热量、电子设备和漏风损失热量、电池包散热量、各个玻璃窗热负荷模型、侧门和顶棚热负荷模型。

监测与控制系统主要是先通过某一维仿真软

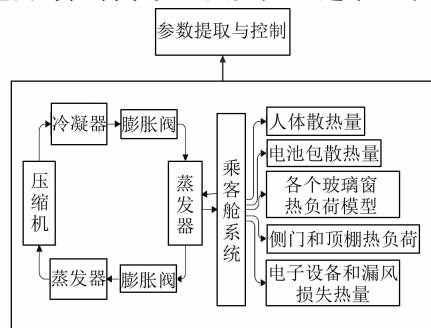


图1 汽车空调控制系统图

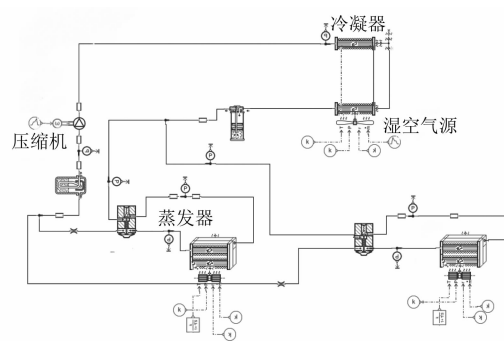


图2 双蒸发器空调系统一维模拟图

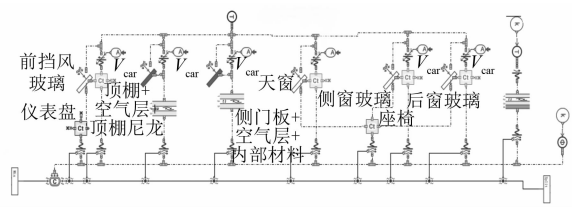


图3 乘客舱系统一维模拟图

件完成前后蒸发器出口温度、前后鼓风机的风量、压缩机的开度和输出功率、进入乘客舱的冷空气温度、乘客舱内部温度等参数的提取,使用S-function函数功能,将所采集的参数连入到Simulink中,然后进行相关的控制操作。

2 控制模型

汽车空调控制系统为多干扰的非线性控制系统,因此本文采用模糊PID控制,并用PSO进行优化,有效提高汽车空调温控系统的总体性能。

2.1 模糊PID控制

用模糊PID控制乘客舱的温度,在构建模糊PID控制时,将系统误差 e 和误差变化率 ec 作为输入量,通过模糊变量语言处理后变为模糊语言变量 E 和 EC ,将模糊控制结果作用在PID控制器上,可以实时地调节PID的 K_p 、 K_i 和 K_d 参数,改善控制调节的效果^[12]。图4是模糊PID控制器结构。

2.2 PSO模糊PID控制

PSO是一种模拟鸟群觅食的群优化算法。算法中,每个粒子均有自己的位置和速度,可以决定飞行的方向和距离,并通过多次迭代找到最优值。每次迭代,粒子通过2种方案来优化自己:(1)粒子自身寻找到最优解,并把这个解称为个体最优

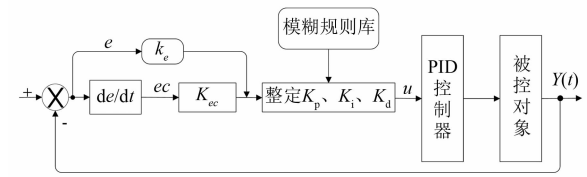


图4 模糊PID控制器结构

值(pBest);(2)整个粒子群找到的最优解,这个最优值称为全局极值gBest。

图5为PSO优化过程。粒子在搜索空间中速度和位置为

$$\begin{cases} v_{i+1} = \omega v_i + c_1 r_1 (P_i - x_i) + c_2 r_2 (G_i - x_i) \\ x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 表示粒子的速度; ω 为惯性因子,取0.6; c_1 、 c_2 为加速常数, $c_1=c_2=2$; r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 区间的随机数; P_i 是个体粒子目前搜索过的最优位置; x 表示粒子的位置; G_i 是整个粒子目前为止搜索的最优位置。

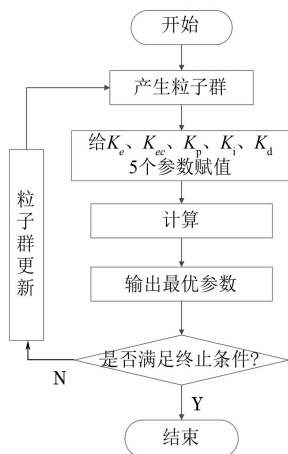


图5 PSO优化过程

本文引入PSO到控制器算法中,通过粒子群算法对模糊PID控制的5个参数 K_e 、 K_{ec} 、 K_p 、 K_i 、 K_d 进行寻优,进而调控乘客舱内的温度。在PSO对5个参数进行寻优的过程将最小适应值设为0.1,速度范围为 $[-1,1]$ 。图6为PSO模糊PID控制过程。

2.3 闭环控制

本文研究的汽车空调系统的调控对象为乘员舱温度,鼓风机风量、混合风门和压缩机的开

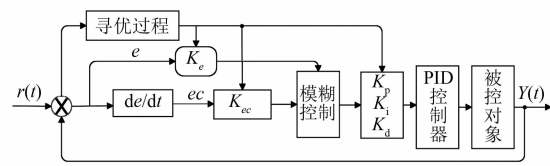


图6 PSO模糊PID控制过程

度是汽车空调制冷时的3个主要控制变量^[13]。空调采用全冷风内循环模式,将鼓风机风量和压缩机开度作为模糊控制的输出控制量。将蒸发器实际出口温度与目标出口温度对比构成闭环系统,对车内实际温度及目标温度的差值进行调控,并将调控的输出用来控制压缩机开度和风机的转速,从而控制车内实际温度尽快达到目标值^[14]。图7为TAO前馈补偿的闭环系统控制图。将车内实时温度作为控制模拟部分的输入量,建立TAO函数(目标出口温度)对整个控制系统进行前馈补偿,帮助构建闭环系统,以解决直接使用车内温度构建闭环系统带来的问题。将所得到的TAO值再作为输入量参与到风机风量控制以及压缩机控制的模糊PID调节中。最终,经过控制器调节后的风量、压缩机开度、压缩机功率以蒸发器出口温度作为一维仿真模拟的输入量。采用TAO函数作前馈补偿预估机制,将车内温度作为闭环反馈值进行处理,防止车内实际温度在设定值处上下波动^[15]。TAO函数为

$$TAO = Ge(T_{set} - T_{car}) + K(T_{set} - T_{amb}) - GL \cdot Solar + T_{set} \cdot GA \quad (2)$$

式中: Ge 为需要冷量系数,取3.5; T_{set} 为设定温度; T_{car} 为初始车内温度; K 为自然散热系数,取0.05; T_{amb} 为室外温度; GL 为光照热系数; $Solar$ 为光照强度; GA 为风机系数。

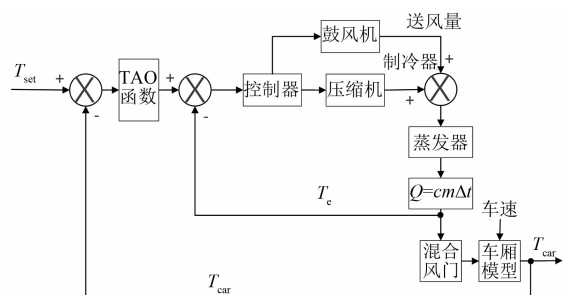


图7 TAO前馈补偿的闭环系统控制图

3 模拟过程及结果分析

3.1 风机的模糊控制

风机转速直接影响车内蒸发器出风口风速。风速越快,空气换热速度越快,车内温度变化迅速,热舒适性不稳定^[16]。本文结合温度变化速度和人体热舒适性,将风机转速划分为6个等级,并逐级增加送风速度。用 Mamdani 型模糊控制器控制风机转速,通过目标温度和实际温度可以得出温度误差 E ,温度误差变化率 EC 是车内温度误差的导数^[17]。将温度误差 E 和温度误差变化率 EC 的模糊论域离散分别划为11个和7个等级, $E = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, $EC = \{-3, -2, 1, 0, 1, 2, 3\}$ ^[18]。因为温度误差和温度误差变化率在模糊语言描述上有相似性,所以选用相同的模糊语言集合: $T(E) = \{\text{负大 (NB)}, \text{负小 (NS)}, \text{零 (Z)}, \text{正小 (PS)}, \text{正大 (PB)}\}$ ^[19]。

用三角形隶属度函数表示 E 和 EC 的中间部分 NS、Z 和 PS,为了保证整个控制系统既快速调控偏差,又不发生超调现象,对边缘部分的 NB 和 PB 采用钟形隶属度函数。输出的隶属度函数如图8、图9所示。

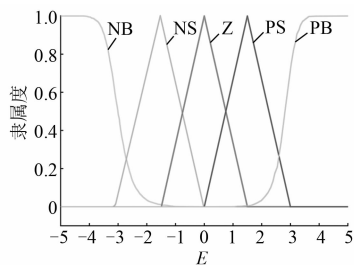


图8 风机温度误差的隶属度函数

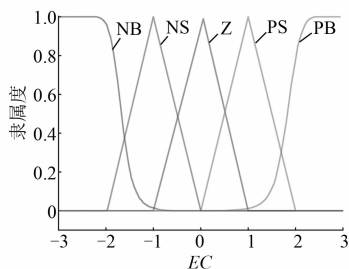


图9 风机温度误差变化率的隶属度函数

结合实际情况,鼓风机划为6个档位,其离散后的区间是0~5,0.5分别为风机最低速和最高速档位,其对应的风机风速的模糊语言集合为

$U = \{\text{零 (ZE)}, \text{正零 (PZ)}, \text{正中 (PM)}, \text{正大 (PB)}\}$ 。风机输出风速采用三角形隶属度函数表示,图10为风机输出风量的隶属度函数曲线。

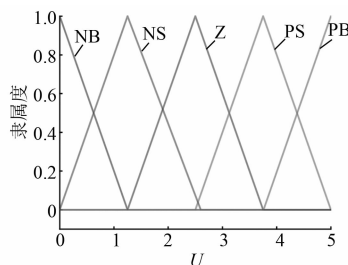


图10 风机输出风量的隶属度函数曲线

温度误差、温度误差率和风机输出风量的隶属函数已经定位完成,则制定风速模糊控制规则。当 E 和 EC 均为正大(PB)时,则车舱温度超过了目标温度,且温度有持续增大的可能,此时需要将鼓风机调至最大档位(PB)来缩小误差,这时空调为制冷模式;当 E 和 EC 均为负大(NB)时,则车舱温度低于目标温度,且差值持续增大,此时需要将鼓风机调至最大档位(PB),空调为制热模式。图11是使用重心法对风机风速模糊控制器的模糊输出量进行清晰化处理后的模拟曲面。

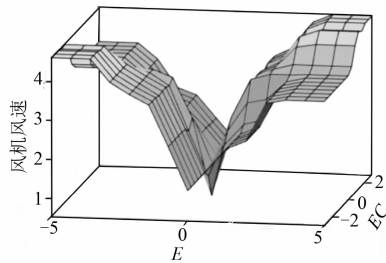


图11 风机风速模糊控制的输出曲面

3.2 压缩机开度的模糊控制

压缩机开度仅有开、闭状态,开和闭在目标温度和实际温度的误差值接近零时切换频繁,这是因为压缩机长时间处于开闭状态会使蒸发器表面结霜和车舱温度上升且温度误差增大的原因,压缩机在运行时要不断切换开闭状态^[20]。考虑到压缩机在稳态处最为敏感的情况,在制定压缩机的温度误差 E 的隶属度函数时要稍作考虑,以确保压缩机的控制状态稳定。图12是压缩机模糊控制温度误差 E 的隶属度函数。在中心0点位置处设置了稍微负(NS)和稍微正(PS)2个三角形函数,压缩机的温度误差隶属度函数在接近中心

处,这是因为此处隶属度函数的敏感度比左右两侧宽边隶属度函数的敏感度高,在控制调节的过程中更加精确^[21]。

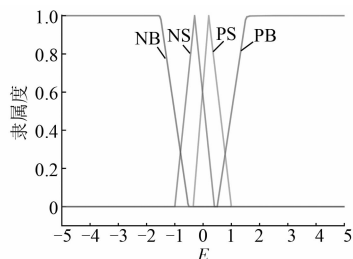


图12 压缩机温度误差 E 的隶属度函数

图13是压缩机的模糊控制温度误差变化率 EC 的隶属度函数。可以看出,中间部分 NS 、 Z 和 PS 采用三角形隶属度函数和边缘部分的 NB 和 PB 采用钟形隶属度函数,使整个控制系统没有出现超调的缺陷,而且可以快速调控偏差。

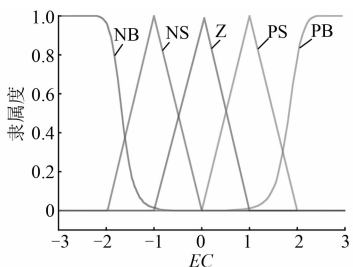


图13 压缩机温度误差变化率 EC 的隶属度函数

本文选用 Sugeno 型模糊控制器控制压缩机开度。由于压缩机仅有开和关状态,则设置二值输出的模糊控制方法,即假定压缩机开起为1,关闭为0。压缩机模糊控制的规则如下:以温度误差值规定:当温度误差值为“大幅小”时,输出1;当温度误差值为“稍微小”时,输出1;当温度误差值为“稍微大”时,输出0;当温度误差值为“大幅大”时制定规则:当误差变化率为“负向大(NB)”时,输出1权值为0.6;当误差变化率为“负向微小(NS)”时,输出1权值为0.2;当误差变化率为“趋于零(ZE)”时,输出0权值为0.2;当误差变化率为“正向微小(PS)”时,输出0权值为0.2;当误差变化率为“正向大(PB)”时,输出0权值为0.6。图14为利用加权平均值法处理压缩机模糊控制规则得到的压缩机模糊控制的输出曲面。

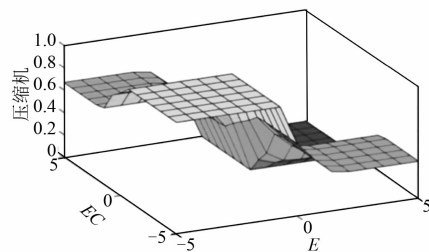


图14 压缩机模糊控制的输出曲面

3.3 PID 与模糊 PID 控制结果分析

对车内温度控制进行仿真,模拟条件为:初始车内温度为 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$,太阳辐射条件为 $1\,000\text{ W/m}^2$,车速为 40 km/h ,总仿真时长为 180 s ,目标车内温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图15为基本PID控制、模糊PID控制和 PSO 模糊PID控制的结果对比。

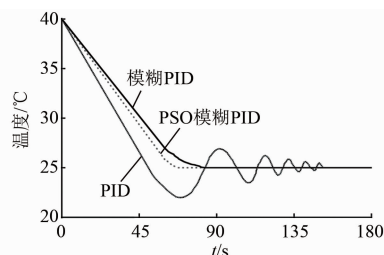


图15 基本PID控制、模糊PID控制和 PSO 模糊PID控制的结果对比

从图15可以看出,PID调节、模糊PID调节与 PSO 模糊PID调节均能够让整个乘员舱温度达到目标舒适温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比3种调节方法:(1)PID在3种调节中温降幅度最大,很快将温度降到了舒适的目标温度,但后期温度变化曲线在目标温度值上下反复波动,这是由于PID调节具有超调的缺陷,不能精确的调控温度,温度在目标温度值处反复波动,使温度不能满足乘客舒适性的需求;(2)模糊PID调节的温降幅度较PID调节的温降幅度小,到达舒适目标温度的时间相对PID调节有延迟,大约需要 78 s ,但模糊PID调节并未出现超调的缺陷,因而可以使车内温度平缓的下降至目标温度,使乘客在不知不觉中达到了舒适性的状态,这种调节更能满足乘客舒适性的需求;(3)PSO模糊PID调节没有超调的缺陷,相较模糊PID调节,其到达舒适的目标温度的时间更短,可以使乘客舱温度更快的到达舒适的目标温度。综合比较3种调节方法,PSO模糊PID调节能够在没有超调的情况下使乘客舱温度较快、

平稳地到达乘客需求的舒适温度,这对汽车的能耗也会降低,显然可以满足工程实际的需求。

4 结 语

本文建立了汽空调系统的车内温度控制仿真模型,设计了闭环控制系统,通过引入 PSO 模糊 PID 控制器,将车内温度作为调节目标,风机风量、压缩机开度、压缩机输出功率及出风口温度作为调节输入量对车内温度进行控制。在一维软件中完成各个控制量的实时检测后,通过 MATLAB/Simulink 建立控制器系统。将 PID 调节、模糊 PID 调节和 PSO 模糊 PID 调节的仿真结果进行对比,发现 PSO 模糊 PID 调节更适合应用在乘客舱温度舒适性控制上,虽然比 PID 调节的时间稍长,但其没有超调这个缺陷,因此使温度更加稳定的趋向舒适目标值,更符合乘客舒适性要求,是一种较好的汽车空调控制方法。

【参考文献】

- [1] 王骞,李顶根,苗华春. 基于模糊逻辑控制的燃料电池汽车能量管理控制策略研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(12): 1347.
- [2] 徐航,马向华,叶银忠. 混合动力汽车驱动控制策略优化研究[J]. 控制工程, 2018, 25(11): 2064.
- [3] 李夔宁,廖强,吕妮娜,等. 汽车空调温度传感器位置及控制参数优化研究[J]. 汽车工程, 2007(11): 1002.
- [4] HUANG Y, KHAJEPOUR A, BAGHERI F, et al. Modelling and optimal energy-saving control of automotive air-conditioning and refrigeration systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(3): 291.
- [5] BRUSEY J, HINTEA D, GAURA E, et al. Reinforcement learning-based thermal comfort control for vehicle cabins[J]. Mechatronics, 2018, 50: 413.
- [6] 何继爱,田亚菲. 模糊自适应整定 PID 控制及其仿真[J]. 甘肃科学学报, 2004, 16(1): 63.
- [7] 李睿钦. 基于 FUZZY-PID 算法的汽车空调控制器研究[D]. 镇江:江苏大学, 2007.
- [8] 徐咏,邬超鹏,谭海峰,等. 基于空调控制器的模糊 PID 控制算法研究与应用[J]. 电脑知识与技术, 2018, 14(9): 269.
- [9] 余明亮,杨维明,赵明俊. 空调自动调温控制系统的设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(7): 57.
- [10] 王清,唐莉萍,欧阳文赋. 基于热舒适度的节能型空调控制算法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2010, 36(1): 57.
- [11] 杨晓庆,左为恒,李昌春. 改进 PSO 算法在中央空调控制系统中的应用[J]. 计算机仿真, 2011, 28(11): 201.
- [12] 曹振华. 变风量空调模糊 PID 控制系统的设计[J]. 洁净与空调技术, 2018(1): 91.
- [13] 杨川,蔡君巍. 基于模糊控制的工艺空调温湿度控制系统的设计[J]. 山东工业技术, 2018(14): 1.
- [14] NG B C, DARUS I Z M, KAMAR H M, et al. Dynamic modeling of an automotive air conditioning system and an auto tuned PID controller using extremum seeking algorithm [C] // 2013 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI), 2013.
- [15] KHAYYAM H. Adaptive intelligent control of vehicle air conditioning system [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 1154.
- [16] ZHANG Q, CANOVA M, RIZZONI G. Sliding mode control of an automotive air conditioning system[C] // 2013 American Control Conference, 2013.
- [17] 周尉杰. 空调变风量控制系统中模糊控制技术研究[J]. 科技创新导报, 2019, 16(4): 102.
- [18] 蔡家明. 汽车空调温度的模糊控制研究[J]. 电子测试, 2017(23): 42.
- [19] 姚堤照,谢长君,曾甜,等. 基于多模糊控制的电混汽车能量管理策略[J]. 汽车工程, 2019, 41(6): 615.
- [20] 蒋志雄. 汽车空调全自动控制系统的分析与研究[D]. 上海:上海交通大学, 2005.
- [21] 王海群,孟令真. 粒子群优化模糊控制在汽车空调温控系统应用[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(2): 91.

欢迎订阅 2021 年《电机与控制应用》

联系地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 12.00 元

全年定价: 144.00 元