

基于新型 PID 算法的整流罩空调控制系统研究

刘雪飞¹, 苏师师², 蒲亮¹, 王帅¹, 闵晓霜¹

(1.中国电子信息产业集团有限公司第六研究所,北京 102209;2.中软信息系统工程有限公司,北京 102209)

摘要: 针对整流罩空调机组工况复杂,温湿度控制的非线性、滞后性、时变性、强耦合等特点,阐述了整流罩空调控制系统结构及机组工作时空气处理过程。在控制算法上,通过分析温湿度控制的干扰因素,研究了传统 PID、专家 PID、模糊自适应 PID 控制原理,提出了一种新型 PID 算法。将新型 PID 算法应用于基于国产 PLC 的整流罩空调机组,运行结果表明,机组能够以高效率、高精度、可调参实时在线控制,满足任务保障要求。

关键词: 整流罩; 空调机组; PID; PLC

中图分类号: TP273

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201156

中文引用格式: 刘雪飞,苏师师,蒲亮,等. 基于新型 PID 算法的整流罩空调控制系统研究[J]. 电子技术应用,2021,47(12):74–78.

英文引用格式: Liu Xuefei, Su Shishi, Kuai Liang, et al. Research on fairing air-conditioning control system based on new PID algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 74–78.

Research on fairing air-conditioning control system based on new PID algorithm

Liu Xuefei¹, Su Shishi², Kuai Liang¹, Wang Shuai¹, Min Xiaoshuang¹

(1.The 6th Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China;

2.CS&S. Information System Engineering Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In view of the complex working conditions of the fairing air conditioning unit, the nonlinearity, hysteresis, time variability, and strong coupling of temperature and humidity control, the structure of the fairing air conditioning control system and the air treatment process when the unit is working are described. In the control algorithm, by analyzing the interference factors of temperature and humidity control, the traditional PID, expert PID and fuzzy adaptive PID control principles are studied, and a new PID algorithm is proposed. The new PID algorithm is applied to the domestically-made PLC-based fairing air-conditioning unit. The operation results show that the unit can achieve real-time online control with high efficiency, high precision, and adjustable parameters to meet the requirements of mission support.

Key words: fairing; air conditioning unit; PID; PLC

0 引言

控制算法的研究一直是整流罩空调机组控制的核心。李佳杰结合 Smith 预估器及模糊 PID 控制技术,实现了预估模糊 PID 控制器^[1];王伟提出用细菌觅食最优化策略对模糊 PID 控制器参数寻优的方法,用于动态控制中央空调冷却水控制系统^[2];王长涛提出粒子群优化 PID^[3];喻锴提出遗传蚁群算法优化控制^[4]。控制算法中,传统 PID 算法^[5-6]、专家 PID 算法^[7-9]、模糊自适应 PID 算法^[10-13]应用较为广泛。常用算法中,专家 PID 算法控制的实质是,基于受控对象和控制规律的各种知识,利用专家经验在考虑参数之间的互联关系后设计 PID 算法的 10 个参数。模糊自适应整定 PID 控制算法是以模糊集合论、模糊数学、模糊语言形式的知识表达和模糊逻辑的规则推理为理论基础的新型计算机控制方法。

优化后算法的共同点是对现场调试人员的经验、暖通空调知识、控制理论知识依赖性太强,且调试难度系数高。为克服专家 PID 算法、模糊自适应整定 PID 算法、蚁群算法的不足之处,本文提出一种新型 PID 算法。

1 整流罩空调机组

整流罩空调控制系统的任务是将回风口和新风混合后的进风处理到所要求的送风状态,送入整流罩,使整流罩内空气的温度、相对湿度、洁净度等参数控制在任务保障需求范围内。机组控制原理如图 1 所示,主要有制冷系统、制热系统、冷水系统、除湿系统、加湿系统。涉及的执行设备包括:6 台压缩机、8 个风阀、4 组前级电加热器、4 组再生电加热器、3 组后级电加热器、进风机、送风机、再生风机、8 个温湿度传感器、1 台电热加湿器、转轮除湿机。

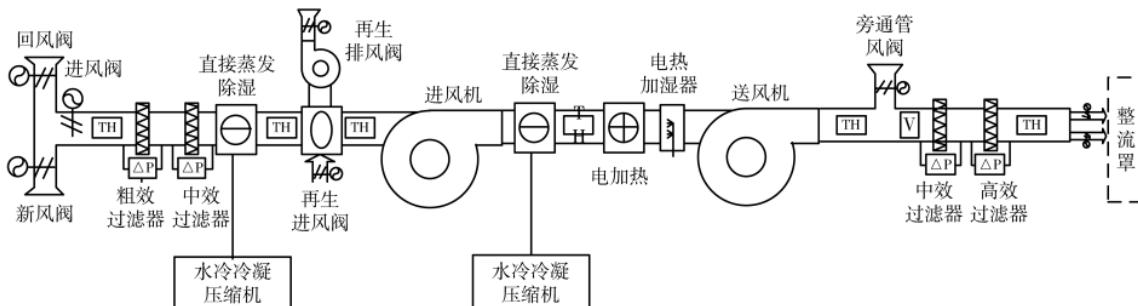


图 1 整流罩空调机组控制原理图

1.1 设计参数

空气处理后送风参数:温度 10~20 ℃可调(控制精度±2 ℃),相对湿度 35%~55%(控制精度±5%),送风量 1 000~4 000 m³/h(可调)。

1.2 空气调节过程

机组运行时,室外空气 W 和大厅空气 N' 混合后状态点为 C ,状态点 C 的混合风经过空气过滤器后,进入表冷器冷却减湿系统,达到机器露点状态 L 。 L 状态点的空气进入转轮除湿系统,控制转轮后含湿量比目标送风状态含湿量小 2,空气状态到达 P 点。 P 点空气经后级压缩机进行减湿降温处理,到达 O 点。然后经过加热器加热至所需的送风状态 Q 。 Q 点进行等焓加湿处理,达到用户送风状态 N ,送入整流罩内。整个处理过程如图 2 所示。

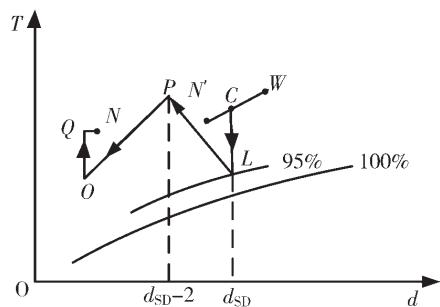


图 2 空气调节过程

1.3 热湿交换过程

空气调节过程实质是电动热备、电热设备、制冷设备与空气热湿交换的过程。

(1) 电动设备

电动机在带动工艺设备进行生产的过程中向机组内空气散发的热量为:

$$Q = 1 000 n_1 n_2 n_3 N / \eta \quad (W) \quad (1)$$

式中, N 为电动设备的安装功率,单位是 kW; η 为电动机效率; n_1 为利用系数; n_2 为同时使用系数; n_3 为负荷系数。

(2) 电热设备

对于机组内的电热设备,按下式计算:

$$Q = 1 000 n_1 n_2 n_3 n_4 N \quad (W) \quad (2)$$

式中, n_4 为考虑排风带走热量的系数。

(3) 表面式冷却器热湿交换过程

表面式冷却器是在整流罩风道空气与紧贴换热器外表面的边界层空气之间的温差和水蒸气分压力差作用下进行的。由传热学可知,换热器的换热量可以写成:

$$Q = K F \Delta t_d \quad (W) \quad (3)$$

式中, K 为传热系数,单位是 W/(m²·℃); F 为传热面积,单位是 m²; Δt_d 为对数平均温差,单位是 ℃。

在不考虑其他附加热阻时,往往把表面式冷却器的传热系数 K 值经验式简化为^[14]:

$$K = \left[\frac{1}{AV_y^m} + \frac{1}{Bw^n} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中, V_y 为空气迎面风速,单位是 m/s; w 为表冷器管内制冷剂流速,单位是 m/s; A 、 B 、 m 、 n 为由实验室得出的系数和指数。

1.4 控制干扰因素

整流罩机组的非线性、滞后性、时变性、强耦合由多种因素造成。对调试过程发现的主要因素进行分析,有助于调试。

(1) 直接干扰因素

在调试过程发现直接干扰因素有漏风率、瞬时冷负荷、电加热器热惰性、转轮除湿机工作原理、压缩机工作特性、直冷器。其中,①转轮除湿机转轮以每小时数转的速度缓慢旋转,潮湿空气由转轮一侧的 3/4 部分进入干燥区。再生空气从转轮另一侧 1/4 部分进入再生区。再生进风量大小、再生电加热器制热量、转轮转速是影响除湿机性能的重要因素。②直冷器的结构(光滑绕片、串片、扎片、二次翻边片)、安装(竖直、水平、倾斜)直接影响空气的扰动、传热性能。③压缩机回油管理功能、短周期控制保护功能、电动机保护功能的设置,会影响制冷系统调节的连续性。

(2) 间接干扰因素

许多被控对象随着负荷变化或受干扰因素影响,其对象热性参数或结构也会发生变化。

2 PID 控制原理

整流罩机组控制系统常用的控制算法有传统 PID 算法、专家 PID 算法、模糊自适应 PID 控制算法。

2.1 专家 PID 控制原理

专家 PID 算法需要设置的参数如表 1 所示。

表 1 专家 PID 算法参数

序号	名称	说明
1	M_1	设定的误差界限
2	M_2	设定的误差界限
3	k_p	增益放大倍数
4	k_i	抑制系数
5	k_d	比例系数
6	k_i	积分系数
7	k_d	微分系数
8	T	采样周期
9	ε	任意正实数
10	f_{\max}	压缩机最大运行频率

令 $e(k)$ 表示目标温度值与当前采样时刻温度值的差值, $\Delta e(k)$ 表示当前误差和前一个采样误差的差值, $u(k)$ 为第 k 次控制器的输出; $u(k-1)$ 为第 $k-1$ 次控制器的输出。以单台压缩机制冷过程介绍专家 PID 控制原理:

当 $|e(k)| > M_1$ 时, 说明制冷误差值很大。此时应考虑开环控制, 即压缩机以合适的大频率 f_{\max} 运行, 以最大速度减小当前环境温度和目标温度的差值。 f_{\max} 应选择得合适, 过大会因机组滞后性, 造成严重超调。

当 $e(k)\Delta e(k) > 0$ 时, 说明制冷误差在朝着增大方向变化, 或者制冷误差为某一常值, 未发生变化。

如果 $|e(k)| \geq M_2$, 说明制冷误差也比较大, 可考虑压缩机以较大的频率运行, 以达到扭转误差朝减小方向变化, 并迅速减小误差, 控制器对压缩机的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \{k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]\} \quad (5)$$

如果 $|e(k)| < M_2$, 说明尽管制冷误差朝增大方向变化, 但误差值并不太大, 可考虑控制器对压缩机实施一般的控制作用, 扭转误差的变化趋势, 使误差朝着减小方向变化, 控制器对压缩机输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) > 0$ 或者 $e(k)=0$ 时, 制冷误差值向减小趋势变化, 或者已经达到平衡状态。此时, 可以考虑采取保持控制器输出不变。

当 $e(k)\Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k)\Delta e(k-1) < 0$, 说明制冷误差处于极值状态。如果此时误差的绝对值较大, 即 $|e(k)| \geq M_2$, 可考虑实时较强的控制作用:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e(k) \quad (7)$$

如果此时误差的绝对值较小, 即 $|e(k)| < M_2$, 可以考虑实时较弱的控制作用:

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e(k) \quad (8)$$

当 $|e(k)| < \varepsilon$ 时, 说明误差的绝对值很小, 此时加入积

分控制, 以减少稳态误差。

2.2 模糊自适应整定 PID 控制原理

本文以送风蒸发器后电加热器控制温度的过程, 介绍模糊自适应 PID 控制原理。自适应模糊 PID 控制器以制热温度误差 e 和误差变化 Δe 作为输入, 利用专家总结的模糊控制规则在线对传统 PID 算法参数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行实时更改, 以达到提高电加热器的控制效果。核心是找出 PID 3 个参数与 e 和 Δe 之间的模糊关系。自适应模糊控制器结构如图 3 所示。

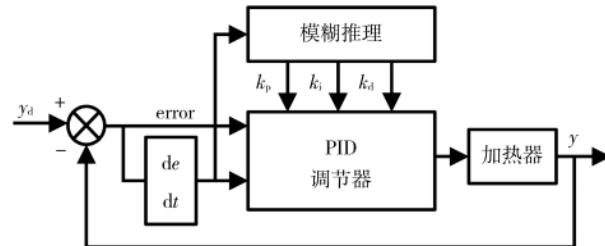


图 3 自适应模糊控制器结构

将蒸发器后温度跟踪误差和误差变化量作为前提, 第 ij 条模糊控制规则的表达形式为^[15]:

$$\text{Rule } ij : \text{IF } e=\mu_i \text{ and } \Delta e=\mu_j \text{ THEN } u=u_{ij} \quad (9)$$

采用乘积推理机, 规则前部分的隶属函数为:

$$f_{ij}=\mu_i(e) \times \mu_j(\Delta e) \quad (10)$$

式中, $\mu_i(e)$ 和 $\mu_j(\Delta e)$ 分别为 e 和 Δe 的隶属度。

采用重心方法进行反模糊化, 得到模糊控制器:

$$u=\frac{\sum_{i,j} f_{ij} u_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (11)$$

式中, u_{ij} 的值由模糊规则表确定。

模糊规则表中每条规则输出 u_{ij} 值可由模糊推理或可根据经验确定。假设 e 和 Δe 各有 3 个隶属函数, 则共有 9 条规则, 模糊规则表的形式如表 2 所示。

表 2 控制规则表

u_{ij}	Δe			
	N	Z	P	
e	N	u_{11}	u_{12}	u_{13}
	Z	u_{21}	u_{22}	u_{23}
	P	u_{31}	u_{32}	u_{33}

2.3 新型 PID 算法

新型 PID 算法沿用了专家 PID 算法分阶段模式和快速减小误差原则、模糊 PID 自整定适应算法简化、增量 PID 计算量小及实时性高的优点。新型 PID 算法的核心是: 第一阶段: 应用公式计算得知理论投入量, 加载到执行设备, 使空气状态以最快的速度达到设定状态附近, 此时 $|e(k)| \leq M$, M 为设定的误差界限。第二阶段: 以简化模

糊自适应 PID 整定，调剂空气状态到设定值，其中 PID 算法是增量式 PID。

下面以前级压缩机的控制方案和后级电加热的控制方案阐述新型 PID 算法。

(1) 压缩机控制

本文以整流罩空调机组前级压缩机控制为例。第一阶段：以空调器焓值法制冷量计算公式得理论制冷量，投入压缩机，使前级蒸发器后空气状态 T_{QJSD} 以最快的速度达到设定状态附近 $T_{QJSD} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。第二阶段：以简化模糊自适应 PID 整定。

计算进风焓值 H_{JF} 和前级设定蒸发器后焓值 H_{QJZFO} 的差值 ΔH ：

$$d = 0.622 \cdot \frac{P_a}{B - P_q} \quad (12)$$

$$H = C_p \cdot t + (2500 + C_p \cdot t) \cdot d \quad (13)$$

其中， P_q 为水蒸气的压力，单位是 P_a ； d 为湿空气的含湿量，单位是 kg/kg_w ； B 为大气压力，单位是 P_a ； C_p 为空气定压比热，单位是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$$\Delta H = H_{JF} - H_{QJZFO} \quad (14)$$

计算所需前级制冷量 Q_L ：

$$Q_L = \frac{L}{3600} \cdot C_p \cdot \Delta H \quad (15)$$

(2) 电加热器控制

本文以整流罩空调机组后级电加热器控制为例。第一阶段：以温差法制热量计算公式得知理论制热量，投入电加热器，使送风空气状态 T_{SFSD} 以最快的速度达到设定状态附近 $T_{SFSD} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。第二阶段：以简化模糊自适应 PID 整定。

计算后级电加热将后级蒸发器后的控制状态调节到送风设定温度时的制热量 Q_R ：

$$Q_R = \alpha \cdot \frac{L}{3600} \cdot C_p \cdot \rho \cdot (T_{SFSD} - T_{HZFO}) \quad (16)$$

$$\rho = 0.003484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{P_a}{T} \quad (17)$$

$$T = 273.15 + t \quad (18)$$

其中， α 为修正系数； ρ 为空气密度，单位是 kg/m^3 ； T 为湿空气的热力学温度，单位是 K。

(3) 简化模糊自适应 PID

对于结构一定的机组，根据式(4)可知，风量设定值的变化是传统 PID 整定困难最大阻碍因素，为了克服调节困难，本文提出简化模糊自适应整定 PID 算法。简化模糊自适应 PID 是在传统自适应模糊整定 PID 算法的基础上，结合整流罩空调机组性能指标风量，把传统 PID 算法的系数 k_p, k_i, k_d 组成矩阵，在运行过程中，依据不同的风量选择适合的 PID 整定系数。

$$\text{PID}_{k_p, k_i, k_d}(L) = \begin{bmatrix} KP_{1000} & KI_{1000} & KD_{1000} \\ KP_{2000} & KI_{2000} & KD_{2000} \\ KP_{3000} & KI_{3000} & KD_{3000} \\ KP_{4000} & KI_{4000} & KD_{4000} \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 试验验证

整流罩空调控制系统设计完成后，应用在某发射站。由专业技术人员对控制系统开机，依照表 3 测试参数改变送风量、送风温度、送风湿度，对现场控制系统进行了历时 8 h 的测试，并拷机试验 72 h。

表 3 测试参数

序号	时间	送风量/(m ³ /h)	送风温度/℃	送风湿度/%
1	11:20	2 800	13	43
2	11:43	2 800	14	43
3	11:58	2 800	15	43
4	12:30	2 800	16	43
5	12:59	2 800	16	46
6	13:13	3 100	16	46
7	13:39	3 100	15	44
8	14:29	3 100	14	42
9	14:49	3 100	13	40
10	15:46	2 800	13	40
11	16:23	3 100	13	40
12	16:33	3 100	14	42

图 4 是电子六所 N 系列 PLC 的上位机组态监控软件 SC-ProView 记录的历时测试曲线。

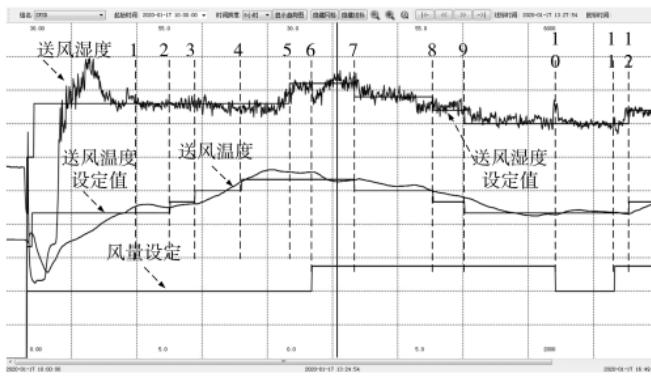


图 4 系统测试结果

由图 4 分析可知，整流罩空调系统开机 1 h 后，空调机组将空气处理到所要求的送风状态风量 2 800 m³/h，温度 13 ℃，相对湿度 43%。按照参数测试表，对空调机组进行了 12 组送风状态的变化，相对湿度控制精度均小于 2%，温度控制精度小于 0.5 ℃。

图 5 是现场机组开机后 1 h 内湿度控制曲线。从图中可知，在 15 min 时刻，因前级压缩机等焓制冷，进风转轮前湿度快速上升达到平衡。后级蒸发器后湿度变化平缓。转轮后湿度曲线的变化反映了转轮除湿系统的控制效果，送风湿度曲线反映了加湿系统控制效果。测试结果为，机组可以在 30 min 中把进风湿度控制到用户指定状态，超调现象不明显。

图 6 是现场机组开机后 1 h 内温度控制曲线。进风温度曲线表示现场混合后温度变化曲线。转轮前温度曲

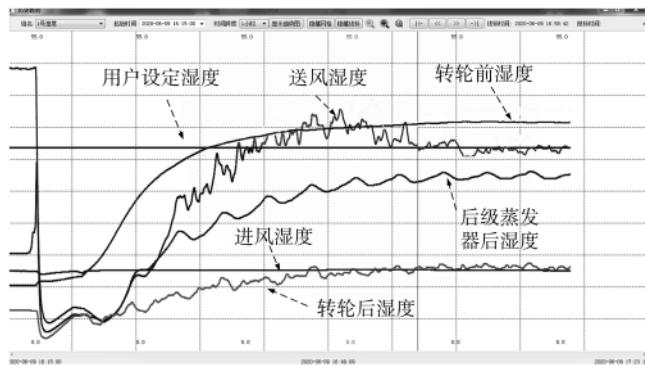


图 5 机组湿度控制曲线

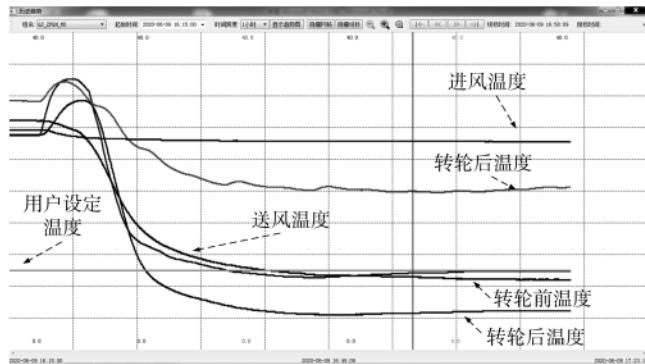


图 6 机组温度控制曲线

线表示前级 3 台压缩机控制效果。转轮后温度反映了转轮除湿系统对进风状态的影响程度,后级蒸发器后的温度曲线反映了后级压缩机控制效果,送风温度曲线是后级 3 级电加热器控制的效果。测试结果为,机组可以在 15 min 中把进风温度控制到用户指定状态,无超调现象。

4 结论

整流罩空调机组应用新型 PID 算法,在一年四季均可具有“快、稳、变”三字特性。“快”,指达到用户设定状态时间短。“稳”,指达到稳定状态后,抗扰动强。“变”,指机组设定温度、湿度、风量可实时调节。新型 PID 算法结合了传统 PID、专家 PID、自适应模糊自整定 PID 的优点,在满足功能需求后,具有易理解、易编程、周期短等特点,尤其对于新学者具有非常好的指导意义、参考价值。

参考文献

- [1] 李佳杰,彭金昇.基于 PID 技术的中央空调房间温度控制策略[J].计量与测试技术,2019,46(5):86-89.

- [2] 王伟,苏双.基于改进模糊 PID 控制器的中央空调冷冻水控制系统[J].信息与电脑,2017(15):60-64.
- [3] 王长涛,郭高超,赵剑明.粒子群优化 PID 在变风量空调系统中的应用[J].自动化仪表,2018,39(2):7-16.
- [4] 喻锴,张九根.中央空调冷冻水系统遗传蚁群算法优化控制研究[J].现代电子技术,2019,42(11):135-139.
- [5] 王丽慧,张继华,张雨蒙.暖通空调工程节能技术的发展与应用[J].中国水运,2020,20(3):125-127.
- [6] 王飞,许文明,张心怡,等.基于可变控制参数的 PID 算法的电子膨胀阀控制方法[J].制冷与空调,2021,21(6):95-97.
- [7] 李相瑞.模糊-专家 PID 控制在空调性能测试台中的应用[J].中国科技信息,2014(11):148-150.
- [8] 李荣昆,周新志,雷印杰,等.基于专家 PID 控制的冷冻水循环系统控制方法改进[J].机电信息,2014(30):146-147,149.
- [9] 程源,颜苏芊,李斌,等.基于专家 PID 的纺织空调自控系统研究[J].棉纺织技术,2020,48(12):30-34.
- [10] 李美丽,闫秀英.基于模糊 PID 的变风量空调末端控制器设计[J].工业控制计算机,2017,30(12):59-63.
- [11] 赵巍,李房云.基于预估模糊 PID 的冰蓄冷空调控制系统[J].现代电子技术,2019,42(20):26-32.
- [12] 杨云鹏,于有生,路向阳.基于模糊 PID 的纺织厂空调温度控制系统设计[J].毛纺科技,2021,49(2):79-82.
- [13] 郭兆明,李树江,张俊.基于模糊 PID 前馈控制的 VRV 空调控制方法研究[J].计算机测量与控制,2020,28(12):65-69.
- [14] 赵荣义,范存养,薛殿华,等.空气调节(第四版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [15] 刘金琨.先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2016.

(收稿日期:2020-11-26)

作者简介:

刘雪飞(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向:工业软件、自动化控制系统、嵌入式软件系统。

苏师师(1992-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向:网络安全、信息系统集成。

蒯亮(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向:计算机技术、指挥控制系统、嵌入式系统。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所