

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108631

# 基于模糊PID的室内空气质量测控系统\*

徐 托 瞿少成 王 安 万洪波 肖 鹏

(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

**摘要:** 针对室内空气质量调节不及时和新风能耗高的问题,设计并实现了一种基于模糊PID的室内空气质量测控系统。首先,以STM32微处理器为核心,结合多种空气质量传感器、通信模块与控制模块,分别实现了数据采集、数据通信与新风控制功能。基于Java Web技术,设计了空气质量软件展示平台。然后,选取室内具有代表性的CO<sub>2</sub>、TVOC作为污染物控制指标,设计了一种模糊PID控制算法。通过将室内空气质量系统简化为一阶纯滞后惯性环节,仿真验证了模糊PID控制器的有效性。最后,实验结果表明该系统调节速度较快,稳定性高,与使用传统控制方式相比新风能耗减少约22.2%,具有一定的应用价值。

**关键词:** 室内空气质量;模糊PID控制;新风能耗;测控系统

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

## Measurement and control system of indoor air quality based on fuzzy PID

Xu Tuo Qu Shaocheng Wang An Wan Hongbo Xiao Peng

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** To address the problems of untimely indoor air quality regulation and high energy consumption of ventilation system, this paper designs and implements a fuzzy PID-based indoor air quality measurement and control system. Firstly, the functions of data collection, data communication and fresh air control are achieved with STM32 microprocessor as the core, combined with various air quality sensors, communication module and control module, respectively. And the air quality software display platform is designed based on Java Web technology. Secondly, a fuzzy PID control algorithm is designed by selecting the representative indoor CO<sub>2</sub> and TVOC as pollutant control indexes. Then, simulation verifies the effectiveness of the fuzzy PID controller by simplifying the ventilation system to a first-order pure hysteresis inertia link. Finally, the experimental results show that compared with the traditional control method, the system not only has fast regulation speed and high stability, but also saves 22.2% of system energy consumption, which has some application value.

**Keywords:** indoor air quality; fuzzy-PID control; energy consumption of air system; measurement and control system

## 0 引 言

室内空气质量的好坏与人体健康息息相关,当室内空气质量较差时容易引起头晕、乏力等不适症状,所以如何保障室内空气质量显得尤为重要<sup>[1]</sup>。目前,开启新风系统进行适当的通风换气是维持室内空气良好最有效、最适用的措施<sup>[2]</sup>。然而,传统的新风系统多依赖人工感知来更新空气,不利于对室内空气质量的及时调节。同时,部分新风系统采用阈值控制或者PID控制来调节风速,控制效果差且能耗高。

为解决室内空气质量调节效果差的问题,国内外学者都展开了相关研究<sup>[3-6]</sup>。文献[4]运用物联网技术与模糊控

制算法对室内空气质量进行实时监控,但其监测指标较少且控制算法稳定性低。文献[6]设计了一种基于物联网的教室模糊AQI监测管理系统,该系统利用新风设备对教室空气质量进行调节,但缺乏一定的智能控制手段。

针对上述问题,设计并实现了一种基于模糊PID的室内空气质量测控系统。首先,该系统运用传感技术,对室内空气中具有代表性的多种环境参数进行实时检测。其次,该系统基于GPRS通信,将采集到的数据存储到云服务器,并在客户端进行展示。最后,该系统以室内CO<sub>2</sub>、TVOC浓度作为污染物控制指标<sup>[7]</sup>,使用模糊PID控制算法对新风设备进行合理调控,既能保障室内空气质量又兼顾节能低碳。

收稿日期:2021-12-20

\* 基金项目:国家自然科学基金(61673190/F030101)项目资助

## 1 系统总体设计

本文所设计的室内空气质量测控系统总体框架可分为 3 层:感知层、传输层、应用层<sup>[8]</sup>,具体结构如图 1 所示。其中,感知层负责实时采集室内外空气中的 CO<sub>2</sub>、PM2.5、TVOC、甲醛、温湿度等参数,并通过串口传输给 STM32 主控系统;传输层负责将串口接收到的

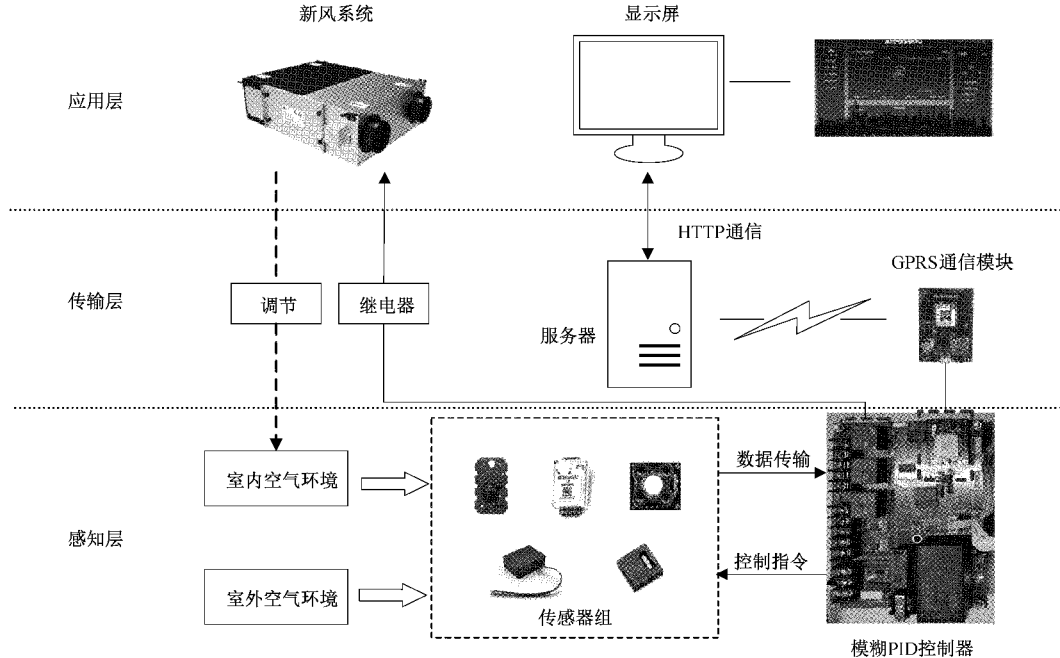


图 1 系统总体框架

## 2 系统硬件设计

硬件系统由 STM32 控制系统、数据采集模块、数据通信模块、新风控制模块 4 部分组成,如图 2 所示。

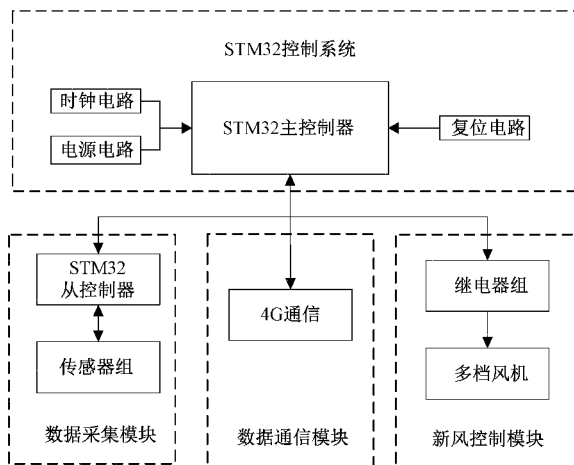


图 2 系统硬件框图

图 2 中,STM32 控制系统由 STM32 主控制器、时钟电路、电源电路、复位电路组成;数据采集模块由 STM32

数据进行一定处理,转换成 16 进制后通过 GPRS 通信传输给服务器,服务器对该数据进行解析后存储在数据库中;应用层中,客户端既可以对空气质量数据进行实时展示,也可以远程控制硬件设备。同时,根据室内污染指数实际值与期望值的偏差,STM32 主控系统通过模糊 PID 算法控制继电器的开关,从而调节新风设备风速,对室内空气质量进行改善。

从控制器、甲醛气体传感器、TVOC 有机物传感器、温湿度传感器、PM2.5、CO<sub>2</sub> 气体传感器组成。各传感器的型号、测量范围如表 1 所示;数据通信模块使用 Air202 进行 4G 通信;新风控制模块通过 PWM 波驱动多个继电器控制新风设备风速,从而提高室内空气质量。

表 1 传感器参数

传感器类型	型号	测量范围
温湿度	SHT20	-40 °C~125 °C/0~100 %RH
CO <sub>2</sub>	S8-0053	0~2 000 ppm
甲醛	WZ-S-K	0~2 000 ppb
TVOC	MICS-VZ-89TE	0~1 000 ppb
PM2.5	PMS5003	0~500 μg/m <sup>3</sup>

## 3 模糊 PID 控制器的设计

传统 PID 控制算法利用系统输入量与期望值偏差的比例、积分以及微分环节,计算出控制量,从而控制相应对象<sup>[9]</sup>,其计算公式为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中： $u(t)$ 表示  $t$  时刻对应的控制量； $k_p$  为比例系数，可以加快系统的收敛速度； $k_i$  为积分系数，可以抑制静态误差； $k_d$  为微分系数，可以提前预知偏差的变化，从而减少超调。

PID 控制算法通过组合三者优势，可以优化控制效果，其控制性能与 3 个参数息息相关<sup>[10]</sup>。然而，室内空气质量测控系统复杂多变，既要考虑室内通风量，又要考虑人员的流动性，不利于对其建立准确的数学模型，从而确定相应的控制参数<sup>[11]</sup>。因此，需要引入模糊控制算法。

作为智能控制的重要成员，模糊控制常用于具有不确定性、难以建立数学模型的系统<sup>[12]</sup>。将 PID 控制算法与模糊控制算法相结合，即为模糊 PID 控制算法。模糊 PID 控制算法在运行时，通过观察实际值与期望值的偏差  $e$  与其变

化率  $ec$ ，可以实时调整  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ ，从而提高算法在应对复杂系统时的控制性能<sup>[13]</sup>。因此，模糊 PID 控制算法兼具模糊控制以及 PID 控制的优点，不仅稳定性好，而且实时性高，适用于较复杂的非线性系统，如室内空气质量测控系统。

### 3.1 控制器的结构设计

室内空气质量测控系统的模糊 PID 控制器主要由模糊控制器、PID 控制器两部分组成，具体结构如图 3 所示。其中， $e$  为室内污染指数实际值  $y$  与期望值  $r$  的偏差，即  $e=r-y$ 。 $ec$  为偏差变化率， $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  为 PID 控制器参数的增量。模糊控制器根据其输入  $e$ 、 $ec$  对 PID 控制器的 3 个控制参数进行整定，以满足不同  $e$  和  $ec$  对控制参数的不同需求。

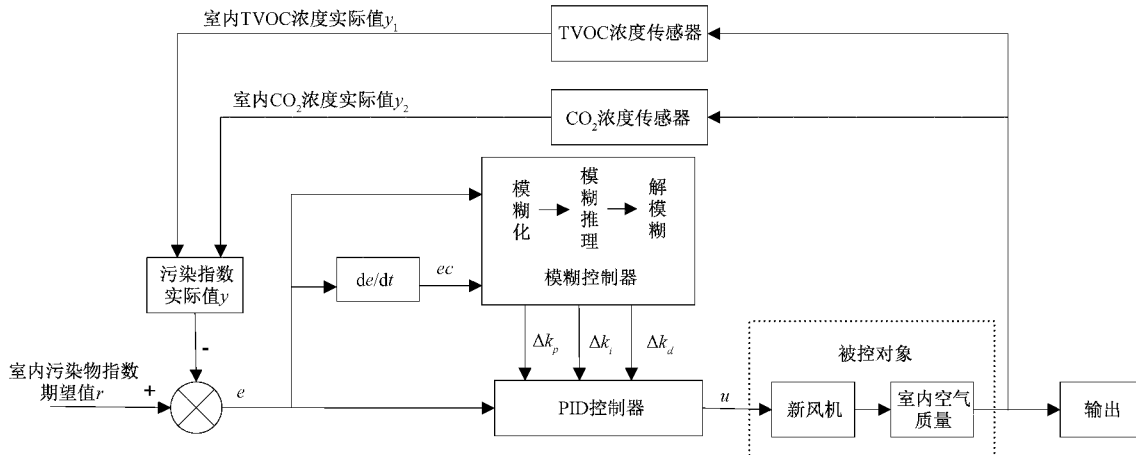


图 3 模糊 PID 控制器结构

为了平衡  $CO_2$  与 TVOC 浓度参数的影响，同时为了简化计算，将  $r$  与  $y$  设为如下值：

$$\begin{cases} r = 0 \\ y = \max\left\{\frac{y_1 - y_{10}}{y_{10}}, \frac{y_2 - y_{20}}{y_{20}}\right\} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $y_1$  表示  $CO_2$  浓度实际值，范围为  $0 \sim 2\,000$  ppm； $y_2$  表示 TVOC 浓度实际值，范围为  $0 \sim 1.2$  mg/m<sup>3</sup>，实测超过此范围按最大值处理； $y_{10}$ 、 $y_{20}$  分别为室内  $CO_2$  浓度、TVOC 浓度的期望值。《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)中规定，标准状态下室内  $CO_2$  浓度不得超过 1 000 ppm、TVOC 浓度不得超过 0.6 mg/m<sup>3</sup>。因此可知， $y_{10}=1\,000$  ppm、 $y_{20}=0.6$  mg/m<sup>3</sup>， $y$  的范围为  $[-1, 1]$ ，其值小于 0 时表示室内  $CO_2$  浓度、TVOC 浓度均已降到标准值以下。

### 3.2 模糊化处理

结合实际情况，对  $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  进行模糊化处理。定义  $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的物理论域分别为  $[-1, 1]$ 、 $[-0.2, 0.2]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.15, 0.15]$ 、 $[-0.9, 0.9]$ 。同时，将上述变量的模糊论域均设为  $[-3, 3]$ 。因此可算得  $e$ 、 $ec$  的量化因子分别为 3、15， $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的比例因子分别为 0.1、0.05、0.3。

模糊子集设定为常规的 7 个等级<sup>[14]</sup>，分别是正大 (PB)、正中 (PM)、正小 (PS)、零 (ZO)、负小 (NS)、负中 (NM)、负大 (NB)。模糊控制器所有变量皆采用三角形函数作为隶属度函数，其函数曲线如图 4 所示。其中，横坐标为变量对应的模糊论域；纵坐标为隶属度，表示模糊论域中的模糊量隶属于某个模糊子集的概率。

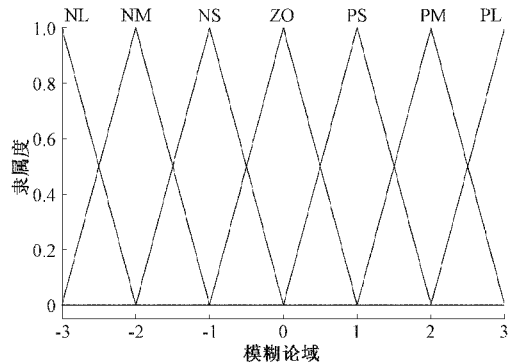


图 4 各变量的隶属度函数曲线

### 3.3 模糊控制规则

模糊控制规则需要完整地反映出模糊控制器在控制过程中出现的各种情况，是整个模糊控制器的核心。

参考文献[15],同时基于对新风系统的长期操作经验,制定  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的模糊控制规则如表 2~4 所示。

表 2  $\Delta k_p$  的模糊规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3  $\Delta k_i$  的模糊规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

### 3.4 解模糊

使用加权平均法对最后得到的模糊输出量进行解模

表 4  $\Delta k_d$  的模糊规则

$e$	$ec$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

糊,从而对  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  进行自整定,自整定规则为:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_{p0}$ 、 $k_{i0}$ 、 $k_{d0}$  为一个采样周期前的 PID 参数; $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  为解模糊后的 PID 参数增量; $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  为更新后的 PID 参数。

## 4 系统仿真与测试

### 4.1 Simulink 仿真实验

将被控对象简化为一阶纯滞后惯性环节<sup>[16]</sup>,利用 MATLAB 自带的系统辨识工具箱可确定其系统函数如下:

$$G(s) = \frac{1.9}{75.3s+1} e^{-0.5s} \quad (4)$$

使用 Simulink 工具箱对所设计的模糊 PID 控制器与经典 PID 控制器进行同时仿真如图 5 所示。

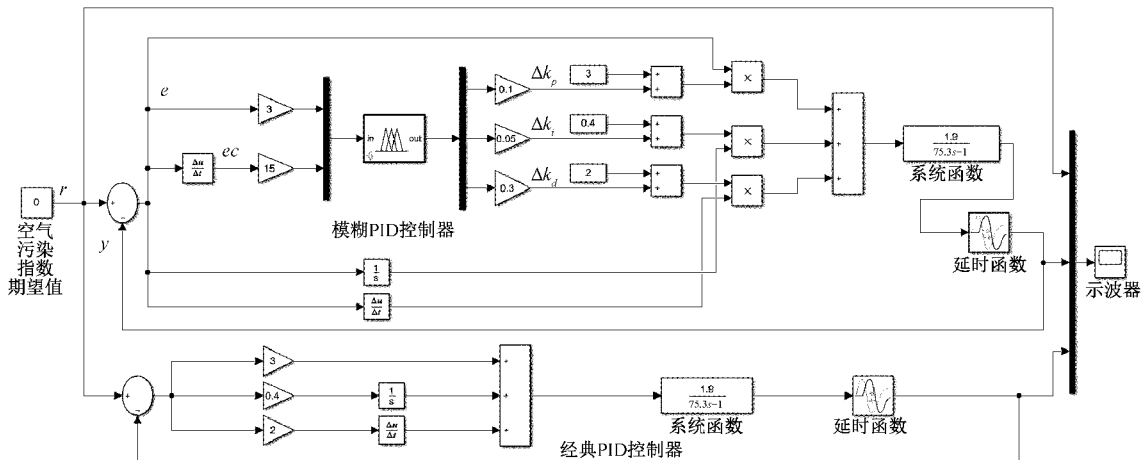


图 5 系统控制器仿真

将室内污染物指数的初始值设为 1,期望值设为 0,仿真结果如图 6 所示。

由仿真结果可知,两种控制算法的上升时间、超调量、调节时间对比如表 5 所示。

由表 5 可知,模糊 PID 控制算法比经典 PID 控制算法

上升时间减少了 3 s,并且超调量减少了 22.6%,同时提前 60 s 到达稳定状态,即模糊 PID 控制算法响应速度更快、稳定性更高。

### 4.2 系统测试

将该系统置于武汉市洪山区某办公室内进行测试。

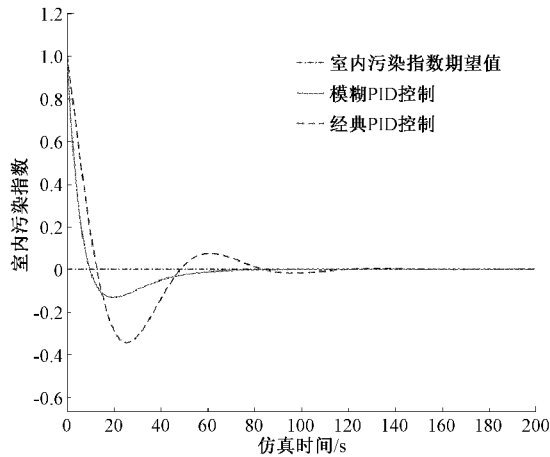


图 6 仿真结果

表 5 仿真结果分析

性能指标	方法	
	模糊 PID	经典 PID
上升时间 $t_r/s$	8	11
超调量 $\sigma/\%$	11.5	34.1
调节时间 $t_s/s$	80	140

测试耗时两周计 10 个工作日,控制器前 5 日使用经典 PID 控制算法,后 5 日使用模糊 PID 控制算法。上午 10:00 时室内污染物浓度达到高峰,打开新风系统对室内空气质量进行调节。系统硬件实物如图 7 所示,主要包括数据采集、数据通信、新风控制、电源等模块。

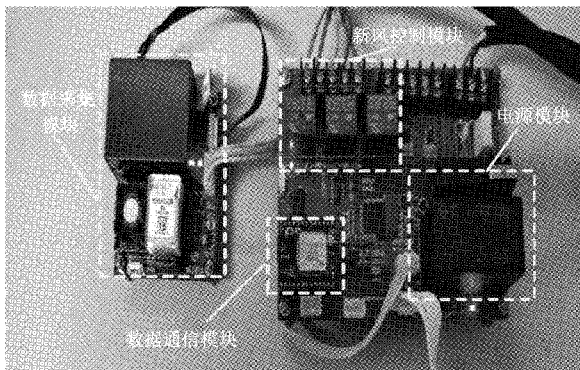


图 7 系统硬件实物

空气质量客户端展示效果如图 8 所示,主要包括设备选择、设备远程控制、空气质量展示等模块。

由图 8 可知,该系统运行稳定,能实时监测室内外的多种环境参数。选取外部情况相近的两天,对比分析不同控制算法对系统性能的影响,测试结果如图 9 所示。

由图 9 可知,使用模糊 PID 控制算法后,系统能更快地将室内污染指数降低到期望值 0 附近,并且稳定性更高。

通过对比分析,系统的新风能耗如图 10 所示。前 5 日

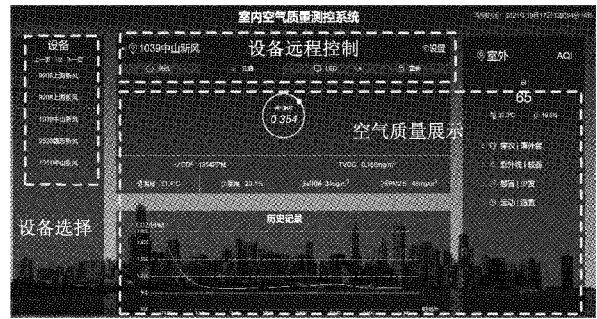


图 8 空气质量客户端展示

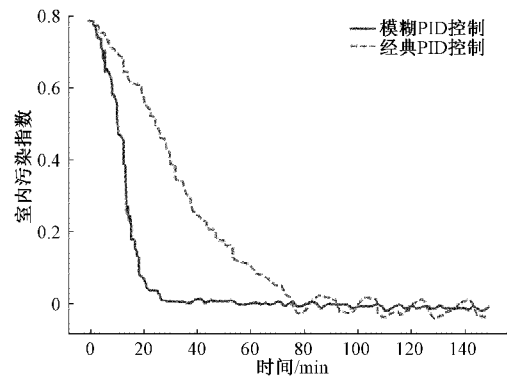


图 9 实际测试结果

使用经典 PID 控制算法后,新风系统日均能耗约为  $0.9 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ;后 5 日使用模糊 PID 控制算法后,新风系统日均能耗约为  $0.7 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。显而易见,对比经典 PID 控制算法,所设计的模糊 PID 控制算法使得新风系统日均能耗减少了  $0.2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,节能约 22.2%。

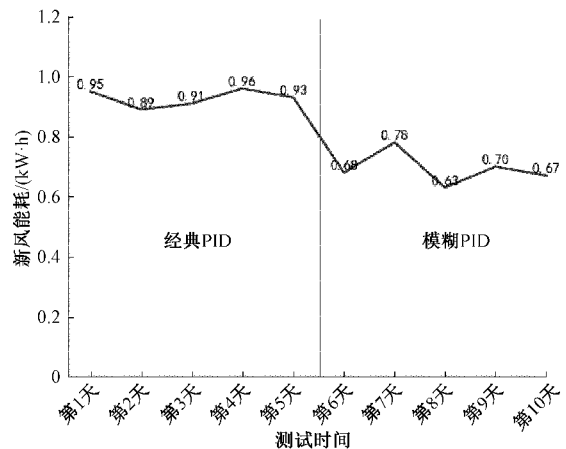


图 10 系统新风能耗

## 5 结 论

为了及时调节室内空气质量,同时降低新风能耗,设计并实现了一种基于模糊 PID 的室内空气质量测控系统。该系统运用嵌入式技术对室内外的多种环境参数进行实

时监测,同时基于模糊 PID 控制算法对新风系统进行合理调控,有效解决了室内空气质量调节不及时且新风能耗高的问题。测试结果表明,该系统稳定性高、实用性强,有一定的推广价值。然而,模糊 PID 控制算法的模糊规则制定和参数范围选取多依赖人工经验,具有一定的误差。下一步工作可以考虑将神经网络、粒子群等算法应用于该系统中,以提高系统的整体性能。

### 参考文献

- [1] 陈双叶,徐文政,丁双春,等. 智能家居室内空气质量检测、评价与监控系统设计[J]. 信息技术,2016,10(3):49-56.
- [2] 尚闯,况彩菱,肖大乔,等. 基于室内 CO<sub>2</sub> 浓度标准值的临界新风量研究[J]. 环境与健康杂志,2016,33(7):617-621.
- [3] 董玉德,黄开,金运掌,等. 室内柜式空气净化器嵌入式系统的设计[J]. 电子测量技术,2013,36(3):62-66.
- [4] PRADITYO F, SURANTHA N. Indoor air quality monitoring system with fuzzy logic control based on IOT [J]. International Journal of Scientific and Technology Research, 2019, 8(8): 1824-1829.
- [5] 牛润萍,范莹莹,孟富强,等. 新风系统在北京地区的运行控制策略分析[J]. 建筑科学,2021,37(6):36-41.
- [6] 毛文琪,瞿少成,赵亮,等. 基于物联网的教室模糊 AQI 监测管理系统[J]. 电子测量技术,2021,44(3):160-164.
- [7] 毕浩桐,杨友良,邝文君,等. 住宅新风系统的控制仿真[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2018,40(3):107-111.
- [8] 龚瑞昆,田野. 模糊控制在 ZigBee 物联网智慧农业大棚中的应用[J]. 现代电子技术,2020,43(8):93-96,100.
- [9] CONG X R, ZHAO C. PID control of uncertain nonlinear stochastic systems with state observer[J]. Science China (Information Sciences), 2021, 64(9): 139-150.
- [10] ZENG Z Z, CHEN Z Y. On control theory of PID and auto-coupling PID[J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(12): 2654-2662.
- [11] 吕晓慧,张冷,徐秀,等. 基于室内 PM2.5 控制和节能的通风策略探讨[J]. 环境工程学报,2017,11(7):4169-4175.
- [12] 徐娟,陈时桢,何烺剑,等. 基于模糊 PID 的平衡头自适应控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(6):895-902.
- [13] 韦宏利,周建波,王晴悦,等. 基于模糊 PID 的温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(9):111-116.
- [14] 周向阳,贾媛. 航空遥感惯性稳定平台模糊/PID 复合控制[J]. 仪器仪表学报,2016,37(11):2545-2554.
- [15] 张卫锋,张灿祥,刘致君. 基于模糊 PID 算法控制的大蒜储藏室通风系统的研究[J]. 计算机与数字工程,2021,49(5):896-901,970.
- [16] OYE T T, GUPTA N, GOH K, et al. Theoretical assessment of sustainability principles for renewable smart air-conditioning[J]. Environmental Management and Sustainable Development, 2020, 9(3):18-46.

### 作者简介

徐托,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统与应用。

E-mail:962397301@qq.com

瞿少成,工学博士,教授,主要研究方向为智能信息处理与非线性控制技术。

E-mail:qushaocheng@mail.ccnuc.edu.cn