

文章编号: 2095-2163(2022)01-0074-06

中图分类号: TP29

文献标志码: A

# 中央空调表冷阀自动控制方法改进

王明菱, 李增光, 孙树国, 代益鹏, 杨文

(西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

**摘要:** 工业生产厂房的中央空调在制冷过程中普遍采用增量式或位置式 PID 控制方法, 通过表冷阀开度直接控制送风温度。但是这种控制方式存在一定的滞后性, 而且为了避免剧烈震荡, 会将  $P$  系数调得尽量小, 导致整个系统反应慢, 首次启动时间长。虽然有人提出了分段控制和限制积分等优化方案, 但是这些方案高度依赖软件开发者的经验, 不具有普适性。本文提出了一种新的控制思路, 以表冷器内的水温为控制对象, 采用 P+PI 间接控制空气温度。在某厂房扩建空调控制软件项目实践中证明, 对比通过阀门开度直接控制空气温度, P+PI 间接控制器的精度更高, 震荡更小, 而且最内环采用 P 控制能够避免嵌套过多导致意料之外的共振。

**关键词:** 中央空调; 表冷器; PID 控制; 间接控制

## Improvement of automatic control method for surface cooling valve of central air-conditioning

WANG Mingling, LI Zengguang, SUN Shuguo, DAI Yipeng, YANG Wen

(Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan 615000, China)

**[Abstract]** The central air-conditioning of industrial production plants generally adopts incremental or positional PID control methods in the refrigeration process, and directly controls the supply air temperature through the opening of the surface cooling valve. However, this control method has a certain hysteresis, and in order to avoid violent oscillations, the  $P$  coefficient will be adjusted as small as possible, resulting in slow response of the entire system and a long first start-up time. Although some people have proposed optimization schemes such as segmented control and restricted integration, these schemes are highly dependent on the experience of software developers and are not universal. Based on this background, this paper proposes a new control idea, taking the water temperature in the surface cooler as the control object, and using P+PI to indirectly control the air temperature. In the practice of a plant expansion air conditioning control software project, it is proved that the P+PI indirect controller has higher accuracy and less vibration than the direct control of the air temperature through the valve opening. Moreover, the use of P control in the innermost loop can avoid unexpected resonance caused by excessive nesting.

**[Key words]** central air conditioning; surface cooler; PID control; indirect control

## 0 引言

工业生产厂房内部的中央空调一般采用表冷器对空气进行降温, 控制方式通常为 PID 控制。文献 [1] 对中央空调表冷器进行物理仿真建模, 同时提出了模糊 PID 控制算法。然而模糊 PID 算法本质上仍属于 PID 算法的范畴, 主要优势在于即使系统随着时间的推移发生轻微变化, 其控制效果仍能收敛至最优的 PID 参数, 不需要重新整定参数, 因此其总体优化效果不可能比在最优的 PID 参数取值下更好。本文不对 PID 参数本身进行优化, 而是通过增加 PID 嵌套的环数来优化控制算法, 提出了一种 P+PI 间接控制方法, 通过建立仿真模型论证了该方法的可行性, 并将其应用在某厂房中央空调控制软件项目中, 取得了满意的控制效果。

## 1 表冷器物理仿真模型简述

假设空调运行在干工况下, 忽略表冷器的析湿效应。在微分时间  $dt$  内, 表冷器内部的换热方程如式 (1) 和式 (2):

$$c_a M_a d \frac{T_{ai} + T_{ao}}{2} = c_a m_a (T_{ai} - T_{ao}) dt - fk \Delta T_m dt \quad (1)$$

$$c_w M_w d \frac{T_{wi} + T_{wo}}{2} = c_w m_w (T_{wi} - T_{wo}) dt + fk \Delta T_m dt \quad (2)$$

根据经验公式, 传热温差  $\Delta T_m$  在  $\frac{T_{ai} - T_{wi}}{T_{ao} - T_{wo}} \leq 2$  时, 取值为  $\frac{(T_{ai} - T_{wi}) - (T_{ao} - T_{wo})}{2}$ ; 在  $\frac{T_{ai} - T_{wi}}{T_{ao} - T_{wo}}$

**作者简介:** 王明菱(1994-), 男, 学士, 助理工程师, 主要研究方向: 工业自动化控制、电力电器、空调工程。

**收稿日期:** 2021-10-08

> 2 时, 取值为  $\frac{(T_{ai} - T_{wi}) - (T_{ao} - T_{wo})}{\ln \frac{T_{ai} - T_{wi}}{T_{ao} - T_{wo}}}$ ; 换热系数

$k$  取值为  $\frac{1}{A V_y \varepsilon^b} + \frac{1}{B \omega^c}$ 。

表冷器特性参数取 JW30-4 型 8 排表面冷却器的经验参数, 见表 1<sup>[1-2]</sup>。

表 1 表冷器特性参数取值

Tab. 1 The value of the characteristic parameter of the surface cooler

名称	符号	数据	单位
换热面积	$F$	267.2	$m^2$
空气质量	$M_a$	20	kg
空气流量上限	$m_a$	24 000	kg/h
空气定压比热	$c_a$	1.004	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
表冷器迎风面积	$F_a$	1.87	$m^2$
空气密度	$\rho_a$	1.293	$kg/m^3$
冷却水质量	$M_w$	100	kg
冷却水流量上限	$m_w$	30 000	kg/h
冷却水定压比热	$c_w$	4.2	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
通水截面积	$f$	0.004 07	$m^2$
冷却水密度	$\rho_w$	1.0	$kg/m^3$
换热系数辅助量 A	$A$	35.5 <sup>[2]</sup>	-
换热系数辅助量 B	$B$	353.6 <sup>[2]</sup>	-
换热系数辅助量 a	$a$	0.58 <sup>[2]</sup>	-
换热系数辅助量 b	$b$	1.0 <sup>[2]</sup>	-
换热系数辅助量 c	$c$	0.8 <sup>[2]</sup>	-
析湿系数	$\varepsilon$	1	-

使用 Simulink 工具对于工况下表冷器换热方程进行仿真, 模型如图 1 所示, 模型中传热温差和换热系数的计算模块, 如图 2 和图 3 所示。

## 2 传统控制方法简述

### 2.1 PID 算法

#### 2.1.1 位置式 PID 算法

送风温度的设定值为  $r(t)$ , 实际值为  $y(t)$ , 偏差值为  $e(t) = r(t) - y(t)$ 。于是有 PID 公式(3):

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

其中,  $K_p, K_I, K_D$  分别为比例、积分、微分系数,  $u(t)$  为表冷三通阀的需求开度。

对公式(3)离散化, 可得式(4):

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4)$$

其中,  $T_I = \frac{K_p}{K_I}$ ;  $T_D = \frac{K_D}{K_p}$ ;  $T$  是离散化后的采样周期。于是有公式(5):

$$u(k) = K_p e(k) + K_I T \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

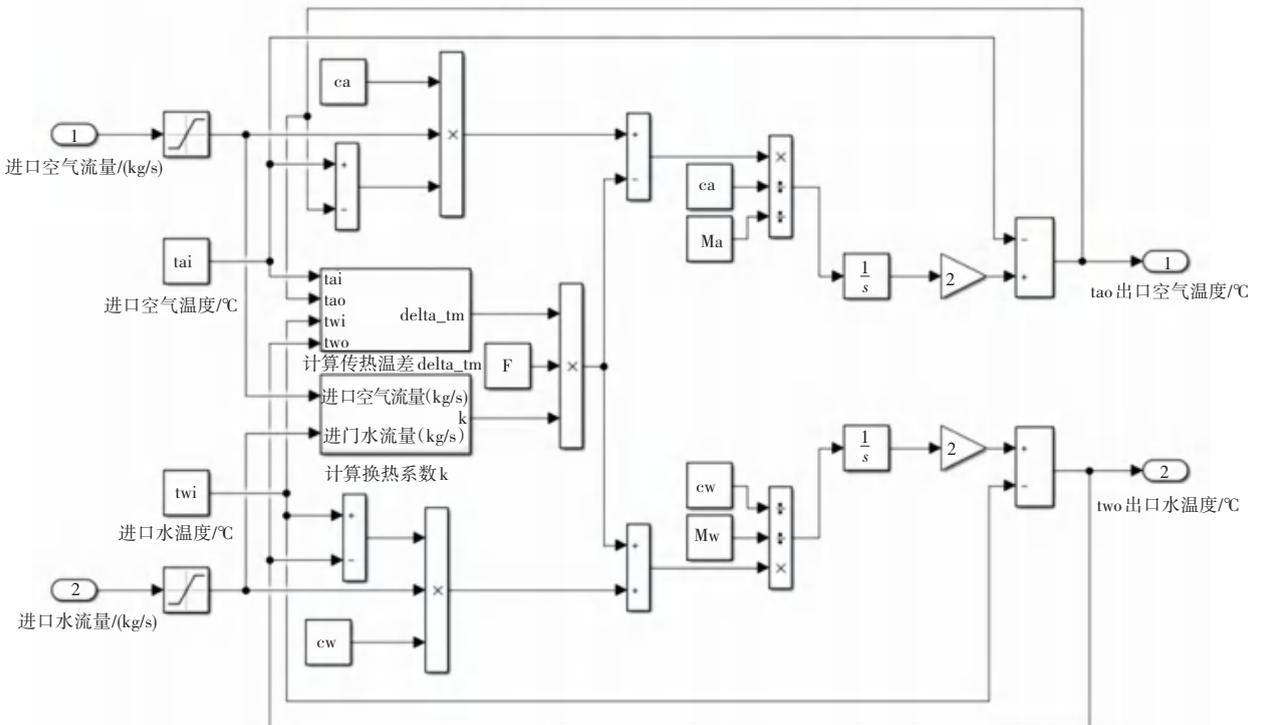


图 1 干工况下表冷器换热仿真模型

Fig. 1 The heat transfer simulation model of the cooler under dry conditions

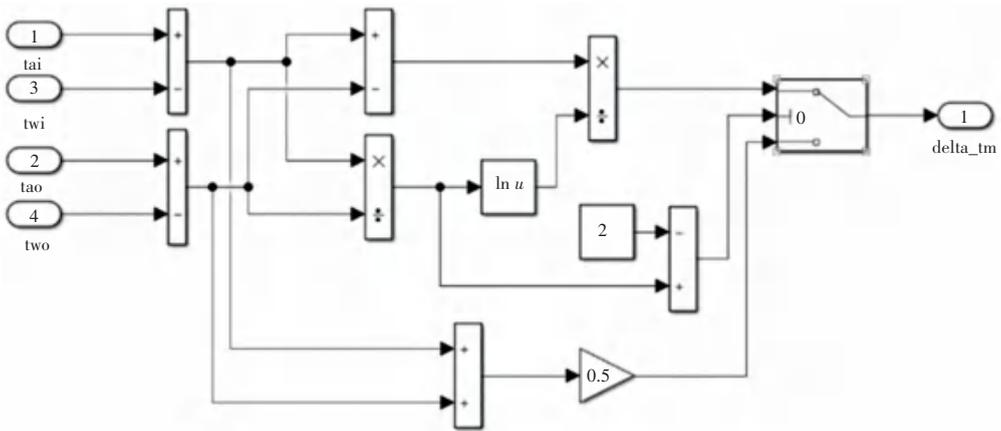


图2 传热温差计算仿真模型

Fig. 2 Simulation model of heat transfer temperature difference calculation

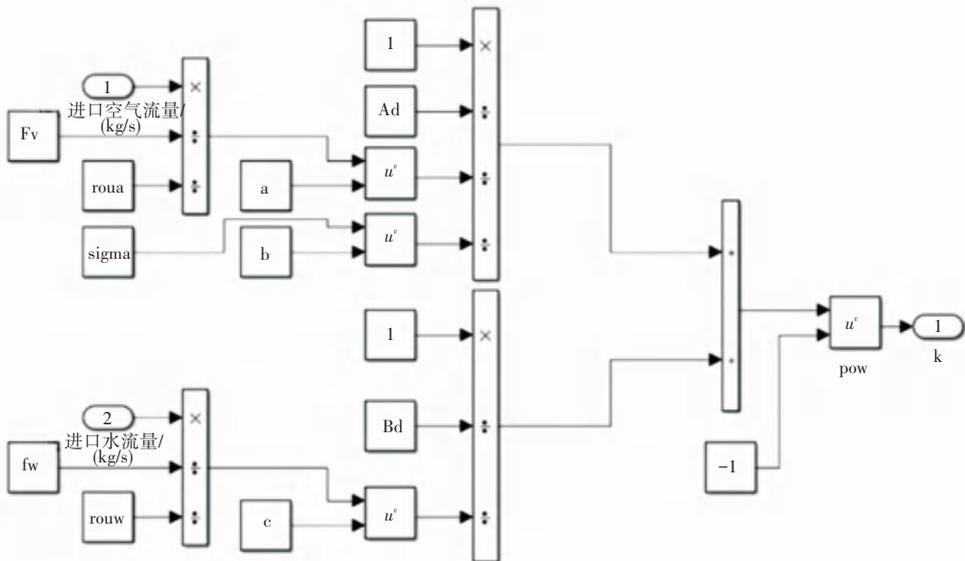


图3 换热系数计算仿真模型

Fig. 3 Simulation model of heat transfer coefficient calculation

### 2.1.2 增量式PID算法

由位置式PID算法公式可得公式(6):

$$\Delta u = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I T e(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

其中,  $\Delta u = u(k) - u(k-1)$ 。

增量式PID控制算法不依赖于积分器或者累加器就能实现PID控制,提高了运算资源和存储资源的利用效率,手动/自动切换时冲击小,便于实现无扰动切换。因此,增量式PID控制被更广泛地应用于需要进行手动/自动切换的场景下,如工业厂房空调控制系统。

### 2.1.3 PID算法仿真模型

直接应用Simulink中PID模块,建立仿真模型如图4所示。根据经验进行整定并微调后,确定PID

参数分别为:15、0.3、0。

### 2.2 模糊PID算法

模糊PID算法通过对PID各系数进行修正,使得在系统发生一系列变化后,控制效果始终能够收敛于最佳PID参数配置<sup>[3]</sup>。

修正公式(7)~(10)如下:

$$\Delta K_p(t) = 0.5abs [e(t) + de(t)] \quad (7)$$

$$\Delta K_I(t) = -0.05abs [e(t) + de(t)] \quad (8)$$

$$K_p(t) = K_p(0) + \Delta K_p(t) \quad (9)$$

$$K_I(t) = K_I(0) + \Delta K_I(t) \quad (10)$$

其中,  $K_p(0)$  为  $K_p$  初始值,  $K_I(0)$  为  $K_I$  初始值。

模糊PID算法仿真模型及控制器内部结构如图5和图6所示。

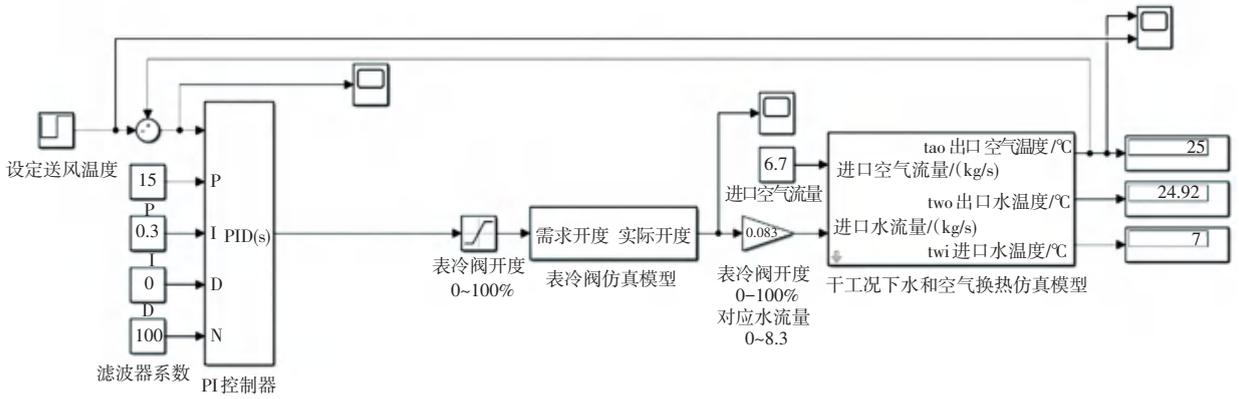


图 4 PID 算法仿真模型

Fig. 4 PID algorithm simulation model

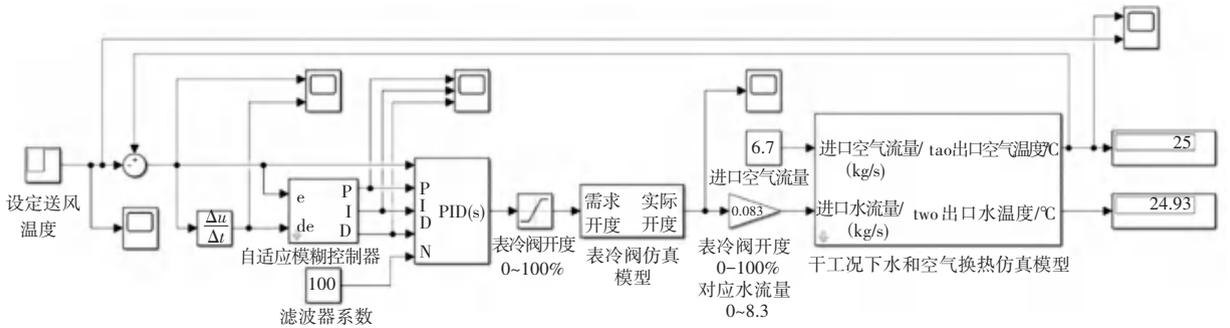


图 5 模糊 PID 算法仿真模型

Fig. 5 Fuzzy PID algorithm simulation model

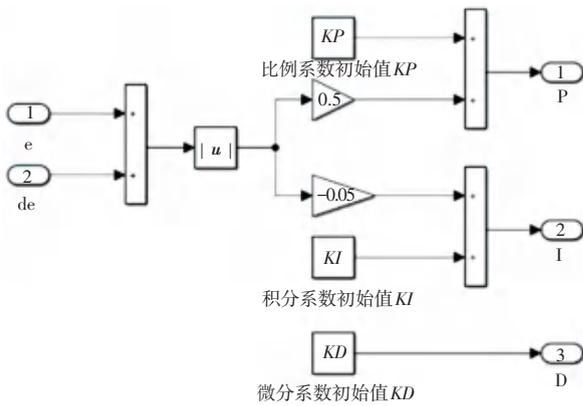


图 6 模糊控制器内部结构

Fig. 6 Internal structure of fuzzy controller

### 3 P+PI 算法描述及运行结果对比

#### 3.1 P+PI 算法描述

由公式(2)可知,水侧能量交换的大小取决于水流量和进出水温差。在风量和新风温度不变的情况下,进出水口的温差受到水流量的影响。瞬时状态下,水流量增大,则进出水温差迅速减小,且二者不是纯粹的线性反比关系;在水流量稳定后,随着时间的推移,送风温度逐渐降低,而进出水口的温度差又会逐渐回升,最终达到动态平衡。

表冷阀的开度会同时影响到水流量和进出水温

差,如果直接通过 PID 算法控制表冷阀的开度,容易出现由于积分饱和现象带来的过高超调,即使采用模糊控制进行优化也无法完全避免这种情况的发生。

因此,本文换一个角度看待控制对象。首先,如果整个系统处在平衡状态,则表冷器内平均温度一定与送风温度值差别不大,且略低于送风温度;其次,在系统运行过程中,如果表冷器内平均温度已经处在较低的状态下,继续加大表冷阀开度并不会使得空气降温更快,反而在出现超调时,由于表冷阀的阀位控制本身具有滞后性,再加上即使表冷阀调节到位,冷冻水对空气的降温过程仍会进一步滞后,带来的连锁反应会导致整个系统很难维持稳定。

如果以表冷器内的平均温度作为控制对象,当温度降低至合理范围内,表冷阀阀位将不再由于积分现象而继续增大,由此避免出现积分饱和现象。而且一旦出现超调,无论从表冷阀的反应速度,还是冷冻水对空气的降温效应来看,滞后都会明显减小。

P+PI 算法的公式描述,式(11)~式(14):

$$u_w(k) = u_w(k-1) + K_p [e_a(k) - e_a(k-1)] + K_I T e_a(k) \tag{11}$$

$$u_v(k) = u_v(k-1) + K_{pv} [e_w(k) - e_w(k-1)] \tag{12}$$

$$e_a(k) = y_a(k) - \bar{y}_a(k) \quad (13)$$

$$e_w(k) = y_w(k) - u_w(k) \quad (14)$$

式中,  $y_a$  为当前实际送风温度;  $\bar{y}_a$  为需求送风温度;  $y_w$  为表冷器进出口水温差;  $u_w$  为内环 P 控制器输出的表冷阀需求开度;  $K_{pv}$  为内环 P 控制器中的比例

系数;  $u_w$  为外环 PI 控制输出的冷冻水需求温差;  $K_p$  和  $K_i$  分别为外环 PI 控制器中的比例和积分系数。

经反复调试整定,  $K_{pv}$  在本次仿真中的最优值取 0.5,  $K_p$  和  $K_i$  的取值为 15、0.3。P+PI 控制系统仿真模型如图 7 所示。

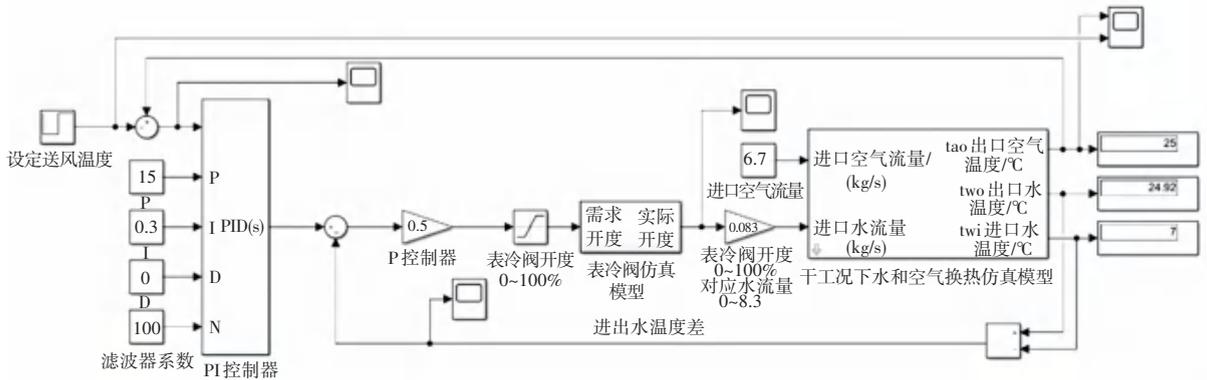


图 7 P+PI 控制系统仿真模型

Fig. 7 P+PI control system simulation model

### 3.2 不同控制算法仿真运行结果对比

对比传统控制方法和经过优化后的控制方法的运行结果,曲线图如图 8~图 10 所示。以空气温度为控制对象,需求温度以 400 ms 为变化周期,形成连续阶跃信号,测试不同控制方法下实际空气温度的连续阶跃响应结果。可以看出, P+PI 算法控制相较于其他两种控制算法震荡更小,控制精度更高,达到了预期的优化效果。

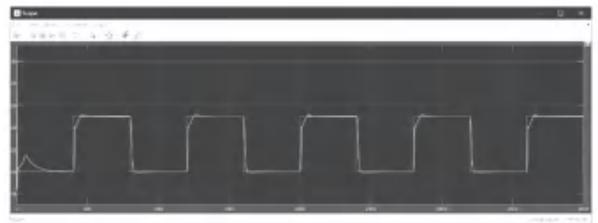


图 10 P+PI 控制仿真运行结果

Fig. 10 P+PI control simulation results

### 3.3 某厂房中央空调控制软件项目实际运行效果对比

PI 控制经过反复调试后,能将单点温度波动控制在  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  以内,而 P+PI 控制可以控制温度波动在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  内,如图 11、图 12 所示。

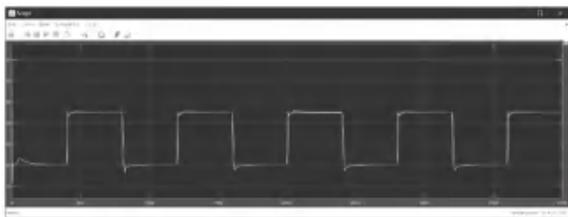


图 8 增量式 PID 控制仿真运行结果

Fig. 8 Incremental PID control simulation results



图 11 PI 控制实际运行结果

Fig. 11 PI control actual operation result

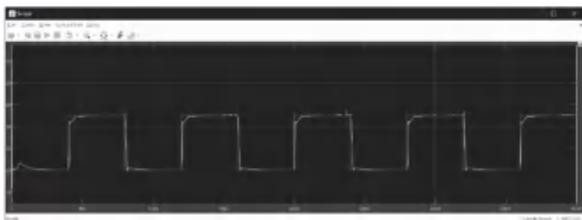


图 9 模糊 PID 控制仿真运行结果

Fig. 9 Fuzzy PID control simulation results



图 12 P+PI 控制实际运行结果

Fig. 12 P+PI control actual operation result

在蒸汽加热系统下,输入量为从锅炉房送出的

高温高压水蒸气, 温度在  $130\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 370\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 压强在  $0.1 \sim 1.5\text{ MPa}$  范围内不规则波动。经过减压阀和稳压阀等一系列稳定措施后, 输入蒸汽的压强波动仍达到了  $\pm 0.2\text{ MPa}$ , 其温度波动为  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用 PI 控制器直接进行控制会出现剧烈震荡, 被控对象温度波动可能会达到  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 该控制精度低于场区舒适性中央空调的最低标准。

P+PI 控制算法在输入量波动较大的系统中, 对控制稳定性的优化尤为明显。在本系统中, P+PI 控制器作用于蒸汽阀门开度, 并通过散热盘管内的蒸汽压强间接控制送风温度, 将其波动缩小到了  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 如图 13 所示。

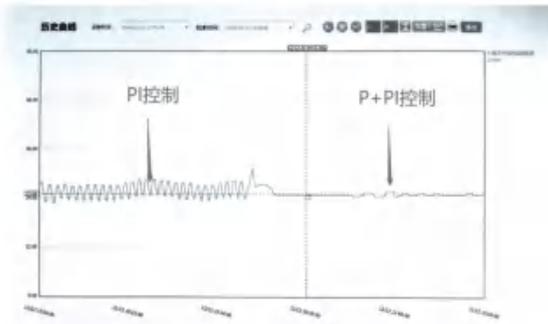


图 13 P+PI 控制在某厂房蒸汽加热系统中的扩展应用案例

Fig. 13 An extended application case of P+PI control in the steam heating system of a plant

## 4 结束语

P+PI 控制算法的调整参数由原来的 P、I、D 3 个, 增加了一个  $P_v$ , 共 4 个参数, 从根本上解决了传统 PID 控制算法中控制对象反应滞后的问题。在 Simulink 仿真环境下可以看出, P+PI 算法大幅消除了调整过程中的高频振荡, 保护表冷阀免受不必要的磨损、延长使用寿命, 且无论从反应速度、超调高度还是收敛速度等多个方面的指标都优于传统控制算法。

在未来更复杂的控制场景、更高的控制精度要求下, P+PI 间接控制算法仍有进一步扩展的空间, 可根据实际应用场景的特点进行适应性改造。在其他领域, 如: 家用空调、恒温恒湿机组、回转平台、吊车、消防、自动驾驶等涉及到滞后控制的系统中也可以得到广泛应用。

## 参考文献

- [1] 杨先德, 王明菱, 王复峰, 等. 中央空调表冷器后空气温度自适应 PID 控制系统建模[J]. 湖南理工大学学报, 2020, 33(4): 28-34.
- [2] 樊德玺, 蓝政杰. 表冷器的数学建模与 Simulink 仿真测试[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(5): 22-25.
- [3] 单鑫, 魏兵, 张会玲. 基于自适应模糊 PID 控制的中央空调冷冻水系统仿真研究[J]. 河北工业科技, 2013, 30(6): 479-483.

(上接第 73 页)

- [8] 杨万里, 周雪婷, 陈孟娜. 基于 Logistic 映射的新型混沌简化 PSO 算法[J]. 计算机与现代化, 2019(12): 15-20, 26.
- [9] Ibrahim R A, Elaziz M A, Lu S F. Chaotic opposition-based grey-wolf optimization algorithm based on differential evolution and disruption operator for global optimization[J]. Expert Systems with Application, 2018, 108: 1-27.
- [10] TENG Z J, LV J L, GUO L W. An improved hybrid grey wolf optimization algorithm[J]. Methodologies and Application, 2018.
- [11] Jain A K. Data Clustering: 50 Years Beyond K-means[M]. Springer Berlin Heidelberg: Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases, 2008: 3-4.
- [12] 董西成. Hadoop 技术内幕: 深入解析 MapReduce 架构设计与

实现原理: in-depth study of mapreduce[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

- [13] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle swarm optimization[J]. Swarm Intelligence, 2007, 1(1): 33-57.
- [14] 江铭炎, 袁东风. 人工蜂群算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 110-113.
- [15] Rudolph G. Local convergence rates of simple evolutionary algorithms with Cauchy mutations[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 1997, 1(4): 249-258.
- [16] 王晓慧, 刘雪英, 白梅花. 引入高斯变异和最速下降算子的人口迁移算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(20): 57-60, 62.