

# 基于自整定变风量的兵器弹药仓库 温度优化控制

熊宪生

(重庆腾升建筑工程有限公司 智能化部,重庆 404000)

**摘要:**为了杜绝军械弹药仓库中温、湿度对武器装备性能的影响,提出了一种基于自整定的VAV优化控制算法。分析了被控仓库对象的控制论特性与存在的控制工程难题,研究了控制策略,采用自整定模糊PID串级控制,给出了自适应模糊PID控制算法,作了仿真对比实验研究。仿真实验响应曲线显示,系统超调量小、上升时间与调节时间短、抗干扰性能强,在模型失配时系统仍有较好的控制品质。研究表明,提出的优化控制方法是合理可行的,既能取得期望的控制品质,又可大幅度节约能源。

**关键词:**变风量系统;军械弹药仓库;自整定模糊PID控制器;温度优化控制

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)06-0068-05

## Optimization Control Based on Self-tuning Variable Air Volume System for Ordnance Ammunition Storehouse Temperature

XIONG Xian-sheng

(Intellectualization Branch, Chongqing Tengsheng Building Engineering Group Co., Ltd, Chongqing 404000, China)

**Abstract:** In order to put an end to impact of temperature and humidity for weapon equipment performance in ordnance ammunition storehouse, the paper proposed a sort of self-tuning optimization control algorithm of variable air volume system. In the paper, it analyzed the cybernetics characteristic of controlled storehouse object and the subsistent puzzle of control engineering, researched on control strategy, adopted self-tuning fuzzy PID series control, gave the self-adaptive fuzzy PID control algorithm, and made the research of simulation contrast experiment. The response curve of simulation experiment demonstrated that it would be small in system overshoot, short in rising and adjusting time, strong in anti-jamming performance, and still could own better control quality when the model unmatched. The research result shows that the proposed optimization control algorithm is reasonable and feasible, not only can obtain expected control quality, but also can save the energy by a large margin.

**Key words:** variable air volume system; ordnance ammunition storehouse; self-tuning fuzzy PID controller; temperature optimization control

军械弹药从出厂到投入部队使用前均存放在仓库中,军械弹药仓库既是军队接收、储存军械弹药的场所,也是军械武器装备分发的集散地。尽管军械弹药在仓库中处于宏观的相对静止状态,但是由于储仓温度和湿度对武器装备质量有重要影响,在长期储存过程中,如果受到不恰当的温、湿度

影响可能导致金属锈蚀,使金属部件强度降低,表面机械性能变坏,军械弹药发生霉变,严重影响军械弹药质量。为了有利于武器装备的安全管理,研究军械弹药仓库的温、湿度优化控制对落实战备储备有重要意义。

收稿日期:2013-03-06

作者简介:熊宪生(1954—),男,高级工程师,主要从事建筑智能化方面的工程技术与系统设计研究。

## 1 变风量系统的控制策略选取

变风量是相对于定风量控制而言的,空调系统是耗能大户,温度相差  $1^{\circ}\text{C}$  就会造成很大的能源浪费。VAV 系统 (Variable Air Volume System) 与 CAV 系统 (Constant Air Volume System) 相比,因其减少了风机装机容量和风机运行能耗,可大约节能  $30\% \sim 70\%$ ,而且易于改、扩建,灵活性较好,在国外智能建筑中使用率已高达  $95\%$ 。VAV 系统使用中根据储仓温度高低,空调系统末端装置可自动调节一次风送风量,跟踪负荷变化,使储仓温度维持在规定范围内,达到送风与回风的差值保持恒定,满足储仓排风的需求。温度控制是储仓最基本的控制要素,由于储仓空调系统是非线性系统,难以精确建立数学模型,传统 PID 控制不具备环境变化时控制参数自动改变的自适应性,如不能在线自动整定控制参数,因此其控制性能难以满足储仓温度控制的要求,因此 VAV 系统一般采用智能控制策略,包括模糊控制、神经网络控制和专家系统等<sup>[1-4]</sup>。实际控制工程中,由于神经网络控制需要大量样本数据训练,各个控制环节差异大,事实上是不可取的;专家系统控制鉴于知识库庞大,使系统设计变得非常困难,也是不可取的。模糊控制技术可将工程经验用于控制器设计,无需建立储仓的精确模型,自整定模糊 PID 控制可实时在线自动整定控制器参数,按照控制规则进行控制,既继承了模糊控制的优点,又避免了 PID 控制器的缺陷,很适合于无人值守储仓场所应用。

## 2 自整定模糊 PID 控制器设计

PID 控制器是控制领域经常使用的控制方法,控制器结构如图 1 所示,其系统传递函数为

$$W(S) = K_p + K_i/S + K_d s$$

其中,比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  与微分系数  $K_d$  参数的作用分别为: $K_p$  用于提高系统响应速率,其值过小,系统调节时间长,响应变慢,恶化了系统的动、静态性能;增大  $K_p$  可加快响应速度,提高系统灵敏度,但可能导致系统超调,甚至使系统发散。 $K_d$  作用在于对偏差的变化过程进行预测,主要用于减小偏差变化率与优化系统响应的动态性能。 $K_i$  可调节系统稳态误差,其值过小,因积分作用太小,稳态误差增大; $K_i$  值过大可能出现积分饱和,系统振荡次数和超调加大。

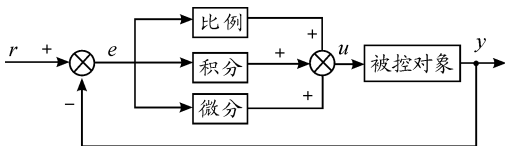


图 1 PID 控制器结构

自整定模糊 PID 控制基于 PID 控制器,如图 2 所示。 $r$  代表参考输入; $y$  代表系统输出; $e$  代表误差; $e = r - y$ 。以误差  $e$  和误差变化率  $ec$  作为控制器的输入,按照制定的控制规则对控制器参数进行整定,以满足不同时刻 PID 控制参数

的控制要求,其工作流程图如图 3 所示<sup>[5-7]</sup>。

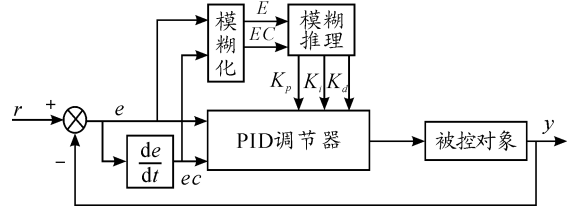


图 2 参数自整定模糊 PID 控制系统结构

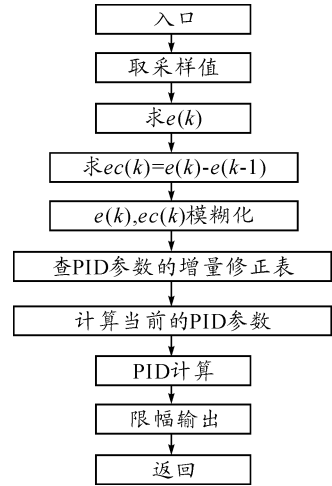


图 3 自整定模糊 PID 控制器流程

### 2.1 模糊变量选取和论域划分

在模糊自整定 PID 控制器中,输出量为控制器参数的修正因子,即  $\Delta K_p, \Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ , 输入量为送风量偏差  $e$  及其偏差变化率  $ec$ 。偏差  $e$  和  $ec$  的量化因子  $K_e = K_{ec} = 0.6$ , 基本论域,离散论域,语言变量分别为  $[-0.5, +0.5], \{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$  以及  $[PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB]$ , 其中,  $ec(kT) = e(kT) - e(k-1)T$ 。PID 的 3 个控制参数修正因子  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  的离散论域与语言变量分别为  $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}, \{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}, \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$  和  $[PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB]$ 。

### 2.2 论域隶属度函数

$e$  和  $ec$  的隶属度函数选为三角形函数,分别如图 4 和图 5 所示。

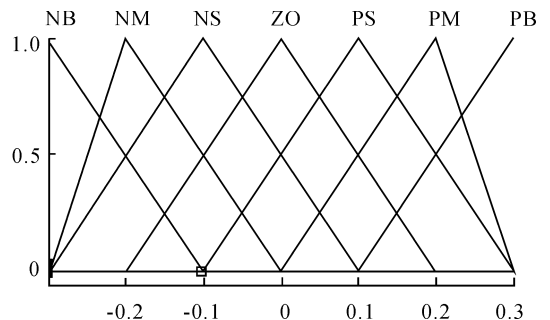


图 4 偏差的隶属函数

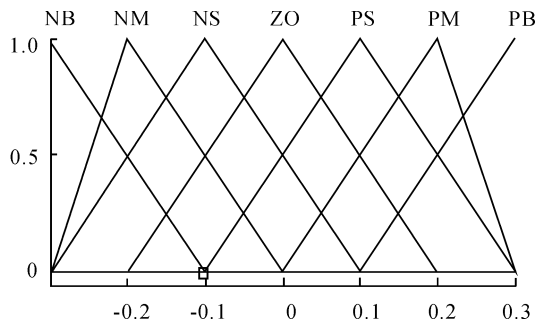
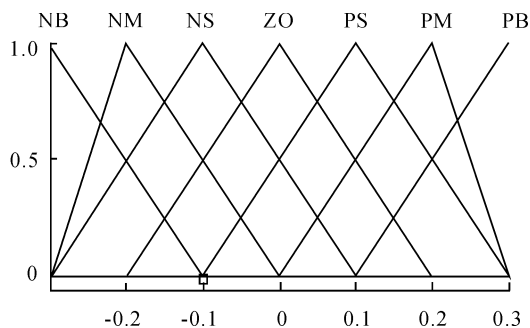
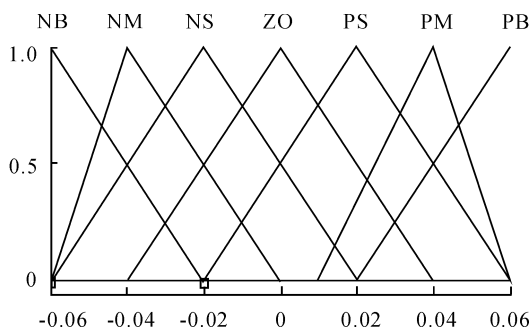
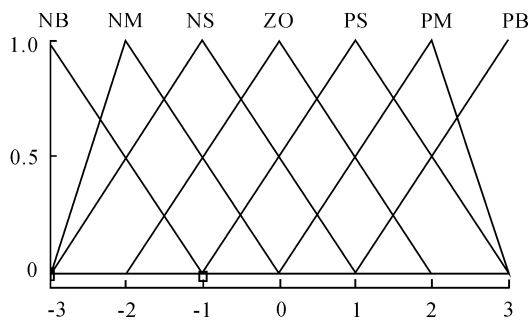


图5 偏差变化率的隶属函数

PID 的 3 个调整参数的隶属函数选为三角形函数, 分别如图 6, 图 7 和图 8 所示。

图6  $\Delta K_p$  的隶属函数图7  $\Delta K_i$  的隶属函数图8  $\Delta K_d$  的隶属函数

### 2.3 控制规则

$K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$  3 个参数可进行在线修改, 以使被控对象具有良好的动、静态性能。按照传统经验: 当  $|e|$  较大时, 为提高系统响应速度, 可选择较大的  $K_p$ ; 在初始阶段偏差大, 为了

避免出现微饱和,  $K_d$  应适当减小; 为不产生大超调避免积分饱和现象, 一般可取  $K_i = 0$ 。当  $|e|$  和  $|ec|$  为中等大小时,  $K_p$  应适当减小, 中等大小的  $K_i$  与  $K_d$  可减小超调, 加快系统响应过程, 响应速度快慢主要取决于  $K_d$  值。当  $|e|$  较小时, 为保证稳态特性应适量增加  $K_p$  和  $K_i$ , 当  $|ec|$  较小时,  $K_d$  取值可适当增大, 而当  $|ec|$  较大时,  $K_d$  值应当减小, 增大  $K_i$  取值。参照上述经验的模糊控制规则表, 如表 1, 表 2 和表 3 所示。

表1  $\Delta K_p$  控制规则表

$e \backslash ec$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	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2  $\Delta K_i$  控制规则表

$e \backslash ec$	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

表3  $\Delta K_d$  控制规则表

$e \backslash ec$	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

### 2.4 模糊推理与解模糊化

按照模糊规则经过推理后采用重心法实现解模糊化, 以  $\Delta K_p$  第一条规则隶属度为例:

$$\mu(\Delta K_p) = \mu_{NB}(E) \wedge \mu_{NB}(EC) = \min\{\mu_{NB}(E), \mu_{NB}(EC)\}$$

在某一采样时刻,根据  $e$  和  $ec$  测量值可求出  $\Delta K_p$ :

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p) \cdot \Delta K_{pj}}{\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p)}$$

式中,  $\sum_{j=1}^{49} \mu_{pj}(\Delta K_p)$  ( $j = 1, 2, \dots, 49$ ) 是由当前  $e$  和  $ec$  测量值经量化后的对应隶属度求得的对应于表中各种组合  $\Delta K_p$  的隶属度。输出量  $\Delta K_i, \Delta K_d$  的模糊推理和去模糊过程与  $\Delta K_p$  类似。经过计算后可求出对应  $e$  和  $ec$  变化的 PID 控制参数调整量输出值,自整定后 PID 控制器的控制参数修正为:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d$$

式中,  $K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}$  分别为初始值,  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  为 PID 控制器的校正值,即自整定模糊控制器的输出值。

### 3 自整定模糊 PID 控制算法的仿真研究

#### 3.1 仿真模型

兵器弹药仓库库房是一个复杂的热力学系统,由于受库内设备、门窗开关、人的散热及室外温度等变化的影响,模型的精确数学描述是很困难的。空调库房示意图如图 9 所示,假设:将库房视为单容对象,其温度按集中参数处理,无需考虑库房温度滞后效应;忽略围护结构蓄热量与太阳辐射和库内空气流动等因素所造成的影响;库内温度变化是均匀的。

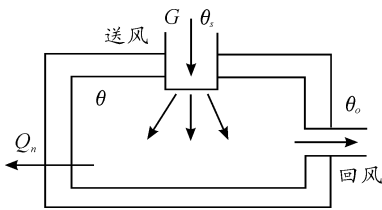


图 9 空调库房示意图

根据能量守恒定律,送风温度与库房温度之间的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{\theta_s(s)} = \frac{K}{T_1 s + 1}$$

其中,  $T_1$  为空调区域系统温度时间常数;  $K$  为空调区域系统温度的放大系数。

上述模型是在若干假设条件下得到的,并未考虑如热容参数、外界温度、电器设备和人体等多种不确定性因素带来的负荷扰动等引起变化的影响,实际上在控制工程中 VAV 系统温控模型往往采用二阶延迟传递函数,因为它能比较准确地真实地反映扰动量的影响。

#### 3.2 仿真模型验证

为了方便地验证模型的有效性,以固定送风量空调为例,假定夏季运行库房参数:  $V = 400 \text{ m}^3$ , 库内空气温度  $\theta = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ , 空气比热容  $c = 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , 库房墙体的热容  $MC = 800 \text{ kJ}/\text{ }^\circ\text{C}$ , 室外空气温度  $\theta_o = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 空调送风温度  $\theta_s = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_n$  在 2 kW 到 8 kW 范围内随机波动,如图 10 所示。在固定送风量 ( $G = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 情况下,库房温度响应曲线如图 11 所示。

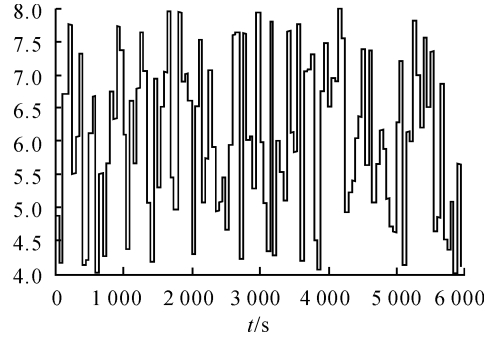


图 10 热负荷变化扰动信号

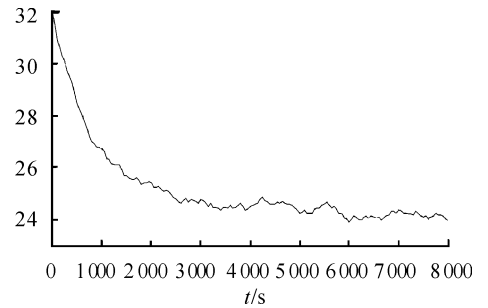


图 11 固定送风量库房温度响应曲线

从图 10 可以看出,在固定送风量后,经过一定时间后库房温度可从  $32 \text{ }^\circ\text{C}$  稳定到  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,验证了该仿真模型的有效性,因此可将该仿真模型用于 VAV 空调系统的温度控制仿真研究。

#### 3.3 VAV 空调库房温度的 PID 串级控制

这里以压力无关型变风量 PID 串级控制系统为例。图 12 为串级 VAV 空调系统控制结构图,用主回路实现温度闭环控制以调整库房温度偏差,用副回路实现风量闭环控制以调整送风量。设定目标温度为  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ;主回路控制参数取  $K_p = -0.3, K_i = -0.01, K_d = 0$ ;副回路控制参数取  $K_p = 6.5, K_i = 0.5, K_d = 5.4$ ;  $Q_n$  选取 2 kW 到 8 kW 的信号。在 PID 串级制方式下的温度响应如图 13 所示。

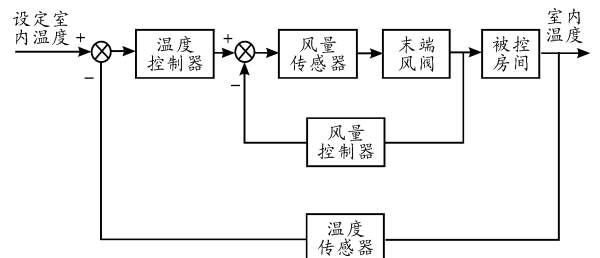


图 12 压力无关型 PID 串级控制结构

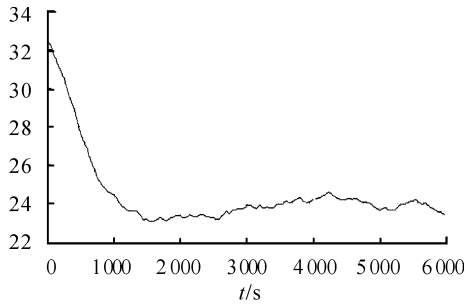


图 13 PID 串级控制下库房温度响应曲线

从图 12 可见,在随机干扰下,经过大约 1 000 s 后可达到设定温度值,存在 5% 的超调,温度稳定后库房可在设定温度值上下波动,基本满足控制精度。

### 3.4 VAV 空调库房温度的自整定模糊 PID 串级控制

在自整定模糊 PID 串级控制方式下的系统响应如图 14 所示,温度在 600 s 时就可达到设定稳态值,调节时间明显缩短。在抗随机干扰方面,超调量仅为 3%,与 PID 串级控制对比,超调明显减小,表明自整定模糊 PID 串级控制有比较强的鲁棒性。两种方法的控制效果对比如表 4 所示。由表 4 可见,自整定模糊 PID 串级控制在超调量、上升和调节时间方面明显优于 PID 串级控制的控制效果,完全可以满足控制指标要求。

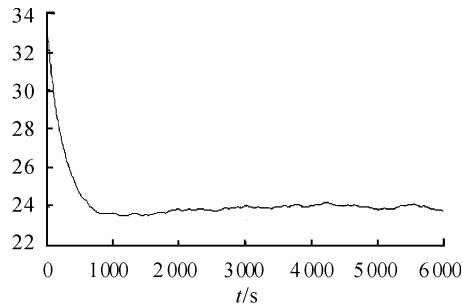


图 14 自调整模糊 PID 串级控制响应曲线

表 4 控制效果分析

控制方法	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s
PID	5	1 000	3 000
自整定模糊 PID	3	700	1 000

## 4 VAV 空调自整定模糊 PID 串级控制的鲁棒性分析

在上述条件下,基于 2 kW 到 8 kW 的随机波动干扰,再加入持续 20 s 的幅值为 100 kW 的强干扰信号后,两种串级控制方式下的系统响应如图 15 和图 16 所示。

由于 VAV 系统具有不确定性,当库房模型失配时,如库房热容常数由 800 变到 1000 时,两种控制方式的响应曲线如图 17 和图 18 所示。

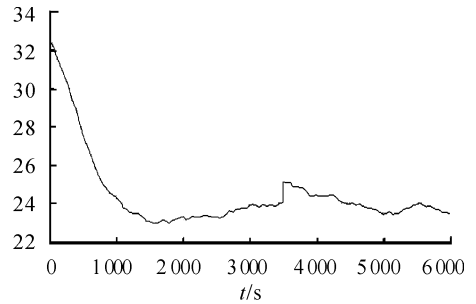


图 15 PID 串级控制温度响应

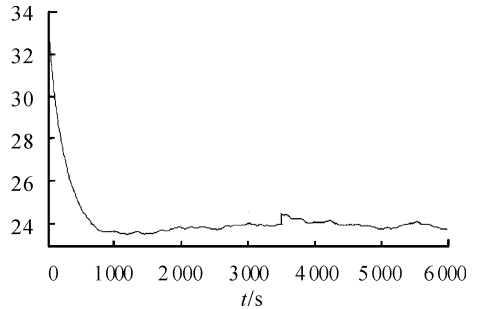


图 16 自调整模糊 PID 串级控制温度响应

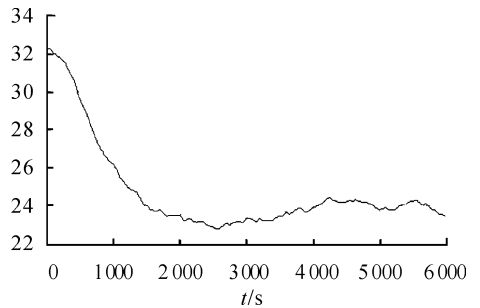


图 17 模型失配时 PID 控制的响应

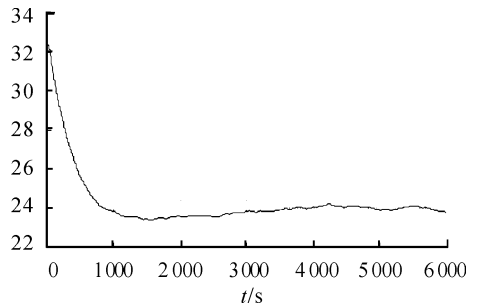


图 18 模型失配时自调整模糊 PID 控制的响应

对比图 15 和图 16,可见在外加 100 kW 的干扰时,自整定串级模糊 PID 控制温度波动明显减小,可更快地恢复到稳定状态。从图 17 和图 18 可见,即使在模型失配时,自整定模糊 PID 串级控制也表现出更好的自适应能力,在控制性能方面(如超调量和调节时间等)远优于 PID 串级控制。综上所述,自整定串级模糊 PID 控制对 VAV 空调系统温度控制有很强的鲁棒性能。

(下转第 78 页)