

文章编号: 1671-6612 (2020) 06-655-09

基于改进单神经元 PID 算法的 变风量空调系统三参数前馈解耦控制

陈宗帅 李绍勇 贺冬辰 孙智冬

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050)

【摘要】 针对变风量空调系统 (Variable Air Volume Air Conditioning System, VAVACS) 的多参数、非线性且其主要控制回路之间存在强耦合的特性, 提出了一种改进单神经元 PID 算法的前馈补偿解耦控制策略的设计思路。首先, 对于 3 个主要控制回路: 冷 (热) 水流量 $Q_{CW/HW}$ -送风温度 T_{SA} 、送风机转速 n_1 -送风静压 P_{SA} 和室内送风量 Q_{SA} -空调房间温度或室温 T_n , 采用前馈补偿方法构建了解耦补偿器的传递函数矩阵, 以消除它们之间的耦合效应。其次, 设计了改进的单神经元 PID 算法 (Modified Single Neuron PID Algorithm, MSNPIDA)。该 MSNPIDA 分别依据送风温度 T_{SA} 、送风静压 P_{SA} 和室温 T_n 的误差及误差变化率对相应的 3 个单神经元 PID 控制器参数的权值与增益系数进行自适应整定, 获取相应的最佳值。最后, 借助 MATLAB 工具, 对基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数前馈解耦单神经元 PID 控制系统进行编程和组态, 且仿真运行。结果表明, 基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数前馈解耦单神经元 PID 控制系统在理论上是可行的, 且相应的送风温度 T_{SA} 、送风静压 P_{SA} 和室温 T_n 的控制指标能够满足空调工艺的相关要求。

【关键词】 变风量空调系统; 前馈解耦; 增益系数; 改进单神经元 PID 算法

中图分类号 TP273/TU831.3 文献标识码 A

Feedforward Decoupling Control for Variable Air Volume Air Conditioning System with Three-parameter Based on Modified Single Neuron PID Algorithm

Chen Zongshuai Li Shaoyong He Dongchen Sun Zhidong

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050)

【Abstract】 For the variable air volume air conditioning system (VAVACS) with characteristics of multi-parameter, nonlinear and strong coupling effects among the main control loops, a design idea of feedforward compensation decoupling control policy based on a modified single neuron PID algorithm (MSNPIDA) is proposed. Firstly, for three main control loops: the flow rate of chilled/hot water ($Q_{CW/HW}$) and supply air temperature (T_{SA}), the speed of supply air fan (n_1) and static pressure of supply air (P_{SA}) and the flow rate of indoor supply air (Q_{SA}) and indoor air temperature (T_n), the feedforward compensation method is adopted to construct the transfer function matrix of decoupling compensator in order to eliminate the coupling effect among them. Secondly, a modified single neuron PID algorithm (MSNPIDA) is designed. On the basis of the errors and the variant rates of supply air temperature, the static pressure of supply air and indoor temperature, this MSNPIDA can adaptively tune weight value and gain coefficient of three single neuron PID controllers' parameters, respectively, and obtain the corresponding optimal values. Finally,

基金项目: 兰州理工大学博士研究基金项目 (B04-237); 兰州理工大学建工七七基金项目 (TM-QK-1301)

作者 (通讯作者) 简介: 陈宗帅 (1993-), 男, 硕士研究生, E-mail: 2459216554@qq.com

收稿时间: 2020-02-13

the feedforward decoupling single neuron PID control systems based on MSNPIDA for VAVACS with three-parameter is programmed and configured by MATLAB tool and then the corresponding simulations are carried out. The results show that the feedforward decoupling single neuron PID control systems based on MSNPIDA for VAVACS with three-parameter are theoretically feasible, and the corresponding control indexes of supply air temperature, the static pressure of supply air and indoor temperature can meet the relevant requirements of air conditioning technical process.

【Keywords】 variable air volume air conditioning system; feedforward decoupling; gain coefficient; modified single neuron PID algorithm

0 引言

变风量空调系统 (Variable Air Volume Air Conditioning System, VAVACS) 以其节能高效的优势被广泛的应用于大型公共建筑中, 但由于它具有多变量、控制回路多且各控制回路之间相互耦合的特点, 导致其运行时各控制回路之间往往会出现相互干扰^[1,2]。例如, 一个典型的单风道的压力无关型的 VAVACS 除了包括变频送/回风机、室内末端装置 (VAV-BOX)、送/回风量调节阀及送/回风管道等设备外, 还设置了多个参数的 PID 负反馈控制环路, 如送风温度 T_{SA} 、送风静压 P_{SA} 和室温 T_n 控制回路等。当 VAVACS 运行时, 这些参数 PID 控制回路之间存在耦合现象, 使得 VAVACS 的实际运行中会产生振荡, 进而降低系统的运行质量^[3]。目前, 已有多篇文献提出了关于 VAVACS 的不同解耦控制策略。文献[4]结合前馈解耦方法与单神经元 PID 控制器, 通过对两个房间末端的“房间送风量—房间温度”控制回路进行解耦控制。仿真结果表明, 该解耦设计方式消除了这两个回路之间的耦合效应, 缩短了调节时间, 且参数解耦矩阵的设计便于实现。文献[5]针对 VAVACS 的送风温度与室内温度 2 个耦合回路, 基于线性反馈原理设计了这两个参数回路的控制器。结果表明, 该策略有效地提升了控制系统的稳定性和鲁棒性; 但其调节时间较长, 不利于 VAVACS 的实际工程运用。文献[6]采用将对角解耦矩阵与常规 PID 控制相结合的控制策略, 对 VAVACS 的送风温度、送风静压和室内温度的 3 个耦合回路进行解耦。结果表明, 3 个耦合回路之间的耦合效应得到抑制, 但其送风静压控制回路的跟踪性能差。文献[7]提出了一种基于解析法的 PID 解耦控制策略并建立了 VAVACS 的送风温度和室内温度控制耦合回路的模型。仿真结果表明, 基于该解析法的送风温度和室内温度控制解耦策略不仅实现了 2 个控制回路之间的完全解

耦, 同时这两个参数控制系统还具有更平稳的跟踪性能。文献[8]通过分析 VAVACS 机组侧的送风静压与新风量的 2 个控制回路之间的耦合特性, 采用 PID 神经网络解耦控制方法实现了两个参数之间解耦控制。然而, 上述文献存在一些问题, 如 VAVACS 耦合回路的建模精度不高, 且其传递函数忽略了滞后时间, 仅考虑机组侧或末端侧的耦合回路和调节时间长等。

针对上述存在的问题, 为了实现 VAVACS 机组侧与末端侧的 3 个主要参数, 即送风温度 T_{SA} 、送风静压 P_{SA} 和室温 T_n 控制回路的稳定运行。本文将前馈解耦方法、模糊控制方式和单神经元 PID 控制技术相结合, 提出了基于改进单神经元 PID 算法 (Modified Single Neuron PID Algorithm, MSNPIDA) 的前馈解耦控制策略并应用于 VAVACS 的三参数控制回路中, 同时对 3 个参数控制回路中的单神经元 PID 控制器的权值 ω_i ($i=1,2,3$) 与增益系数 λ_j ($j=1,2,3$) 进行优化整定, 消除 VAVACS 的 3 个控制回路之间的耦合效应, 提升控制系统的性能。

1 变风量空调控制系统的分析与数学描述

本文所研究的被控对象 VAVACS 的工艺控制流程图如图 1 所示^[9]。

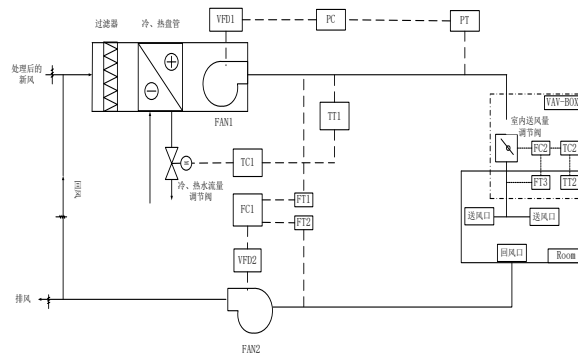


图 1 变风量空调系统的工艺控制流程图

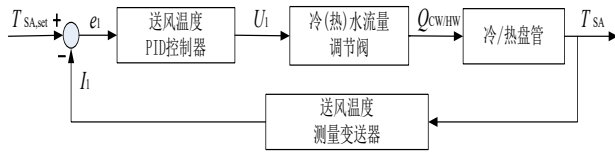
Fig.1 Flow chart of technical process and control for

VAVACS

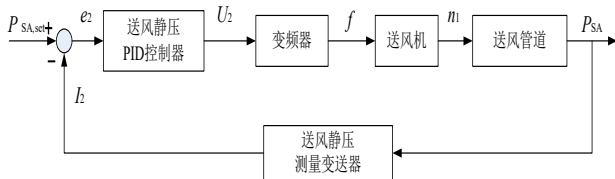
PT: 送风静压测量变送器; PC: 送风静压 PID 控制器; VFD1: 送风机变频器; FAN1: 送风机; TT1: 送风温度测量变送器; TC1: 送风温度 PID 控制器; FT1: 送风管道风量测量变送器; FT2: 回风管道风量测量变送器; FC1: 送回风量匹配 PID 控制器; VFD2: 回风机变频器; FAN2: 回风机; TT2: 室温测量变送器; FC2: 室内送风量 PI 控制器; TC2: 室温 PID 控制器; FT3: 室内送风量测量变送器; VAV-BOX: 室内末端装置; - - -: 参数测量、控制信号线。

分析图 1, 该流程图包含了 3 个主要参数的控制回路: 冷、热水流量 $Q_{CW/HW}$ —送风温度 T_{SA} (记为控制回路 1), 送风机转速 n_1 —送风静压 P_{SA} (记为控制回路 2) 和室内送风量 Q_{SA} —室温 T_n (记为控制回路 3)。

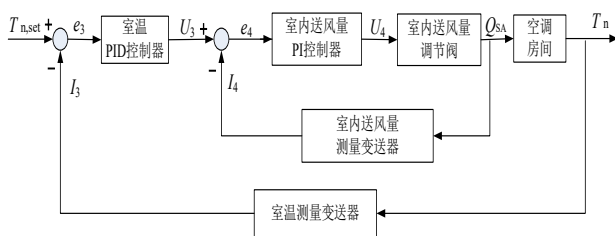
相应的 3 个参数控制系统的方框图分别如图 2 (a)、(b) 和 (c) 所示。



(a) 送风温度 PID 控制系统方框图



(b) 送风静压 PID 控制系统方框图



(c) 室温 PID—室内送风量 PI 串级控制系统方框图

图 2 变风量空调系统的 3 个参数控制系统方框图

Fig.2 Block diagram of the control systems for VAVACS with three parameters

VAVACS 通过维持送风温度的恒定, 改变送入室内的冷/热送风量的方式来实现对室内温度的调节。如图 2 (a) 所示, 送风温度 PID 控制系统

通过调节流经冷、热盘管的冷、热水流量 $Q_{CW/HW}$ 以保持送风温度 $T_{SA} \approx T_{SA,set}$ 。图 2 (b) 所示的送风静压 PID 控制系统为定静压法控制法。送风静压 PID 控制器通过改变变频器的频率 f 以调节送风机转速 n_1 , 使得 $P_{SA} \approx P_{SA,set}$ 。VAVACS 的室内末端装置 (VAV-BOX) 按室内送风量的调节方式可分为压力相关型与压力无关型。图 2 (c) 所示 VAV-BOX 为压力无关型。其室温 PID-室内送风量 PI 控制器串级调节, 通过改变室内送风量 Q_{SA} 的大小, 使得 $T_n \approx T_{n,set}$ 。

1.1 VAVACS 运行的稳定性分析

VAVACS 依据空调房间冷 (热) 负荷的不断变化, 动态地改变室内送风量 Q_{SA} , 从而确保室温 $T_n \approx T_{n,set}$ 。例如, 如图 1 所示的空调房间, 当夏季工况下室温低于其设定值时, 即 $T_n < T_{n,set}$ 。此时, 室温控制器 TC2 和室内送风量控制器 FC2 串级调节, 发出控制指令 U_4 , 使得 VAV-BOX 的冷风流量调节阀开度 V_{SA} 减小, 相应的送入室内的冷风流量 Q_{SA} 减少, 这样使得 T_n 升高, 直至 $T_n \approx T_{n,set}$ 。同时 V_{SA} 的减小会引起送风管道静压 P_{SA} 的升高, 当 $P_{SA} > P_{SA,set}$ 时, 送风静压控制器 PC 会发出控制指令 U_2 给变频器 VFD1, VFD1 则输出减小的供电频率信号 f 降低送风机 FAN1 的转速 n_1 , 进而减少室内送风量 Q_{SA} 。此时, 为了维持房间的微正压, 送回风量匹配控制器 FC1 会降低回风机 FAN2 的转速 n_2 以减小回风量 Q_{RA} , 匹配 Q_{SA} 。此外, 为了满足室内的空气品质要求, 即在维持送入室内的新风量不变的情况下, 回风与新风混合后会造成送风温度降低, 即 $T_{SA} < T_{SA,set}$ 。此时, 送风温度控制器 TC1 发出控制指令 U_1 , 减小流经冷水盘管的冷冻水流量 Q_{CW} , 直至 $T_{SA} \approx T_{SA,set}$ [10]。由以上分析可知, T_n 、 T_{SA} 和 P_{SA} 的 3 个控制回路之间会相互干扰, 其中任一被控参数的调节都会引起其余两个被控参数的相应变化。因此, 需要对上述 3 个具有耦合效应的控制回路进行解耦设计, 抑制它们之间相互干扰, 以达到实现 VAVACS 稳定运行的预期目标。

1.2 VAVACS 三个控制回路耦合作用的数学描述

如上所述, VAVACS 包含了 3 个主要的控制回路: 冷、热水流量 $Q_{CW/HW}$ —送风温度 T_{SA} , 送风机转速 n_1 —送风静压 P_{SA} , 室内送风量 Q_{SA} —室温 T_n 相应的被控量和控制量为送风温度 T_{SA} (记为 y_1)、送风静压 P_{SA} (记为 y_2)、室温 T_n (记为 y_3) 和

冷热水流量 $Q_{CW/HW}$ (记为 u_1)、送风机转速 n_1 (记为 u_2)、室内送风量 Q_{SA} (记为 u_3)。用矩阵表示即控制量 $U=[u_1 u_2 u_3]^T$ ，被控量为 $Y=[y_1 y_2 y_3]^T$ ，故 VAVACS 的三个回路的耦合关系可表示为 $Y=G_{ij}(s)U$ ，为了便于后面矩阵的运算，其中 $G_{ij}(s)$ ($i,j=1,2,3$) 可表示为第 j 个控制回路的控制量 u_j 与 3 个被控量 y_i 之间的传递函数^[11]，如 $G_{i,1}(s)$ ($i=1,2,3$) 表示第 1 个控制回路中的控制量 $u_1(Q_{CW/HW})$ 分别对 3 个控制回路中的被控量 $y_1(T_{SA})$ 、 $y_2(P_{SA})$ 与 $y_3(T_n)$ 造成的影响。由以上分析可知，

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-8.125}{81.8s+1} e^{-15s} & 0 & \frac{6.8}{81.8s+1} e^{-s} \\ 0 & 12.27 & -363.2 \\ \frac{-0.02276}{100s^2+1.81s+0.007938} e^{-21s} & 0 & \frac{-7.0555s-0.0675}{100s^2+1.81s+0.007938} e^{-s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

结合图 2 (a)、(b)、(c) 与式 (1)，VAVACS 的 3 个控制回路之间相互耦合的方框图如图 3 所示。

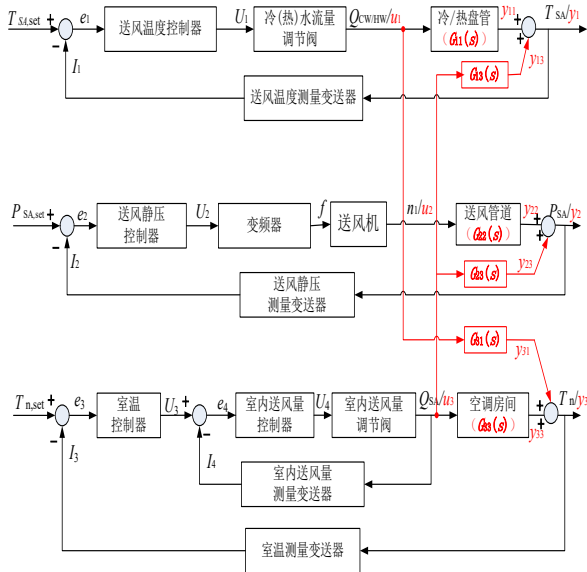


图 3 变风量空调系统 3 个控制回路的耦合作用方框图

Fig.3 Block diagram of coupling effects among three control loops for VAVACS

由图 3 可知，第 3 个控制回路的控制量 u_3 变化除了对该回路被控量 y_3 产生作用外，还会影响到第 1、2 个控制回路的被控量 y_1 、 y_2 。同时，第 1 个控制回路的控制量 u_1 变化除了对该回路的被控量 y_1 产生作用外，也会对第 3 个控制回路的 y_3 存在着影响。因此，针对上述 3 个控制回路之间控制量与被控量之间出现的相互影响，需要通过设计

VAVACS 三个相互耦合的控制回路所构成的耦合传递函数矩阵表示为：

$$G_{i,j}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

基于 VAVACS 的机理与对 3 个控制回路中 u_j 对 y_i ($i,j=1,2,3$) 的影响分析，参考文献[12,13]中在夏季工况下的实验数据，式 (1) 可改写如下：

解耦补偿器，从而消除不同回路之间的耦合作用，以此抑制不同控制量对同一被控量的影响。

2 变风量空调系统三参数前馈解耦补偿器的设计

基于前馈补偿控制原理^[14]，通过设计前馈补偿解耦控制器 $F(s)$ 来抑制干扰量对其它控制回路中被控参数的影响。根据图 3 所示的 VAVACS 三个控制回路中 u_j 对 y_i ($i,j=1,2,3$) 的耦合影响，依据前馈补偿原理，可设计前馈解耦补偿器 $F_{ij}(s)$ 来消除 u_j 对其它控制回路 y_i ($i,j=1,2,3, i \neq j$) 的影响。相应的 VAVACS 三参数前馈解耦补偿器的传递函数 $F_{ij}(s)$ ($i,j=1,2,3, i \neq j$) 如式 (3) 所示。

$$\begin{aligned} F_{13}(s) &= -\frac{G_{13}(s)}{G_{11}(s)} \\ F_{23}(s) &= -\frac{G_{23}(s)}{G_{22}(s)} \\ F_{31}(s) &= -\frac{G_{31}(s)}{G_{33}(s)} \end{aligned} \quad (3)$$

其中，式 (3) 中的负号表示控制作用与干扰作用相反。结合图 3 与式 (3) 所示的前馈解耦补偿器 $F_{i,j}(s)$ ，本文提出的 VAVACS 三参数前馈补偿解耦控制系统如图 4 所示。

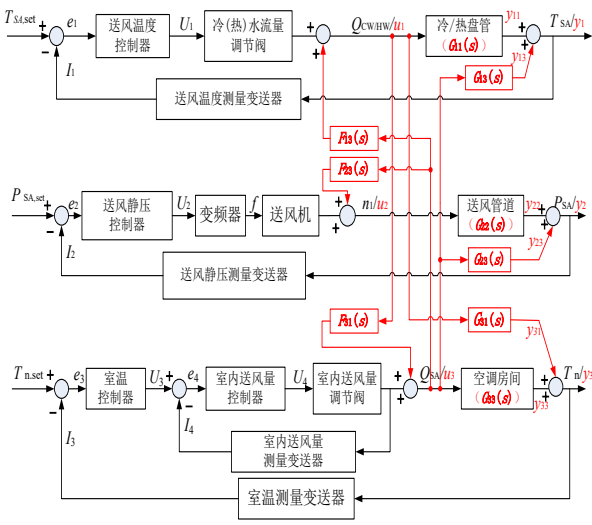


图 4 变风量空调系统 3 个控制回路的前馈补偿解耦作用方框图

Fig.4 Block diagram of feedforward compensation decoupling among three control loops for VAVACS

显然, 加入解耦补偿器 $F_{ij}(s)$ 之后, 可以消除图 3 中的三个参数控制回路之间的耦合作用, 实现 $y_{11}+y_{13}=0 (u_3 \neq 0)$; $y_{22}+y_{23}=0 (u_3 \neq 0)$; $y_{31}+y_{33}=0 (u_1 \neq 0)$ 。即表示 y_1 、 y_2 不再受 u_3 的影响, y_3 不再受 u_1 的影响。

3 改进的单神经元 PID 控制器的设计

目前 VAVACS 的主要控制回路常采用常规的 PID 控制器, 其中传统 PID 控制算法的增量形式可表示为^[15]:

$$u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

$$= K_p x_2(k) + K_I x_1(k) + K_D x_3(k)$$

式中, $x_1(k)=e(k)$, $x_2(k)=e(k)-e(k-1)$, $x_3(k)=e(k)-2e(k-1)+e(k-2)$ 。其中 K_p 、 K_I 和 K_D 分别为 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数, 一般而言, 这三个系数是按照被控对象和控制要求预先整定的, 且在整个控制过程中是保持不变的。当控制回路出现干扰时, PID 控制器很难适应干扰引起被控制量的变化。考虑到 VAVACS 非线性、控制回路之间相互干扰的特点, 可以将具有自适应功能的神经网络与 PID 控制器相结合, 设计出单神经元 PID 控制器, 通过神经网络的学习规则对单神经元 PID 控制器的权值进行自适应整定, 提升抗干扰力,

进而实现 VAVACS 的稳定运行。

3.1 单神经元自适应 PID 控制器

单神经元 PID 算法 (Single Neuron PID Algorithm, SNPIDA) 是指将常规 PID 控制与神经网络控制相结合的一种控制方式。它根据神经网络的某一学习规则通过对三个权值系数 $\omega_i(k)$ ($i=1,2,3$) 的调整来实现自适应及自组织功能^[16]。其中, 普遍采用的基于有监督的 Hebb 学习规则的单神经元自适应 PID 控制结构框图如图 5 所示。

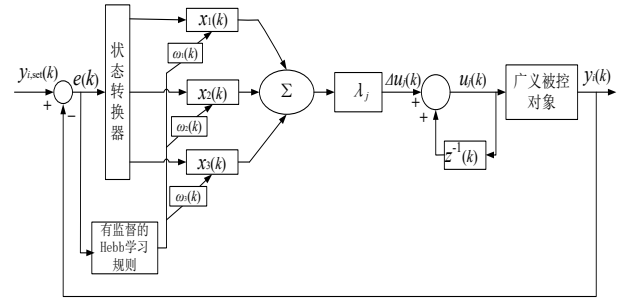


图 5 基于 Hebb 学习规则的单神经元自适应 PID 控制系统方框图

Fig.5 Block diagram of single neuron adaptive PID control system based on Hebb learning rules

这里, 状态转换器的输入 $e(k)=y_{i,set}(k)-y_i(k)$, $i=1,2,3$ 。 $y_{i,set}(k)$ 和 $y_i(k)$ 分别表示 k 时刻的 T_{SA} 、 P_{SA} 和 T_n 的设定值与采样值。 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 和 $x_3(k)$ 是状态转换器的输出, $x_1(k)=e(k)$, $x_2(k)=e(k)-e(k-1)$, $x_3(k)=e(k)-2e(k-1)+e(k-2)$ 。单神经元 PID 控制器的输出为 $u_j(k)$ ($j=1,2,3$), 其增量形式可表示为^[17]:

$$u_j(k) = \lambda_j (\omega_{1,j} e(k) + \omega_{2,j} [e(k) - e(k-1)] + \omega_{3,j} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]) \quad (5)$$

$$= \lambda_j (\omega_{1,j} x_1(k) + \omega_{2,j} x_2(k) + \omega_{3,j} x_3(k))$$

式中, λ_j 为第 j 个控制回路的神经元的增益系数, $\lambda_j > 0$; $\omega_{1,j}$ 、 $\omega_{2,j}$ 和 $\omega_{3,j}$ 为第 j 个控制回路的三个权值系数。

比较式 (4) 与式 (5) 可知, 其两者在表达式上一致。但式 (4) 中的 K_p 、 K_I 和 K_D 一旦经过整定后保持不变; 而式 (5) 中的 ω_i ($i=1,2,3$) 可以根据有监督的 Hebb 学习规则实现自整定功能。基于此, 可以将单神经元 PID 控制器看作一变系数的 PID 控制器。

其中, 根据有监督的 Hebb 学习规则, 权值系数的学习算法为^[18]:

$$\begin{aligned} \omega_{1,j}(k) &= \omega_{1,j}(k-1) + \eta_I e(k) u_j(k) x_1(k) \\ \omega_{2,j}(k) &= \omega_{2,j}(k-1) + \eta_P e(k) u_j(k) x_2(k) \\ \omega_{3,j}(k) &= \omega_{3,j}(k-1) + \eta_D e(k) u_j(k) x_3(k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $e(k)=y_i(k)-y_{i,set}(k)$ ($i=1,2,3$); η_I 、 η_P 、 η_D 分别为积分、比例、微分的学习效率, 本文仿真时取 $\eta_P=0.24$, $\eta_I=0.053$ 和 $\eta_D=0.45$ 。

3.2 改进的单神经元自适应 PID 控制器

对于单神经元 PID 控制器中的增益系数 λ , 进一步分析, 可知其大小对整个控制系统的性能与响应速度有较大的影响。若 λ 值越大, 则控制系统的快速性越好, 但会出现系统超调量大甚至系统变得不稳定; 反之, 则会使系统的快速性变差^[19]。

所以, 本文引入模糊控制器 (Fuzzy Controller, FC), 将被控参数 y_i ($i=1,2,3$) 的误差 $e_i(k)$ 及误差变化率 $de_i(k)/dk$ 输入 FC。基于模糊规则, 实时调整增益系数 λ , 构建出了一种改进的单神经元 PID 算法该算法的控制系统如图 6 所示。

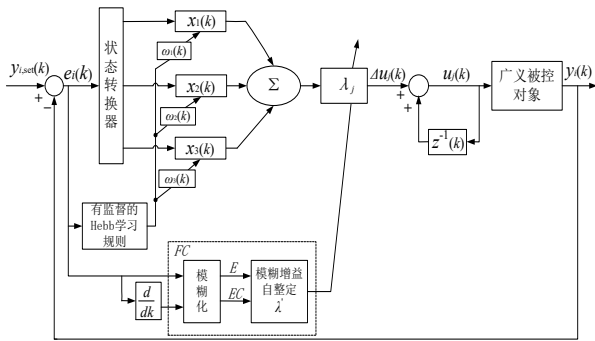


图 6 基于 MSNPIDA 的单神经元 PID 控制系统方框图

Fig.6 Block diagram of single neuron PID control system based on MSNPIDA

对于图 6 中的 FC, 其输出 $\lambda=\lambda_0+\lambda'$, 这里的 λ_0 为初值; λ' 是根据模糊规则, 对论域均为 $\{-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5\}$ 的误差 $e_i(k)$ 及误差变化率 $de_i(k)/dk$, 隶属度函数为三角函数, 进行运算后的输出。

其中, 基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数控制系统流程图如图 7 所示。

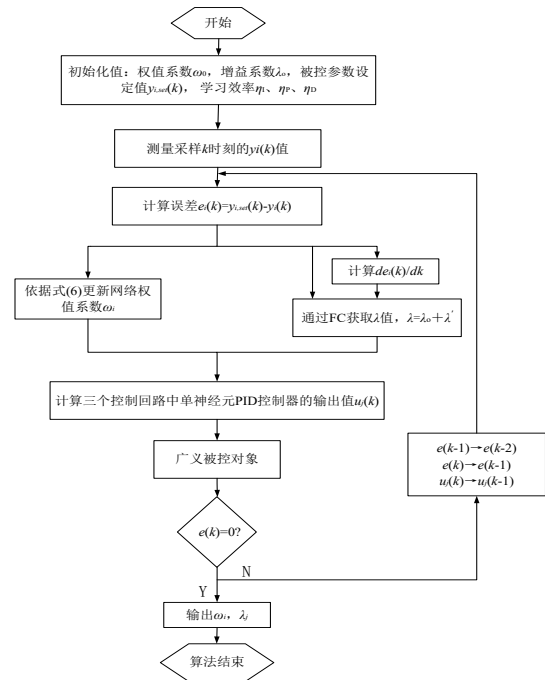


图 7 基于 MSNPIDA 的 VAVACS 的三参数控制算法流程图

Fig.7 Flow chart of control algorithm based on MSNPIDA for VAVACS with three-parameter

对于本文所提出的 VAVACS 的三个控制回路而言, 基于 MSNPIDA 的控制器需要整定的参数包括第 j ($j=1,2,3$) 个控制回路所包含的神经网络权值系数 ω_i ($i=1,2,3$) 与增益系数 λ 。需要说明的是, 上述的 3 个控制回路的权值系数 ω_i ($i=1,2,3$) 和增益系数 λ_j ($j=1,2,3$) 整定的算法—MSNPIDA 可用 MATLAB 软件进行编程, 保存为一个独立程序, 命名为 MSNPIDA.m。该 MSNPIDA.m 与图 8 所示的 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统仿真模型同步运行。

4 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统的数值仿真及结果分析

4.1 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统仿真模型的构建

该仿真模型包括由输入信号 $T_{SA,set}$ 、 $P_{SA,set}$ 、 $T_{n,set}$ 、主控制器部分、解耦控制器部分与广义被控对象等组成。在 MATLAB 中的 Simulink 环境下, 对图 4 所示的 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统进行组态, 如图 8 所示。

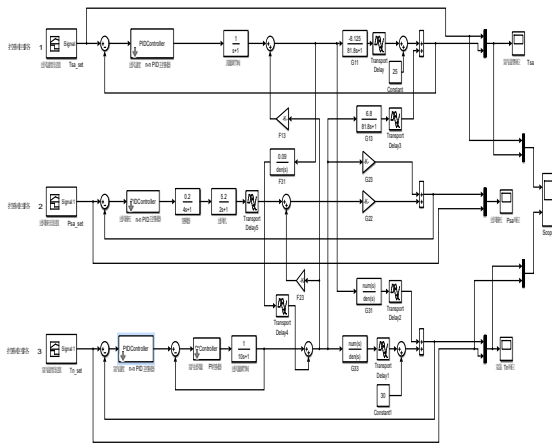


图 8 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统仿真模型
Fig.8 Simulation model of feedforward decoupling control system for VAVACS with three-parameter

其中, 图 8 的控制回路 3 中的室内送风量 PI 控制器, 其 $K_P=0.31$, $K_I=0.07$ 。控制回路 1、2 和 3 中的三个 $n-n$ PID 主控制器是采用 Simulink 功能块封装的基于 MSNPIDA 单神经元 PID 控制器, 其结构如图 9 所示。

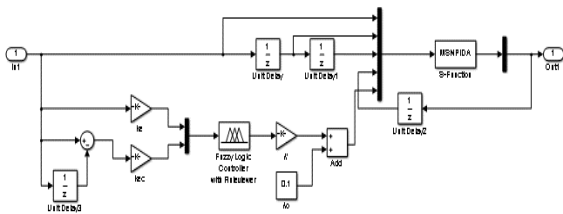


图 9 基于 MSNPIDA 的单神经元 PID 控制器的封装
Fig.9 Packaging of single neuron PID controller based on MSNPIDA

其中, 图 9 中的模糊控制器中增益 λ' 的模糊运算规则如表 1 所示。

表 1 增益 λ' 的模糊运算规则表

Table 1 Fuzzy operation rule table for gain λ'

$E \backslash \lambda'$	EC	NB	NS	ZO	PS	PB
NB		PB	PB	PS	PS	ZO
NS		PB	PS	PS	ZO	NS
ZO		PS	PS	ZO	NS	NS
PS		PS	ZO	NS	NS	NB
PB		ZO	NS	NS	NS	NB

4.2 仿真结果及分析

首先, VAVACS 在空调夏季工况下, $T_{SA,set}=15\pm 3^\circ\text{C}$, $T_{n,set}=25\pm 3^\circ\text{C}$ 和 $P_{SA,set}=200\pm 50\text{Pa}$;

其初始工况为 $T_{SA,0}=25^\circ\text{C}$, $T_{n,0}=30^\circ\text{C}$ 和 $P_{SA,0}=0\text{Pa}$ [20]。

其次, 考虑到空调房间由于人员流动、设备使用等情况会引起室内负荷发生变化的情况[21], 仿真过程中分别在 200s 和 400s 时, 调整 $T_{SA,set}$ 、 $P_{SA,set}$ 和 $T_{n,set}$ 大小, 进而验证控制系统的跟踪性能。

最后, 在 MATLAB 中的 Simulink 环境和 Command Window 界面, 同步运行图 8 所示的 VAVACS 三参数前馈解耦单神经元 PID 控制系统和 MSNPIDA.m, 可获取整定后的权值与增益系数和相应的送风温度、送风静压和室温的响应过程, 分别如表 2 和图 10~图 12 所示。

表 2 基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数单神经元 PID 控制器 ω 与 λ 系数整定值

Table 2 Coefficient setting values of ω and λ of single neuron PID controller for VAVACS with three-parameter based on MSNPIDA

回路/参数	ω_1	ω_2	ω_3	λ
控制回路 1	-4.6651	0.015	-0.01235	0.16
控制回路 2	-8.6215	0.052	-0.59563	0.02
控制回路 3	0.08945	0.00016	0.60576	0.56

此外, 为了比较解耦和非解耦方式的控制效果, 同时也进行了基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数单神经元 PID 系统的数值仿真。

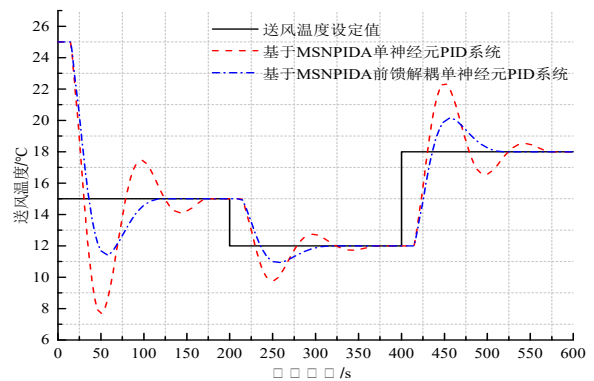


图 10 送风温度的响应曲线

Fig.10 Response curve of supply air temperature

分析图 10, 相比于未解耦时, 经过解耦后的控制回路 1 的超调量减少了 54%, 调节时间缩短了 27%。

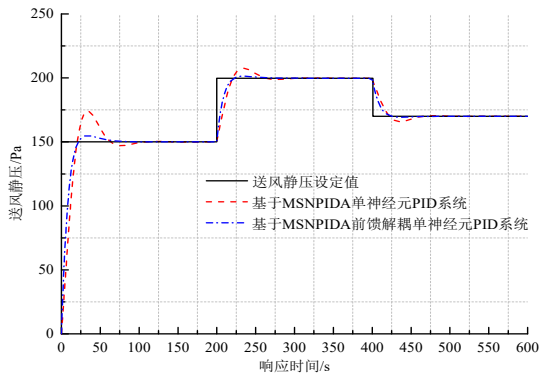


图 11 送风静压的响应曲线

Fig.11 Response curve of static pressure of supply air

分析图 11, 相比于未解耦时, 经过解耦后的控制回路 2 的超调量减少了 81%, 调节时间缩短了 29%。

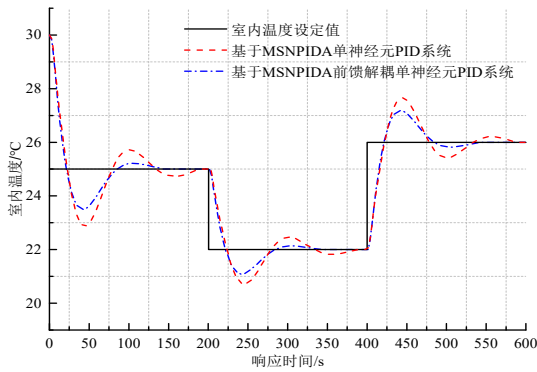


图 12 室内温度的响应曲线

Fig.12 Response curve of indoor temperature

分析图 12, 相比于未解耦时, 经过解耦后的控制回路 3 的超调量减少了 25%, 调节时间缩短了 21%。

基于图 10~图 12, 可知 VAVACS 控制回路之间的耦合主要影响响应的幅值、响应速度与稳定性。通过对 VAVACS 的耦合传递函数矩阵分析可知, T_{SA} 、 T_n 受到 Q_{CW} 与 Q_{SA} 的影响。由式(2)可知 $G_{11}(s)$ 的传函增益为负、 $G_{13}(s)$ 的传函增益为正、 $G_{31}(s)$ 的传函增益为负、 $G_{33}(s)$ 的传函增益为正, 可知, T_{SA} 、 T_n 的变化趋势应相同。同理分析, T_{SA} 与 P_{SA} 的变化趋势相反。通过对比图 10~图 12 的仿真结果, 表明本文的仿真结果符合理论要求。同时, 在后 200s 与 400s 内三个被控参数的设定值改变后, 经过解耦后的 T_{SA} 、 P_{SA} 与 T_n 能够较快的实现跟踪设定值, 具有很好的跟踪能力。

此外, 基于 MSNPIDA 的 VAVACS 三参数前

馈解耦单神经元 PID 控制系统的性能指标如表 3 所示。

表 3 主要控制性能指标 (前 200s 内)

Table 3 Main control performance indexes during 200s

控制回路	控制回路 1	控制回路 2	控制回路 3
性能指标			
超调量/%	22.6	3.1	5.6
响应最值	11.6°C	154.6Pa	23.6°C
上升时间/s	34.8	24.8	24.6
峰值时间/s	58.7	40.2	48.6
调节时间/s	123.8	77.8	148.9
稳态误差	0°C	0Pa	0°C

分析表 3, 由于空调房间具有一定的热储蓄能力, 故控制回路 3 的调节时间比回路 1 与回路 2 的调节时间长。

5 结论

综上所述, 针对 VAVACS 的三个主要控制回路在运行时会出现控制通道之间相互耦合的特性, 本文提出了一种改进的单神经元 PID 前馈解耦控制策略。通过对 VAVACS 运行时的稳定性分析, 设计了前馈解耦矩阵。借助 MATLAB 软件, 对 VAVACS 三参数前馈解耦控制系统进行了组态与数值模拟并得到以下结论:

(1) 本文提出的基于 MSNPIDA 的前馈解耦控制策略不仅消除了 VAVACS 三个控制回路之间的耦合效应, 且提升了相关控制性能指标。

(2) 改进后的单神经元 PID 控制器可以依据被控制量的实时误差在线调整增益 λ 与权值 ω 的数值, 控制系统具有更小的超调量和更快的响应速度, 很好的提升了控制系统的运行性能, 对 VAVACS 的实际工程应用具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 高佳佳,徐新华,黄公胜.变风量空调系统室内温度控制[J].华中科技大学学报,2015,43(12):86-89,105.
- [2] 闫秀联,颜菲菲,闫秀英.变风量空调系统温湿度解耦控制[J].制冷与空调,2019,33(3):298-302,342.
- [3] 曹振华.变风量空调系统的控制仿真研究[J].制冷与空调,2013,27(4):407-410.
- [4] 郭方敏,任庆昌.VAV 空调系统末端解耦控制研究[J].

- 自动化与仪器仪表,2010,(4):141-143.
- [5] Archana T, Amit P, Souvik B. Feedback linearization based control of a variable air volume air conditioning system for cooling applications[J].ISA Transactions, 2008,47(3):339-349.
- [6] 王雁, 王军, 王瑞祥, 等. 采用对角矩阵解耦法提高变风量空调的性能[J].建筑电气,2004,(6):3-7.
- [7] 陈大鹏, 张九根, 梁星. 基于解析法的变风量空调解耦优化控制[J].计算机工程与应用,2018,54(18):235-241.
- [8] 付龙海, 李蒙. 基于 PID 神经网络解耦控制的变风量空调系统[J].西南交通大学学报,2005,40(1):13-17.
- [9] Godwine S O, Ye Y. A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air-conditioning systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016, 59(1):784-817.
- [10] 孙宁, 李吉生, 彦启森. 变风量空调系统设计浅谈[J].暖通空调,1997,27(5):53-59.
- [11] 方康玲. 过程控制及其 MATLAB 实现[M].北京:电子工业出版社,2013:160-163.
- [12] Wang J, Wang Y. Performance improvement of VAV air conditioning system through feedforward compensation decoupling and genetic algorithm[J]. Applied Thermal Engineering,2008,28(5): 566-574.
- [13] 徐玮, 张九根, 杨伟斌, 等. 自适应遗传算法在变风量空调系统解耦控制中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2017,(4):95-99,103.
- [14] 郑辑光, 韩九强, 杨清宇. 过程控制系统[M].北京:清华大学出版社,2012:178-179.
- [15] 王建玉, 任庆昌. 变风量空调系统的模型预测控制及仿真研究[J].系统仿真学报,2008,20(16):4446-4450.
- [16] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2016:311-312.
- [17] 陈静杰, 顾泽龙, 陆道溢. 面向航站楼环境二氧化碳浓度控制研究[J].计算机仿真,2019,36(1):23-28.
- [18] 沈斌, 尹斌, 孙维广. 基于单神经元自适应 PID 的光伏发电 MPPT[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(2):89-95.
- [19] 曹振华. 地源热泵空调系统的控制仿真研究[J].制冷与空调,2017,31(3):313-316,340.
- [20] 陆亚俊, 马最良, 邹平华. 暖通空调[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:133-145.
- [21] Min N, Zaheeruddin M. Neuro-optimal operation of a variable air volume HVAC&R system[J]. Applied Thermal Engineering,2010,30(5):385-399.