

高压饱和气体制备系统饱和室多变量控制研究^①

王文华, 何建忠, 孙 权

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 高压饱和气体制备系统的饱和室出口压力、流量和温度调节系统是一个相互耦合的三输入三输出系统。针对以上特点采用部分解耦控制策略, 压力—流量调节子系统采用静态解耦的专家控制方式, 温度调节子系统采用串级模糊 PID 控制方式。通过仿真试验证明这种控制策略能够获得良好的控制效果。

关键字: 多变量; 静态解耦; 专家控制; 串级控制; 模糊 PID

Multi-Variable Control of Saturator in High Pressure Saturated Air Preparation System

WANG Wen-Hua, HE Jian-Zhong, SUN Quan

(College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The outlet pressure, flow and temperature regulating system of saturator in pressure saturated air preparation is a three-input three-output coupled system. The partial decoupling control strategy is presented according to the characters. The expert control strategy with static decoupling is proposed in the pressure and flow regulating subsystem. The cascade fuzzy PID control strategy is proposed in the temperature regulating subsystem. The result of simulation proves good control effect of this control strategy.

Key words: multi-variable; static decoupling; expert control; cascade control; fuzzy PID

湿度是一个重要的环境参数, 湿度仪器仪表广泛用于航空航天、微电子、原子能、石化、电力、气象、仓储等领域。随着现代科学技术和国民经济的快速发展, 对湿度的测量和控制的要求也日益提高, 建立高水平的国家湿度计量标准装置就显得非常重要和迫切^[1-3]。高压饱和气体制备系统便是为建立高水平湿度计量标准装置提供压力、流量和温度可控的高压饱和气体。饱和室是高压饱和气体制备系统的核心部分, 也是整个系统控制的难点。

饱和室中各控制系统之间存在着相互关联作用, 如果忽视控制系统之间的关联, 控制品质将会变得很差; 而另一方面多输入多输出系统的完全解耦在设计 and 整定存在着很多困难。针对以上特点, 本文提出采用部分解耦策略, 即压力—流量调节子系统采用静态

解耦的专家控制, 温度调节子系统采用串级模糊 PID 控制。

1 系统对象研究与分析

1.1 饱和室及工艺描述

高压饱和气体制备系统是采用预饱和器加饱和器的结构, 气体在经过预饱和室达到 90%-95% 的湿度后进入饱和室 (如图 1 所示), 在饱和室降低一定温度后达到 100% 饱和。饱和室采用“迷宫式”结构, 气体从管的一端分三路进入相互隔离的螺旋形通道。通道位于水或冰面上方, 气流不断折回水或冰面, 从而有足够的机会同水或冰接触。气体出口有温度传感器、压力传感器和流量计各一个, 分别测量及反馈该处的温度、压力及流量。位于电加热器后的温度传感器测量及反馈载冷剂进口的温度。

① 基金项目: 上海市科委 2010 年度初创企业创新基金(1006H171900)

收稿时间: 2011-07-01; 收到修改稿时间: 2011-08-05

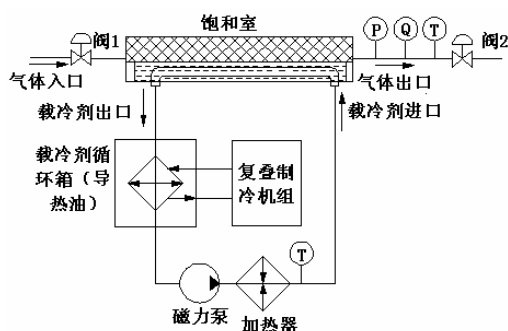


图 1 饱和室工艺流程示意图

1.2 饱和室被控对象的特点

饱和室调节系统中的三个控制系统的被控对象之间，存在着相互耦合作用。为了使各个控制系统都具有良好的调节品质，就必须设法进行解耦。由于在工程实际应用中，这种三输入三输出系统的完全解耦在设计和整定过程中存在着很多困难，同时从整体上来看，压力控制系统与流量控制系统的关联较大，而温度控制系统对压力控制系统以及流量控制系统的相对关联则较小；所以饱和室多变量调节系统采用部分解耦控制策略，即整个饱和室调节系统分为两个子系统：压力—流量调节子系统和温度调节子系统。其中压力—流量调节子系统采用静态解耦的专家控制方式，温度调节子系统采用串级模糊 PID 控制方式（如图 2，图 3 所示）。

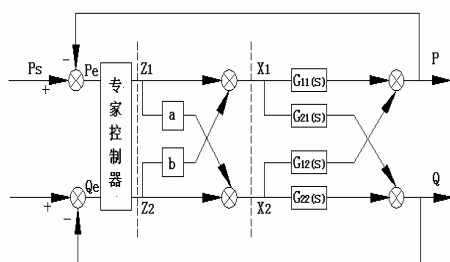


图 2 饱和室压力—流量过程子系统静态解耦的专家控制方框图

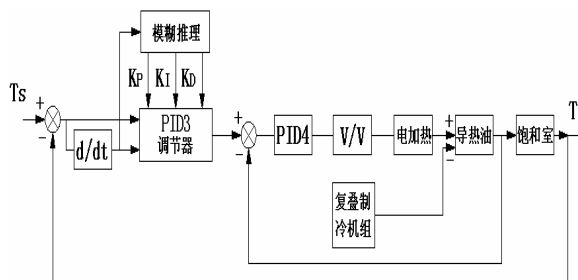


图 3 饱和室温度调节子系统方框图

由图 2 图 3 可以看出，温度调节子系统为串级控制回路，可以迅速消除系统自发扰动；压力—流量控制系统，由于调节对象的时间常数较小，故也可迅速消除系统自发扰动。因此，饱和器调节系统可以由上述两个调节子系统协调一致地工作来完成调节任务。

2 饱和室压力—流量过程子系统静态解耦的专家控制器设计

2.1 静态解耦设计

静态解耦设计过程简单，且所得到静态解耦器总是物理可实现的，在工业过程控制中应用广泛。考虑到压力—流量系统广义被控对象在其静态工作点附近的线性度良好，所以采用静态解耦法^[4]。

如图 2 所示，压力—流量调节子系统对象特性可用式(1)所示的传递函数矩阵表示,s 表示复变量：

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

假设图 2 中, $G_{11}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{12}(s)$, $G_{22}(s)$ 所对应的的开环放大倍数分别为 K_{11} , K_{21} , K_{12} 和 K_{22} , 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & 1 \end{bmatrix} \times \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

该系统静态全解耦的条件是：

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & b \\ a & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \quad (3)$$

则静态时

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & d \end{bmatrix} \times \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} cZ_1 \\ dZ_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)可得

$$a = -\frac{K_{21}}{K_{22}} \quad (5)$$

$$b = -\frac{K_{12}}{K_{11}} \quad (6)$$

从图 2 也可以看出，补偿网络在系统中起到的是一个静态前馈作用，并且静态时 P 只与 Z_1 有关， Q 只与 Z_2 有关。

实践表明，在本系统中，前向通道 $G_{11}(s)$, $G_{22}(s)$ 与耦合通道 $G_{12}(s)$, $G_{21}(s)$ 动态响应相近，静态解耦能够取得很好的效果。

2.2 专家控制器的设计

根据式(5)和式(6)计算 a , b 值即可实现压力—流量调节子系统的静态全解耦,但在实际运行中,由于饱和和室本体结构存在着非线性,检测元件,变送器和执行结构又难免存在非线性,且压力—流量调节子系统始终存在着温度调节子系统的干扰和其他随机干扰。虽然系统在处于稳定的静态工作点处时可以获得良好的控制品质,但当系统偏离静态工作点较远时易引起不稳定因素,这时需要现场的操作人员通过手动控制阀门或改变设定参数使系统重新处于稳定的静态工作点。现场的操作人员在调试过程中积累了丰富的经验,因此可以总结利用这些经验,采用专家静态解耦控制方式。

令 $P_e(k)$ 、 $P_e(k-1)$ 分别表示压力控制回路离散化的当前和前一个采样时刻的误差值 $Q_e(k)$ 、 $Q_e(k-1)$ 分别表示流量控制回路离散化的当前和前一个采样时刻的误差值。则有 $\Delta P_e(k) = P_e(k) - P_e(k-1)$

$$\Delta Q_e(k) = Q_e(k) - Q_e(k-1) \quad (7)$$

压力—流量控制采用异步循环调节方式。根据误差及其变化,可设计专家控制器,该控制器可分以下十种情况进行设计。

情况 1: 当 $|Q_e(k)| > N_1$ 时,说明流量回路的误差绝对值已经很大,不管 $|P_e(k)|$ 如何,这时调整应遵循流量回路优先原则,即控制器输出增量为:

$$\Delta Z_1(k) = 0, \Delta Z_2(k) = \delta \text{ (或 } -\delta \text{)} \quad (8)$$

δ 为在保证系统平稳运行控制器对执行机构(调节阀)的最大增量(或最大负增量)输出。

δ 可取阀门全行程的 3%。

N_1 可选流量设定值的 5%。

此时,控制器相当于实施开环控制。

情况 2: 当 $N_2 \leq |Q_e(k)| \leq N_1$, $Q_e(k)\Delta Q_e(k) > 0$ 时;说明流量控制回路在朝误差绝对值增大方向变化,且此时误差也较大,可考虑由控制器实施较强的控制作用,以达到扭转误差绝对值朝减小方向变化,并迅速减小误差的绝对值,则

$$\Delta Z_2(k) = k_1[k_{p2} \times \Delta Q_e(k)] + k_{i2}Q_e(k) \quad (9)$$

k_1 为增益放大系数, $k_1 > 1$ 。 k_{p2} , k_{i2} 分别为 PID2 的比例和积分系数。 N_2 可选流量设定值的 3%。

情况 3: $N_2 \leq |Q_e(k)| \leq N_1$, $Q_e(k)\Delta Q_e(k) \leq 0$ 时,说明流量控制回路误差较大,但误差朝绝对值减小的方向

变化,可考虑控制器实施一般的控制作用,所以控制器的增量输出

$$\Delta Z_2(k) = k_{p2} \times \Delta Q_e(k) + k_{i2}Q_e(k) \quad (10)$$

情况 4: $|Q_e(k)| < N_2$, $Q_e(k)\Delta Q_e(k) > 0$ 时;说明流量控制回路尽管误差朝绝对值增大方向变化,但误差绝对值本身并不是很大,可考虑控制器实施一般的控制作用,只要扭转误差的变化趋势,使其朝误差绝对值减小方向变化,所以控制器增量输出为

$$\Delta Z_2(k) = k_{p2} \times \Delta Q_e(k) + k_{i2}Q_e(k) \quad (11)$$

情况 5: $|Q_e(k)| < N_2$, $Q_e(k)\Delta Q_e(k) \leq 0$ 时;说明流量控制回路误差朝绝对值减小的方向变化,且误差本身并不大,可考虑控制器实施较弱的控制作用,所以控制器增量输出为

$$\Delta Z_2(k) = k_2[k_{p2} \times \Delta Q_e(k)] + k_{i2}Q_e(k) \quad (12)$$

k_2 为抑制系数, $0 < k_2 < 1$ 。

情况 6: $|Q_e(k)| \leq N_1$, $|P_e(k)| > M_1$ 时,说明压力回路的误差绝对值已经很大,则

$$\Delta Z_1(k) = \delta \text{ (或 } -\delta \text{)} \quad (13)$$

M_1 可选压力设定值的 5%。

情况 7: $|Q_e(k)| \leq N_1$, $M_2 \leq |P_e(k)| \leq M_1$, $P_e(k)\Delta P_e(k) > 0$ 时,说明压力控制回路在朝误差绝对值增大方向变化,且此时误差也较大,可考虑由控制器实施较强的控制作用,则

$$\Delta Z_1(k) = k_1[k_{p1} \times \Delta P_e(k)] + k_{i1}P_e(k) \quad (14)$$

M_2 可选压力设定值的 3%。 k_{p1} , k_{i1} 分别为 PID1 的比例和积分系数。

情况 8: $|Q_e(k)| \leq N_1$, $M_2 \leq |P_e(k)| \leq M_1$, $P_e(k)\Delta P_e(k) \leq 0$ 时,说明压力控制回路误差较大,但误差朝绝对值减小的方向变化,可考虑控制器实施一般的控制作用,则

$$\Delta Z_1(k) = k_{p1} \times \Delta P_e(k) + k_{i1}P_e(k) \quad (15)$$

情况 9: $|Q_e(k)| \leq N_1$, $|Q_e(k)| < M_2$, $Q_e(k)\Delta Q_e(k) > 0$ 时,说明压力控制回路尽管误差朝绝对值增大方向变化,但误差绝对值本身并不是很大,可考虑控制器实施一般的控制作用,则

$$\Delta Z_1(k) = k_{p1} \times \Delta P_e(k) + k_{i1}P_e(k) \quad (16)$$

情况 10: $|Q_e(k)| \leq N_1$, $|P_e(k)| < M_2$, $P_e(k)\Delta P_e(k) \leq 0$ 时,说明压力控制回路误差朝绝对值减小的方向变化,且误差本身并不大,可考虑控制器实施较弱的控制作用,则

$$\Delta Z_1(k) = k_2[k_{p1} \times \Delta P_e(k)] + k_{i1}P_e(k) \quad (17)$$

3 饱和室温度串级模糊PID控制器设计

如图3所示,饱和室的控制方式为串级模糊控制,温度副回路起迅速的“粗调”作用,温度主回路起进一步的“细调”作用。本文对复叠制冷机组的控制不作讨论,复叠制冷机组可以看成根据工况提供合适的冷量,副回路仅讨论加热器。主调节器的输出作为副调节器的设定,副调节器的输出送往调压器来控制导热油的温度从而达到控制饱和室出口饱和气体的温度。串级控制系统可快速克服进入副回路的各种扰动,对负荷的变化和操作条件的改变有一定的自适应能力。

饱和室的温度对象随着负荷变化或干扰因素影响,其对象特性或结构会发生改变,常规串级控制效果超调较大。模糊控制是基于模糊集合论,模拟人的模糊推理和决策过程的一种实用的控制方法,不完全依赖与控制对象的模型,有很强的鲁棒性。因此,温度控制系统采用串级模糊控制,即主控制器为模糊PID控制器,副控制器采用PI控制器。

选取主回路温度偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入, PID 参数 K_p , K_I , K_D 作为模糊控制器的输出。 E, EC, K_p, K_I, K_D 论域上的基本模糊子集均用符号表示 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。选择隶属度函数均为三角隶属度函数。

控制规则表如表1,表2,表3所示,采用的模糊推理算法是 Mamdani 的“最大—最小”推理法,解模糊化采用“mom”法^[6]。

表1 K_p 的模糊规则表

E	ΔK_p						
	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	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2 K_I 的模糊规则表

E	ΔK_I						
	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 K_D 的模糊规则表

E	ΔK_D						
	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

4 控制算法的仿真研究

4.1 压力—流量调节子系统专家控制结合静态解耦仿真

为了对本文提出的智能控制算法的各种性能进行验证,根据实际试验参数,饱和室压力—流量对象特性的传递函数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.33}{4s+1} & -\frac{0.29}{5s+1} \\ \frac{3.5}{8s+1} & \frac{3.7}{7s+1} \end{bmatrix}$$

据式(5)和式(6)计算出

$$a = -0.88$$

$$b = 1.06$$

使用 Matlab 仿真语言中的 simulink 仿真工具得到的仿真如图4所示:

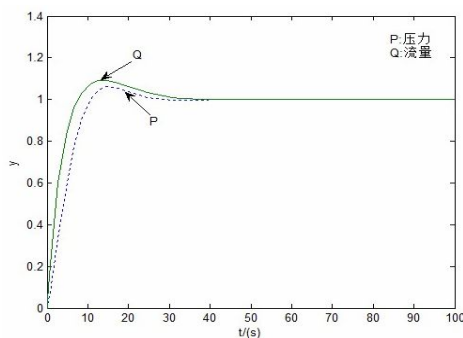


图4 专家控制条件下的静态解耦压力—流量阶跃响应曲线

4.2 温度调节子系统串级模糊 PID 控制仿真

温度对象副回路传递函数 $G_4(s) = \frac{1}{10s+1}$ ，饱和器

温度对象传递函数 $G_{33}(s) = \frac{4}{(43s+1)(20s+1)}$ 。

系统阶跃响应如图 5 所示，从图中可以看出串级模糊 PID 控制能够有效地抑制超调，过渡时间短，控制效果优于常规串级 PID 控制。

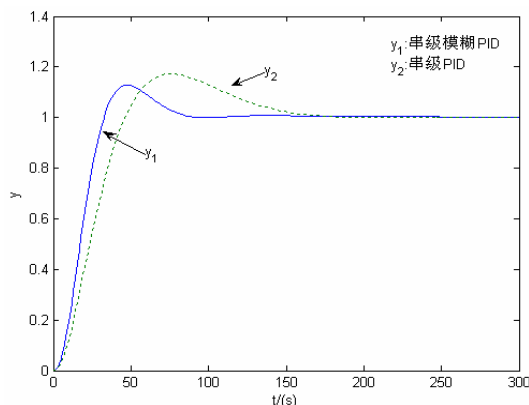


图 5 饱和室变量的串级模糊 PID 的阶跃响应曲线

5 结论

压力—流量调节系统间关联较大，本文采用专家控制算法结合静态解耦对其控制，仿真结果表明可以获得良好的动静特性；而温度与压力—流量系统间关联较小，故采用串级模糊 PID 控制单独对其控制，

子系统按上述控制策略下协调一致地工作，能够产生温度、压力、流量可控的高压饱和气体，为建立高水仿真结果表明该算法能够有效地抑制超调，过渡时间短，表现出良好的响应特性。实践表明，饱和室两个平湿度计量标准装置提供气源，具有广泛的实际工程应用价值。

参考文献

- 1 劳逸民.浅析采用冷冻除湿方式的温湿度独立控制系统冷源节能的可行性.建筑科学,2011,27(8):48-50.
- 2 Acheson D. Humidity T. and moisture.1965:521-530.
- 3 易洪,孙国华,等.低霜点湿度检测标准装置的研制.陶瓷学报,2008,29(3):301-304.
- 4 于希宁,边立秀,孙建平.磨煤机解耦控制系统的设计与调试.河北电力技术,1994,6:10-14.
- 5 俞金寿.工业过程先进控制.北京:中国石化出版社,2002.
- 6 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真.北京:电子工业出版社,2002.
- 7 Ahmed SS, Majid MS, Novia H, et al. Fuzzy logic based energy saving technique for a central air conditioning system. Energy, 2007,32(7):1222-1234.
- 8 Jung CH, Ham CS, Lee KI. A Real-time, Self-tuning Fuzzy Controller Through Scaling Adjustment for the Steam Generator of NPP. Fuzzy Sets and Systems, 1995,74:53-60.

(上接第 251 页)

6 结语

针对工程现场串行通信调试设备较繁琐的问题，基于 symbian S60 v5 操作平台，设计了此套串行通信专用调试软件，可使工程现场 S60 v5 操作平台的手机能方便、快捷的调试串行通信设备。调试过程中的数据亦可直接由手机短信发出，以方便远程调试与诊断。

参考文献

- 1 马建,陈健,牛建伟,邹仕洪,高一普.智能手机操作系统编程—Symbian 及 S60 系列.北京:科学出版社,2005.
- 2 DIGIA Inc. Programming for the Series 60 Platform and Symbian OS. Helsinki: John. Wiley. & Sons Ltd, 2003.
- 3 TSS000601-Serial communication over USB on S60 3rd

Editiondevices.2007.http://wiki.forum.nokia.com/index.php/TSS000601_-_Serial_communication_over_USB_on_S60_3rd_Edition_devices.

4 Send UI API: Using the SendUi API.2007. http://www.developer.nokia.com/document/Cpp_Developers_Library/GUID-96C272CA-2BED-4352-AE7C-E692B193EC06/html/Send_UI_API4.html.

5 王宁.S60 第三版智能手机应用超详细解析.数字通信, 2008,(15):105-109.

6 Symbian Software Ltd. How do I get my Symbian OS application signed. A guide to Symbian Signed. 2005. Helsinki: Symbian Software Ltd. 2005,1-11.