

# 基于自适应模糊控制的节能装置研究

陆仲达, 王丽婧, 徐凤霞

(齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:** 针对凹版印刷干燥设备, 设计节能装置, 该装置利用压缩机换热原理, 对余热进行再循环利用; 设计自适应模糊 PID 节能控制系统, 完成对压缩机, 调功器, 变频器的实时控制; 利用组态软件完成系统界面设计, 人机交互简洁, 操作方便; 控制算法采用自适应模糊 PID 控制, 依靠数据信息来调整模糊逻辑系统的参数, 通过在线计算得到最佳控制器参数, 抑制不确定性对系统的影响; 将节能装置应用到凹版印刷机, 实验数据显示, 系统耗能减少, 效率得到提高, 达到节能目的, 证明了节能系统的有效性, 具有较强的应用价值。

**关键词:** 自适应控制; 模糊 PID 控制; 节能; 控制器设计; 热交换

## Research of Control System of Saving Energy Based on Self-adapted Fuzzy Control

Lu Zhongda, Wang Lijing, Xu Fengxia

(School of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

**Abstract:** According to the gravure printing machine, design a saving device. Using the compressor heat transfers principle, recycling of waste heat. The design of a control system of saving energy based on self-adapted fuzzy control is put forward. Complete real-time control of the compressor, the dynamometer, frequency converter. Using configuration software to complete the system interface design, human-computer interaction is concise and easy to operate. Comparison of traditional PID control algorithm and the adaptive fuzzy control. In the gravure printing system. Using the adaptive fuzzy control algorithm. Rely on data information to adjust the parameters of the fuzzy logic system, the optimum parameters of the controller is obtained by online computation, and to restrain the uncertainty influence. Finally, experiments is carried out energy consumption is reduced, effect of control is excellent. To achieve the purpose of energy saving. The validity of the design are proved. The control system has strong application value.

**Keywords:** adaptive control; fuzzy PID control; saving energy; controller design; heat-exchange

## 0 引言

干燥过程是化工生产的重要操作单元, 凹版印刷机, 层压机, 挤出机, 工业用覆膜机干燥时, 其系统内会产生大量的易挥发性溶剂, 且耗电量极大, 造成环境的严重污染及资源浪费。对于污染和耗能较高的行业, 解决节能减排问题势在必行。因此, 在干燥新技术开发和规模化应用的同时, 研究传统干燥技术与设备的节能降耗, 具有很大的社会效益和经济效益。随着传感器技术、计算机技术、控制理论的发展, 研发应用新型干燥设备控制系统, 提高干燥设备的控制精度和效率, 实现物料干燥智能控制, 是干燥设备技术发展的主要方向之一。

本文针对凹版印刷这一污染和耗能较高的行业, 设计自适应模糊 PID 控制的节能干燥系统, 在传统电加热系统中, 加入热交换装置, 完成干燥过程热量的回收利用; 在控制方法上, 采用自适应控制与模糊 PID 控制结合, 提高系统运行效率。利用组态软件完成系统界面设计, 使人机交互简洁, 操作方便。

收稿日期: 2015-04-26; 修回日期: 2015-06-01。

基金项目: 第 48 批“留学回国人员科研启动基金”资助项目。

作者简介: 陆仲达(1970-), 男, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事现代集成控制、智能仪表的开发与测试, 过程控制系统等方向的研究。

## 1 系统组成

节能系统工作框图如图 1 所示。节能控制系统由调功器、变频器、控制单元, 热交换装置等组成, 其中热交换装置由压缩机, 冷凝器, 蒸发器, 节流阀, 储液罐组成。

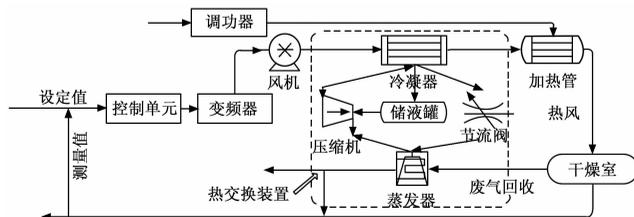


图 1 节能系统工作框图

系统主要控制风量和温度。系统开始工作, 驱动风机将定量空气送入系统中, 经由加热管, 向干燥室送入热风, 干燥室内高风速移动的空气分散, 对产品进行干燥处理。此时, 气体状态下的溶剂及水分与高温空气一起排出, 热风引入热交换装置, 蒸发器完成将制冷剂吸热汽化, 送给压缩机完成将制冷剂由低温低压转换成高温高压, 传至冷凝器进行高压放热液化的过程, 同时, 测量干燥室出口及出风口空气温度, 压力, 将高温废气转换成低温气体, 完成废气热回收利用。将采集数据发送给控制器, 利用变频器调频来调整所需风量, 调节调功输

出, 使加热管完成加热任务。装置中采用无刷直流电机作为压缩机的驱动电机, 提高能效, 延长使用寿命更长。

## 2 控制系统设计

### 2.1 控制单元硬件设计

控制单元由工控机, 采集卡 8344A, 输出卡 1720U, 及核心控制板卡组成, 装置正常工作条件下, 控制单元需完成对压缩机, 调功器, 变频器, 实时控制, 并将设备运行状态传至显示屏。由 8344A 输出 4~20 mA 电流信号控制调功器及变频器, 输出 0~5 V 电压信号, 使继电器常开端接通, 则交流接触器上的线圈通电并吸合, 使压缩机启动, 做到弱电控制强电。

开发以单片机为控制核心的控制板, 该控制板需具备 4 路模拟量输出、6 路 4~20 mA 模拟量采集、8 路开关量输出、2 路开关量输入。通信采用 RS485 模块, 内嵌标准 Modbus 通信协议。设计中采用 STC89C51RC/RD+ 系列单片机。利用 AD5422、AD7705 完成数模、模数转换, 以 MAX2322 硅桥接收器作为通讯前端, 考虑电信号干扰及整体电路降压限流作用, 应用阻容滤波器。控制板设计原理框图如 2 所示。

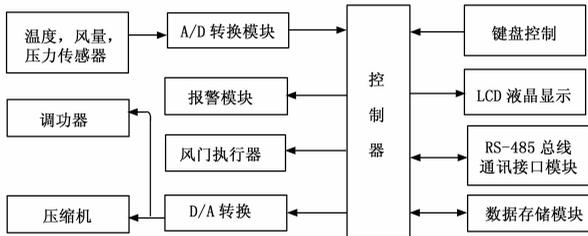


图 2 控制器设计原理框图

### 2.2 自适应模糊 PID 控制

节能装置的温度控制采用模糊 PID 控制, 风量控制采用模糊 PI 控制。在温度控制系统中, 以温度变化及温度变化率作为控制系统的输入量, PID 控制器的参数变化量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  作为输出量。形成双输入三输出控制器, 采用模糊 PID 算法。其控制系统如图 3 所示。

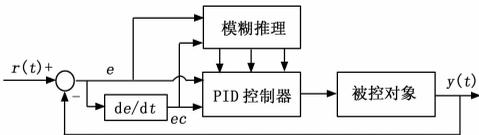


图 3 模糊 PID 控制系统图

系统中输入量温度偏差  $e$  语言变量表示为  $E$ 。温差变化率为  $ec = de/dt$ , 语言变量表示为  $E_c$ 。将  $E$ 、 $E_c$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  均定义为 7 个模糊子集, 相应的语言变量为 {负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)}。隶属度函数取高斯型, 表述为:  $\mu(x) = \exp[-(x-c)^2/\sigma^2]$ 。

当偏差  $e$  较大时, 选取较大的  $K_p$  加快系统响应速度, 取较小的  $K_d$  避免微分过饱和, 取  $K_i = 0$  防止系统较大的超调, 积分饱和。当  $e$  较小时, 应增大  $K_p$ 、 $K_i$  的取值。偏差变化量  $ec$  大小表明偏差变化的快慢,  $ec$  越大,  $K_d$  取值越小,  $K_i$  取值越

大。在实验测试中, 设定温度的期望值为  $65^\circ\text{C}$ , 输入语言变量  $e$  与  $ec$  的论域  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ , 输出语言变量  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的论域为  $\{-1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ 。模糊控制规则可以归纳为 49 条。采用归一化论域得到表 1 模糊 PID 调节规律表。

模糊控制将“专家经验”通过模糊控制规则表体现, 规则表内存空间量大, 且只能按已编入的规则进行控制。结合自适应控制与模糊控制, 依靠数据信息来调整模糊逻辑系统的参

表 4 模糊 PID 调节规律表

$E \setminus E_c$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PM/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

数, 通过在线计算即可得到最佳输出, 抑制系统不确定性。设节能系统是一个二维模糊系统  $g(x)$  为集合  $U = [\alpha_1, \beta_1] \times [\alpha_2, \beta_2] \subset R^2$  上的一个函数, 对任意  $x \in U$  都能得到  $g(x)$ , 设计一个逼近的模糊系统。如果  $x_1$  为  $A_1^i, x_2$  为  $A_2^j$  则  $y$  为  $B^{i_1 i_2}$ , 将模糊集  $B^{i_1 i_2}$  的中心表示为:

$$\bar{y}^{i_1 i_2} = g(e_1^i, e_2^j) \quad (1)$$

采用乘积推理机, 单值模糊器和中心平均解模糊器, 根据  $M = N_1 \times N_2$  条规则构造模糊系统  $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{\sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{i_2=1}^{N_2} \bar{y}^{i_1 i_2} (\mu_{A_1}^{i_1}(x_1) \mu_{A_2}^{i_2}(x_2))}{\sum_{i_1=1}^{N_1} \sum_{i_2=1}^{N_2} (\mu_{A_1}^{i_1}(x_1) \mu_{A_2}^{i_2}(x_2))} \quad (2)$$

确定系统的模糊逼近精度, 二维模糊系统  $g(x)$  为集合  $U = [\alpha_1, \beta_1] \times [\alpha_2, \beta_2] \subset R^2$  上连续可微, 则

$$\|g - f\|_\infty \leq \left\| \frac{\partial g}{\partial x_1} \right\|_\infty h_1 + \left\| \frac{\partial g}{\partial x_2} \right\|_\infty h_2 \quad (3)$$

$$h_i = \max_{1 \leq j \leq N_j - 1} |e_i^{j+1} - e_i^j| \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

式中, 无穷范数  $\|*\|_\infty$  定义为  $\|d(x)\|_\infty = \sup_{x \in U} |d(x)|$ 。则系统可等价于二位函数, 设计模糊系统  $f(x)$ , 使之逼近定义在  $U = [-6, 6] \times [-6, 6]$  上的连续函数  $g(x) = 0.52 + 0.1x_1 + 0.28x_2 - 0.06x_1x_2$ , 设计含有 49 条 IF-THEN 模糊规则。当所需精度为 0.2 时, 则模糊系统可描述为  $f(x)$ :

$$f(x) = \frac{\sum_{i_1=1}^{11} \sum_{i_2=1}^{11} g(e_1^{i_1}, e_2^{i_2}) \mu_{A_1}^{i_1}(x_1) \mu_{A_2}^{i_2}(x_2)}{\sum_{i_1=1}^{11} \sum_{i_2=1}^{11} \mu_{A_1}^{i_1}(x_1) \mu_{A_2}^{i_2}(x_2)} \quad (5)$$

利用 MATLAB 得到系统模糊逼近效果图 4 及误差逼近效果图 5。

## 3 实验测试

对节能装置进行测试, 每个控制器控制一个色组干燥过程, 通过人机组态界面观察 5 个色组组成的干燥系统运行。系统的人机界面设计通过力控组态软件完成, 包括主画面、变量设置、报警、历史报表、进风风门、趋势曲线、压缩机管理等

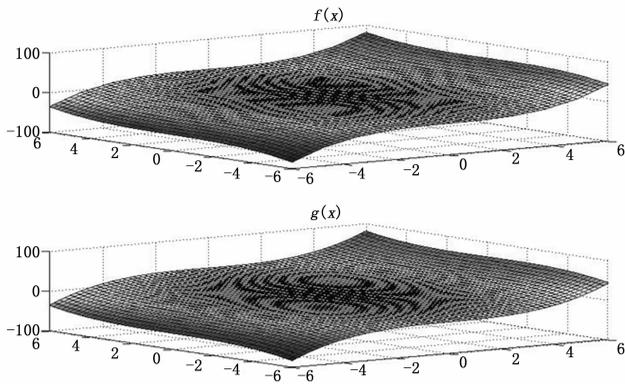


图 4 模糊逼近

Approaching error

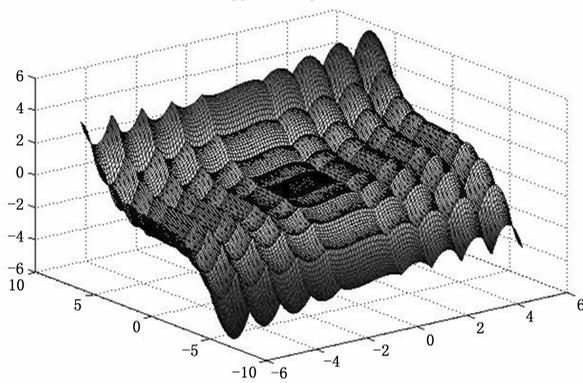


图 5 逼近误差

界面。人机界面友好，操作简便。

图 6 为 PID 温度控制系统输出曲线，图 7 为自适应模糊 PID 温度控制系统输出曲线。

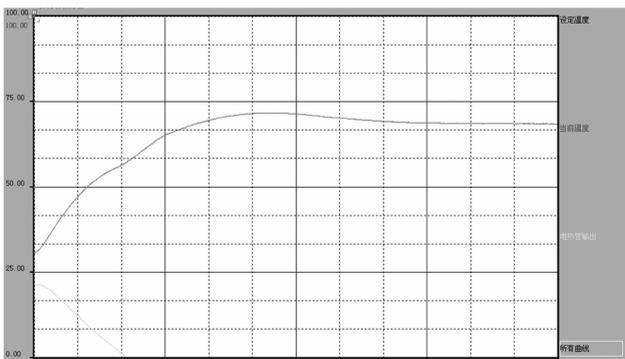


图 6 PID 温度控制系统输出曲线

对比图 6，图 7，自适应模糊 PID 控制方法明显优于传统 PID 控制，其上升时间短，超调小，控制精度高。测量系统数据，自适应模糊 PID 控制系统起动电流小，噪声低，控制精度高。当温度设定为 65℃，风量为 1 800 m<sup>3</sup>/h，测得单台节能装置耗能约为 6 kW/h，为常规设备的 50%。调功输出稳定，系统能耗减少，达到节能目标。

将节能干燥设备应用于“北人”转印膜机上，完成节能应用前后耗电量的对比测试。由黑龙江节能监测中心发布测试报告，以确定节能烘干系统的节能效果。其中节能干燥设备投入

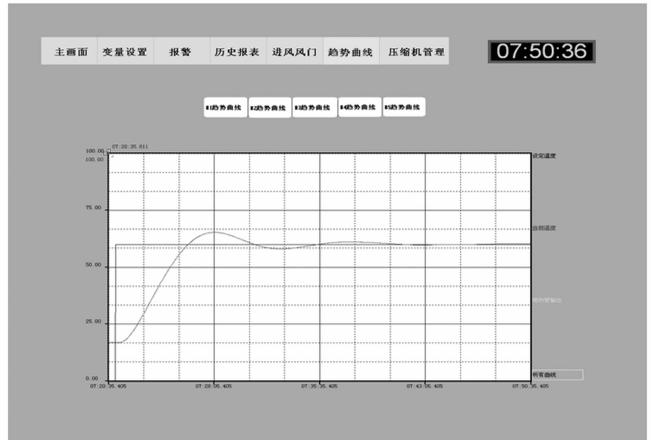


图 7 自适应模糊 PID 温度控制系统输出曲线

前后运行时数据汇总表如表 2 所示。

表 2 设备投入前后运行时数据汇总表

序号	状态	检测时间	有功电能/(kWh)	转印膜印刷数据/m	印制品单耗/(kWh/m)	投入设备后印制品单耗节能率/(%)
1	不投入节能系统单机组	9:00 至 10:00	38.7	3 660	$10.574 \times 10^{-3}$	86.32
2	投入节能系统单机组	10:35 至 11:35	5.5	3 800	$1.477 \times 10^{-3}$	
3	环境温度				13℃	

由监测数据得到：在相同条件下，投入节能系统后，印制品单耗节率为 86.32%，该设计节电率高，节能效果突出。

#### 4 结论

将节能装置应用于凹版印刷机，在传统电加热方式上设计热交换装置，完成废气的热量回收，该热交换装置所需动力小，仅为为电加热式的 15%~20%，使动力设备费用明显降低，做到了最大限度的节能；自适应模糊 PID 控制使调节时间减少，超调小，控制精度高，减少热能损耗，体现节能设计；组态设计使操作简单，易于监控。整体设计具有较大的经济优势和节能减排效益，应用前景广泛。

#### 参考文献：

- [1] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2011, 30 (1): 166-172.
- [2] 陈众, 张慧. 空气源热泵的分层递阶多智能体控制系统 [J]. 化工自动化及仪表, 2011 (8): 934-936.
- [3] Qiu C, Liu C, Shen F, et al. Design of automobile cruise control system based on Matlab and fuzzy PID [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (6): 197-202.
- [4] Liu Y, Zhang X G, Liu J G. Application of Self-adjusting Fuzzy Control to Air Compressor System [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33 (6): 204-206.
- [5] 张景元. 基于神经网络的自适应模糊 PID 控制系统 [J]. 计算机工程与设计, 2014, 35 (10): 3613-3616.
- [6] 刘文江, 隋青美, 周风余, 等. 基于自适应模糊滑模控制的船舶航向控制器设计 [J]. 信息与控制, 2012, 41 (2): 136-141.