

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.008

# 基于积分补偿模糊控制的气压控制系统

潘海鹏, 刘广云\*, 江先志

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对电磁阀无法建立精确的数学模型,及存在小信号死区时间的问题,课题组设计了基于STM32单片机的控制系统,提出了一种积分补偿模糊控制算法,将目标气压和实际气压的气压差以及气压差的变化率作为输入,建立模糊控制规则库,将脉冲宽度调制(PWM)信号作为输出作用于电磁阀,实现了气压的精准跟踪控制。实际运行结果表明:该方法在气压控制系统中具有控制精度高、鲁棒性好等特点,优于传统的PID控制方法。

**关键词:**气压控制;积分补偿;模糊控制规则库;脉冲宽度调制;STM32F103

中图分类号:TH137.53 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)03-0055-05

## Air Pressure Control System Based on Integral Compensation Fuzzy Control

PAN Haipeng, LIU Guangyun\*, JIANG Xianzhi

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the solenoid valve could not establish an accurate mathematical model and had a small signal dead time, a control system based on STM32 single chip microcomputer was designed, and a fuzzy control algorithm with integral compensation was proposed. The air pressure difference between the target air pressure and the actual air pressure, as well as the change rate of the air pressure difference were taken as the input, and the fuzzy control rule base was established. The PWM pulse width signal was taken as the output to the solenoid valve to realize the accurate tracking control of the air pressure. The actual operation results show that the proposed method has the characteristics of high control accuracy and good robustness in the pneumatic control system, and is superior to the traditional PID control method.

**Keywords:** air pressure control; integral compensation; fuzzy control rule base; PWM (Pulse Width Modulation); STM32F103

气压是一个常用的物理量,与我们的生活密切相关。在工业生产中,许多场合需要对气压进行控制,例如在特定的气压环境下对某些物品进行保存,或者是在特定的气压环境下对某些产品的性能进行检测等<sup>[1-2]</sup>。在仪器仪表行业中,为提高气动仪表的检测精度,需要对气压的控制快速、精准、稳定<sup>[3]</sup>;同时为测试比较不同材料之间的性能差异,系统需能控制多个管路的气压输出,这要求系统对主管的气压及最多64个支管路的气压控制精准。然而气体本身的可压缩性大、固有频率低及不易稳定等特点,导致控制气压的压

力变化是一个具有明显非线性和不确定性的过程<sup>[4-5]</sup>,且电磁阀存在小信号死区时间的特性,这又给气压的精准控制增加了困难。

邓建军等<sup>[6]</sup>针对电子比例阀的控制提出了一种自适应控制算法,该方法在工作条件大范围变化时能够准确的辨识出相应PID参数,进行准确控制,但该方法在接近目标气压值时上升时间较长。李琳等<sup>[7]</sup>针对液压缸的控制设计了一种BP神经学习算法——梯度下降法,但此算法的全局寻优能力不佳,容易陷入局部极值。张永贤等<sup>[8]</sup>针对气箱压力控制,提出了一种

收稿日期:2022-10-17;修回日期:2023-03-28

第一作者简介:潘海鹏(1965),男,河南濮阳人,教授,硕士研究生导师,主要研究方向为智能检测与控制、信息处理。通信作者:刘广云(1998),男,江西萍乡人,硕士研究生,主要研究方向为智能检测与控制。E-mail:2297711907@qq.com

改进粒子群算法(improved particle swarm optimization, IPSO)优化的 BP-PID 控制算法,通过用粒子群算法优化 BP 神经网络的加权系数得到最优权值,并按 BP 神经网络学习训练测试,得到最佳的 PID 控制参数。但该方法只停留在仿真阶段并未得到实际运用。赵志衡等<sup>[9]</sup>针对容腔气压的控制,提出了一种模糊 PID 的控制算法,解决了气压控制非线性造成的 PID 参数难以整定的问题,但在接近目标气压时过渡时间长,未能克服电磁阀小信号死区时间特性带来的问题。

因此,在前人研究的基础上,结合电磁阀自身存在小信号死区时间的特点,课题组基于 STM32 单片机的气压控制系统,提出了一种积分补偿模糊控制算法,并通过实际应用验证了系统的有效性。

### 1 系统总体设计方案

课题组基于 STM32F103 单片机设计了针对电磁阀驱动的压力控制系统,系统总体框图如图 1 所示。

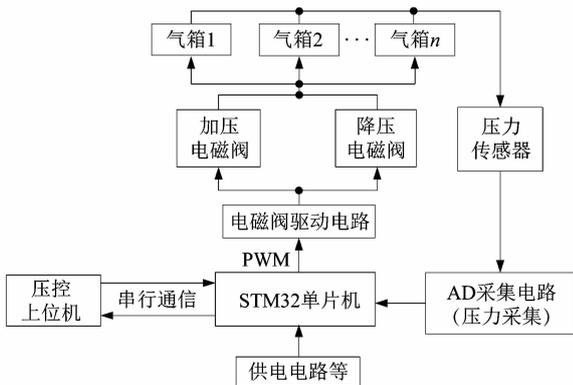


图 1 系统总体设计框图

Figure 1 System overall design block diagram

系统采用上、下位机结构,下位机包括气压检测和电磁阀驱动两部分。气压检测部分通过 A/D 采集电路实时监测压力传感器的反馈气压;电磁阀驱动部分采用 STM32 单片机的输出端口控制电磁阀的开闭。STM32 单片机将采集到的气压值和设定值的偏差值及其变化率经过计算得到 PWM 信号的占空比。将产生的 PWM 信号经过电磁阀驱动电路作用在电磁阀上,不断地调节电磁阀的开关,最终设置各控制回路中电磁阀的打开时间,并且该电磁阀的打开时间也在不断的根据实时的压力值进行变化,使管路内的气压能够快速精准的跟踪目标气压的变化。上位机与 STM32

单片机之间通过串行通信实现气压数据显示、目标值设定和曲线记录等功能。

### 2 系统的硬件设计

#### 2.1 电磁阀驱动电路

电磁阀驱动电路的作用是单片机 IO 口驱动控制电磁阀的开闭,控制电磁阀的开启时间,利用气泵和管道内的气压差进行加压。课题组选择 24 V 的高频电磁阀,其电磁阀驱动电路如图 2 所示。当 IO 口 PWM1 接收到高电平,使三极管导通,同时发光二极管导通点亮,P 沟道 MOS 管导通,接线端子两端会形成 24 V 电压差使电磁阀导通。当 IO 口 PWM1 接收到低电平,电磁阀两端电压为 0,电磁阀关闭。当接收到某个占空比的 PWM 脉宽信号时,电磁阀将保持在一定的打开状态,从而精准调节进气量和出气量。

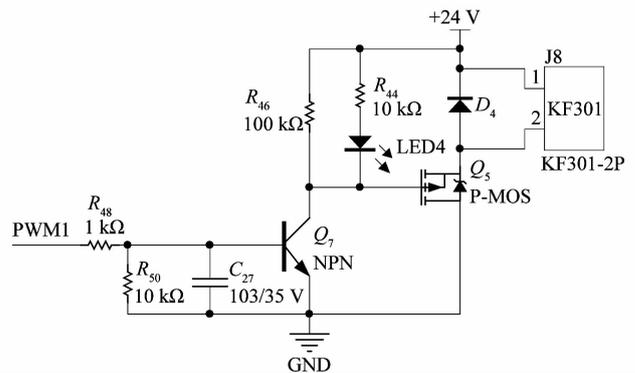


图 2 电磁阀驱动电路

Figure 2 Drive circuit of solenoid valve

#### 2.2 压力采集电路

压力采集电路的作用是实时检测系统实际的气压值。系统中需要采集的压力变送器的输出为 4 ~ 20 mA 电流输出,压力采集电路如图 3 所示。为提高压力控制的精度,电路中将传感器输入的电流信号经过一个电阻转换成电压信号,然后通过运算放大器 U13B 的比例调整得到输入电压,再经过 U13A 的比例调整得到调零电压。调节滑动变阻器  $R_{V1}$  和  $R_{V2}$  的电阻值可以调节调零电压和放大倍数,以适应传感器不同的输出信号的量程。调零电压和输入电压经过 U14A 运算放大器的调零放大得到 0 ~ 3.3 V 满量程的电压。用单片机内分辨率为 12 位的 A/D 转换器进行转换,获得实时气压值的数字量。

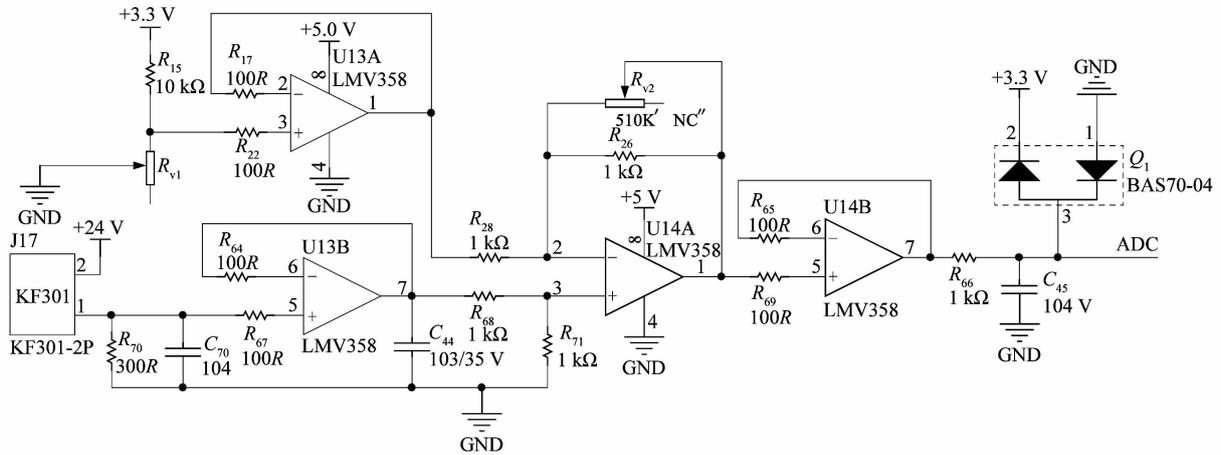


图3 压力采集电路

Figure 3 Pressure acquisition circuit

### 3 气压系统的控制策略设计

#### 3.1 积分补偿模糊控制算法

电磁阀存在小信号死区时间的特性,且不同电磁阀之间的死区时间也有一定的差异,无法对电磁阀建立准确的数学模型<sup>[10-11]</sup>;同时在加压过程中随着管道与气泵压差的变化也会加强气压控制的不稳定性,这给整个系统的气压控制的增加了一定的难度。而采用模糊控制算法能够实时检测压力变化,精确调节阀门的打开状态,实现气压的快速跟踪控制,但也会导致整

个压力控制系统产生一定的稳态误差,且上升时间较长,控制精度难以达到要求,在实际的应用中仍存在一定局限性<sup>[12-13]</sup>。导致这一问题的原因是压力控制系统在接近期望目标值时将会输出一个较短时间的气阀动作信号,该信号将不足以控制气压的变化。

为解决模糊控制算法中对电磁阀控制时会产生稳态误差的问题,在模糊控制算法的基础上引入了积分补偿控制器,以达到气压精准控制的效果。积分补偿模糊控制系统结构如图4所示。

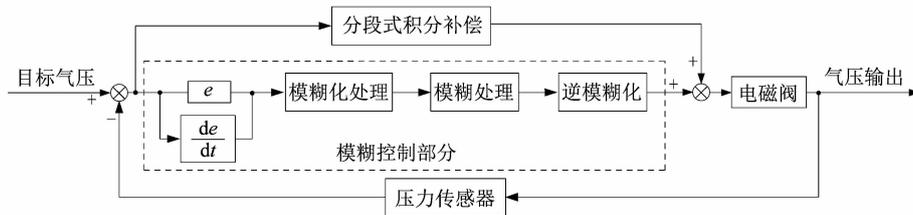


图4 积分补偿模糊控制系统结构

Figure 4 Structure of integral compensation fuzzy control system

积分补偿控制器采用分段式积分补偿控制,根据不同的目标压力和实际压力的差值分段补偿,积分补偿控制器的表达式:

$$Y = I_i e. \quad (1)$$

式中:Y为积分补偿量,e为目标气压和实际气压的偏差, $I_i$ 为积分因子。

通过大量实验数据建立了一个积分因子和气压差的数值表,根据不同的气压偏差e去查询积分因子数

值表获取相应的积分因子 $I_i$ 。当气压偏差e的数值较大时,积分补偿控制器对系统的影响较小;当气压偏差e较小时,积分补偿控制器会逐渐增大对系统的影响,弥补模糊控制存在的稳态误差的缺点。

课题组将模糊控制器的输出与分段式积分补偿器的输出结合使用,根据不同的实际压力变化来调整输出的方式,实现了智能调节的效果。系统整体输出的表达式:

$$P = \frac{Y + k\sigma}{U_m} \quad (2)$$

式中： $P$  为系统输出的 PWM 脉宽占空比， $k$  为模糊控制器输出的比例系数， $\sigma$  为模糊控制器精确化后的输出， $U_m$  为系统输出的最大限幅。

### 3.2 模糊控制器的设计

#### 3.2.1 模糊化

模糊控制器的设计包括输入数据的模糊化、根据专家经验和实际数据总结归纳的规则库、模糊推理和输出数据的逆模糊化几个部分<sup>[14-15]</sup>。设  $r$  为所需达到的目标气压， $y$  为当前实际测得气箱内的气压值，则模糊控制中的一个输入  $e$  为目标气压  $r$  和实际气压  $y$  的差，即  $e = r - y$ 。另外一个输入则为气压差的变化  $e_c = e_i - e_{i+1}$ 。其中， $i$  为采集到的气压次数。

设置气压误差  $e$  的基本物理论域为  $[0, 3\ 200]$  kPa，误差的变化  $e_c$  基本论域为  $[0, 3\ 200]$  kPa。设  $e$  和  $e_c$  相对应的模糊变量为  $S_e$  和  $S_{e_c}$ ，其模糊论域为  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。模糊控制最终控制的输出为电磁阀的打开时间  $U$ ，定义其基本论域为  $[0, 1\ 000]$ ，量化论域为  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

#### 3.2.2 模糊变量的赋值

根据实际的实验数据和专家经验，设置模糊输入变量  $S_e$  和  $S_{e_c}$  的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，相应的具体值为  $\{0, 100, 200, 400, 800, 1\ 600, 3\ 200\}$ ，模糊输入变量赋值如图 5 和 6 所示。

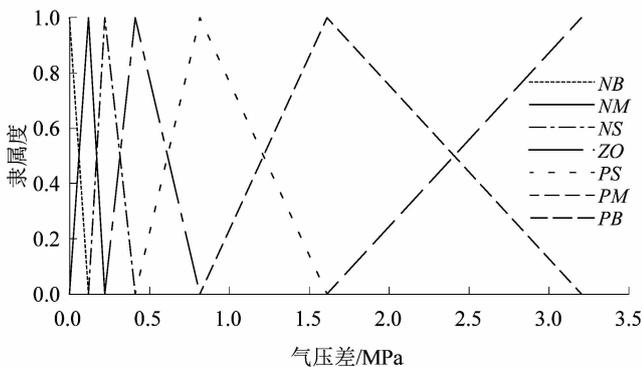


图 5 模糊变量  $S_e$  的赋值

Figure 5 Assignment of fuzzy variables  $S_e$

#### 3.2.3 模糊控制规则设计

根据大量实验数据及模糊控制规则的设计原则建

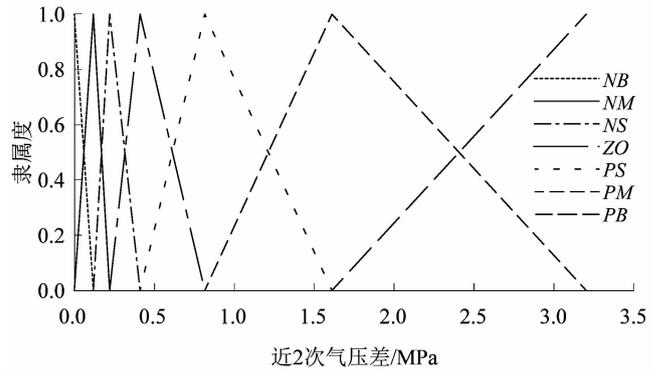


图 6 模糊变量  $S_{e_c}$  的赋值

Figure 6 Assignment of fuzzy variables  $S_{e_c}$

立的模糊控制规则表如表 1 所示。根据该规则表以及输入的隶属度函数的计算可以构建模糊推理控制系统。采用最大隶属度法和重心法进行逆模糊化，根据输入的气压差和气压差的变化得到相应输出值，通过 STM32 单片机输出的 PWM 脉宽的占空比作为调节电磁阀开度的驱动信号之一。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules

$S_{e_c}$	$S_e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	1	2	1	1	1	0	1
NM	4	3	1	1	1	1	2
NS	3	2	1	1	2	2	3
ZO	4	2	2	1	2	2	4
PS	4	4	3	3	3	3	4
PM	5	4	4	3	3	3	4
PB	5	5	4	3	2	2	4

## 4 实验测试结果

积分补偿模糊控制算法采用 C 语言进行编写，并在 STM32F103 单片机内运行实现控制效果。系统在单片机中断中采用积分补偿模糊控制算法计算 PWM 脉宽的占空比，以实现气压的快速跟踪，其中 PWM 的控制周期为 10 ms。实验设定 800 kPa 为目标气压值，根据上位机实时采集 STM32 单片机中的气压值得出相应的变化曲线。传统 PID 控制算法、模糊控制算法和积分补偿模糊控制的气压变化曲线如图 7 所示。

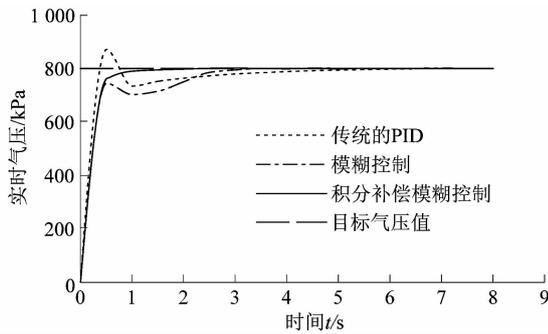


图7 积分补偿模糊控制的气压变化曲线

Figure 7 Air pressure change curves of integral compensation fuzzy control

由图7中结果可以看出3种控制方法大致能够跟随目标气压变化,并且稳定性较好。但采用传统的PID控制方法中存在一定的超调,并且气压达到稳定时间需要6s。这是由于电磁阀自身非线性的调节特性导致PID参数的整定难度加大。因此采用传统的PID的控制方法难以取得期望的控制效果。而模糊控制方法没有超调,气压达到稳定的时间约为4s。因此采用模糊控制方法能够在一定程度上提升系统的性能。但采用模糊控制方法的上升时间仍然较长,这是由于当控制电磁阀开启时间小于死区时间时,阀门开启进入的气压不足以引起内部气压的明显变化;同时曲线还出现向下折的现象,其原因是在接近目标气压值时,单片机的输出不足以引起气压的明显变化,各支路气管的气压进行均压造成的。

在采用积分补偿模糊控制算法时,可以看出上升时间仅为1~2s,并且曲线在达到目标值后无明显震荡。同时在接近目标气压时,积分补偿器会实时补偿并稳定的完成均压的过程。由此可见课题组设计的积分补偿模糊控制器超调量小、响应快、无震荡,且系统平稳性好,对系统性能提升显著。

## 5 结语

课题组从智能控制的角度出发设计气压控制系统,采用Delphi软件编写的上位机和STM32单片机之间的串行通信实现整个系统的控制功能;在单片机中设计相应的外设驱动电路,对压力传感器输出的实时

的压力进行采集,并在单片机内采用积分补偿模糊控制算法,输出PWM信号作用于电磁阀以调节系统气压的变化。经过实验测试,该气压控制系统采用的积分补偿模糊控制算法相较于传统PID的控制算法能够抑制超调的现象,并且上升时间仅为1~2s,曲线在达到目标值后无明显震荡,同时能够很好的解决电磁阀非线性及存在小信号量死区时间的问题。因此该气压控制系统具备超调量小、响应快、无震荡和鲁棒性好等特点,有较好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 程邵华,周骅.一种基于STM32的气压控制系统[J].微处理机,2022,43(1):53.
- [2] 杨茹,熊远生,韩啸风,等.基于STM32的气压控制系统设计[J].液压气动与密封,2020,40(8):60.
- [3] 谷立臣,祁泽林,李贾宝.模糊及PID控制在变转速液动力源流量控制中的应用研究[J].机械设计与制造,2021(4):29-33.
- [4] 王福生,孟晓风.一种气体压力控制方法及应用[J].测控技术,2001(4):26-28.
- [5] 张春明,沈俊杰.一种基于比例阀的气压变化速率控制方法及应用[J].机床与液压,2014,42(16):91-93.
- [6] 邓建军,刘兴堂,李彦彬.气压自适应控制系统的研究[J].电光与控制,2001(4):62.
- [7] 李琳,陶建峰,黄亦翔,等.基于BP神经网络的液压缸内泄漏诊断[J].液压与气动,2017(7):12.
- [8] 张永贤,邵万文,陈杨瑾瑜,等.基于IPSO-BP算法的燃油系统气压控制优化[J].液压与气动,2021,45(5):92.
- [9] 赵志衡,冀勇,宋欢,等.可变体积容腔内气体压力的模糊PID控制[J].探测与控制学报,2018,40(3):27.
- [10] 梁月云,崔天时,何亚非.温室节水灌溉系统模糊控制器设计及MATLAB仿真[J].农机化研究,2014,36(6):203.
- [11] 刘振奎.基于模糊控制的节水智能灌溉系统设计[J].安徽农学通报,2021,27(23):144.
- [12] ZHANG H G, LIU D R. Fuzzy modeling and fuzzy control[J]. Technometrics,2008,50(3):408.
- [13] 陈志毅,颜冰,闫晓伟.密闭容腔气体压力的自适应模糊PID控制[J].探测与控制学报,2009,31(增刊1):91.
- [14] 杨恒玲,胡燕瑜.基于单片机的水温模糊控制系统[J].科技创新导报,2009(32):44.
- [15] 侯军凯,聂建军,牛继高,等.基于微控制器的模糊控制算法实现[J].中原工学院学报,2021,32(5):57-62.