

智能阀门设计与控制方法研究

邵 曙¹, 潘益茅², 吕志翼³, 宋吉利², 洪 卫²

(1. 浙江百得自动化仪表有限公司, 浙江 温州 325000;

2. 浙江中德自控科技股份有限公司, 浙江 温州 313100; 3. 超一阀门有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 为了满足智能阀门在工业生产中极高的应用标准, 进行了智能阀门设计与控制方法, 设计了智能阀门硬件系统, 包括电气转换模块、微处理器、信号处理模块和阀门反馈模块 4 个部分, 以主控制器 LPC2290 为核心, 以及 A/D 转换器和 CAN 总线进行通信, 实现了智能阀门的控制功能, 为了提高智能阀门控制的精确度, 文章利用 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法, 通过 PID 控制的基本原理和稳定边界法整定 PID 控制参数的过程, 完成 PID 控制器的设计, 再结合 FUZZY-PI 复合算法实现智能阀门的偏差判别与条件控制和多路转换开关与信号的转换, 实现智能阀门的高精度控制, 最后设计了智能阀门定位器系统, 实现了智能阀门的精准定位与自我诊断功能, 实验表明, 智能阀门设计与控制在 4 s 时就能够达到控制稳定, 并且控制精确度可高达 95%。

关键词: 智能阀门; 控制; 定位器; PID 控制器; FUZZY-PI

Research on Intelligent Valve Design and Control Method

SHAO Shu¹, PAN Yimao², LÜ Zhiyi³, SONG Jili², HONG Wei²

(1. Zhejiang Baide Automation Instrument Co., Ltd., Wenzhou 325000, China;

2. Zhejiang Zhongde Automatic Control Scienc and Technology Joint Stock Co., Ltd., Huzhou 313100, China;

3. Chaoyi Valve Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract: In order to meet the extremely high application standard of smart valve in industrial production, the design and control method of smart valve have been studied, and the smart valve hardware system has been designed, including electrical conversion module, microprocessor, signal processing module and valve position feedback module, with the main controller LPC2290 as the core, and the A/D converter and CAN bus for communication, the intelligent valve control function is realized. In order to improve the accuracy of intelligent valve control, the PID controller and the FUZZY-PI compound algorithm are used in this paper, Through using the basic principles of PID control and the process of tuning PID control parameters by the stable boundary method, the design of PID controller is completed, and then the FUZZY-PI compound algorithm is combined to realize the deviation judgment and condition control of intelligent valve and the conversion of multiple conversion switches and signals. In order to realize the high-precision control of smart valve, and finally the smart valve positioner system is designed to realize the precise positioning and self-diagnosis function of smart valve. Experiments show that the smart valve design and control system can achieve control stability and 4 s of control time. The accuracy can be high up to 95%.

Keywords: intelligent valve; control; positioner; PID controller; FUZZY-PI

0 引言

智能阀门在工业上的控制应用已经逐渐取代了机械式阀门控制系统, 由于在工业生产中的应用对阀门控制系统有着迫切的要求, 对智能阀门控制精度、控制速度和控制灵活性都有极高的标准。近年来, 国内智能阀门的控制方法使用机械式阀门定位控制较多, 然而国外对智能阀门定位控制的研究, 故障发生的频率较高, 使智能阀门在实际因公众较少使用。

为了满足智能阀门在工业生产中极高的标准, 相关文献也有相应的研究, 文献 [1] 提出了一种基于 C8055F005 的智能阀门控制系统, 该系统采用一体化的思想, 使用嵌入式的开发技术, 实现智能阀门的控制功能, 但该系统在

自适应调节的功能上有一定的不足, 降低了智能阀门的控制精度, 还需后期的改进; 文献 [2] 提出了一种智能阀门电动控制器系统, 该系统通过对硬件电路和系统软件的设计, 实现了人机界面操作、阀门故障提示和智能阀门的控制功能, 但该系统采用的是开环控制无刷直流电机, 对阀门的控制精度比较低。

基于上述文献中的不足, 本文提出了对智能阀门的设计与控制方法进行研究, 设计了智能阀门硬件系统, 通过对智能阀门的设定信号与阀门检测反馈信号进行有效的调理, 实现智能阀门的信号转换, 信息采集等功能, 接着利用 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法, 进行对智能阀门的控制设计, 最后设计了智能阀门定位器系统, 实现了智能阀门精准的定位和控制、自我诊断的功能^[3]。

收稿日期: 2021-11-07; 修回日期: 2021-12-02。

作者简介: 邵 曙(1978-), 男, 浙江温州人, 大学本科, 工程师, 主要从事执行器开发与设计方向的研究。

引用格式: 邵 曙, 潘益茅, 吕志翼, 等. 智能阀门设计与控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 87-91.

1 智能阀门硬件设计

本文首先对智能阀门的硬件系统进行了设计, 智能阀门硬件系统主要分为: 电气转换模块、微处理器、信号处理模块和阀门反馈模块 4 个部分^[4], 智能阀门硬件设计结构图如图 1 所示。

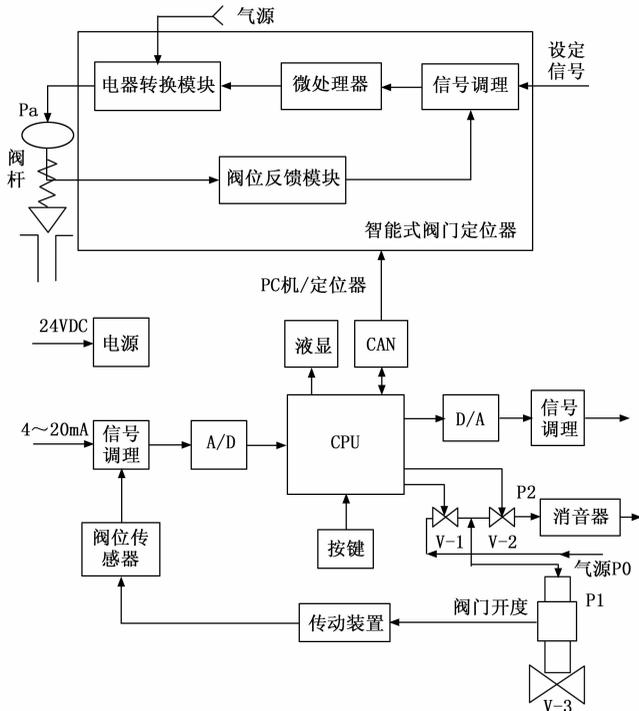


图 1 智能阀门硬件设计结构图

信号调节模块通过对传入的系统固定信号和阀门测试反馈信号执行合理、有效处理, 采用 A/D 转换器将模拟信号转换成微处理器可以接收的数字信号, 通过微处理器进行比较由信号处理模块输入的数字信号之间的特性关系, 进而对比阀门开度与设定信号之间的联系, 并将控制信号传输至电气变换模块, 再由电气变换模块将电信号转换成气压信号同时传输至气动执行机构, 响应调节机构操作, 最后由阀门测试反馈系统进行对阀杆位置的测试, 同时将该信号转换为反馈电信号至定位器的调节模块^[5]。

智能阀门系统使用的是 CAN 总线进行通信, CAN 总线利用非破坏性仲裁技术, 当总线同时接收到多个节点发来的信息时, 低优先级的节点选择不发送, 并且高优先级的节点将继续传输不受任何影响, 从而节省了大量的传输时间。CAN 总线可通信至 10 km 以外的距离, 通信速度并且很高, 可达到 1 Mb/s^[6]。CAN 总线的节点数可达到 110 个取决于总线驱动电路, 并且扩展标识报文不受限制, 该系统中采用的 LPC2290 控制器自带两路的 CAN 通道。

此智能阀门定位器硬件系统设计有 4 个按键, 因为采用的主控制器 LPC2290 有足够的 I/O 接口, 因此每个按键各自对应一个 GPIO 口进行输入, 利用字符型液晶显示屏 LCD1602, 实现清晰的人机交互界面。为了提高阀门定位器的控制精准率^[7], 该系统选用压电阀作为控制器件, 采

用陶瓷片在电压影响下发生弯曲变形原理而造成的一种两位式控制阀, 进而实现 IP 的转换。

2 基于 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法的智能阀门控制

本文利用 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法, 进行对智能阀门的控制设计, 通过 PID 控制的基本原理和稳定边界法整定 PID 控制参数的过程, 完成 PID 控制器的设计, 再结合 FUZZY-PI 复合算法实现智能阀门的偏差判别与条件控制和多路转换开关与信号的转换^[8]。完成智能阀门控制需要 3 个步骤。

步骤一: 智能阀门控制中 PID 控制器的设计。

设 $r(t)$ 表示为设定值, $y(t)$ 表示为输出值, 将设定值与输出值进行比较构成控制偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$, 将偏差其值进行逻辑计算后, 通过线性组合计算出控制量^[9]。

PID 控制器数学模型方程式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(d) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

将 PID 控制器的数学模型表达式化简可表示为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(d) dt \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

式 (1) ~ (2) 中, $u(t)$ 表示控制器的输出, $e(t)$ 表示控制器输入偏差, K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示为表征其比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 作用的参数。

在比例部分, 比例系数 K_p 负责提高系统的反应速度, 进而使系统的控制精确度提高^[10]。 K_p 越大, 控制反应速度将越快, 但会产生系统不稳定的影响; 如果 K_p 取值较小, 会使控制精确度降低, 并且系统控制的反应速度变慢, 进而影响调节时间, 因此, 比例系数 K_p 的选取应结合实际情况, 适当的进行取值, 使系统性能更优越^[11]。

积分部分可以消除系统偏差, 当 T_i 比较大时, 不宜采用积分的方式, 虽然系统不能产生振荡, 但是消除偏差利用的时间较长, 当 T_i 比较小时, 采用积分的方式作用较强, 系统可能会产生超出范围, 但消除偏差所利用的时间较短。

系统进行微分可以调整闭环系统的稳定性以及系统响应的速度, T_d 较大, 微分越强, T_d 越小, 微分作用则越弱, 在 T_d 选取适当的状态下, 能够减弱超调, 加快调节速度, 使系统的稳态误差减小, 提高系统控制精准度^[12]。

基于上述的分析, 将调节器的积分时间置于最大 $T_i = \infty$, 微分时间 $T_d = 0$, 比例度带 δ 取值较大时, 将系统启动运行, 等系统运行稳定后, 将比例度 δ 逐渐减小, 直至系统出现等幅振荡过程, 记录临界值比例带 δ_{cr} 和临界振荡周期 T_{cr} 的值, 进而运算出调节器各个参数的值, 即 K_p 、 K_i 和 K_d 的值^[13]。

步骤二: 智能阀门模糊控制。

设模糊控制输入设定值的误差用 x 表示, 误差变化率

用 y 表示, 输出控制量用 z 表示。 x, y, z 的语言值的集合分别设为:

$$X: \{A_i \mid i = 1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

$$Y: \{B_j \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$Z: \{C_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

设 R 为控制规律中输入值与输出值之间的关系, “ \circ ” 表示模糊推理之间组合规则的构成计算, 则每一句语句表示的模糊关系 R_{ij} 为:

$$R_{ij} = R_{ij}((A_i)\Delta(B_j)) \rightarrow (C_{ij}) = R_{ij}(A_i, B_j; C_{ij}) \quad (6)$$

总的模糊关系为:

$$R = \underset{i=1}{\overset{m}{\times}} \underset{j=1}{\overset{n}{\times}} R_{ij}(A_i, B_j; C_{ij}) \quad (7)$$

若某一时刻的输入为 A' 和 B' , 由推理合成规则输出 C' 为:

$$C' = (C' \times B') \cdot R = (A' \times B') \cdot \underset{i=1}{\overset{m}{\times}} \underset{j=1}{\overset{n}{\times}} R_{ij}(A_i, B_j; C_{ij}) \quad (8)$$

采用 Mamdani 的极大极小推理法:

$$C'^{(z)} = \bigvee_{x \in X, y \in Y} (A'(x) \wedge B'(y) \wedge R(x, y, z)), \forall z \in Z \quad (9)$$

$$R(x, y, z) = \underset{i=1}{\overset{m}{\vee}} \underset{j=1}{\overset{n}{\vee}} (A'(x) \wedge B'(y) \wedge C_{ij}(z)) \quad (10)$$

当论域 X, Y, Z 表示离散的可数论域时, 模糊关系 $R = |r_{ijk}|_{p \times q \times s}$, p, q, s 表示论域 X, Y, Z 所含元素的个数。先把观测偏差的范围定为 $[-6, 6]$ 这之间的值, 之后将此范围内的值进行精确量离散化, 观测到的实际偏差范围为 $[a, b]$, 将 $[a, b]$ 之间的变量 x 转化为 $[a, b]$ 之间的变量 y 为:

$$y = \frac{12}{b-a} \left(x - \frac{a+b}{2} \right) \quad (11)$$

对输入变量 e 的论域取值为: $X = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 其中模糊子集记为: $E = \{NB, NS, NO, PS, PB\}$, 式中 NB, NS, NO, PS, PB 五个值分别代表: 负大、负小、零、正小、正大^[14], 其中, PB 的隶属度函数为:

$$\mu_{PB} = \begin{cases} 0 & (x \leq 2.5) \\ \frac{x-2.5}{4-2.5} & (2.5 < x \leq 4) \\ 1 & (x > 4) \end{cases} \quad (12)$$

PS 的隶属度函数为:

$$\mu_{PS} = \begin{cases} 0 & \text{其他} \\ \frac{x-0.5}{2-0.5} & (0.5 \leq x < 2) \\ \frac{3.5-x}{3.5-2} & (2 < x < 3.5) \end{cases} \quad (13)$$

利用中位数判决法, 进行对论域元素计算, 所对应论域元素 U 作为判决输出, 满足:

$$\sum_{u=1}^m \mu_U(u) = \sum_{u=1}^m \mu_U(u) \quad (14)$$

当加权系数 $k_i (i = 1, 2, \dots, I)$ 选取适当值时, 模糊量的判决输出方程式为:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^I k_i u_i}{\sum_{i=1}^I u_i} \quad (15)$$

设误差的基本论域为 $[-e_{\max}, +e_{\max}]$, 误差变化率的基本论域为 $[-\dot{e}_{\max}, +\dot{e}_{\max}]$ 。

误差语言变量 E 所取的模糊子集的论域为:

$$X = \{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n\} \quad (16)$$

误差变化率语言变量 E_c 所取的模糊子集的论域为:

$$Y = \{-m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m\} \quad (17)$$

控制量语言变量 U 所取的模糊子集的论域为:

$$Z = \{-l, -l+1, \dots, 0, l-1, l\} \quad (18)$$

式 (16~18) 中, n, m, l 分别表示连续变化的误差、误差变化率、控制量在 $0 \sim e_{\max}, 0 \sim \bar{e}_{\max}, 0 \sim u_{\max}$ 范围内量化后分成的档数^[15]。

进行模糊处理过之后的量化因子误差和误差变化用公式表示为:

$$K_e = n/e_{\max} \quad (19)$$

$$K_{\dot{e}} = n/\dot{e}_{\max} \quad (20)$$

控制量进行输出的比例因子方程式为:

$$K_u = u_{\max}/l \quad (21)$$

式 (19) ~ (21) 中, 基于 $K_e, K_{\dot{e}}, K_u$ 各自对系统性能的影响情况, 进行参数调节, 当系统发散时, 根据系统发散的程 度以较大的幅度减小 K_u , 当系统振荡时, 根据振荡的程度试单减小 K_u , 当系统存在的误差取值较稳定时, 依据相对误差的大小进行合适的增加 K_u , 同时以较小幅度增大 K_e , 当系统运行反映时间较长时, 依据运行反应的时间以适当较小的幅度进行减小 $K_{\dot{e}}$, 当超调范围较大时, 依据超调范围的大小合适地加大 $K_{\dot{e}}$ 。

步骤三: 智能阀门的 Fuzzy-PI 复合控制。

假设 e 表示阀门开度偏差, e_c 表示阀门开度偏差变化率, u_1, u_2, u_3, u_4 表示电磁阀开启时间, 将偏差划分为: 正大偏差、正偏差、负偏差、负大偏差四区, 当在正大偏差范围内, 即 $e \geq e_{\max}$ 时, 取 $e = e_{\max}$; 当在正偏差范围内, 即 $e_{\max} \geq e \geq 0$ 时, e 不变; 当在负偏差范围内, 即 $-e_0 \geq e \geq -e_{\max}$ 时, e 不变; 当在负大偏差范围内, 即 $-e_{\max} \geq e$ 时, 取 $e = -e_{\max}$ 。

综上所述, 采用 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法, 利用 FUZZY-PI 复合控制同时结合 PID 控制的优点, 考虑到偏差判别与条件控制、多路转换开关与信号转换, 实现了智能阀门的精准控制。

3 智能阀门定位器的设计

由于工业上对智能阀门对调节阀控制精度和稳定性的要求很高, 因此本文设计了一种智能阀门定位器系统, 该智能阀门定位器以 MSP430 单片机为核心, 包括采样模块、外部数字指令、电源模块、人机交换模块、阀位输出与报警模块、调节和执行机构六个模块^[16], 智能阀门定位器系统结构图如图 2 所示。

该智能阀门定位器不仅能够精确定位, 还可以自我诊断、自我调节等多种功能。该智能阀门定位器系统将接收到的 4~20 mA 设定信号转换为数字信号, 传送至微处理器进

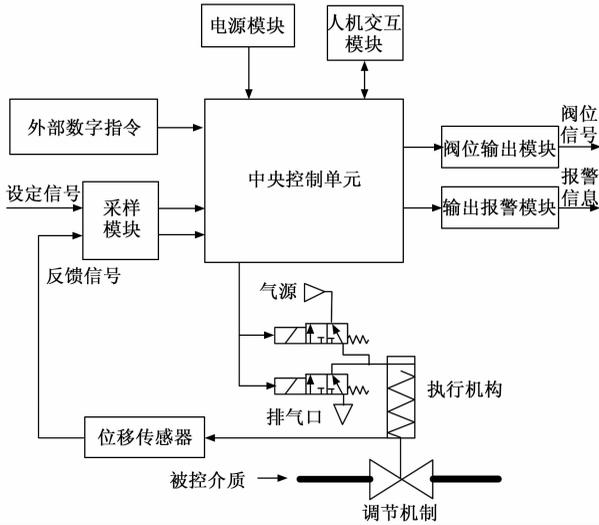


图 2 智能阀门定位器系统结构图

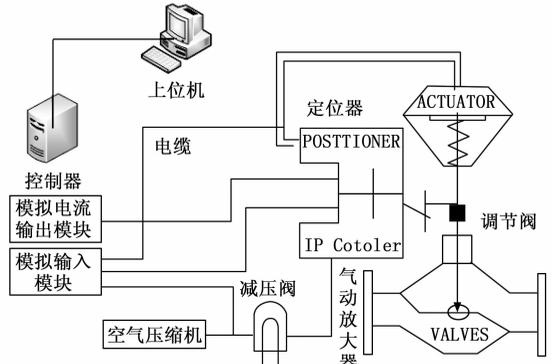


图 3 实验架构示意图

表 2 实验数据

控制阀参数	变量 1	变量 2	变量 3
行程	16 mm	16 mm	0.016 m
预紧力参数	0.017	0.017	0.017
膜片面积/m ²	0.032	0.032	0.032
弹簧刚度/(N/m)	200 000	258 000	258 000
供气压力	实际气源气压	400 kPa	$P=0.5, I=6\text{ s}$

行处理，同时将阀门开度信息通过位移传感器转化为电信号反馈给微处理器，微处理器将数字信号与电信号进行比较，若偏差不在正常范围内，采用电磁阀切断状态的方式^[17]。

该系统的中央控制单元采用的是 MSP430F5438 微控制器，该微控制器具有 16 位的 RISC 结构，有超低功耗低的优点，并且有 5 种时钟源、512 kB 的 FLASH ROM 和 66 kB 的 RAM、12 位 8 通道以及 SPI \ UART 通信接口。

智能阀门定位器采用直流 24 V 作为电源，电磁阀是 24 V 驱动且对电压波动敏感，因此采用 24 V 电压进行稳压处理，通过光耦控制通断 24 V 电源来实现系统输出的 24 V 报警信号，经过稳压二极管和光耦隔离后输入到单片机。

智能阀门定位器的电气转换单元由 4 个两位三通电磁阀构成，通过单片机的 I/O 口驱动光耦，讲过光耦驱动三极管进行驱动电磁阀。实现智能阀门定位器的精确定位与自我诊断、自调整功能。

4 实验结果与分析

为了验证本文研究的智能阀门设计与控制的有效性，做了相关实验进行验证，首先对实验平台进行搭建，本文采用空载状态下进行实验，无介质的反作用力以及平衡力，实验平台是在 LabVIEW 软件上进行搭建的，本次实验环境参数如表 1 所示。

表 1 实验环境参数

项目	参数
CPU 处理器	E5700 @3.00 GHz
安装内存(RAM)	2.00 GB
系统类型	64 位操作系统
通信端口	COM1
控制器	ATA Channel1

本次实验搭建的实验架构示意图如图 3 所示。

实验平台搭建好之后，进行实验的数据是采用某工程智能阀门检测出的数据，实验数据如表 2 所示。

首先进行对智能阀门控制速度进行测试，测试结果并与文献 [1] 和文献 [2] 进行对比，实验结果对比图如图 4 所示。

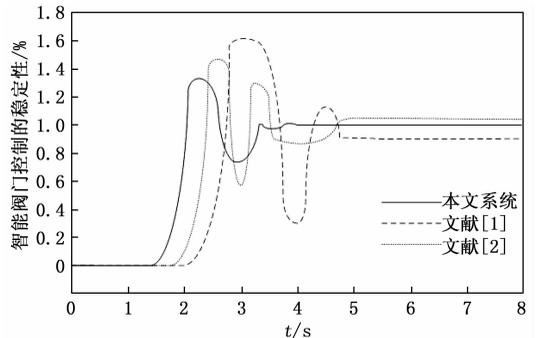


图 4 实验结果对比图

由图 4 所示，实线表示的是本文研究的系统在智能阀门控制趋于稳定时所消耗的时间，在 4 s 时刻，智能阀门控制趋于稳定并且接近于 1；长虚线表示的是文献 [1] 在智能阀门控制趋于稳定时所消耗的时间，在 4.7 s 时刻，智能阀门控制趋于稳定，稳定值在 0.92，与本文研究的系统相比略有不足；短虚线表示的是文献 [2] 在智能阀门控制趋于稳定时所消耗的时间，在 5 s 时刻，智能阀门控制趋于稳定，稳定值在 1.02，与本文研究的系统相比存在不足；由此可见本研究的系统在智能阀门控制上反应的速度较快，并且稳定性较好。

基于对智能阀门控制速度测试的实验上，进行对智能阀门控制精度进行测试，实验结果对比如图 5 所示。

由图 5 所示，本文研究的系统对智能阀门控制精度进行测试时，智能阀门控制的精确度均在 80% 以上，并且控制的精确度最高可达 95%；文献 [1] 在智能阀门控制精

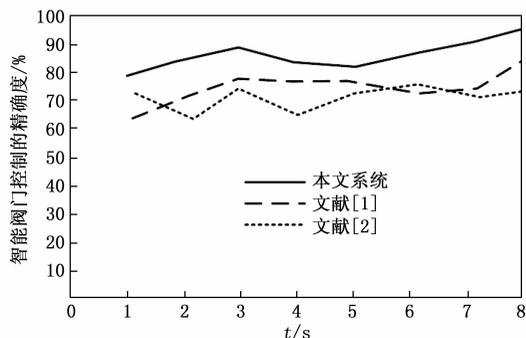


图5 实验结果对比图

精度实验测试时, 智能阀门控制的精确度均在 60% 以上, 并且控制精确度最高可达 82%; 文献 [2] 在智能阀门控制精度实验测试时, 智能阀门控制的精确度均在 60% 以上, 并且控制精确度最高可达 79%; 由此可见, 本文研究的系统在对智能阀门控制精确度上有一定的优势。

5 结束语

为了满足工业生产中智能阀门控制精度、控制速度和控制精确度极高的标准, 本文进行了对智能阀门设计与控制方法的研究, 设计了智能阀门硬件系统, 包括电气转换模块、微处理器、信号处理模块和阀位反馈模块 4 个部分, 采用以主控制器 LPC2290 为核心, 以及 A/D 转换器和 CAN 总线进行通信, 实现了智能阀门的控制功能, 为了提高智能阀门控制的精确度, 本文利用 PID 控制器和 FUZZY-PI 复合算法, 进行对智能阀门的控制设计, 实现智能阀门的高精度控制, 最后设置了智能阀门定位器系统, 实现智能阀门的高精度定位与自我诊断的功能。

本文研究的系统还存在着一定的缺陷, 在调节阀填料与阀杆之间存在动静摩擦力, 导致阀门运动时产生粘滞现象, 因此, 还需更深一步的研究, 解决该问题。

参考文献:

[1] 向海堂, 权亚强, 梁永增. 智能燃气表主控电路板仿真检测技术 [J]. 煤气与热力, 2019, 39 (1): 28-32.

(上接第 80 页)

[11] 李 姝, 陈培瑶, 王 帅. 干粉灭火剂吸湿性能的影响因素及检测方法分析 [J]. 消防科学与技术, 2018, 37(2): 232-234, 254.

[12] 张宪忠, 胡 成, 傅学成, 等. 泡沫灭火剂的 COD 和 TOC 浓度规律及相关性研究 [J]. 消防科学与技术, 2018, 37(4): 520-523.

[13] 黎 可, 王青松, 孙金华. 基于火探管式的锂离子电池灭火技术研究 [J]. 火灾科学, 2018, 27(2): 124-132.

[14] 张贤凯, 宋小林, 王 帅, 等. 锂电池化成成分容生产工序自动灭火技术研究应用 [J]. 工业安全与环保, 2020, 46(1): 10-15.

[15] 赖余斌, 洪巧章. 换流变压器消防设计研究 [J]. 消防科学与技术, 2021, 40(9): 1381-1383.

[16] 刘岳鹏, 周 磊, 马 鑫. 基于 LabVIEW 的 mN 级微推力测

[2] 刘海明, 孟佳阳, 翟林鹏. 基于一体化智能阀门控制器的农业节水管道灌溉系统研究 [J]. 江苏水利, 2019, 270 (9): 64-67.

[3] 廖建民. 智能自动化设备在阀门行业应用的探讨 [J]. 新型工业化, 2020, 10 (1): 114-117.

[4] 刘 晔, 王笑波, 王 昕. 一类基于 Expert-PID 的智能阀门定位器控制方法 [J]. 控制工程, 2019, 26 (1): 87-91.

[5] 李 俊, 王 辉, 郑书剑, 等. 智能电气阀门系统先进 PID 控制器 [J]. 电工技术, 2020, 532 (22): 21-23.

[6] XU H, ZHANG L. A software and hardware design scheme of intelligent valve positioner [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 268 (10): 01067.

[7] 思皓天, 张 宏. 智能阀门定位器调试与故障维护 [J]. 信息记录材料, 2019, 20 (5): 215-216.

[8] 王志刚, 俞利明, 胡孟杰, 等. 智能电气阀门定位器的研制 [J]. 化工自动化及仪表, 2020, 353 (2): 29-32.

[9] 王明武, 王 楠. 基于单片机的高压调节阀智能控制器设计 [J]. 现代电子技术, 2020, 43 (11): 148-151, 157.

[10] 蹇开任. 浅谈电磁感应技术在隔爆型智能阀门定位器中的应用 [J]. 仪器仪表用户, 2019, 26 (8): 57-62.

[11] XIONG S, WILFONG G, LUMKES J. Development of a novel high-speed actuation mechanism using a magneto-rheological fluid clutch and its application to a fluid control valve [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2019, 30 (16): 2502-2516.

[12] 朱启法. 水处理系统反冲洗智能控制技术的研究 [J]. 化学工程与装备, 2019 (2): 194-196, 199.

[13] 王建军, 马世辉, 白云飞. 蒸汽冷凝水智能控制与应用 [J]. 中国造纸, 2019, 38 (A01): 52-64.

[14] 闫宏亮, 思皓天, 张 宏. 智能阀门定位器的控制设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18 (5): 39-48.

[15] 黄山珊, 常明明, 马志国, 等. 电动阀门在控制矿浆中的改造及应用 [J]. 北方钒钛, 2020, 137 (2): 59-60.

[16] 曹晴云, 屠怡范. 从专利视角看智能阀门定位器的发展现状和创新趋势 [J]. 液压气动与密封, 2021, 41 (9): 157-163.

[17] 韩 剑. 常见智能阀门定位器的基本原理及对比分析 (上) [J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46 (10): 9-13.

[17] 吕美茜, 赵昊罡, 任 伟, 等. 飞行试验的微压差式灭火剂浓度机载测试系统 [J]. 测控技术, 2020, 39 (11): 23-28, 44.

[18] 郑 宇, 方 岚, 李苏苏, 等. 微处理器下的数字集成电路测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (3): 27-31.

[19] 谢 君, 李德才, 朱锐棋. 霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (6): 27-34.

[20] 唐 诗, 郑 腾, 孔德仁, 等. 阵列式破片飞散特性测试系统设计 [J]. 测试技术学报, 2020, 34 (6): 485-490, 498.

[21] 喻名成, 汤华清, 陈天豪, 等. 高分子水凝胶灭火剂灭火作战性能测试 [J]. 消防科学与技术, 2020, 39 (1): 101-103.