

呼吸机比例阀的控制与仿真

陈继伟^{1,2}, 郭会明², 刁俊², 魏瑞丽²

(1. 中国航天科工集团第二研究院, 北京 100039;
2. 北京航天长峰股份有限公司, 北京 100039)

摘要: 比例阀是呼吸机吸气模块中负责流量控制的重要组件, 为了研究比例阀的特性和提高呼吸机吸气模块的流量跟踪效果, 推导了比例阀阀芯位移与流量之间的关系, 构建了比例阀的被控对象模型并采用 S-函数在 Simulink 中实现了该模型; 对模型进行简单的输入控制可以获得比例阀的瞬态特征和稳态特征, 对模型输入采用 PID 控制和模糊 PID 控制方法均能够提高比例阀的响应速度; 在两种控制方法中采用一致参数, 分别在 Simulink 仿真和实验条件下对两种方法的流量跟踪效果, 可以验证相较于固定参数的 PID 控制方法, 模糊 PID 控制方法更能有效降低流量的超调量从而保持气路中流量的稳定。

关键词: 呼吸机; 比例阀; 模糊 PID 控制; Simulink

Control and Simulation of Proportional Valve of Ventilator

CHEN Jiwei^{1,2}, GUO Huiming², DIAO Jun², WEI Ruili²

(1. Second Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100039, China;
2. Beijing Aerospace Changfeng Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: Proportional valve is an important component responsible for flow control in the inspiratory module of the ventilator. In order to study the characteristics of the proportional valve and improve the flow tracking effect of the inspiratory module of the ventilator, the relationship between the displacement of the valve core and the flow of the proportional valve is deduced, and the controlled object model of the proportional valve is constructed, and the model is realized in Simulink by using S-Function. The transient and steady characteristics of the proportional valve can be obtained by simple input control of the model. The response speed of the proportional valve can be improved by PID control and fuzzy PID control. By using the same parameters in the two control methods, the flow tracking effect of the two methods is compared under the Simulink simulation and experimental conditions, which can verify that compared with the fixed parameter PID control method, the fuzzy PID control method can effectively reduce the flow overshoot, so as to maintain the stability of the flow in the gas path.

Keywords: ventilator; proportional valve; fuzzy PID control; Simulink

0 引言

为了保证患者机械通气时的安全性, 呼吸机对于流量控制的精度有较为严格的要求, 通常允许的流量误差在 10% 以内, 该参数也是衡量呼吸机品质的性能指标之一。呼吸机的吸气模块通常负责按照主控的指令, 跟踪稳定流量。在吸气模块的气路中, 比例阀起到关键作用, 在比例阀阀体两端存在较大的压力差, 气流通过阀体内部的小间隙流出形成声速流, 流量大小取决于比例阀的过流面积。通常认为流经比例阀的流量的大小和比例阀中线圈电流成一次函数关系, 但在实际应用中, 由于比例阀的瞬态特征的存在, 不能依据仅该一次函数关系控制比例阀, 而要采用闭环控制。本文根据比例阀的基本结构和工作原理推导出阀芯位移与流量之间的关系, 并根据动力学方程构建比例阀的被控对象模型, 仿真分析比例阀的瞬态特征和稳态特征。同时本文也分别采用固定参数的 PID 控制和模糊

PID 控制方法, 在 Simulink 仿真和实验两种条件下, 验证了模糊 PID 控制方法更能降低系统的超调量。本文将按照顺序阐述三部分内容即模型分析, 模糊 PID 控制器的设计和仿真与实验。

1 模型分析

1.1 比例阀的结构和基本工作原理

在吸气模块中, 比例阀的开合度决定了吸气流量的大小。图 1 描述了比例阀的结构, 阀芯位移记为 x , 进气口孔径记为 d , 箭头方向代表了气流的流向。在比例阀的线圈未通电时, 弹簧存在预压缩量 x_0 , 此时存在公式 (1) 所示的力平衡关系使其维持关闭状态:

$$kx + Mg = F_p + F_N \quad (1)$$

其中: k 为弹簧的刚度系数, M 为阀芯与橡胶片的总质量, g 为重力加速度, F_p 为入口气压力, F_N 为孔壁和橡胶片之间的弹力。通电后, 随着线圈中电流的增打, 阀芯受

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-02-05。

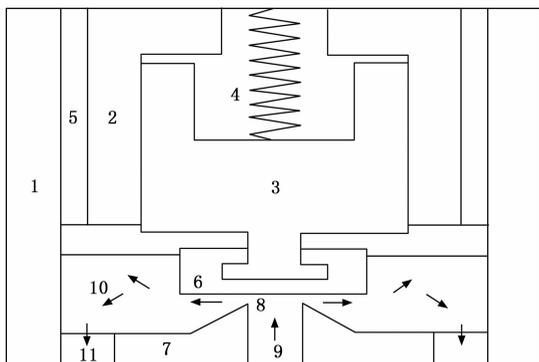
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFF0302304)。

作者简介: 陈继伟(1994-), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统设计与应用方向的研究。

引用格式: 陈继伟, 郭会明, 刁俊, 等. 呼吸机比例阀的控制与仿真[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 131-136, 157.

到竖直向上的电磁力 F_a 逐渐增加, 使得 F_N 逐渐减小直至为零, 比例阀将要开启, 阀芯位移 x 为零, 线圈中的电流为开启电流, 记为 I_0 , 此时存在公式 (2) 所示的力平衡方程。其中, k_a 是力与电流的比例系数, 在阀芯的整个运动过程中, k_a 保持定值。随着电流继续增加, 阀芯位移 x 不断增大, 比例阀的出口流量不断增大。

$$kx_0 + Mg = F_p + k_a I_0 \quad (2)$$



1. 阀壁; 2. 阀套; 3. 阀芯; 4. 弹簧; 5. 线圈; 6. 橡胶片; 7. 孔壁; 8. 橡胶片和孔壁之间的缝隙其最小宽度即阀芯位移; 9. 进气孔; 10. 容腔; 11. 出气孔。

图 1 比例阀的结构示意图

1.2 比例阀的出口流量与阀芯位移的关系

在分析出口体积流量 Q 与阀芯位移 x 关系前, 需要做出一些假设^[2]:

- 1) 流经比例阀的气体可视为理想气体, 满足理想气体状态方程;
- 2) 可以忽略比例阀的泄漏并确定容腔内部充满气体;
- 3) 容腔和出口处的温度和压力均匀, 其中任意点在任意时刻的状态参数相等;
- 4) 气体流经比例阀的过程属于绝热运动;
- 5) 入口压力, 大气压力和环境温度保持恒定, 气体入口温度等于环境温度;
- 6) 气体流经孔壁和橡胶片之间缝隙的流动可以视为气体经过收缩喷管的一维等熵流动。

在满足上述假设条件的前提下, 可以采用 Sanville 流量公式计算气体流经比例阀的出口质量流量 G , 如公式 (3) 和 (4) 所示^[3]:

$$G = c_q A_q p_1 \sigma \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \sqrt{\frac{2}{RT}} \quad (3)$$

$$\sigma(\gamma) = \begin{cases} \sqrt{\frac{r}{r-1}} (\gamma^{2/r} - \gamma^{(r+1)/r}), & 0.528 < \gamma \leq 1 \\ \left(\frac{2}{r+1} \right)^{(r-1)/2} \sqrt{\frac{r}{r+1}}, & 0 \leq \gamma \leq 0.528 \end{cases} \quad (4)$$

式 (3) 中, c_q 为流量系数, $0 < c_q < 1$, 反应了实际测量值与理论计算值之间的比例关系, A_q 为气流流经孔壁与橡胶片之间缝隙的过流面积, p_1 为入口压力, p_2 为出口压力, R 为气体常数, T 为气体的绝对温度。式 (4) 中, γ

为出口压力与入口压力之比, r 为气体的比热容比。过流面垂直于气流流速最大的方向, 由图 1 可知, 缝隙 8 处的过流面是一个圆柱面, 母线垂直于橡胶片底面, 该圆柱面底面半径为 d , 由此可得公式 (5):

$$A_q = \pi dx \quad (5)$$

过流面积也存在最大值, 即在阀芯位移形成的圆柱面面积等于进气孔 9 的底面面积后, 即使阀芯位移继续增大, 过流面积不再增加, 其最大值为 $\pi d^2/4$, 总结后可得公式 (6):

$$A_q = \begin{cases} \pi dx, & x < d/4 \\ \pi d^2/4, & d/4 \leq x \leq x_m \end{cases} \quad (6)$$

其中: x_m 是满足 6 条假设的极限位移。如果要获得出口的体积流量, 还需要查得出口处的气体温度和气压获得气体的密度 ρ 。根据 $Q = G/\rho$ 可以计算得到体积流量 Q 。

1.3 受力分析

以阀芯和为研究对象, 当孔壁和橡胶片之间的弹力为 0 时, 考虑运动过程, 可以画出如图 2 所示的受力分析图^[5]。在图 2 中, x 轴方向为位移 x 的正方向, 根据牛顿第二定律, 可得动力学方程 (7) ~ (9):

$$M\ddot{x} = F_a + F_p - F_v - Mg - F_k \quad (7)$$

$$F_a = k_a I, F_p = \frac{\pi}{4} d^2 p_1, F_v = k_v \ddot{x} \quad (8)$$

$$F_k = k(x + x_0) \quad (9)$$

其中: F_a 为阀芯所受的电磁力, I 为线圈中的电流, F_v 为阀芯和阀套间的粘滞阻力, F_k 为弹簧的弹力。

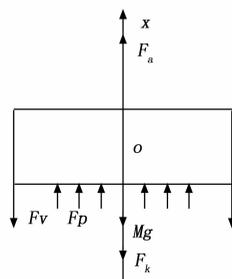


图 2 受力分析示意图

1.4 被控对象建模

根据 1.2 节和 1.3 节, 可以获得比例阀的流量计算方法和动力学方程, 以此可以建立比例阀的观测方程和状态方程。如果考虑如图 3 所示的整个吸气模块气路, 观测方程还可以进一步优化。在呼吸机的吸气模块中, 高压气体经过过滤器和减压阀后气压稳定在 0.295 MPa, 呼吸机气路中最大允许气压为 10 kPa。比例阀后端接入的气阻和并联的压力传感器作为一个整体用于测量流量, 气阻两端的最大压力差不超过 14 kPa, p_1 和入口压力 p_2 之比 $\gamma < (10 + 14)/295 = 0.081 < 0.528$, 此时气流满足声速流条件, 使得出口体积流量 Q 仅与入口压力 p_1 相关而与出口压力 p_2 无关。由于气路中流量是通过气阻两端的压差测量的, 需要进行事先标定, 该过程会引入随机标定误差, 该误差的幅值与 Q 成正比, 因此观测方程中需要增加白噪声, 用以描

述标定过程对流量计算的影响。

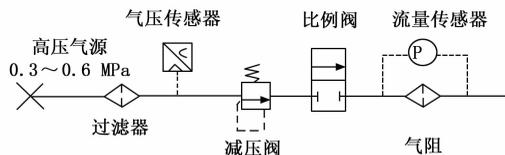


图 3 吸气模块气路示意图

在状态方程中, 需要确定 I 的来源。微控制器通过调整 DA 端口的输入来控制流经比例阀线圈的电流 I , 可以用公式 (10) 描述:

$$I = 0.1 + 0.3 \times DA / 4096 \quad (10)$$

DA 模块为 12 位, 当 $DA=0$ 时, 比例阀的线圈电流为 100 mA, 而 $DA=4095$ 时, 线圈电流为 400 mA。综上两部分, 可以得到 (11) ~ (14) 所示的被控对象模型^[6-7]。其中, ξ 代表随机误差幅值与理想流量 Q 的常比例系数, $\varphi(t)$ 代表高斯白噪声序列, DA 代表控制输入, Q_1 是最终的观测值。

$$\ddot{x} = \frac{k_v}{M} \left(0.1 + 0.3 \times \frac{DA}{4096} \right) + \frac{\pi}{4M} d^2 \dot{p}_1 - \frac{k_v}{Mx} \dot{x} - \frac{k}{M} (x + x_0) - g \quad (11)$$

$$A_q = \begin{cases} \pi d x, & x < d/4 \\ \pi d^2 / 4, & d/4 \leq x \leq x_m \end{cases} \quad (12)$$

$$Q = \frac{c_q A_q p_1}{\rho} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{r/r-1} \sqrt{\frac{2r}{(r+1)RT}} \quad (13)$$

$$Q_1 = Q + \xi Q \varphi(t) \quad (14)$$

2 模糊 PID 控制器的设计

模糊控制是一种以模糊集合论, 模糊语言和模糊推理为基础, 力图模仿人的推理和决策过程实现对具有典型非线性特征的系统的智能控制方法。模糊控制器如图 4 所示, 主要包含了模糊化接口、知识库、推理机及解模糊接口等组件, 各组件功能如下:

1) 模糊化接口: 模糊控制器的输入需要转换成模糊变量才能应用到模糊推理过程中, 在模糊接口中, 可以修改转换比例系数和转换边界条件来改善模糊控制器的效果。

2) 知识库: 知识库包含数据库和规则库, 数据库中保存了输入和输出变量的全模糊子集的隶属度值, 而规则库确定了输入的模糊变量的隶属度和输出的模糊变量的隶属度之间的对应关系, 这些对应关系基于已有理论或工程经验, 通过一系列通过逻辑符号 if, and, or, not, then, none, is 等将输入输出的模糊变量及其对应隶属度连接而形成。

3) 推理机: 推理机是一段可执行程序, 根据输入的模糊变量及其隶属度和模糊规则, 得出输出变量的隶属度。

4) 解模糊接口: 由于输出模糊变量的取值范围在模糊论域中, 该输出值不能直接匹配工程需求, 因而需要进行数值转换。

在吸气模块上应用时, 通常采用如图 5 所示的模糊 PID 控制方法, 模糊 PID 控制方法^[8]将模糊控制器的输出作为

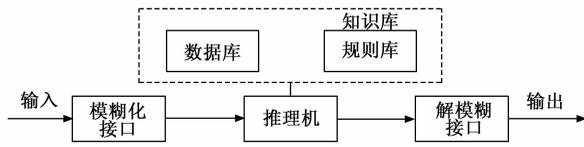


图 4 模糊控制器原理图

PID 控制器的输入, 从而达到动态控制闭环系统状态的目的。该方法中包含如下部分:

1) 模糊控制器: 输入误差 E 和误差变化率 EC , 依据模糊控制规则, 输出 K_p, K_i, K_d 参数。

2) PID 控制器: 输入误差 E , 根据增量式 PID 控制规则, 输出控制量即 DA 值。

3) 比例阀: DA 值可以改变比例阀线圈中的电流, 在不同电流下平衡状态不同从而导致比例阀的开合度发生变化。

4) 流量传感器: 在气路中测量固定气阻两端的压差, 根据预定值计算某一压差下的流量值。

该模糊控制器设计主要包含 3 个步骤^[9]:

1) 输入量 E 和 EC , 输出量 PID 参数 K_p, K_i, K_d 的模糊化和隶属度函数的设计;

2) 分别对 PID 参数 K_p, K_i, K_d 建立模糊规则对照表;

3) 解模糊处理, 分别对 K_p, K_i, K_d 的输出模糊量进行数值转换。

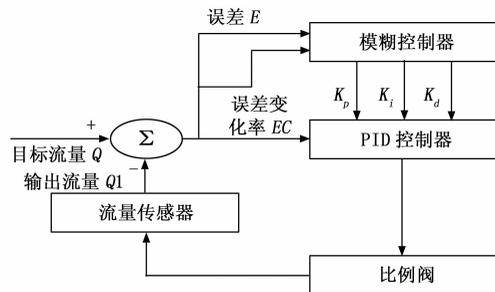


图 5 模糊 PID 控制原理示意图

对于输入模糊量 E 和 EC , 确定模糊集合为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 集合中各变量代表的含义分别为“负大”, “负中”, “负小”, “零”, “正小”, “正中”和“正大”, 在程序中, 模糊集合用整形变量表示为 $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。对于吸气模块, 流量误差值 E 的变化范围为 $0 \sim 150$ L/min, 在对流量误差值 E 进行模糊化时, 需要确定一个流量误差限值, 该限值确定了流量误差 E 的可模糊化范围, 当流量误差绝对值小于时, 其模糊论域为 $[0, 6]$ 。而对于流量误差变化率 EC , 其变化范围为 $-300 \sim 300$ L/min, 同样需要设置类似的流量误差变化率限值。根据以上分析可以得出模糊化公式 (15) 和 (16):

$$qE = \begin{cases} 6, & E > E_L \\ \frac{3E}{E_L} + 3, & -E_L < E < E_L \\ 0, & E < -E_L \end{cases} \quad (15)$$

$$qEC = \begin{cases} 6, & EC > EC_L \\ \frac{3EC}{EC_L} + 3, & -EC_L < EC < EC_L \\ 0, & EC < -EC_L \end{cases} \quad (16)$$

其中： qE 代表了 E 的模糊化值，而 qEC 代表了 EC 的模糊化值。而对于输出量 PID 参数，需要保证 $K_p \geq 0$, $K_i \geq 0$, $K_d \geq 0$ ，因而取模糊集合 {ZO, S, M, B} 即可，集合中变量分别代表“零”，“小”，“中”和“大”。在程序中则采用整形变量将该模糊集合表示为 {0, 1, 2, 3}。模糊化过程中需要进行隶属度函数的设计，隶属度函数有多种，主要包括三角隶属度函数，钟形隶属度函数，梯形隶属度函数和正太分布隶属度函数。由于模糊 PID 控制方法需要在微控制器中实现，因而选择较为简单的三角隶属度函数。根据三角隶属度的特点，可以分别设计出如图 6 所示的输入变量的隶属度函数和如图 7 所示的输出变量的隶属度函数^[10]。

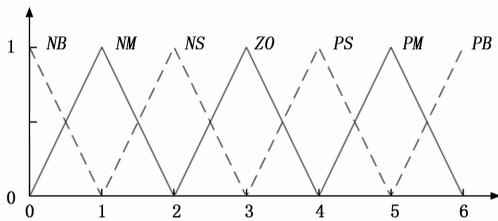


图 6 输入变量 E 和 EC 的三角隶属度函数

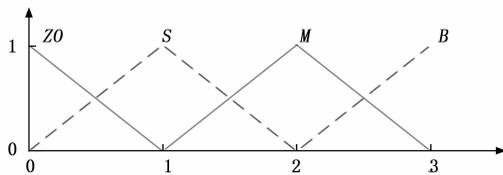


图 7 输出变量的三角隶属度函数

在 PID 控制过程中，较大的比例增益 K_p 可以提高系统的快速性，减少上升时间，但过大的 K_p 也会引起超调和震荡；积分环节主要作用是消除静态误差，积分系数 K_i 大则可以减小消除稳态误差的时间，但过大的 K_i 极易引起积分饱和和现象，使得积分环节作用降低并引起超调；微分环节能够预见系统偏差的变化，并对其产生超前抑制作用，提前减小即将增大的偏差，选取适当的微分系数 K_d 能够减小调节时间，降低超调量，改善系统的动态特性，若 K_d 过大，也会增加额外的系统噪声，引起较大震荡。因而在模糊 PID 控制过程中，控制 3 个参数在调节过程中的变化成为了关键问题。 K_p , K_i , K_d 的模糊规则如表 1, 2, 3 所示，在模糊规则中，调节早期， K_p , K_i , K_d 均保持较大数值，有利于快速减小误差 E ；调节中期，积分参数 K_i 迅速减小以防止积分饱和，比例增益 K_p 和微分系数 K_d 适当降低以防止出现超调；出现超调时，迅速增大 K_p 和 K_d 以抑制超调量增大^[11]。

表 1 K_p 的模糊规则对照表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	M	ZO	ZO	S	ZO	S	ZO
NS	ZO	S	ZO	ZO	S	ZO	ZO
ZO	S	S	ZO	S	ZO	S	S
PS	ZO	ZO	S	ZO	ZO	S	ZO
PM	ZO	S	ZO	S	ZO	ZO	M
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 2 K_i 的模糊规则对照表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	M
NS	ZO	ZO	S	ZO	S	ZO	ZO
ZO	S	ZO	ZO	S	ZO	ZO	S
PS	ZO	ZO	S	ZO	S	ZO	ZO
PM	M	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

表 3 K_d 的模糊规则对照表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	M	B	M	B	B	B	B
NM	S	S	S	ZO	S	M	M
NS	S	S	ZO	ZO	ZO	S	S
ZO	S	S	ZO	S	ZO	S	S
PS	S	S	ZO	ZO	ZO	S	S
PM	M	M	S	ZO	S	S	S
PB	B	B	B	B	M	B	M

完成模糊规则的设计后，需要进行解模糊处理。解模糊处理包含多种方法，例如重心法，简单极大值法和加权平均法等方法。在本文中，既要保证求解结果的精确度，又要保证解模糊方法在微控制器上实现的可行性，因而选择加权平均法。由于隶属度函数选择三角隶属度函数，这使得输入的模糊变量只有在两个模糊集合变量之间存在隶属度，其他模糊集合变量的隶属度为零，因而在解模糊过程中，总会涉及到如表 3 框中所示的 4 个数值，按照顺时针记 4 个数值分别为 Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , Δ_4 ，不妨假设误差 E 对于两个量化值 NS, ZO 的隶属度为 λ_{E1} , λ_{E2} ，实际误差率 EC 对于 NM, NS 的隶属度为 λ_{EC1} , λ_{EC2} ，最终根据加权平均^[12]得到的结果，见公式 (17)。得到的结果 K_p (i, d) 最终落在模糊论域 $[0, 3]$ 中，如果应用到 PID 控制器中还需要进行如公式 (18) 的转换。式 (18) 中， χ_p , χ_i , χ_d 分别是比例增益，积分系数和微分系数的转换比例。转换结束后，可以应用到 PID 控制器中。

$$K_p(i, d) = [\lambda_{E1} \quad \lambda_{E2}] \begin{bmatrix} -\Lambda_1 & \Lambda_2 \\ \Lambda_1 & \Lambda_3 \end{bmatrix} [\lambda_{EC1} \quad \lambda_{EC2}]^T \quad (17)$$

$$\begin{aligned} K_{pf} &= \chi_p K_p \\ K_{if} &= \chi_i K_i \\ K_{df} &= \chi_d K_d \end{aligned} \quad (18)$$

PID 控制器基于以下连续模型:

$$U = K_p \left(E + \frac{1}{T_i} \int E dt + T_d \frac{dE}{dt} \right) \quad (19)$$

其中: U 是控制器输出, K_p 是比例系数, T_i 是积分时间, T_d 是微分时间。在实际应用中, 微控制器在计算时经常采用如公式 (20) 和 (21) 所示的离散增量式 PID 公式。

$$\Delta U_n = K_p (E_n - E_{n-1}) + K_i E_n + K_d (E_n - 2E_{n-1} - E_{(n-2)}) \quad (20)$$

$$K_d = K_p \frac{T_d}{T_s}, K_i = K_p \frac{T_s}{T_i} \quad (21)$$

其中: ΔU_n 是第 n 次控制器的输出相对第 $n-1$ 次控制器输出的增量, E_n 为第 n 次测量值与设定值之差, T_s 为控制过程的执行周期, 通常模糊 PID 控制需要保证 K_p , K_i , K_d 相互独立, 因而不会将 K_p , K_i , K_d 之间的约束方程作为控制依据, 仅采用公式 (20) 作为控制器的实现。

3 建模仿真与实验

3.1 模型参数计算与基本仿真

由于比例阀模型中的多个参数未知, 因而需要根据已有数据和测量数据进行估算。由于比例阀的最大承压 0.7 MPa, 入口直径 d 为 4.6 mm, 比例阀的总质量为 36 g, 开启电流 I_0 为 0.18 A, 最大电为 0.4 A, 响应时间 < 10 ms, 根据公式 (1) ~ (9), 可以得出以下参数:

$$\begin{aligned} k &= 12 \text{ N/mm} \\ x_0 &= 0.96 \text{ mm} \\ M &= 11.22 \text{ g} \\ k_a &= 37.4 \text{ N/A} \\ k_v &= 20 \text{ N} \cdot \text{s/m} \end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) 参数基本满足了动力学方程 (11) 的要求, 对于流量计算式 (12) ~ (14), 参数设置如公式 (23) 所示。根据 (22) 和 (23) 中数据, 利用 Simulink 中的 S 函数即可构建比例阀的被控对象模型。

$$\begin{aligned} r &= 1.4, \xi = 0.005 \\ R &= 287.106 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ \rho &= 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (22)$$

构建模型之后, 可以对该模型进行基本仿真, 搭建如图 8 所示的 Simulink 模型, 其中, valve 是比例阀模型对应的 S-函数, $[t \ u]$ 为主函数对该模型的输入, Q_2 是该模型向工作区的输出, 选择仿真步长为固定步长 0.005 ms, 计算方法选择龙格库塔法 (ode4)。主函数输入 $u = 2000$ 时, 可得如图 9 所示的阀芯的位移与速度随时间变化曲线, 并由此可知比例阀的瞬态特征。阀芯速度先增加后降低直至为零, 此时达到稳态, 位移保持恒定, 响应时间约为 6 ms。主函数将使输入从 $u=0$ 变化到 $u=4080$, 对于每个变化的 u , 进行一次

仿真并获取其稳定流量 Q_2 , 可以获得如图 9 左图所示的 DA 与流量关系曲线, 即为比例阀的稳态特征。图 9 中比例阀的流量存在 3 个区域, 死区, 线性区和饱和区, 在输入小于 1200 时, 比例阀关闭, 流量为零, 而输入大于 3300 时, 比例阀的开度达到最大, 流量不再增加。根据右图实测结果, 仿真与实测之间存在一定差异, 主要体现在上下行曲线实际不一致, 接近死区和饱和区时的非线性以及最大流量输出值的不同。这些问题的原因将在第 4 节中探讨。

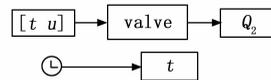


图 8 用于基本仿真的 Simulink 模型

3.2 PID 控制和模糊 PID 控制仿真对比

PID 控制和模糊 PID 控制的仿真分别需要实现如图 9 和图 10 所示的 Simulink 模型。由于增量式 PID 公式和位置式 PID 公式的等价性, 为了减少变量, 因而在这两个模型中均采用位置式 PID 公式。在 PID 控制的模型中, 主要包含 3 个重要的 S-函数, valve, input_cal2 和 error_cal, error_cal 负责计算系统的误差, 误差变化率和误差累积量, input_cal2 负责根据以上数据和 PID 参数计算控制输出, PID 参数选择为 $K_p = 40$, $K_i = 10$, $K_d = 80$ 。在模糊 PID 控制模型中, 增加了以下 S-函数 e_ec_input 和模糊控制器, 在 e_ec_input 中选择 $E_L = 20$, $EC_L = 40$ 作为隶属度函数计算的边界条件, 模糊控制器依照小节 2 实现, 在 S-函数 input_cal 中选取参数 $\chi_p = 40$, $\chi_i = 20$, $\chi_d = 80$, 此时模糊控制器产生的 PID 参数的最大值为 PID 控制中参数值的 3 倍。在波形生成器中输入数据 100, 主函数中进行 0.05 s 的 Simulink 仿真, 可以得到如图 13~16 所示的波形, 这些波形反应了在 PID 控制和模糊 PID 控制下的流量跟踪, 控制输出 DA, 阀芯速度和位移随时间的变化过程。

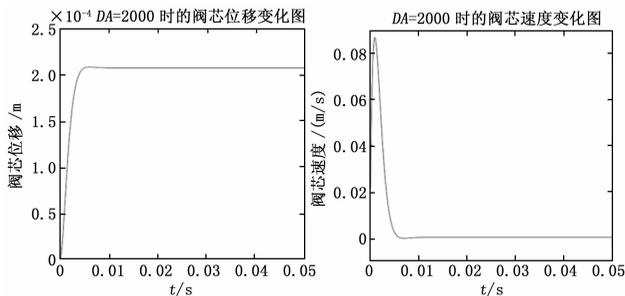


图 9 DA=2000 时的阀芯位移 (左) 和速度 (右) 随时间变化曲线

在 PID 控制中, 调节时间为 18 ms, 最大流量值为 110.5 L/min, 超调量为 10.5%。而在模糊 PID 控制中, 调节时间为 30 ms, 最大流量值为 104.3 L/min, 超调量为 4.3%, 可以看出, 采用模糊控制器增加了调节时间, 但大幅度降低了超调量, 流量控制过程更加平稳。在流量跟踪波形图中, 达到 80 L/min 时两种控制方法所需的时间基本

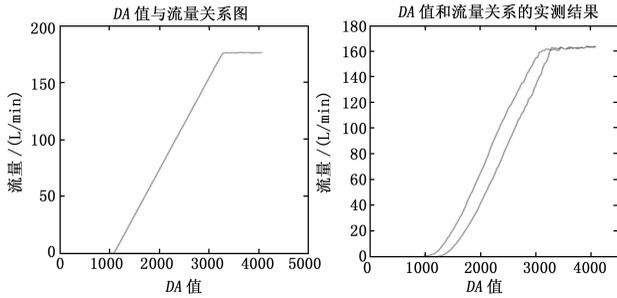


图 10 DA 值与流量关系的仿真 (左) 和实测 (右) 曲线

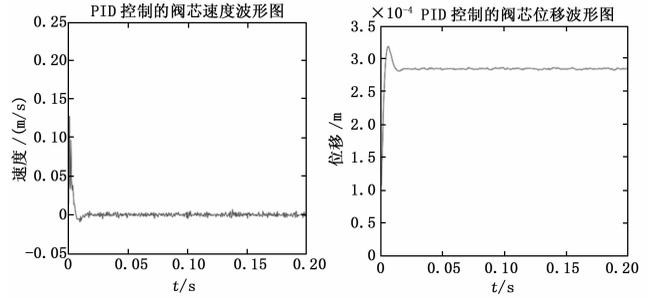


图 14 PID 控制的阀芯速度 (左) 和 阀芯位移 (右) 的波形图

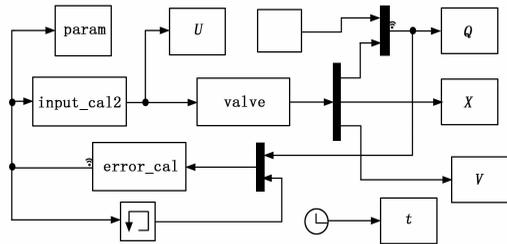


图 11 PID 控制仿真的 Simulink 模型

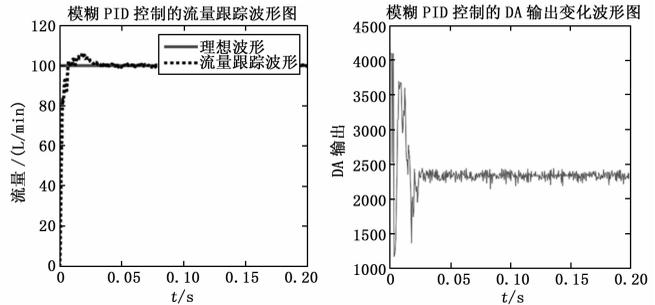


图 15 模糊 PID 控制的流量跟踪 (左) 和 控制输出 DA (右) 的波形图

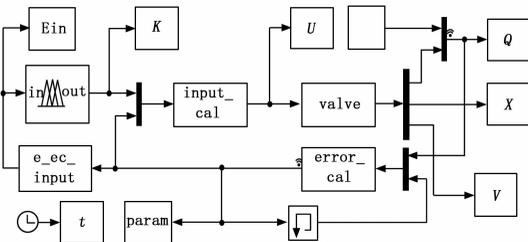


图 12 模糊 PID 控制仿真的 Simulink 模型

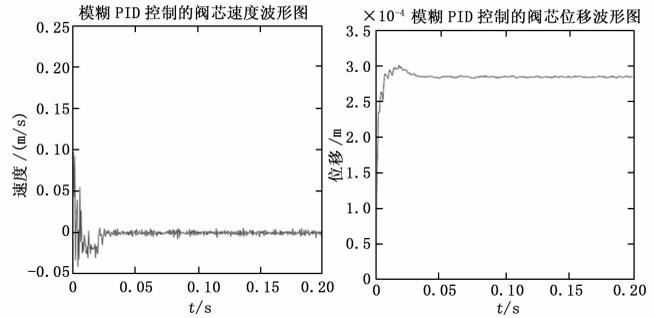


图 16 模糊 PID 控制的阀芯速度 (左) 和 阀芯位移 (右) 的波形

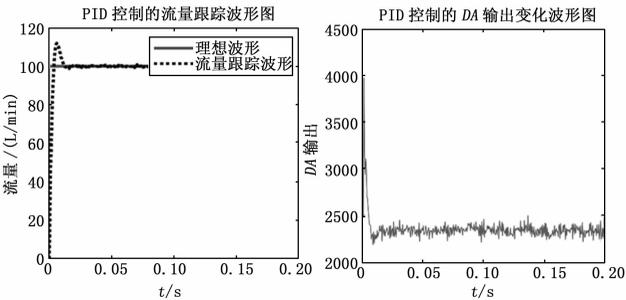


图 13 PID 控制的流量跟踪 (左) 和 控制输出 DA (右) 的波形图

一致, 这表明模糊控制器的加入并不会大幅度降低系统的快速性, 因而可以应用在吸气模块控制过程中。

3.3 PID 控制和模糊 PID 控制的实验验证

对于 Simulink 仿真结果, 还需要进行实验验证。实验条件下, 高压空气气源压力为 0.6 Mpa, 经减压阀减压后压力降至 0.295 Mpa, 吸气模块中, 微控制器实现了 PID 控制和模糊 PID 控制算法以及与外部通信的接口, 在本实验中, 采用 USBDCD 协议与上位机软件通信, 接收和发送气体流量数据。图 17 和图 18 分别反应了模糊 PID 控制和固定参数 PID 控制对于设定流量波形的跟踪效果。从图中可知,

两种控制方法的上升时间差异较小, 但超调量差异较大, 图 17 中最大超调量为 $5/90 \times 100\% = 5.56\%$, 图 18 中的最大超调量为 $20/80 \times 100\% = 25\%$ 。这说明模糊 PID 控制能够有效降低超调量, 保证气路流量的平稳变化。

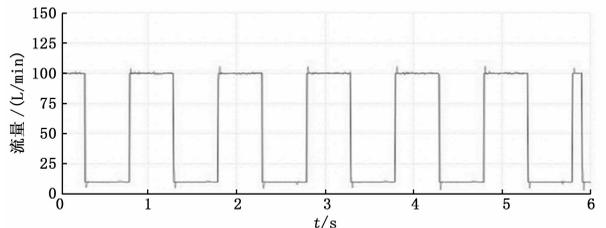


图 17 实验条件下模糊 PID 控制下的流量跟踪曲线

4 结束语

本文首先根据比例阀的结构计算出阀芯位移和流量之间 (下转第 157 页)