文章编号:1674-2869(2024)06-0676-05

基于Simulink的离心泵系统阀门开度分数阶PID控制

耿胡锐,王彦伟*
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:针对目前常见离心泵系统中,传统比例积分(PI)控制器和比例积分微分(PID)控制器对系统中阀门的开度控制存在控制精度欠缺和控制稳定性低等问题,基于MATLAB中的Simulink模块对常见离心泵系统中管路阀门开度控制系统进行数学建模,并确定离心泵、管路、阀门系统中阀门开度最优控制范围。采用分数阶PID算法和Oustaloup滤波器算法设计出一种阀门开度控制方案,以期提高控制系统的响应时间和稳定性。研究结果表明,对比传统PID控制器,在比例、积分、微分3个参数相同的条件下,以75%阀门开度为控制目标,本文设计的分数阶PID阀门开度控制器超调量减小了8.7%、控制系统的稳定时间减少了5.6 s,控制结果稳定性提升明显,稳定时间显著降低,为离心泵系统阀门开度控制的深入研究提供了参考。

关键词:离心泵系统;阀门开度;最优范围;分数阶PID
中图分类号:TP29 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.20230827

Fractional-order proportional-integral-derivative control of valve opening in centrifugal pump system based on Simulink

GENG Hurui, *WANG Yanwei**
School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: In response to the issues of insufficient control accuracy and low control stability in traditional proportional-integral (PI) controllers and proportional-integral-derivative (PID) controllers for valve opening in common centrifugal pump systems, a mathematical model of the pipeline valve opening control system in such systems was established using the Simulink module in MATLAB. The optimal control range for valve opening in centrifugal pumps, pipelines, and valve systems was determined. A valve opening control scheme was designed utilizing the fractional-order PID algorithm and the Oustaloup filter algorithm to enhance the response time and stability of the control system. The results indicate that, compared to traditional PID controllers with the same proportional, integral, and derivative parameters, targeting 75% valve opening, the fractional-order PID valve opening controller developed in this study reduces overshoot by 8.7% and decreases control stability time by 5.6 seconds. Notably, there is a significant enhancement in control result stability, with a marked decrease in stability time. The results offer valuable insights for further exploration into valve opening control in centrifugal pump systems.

Keywords: centrifugal pump system; valve opening; the optimal range of valve opening; fractional-order PID

目前,离心泵系统应用广泛,因本身对液体输送工作的高效性,使其在各行各业都占有主导地位[1]。离心泵系统通常由驱动电机、离心泵本体、管路系统、调节阀和水箱等部分组成[2]。其中由

收稿日期:2023-08-27
基金项目:国家自然科学基金(52301337);湖北省教育厅重点科研项目(D20161506)
作者简介:耿胡锐,硕士研究生。Email:tzzgfree@163.com
***通信作者**:王彦伟,博士,教授。Email:ywwang.cad@gmail.com
引文格式:耿胡锐,王彦伟. 基于Simulink的离心泵系统阀门开度分数阶PID控制[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(6):676-680.

于调节阀的阀门开度对离心泵系统的水力性能有重要影响，故探究调节阀对研究离心泵系统整体的水力特性具有重要意义[3]。

调节阀在工业控制系统中应用广泛，在石油化工、流体传输、日常生活生产等领域都发挥着重要应用[4]。在离心泵系统中，阀门开度是离心泵系统运行过程中的重要参数之一[5]。但在常见的使用场景中，调节阀的工作环境恶劣，具有非线性、时变性、迟滞性等特征，导致对阀门开度的控制超调量高，达到稳态的时间长[6]。在对阀门开度的控制方面，国内外学者均进行了相关研究。Plestan等[7]针对非线性系统提出了一种滑模控制器，减少了阀门开度控制过程中的抖动；Janus等[8]设计了一种增益补偿器，使低流量情况下阀门控制系统更加稳定；Smith预估控制，是一种针对纯滞后系统的纯滞后补偿控制手段，吴金波等[9]提出了流量跟踪的Smith预估比例积分微分（proportional integral differential，PID）控制策略；任璟燚等[10]运用数字信号处理器改进模糊PID算法，提高了阀门开度控制的精度；朱天宇等[11]运用模糊神经网络PID控制算法搭建了电磁阀气缸控制平台。

在目前实际的生产应用中，仍以传统比例积分（proportional integral，PI）控制器或PID控制器为主，存在超调量大、到达稳态时间长等问题[12]。目前，少有学者在离心泵系统的阀门开度控制方面运用分数阶PID控制相关理论。

分数阶PID控制器在传统PID控制器的基础上增加了微分阶次λ和积分阶次μ，提高了控制系统的稳定性和鲁棒性，也能更加灵活地控制受控对象。同时，在进行控制系统优化时，同时对5个参数进行优化可使分数阶PID控制器具有更好的控制效果[13-15]。

针对典型离心泵系统中阀门开度的控制问题，将分数阶微积分和PID控制器相结合，设计了一种阀门开度控制器。仿真结果表明，提出的分数阶PID控制器提高了控制系统的稳定性并显著减少了系统的响应时间，为离心泵系统阀门开度的控制提供了一种可靠的方式。

1　阀门开度控制系统建模

1.1　离心泵系统阀门开度最优范围确定

离心泵是通过电机驱动叶轮从而利用离心力加速流体并输送的一种机械设备。离心泵系统各项水力参数均受离心泵出口阀门开度影响。阀门开度K与阻力系数ξ相关。当ξ较小时，阀门调节精度也较高。通常情况下，K越大，ξ越小，且两参数之间为非线性关系。当K增加至一定值后，K与ξ之间的线性关系更加明显，且与阀门结构形式等因素相关，因此只能由仿真或实验测得。本文采用文献[16]中的K与ξ的关系拟合曲线：

$$K = 10.886 + \frac{830\,704.449\,74}{1 + \left(\dfrac{\xi}{0.405\,63}\right)^{1.2452}} \tag{1}$$

拟合曲线如图1所示，由图1可知，随着阀门开度从80%逐渐减小，阻力系数初始增幅小，当阀门开度减小到25%左右时，阻力系数增幅变化明显。以上数据说明阀门开度较大时，水力损失较小；阀门开度减小到一定阈值时，离心泵系统水力损失激增。

ξ与阀门的尺寸、结构等参数有关。阻力F与ξ的关系为：

$$F = \xi Q^2 \tag{2}$$

式中，Q为阀门流量。

如图1所示，通过K的不断调节，阀门的阻力曲线和离心泵系统管路特性曲线也会随之改变。离心泵系统管路的损失系数δ在K降至20%左右时激增。结果表明，离心泵系统中管路的δ受K影响。在调节K的过程中，对阀门开度控制系统优化的前提是保证离心泵系统水力性能。

综上所述，K的最优范围应控制为：$25\% \leqslant K \leqslant 100\%$。

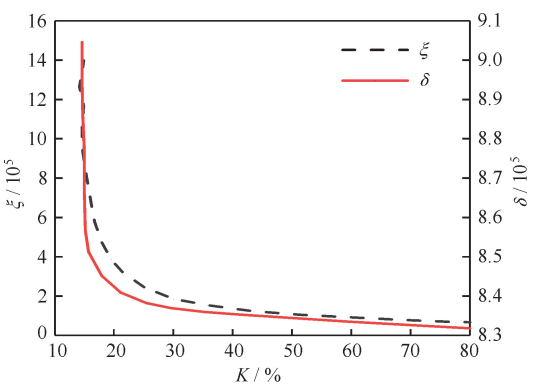


图1　ξ和δ与K的关系图

Fig. 1　Plots of ξ and δ versus K

1.2　阀门开度控制系统建模

阀门开度控制系统主要由分数阶PID控制器、气缸、电气比例阀、调节阀阀体以及位移和压力传感器等部件组成。分数阶PID阀门开度控制系统工作原理为分数阶PID控制器接收上级系统控制电信号，对比阀杆位移信号后，输出信号驱动电气比例阀，电气比例阀输出气压信号，使气缸中

气压发生变化，气缸通过自身内部气压带动调节阀中阀杆运动，阀杆的位移通过机械装置直接反馈于分数阶PID控制器，组成闭环反馈阀门开度控制系统。

作为气压放大装置，电气比例阀将电信号转化为气压信号驱动气缸带动调节阀阀杆运动。外界环境不变、电气比例阀气源压力不变且介质为理想气体时，对气动调节阀阀芯作受力分析有如下微分方程：

$$m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + k_2 x_1 = F_Q - F_f \tag{3}$$

式中：m、c、k_2均为常量，m为阀门阀杆及其附属物的质量，c为阻尼系数；x_1为弹簧压缩量；F_f为摩擦力；F_Q为气源推力，$F_Q = p_0/A$（p_0为电气比例阀中气动执行器的输出压强，A为阀芯截面积）。

对式(3)方程两边进行拉普拉斯变换可得阀杆的运动传递函数为：

$$G_1 = X(S)/P_0(S) = \frac{S}{ms^2 + cs + k_1} \tag{4}$$

式中：$X(S) = F_Q - F_f$，$P_0(S) = m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1 + k_1 x_1$，$k_1$为弹簧的刚度系数。

由质量守恒定律可知，进入电气比例阀中气体的质量流量等于气缸内气体质量变化率，故：

$$G = \mathrm{d}(\rho V)/\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中：t表示时间，G和V分别代表气缸内部气体质量流量和气缸体积，ρ为气缸内气体密度。设气体进入气缸的过程在瞬间完成，由热力学第一定律可知：

$$c_p GT + \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(c_v \rho V T)}{\mathrm{d}t} + p\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中：c_p和c_v分别表示比压系数和比容系数；T为理想气体温度；$\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$为单位时间气缸与外界的热量；$p\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$为单位时间气缸气体变化所做的功。假设气体进入气缸的过程瞬间完成且没有热量散失，则$\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$与$p\mathrm{d}V/\mathrm{d}t$的值均为0。气体压强与气体密度关系为：

$$pM = \rho RT \tag{7}$$

式中：p为理想气体压强，M为摩尔质量，R为理想气体常数。同时，对于气体比热r和理想气体常数R有：$r = c_p/c_v$、$R = c_p - c_v$。

由式(6)和式(7)可知：

$$G = MV/rRT \times \mathrm{d}p/\mathrm{d}t \tag{8}$$

式(8)经过拉普拉斯变换后，可视作电气比例阀对气压信号的放大环节，证明了电气比例阀对气压信号的放大作用。气缸和调节阀共同组成气动执行机构。气动执行机构的运动可视作密闭的气动阻容环节。根据不同阀门开度的控制要求，上级控制系统会对输入阀门的电信号进行调整，从而改变电气比例阀气源的输出压力。此环节的微分方程可表示为：

$$K_T \frac{\mathrm{d}(\Delta p_1)}{\mathrm{d}t} + \Delta p_1 = \Delta p_2 \tag{9}$$

式中：p_1表示比例阀输出压强，p_2表示比例阀输入压强，K_T表示气动阻容环节的时间常数。

考虑到电气比例阀气源的输出具有一定的滞后性，在对气动执行器进行数学模型建立时应将此环节视作一个纯滞后的惯性环节。式(9)经拉普拉斯变换得出阀门的气动执行器的传递函数：

$$G_2 = \frac{K_1}{K_T s + 1} \mathrm{e}^{-ts} \tag{10}$$

式中：K_1为放大系数。

当气缸中的气体作用在阀杆顶部的膜片上压力大于阀杆所受摩擦力和弹力之和时，阀杆将开始运动。根据气体状态方程，可得阀门阀芯的动力学微分方程为：

$$m\ddot{x}_1 + \alpha\dot{x}_1 + k_1(x_0 + x_1) = p_3 A_1 - p_4 A_0 - F_m \tag{11}$$

式中：x_0为气缸弹簧原长度，x_1为弹簧被压缩后的长度，α为阀门气动摩擦系数，p_4和p_3分别表示阀门输出压力和膜头对阀门的压力，F_m表示摩擦力，A_0和A_1分别表示液体在管路中流动时，始末位置的管路截面积。

电气比例阀的运动过程较为复杂，难以获得准确的数学模型，只能得到理想状态下的近似模型，根据其近似模型可得由典型控制环节构成的传递函数，近似表示为：

$$G_3 = \frac{k_1\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \tag{12}$$

式中：ω表示振荡频率。

2 分数阶PID控制原理及参数设计

2.1 分数阶PID控制原理

分数阶PID控制是传统PID控制的扩展，引入了分数阶积分和微分运算，以提供更加灵活和精确的控制策略，适合处理具有复杂动态特性的系统，如具有长记忆效应、非线性或时变特性的系统。分数阶PID控制器通过调整控制参数以及积分和微分的阶数，实现比传统PID控制器更优的性能。分数阶微积分实质上是非整数阶微积分，在不同的角度，分数阶的定义有不同的表现形式。但分数阶作为一个非线性系统，在实际的模拟和

仿真过程中并不存在整数阶的传递函数模型来完成真正的分数阶行为，通常通过近似化等方法实现分数阶系统。目前应用比较广泛的方法是运用Oustaloup滤波器算法进行拟合[17]。

Oustaloup滤波器算法是一种用于近似分数阶积分器和微分器（分数阶微积分运算）的算法，特别适用于控制系统和信号处理中，允许设计师实现非整数阶的控制策略，从而提供比传统整数阶PID控制器更灵活和更优化的性能。Oustaloup分数阶算子的实现方法是在频域上运用零极点形式的传递函数来近似替代分数阶算子，Oustaloup滤波器的标准形式为[18]：

$$s^{\gamma} \approx G(s) = K_1 \prod_{k=1}^{N_f} \frac{s + \omega_k'}{s + \omega_k} \tag{13}$$

式中：s^{γ}为分数阶微分算子；N_f为滤波器的阶次；零点 $\omega_k' = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1-\gamma}{N_f}}$（$k$为常数，$\gamma$为分数阶阶次），$\omega_u = \sqrt{\omega_h / \omega_b}$（$\omega_h$和$\omega_b$分别为设计者选择频率段的上下限）；极点 $\omega_k = \omega_b \omega_u^{\frac{2k-1+\gamma}{N_f}}$；增益 $K_1 = \omega_h^{\gamma}$。

分数阶PID控制器传递函数的表达式为：

$$G(s) = K_P + K_I / s^{\lambda} + K_D s^{\mu} \tag{14}$$

式中，K_P、K_I、K_D分别为比例、积分和微分项的系数，λ为微分阶次，μ为积分阶次。

相较于传统PID控制器，分数阶PID控制器增加了微分阶次λ和积分阶次μ，提高了控制系统的稳定性和鲁棒性，同时在参与系统二次频率调节时的效果更好。

2.2　分数阶PID控制器参数设计及仿真

选用的电气比例阀为日本SMC公司产品，根据其产品说明书可得传递函数中各参数值如表1所示[19]。

表1　电气比例阀参数表

Tab. 1　Parameter table of electrical proportional valve

m / kg	k_1 / (N/m)	K_1	K_T / s	ω / (rad/s)	α	ξ
0.05	10	3.3	3.9	14.8	1	0.68

整体离心泵阀门开度控制系统的传递函数为各部分间传递函数的乘积。故系统的传递函数为：

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \tag{15}$$

将上述各部分参数代入式（4）、式（10）和式（12）中可得系统传递函数为：

$$G = (65/0.05s^2 + s + 10) \times 3(1/11.8s) \times e^{-1.2s} \times 50/(0.05s^2 + s + 11) \tag{16}$$

Simulink是MATLAB软件中的一种可视化仿真工具。由于特殊的模块化特性，使其具有适应面广和结构流程清晰等特点。同时，随着对软件的不断开发，MATLAB/Simulink也拥有了很多模块使系统的仿真更加便捷[20]。

为了验证本文离心泵系统阀门开度分数阶PID控制系统的控制效果，利用Simulink搭建阀门开度分数阶PID控制系统模型，根据式（15），分别采用G_1作为电气比例阀的传递函数，G_2作为气缸的传递函数，G_3作为阀杆的传递函数，控制目标为将阀门开度控制在75%。

根据以上信息，运用Simulink中各类型模块构建离心泵系统阀门开度分数阶PID控制系统模型。其中，分数阶PID控制器的比例、积分、微分项的系数分别为：$K_P = 2.5$、$K_I = 0.58$、$K_D = 1.2$；积分阶次和微分阶次分别为：$\lambda = 1.004$、$\mu = 1.15$；频率范围为：$[\omega_b, \omega_h] = [0.001, 1000]$。

3　分数阶PID控制仿真

根据上述各参数值，运行Simulink模型，在单位阶跃信号输入下，保持K_P、K_I、K_D参数值不变，可得传统PID控制器和分数阶PID控制器对离心泵系统阀门开度的控制效果对比情况，如图2所示。

传统PID控制器和分数阶PID控制器均能完成75%阀门开度的控制目标。但传统PID控制器的超调量为32.2%，稳定时间为15.2 s，分数阶PID控制器的超调量为23.5%，稳定时间为9.6 s，分数阶PID控制器与传统PID控制器的超调量降低了8.7%，稳定时间缩短了5.6 s。

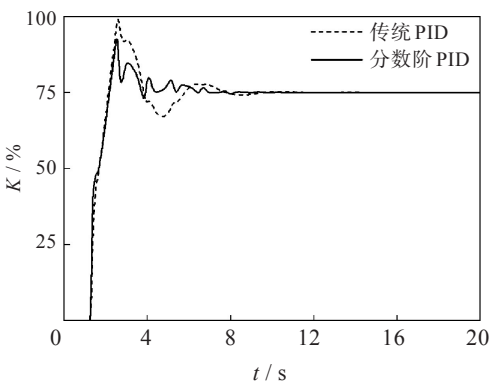


图2　控制效果对比图

Fig. 2　Comparison of control effects

4　结　论

针对离心泵系统中，对调节阀的阀门开度控制精度和稳定性不足的问题，设计了一种分数阶PID阀门开度控制器，应用热力学定律和Oustaloup滤波器算法，推导出离心泵阀门开度控

制系统的数学模型，得出离心泵系统K的最优控制范围，对分数阶PID控制器和传统PID控制器在单位阶跃信号输入下，以75%的K为控制目标的控制效果进行了仿真与分析，结论如下：

（1）K与ξ之间成非线性关系，与δ也存在相似关系。考虑到对K的控制不应损失过多水力性能，K的最优范围应控制在：$25\% \leqslant K \leqslant 100\%$。

（2）在K_P、K_I、K_D参数值相同时，对比传统PID控制器，分数阶PID控制器的控制效果提升显著，超调量降低了8.7%，稳定时间缩短了5.6 s。

仿真和分析结果表明，在相同条件下，分数阶PID阀门开度控制器比传统控制器控制效果提升显著，满足了离心泵系统阀门开度的控制要求，为离心泵系统的深入研究提供了参考。

参考文献

[1] 高豪，王彦伟.气-液两相条件下叶轮开孔对高速离心泵的影响[J].武汉工程大学学报，2020，42(6)：683-687.

[2] HIENINGER T，SCHMIDT-VOLLUS R，SCHLÜCKER E. Improving energy efficiency of individual centrifugal pump systems using model-free and on-line optimization methods[J]. Applied Energy，2021，304：117311.

[3] 陈颂英，李春峰，曲延鹏，等. 离心泵在启动阶段的水力特性研究[J].工程热物理学报，2006，27(5)：781-783.

[4] 徐亮亮. 基于CFD调节阀内部流场数值模拟研究与结构优化[D].上海：华东理工大学，2016.

[5] 朱启培，李育房，王彦伟.离心泵叶轮湿模态及其影响参数分析[J].武汉工程大学学报，2021，43(6)：701-705.

[6] 王明坤，刘姗姗，王晓斐，等.超超临界汽轮机调节级叶片的汽流激振力研究[J].汽轮机技术，2014，56(3)：195-198，202.

[7] PLESTAN F，SHTESSEL Y，BRÉGEAULT V，et al. Sliding mode control with gain adaptation：application to an electropneumatic actuator [J]. Control Engineering Practice，2013，21(5)：679-688.

[8] JANUS T，ULANICKI B. Improving stability of electronically controlled pressure-reducing valves through gain compensation[J]. Jouranl of Hydraulic Engineering，2018，144(8)：04018053.

[9] 吴金波，鄢俊峰，吴永弘.阀控给水系统的流量跟踪控制[J].机械与电子，2017，35(9)：45-48.

[10] 任璟燚，张莉萍，申景双，等.基于DSP的阀门开度控制系统设计[J].传感器与微系统，2022，41(9)：73-76.

[11] 朱天宇，董全林，刘日.模糊神经网络在阀门开度控制中的应用[J].仪表技术与传感器，2019(2)：94-98，103.

[12] 吴忠强，张伟，李峰，等.基于云神经网络自适应逆系统的电力系统负荷频率控制[J].电力自动化设备，2017，37(11)：86-91.

[13] 高嵩，王磊，陈超波，等.一种改进粒子群优化的分数阶PID参数整定[J].控制工程，2017，24(10)：2010-2015.

[14] 吴雪婷. 基于人工蜂群分数阶PID算法的电磁搅拌控制系统研究[D].岳阳：湖南理工学院，2021.

[15] 余建军，蔡世波，胥芳，等.基于分数阶PID算法的磁流变液柔顺关节控制研究[J].计算机集成制造系统，2020，26(2)：393-401.

[16] JOSEPH P，AMANDOLÈSE X，AIDER J L，et al. Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference body using pulsed jets[J]. Experiments in Fluids，2012，52(5)：1169-1185.

[17] OUSTALOUP A，LEVRON F，MATHIEU B，et al. Frequency-band complex noninteger differentiator：characterization and synthesis[J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems I：Fundamental Theory and Applications，2000，47(1)：25-39.

[18] 刘勇智，李杰，戴聪，等.基于改进Oustaloup滤波器的分数阶PID控制器简化设计[J].信息与控制，2019，48(6)：723-728.

[19] 孙钦翰，罗定钊，韦山峰，等.基于AMESim的电气比例阀仿真研究[J].阀门，2022(6)：460-462.

[20] 林思齐，熊永新，姚伟，等.基于MATLAB/Simulink的新一代电力系统动态仿真工具箱[J].电网技术，2020，44(11)：4077-4088.

本文编辑：霍淑利