

管内智能封堵器能量回收模糊PID控制系统研究

赵弘*, 孟繁帛, 苗兴园

中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

* 通信作者, hzhao_cn@163.com

收稿日期: 2019-06-26

国家自然科学基金面上项目(51575528)资助。

摘要 智能封堵技术是一种十分重要的管道维修手段,但其工作效率与可靠性一直受到能源问题的制约,在没有新型高效能源的情况下,设计一种可能量回收的管内智能封堵器可以有效地解决这一问题。本文提出在电液系统中加入蓄能器形成双动力源的方法,设计一种管内智能封堵器的电液能量回收控制系统,并针对封堵过程中可能出现的振动问题,提出模糊PID控制方法,并用MATLAB-Simscape软件进行仿真。仿真结果表明,模糊PID控制电液能量回收系统可以使系统在安全工作状态下工作,误差小于3%,当蓄能压力为3.8 MPa时,能量回收效率为24.57%。

关键词 管内智能封堵器; 模糊PID控制器; 能量回收效率; 控制系统

Study on fuzzy-PID control system for energy recovery of pipe isolation tool

ZHAO Hong, MENG Fanbo, MIAO Xingyuan

College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract Intelligent plugging technology is a very important means of pipeline maintenance. Its work efficiency and reliability are restricted by energy problems. In the absence of new high-efficiency energy, the design of a possible amount of recycling intelligent in-pipe occluder can effectively solve this problem. In this paper a method of adding an accumulator to form a dual power source in an electro-hydraulic system was proposed, and an electro-hydraulic energy recovery control system for the intelligent occluder in the tube was designed, and the fuzzy PID control for the vibration problem was proposed that may occur during the plugging process. In another, MATLAB-Simscape software was used to simulate the process. The simulation results showed that the improved fuzzy PID control electro-hydraulic energy recovery system can make the system work under safe working conditions with an error of less than 3%. When the storage pressure was 3.8 MPa, the energy recovery efficiency was 24.57%.

Keywords pipe isolation tool; fuzzy PID controller; energy recovery efficiency; control system

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.014

0 引言

石油行业与我国的经济、能源等行业息息相关。

管道运输作为石油行业的最基本的,同时也是应用最为广泛的远距离运输方式,其安全性直接影响到了油气运输的安全和效率。由于油气运输的特殊工作环境,

引用格式: 赵弘, 孟繁帛, 苗兴园. 管内智能封堵器能量回收模糊PID控制系统研究. 石油科学通报, 2023, 02: 193-203

ZHAO Hong, MENG Fanbo, MIAO Xingyuan. Study on fuzzy-PID control system for energy recovery of pipe isolation tool. Petroleum Science Bulletin, 2023, 02: 193-203. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.02.014

油气管道十分容易受到堵塞、腐蚀、磨损,对这些问题管道需要进行及时的更换,否则管道的损伤将会得到进一步的扩大,直到发生油气的泄漏,造成巨大的经济损失、环境污染,甚至会影响到人身安全。因此,油气管道需要定期检测,并及时对损伤的管道进行更换。油气管道的智能封堵技术是一种十分重要的管道抢修方法,尤其是对于海洋油气管道,这种方法可以有效地减少抢修时间,快速地阻止油气的泄漏,降低维修工作的操作风险,因此管道智能封堵技术具有十分广泛的应用前景^[1]。

管内智能封堵器的工作原理如图1所示。管内智能封堵器通过管道的清管器发球端发射进入管线,在管内前后压差的推动下向下游运动。地面控制中心与管道智能封堵器通过安装在管壁上的超低频电磁脉冲信号发生器进行信息交换,该信号发生器可使信号穿透管壁与智能封堵器进行通讯,控制中心在得到封堵器各项状态的同时,可以对封堵器进行控制。当控制中心根据传回的位置信号判断出封堵器到达故障位置时,控制中心对封堵器发射进行封堵的控制指令。接收到封堵指令后,清管模块内的旁通阀开启,管内智能封堵器前后压差减小,其运动速度降低,同时激活封堵模块中的微型液压泵开始封堵作业,内部液压缸

驱动活塞杆运动,在其带动下位于封堵模块两端面的承压头和执行盘轴向缩紧,推动锁定滑块沿挤压碗向斜上方运动,直到其毛刺与管壁接触并刺入一定深度,从而使管内智能封堵器锚定实现自锁,与此同时,封隔圈在挤压碗的压力作用下径向变厚,与管壁形成高压接触,从而密封管内高压介质。维修工作完成后,在解封信号控制下,系统泄压,其前后压力平衡,封堵器解封,在介质推动下继续运动。

管内智能封堵器的封堵工作主要依赖于电池组提供能源,蓄电池的工作寿命对于管内智能封堵器的工作时长和成本都有着影响,而对于智能封堵器的工作特点,减少蓄电池电量的消耗量,降低封堵过程对于电池的依赖性,可以有效地提高工作效率,降低工作成本。管内智能封堵器在管道中运行的过程中,管道内流体的动能可以加以利用,而在封堵作业过程中,随着封堵比例的提高,管内智能封堵器前后压差将有着剧烈的提高,前后流体的压力势能也可以进行一定的利用,将油气的能量进行回收、存储,并在封堵的过程中释放,降低对于电能的需求。

现阶段电液能量回收系统的主要方法是在系统内安装蓄能元件,在系统高压状态下的能量吸收一部分,在主要的做功过程中,将蓄能器的能量释放,从而减

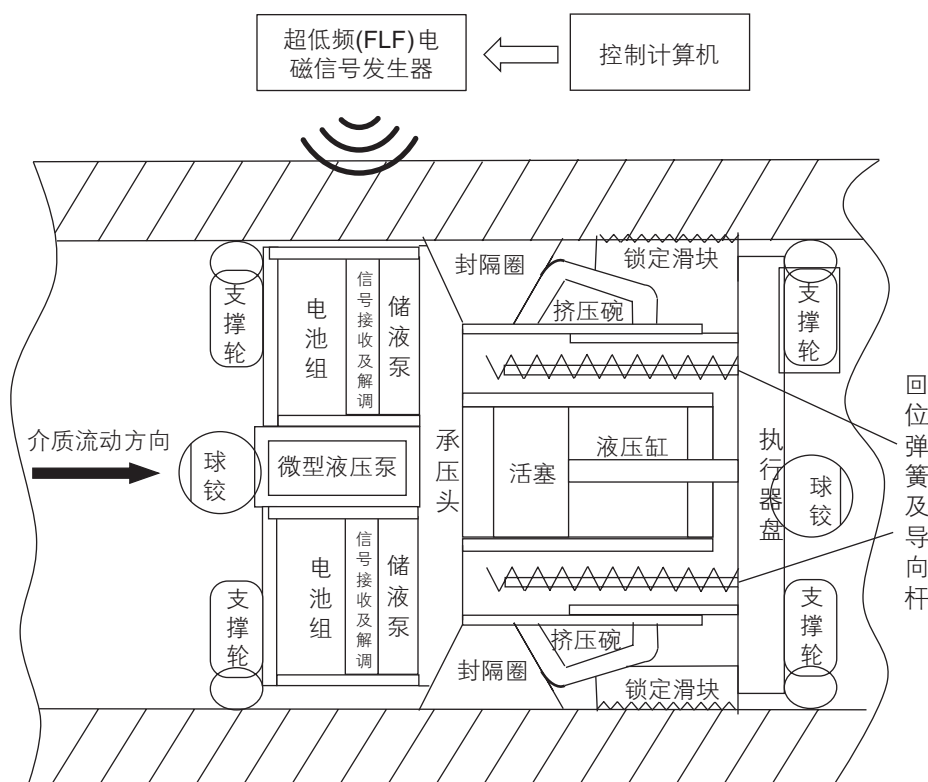


图1 管内智能封堵器工作原理

Fig. 1 Pipe isolation tool working principle

小在做功过程中能量的消耗,减少动力元件的负载需求。Zhao 等人开发了一个能量回收系统(ERS),该系统利用三腔液压缸和蓄能器来回收机械臂的势能和挖掘机的负载,发动机的能量耗散可减少约 50%^[2]。Li 等人提出了一种 21t 挖掘机的新型能量回收控制方案,利用液压蓄能器回收吊杆势能、动摇马达能量和主溢流阀,与传统挖掘机相比,可节油 16%,效率更高^[3]。

传统 PID 控制是目前应用最为广泛,技术最为成熟的实现连续控制的控制方法,具有鲁棒性强、结构简单、易于实现的特点。但是面对运动过程复杂的非线性时变系统,往往需要通过结合模糊算法,实现时在线优化 3 个控制参数,达到优化控制效果的目的。在赵从建等人,以及尘帅等人的研究中,都利用模糊 PID 对汽车的制动过程进行控制,提高了控制效果,减少制动时间,提高了制动过程的安全性^[4-5]。

本文针对油气管道智能封堵器的封堵作业过程,设计了管内智能封堵器电液能量回收控制系统,并提出了一种针对管内智能封堵器封堵速度的模糊 PID 控制策略,可实现准确封堵速度的控制和封堵装置的能量回收利用,避免水击、振动等问题,使封堵作业更加安全有效。

1 管内智能封堵器电液能量回收控制系统设计

本设计将管内智能封堵器运动时液体流动的动能回收,并将其转化为液压能,以供管内智能封堵器到达封堵位置时液压缸运动推动推筒,在改进的液压系统中加入蓄能器,用来存储回收的能量,同时在封堵的过程中作为压力源^[6-8]。电液能量回收控制系统设计原理图,如图 2 所示。

当封堵器在管道内运动时,通过安装的叶轮带动液压泵,将液体泵入蓄能器中。当封堵器到达封堵位置,封堵器进行管道的封堵,蓄能器释放液体,快速提高系统压力,辅助液压源提供动力,当蓄能器压力不再下降后,停止释放液体。当封堵作业完成后,蓄能器继续释放液体,使封堵器推筒和锥筒分离,封堵器继续在压差的作用下,随着液体向下游移动。

根据相关研究^[9],可以知道在封堵的过程中封堵器前后压力差的变化规律。封堵过程中管内智能封堵器上下游压差一直呈上升趋势,主要由于流量减小导致上游流体减速静压增大,但是在封堵的前中期,封堵比例小于 80% 时,管内智能封堵器前后的压力差变化不大,当封堵比例达到 80% 后压差开始剧烈变化,压差增长曲线变为指数型。

忽略弹性负载和外部负载扰动,液压缸和负载平衡方程是:

$$p_2 A_2 - p_1 A_1 = ma + b_c v + F \quad (1)$$

其中, p_1 为液压缸有杆腔压力(Pa); p_2 为液压缸无杆腔压力(Pa); A_1 为液压缸有杆腔的有效面积(m^2); A_2 为液压缸无杆腔的有效面积(m^2); m 为活塞杆与负载的总质量(kg); b_c 为液压缸活塞和负载的粘性阻尼(Ns/m); a 为活塞运动速度变化(m/s^2); v 为活塞运动速度(m/s); F 为管道内液压差对负载及活塞造成的力(N)。

因为活塞行程短,质量小,且在封堵过程中封堵器基本没有速度变化,质量及阻尼造成的力可以忽略不计,平衡方程可近似看作:

$$p_2 A_2 - p_1 A_1 = F \quad (2)$$

根据实际的工作环境以及实验条件,液压系统的最大工作压力取活塞行程 80% 时的管道前后压力差 $p_{0.8}$ 所造成的压力:

$$F = p_{0.8} A_c = p_{0.2} \times \pi \times D^2 / 4 = 3925 N \quad (3)$$

通过查找相关设计标准^[10],计算得到液压缸,蓄能器和叶轮的相关参数,包括:有杆腔的有效面积 A_1 为 7.85 cm^2 ; 无杆腔的有效面积 A_2 为 15.7 cm^2 ; 理论液压缸直径 D_o 为 44.7 mm ; 实际液压缸直径 D_c 为 50 mm ; 实际活塞杆直径 d_c 为 28 mm ; 活塞的工作行程 l 为 25 mm ; 有杆腔的容积 V_1 为 0.034 L ; 无杆腔的容积 V_2 为 0.049 L ; 蓄能器的工作容积 V_x 为 0.027 L ; 蓄能器的最小工作压力 p_1 为 2 MPa ; 蓄能器的最大工作压力 p_2 为 5 MPa ; 蓄能器的充气压力 p_0 为 1.5 MPa ;

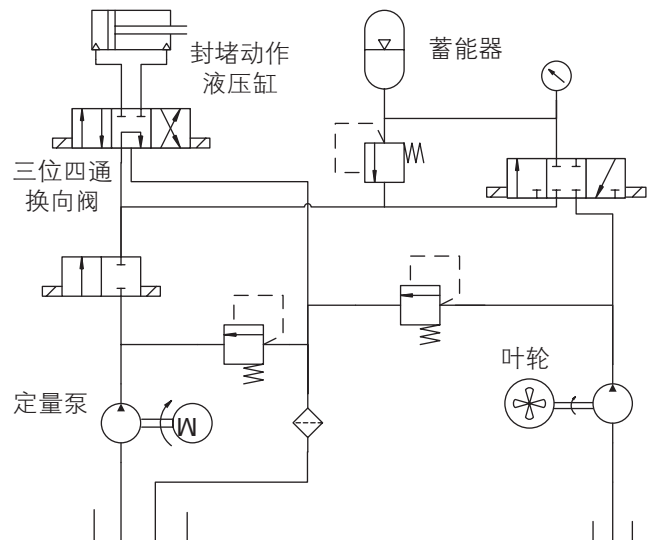


图 2 电液能量回收控制系统原理图

Fig. 2 Electro-hydraulic energy recovery control system schematic

蓄能器的容积 V_A 为 0.0604 L；齿轮泵的输入转矩 M 为 66.85 Nm。

封堵过程至关重要。如果封堵时速度很快，则会瞬间引起很大的压力变化。管道内会产生水击，这将给输油管道带来很大的危害。为避免引起水击，控制封堵过程中的进行速度将是一个非常重要的问题^[11-13]。根据相关实验得到封堵速度优化曲线，并在其基础上

进行控制系统的建立与优化。

2 管内智能封堵器电液能量回收控制系统数学模型建立

采用 MATLAB-Simscape 中的液压元件进行建模与仿真研究，模型设计图如图 3 所示，其中 a 为管内

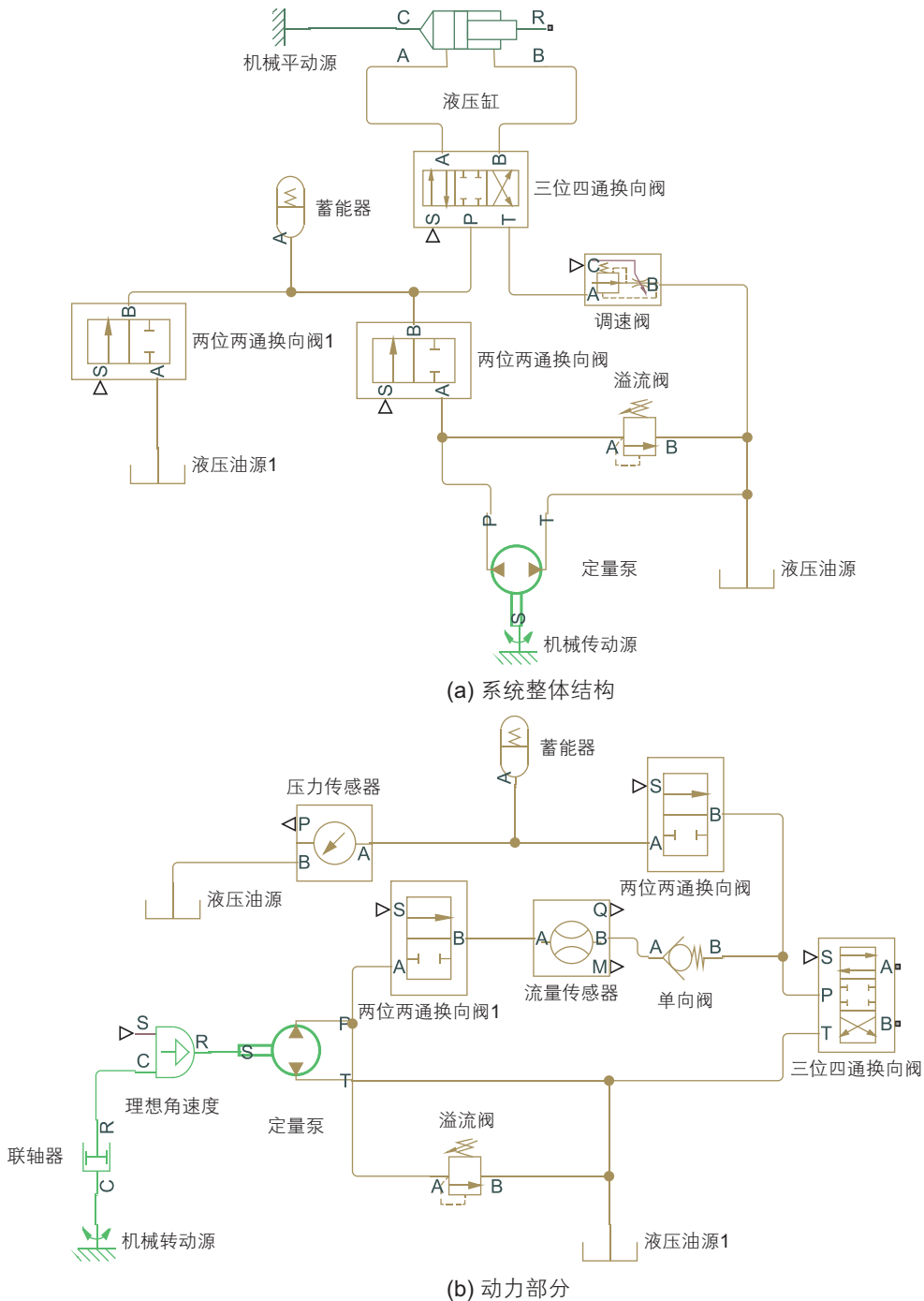


图 3 MATLAB-Simscape 仿真模型图
Fig. 3 MATLAB-Simscape simulation model diagram

智能封堵器电液能量回收控制系统的整体结构, b 为该系统的动力部分。该系统的动力源由液压泵动力源和蓄能器动力源两部分组成。液压泵动力源和蓄能器动力源可单独或同时为液压缸提供动力。

设计的管内智能封堵器电液能量回收控制系统结构相对简单, 通过对该系统进行建模, 验证控制系统的控制性能。液压控制系统建模的关键是构造液压缸的传递函数, 可由阀的负载流量方程、液压缸的流量连续性方程和液压缸的负载力平衡方程 3 个基本方程经过拉普拉斯变换得到^[14-15]。

四通阀控非对称液压缸的负载流量方程:

$$q_L = k_q x_v - K_c P_L \quad (4)$$

液压缸的流量连续性方程:

$$q_L = A_1 \frac{dx_p}{dt} + C_{ip} P_L + \frac{V_t}{2(1+n^2)\beta_e} \frac{dp_L}{dt} + C_{ic} p_s \quad (5)$$

液压缸的负载力平衡方程:

$$A_1 P_L = m_t \frac{d^2 x_p}{dt^2} + B_p \frac{dx_p}{dt} + K x_p + F_L \quad (6)$$

将式(4)-(6)联立, 并进行拉氏变换, 忽略液压缸的泄露, 将模型简化可以得到系统的PID控制框图, 如图4所示。

在不考虑负载力的情况下, 将液压系统相关参数代入到图4的框图中, 可以得到液压缸阀芯位移 x_p 对液压缸活塞位移 x_v 的传递函数式(7):

$$G_k(s) = G_1(s)G_2(s)H(s) = \frac{0.65}{5.58 \times 10^{-4} s^3 + 2.779 \times 10^{-3} s^2 + 7.85 \times 10^{-4} s + 7.85 \times 10^{-4}} \quad (7)$$

考虑到实际参数, 管内智能封堵器电液能量回收液压系统带反馈环节的传递函数框图如图4所示, 系统闭环阶跃响应如图5所示。

可以看到系统在前1s出现较强烈的振荡, 说明系统具有较大的超调量, 调整时间长, 系统的动态特性不好, 不利于对液压缸活塞进行控制。为了提高系统的稳定性, 需要对系统进行控制。

3 模糊 PID 控制策略研究

模糊PID相较于传统PID的控制方法, 其最主要的优点就是其可以根据设定的参数与实际数值的偏差, 利用模糊推理的方式, 实时改变控制的3个参数, 使得调节的速度更快, 同时各个状态下都由较好的控制效果, 有效地减小控制过程中每一部分的误差^[16-17]。

管内智能封堵器模糊PID控制系统设计如图6所示。在MATLAB使用Fuzzy Logic Designer进行模糊逻辑设计, 以实际位移与理想位移的差值为输入, 将PID控制的3个参数(比例、积分、微分系数)作为输出, 并建立适当的模糊规则, 使得PID控制的参数可以根据位移的变化而进行改变。将生成的模糊程序导入到Simulink界面中的模糊逻辑管理器中, 即可实现对仿真系统的模糊控制。除了执行模块和动力模块之外, 液压系统还需要许多传感器模块, 例如用于测量液压缸的位移和速度的传感器、用于测量蓄能器储能压力的传感器、用于测量管道流量的传感器。控制器可以将传感器信号与输入信号进行比较, 并产生输出

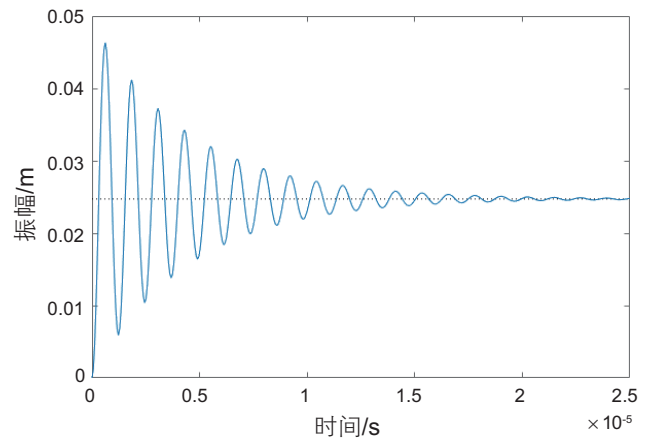


图5 系统阶跃响应图

Fig. 5 System step response diagram

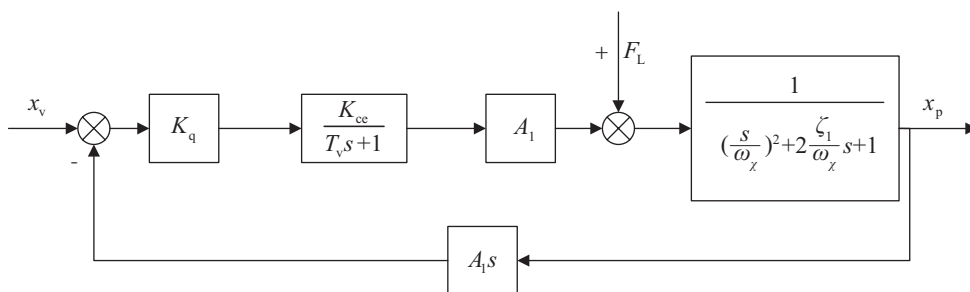


图4 能量回收液压系统PID控制系统框图

Fig. 4 Energy recovery hydraulic system block diagram of PID control system

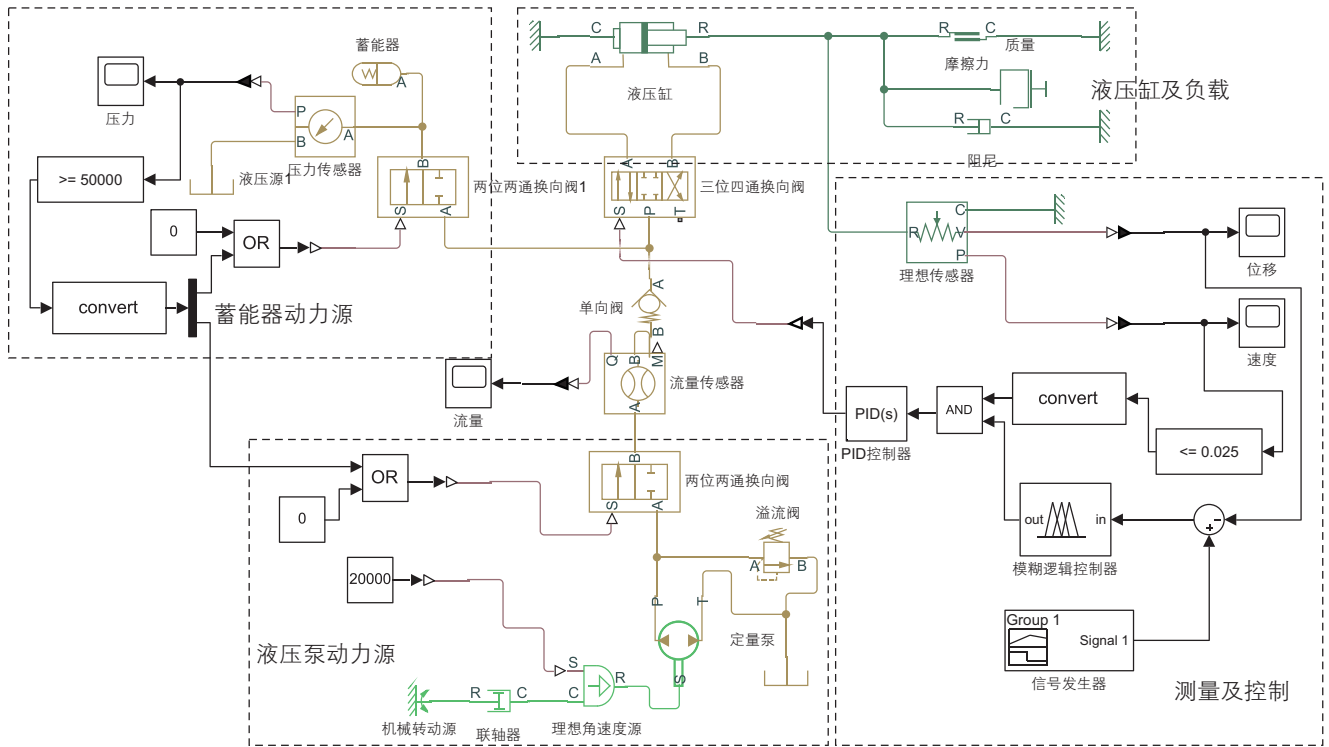


图6 整体系统设计图

Fig. 6 Overall system design

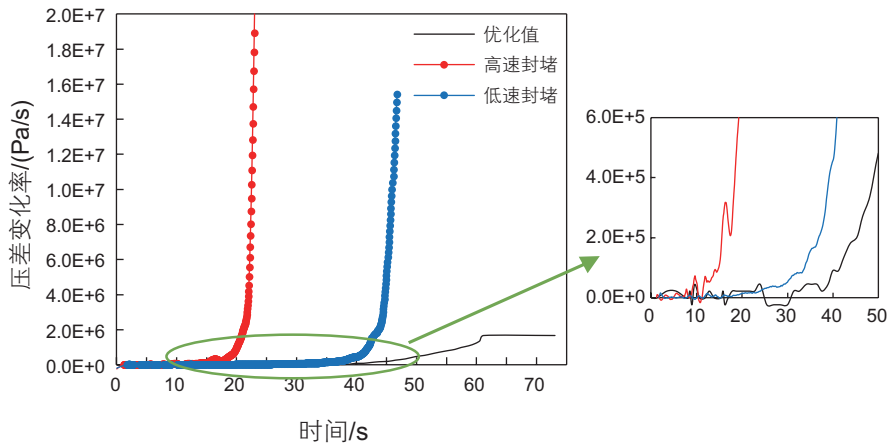


图7 匀速控制与优化速度控制的压力差

Fig. 7 Constant pressure control and optimized speed control pressure difference

信号以控制致动器动作。当蓄能器能量不足时，打开液压泵与蓄能器之间的通道，使蓄能器可以存储能量。当液压缸到达目标位置时，关闭电源以避免破坏液压缸。液压泵动力源和蓄能器动力源均可单控，可单独使用或同时使用。

在整个系统的控制中，控制封堵速度是非常重要的。在封堵过程中，当压差变化率太大时，会导致水击等不安全事故。因此，控制系统在安全条件下的运行是系统的控制目标。通过研究可知，等速封堵后压差的变化在封堵完成80%以上时呈指数增长。将系统

控制在优化速度下，系统完全处于安全状态。图7展示了均匀速度控制与优化速度控制之间的压差的对比图。

因此，通过对电液能量回收系统施加PID控制以控制管内智能封堵器的封堵速度。通过仿真，不同的PID参数(见表1)对结果的影响如图8所示，对应于不同参数的误差曲线如图9所示。

可以看出，当系统只按比例调整时，系统中存在静态误差。通过增加积分系数可以消除静态误差。积分系数将减缓系统的调整速度。微分系数的引入可以

使其得到改进，而积分系数的引入将使系统产生超调。

在一般的系统中，适当的超调是加快系统的反应速度的一种方法，该方法被广泛使用。但在该液压系

统中，控制目标是优化速度函数。考虑安全压差，通过实验研究了最优速度函数。也就是说，超过最优速度函数相当于越过安全线。这种不安全的条件不允许在研究和工业中使用。因此，必须将系统控制在安全条件下操作，也就是说，不能超过最佳速度函数。

通过对曲线的分析得到，在控制的第一阶段只需增加比例系数，就可以保持控制的稳定性，而较大的 PID 参数(模式 1)可以使系统稳定。由于系统的巨大变化，在控制的后期封堵速度很慢，误差普遍增大。较小的 PID 参数(模式 2)使系统能够在末端保持更好的性能，但较早的误差较大。因此使用单一的 PID 系数对于该电液能量回收系统的速度控制并不能达到很好

表 1 PID 不同模式的控制参数

Table 1 PID control parameters of different modes

项目	数值		
	比例系数	积分系数	微分系数
P 控制模式	22	0	0
PI 控制模式	22	1	0
PID 控制模式 1	15	8	3
PID 控制模式 2	7.1	0.32	0.05

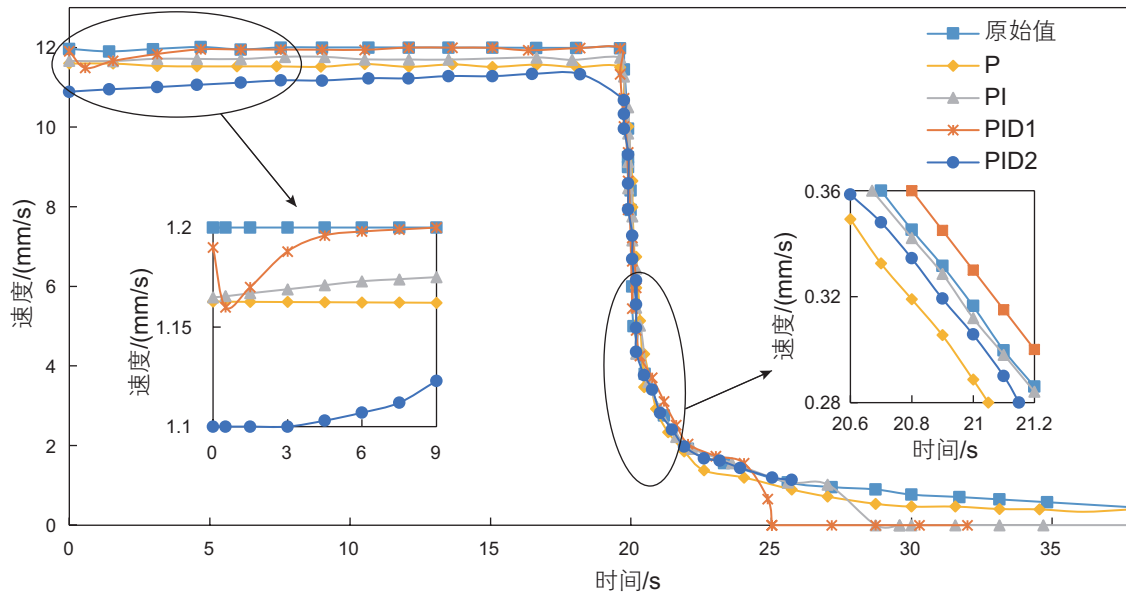


图 8 不同 PID 参数下的速度曲线

Fig. 8 Speed curve under different PID parameters

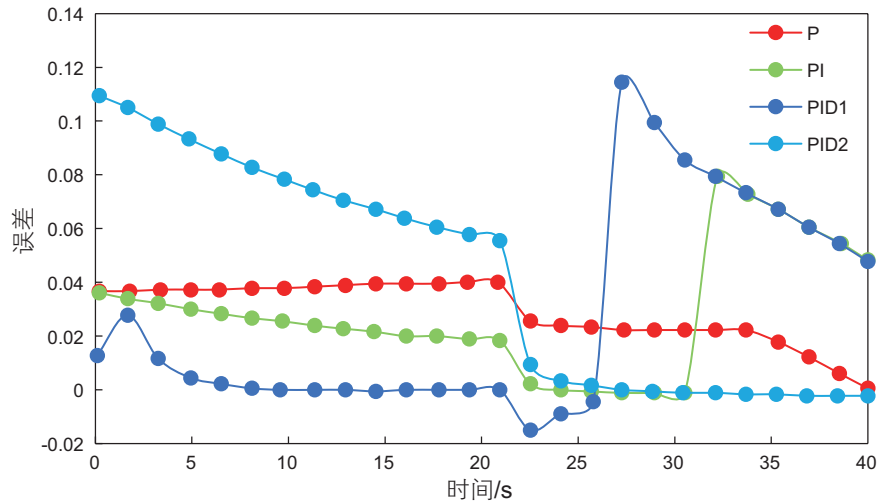


图 9 不同 PID 参数下的误差曲线

Fig. 9 Error curve under different PID parameters

的效果。因此，选用模糊PID控制的方法，对本文设计的液压回路进行控制，控制框图如图10所示。

使用MATLAB中的模糊逻辑控制器建立模糊控制规则，将线速度误差变化 e 和线速度误差变化率 ec 作为模糊PID的2个输入， K_p 、 K_i 、 K_d 这3个参数作为输出，选用三角形隶属度函数，如图11所示。根据经验，建立调整 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则如表2-4所示。

根据 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则表在线整定PID参数，计算公式如下：

$$K_p = K'_p + \Delta K_p \quad (8)$$

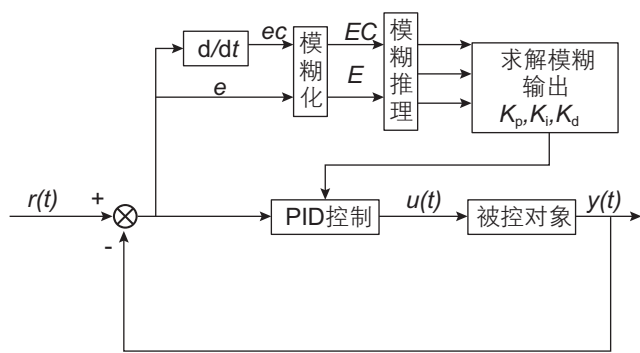


图10 控制框图
Fig. 10 Control block diagram

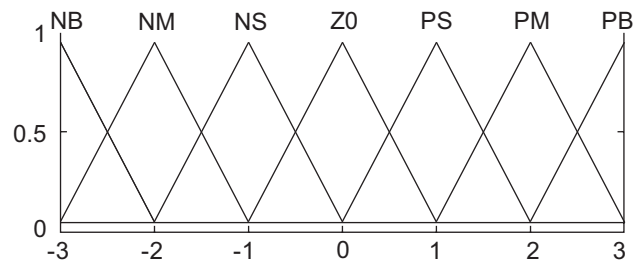


图11 隶属度函数曲线
Fig. 11 Membership function curve

表2 调整 ΔK_p 的模糊规则表

ΔK_p	ec							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO	
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	
e	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB	

$$K_i = K'_i + \Delta K_i \quad (9)$$

$$K_d = K'_d + \Delta K_d \quad (10)$$

式中， K'_p 、 K'_i 、 K'_d 为上一次整定好的PID参数。

如图12所示，比较模糊PID和传统PID控制速度曲线之间的差异。通过误差分析可知，传统PID控制的误差在1%~10%之间，模糊PID控制误差在3%以内，模糊PID控制效果较好。

4 能量回收效率分析

蓄能器储能不足时，应同时启动蓄能器和液压泵。当通过液压泵提供能量时，流经的总油量代表液压缸 V_0 所需的能量。当蓄能器和液压泵同时供给能量时，流经液压泵的油总量为 V ，此时，目标堵塞能量回收效率为：

$$\eta = 1 - \frac{V}{V_0} \quad (11)$$

当蓄能器压力为3.8 MPa时，设计的液压系统用于仿真3种工作条件，即单蓄能器，单泵和两者同时工作。曲线如图13和图14所示。

表3 调整 ΔK_i 的模糊规则表

ΔK_i	ec							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO	
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	
e	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	

表4 调整 ΔK_d 的模糊规则表

ΔK_d	ec							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS	
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO	
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	
e	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO	
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB	
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB	

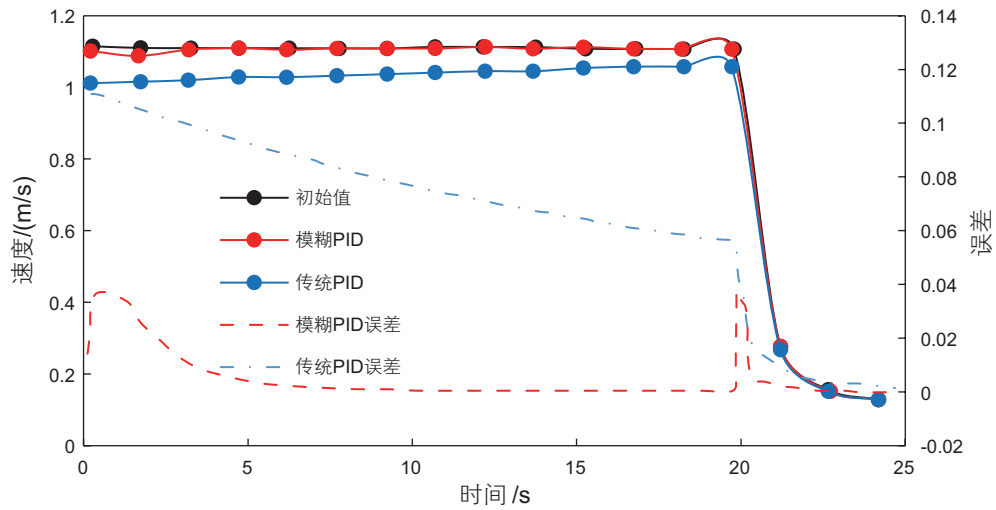


图 12 模糊 PID 和传统 PID 控制速度曲线对比图

Fig. 12 Fuzzy PID and traditional PID control speed curve comparison chart

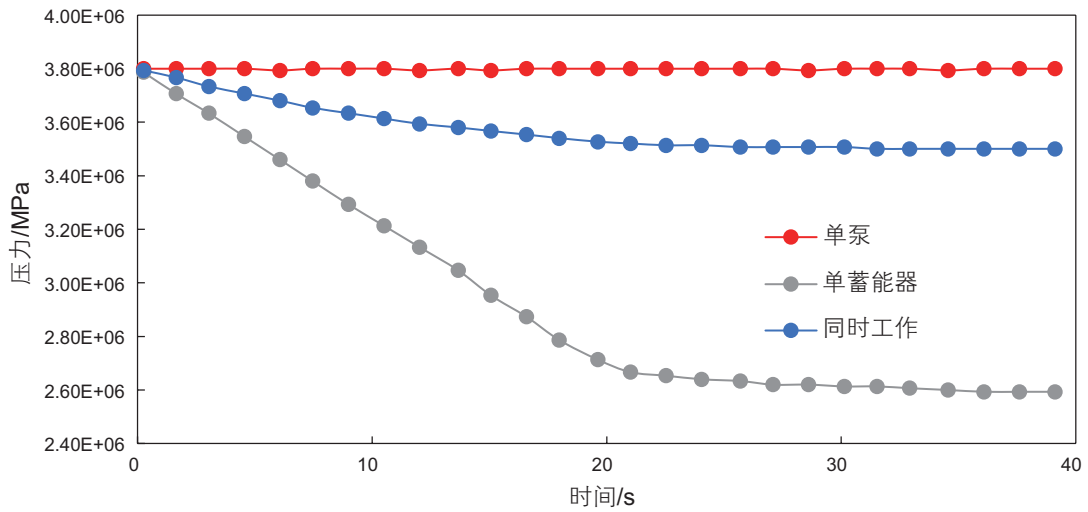


图 13 不同条件下蓄能器的压力

Fig. 13 Accumulator pressure under different conditions

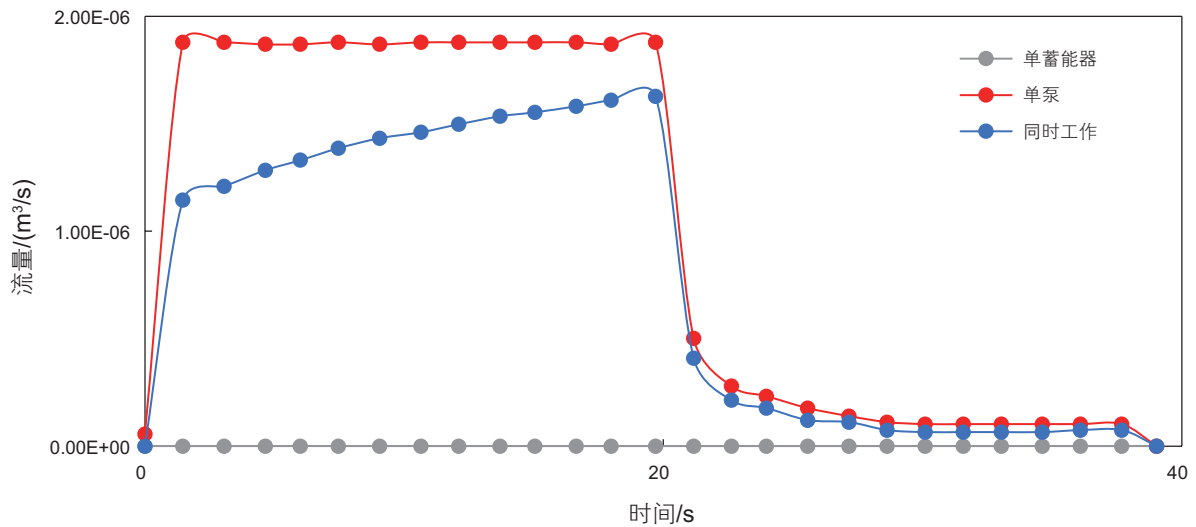


图 14 不同条件下的流量

Fig. 14 Flow under different conditions

如图12所示,当单独使用蓄能器时,泵的出口流量基本为零。能量被蓄能器完全消耗,压力从3.8 MPa降低到约2.6 MPa。

类似地,当泵单独工作时,蓄能器的压力基本恒定在3.8 MPa,而管道流量控制液压缸的速度。通过积分和数值计算,流过泵出口的总液体体积为40.75 cm³。

当泵和蓄能器同时工作时,蓄能器提供的压力从3.8 MPa降至3.45 MPa。泵将提供其他能量。流量曲线如图13所示。通过计算,泵出口的流量总量,液体体积为30.74 cm³。也就是说,在不考虑蓄能器能量从3.8 MPa降至3.45 MPa的情况下的能量损失,电动机输送能量相当于运送10.01 cm³液体所携带的能量。同时,蓄能器能量从3.45 MPa降低到2.6 MPa可以由泵输送30.74 cm³液体所携带的相同的能量。

分析图表可知,单泵与单蓄能器流量曲线包围的区域为 V_0 ,单泵与同时工作流量曲线包围的区域为 V 。这可以通过数值计算得到:

$$\eta = \frac{\int (C_o - C_g) dt}{\int (C_o - C_s) dt} = \frac{4.075 \times 10^{-5} - 3.074 \times 10^{-5}}{4.075 \times 10^{-5} - 5.879 \times 10^{-12}} \times 100\% = 24.57\% \quad (12)$$

通过分析蓄能器压力为3.8 MPa时的3种工况曲线,计算得出能量回收效率为24.57%。

更改蓄能器的条件,然后进行仿真。可以得到系统在各种工况下的能量回收情况,如图15所示。

可以看出的是,当所述能量存储压力为3 MPa,其能量回收效率是比较低的,只有约0.3%。当存储压力达到6 MPa时,能量回收效率可达到90%或更高。在3 MPa至6 MPa的范围内,随着压力的增加,能量回收效率迅速提高。蓄能器的体积有限,所以压力衰减更快。同时,液压泵的输出压力约为3 MPa。

但是考虑到在实际情况下负载的非线性变化以及蓄能器的尺寸要求,系统的能量回收效率会比计算的理论值有所降低。

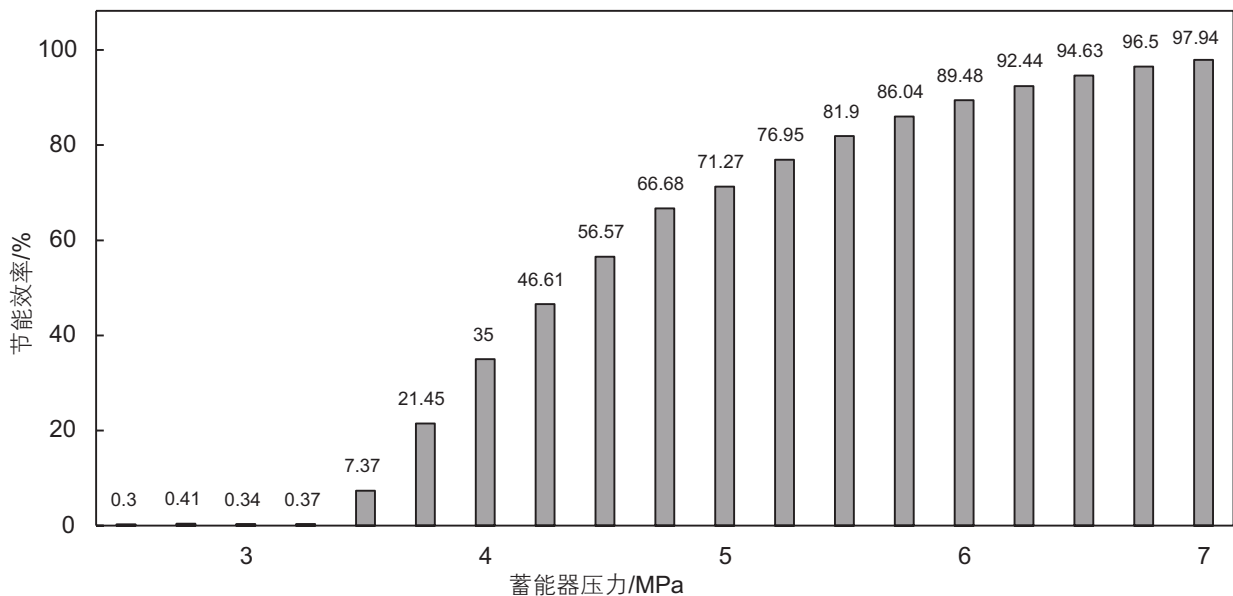


图15 能量回收效率

Fig. 15 Energy recovery efficiency

5 结论

针对管内智能封堵器封堵过程消耗能源的情况,分析了管内智能封堵器模型的结构,并根据管内智能封堵器的工作原理以及工作环境,设计了模糊PID控制电液能量回收系统。之后根据试验台的实际工作环境对电液能量回收系统的参数进行了相关的计算,得

到了电液能量回收控制系统的数学模型,提出了模糊PID控制方法,并对该系统进行仿真。

仿真结果表明:在管内智能封堵器电液能量回收控制系统中,传统PID控制方法不能兼顾小误差和安全控制两个方面,提出的模糊PID控制方法可以使系统在安全工作状态下工作,误差小于3%。能量效率分析表明,当蓄能压力为3.8 MPa时,能量回收效率为24.57%。

参考文献

- [1] 马明, 赵弘, 苏鑫, 等. 油气管道封堵抢修技术发展现状与展望[J]. 石油机械, 2014, 42(06): 109–112+118. [MA M, ZHAO H, SU X, et al. The current development status and prospect of oil and gas pipeline plugging and emergency repair technology [J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(6): 109–112+118.]
- [2] ZHAO P Y, CHEN Y L, ZHOU H. Simulation analysis of potential energy recovery system of hydraulic hybrid excavator[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(11): 1575–1589.
- [3] LI S, WEI J, FANG J, et al. Design and control of hydraulic hybrid system for excavators[C]// ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control. Chicago, 2015: V001T01A034.
- [4] 赵从健, 雷菊阳, 李明明. 基于史密斯模糊控制的汽车制动系统[J]. 计算机时代, 2019, (09): 16–19. [ZHAO C J, LEI J Y, LI M M. Research on automobile braking system based on smith fuzzy control[J]. Computer Era, 2019, (09): 16–19.]
- [5] 尘帅, 王吉忠. 基于模糊PID控制的EMB制动力控制策略[J]. 内燃机与配件, 2019, (15): 14–15. [CHEN S, WANG J Z. EMB control strategy based on fuzzy PID control[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019, (15): 14–15.]
- [6] CHEN Z Q, YU C Y, WU W, et al. Architecture of a hydraulic hybrid vehicle with pressure cross-feedback control[J]. Mechanism and Machine Science, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2017, 408: 1503–1515.
- [7] 郭秦阳, 施光林, 何常玉, 等. 蓄能器变压力供油电液位置控制系统的复合补偿控制[J]. 液压与气动, 2016, (09): 1–9. [GUO Q Y, SHI G L, HE C Y, et al. Compound compensation control for the electro-hydraulic position control system supplied with oil by variable-pressure accumulators[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2016, (9): 1–9.]
- [8] 谢达. 路面减速带液压力式振动能量回收系统设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017. [XIE D. Design and research of hydraulic vibration energy recovery system of speed bump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University. 2017.]
- [9] 胡浩然. 管内智能封堵器动态过程模拟及优化控制研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017. [HU H R. Study on simulation and control optimization in the plugging process for smartplug [D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2017.]
- [10] 王冰冰, 施光林, 郁立成. 基于压力补偿控制的蓄能器供油阀控液电机电机系统的研究[J]. 机电一体化, 2016, 22(4): 8–15. [WANG B B, SHI G L, YU L C. Research on the electro-hydraulic proportional valve control hydraulic motor system supplied by accumulator based on pressure compensation control [J]. Mechatronics, 2016, 22(4): 8–15.]
- [11] 曾强, 马贵阳, 江东方, 等. 液体管道水击计算方法综述[J]. 当代化工, 2013, 42(08): 1189–1193+1197. [ZENG Q, MA G Y, JIANG D F, et al. A review of calculation methods for pipeline water hammer [J]. Contemporary Chemical Industry, 2013, 42(08): 1189–1193+1197.]
- [12] 张阳. 长输管道水击分析及其控制研究[J]. 管道技术与设备, 2017, (01): 13–14+19. [ZHANG Y. Long-distance pipeline water hammer analysis and control research [J]. Pipeline Technique & Equipment, 2017, (01): 13–14+19.]
- [13] 薛永飞, 车福亮, 王迎辉, 等. 有压管路中阀门关闭特性的数值研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2009, 21(03): 6–9. [XUE Y F, CHE F L, WANG Y H, et al. The numerical research on control characteristics of closing valve in pressure pipeline[J]. Journal of Henan Institute of Engineering, 2009, 21(03): 6–9.]
- [14] 王欣, 宋晓光, 薛林. 基于Matlab/Simulink的键合图在液压系统动态仿真中的应用[J]. 机床与液压, 2007, (06): 123–124+127. [WANG X, SONG X G, XUE L. The application of power bond graph based on matlab /simulink in hydraulic dynamic simulation system [J]. Machinetool and Hydraulics, 2007, (6): 123–124, 127.]
- [15] 刘昕晖, 陈晋市. AMESim仿真技术在液压系统设计分析中的应用[J]. 液压与气动, 2015, (11): 1–6. [LIU X H, CHEN J S. Application of AMESim in the design and analysis of hydraulic system [J]. Hydraulic and pneumatic, 2015, (11): 1–6.]
- [16] WANG Y Z, JIN Q B, ZHANG R D. Improved fuzzy PID controller design using predictive functional control structure[J]. ISA Transactions, 2017, 71: 354–363.
- [17] CHAO C T, SUTARNA N, CHIOU J S, et al. Equivalence between fuzzy PID controllers and conventional PID controllers [J]. Applied Sciences, 2017, 7(6): 513.