

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.038

基于模糊免疫自适应 PID 算法的煤矿排水控制系统

高政霞¹, 拜颖乾²

(1. 西安汽车职业大学 交通运输工程学院, 陕西 西安 710600;

2. 陕西铁路工程职业技术学院 城轨工程学院, 陕西 渭南 714000)

摘 要:针对煤矿自动化排水系统受到外部环境及排水系统自身变化干扰而无法及时启动排水的问题,提出并设计一种基于模糊免疫自适应 PID 算法的排水控制方案。将外部环境和排水系统自身变化等影响因子纳入到控制模型中,对排水控制 PID 进行整定调节,以实现排水速度进行自适应控制;通过 Matlab/Simulink 搭建仿真实验模型。仿真验证表明:在快速排水阶段排水响应速度提升 50%,平稳阶段效率提升了 5%,对外部渗水适应性提升 15%,对排水系统自身参数突变适应性提升了 10%,这能够有效地提高煤矿排水系统在复杂环境下的工作稳定性,大幅降低排水系统因受到外部环境和自身排水系统参数突变而导致排水不足引发渗水坍塌的风险。

关键词:煤矿排水系统;PID;模糊控制;免疫算法;Matlab/Simulink;鲁棒性

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0204-08

Coal Mine Drainage Control System Based on Fuzzy Immune Adaptive PID Algorithm

GAO Zhengxia¹, BAI Yingqian²

(1.School of Transportation Engineering, Xi'an Vocational University of Automobile, Xi'an 710600, China;

2. School of Track Engineering, Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract:This paper proposes and designs a drainage control scheme based on fuzzy immune adaptive PID algorithm to address the failure of coal mine automation drainage system in starting drainage timely when affected by external environment and changes in the drainage system itself. Impact factors such as external environment and changes in the drainage system itself are incorporated into the control model of the scheme to adjust the drainage control PID, achieving adaptive control of the drainage speed. A simulation experimental model is built with Matlab/Simulink, verifying that the drainage response speed of the drainage control system is increased by 50%, the steady stage efficiency by 5%, the adaptability to external water seepage by 15%, and the adaptability to sudden changes in the drainage system's own parameters by 10%.

Keywords:coal mine drainage system; PID; fuzzy control; immune algorithm; Matlab/Simulink; robustness

0 引言

排水系统是保障煤矿安全稳定运行的关键基础设施,据统计在煤矿事故中有高达 20% 的事故是由于排水系统出问题而导致,故对排水系统的优化和改进一直以来都是煤矿自动化设施研究和关注的重点。

近年来随着自动化及电力电子技术的进步,大型煤矿中的排水系统也由传统的人工排水升级到自动化无人值守排水,借助于水位传感器和自动化排水控制装置,能够实现对煤矿的水位变化的监测,以自动地启动排水装置进行排水。但是,从实际的应用来看,这种只依赖监控水位信息来

决策和调整控制器进行排水的方式已很难应对环境突变和排水系统自身突变所带来的影响,使得在实际的开采过程中,排水系统经常出现排水不足引发渗水安全等问题。为了解决这一问题,相关的研究人员提出了一些优化策略,通过模糊策略控制,增加水位监测传感器采用分段监测等手段来提升排水系统工作的稳定性,但是实际效果没有显著提升。文献[1]提出了一种模糊控制策略,通过将排水系统的工作效率和排量等参数纳入到控制模型中对 PID 控制器进行调整,提升了排水系统自身的工作效率和排量变化的适应性,但是依然无法解决外部环境如渗水突然加大导致排水不足的问题。文献[2]提出了一种多传感器

基金项目:陕西省教育厅服务地方专项科研计划项目(22JC026)

第一作者简介:高政霞(1985—),女,甘肃白银人,工程师,硕士,研究方向为信号处理及智能交通控制等,zaw0609@126.com。

监测的排水系统设计,通过增加和调整水位传感器的分辨率和监测布局来提高排水系统的灵敏度,避免渗水突然增加导致无法及时启动排水的问题。这种方式不仅成本高,而且无法解决其自身变化影响排水性能下降而导致排水不足的问题。文献[3]采用S7-300对煤矿的排水系统进行了设计,通过PLC检测水位以及流量等,优化不同的阀组与水泵之间的组合,实现排水自动化,但PLC控制器结合先进的控制算法相对较复杂。文献[4]利用Fuzzy PID控制提高了排水系统的动态响应特性,但煤矿排水系统迟滞性强,易受外界干扰,该方法不能保证系统运行的稳定性。从已有文献来看,目前还没有一种合适的方法和模型,能够以低成本的方式解决在煤矿复杂的工作环境下,排水系统受到外部环境(渗水速度)和排水系统自身变化(管道直径、长短及突变截面等)等因素影响导致排水不足产生渗水安全风险的问题。

为解决煤矿排水系统对外部环境及自身因素变化而影响排水稳定性的问题,本文提出了一种模糊免疫自适应PID排水控制算法,将排水系统外部环境及自身参数变化干扰因素纳入到控制策略模型中进行考虑,实现了一种自适应的排水控制方案,其能够显著提高排水系统的稳定性和对外部环境及自身参数突变的适应能力,提高煤矿排水系统工作的稳定性。

1 模糊免疫算法

免疫是生物对外界入侵的一种自我保护反应,人体就是依靠完整的免疫系统抵御细菌、病毒等微生物的入侵^[5-6],其原理如图1所示。当有微生物入侵人体时,人体免疫系统立即进入工作模式,相关细胞会将入侵信息传递于周围T淋巴细胞,该细胞会生成辅助性 T_H 细胞和抑制性 T_S 细胞^[7-8]。B细胞亦会受到入侵微生物刺激,生成抗体以抵御微生物入侵。若微生物数量较多,辅助性 T_H 细胞相应就会增多,同时抑制性 T_S 细胞则相应减少;为更好地抵御入侵微生物,此时生成抗体的B细胞数量则会相对较多。相反,如若入侵微生物被抗体消灭而大量减少,此时抑制性 T_S 细胞就会迅速增多,以抑制抗体数量,防止免疫系统被破坏。待人体恢复后,免疫系统生成的各种细胞则会重新达到平衡状态。

本文所设计的排水控制系统主要是考虑外部环境(渗水)和排水系统自身(管道直径、长短及突变截面等)不可预测的参数突变对控制器带来

的影响,在设计中将通过模糊规则的自适应学习和免疫算法的优化搜索,可以不断提高PID算法的稳定性和抗外部环境干扰能力,更好地适应系统的非线性特性和动态变化,同时对外部环境的干扰也能有较好的抑制能力。这样可以提高排水控制系统的控制精度和稳定性,使系统在复杂的外部及自身参数变化的干扰下工作更加可靠和鲁棒。

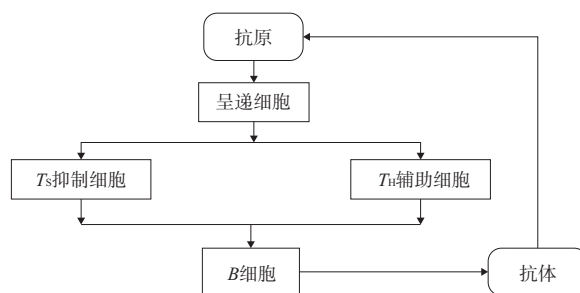


图1 生物体免疫系统原理图

2 排水系统控制策略设计

排水控制系统的本质是实现系统的负反馈功能,当检测到矿井中的水位变化时,传感单元实时将水位变化信息通过某种分析或者变换反馈于系统控制器。控制器则利用相关算法实现对水泵转速以及启闭的自动化控制。

实际的煤矿井下水位由于存在严重的非线性、时滞性以及外干扰因素,会导致渗水量和渗水速度难以预测,并且排水系统工作中优于矿井在动态掘进,排水系统的管道直径、长短及突变截面等也随时会被改变,导致影响排水系统的排水效率,因此很难建立一个准确的模型来调节排水泵工作速度。本文以渭南市某煤矿排水系统为例进行分析。

在分析渭南市某煤矿排水系统改造工程的具体工况时,本文考虑以下方面。

a) 进水流量变化。煤矿井下的进水流量在不同时间段可能会有较大的波动,例如在雨季或降雨较多的情况下,进水流量可能明显增加。因此,需要确保排水系统在高进水流量工况下仍能有效排水,并保持井下水位稳定。

b) 进水速度变化。除了进水流量的变化,进水速度也会随着工况的不同而变化。某些情况下,进水速度可能会较快,例如在突发水灾或倒灌情况下。此时,排水系统需要具备快速响应能力,迅速降低水位,以确保矿井的安全。

c) 矿井水位变化范围。煤矿的水位变化范围需在可控范围内,避免水位过高或过低而导致安全风险的增加。设计时需要考虑最大允许水位和

最小安全水位,并确保排水系统能够在这个范围内稳定控制水位。

基于上述工况分析,可以得出在实际设计策略中需要满足以下设计要求。

1) 系统稳定性。排水系统需要具备良好的稳定性,能够在不同的进水工况下保持井下水位稳定。系统设计应考虑各种因素对稳定性的影响,并通过合适的控制策略和参数配置实现系统的稳定运行。

2) 快速响应能力。排水系统需要具备快速响应的能力,能够在短时间内适应进水流量和进水速度的变化。控制策略和参数设置应能够实现快速降低水位或调整排水流量,以应对突发工况。

3) 控制精度。排水系统的控制精度需要达到一定的要求,确保水位能够稳定在规定范围内。控制策略和参数配置应能够实现精确控制,减少水位偏差和波动。

4) 可靠性和灵活性。排水系统设计应具备高可靠性和灵活性,能够应对突发事件和设备故障等异常情况。系统应具备备用设备和自动切换功能,以确保连续的排水工作。

基于上述工况和设计要求分析,本文进一步从策略模型构建方面进行分析和建模,具体分析过程如下。

在实际的煤矿排水工况中,通常需考虑地质条件、水文地质特征、煤矿开采方式等,但是,这些因素最终对工况的影响是体现在煤矿自身涌水量上。因此,在本文研究中,简化工况模型只考虑排水过程中的涌水量变化,并且基于年度涌水量变化来进行建模,设定年最大涌水量为 $W_{\max}$;最小涌水量为 $W_{\min}$,那么这一年任意时刻的涌水量 W 可以通过如下模型描述。

$$W = \frac{1}{2} (W_{\max} - W_{\min}) \cdot [1 + \sin(0.041 \ 1t - 90)] \quad (1)$$

式中 t 为时间, h。令

$$W_r = \frac{1}{2} (W_{\max} + W_{\min}), \text{将其代入式(1)可得}$$

$$W = (W_{\max} - W_r) + (W_{\max} - W_r) \cdot \sin(0.041 \ 1t - 90) \quad (2)$$

首先本文考虑横井情况,通过现场采集和记录,矿井水最大深度为 5.5 m,要求的水位变化范围是 1~4 m 之间,因此取水基准线为 3.5 m,由式(2)计算可得 $W_{\max}$ 和 W_r 分别为 498 m³/h 和 358 m³/h。代入上式,通过 Laplace 变换得到排水

系统传递函数为

$$G(s) = \frac{232.84s^2 + 2.576s + 0.608 \ 6}{s^3 + 0.001 \ 7s} \quad (3)$$

其次本文考虑倾斜角为 α 的斜井中的排水情况,并且根据实际情况设定斜井的倾斜角度可以在 5°~30° 之间取值,当地下水位高于斜井底部时,涌水模型:

$$Q = K \times (H - h_0) \times A_{\text{rea}} \quad (4)$$

当地下水位低于或等于斜井底部时,排水模型:

$$Q = K \times (h_0 - H) \times A_{\text{rea}} \quad (5)$$

式中: Q 为涌水或排水的流量; K 为斜井的抽排系数,抽排系数的取值范围可以在 0.1~1.0 之间,与斜井的几何形状和地层条件相关; H 为地下水位; h_0 为斜井底部高程,假设矿井的水位变化范围是 1~4 m 之间,可以选择斜井底部高程在 3.5~7.5 m 之间变动; A_{rea} 为斜井底部的横截面积,横截面积的取值范围可以在 0.1~10 m² 之间。因此,斜井中的排水传递函数可以表示为:

$$H(s) = [Q(s) / (K \times A_{\text{rea}})] + h_0 \quad \text{当 } H(s) > h_0 \quad (6)$$

$$H(s) = h_0 - [Q(s) / (K \times A_{\text{rea}})] \quad \text{当 } H(s) \leq h_0 \quad (7)$$

在实际应用中,可以根据具体的矿井斜井的参数和条件,通过测量和实测数据来确定斜井的抽排系数 K 和斜井底部高程 h_0 。

通过式(3)、式(6)和式(7)可以看出:无论在斜井模式还是横井模式,排水系统是一个典型的多阶传递函数,它可以等效成 1 阶惯性环节和 2 阶振荡环节,因此如果控制器参数不合理,很容易导致系统响应之后整个排水工作不稳定,而控制参数的干扰主要是外部环境和自身参数变化导致。因此,在整个系统设计的过程中需要重点考虑在保障系统稳定性的前提下,提高系统动态响应特性及控制精度,则可在短时间内实现排水控制,提高排水效率和响应灵敏度,使矿井水位位于合理区间,从而确保煤矿安全生产。

3 模糊免疫自整定 PID 控制器设计

考虑到外部环境(渗水)和排水系统自身(管道直径、长短及突变截面等)参数突变是影响控制系统稳定性的重要因素,在本文中提出了一种模糊免疫自整定 PID 控制算法。该算法将模糊控制

策略和免疫算法结合起来,旨在兼顾PID参数易调节的特点,并利用模糊免疫算法来适应和抵御外部干扰变化带来的影响。通过利用系统误差及其变化率,在模糊免疫控制器中优化参数配置,从而在外部干扰存在的情况下能很好地调节系统的稳定性和动态响应特性。并且本文构建的模糊免疫自整定PID控制算法,将模糊控制策略和免疫算法进行了结合,兼顾了PID参数容易调节特点,同时利用Fuzzy免疫算法来适应抵抗外部干扰变化带来的影响,在该算法中利用系统误差及其变化率,通过模糊免疫控制器去优化参数配置,进而在外部干扰的情况下能很好地调节系统的稳定性以及动态响应特性等性能。

基于上述分析,本文构建的模糊免疫控制的基本框架如图2所示。

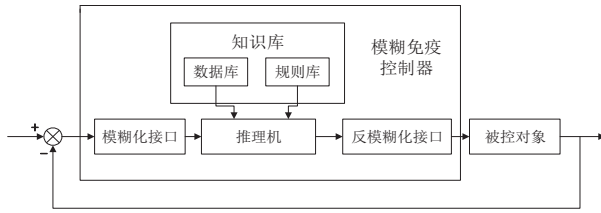


图2 模糊免疫控制基本框架图

在该模型中采用“2输入3输出”的形式设计模糊免疫自整定PID控制器,考虑到外部环境渗水量的变化主要体现在水位偏差上,而渗水速度、自身的管道直径、长短及突变截面等因素也主要是影响其排水速度,最终也是体现在水位偏差变化率上。因此,在实际设计中只需要将水位偏差和水位偏差变化率作为系统参数输入即可,即在模型中以水位偏差 e ,水位偏差变化率 e_c 为输入,以 k_p 、 k_i 、 k_d 为输出构建PID控制模型。最终实现的离散PID控制算法表达式如下^[9-15]。

$$u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (8)$$

式中: $u(k)$ 为系统输出; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数; $e(k)$ 为水位偏差; T 为采样时间; k 为采样序号。

同时本文考虑排水泵的影响,在建模中选定的排水泵参数如下:

额定流量为 $Q_{\text{rated}} = 1\,000 \text{ m}^3/\text{h}$;额定扬程为 $H_{\text{rated}} = 50 \text{ m}$;泵效率为 $\eta = 85\%$;最大流量为 $Q_{\text{max}} = 1\,200 \text{ m}^3/\text{h}$;最大扬程为 $H_{\text{max}} = 60 \text{ m}$;最小流量为 $Q_{\text{min}} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

控制模型优化思路为在PID控制中,需要确定比例系数 k_p 、积分系数 k_i 和微分系数 k_d 的取值。还需要通过试探法、经验法或自动调节算法进行参数调节,以获得合适的控制性能。本文进一步在上述PID模型中引入模糊免疫算法,通过不断优化 k_p 、 k_i 、 k_d 3个参数,使系统输出不断更新,直至达到最优状态,完成模糊免疫PID自整定功能,构建的模糊免疫自整定PID控制器结构原理如图3所示。

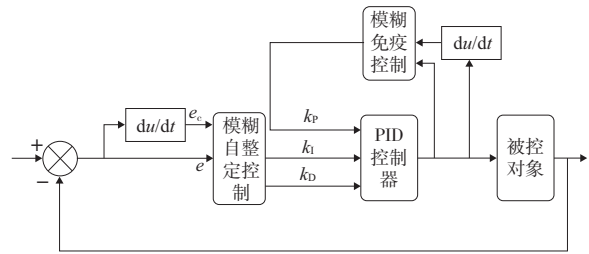


图3 模糊免疫自整定PID控制器结构原理图

依据上述控制器结构方案,设计加载系统输出值为矿井水位,故将实际输出水位与期望水位的差作为控制器的输入变量之一,即误差 e ,另一个输入变量为误差变化率 e_c 。因此,控制器的输入变量分别为 e 、 e_c ,输出变量为 k_p 、 k_i 、 k_d ,依据矿井水位变化范围确定输入变量的论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,确定相应的语言值为 $\{\text{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}\}$,其隶属度函数均为三角函数,如图4所示。

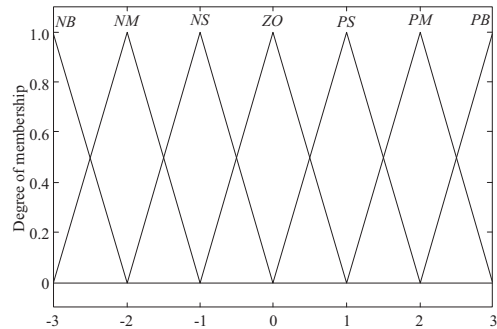


图4 隶属度函数曲线

该模糊控制器包含7个子集,每个子集包含7个语言值,模糊规则由专家的经验及控制对象的特征综合而定^[16-20]。经过前期大量的走访调研及文献阅读,确定模糊控制规则如下。

1) k_p 的控制规则

在本系统中, k_p 能够调控系统的响应速度,因此在系统运行初始阶段要增大 k_p ,同时兼顾系统其他的动态性能,将 k_p 的值逐渐下调,其目的

就是要让系统变得最优。其控制规则如表1所示。

表1 k_p 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	ZO	NS	NB	NM	PM	ZO
NM	NM	NS	ZO	NM	PS	ZO	PB
NS	NS	NS	NS	PM	ZO	NM	NM
ZO	NM	NM	PB	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	PM	ZO	PS	PS	NB	NB
PM	PM	ZO	PS	NS	NS	NS	PB
PB	ZO	PS	PM	PM	PM	NS	NS

2) k_i 的控制规则

通过调节 k_i 可以减小系统误差,不断优化调整 k_i 值,使系统误差位于合理范围,同时可保障系统的快速响应特性及安全稳定性。其控制规则如表2所示。

表2 k_i 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	PM	NS	NS	PS	PB	ZO
NM	PS	PS	PB	NM	NM	ZO	NB
NS	PM	PB	PB	PB	ZO	NM	NM
ZO	NB	NB	PS	ZO	NS	NS	NS
PS	PM	PB	ZO	NS	NS	NM	NS
PM	NB	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
PB	ZO	NM	NB	PS	PS	PM	PM

3) k_d 的控制规则。

微分调节主要是在系统产生较大误差变化之前起到抑制作用, k_d 值的调试过程与 k_p 值类似,其控制规则如表3所示。

表3 k_d 的模糊控制规则

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	PM	PS	PS	PS	PB	PB
NM	NS	PB	PS	PM	PM	PB	ZO
NS	NM	PB	PS	PS	PS	PS	ZO
ZO	PM	PB	PB	PB	PB	PB	ZO
PS	NM	NM	NM	NM	NM	NM	ZO
PM	NS	PB	NB	NB	NB	NB	NB
PB	NS	NM	NM	ZO	NB	NB	NS

利用质心法对系统进行反模糊,其公式为

$$z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i) \times z_i}{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i)} \quad (9)$$

式中: z_0 为解模糊后的输出值; z_i 为论域内的值; $\mu_c(z_i)$ 为 z_i 的隶属度值; n 为采样序号。

4 仿真分析

渭南市某煤矿的排水系统改造前面临着多个挑战,包括水位控制不稳定、排水效率低下等问题。为提升排水系统的性能和可靠性,进行了系统的改造设计,根据实地勘测和数据分析,得知该煤矿在不同工况下会产生不同的排水需求。工况条件包括不同的矿井水位、进水流量和排水流量等因素,这些因素对排水系统的稳定性和效率有显著影响。

在设计过程中,制定了以下的设计要求:首先,确保排水系统在不同工况下都能保持稳定的水位控制,以防止矿井内水位过高或过低的情况发生;其次,提高排水系统的效率,增加排水流量,缩短矿井排水时间,以达到安全和高效的排水效果;最后,设计一个智能控制系统,能够根据工况条件和需求自动调整参数,实现自动化运行。

为了验证改造设计的可行性和效果,本文在仿真过程中基于前文设计的优化方法开发了一个仿真系统,基于 Matlab/Simulink 平台开发,模拟了煤矿排水系统的实际运行情况。通过该仿真系统可以观察到在不同工况条件下,系统能够自动调整参数并实现稳定的水位控制和高效的排水。

基于上述工程背景,本文仿真中针对渭南市某煤矿排水系统,利用 Matlab/Simulink 搭建其模糊免疫自整定 PID 控制原理图,如图5所示。

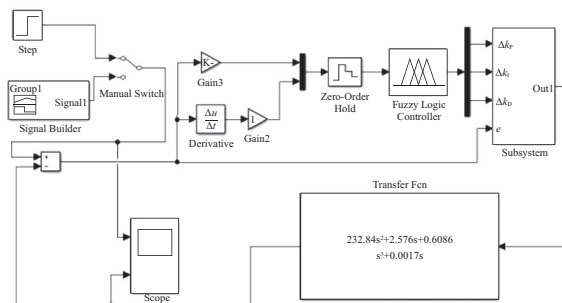


图5 煤矿排水系统模糊免疫自整定PID控制原理图

图5中的Subsystem内部结构如图6所示。

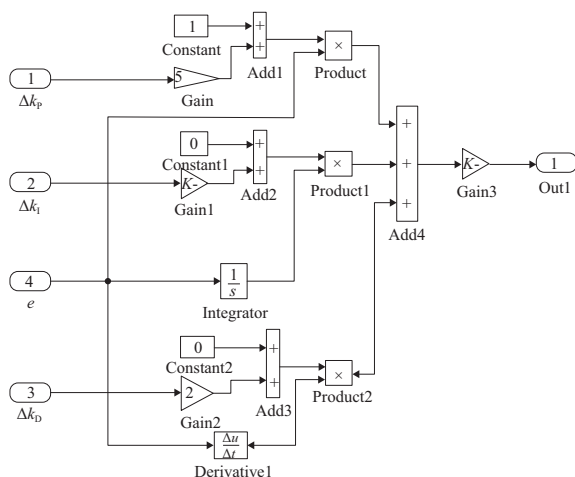


图6 Subsystem 内部结构图

按照上述结构设计,在 Matlab/Simulink 中完成相关参数的配置和仿真,其配置如图 7 所示。

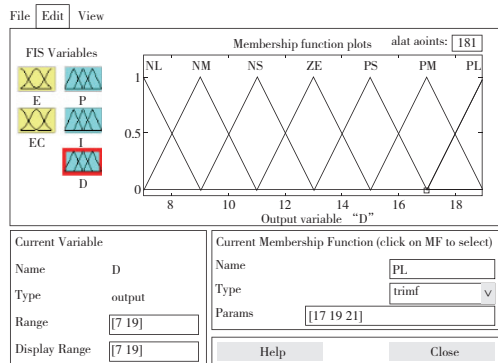


图7 Matlab 中的参数配置效果

为了进行排水系统的设计和评估本文仿真中将模拟不同的工况条件进行仿真。以下是一些示例仿真工况。

1) 正常工况。在正常运行状态下,矿井的进水量和排水流量都处于正常范围内,水位保持稳定并在合理的范围内波动。该工况用于评估排水系统的基本性能和稳定性。

2) 高进水流量工况。在某些情况下,矿井可能会面临较高的进水流量,例如暴雨天气或附近水源的持续涌入。该工况下,排水系统需要应对高进水流量的挑战,确保水位仍然能够稳定控制在安全范围内。

3) 低进水流量工况。相反地,在一些特定情况下,矿井的进水量可能会较低,例如矿井附近水源的减少或停供。在这种情况下,排水系统需要适应低进水流量,保持水位稳定并避免过度排水。

4) 突发事件工况。排水系统也需要能够应对突发事件,如管道堵塞、设备故障或电力中断等。在这种情况下,排水系统需要快速调整工作状态,并采取相应措施来保持矿井的水位在安全范围内。

通过模拟这些不同的工况条件,可以评估排水系统的性能、稳定性和可靠性。本文将从排水响应速度、排水效率、对外部渗水适应性、对排水系统自身参数突变适应性 4 个方面开展仿真,其结果与已有的基于传统 PID 和模糊 PID 的排水控制算法进行对比分析,进一步验证本文设计的模糊免疫自适应 PID 排水控制方案的优势,具体如下:

1) 不同控制算法下排水响应速度对比分析

本文通过设置初始水位为 80 cm 的状态,同时设置安全水位为 15 cm,渗水量为 $10 \text{ cm}^3/\text{s}$,启动仿真模型对 3 种算法进行仿真对比分析,其结果如图 8 所示。

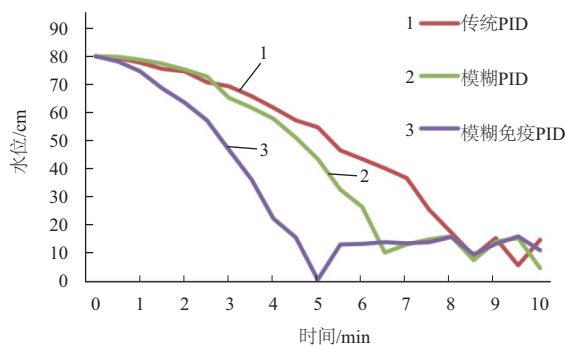


图8 3种不同算法的排水响应时间仿真结果

从上述仿真结果来看,3 种算法均能够在 10 min 内完成排水操作,控制水位到安全水位内达到平衡。从排水响应速度来看,本文使用的模糊免疫 PID 算法响应速度最快,在第 5 min 的时候就达到了安全水位,并且稳定在安全水位,其次是模糊 PID 算法在 6.5 min 的时刻达到了安全水位,最后是 PID 算法在 9 min 左右达到了安全水位。

2) 排水效率对比分析

通过对比分析 3 种算法在相同的参数设定下不同时刻的排水量进行对比,其结果如图 9 所示。

从排水量随着时间变化来看,3 种算法在前期都使用了最大的排水功率进行排水,排水量相同,但是后期达到稳定状态后,3 种算法开始表现出差异特征,从排水稳定后短时间的排水效率来

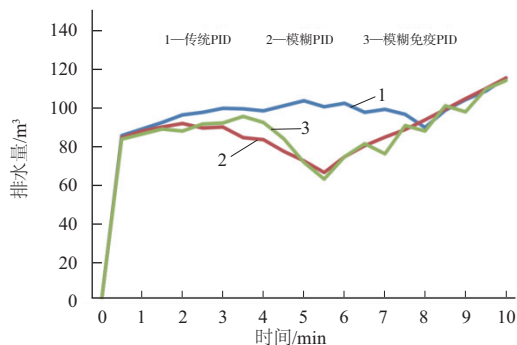


图9 3种不同算法实现的排水控制系统的排水量

看,基于模糊免疫PID算法的综合排水效率最高,其在前期的排水效率要远远高于传统PID和模糊PID算法,并且后期控制稳定的安全水位的情况下,模糊免疫PID的排水效率也高,其统计结果如表4所示。

表4 3种算法的不同时间段的排水效率对比

项目	单位: m^3/min		
	传统PID	模糊PID	模糊免疫PID
快速排水到安全水位阶段	11.20	12.60	17.34
安全水位维持阶段	6.34	6.23	7.32

在排水效率对比分析中,传统PID控制对于非线性系统和外部干扰的适应能力较弱,导致排水效率低下或波动较大。模糊PID控制能够通过模糊规则的引入,提高控制精度和稳定性,从而提高排水效率。相比传统方法提升10%。而本文构建的模糊免疫自适应PID控制则进一步通过免疫算法的优化搜索,对模糊规则进行自适应学习和优化,从而进一步增强控制器的稳定性和抗干扰能力,提高排水效率,在快速排水阶段相对传统算法性能提升了50%,相对于模糊PID算法性能提升了45%,在稳定排水阶段,相对传统算法性能提升了5%,相对于模糊PID算法性能提升了4.2%,整体效率上本文构建的算法达到了最优。

3) 外部渗水干扰适应性对比分析

为了评估算法对外部渗水干扰的适应能力,本文在仿真中加入了渗水干扰调节因子达到最大值30的时候,观察3种算法排水效率及是否能够调节水位到安全水位区域,其结果如图10所示。

从上述排水效果来看,在最大外部渗水的情况下,模糊PID和模糊免疫PID均能够维持水位达到安全水位,但是传统的PID算法在10 min内已经无法维持水位到安全水位,并且从响应速度

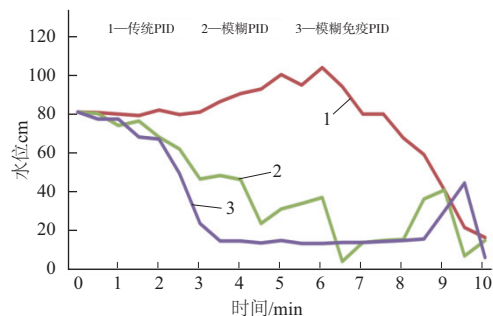


图10 3种不同算法在最大外部渗水情况下的排水效果

来看,模糊免疫PID明显优于模糊PID,其能够在5 min左右达到安全水位,模糊PID的响应速度明显受到了外部渗水的影响,响应速度下降到了9 min左右。

4) 自身参数突变适应性对比分析

在模型中加入干扰因子对实际排水速度进行调节和干扰,通过观察3种算法调节水位到安全水位的时间,以评估3种算法的适应能力,其结果如图11所示。

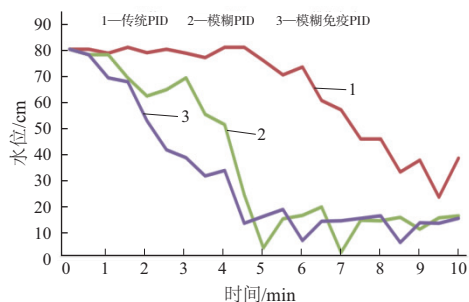


图11 自身排水参数因子突变情况下的排水效果对比

进一步统计3种算法能够调节到安全水位的最大干扰幅度,从图11可以看出,3种算法在一定的干扰情况下均能够自动地调节水位到安全水位并维持稳定状态,但是在干扰幅度超过一定的大小后,3种算法均出现了失稳状态,无法维持安全水位。同时从结果来看,本文构建的模糊免疫自适应PID算法能够在短时间内回复到平稳状态,维持安全水位,其次是模糊PID算法,传统PID算法已经失去维持安全水位能力,本文的适应能力相对于模糊PID算法的维持效率提升了10%。

综合上述仿真结果分析,本文构建的模糊免疫自适应PID排水控制算法其综合性能最佳,在排水效率、响应速度、抗外部环境干扰和抗内部参数突变干扰上有了显著提升,对提高矿井排水系

统工作稳定性具有非常重要的价值和意义。

5 结语

针对煤矿安全生产过程中的排水系统问题,以渭南市某矿井排水系统为依托,建立排水系统数学模型,采用一种模糊免疫自整定PID算法,利用该算法设计出相应控制策略,最后在Matlab/Simulink中搭建仿真实验模型。仿真结果表明:模糊免疫自整定PID控制策略相较于传统模糊PID控制策略及仅采用PID的控制策略有更好的鲁棒性,可以显著地提高系统动态性能。

参考文献:

- [1] 张瑞霖. 煤矿排水系统井下电力载波联网控制设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(3): 17-20.
- [2] 陈玉祥. 煤矿井下排水监控系统的设计与实现[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [3] 刘京涛, 高金龙, 祝国防. 某矿三水平排水系统改造方案研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(1): 120-122.
- [4] 吕兆海, 赵长红, 潘长斌, 等. 金家渠煤矿排水体系构建及净化处理工艺应用[J]. 华北科技学院学报, 2019, 16(1): 16-21.
- [5] 张毅. 煤矿排水系统水锤现象与解决方案探讨[J]. 煤矿机电, 2018(4): 61-63.
- [6] 刘金鑫, 陈远龙, 李回归. 基于模糊PID的翻转闸门液压系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(1): 26-28, 31.
- [7] 刘真祥, 谢旭阳. 矿井排水的动态分析模型[J]. 贵州工业大学学报, 1997, 26(5): 50-55.
- [8] 戚英杰, 李雪林, 孙玉坤. 基于模糊算法的回流焊温度系统仿真设计[J]. 控制工程, 2022, 29(9): 1613-1618.
- [9] 岳跃腾, 赵世海. 基于模糊免疫PID定型机拉伸张力控制技术[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13454-13460.
- [10] 赵涛岩, 曹江涛, 李平, 等. 区间二型模糊免疫PID在环己烷无催化氧化温度控制系统中的应用[J]. 化工学报, 2022, 73(7): 3166-3173.
- [11] MAO Y, DENG Q, CHEN Z. Parallel association rules incremental mining algorithm based on information entropy and genetic algorithm [J]. Journal on Communications, 2021, 42(5): 122-136.
- [12] HERAGUEMI K, KADRI H, ZABI A. Whale optimization algorithm for solving association rule mining issue [J]. International Journal of Computing and Digital Systems, 2021, 10(1): 333-342.
- [13] 史晓娟, 顾华北. 基于DSP的矿井水位监测与自动排水控制系统[J]. 制造业自动化, 2023, 45(7): 117-120, 138.
- [14] 杨伟. 煤矿多级排水系统的优化协调控制[J]. 矿山机械, 2023, 51(6): 50-53.
- [15] 巴显一, 李标, 贺伟. 煤矿排水系统防结冰控制方法[J]. 工况自动化, 2024, 50(增刊1): 183-186.
- [16] 王永, 吴向军, 李耀, 等. 浅谈某煤矿井下无人值守排水系统的升级改造[J]. 电气传动自动化, 2024, 46(1): 27-31.
- [17] 朱育兵, 张亦龙. 基于智能化控制的煤矿井下自动排水系统[J]. 电气传动自动化, 2023, 45(3): 26-28, 37.
- [18] 张建锋. 基于PLC的煤矿主排水智能监控系统的设计及应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(1): 227-230.
- [19] 刘东平. 煤矿井下辅助自动排水系统的研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(18): 66-68.
- [20] 史志红. 煤矿智能化排水系统的应用研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 153-159.

收稿日期: 2024-02-20