

基于模糊PID的综采面降尘喷雾恒压供水系统

张强, 李宏峰, 王海舰, 祁秀

辽宁工程技术大学机械工程学院, 阜新 123000

摘要 针对综采工作面降尘喷雾的恒压供水系统问题, 提出了一种模糊PID控制策略, 利用Simulink软件针对不同工况, 对降尘喷雾恒压供水系统进行仿真分析。结果表明, 模糊PID控制比传统PID控制达到稳定值的时间快5 s, 遇到干扰恢复平稳运行比传统PID控制快36%, 且无较大的超调现象, 提高了系统的静动态性能, 模糊PID控制能够满足综采工作面降尘喷雾恒压供水系统的要求, 方法可行。

关键词 恒压供水; 模糊PID控制; 仿真分析; 平稳性

中图分类号 TD434

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.02.012

Constant pressure water-supplying system based on fuzzy PID for dust-reducing spray at fully mechanized coalface

ZHANG Qiang, LI Hongfeng, WANG Haijian, QI Xiu

School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract This paper proposes a strategy of fuzzy PID control for constant pressure water-supplying system to reduce the dust by spray at fully mechanized coalface. Simulation analysis of the system was carried out under different working conditions using SIMULINK software. The simulation results show that the time for the system to reach a stable value using fuzzy PID control was 5 s shorter than that using fuzzy PID control, and the speed for the system to restore stability after disturbance was 36% higher than that using PID control, and the former had no major overshoot phenomenon. The proposed strategy improved the static and dynamic performance of the system, thus met the requirement of constant pressure water-supplying system for dust-reducing spray at fully mechanized coalface, demonstrating its feasibility.

Keywords constant pressure water-supplying; fuzzy PID control; simulation analysis; stationarity

矿井下的粉尘不仅会给人的身体健康造成一定的伤害, 还会给矿井安全带来严重的隐患, 矿井下粉尘的含量与喷雾降尘系统的降尘效果有着密切的关系。综采面多采用高压喷雾降尘方式, 而当采用高压喷雾降尘方式时, 降尘效率主要取决于供水压力。因为水雾粒径越小降尘效率越高, 但不同粒径的粉尘颗粒对应一个不同的水雾粒度, 而水雾粒度程度主要取决于供水压力, 所以选定降尘效率最高的供水压力

并且保持恒压进行喷雾, 降尘效果能够更加理想。而矿井下对于控制系统的抗干扰性和稳定性要求更高, 所以研究综采工作面喷雾降尘系统的恒压供水控制系统具有重要的意义。

水压对喷嘴喷雾影响和恒压供水都受到较大关注。刘佩^[1]以神东矿区为例, 论述了粉尘的危害, 以及采用喷雾降尘的方式治理粉尘及达到的效果。吴琼^[2]以实验为基础, 研究了水压力对喷嘴喷雾效果的影响。程卫民等^[3]以实验和实际

收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-10-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA06A412); 国家科技支撑计划项目(2013BAH12F01); 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金项目(GZ1107); 辽宁省教育厅科研项目(L2011050)

作者简介: 张强, 教授, 研究方向为矿山机械动态设计及监测技术, 电子信箱: lgdjx042@126.com

引用格式: 张强, 李宏峰, 王海舰, 等. 基于模糊PID的综采面降尘喷雾恒压供水系统[J]. 科技导报, 2015, 33(2): 80-85.

应用为基础,研究了喷雾压力与雾化颗粒之间的关系,进一步证明了水压对喷雾效果的影响。丁成松^[4]分析了恒压供水系统的组成部分,对恒压供水系统进行了仿真。王鑫等^[5]分析了中央空调的恒压供水问题,对于中央空调的恒压供水系统进行了仿真分析。

本研究利用模糊PID^[6]控制理论对恒压供水控制系统进行仿真,研究不同工况下恒压控制系统的响应曲线,研究模糊PID系统的抗干扰能力和系统运行的平稳性。通过对比分析得出模糊PID控制系统的运行效果,以证明模糊PID控制更适合在恶劣环境的综采工作面下应用,能够保证水压恒定,使降尘效果更加理想。

1 恒压供水系统的工作原理和数学模型

1.1 恒压供水系统的工作原理

综采工作面降尘喷雾恒压供水系统由控制器,变频器,水泵,水管网,压力传感器组成。水泵供水的压力值不同,喷雾的效果也不相同。由吴琼^[3]研究的内容可知,水压8 MPa达到的喷雾效果较好。喷雾降尘系统在喷雾时实现联动,3个电磁阀同时开启,需要总水管为3条分水管同时供水,3个分水管保持相同的压力值,水管处供水的压力值为8 MPa。

恒压供水系统是通过调节变频器改变水泵的供水量,达到水压恒定的目的^[7]。压力传感器检测系统输出Y压力信号,由信号分析和滤波计算出Y的实际值,再通过信号比较器1确定Y与期望值的差值ΔY,经信号比较器2判断是否超过许用误差值[ΔY],输出e触发信号值。

$$e = \begin{cases} 1 & \Delta Y > [\Delta Y] \\ 0 & \Delta Y = [\Delta Y] \\ -1 & \Delta Y < [\Delta Y] \end{cases} \quad (1)$$

式中,e为控制变频器的信号发生器,如果e=1,改变变频器的频率,使水泵降低转速,减少流量;如果e=0,变频器保持原频率;如果e=-1,改变变频器的频率,使水泵增加转速,增大流量。

恒压供水系统原理如图1所示。

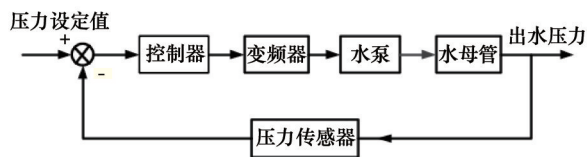


图1 恒压供水系统控制原理

Fig. 1 Control principle of constant pressure water-supplying system

1.2 恒压供水系统的数学模型

针对恒压供水系统进行研究,系统的控制对象具有非线性、滞后性的特点,很难得到一个准确的数学模型。由于水泵将水送到管网中,网管的压力基本保持初始压力,所以此

过程为一阶纯滞后过程,异步电动机近似成一阶惯性环节,系统中其他控制和检测环节的时间常数和滞后时间与供水系统的时间常数和滞后时间相比可忽略不计,可等效为比例环节。所以得到近似的数学模型:

- 1) 网管的传递函数为一个纯滞后过程 $e^{-\tau}$;
- 2) 异步电动机的传递函数为 $\frac{k}{T_s + 1}$;
- 3) 压力传感器近似为比例增益环节 K 。

在一定的假定条件和忽略一定条件下,恒压供水系统可认为是供水压力为8 MPa,由1个一阶滞后环节,1个传递函数和1个比例增益环节 K 组成,数学模型为

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{T_s + 1} \quad (2)$$

经过多次测试与实验,应用阶跃响应曲线法测试系统的数学模型参数,系统的辨识结果为 $K=1.6$,滞后时间 $\tau=5$ s,常数 $T=139$ s。所以系统的数学模型为

$$G(s) = \frac{1.6e^{-5s}}{139s + 1} \quad (3)$$

一个系统的平稳性是系统的重要条件,平稳性是系统在受到干扰后仍能够恢复到原来状态的能力。运用Matlab对系统进行频域分析,绘制伯德图研究系统是否稳定。得到的伯德图如图2所示。

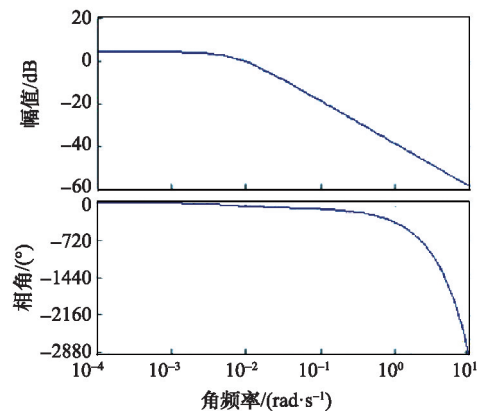


图2 恒压供水系统伯德图

Fig. 2 Bode diagram of constant pressure water-supplying system

由图2可得幅值裕度 $G_m=27.6917$,相角裕度 $P_m=126.1084$,相角交界频率 $\omega_{cg}=0.3187$,截止频率 $\omega_{cp}=0.0090$,模值稳定裕度 $L_m=20\lg 27.6917$ dB,相角稳定裕度 $R=126.1084^\circ$, $-\pi$ 相角交界频率 $\omega_{cg}=0.3187$,截止频率 $\omega_{cp}=0.0090$,这些性能指标都为正值,所以系统是稳定的。系统虽然稳定,由于综采工作面的环境等因素会对系统的控制造成一定的影响,为确保喷雾恒压供水系统稳定运行,并具有较强的抗干扰能力,能够很好地满足系统的静动态特性要求,需要应用有效的控制策略进行控制。为达到很好的控制效果,本文采用模糊PID控制理论实现对恒压供水系统的控制。

2 恒压供水系统仿真

2.1 模糊PID建模

常规的PID控制器的数学模型为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益, K_d 为微分增益, $e(t)$ 为输入量。

常规的PID控制器的控制精度不高,表现出较差的自适应性与鲁棒性,所以本文采用模糊理论对PID控制器参数进行优化,通过以误差 e 和误差变化率 e_c 作为输入,以PID控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 作为输出,利用模糊控制理论对PID参数进行修正,构成模糊的PID控制器,其结构如图3所示。

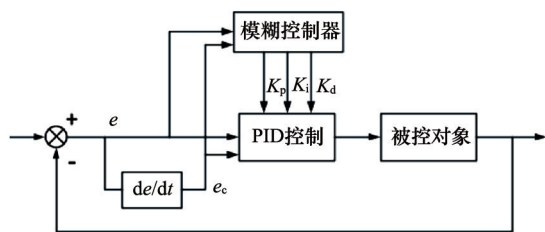


图3 模糊控制原理

Fig. 3 Fuzzy control principle

根据对系统的分析,采用模糊的控制原则,常规的PID控制器由 K_p 、 K_i 、 K_d 3个参数是否合理决定,模糊控制器中的输出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为 K_p 、 K_i 、 K_d 3个参数的修正值,模糊控制器将 K_p 、 K_i 、 K_d 调节为 K'_p 、 K'_i 、 K'_d ,所以输出值得到算式:

$$K'_p = K_p + \Delta K_p \quad (5)$$

$$K'_i = K_i + \Delta K_i \quad (6)$$

$$K'_d = K_d + \Delta K_d \quad (7)$$

模糊控制器输入变量为水压偏差 e 和水压偏差变化率 e_c , 输出变量为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。 e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊子集为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}, 子集代表的含义为负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。模糊论域为 $[-3, 3]$, 量化等级为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ 。通过 Matlab 的模糊控制工具箱, 设定各变量的隶属度函数。论域的左端和右端采用高斯隶属度函数, 其余部分采用三角型隶属度函数^[8-10]。

K_p 、 K_i 、 K_d 的推理规则为

- 1) 当偏差 e 较大时, 为避免较大的超调, 应选择较小的 K_d , 加快系统的响应, 选择较大的 K_p ;
- 2) 当偏差 e 适中时, 应取较小的 K_p , 适当增加 K_i , 防止超调;
- 3) 当偏差 e 较小时, 可取较大的 K_p 和 K_i , 为避免在平衡点出现震荡现象, 取适中的 K_d 。

根据以上推理制定 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则推理表(表1、表2、表3)。 e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数如图4所示。

表1 ΔK_p 模糊规则表

Table 1 ΔK_p fuzzy rules

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PS	PS	PB	PM	PM	Z	Z
NM	PB	PB	PB	PS	PS	Z	Z
NS	PB	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NB	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 模糊规则表

Table 2 ΔK_i fuzzy rules

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PM	NB	NB	NB	NB	NB	PM
NM	PS	NM	NM	NM	NM	NM	PS
NS	PS	NM	NM	NM	NM	NM	PS
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PM	PM	PM

表3 ΔK_d 模糊规则表

Table 3 ΔK_d fuzzy rules

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PM	PM	PM	PB	PB

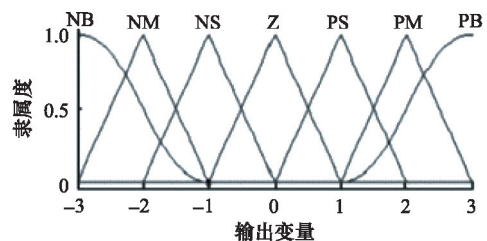


图4 e 、 e_c 、 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数

Fig. 4 e , e_c , ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d membership functions

2.2 恒压供水系统的仿真

利用 Matlab 中的 Simulink 相关工具箱建立了系统的模

糊 PID 控制和传统 PID 控制的仿真模型, 仿真图如图 5, 图 6 所示, 应用阶跃响应对恒压供水系统进行测试和研究。

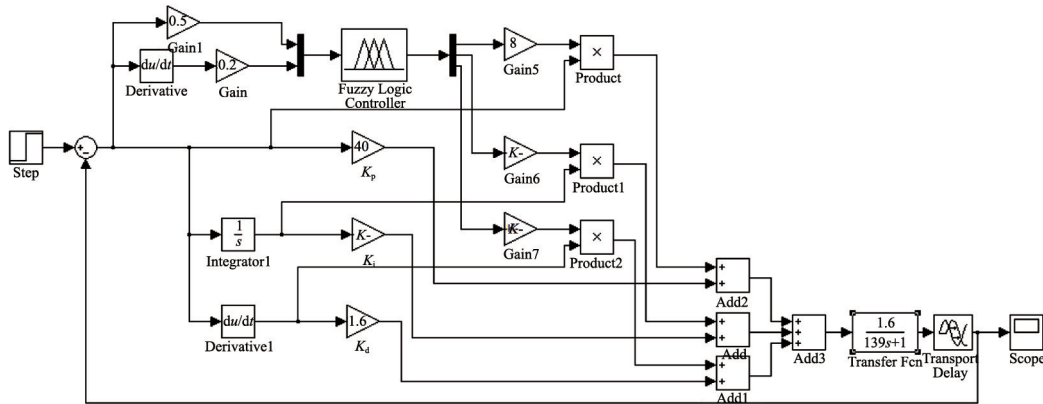


图5 模糊PID控制仿真

Fig. 5 Fuzzy PID control simulation

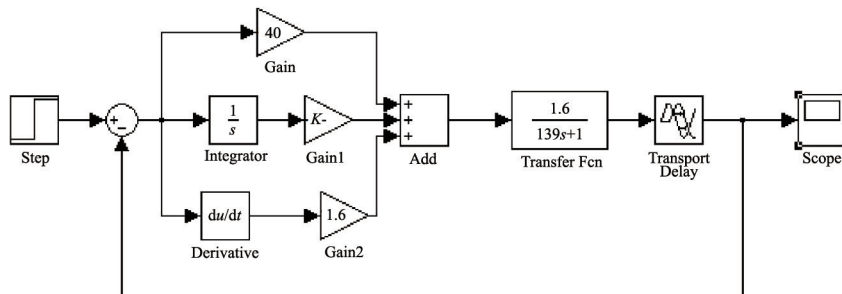


图6 传统PID控制仿真

Fig. 6 Conventional PID control simulation

由于综采工作面的环境恶劣, 系统运行中将会有干扰信号对系统进行干扰, 要想保证系统正常运行, 系统的抗干扰能力和稳定性等就要满足系统的运行要求。本研究针对不同的工况对系统进行仿真分析。

1) 在正常工作状态下, 恒压供水系统的模糊 PID 控制和传统 PID 控制的响应曲线如图 7 所示。

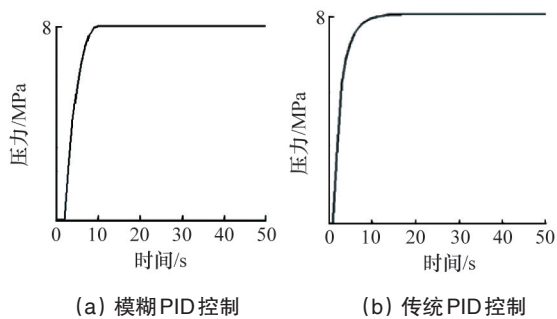


图7 恒压供水系统响应曲线

Fig. 7 Response curve of constant pressure water-supplying system

2) 根据矿井下粉尘的情况, 达到不同的喷雾效果, 需调整水的压力。将母管水压从 8 MPa 调整到 6 MPa 时, 响应曲线如图 8 所示。

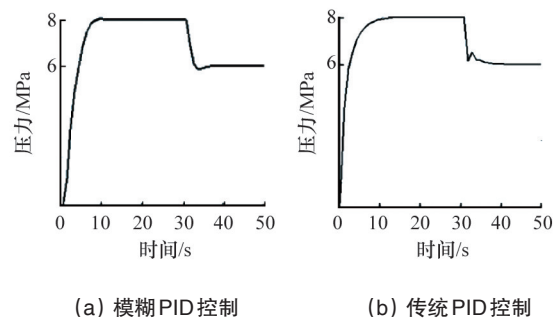


图8 调节供水压力的响应曲线

Fig. 8 Response curve of water-supplying pressure adjustment

3) 由于恒压供水系统具有参数时变性等特点, 所以改变恒压供水系统的运行参数, 对系统进行鲁棒性分析。响应曲线如图 9 所示。

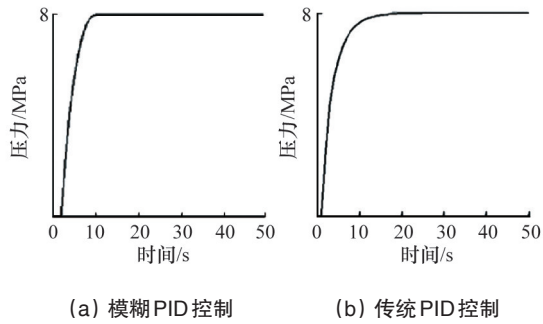


图9 被控对象变化的恒压供水响应曲线

Fig. 9 Response curve of constant pressure water-supplying with different controlled objects

4) 系统运行时干扰信号会影响控制系统的运行,故对恒压供水系统抗干扰性进行分析,响应曲线如图10和图11所示。

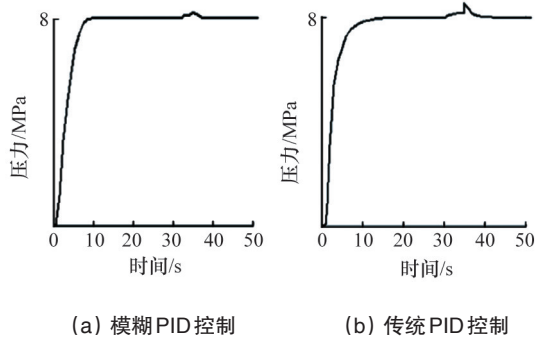


图10 施加阶跃干扰的恒压供水响应曲线

Fig. 10 Response curve of constant pressure water supply under step perturbation

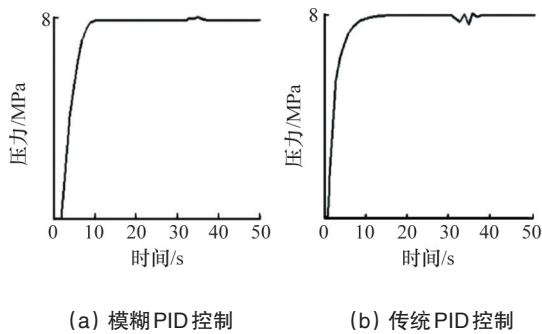


图11 施加脉冲干扰的恒压供水响应曲线

Fig. 11 Response curve of constant pressure water supply under pulse interference

由图7可以看出系统的模糊PID控制和传统PID控制都

无震荡现象,超调量也均较小,几乎为零;动静特性都较稳定,模糊PID控制在11 s左右达到平稳状态,而传统的PID控制在16 s左右才达到平稳状态。由此可以看出,模糊PID控制的初始响应速度比传统的PID控制的初始响应速度更快,所以模糊PID控制器更加满足恒压供水系统的要求。

当系统输入从8 MPa调节到6 MPa时,由图8可以看出,模糊PID控制虽然产生了超调,但超调量很小,不影响系统的稳定性,而调整时间仅用6 s左右,传统的PID控制调整时间需要12 s左右,虽然稳定,但调整时间过长,模糊PID控制比传统PID控制的调整时间更短,更加满足快速性的要求。

恒压供水系统具有参数时变性等特征,所以对模糊PID控制进行鲁棒性分析。当被控对象的比例增益由原来的1.6变为1.2时,由图9可以看出,模糊PID控制的各项动态指标都无明显变化,说明系统的稳定性较好,有较好的动静效果。而传统的PID控制在18 s左右达到平稳状态,比先前的传统PID控制达到平稳状态慢了2 s,有一定的变化。由此可见,模糊PID控制的鲁棒性比传统PID控制的更好,更加适合恒压供水系统。

在恒压供水系统稳定运行30 s后,为模糊PID控制系统和传统PID控制系统同时施加幅值为设定值40%的阶跃干扰信号^[9],系统的响应曲线如图10所示。模糊PID控制系统的调节时间约为7 s,传统PID控制系统的调节时间约为12 s,而且有一定的超调现象,系统遇到干扰信号时,稳定性不是很好,而模糊PID控制的超调量较小,调整时间更短,说明干扰信号对系统的影响较小,遇到干扰信号时能够很快恢复到平稳状态,由此可见,模糊PID控制系统的抗干扰能力更强。

在恒压供水系统稳定运行30 s后,为模糊PID控制系统和传统PID控制系统同时施加脉冲干扰信号,如图11所示,模糊PID控制系统的调节时间约为6 s,而传统PID控制系统的调节时间约为11 s,且稳定性较差,说明干扰信号对模糊PID控制系统的影响较小,遇到干扰信号时能够很快恢复到平稳状态,具有较强的抗干扰能力。

2.3 模糊PID控制方式的应用

将此模糊控制方式应用于某矿的喷雾降尘恒压供水系统中,降尘效率主要由水的压力决定^[11],通过测量粉尘浓度分析此控制方式的优越性。在实际工况的综采面,应用GCG1000粉尘浓度传感器对粉尘浓度进行检测,采煤机每向前截割煤5 m,在采煤机中心位置进行1次采样,共计采集10个点的粉尘浓度值,与先前应用普通控制在相同位置检测的粉尘浓度值比较,绘制出分别采用模糊PID控制和传统PID控制的粉尘浓度与时间关系图,结果见图12。

由图12可以得出,应用模糊PID的恒压供水系统的粉尘质量浓度值明显低于传统PID控制的粉尘质量浓度值,模糊PID控制方式能够更好地保持水压的恒定,说明模糊PID控制方式运行更平稳,抗干扰性更强。

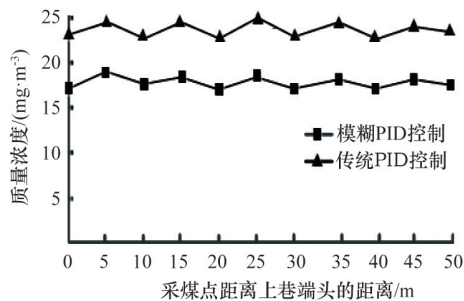


图 12 模糊PID控制和传统PID控制的粉尘浓度

Fig. 12 Dust concentration under fuzzy PID control and conventional PID control

3 结论

对综采面降尘喷雾恒压供水系统进行不同工况的仿真分析,由仿真图可以看出,模糊PID控制达到稳定运行需要 11 s 左右,而传统的PID控制达到稳定需要 16 s 左右,而且遇到干扰时,模糊PID控制更平稳,调节时间更短,只需要 8 s 左右就能够达到平稳状态。研究表明,模糊PID控制比传统的PID控制调整时间短,运行更平稳,抗干扰能力更强。将模糊PID控制方式应用到综采面喷雾降尘恒压供水系统中,恒压供水系统运行更加稳定,能够达到更好的降尘效果。

参考文献 (References)

- [1] 刘佩. 现代化矿井粉尘综合治理技术探讨[J]. 矿业安全与环境, 2009, 36(4): 76-80.
Liu Pei. Modern mine dust comprehensive treatment technology[J]. Mine Safety and Environment, 2009, 36(4): 76-80.
- [2] 吴琼. 综采工作面喷雾降尘机理及高效降尘喷嘴改进研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
Wu Qiong. Spray dust mechanism and efficient dust nozzle improvement study of comprehensive mechanized coal face[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.
- [3] 程卫民, 周刚. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究[J]. 煤炭学

报, 2010, 35(8): 1308-1313.

- Chen Weimin, Zhou Gang. Experimental research on the relationship between nozzle spray pressure and atomization particle size[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1308-1313.
- [4] 丁成松. 基于模糊PID的恒压供水控制系统设计[D]. 济南: 山东大学, 2010.
Ding Chengsong. Fuzzy PID controller for water supply system[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [5] 王鑫, 黄险峰, 林彬. 基于模糊PID的变频水泵恒压供水系统仿真[J]. 五邑大学学报: 自然科学版, 2013, 27(1): 59-63.
Wang Xin, Huang Xianfeng, Lin Bin. Simulation of variable frequency pump constant pressure water-supplying system based on fuzzy PID[J]. Journal of Wuyi University: Natural Science Edition, 2013, 27(1): 59-63.
- [6] 王振臣, 刘建旺, 张聪. 基于遗传算法和模糊PID的采煤机滚筒调高系统研究[J]. 中国矿业, 2014, 23(1): 133-136.
Wang Zhenchen, Liu Jianwang, Zhang Cong. Study on drum lifting system of shearer based on genetic algorithm and fuzzy PID[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(1): 133-136.
- [7] 徐国强. 模糊变频控制在煤矿井下恒压供水系统中的应用研究[J]. 科技情报开发与经济, 2008, 18(34): 97-99.
Xu Guoqiang. Study on the application of the fuzzy frequency control in constant pressure water supply system of coal mine[J]. Sci-tech Information Development & Economy, 2008, 18(34): 97-99.
- [8] 赵永娟, 孙华东. 基于Matlab的模糊PID控制器的设计与仿真[J]. 微计算机信息, 2009, 25(1): 48-49.
Zhao Yongjuan, Sun Huadong. Design and simulation of a fuzzy PID controller based on Matlab[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(1): 48-49.
- [9] 刘文定, 王东林. MATLAB/Simulink与过程控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 155-159.
Liu Wending, Wang Donglin. MATLAB/Simulink and the process control system[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012: 155-159.
- [10] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 70-71.
Liu Jinkun. Advanced PID control and MATLAB simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 70-71.
- [11] 马素平, 寇子明. 喷嘴降尘机理的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 297-302.
Ma Suping, Kou Ziming. Study on mechanism of reducing dust by spray[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 297-302.

(责任编辑 王媛媛)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。