

基于模糊 PID 的双注浆泵同步系统的仿真与研究

王 婵, 马月辉, 于正航

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对传统双注浆泵同步系统中同步精度难以保证的问题,提出了基于模糊 PID 控制的双注浆泵同步系统。利用电液比例阀控制液压缸,液压缸活塞杆直接控制注浆泵活塞,因此,可以通过控制液压缸活塞杆位移,保证注浆泵活塞位移同步,从而使双注浆泵的进料与出料过程同步。采用 AMESim/Simulink 对该系统进行联合仿真,并进行了实验验证,与传统无模糊 PID 控制该系统的结果对比,结果表明,模糊 PID 控制可以有效改善同步注浆系统的控制精度。

关键词:AMESim/Simulink;模糊 PID;同步注浆

中图分类号:TH137 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2019)01-0093-06

0 引言

双注浆泵同步系统主要应用于高速铁路无砟轨道道床同步抬升控制系统,其中注浆泵为柱塞模式,以液压系统为动力源,液压缸活塞杆直接控制注浆泵活塞,从而控制进料与出料。为保证双注浆泵同步注浆,需要实现两个液压缸活塞杆以相同的位移或速度运动。理论上,要实现两液压缸同步运动,只需向两个结构参数完全相同的液压缸输入等量油液即可,但是由于一些不可避免的因素影响,例如:摩擦阻力、泄漏量、液压油中的杂质以及液压缸的制造误差等,都使得两液压缸的同步精度难以保证^[1]。

于宗振^[1]建立了双液压缸同步系统的数学模型,并进行了 AMESim/Simulink 联合仿真。但只应用了 PID 控制,没有涉及模糊控制;刘天豪等^[2]分别利用 Matlab/Simulink 与 AMESim 软件对液压缸的同步控制问题进行了比较研究,但文中没有涉及控制算法,也没有进行联合仿真;孙静等^[3]利用 AMESim 软件,分析了液压位置控制系统的动态误差与稳态误差。但仅是单个液压缸的输出位移跟踪给定信号,观察其同步误差。现针对双注浆泵同步控制系统,设计了模糊 PID 控制器,并对该系统进行了 AMESim/Simulink 联合仿真。与传统的未加控制算法的结果对比,加入模糊 PID 控制算法可以有效提高同步控制精度。

1 系统的组成及原理

系统的控制策略采用“主从方式”^[4],液压缸 1 作为主缸,其活塞杆位移跟随输入信号的变化而变化,将液压缸 1 的输出信号作为液压缸 2 的输入,使液压缸 2 跟随液压缸 1 位移的变化而变化,从而达到同步驱动的效果。控制策略框图如图 1 所示。

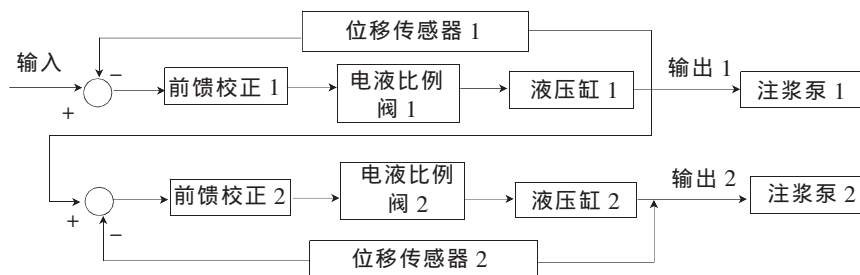


图 1 “主从方式”控制策略框图

收稿日期:2017-09-20 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxsb.20170210

作者简介:王婵(1992—),女,硕士研究生,主要从事液压控制与注浆方面的研究。E-mail:846646436@qq.com

王婵,马月辉,于正航.基于模糊 PID 的双注浆泵同步系统的仿真与研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(1):93-97.

在该系统中,注浆泵是系统的关键设备,注浆泵的工作原理为:恒转速电机控制液压泵向液压缸供油,通过三位四通电磁换向阀左右侧电磁铁得失电来控制液压缸活塞杆的左右移动,液压缸活塞杆直接控制注浆泵活塞,从而控制进料与出料。注浆泵原理图如图 2 所示。

2 系统控制算法选择

由于双注浆泵同步系统具有不确定性以及非线性,因此常规 PID 控制无法达到预期效果,而单一模糊控制虽然可以实现非线性控制,也不需要被控对象的数学模型,但无法消除系统的稳态误差。因此,采用自适应模糊 PID 控制,使模糊控制与 PID 控制优缺点互补,从而使系统具有参数自整定、鲁棒性强、控制精度高等特点。

2.1 自适应模糊 PID 控制原理

自适应模糊 PID 控制将模糊控制与 PID 控制结合^[5],偏差 e 、偏差变化率 ec 和 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 通过模糊推理建立函数关系,从而使这 3 个参数随 e 和 ec 的变化自动调整,其原理如图 3 所示。

2.2 自适应模糊 PID 控制器设计

在 Matlab 的 fuzzy 工具箱中建立模糊推理系统结构,输入为 e 、 ec ,输出为 K_p 、 K_i 、 K_d 。这 5 个变量的模糊集均为 $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$,论域均为 $[-3, 3]$,分别对输入和输出变量建立隶属度函数,其中 PB 、 NB 分别为 S 型和 Z 型隶属度函数,其它均为三角型隶属度函数^[6]。其模糊规则如表 1 所示。解模糊方法选取重心法。

表 1 模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	Z/Z/NM	Z/Z/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/Z/Z
NS	PM/NB/Z	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z
Z	PM/NM/Z	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z
PS	PS/NM/Z	PS/NS/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NS/PS/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z
PM	PS/Z/PB	Z/Z/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

2.3 模糊 PID 控制系统的 Simulink 仿真

自适应模糊 PID 控制器在 Simulink 中的仿真模型如图 4 所示,图 5 为 PID 子系统结构图。

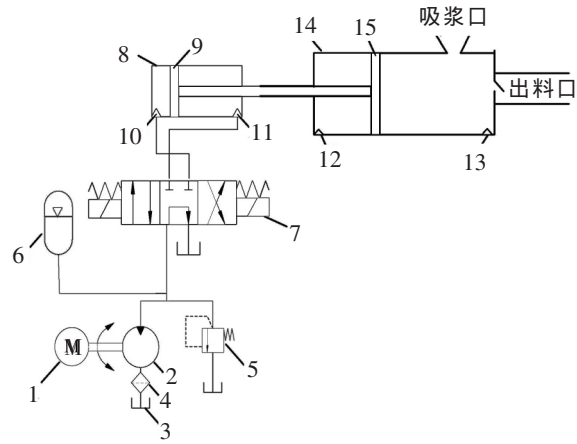


图 2 注浆泵原理图

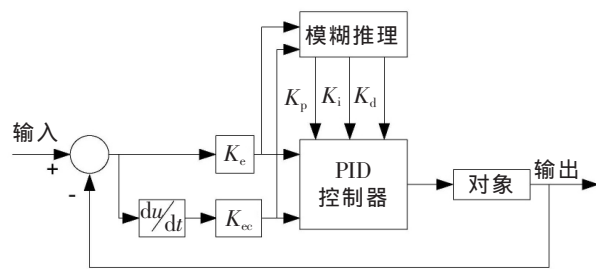


图 3 自适应模糊 PID 控制原理图

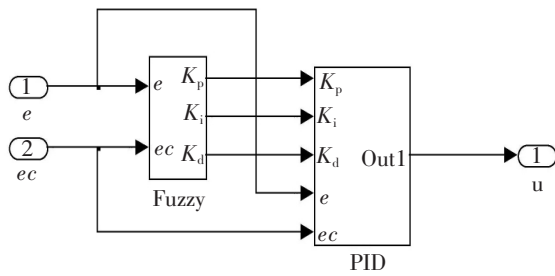


图 4 自适应模糊 PID 仿真结构图

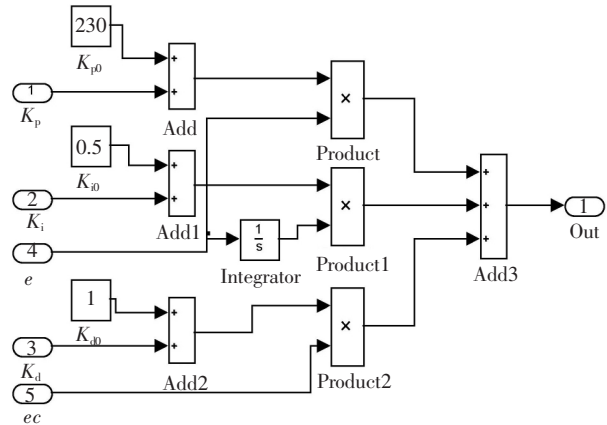


图 5 PID 子模型结构图

3 系统 AMESim 仿真

3.1 未加控制算法的 AMESim 仿真

为验证两液压缸活塞杆位移是否同步,利用 AMESim 软件对同步系统进行仿真。仿真中,两个注浆设备的结构参数完全相同,参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	液压缸活塞直径 D/mm	液压缸杆直径 d/mm	活塞行程 l/mm	质量块质量 G/kg	齿轮泵排量 $q/(\text{mL} \cdot \text{r})$	系统压力 p/bar
值	32	28	175	100	63	1

对该系统进行 AMESim 仿真,未加任何控制算法时,两液压缸的位移曲线 S 如图 6 所示,同步误差曲线如图 7 所示。

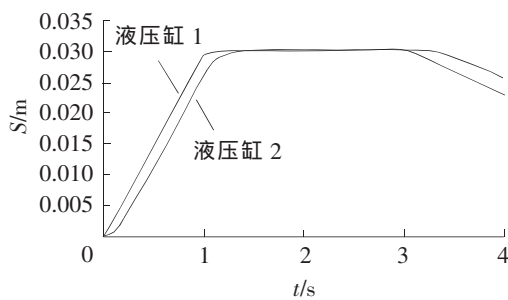


图 6 位移曲线 ($K=500$)

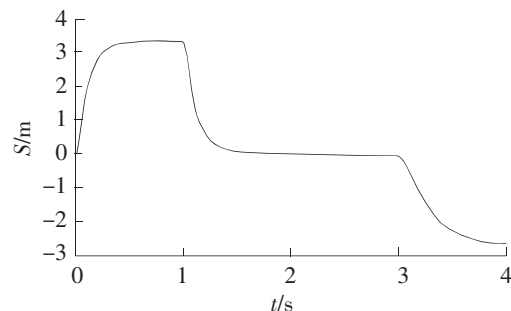


图 7 同步误差曲线 ($K=500$)

仿真中,由于液压缸 2 的输入信号为液压缸 1 的输出信号,因此,液压缸 2 对应电液比例阀的响应存在一定延迟,液压缸 2 的活塞杆运动滞后于液压缸 1,从而产生误差。

由仿真曲线可以看出,液压缸 2 活塞杆位移能够跟随液压缸 1 活塞杆位移的变化而变化,但是跟踪精度不够高,同步误差较大,最大值达到了 3.318 mm,不能满足要求的同步误差精度。

减小系统稳态误差的有效方法之一就是增大系统的开环增益 $K^{[7]}$,因此当系统的其它条件保持不变时,使得系统的开环增益 K 增大到 600,位移曲线及同步误差曲线如图 8、图 9 所示。

由仿真图可知,液压缸 2 的跟踪效果有所改善,系统同步误差峰值减小到 2.071 mm,同步控制精度提高了 1.247 mm。但是,由于高速铁路无砟轨道具有高平顺性,所以仅增大系统的开环增益 K 不能满足系统对同步精度的要求。

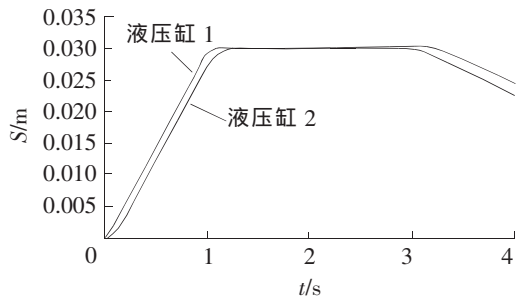


图 8 位移曲线(K=600)

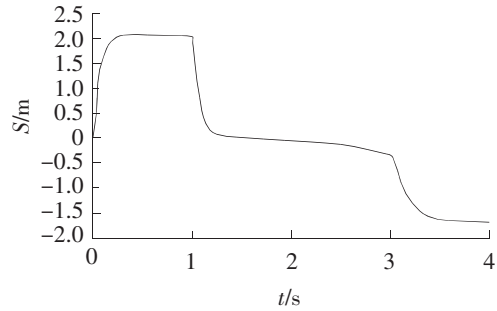


图 9 同步误差曲线(K=600)

3.2 加入模糊 PID 后的 AMESim/Simulink 联合仿真

AMESim 为用户提供一个图形化的建模仿真平台,用于工程系统建模、仿真以及系统的稳态和动态性能分析^[4]。通过模型库搭建设计模型,并设定模型的参数结构,即可对系统进行稳态及动态仿真,并根据仿真曲线分析结果。但是在 AMESim 中建立数学模型是有难度的,此时需要 Matlab/Simulink 软件辅助完成系统仿真。在 AMESim 中对系统建模,并以 S 函数的形式导入到 Simulink 的数学模型中,从而实现联合仿真,这样可以大大减少建模的工作量。因此在系统中加入模糊 PID 控制器时利用 AMESim/Matlab 进行联合仿真会更加简便。同步注浆系统联合仿真模型图只需在未加任何算法模型的基础上加上联合仿真模块即可,联合仿真模型如图 10、图 11 所示。

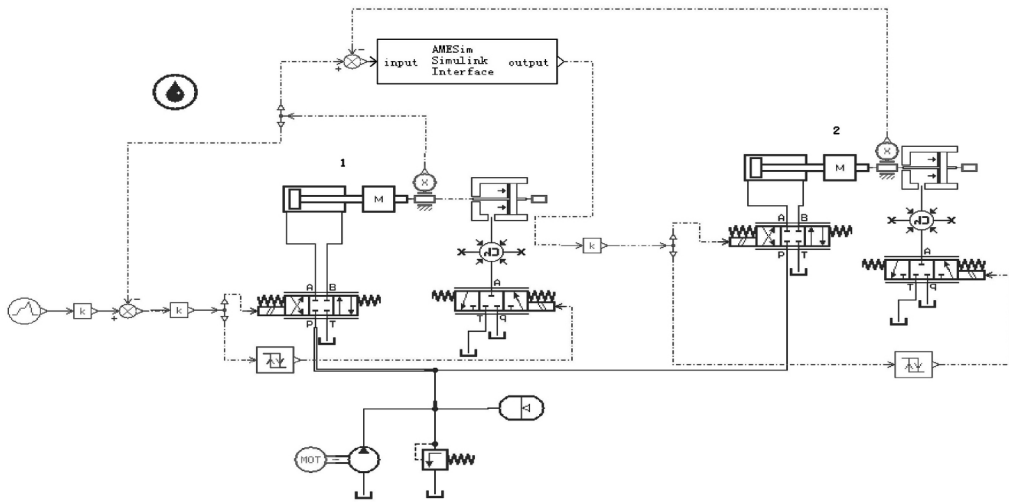


图 10 同步注浆系统 AMESim/Simulink 联合仿真模型图

仿真结果如图 12、图 13 所示。

由仿真图可知,给定信号不变,加入模糊 PID 控制算法后,液压缸 2 的跟踪情况发生了变化,液压缸 2 的位移能够准确地根据液压缸 1 的位移变化而变化,实现了有效跟踪。

胡爱闽^[8]采用主从控制方式实现液压升降台同步控制,同步误差最大值为 0.023 mm。鲁鼎^[4]采用试凑法对 PID 参数整定,同步误差最大值为 0.018 mm。由图 13 可知,该系统两液压缸活塞杆位移差在 0.8 s 处达到最大,最大值约为 0.014 mm。仿真结果表明,自适应模糊 PID 控制可以实现 PID 的参数自整定,提高系统的灵活性和稳定性,并有效提高系统的同步精度。

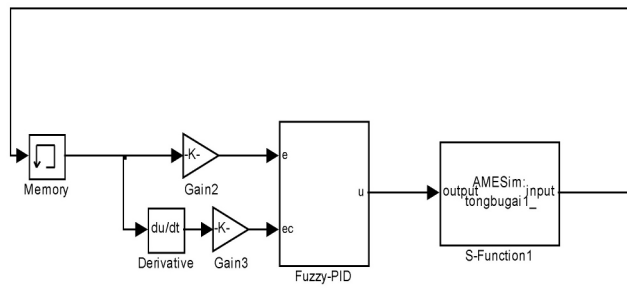


图 11 同步注浆系统 Simulink 模型图

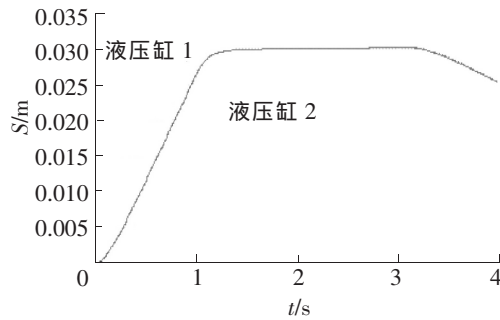


图 12 加模糊 PID 后位移曲线

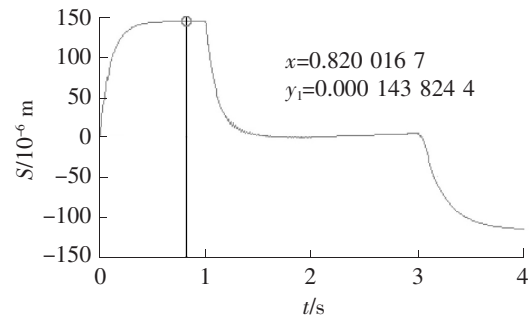


图 13 加模糊 PID 后同步误差曲线

4 实验验证

模拟实验采用博世力士乐旗下 WS290 试验台,该设备主要应用于液压控制系统。位移传感器采用 KPM22-225 mm。根据 AMESim 仿真模型,利用该设备搭建双注浆泵同步系统,验证两液压缸活塞位移是否同步。表 3 为未加入模糊 PID 的实验结果,表 4 为加入模糊 PID 后的实验结果。

表 3 未加模糊 PID 实验结果

时间 t/s	1号液压缸 位移 S/mm	2号液压缸 位移 S/mm	同步误差 S/mm
0.8	23.2	20.1	3.1
1.0	29.3	25.9	3.4
1.5	30.2	29.8	0.4
2.0	30.0	30.0	0
2.5	30.1	30.1	0
3.0	30.2	30.0	0.2
3.5	27.1	24.5	2.6
4.0	23.3	20.6	2.7

表 4 加入模糊 PID 后实验结果

时间 t/s	1号液压缸 位移 S/mm	2号液压缸 位移 S/mm	同步误差 S/mm
0.8	23.4	23.3	0.1
1.0	29.1	29.1	0
1.5	30.0	30.0	0
2.0	30.1	30.1	0
2.5	30.2	30.1	0.1
3.0	30.2	30.2	0
3.5	26.9	26.9	0
4.0	23.1	23.1	0

由表 3 可知,未加模糊 PID 控制的同步误差最大值达到 3.4 mm。由表 4 可知,加入模糊 PID 控制后液压缸 1 与液压缸 2 的活塞杆位移基本保持一致。在模拟实验中,由于环境与设备安装误差等因素的影响,模拟实验控制精度与软件仿真存在一定偏差。本实验验证了模糊 PID 控制的有效性。

5 结论

(1)针对双注浆泵同步系统,设计了自适应模糊 PID 控制器,使 PID 的 3 个参数能够在线自整定,大大提高系统的工作效率,另外,通过 AMESim 与 Simulink 软件对该系统的联合仿真,验证了自适应模糊 PID 控制可以提高系统的灵活性和稳定性,并使系统的同步误差控制在 ± 0.02 mm 范围内,与未加入模糊 PID 控制算法的同一系统相比,同步精度有了明显提高。

(2)针对提出的方法,对该系统进行了模拟实验,加入模糊 PID 控制的两液压缸活塞杆位移基本保持一致。实验结果验证了该方法的有效性。

(3)该同步注浆系统为高速铁路无砟轨道道床同步抬升控制奠定基础,此后将继续研究双注浆泵的流量跟踪问题,使得双注浆泵同步控制系统的同步效果更好。

参 考 文 献

- [1]于宗振.基于 AMESim/Simulink 的电液伺服比例控制的同步回路建模与仿真研究[J].机械研究与应用,2012(3):43-45.
- [2]刘天豪,左茂文,李恒,等.基于 AMESim 和 MATLAB 的液压缸位置同步控制问题仿真的比较研究[J].液压气动与密封,2010,30(6):32-34.

(下转第 126 页)

Deterioration Law of Fibrous Shotcrete in the Environment of Sulfate Corrosion

Liang Shufeng

(Construction and Installation Engineering Co., LTD of China Railway 18 Bureau Group, Tianjin 300308, China)

Abstract: In order to study the feasibility and durability of Macro-PPFRC concrete in groundwater e-rode environment in the tunnel, many tests have been done. The mechanical properties and corrosion resistance of Macro-PPFRC concrete with different fiber contents were tested under medium-and long-term immersion conditions in the sulfate solution at a concentration of 5%. The law of corrosion deterioration of Macro-PPFRC concrete was explored according to the results to predict the life of Macro-PPFRC concrete. The results show that the mechanical properties and the corrosion resistance of Macro-PPFRC concrete perform well when the content of Macro-PPFRC is about 8 kg/m³. This conclusion can be used as the basis of durability design of Macro-PPFRC concrete.

Key words: tunnel; Macro-PPFRC; shotcrete; sulfate corrosion; deterioration law

(上接第 97 页)

- [3]孙静,王新民,金国举.基于 AMESim 的液压位置控制系统动态特性研究[J].机床与液压,2012,40(11):120-122.
- [4]鲁鼎.多液压缸同步控制技术的研究[D].镇江:江苏科技大学,2013.
- [5]龚齐斌,向贤兵.自整定模糊 PID 控制器的设计与 Simulink 仿真[J].重庆电力高等专科学校学报,2012,17(2):88-90.
- [6]李晓红,么娆,刘松青.基于 Smulink 的模糊 PID 参数自整定控制器的设计与仿真[J].吉林工程技术师范学院学报:自然科学版,2006,9(22):33-37.
- [7]苏东海,孙占文. AMESim 仿真技术在电液位置同步系统中的应用[J].液压气动与密封,2007,27(6):13-15.
- [8]胡爱闽.基于 AMESim 和 Simulink 的液压升降台同步控制仿真研究[J].煤矿机械,2007,28(12):45-47.

Simulation and Research on Synchronization System of Double Grouting Pump Based on Fuzzy-PID

Wang Chan, Ma Yuehui, Yu Zhenghang

(School of Electrical and Electric Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the controlling accuracy of the traditional synchronization system of double grouting pump is difficult to be guaranteed, a synchronization system of double grouting pump based on fuzzy PID is proposed. The electro-hydraulic proportional valve is used to control the hydraulic cylinder. The piston rod of hydraulic cylinder directly controls the grouting pump's piston. Therefore, the piston displacement of the grouting pump can be synchronized by controlling the displacement of the piston rod of the hydraulic cylinder, so that the feed and discharge of double grouting pump are synchronous. The system is simulated by AMESim and Simulink, and verified by experiments to compare with the traditional system. The results show that the fuzzy PID controller can effectively improve the precision of the system.

Key words: AMESim/Simulink; fuzzy-PID; synchronize grouting