

## 灌浆压力稳定控制系统的设计和仿真

王超<sup>1,2</sup>, 徐力生<sup>1,2</sup>, 姚翠霞<sup>1,2</sup>, 徐蒙<sup>1,2</sup>, 黄辉<sup>1,2,3</sup>

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 云南华电怒江水电开发有限公司, 昆明 650228)

**摘要:** 由于被灌地层岩体结构面特征、裂隙开度和浆液性能等因素影响, 灌浆压力的变化具有不确定性、时变性和非线性特征。为了实现灌浆压力的动态检测和稳定控制, 基于控制理论、传感器技术和微机技术, 以 80C196 单片机为核心部件, 设计了灌浆压力稳定控制系统。该系统采用模糊控制算法来自适应整定 PID 控制的  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  参数, 使 PID 控制器能够消除系统动态耦合、通过改变调节信号来控制执行机构, 从而使灌浆压力保持稳定。仿真试验结果表明, 灌浆压力稳定控制系统可将压力波动控制在设定压力值的 5% 以内, 控制响应时间为 5~6 s, 其性能指标优于传统人工控制方式的。

**关键词:** 灌浆压力; 稳定性; PID 控制; 模糊控制

中图分类号: TV53

文献标志码: A

## Design and simulation of grouting pressure stabilization control system

WANG Chao<sup>1,2</sup>, XU Li-sheng<sup>1,2</sup>, YAO Cui-xia<sup>1,2</sup>, XU Meng<sup>1,2</sup>, HUANG Hui<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Yunnan Huadian Nujiang River Hydropower Development Co., Ltd., Kunming 650228, China)

**Abstract:** The changes of grouting pressure have the characteristics of uncertainty, time variation and nonlinear because of the influences of structural plane characteristics of rock mass, fracture aperture and grout performance, etc. In order to achieve dynamic measurement and stabilization control on grouting pressure, the grouting pressure stabilization control system is designed based on control theory, sensor and micro-computer technology, while using 80C196 chip as micro-computer. In this control system,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  of PID control are adaptively adjusted by fuzzy control rule, PID controller could eliminate system dynamic coupling and control actuator by changing adjustment signal. Finally, the given grouting pressure can be kept stable. The simulation results prove that the grouting pressure fluctuation can be controlled to less than 5% of the set value in 5~6 s by grouting pressure stabilization control system. These performance indexes are better than those of the manual control.

**Key words:** grouting pressure; stabilization; PID control; fuzzy control

水工建筑大坝、水电站、地下工程等基础设施的修筑都离不开灌浆。作为灌浆施工的能量来源, 灌浆压力是灌浆液对灌浆地层施加的压力, 是控制和提高

灌浆质量的关键参数<sup>[1-2]</sup>。由于被灌地层岩体结构面特征、裂隙开度、浆液性能和灌浆方式等因素的影响, 灌浆压力的变化具有不确定性、时变性和非线性特

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51208514); 国家中小企业创新基金项目(12C26214304879); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011QNZT007)

**收稿日期:** 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

**通信作者:** 徐蒙, 讲师, 博士; 电话: 13975809372; E-mail: x1950217@126.com

征<sup>[3-4]</sup>。如何实现灌浆压力的可控性并保证屏浆阶段压力的稳定性是目前灌浆质量检测的一个重点问题<sup>[5]</sup>。灌浆压力过高,不仅会造成有害的水力劈裂和扩缝效应,使得坝基因抬动变形而发生开裂甚至破坏,而且也有可能将浆液灌入不需要灌浆的区域而造成材料浪费,增加工程成本。灌浆压力偏低,又会使浆液无法较好地灌入岩体的细小裂隙和空洞中,使得裂隙充填不够牢实和紧密,进而影响工程体的牢固性和稳定性,造成工程安全隐患<sup>[6]</sup>。在大坝基础防渗灌浆中,随着坝高的不断增加,坝基渗透作用水头也越来越高,采用小压力灌浆,防渗帷幕容易发生渗透破坏,尤其是软弱夹层和灰岩地层中岩溶通道的充填物,在高水头压力作用下很容易被击穿<sup>[7-8]</sup>。针对灌浆压力波动的非线性特点,本文作者结合传感器技术、微机技术和控制理论,设计制造了灌浆压力稳定控制系统,实现了灌浆过程中对灌浆压力的动态检测和稳定控制,并通过室内仿真试验验证了该系统的可靠性和控制性能。

## 1 灌浆压力稳定控制系统

### 1.1 设计思路

灌浆压力在灌浆管路中的传播是与管路内粘性流体流动相结合的复杂混合过程,其结构和参数的不确定性、状态的不完全性及非线性等特征使得灌浆压力的稳定控制非常困难<sup>[9-11]</sup>。要实现灌浆压力的稳定控制,不仅要求过程的控制策略具有较高的精度和较短的反应时间,而且要求它具有一定的智能特点。根据灌浆压力传播的特性,灌浆压力稳定控制系统是一个闭环负反馈控制系统,必须具备压力动态检测和压力稳定控制两个主要功能,其工作原理如图1所示。

灌浆压力动态检测和稳定控制的过程可解析为系统主机的微机系统将压力传感器信号采集、分析、并进行数据处理后,与事先设定的压力值进行比较,如

果压力的波动值超出给定幅度,压力稳定控制部分将会迅速给出调整灌浆管路系统中电动调节阀开度的执行指令,使压力在极短时间内恢复到设定压力范围之内,最后在主机上显示输出,实现实时打印灌浆数据与图表的功能。

### 1.2 控制算法

灌浆压力稳定控制必须要有与压力波动特征相适应的控制算法。常规PID控制器是将偏差比例、积分和微分控制,通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制,其控制规律如下<sup>[12]</sup>:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中:  $u(t)$  为  $t$  时刻控制器输出值;  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数;  $e(t)$  为  $t$  时刻偏差,即给定值与测量值之差。

灌浆压力稳定控制系统主机采用80C196单片机,单片机控制是一种采样控制,它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量,式(1)中的积分和微分项不能直接使用,需要进行离散化处理,则可得式(1)的离散PID表达式如下:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

根据递推原理可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d [e(k-1) - e(k-2)] \quad (3)$$

由于  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ , 则

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + \\ &K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] = \\ &K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + \\ &K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

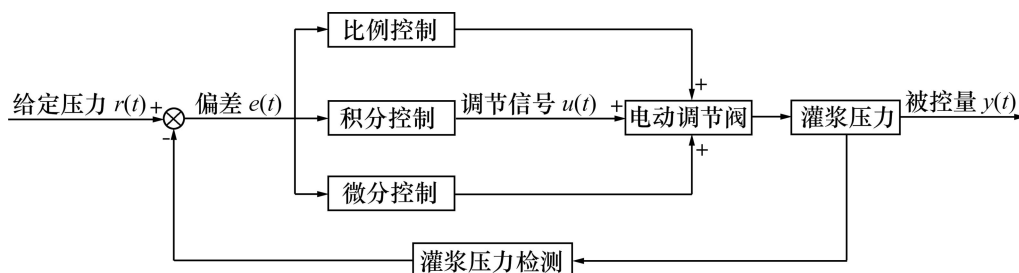


图1 灌浆压力稳定控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of grouting pressure stabilization control system

式中:  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ ;  $u(k)$  为第  $k$  次采样时刻的计算机输出值;  $e(k)$  为第  $k$  次采样时刻输入的偏差值;  $e(k-1)$  为第  $(k-1)$  次采样时刻输入的偏差值;  $K_i = K_p T / T_i$ ;  $K_d = K_p T_d / T$ ;  $T$  为采样周期;  $k$  为采样序号。

由于其中的控制增量  $\Delta u(k)$  只与最近几次采样偏差值  $e(k)$ 、 $e(k-1)$  及  $e(k-2)$  有关, 算式中不作大量累加, 计算误差对控制量影响较小, 可获得较好的控制效果。控制算法中的  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  参数必须与被控对象结构及参数相匹配, 但灌浆压力稳定控制系统是一个多输入、单输出的多变量非线性系统, 各变量间存在着耦合, 因此要实现压力的稳定控制, 解耦是关键。传统的 PID 控制只能消除静态耦合, 对于特性不确定的工业对象无法调和提高响应速度和降低超调量之间的矛盾, 因此动态耦合依然存在<sup>[13]</sup>。此时, 可利用模糊控制来消除动态耦合。模糊控制虽有较强的自适应能力, 但是其控制精度取决于规则的复杂程度, 特别是无法有效克服稳态误差<sup>[14-15]</sup>。常规 PID 控制在比例积分作用时对于平衡点附近的小范围调节效果较为理想, 可最终消除余差<sup>[16-17]</sup>。故系统采用自适应模糊 PID 控制, 将模糊控制算法和常规 PID 控制算法组合起来使用, 有效解决了系统存在的耦合, 获得很好的动态、静态特性。

模糊 PID 控制器的设计思想如下: 当压力偏差较大时, 采用模糊控制加快响应速度; 当压力偏差较小时进入稳态过程后, 切换到 PID 控制, 消除静差, 提高控制精度<sup>[18]</sup>。同时, 考虑到灌浆压力在大波动时可能把阀门关死, 而实际要求不容许出现阀门关死现象<sup>[19]</sup>, 因此, 在设计程序时, 给阀门全关信号留有余量, 可根据实际情况调整这个余量的大小。

$K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的取值采用键盘预置, 运行时根据误差  $e$  和误差变化率  $ec$  利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改, 满足不同  $e$  和  $ec$  时对 3 个参数的不同要求。该算法将误差  $e$ 、误差变化率  $ec$  和模糊判决输出值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  量化, 分别分为 7 个档级, 其模糊子集为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} = {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大} 共 7 个语言值<sup>[20-21]</sup>, 误差  $e$ 、误差变化率  $ec$  及模糊判决输出值  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  采用相同隶属函数和产生式规则来描述, 其一般形式如下:

If  $e = A_1$  and  $ec = B_1$ , then  $PC(\Delta K_{p1} \& \Delta K_{i1} \& \Delta K_{d1})$

If  $e = A_2$  and  $ec = B_2$ , then  $PC(\Delta K_{p2} \& \Delta K_{i2} \& \Delta K_{d2})$

...

If  $e = A_n$  and  $ec = B_n$ , then  $PC(\Delta K_{pn} \& \Delta K_{in} \& \Delta K_{dn})$

式中:  $A_n$  为偏差;  $B_n$  为偏差变化率;  $\Delta K_{pn}$ 、 $\Delta K_{in}$  和  $\Delta K_{dn}$

分别为在偏差  $A_n$ 、偏差变化率  $B_n$  下的 PID 控制器的  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  输出。不同  $e$  和  $ec$  情况下,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$  控制数如表 1~3 所列。

表 1  $\Delta K_p$  的模糊规则表

Table 1 Fuzzy rule of  $\Delta K_p$

$e$	$ec$						
	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
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	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

表 2  $\Delta K_i$  的模糊规则表

Table 2 Fuzzy rule of  $\Delta K_i$

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

表 3  $\Delta K_d$  的模糊规则表

Table 3 Fuzzy rule of  $\Delta K_d$

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

### 1.3 硬件设计

灌浆压力稳定控制系统硬件由压力动态检测模块和模糊 PID 控制模块两部分组成。

1) 压力动态检测模块。由 80C196 单片机系统、输入通道(压阻式压力传感器、接口电路、键盘)、输

出通道(显示器、模糊 PID 控制器、打印机、数据存储器等)等组成。

输入通道: 压力信号为模拟量, 压力传感器输出的 4~20 mA 的电流信号通过隔离器输入接口电路, 经 I/V 转换器转换成 1~5 V 的直流电压, 再经低通滤波器去掉干扰信号后, 输往单片机的 A/D 口。保护电路由二极管组成, 保证当信号电流高于 20 mA 或低于 4 mA 时, 不会烧坏 80C196 的 A/D 口。键盘经 8155 并行接口芯片的 I/O 口将功能选择和参数设置的内容、打印数据格式及相关的打印命令等输入单片机<sup>[22]</sup>。

输出通道: 压力信号输入单片机经过处理后, 所得数据根据设定的条件和格式分别输出到模糊 PID 控制器、液晶显示屏、打印机和数据存储器。

2) 模糊 PID 控制模块。由模糊 PID 控制器、电动调节阀和灌浆管道等组成。输入控制模块的是灌浆压力的预设值和动态检测值, 输出为电压信号。电压信号经过变频器转化为频率信号, 通过参数自适应模糊 PID 算法控制返浆管路中的电动调节阀阀芯的开度来控制返浆的流量, 达到控制压力波动、稳定压力的目的。当压力的动态检测值大于设定值时, 电动阀开度增大进行卸荷; 反之, 则电动阀开度减小, 减少卸荷流量以起到加压的作用。当孔内吸浆量较大不能产生压力时, 电动阀将完全关闭, 所有浆液均灌入孔内; 当孔内压力超过设定压力并快速增长时, 电动阀将迅速完全打开快速卸荷, 防止抬动事故发生。模糊 PID 控制模块的系统结构如图 2 所示。

#### 1.4 软件设计

控制系统软件采用模块化的结构程序设计方法, 主程序简单明了, 同时设置了多条子从程序, 功能齐全。软件具有良好的人机交互界面, 灌浆操作人员可根据菜单提示进行所需操作。软件基于参数自适应模糊 PID 控制算法编写, 控制对象为电动阀, 其控制算法流程如图 3 所示。

系统软件具备以下 5 个功能模块:

1) 灌浆模块: 配合灌浆自动记录仪完成灌浆操作, 设定灌浆工程有关数据(孔号、日期等)、灌浆压力、波动范围(上限和下限)等系统参数;

2) 通讯模块: 实现与灌浆自动记录仪和数据存储器的串行通讯(RS-232C)功能;

3) 数据处理模块: 分析动态检测压力值和设定压力值之间差值的“正”、“负”, 根据误差  $e$  和误差变化率  $ec$  利用模糊控制规则整定修改 PID 参数, 计算并输出压力调整量;

4) 指令执行模块: 根据压力调整指令控制阀门开度来实现压力的稳定控制;

5) 数据打印模块: 从存储器中调出历史数据, 根据需要打印相关统计表格与曲线。

## 2 仿真试验及结果分析

### 2.1 试验设备和方法

为了检验研究的可行性, 按照灌浆工程的一般工况, 并根据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(DL/T5148-2012)<sup>[23]</sup>设计和制造了室内模拟灌浆试验台进行仿真试验, 其基本组成和灌浆管路系统的布设如图 4 所示。模拟灌浆试验台主要由以下部分组成: SGB6-10 型往复式高压灌浆泵作为灌浆动力源; 灌浆自动记录仪, 其主要构成包括密度传感器, 用于检测浆液密度; 进浆流量计和返浆流量计, 用于检测浆液流量; 压力传感器, 用于检测灌浆管路系统内的灌浆压力值; 抬动传感器, 用于检测地层抬动变化; 自动记录仪主机, 用于各传感器检测指标分析、记录和打印, 与灌浆压力稳定控制系统实时连接, 传输实时检测数据; 模拟灌浆压力变化时不同工况的阀门组(电动调节阀、手动调节阀和紧急快开阀等); 灌浆压力稳定控制系统。

仿真试验中采用电动阀 V01 作为扰动阀, 按设计要求改变其阀芯开度来产生模拟扰动, 从而模拟出实际工况下灌浆压力的波动。当浆液流经调节阀门组时, 灌浆压力稳定控制系统接收动态检测信息, 并反馈电动阀 PV02 的开度来控制压力波动。由手动阀 V02、快开阀 PV01 和手动阀 PV03 组成的阀门组, 用来模拟灌浆管道阀门的切换控制。由于灌浆泵脉动特性, 故在进浆流量计和扰动阀之前设计增加一个空气室,

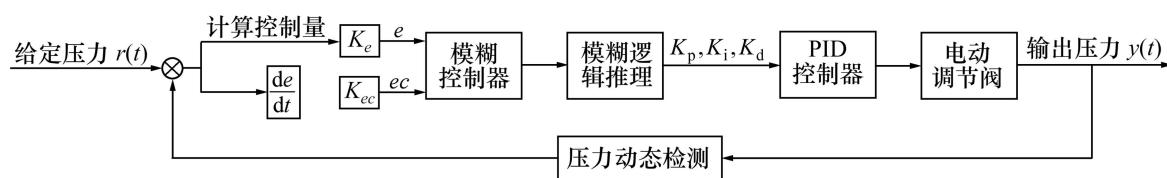


图 2 参数自适应模糊 PID 控制系统结构框图

Fig. 2 Principle diagram of parameter adaptive fuzzy-PID control system

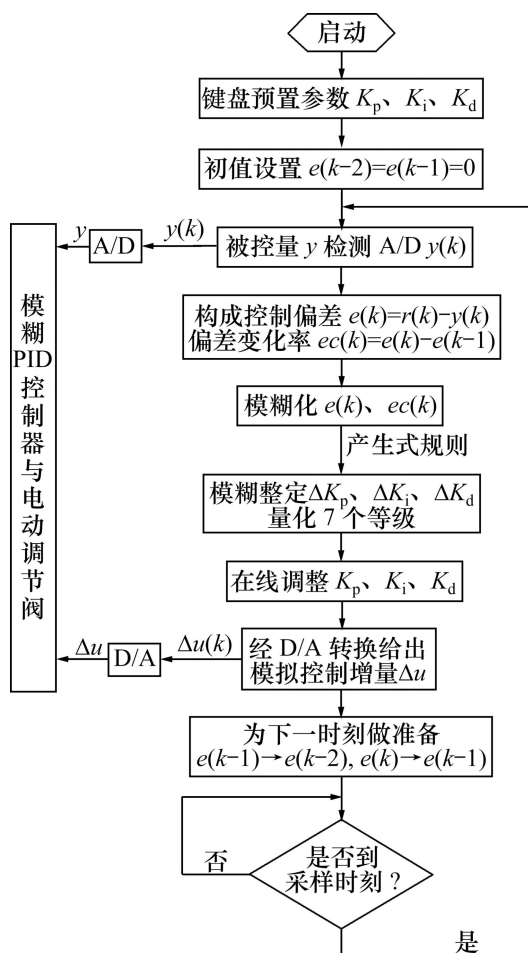


图3 模糊PID控制算法流程图

Fig. 3 Flow chart of fuzzy PID control algorithm

用于稳定模拟灌浆试验时的浆液泵送流量,减小泵送压力变化带来的检测误差。

## 2.2 试验结果分析

系统根据不同灌浆压力设定值与其对应的实测压力值的偏差值,来计算转换成调节电动阀 PV02 开度的理想控制指令值。但当压力稳定后,实际需要的稳定开度值与理想控制指令值存在一定误差,从表 4 中看出,通过系统计算发出的理想控制指令值和稳定开度值的相对误差不超过 5%。因此系统可以使阀门开度大致一步到位,误差较小,这将极大减少反馈控制时间,同时提高控制精度。

当设定压力为 1.0 MPa 进行仿真试验时,灌浆压力的阶跃响应曲线如图 5 所示。从图 5 可知,在系统控制下,灌浆压力从 0 很快升到设定值 1.0 MPa 左右,经过 5 s 左右的小幅波动后,趋于平衡,稳定停留在设定压力值上。这说明系统的控制响应时间很短,且控制精度较高,稳定性良好。

在仿真试验中,由于电动阀 V01 产生的模拟扰动,管路内灌浆压力产生波动,无法稳定。当设定压力为 0.5、1.5 和 3.0 MPa 时,压力波动和系统稳定控制的过程分别如图 6~8 所示。图中, A 区为灌浆压力超值波动阶段; B 区为系统控制启动的响应阶段; C 区为系统稳定控制阶段。由图 6~8 可知,在不同压力状况下,对于不同的扰动,系统通过调节电动阀 PV02 的开度都可以使压力在短时间内稳定下来,对应于 0.5、

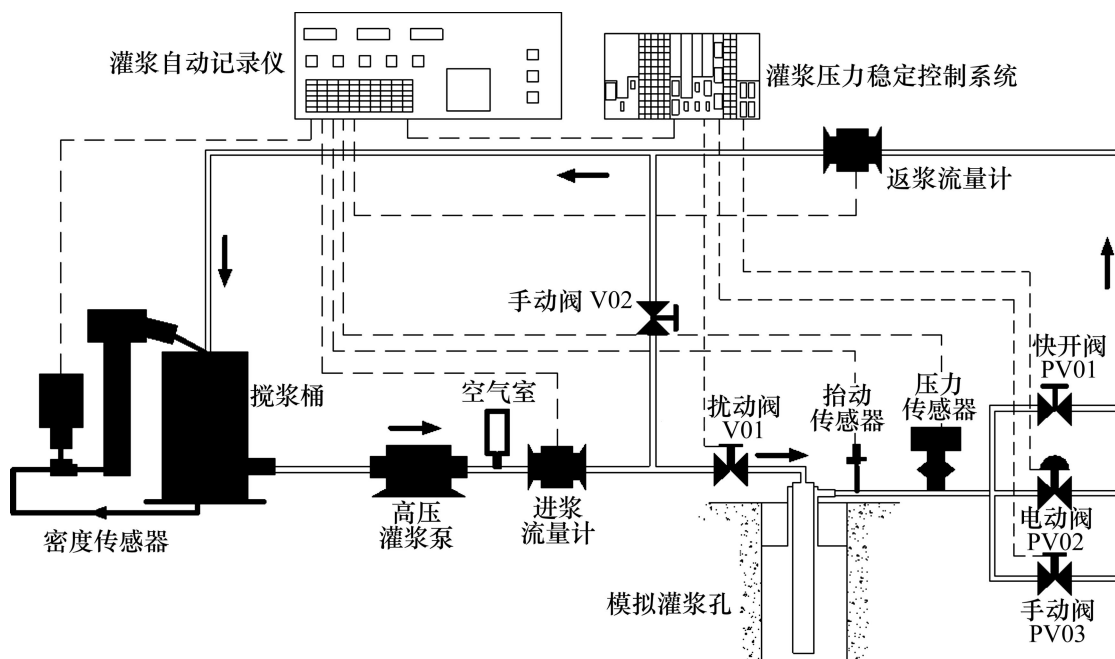


图4 室内模拟灌浆试验台原理图

Fig. 4 Schematics diagram of indoor simulated grouting system

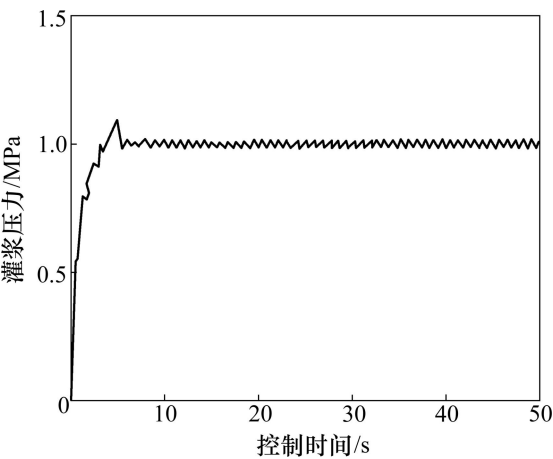


图 5 灌浆压力为 1.0 MPa 时的阶跃响应试验

Fig. 5 1.0 MPa pressure step response test under system control

表 4 电动阀 PV02 的控制指令值和稳定开度值

Table 4 Control instruction value and stable value of valve PV02

灌浆压力/ MPa	控制指令值/ %	稳定开度值/ %	相对误差/ %
0.25	50.4	51.2	1.6
0.75	58.3	59.6	2.2
1.25	66.1	67.7	2.4
1.75	72.2	73.9	2.4
2.25	76.6	78.5	2.5
2.75	80.6	82.7	2.6
3.25	83.9	86.6	3.2
3.75	85.7	87.9	2.6
4.25	87.5	89.9	2.7

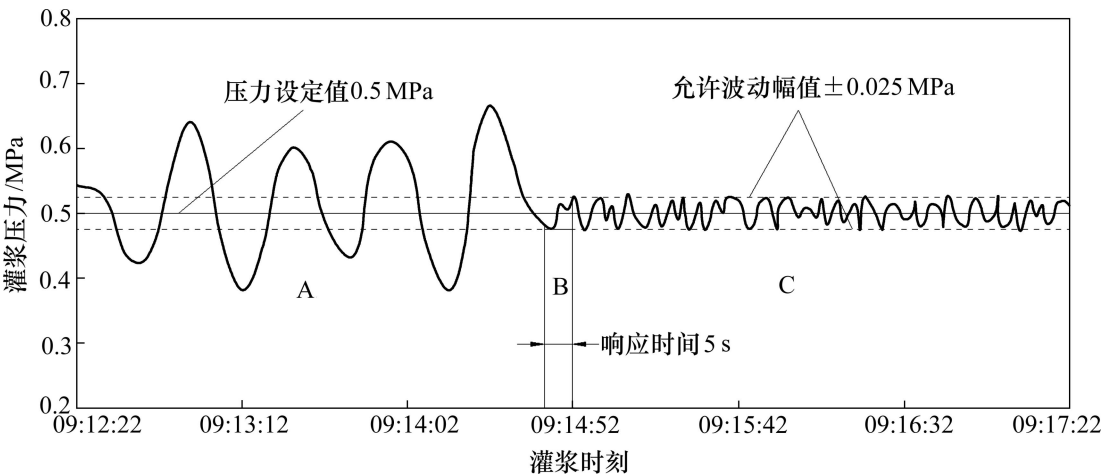


图 6 灌浆压力设定为 0.5 MPa 时压力的波动变化情况

Fig. 6 Changes of pressure under grouting pressure of 0.5 MPa

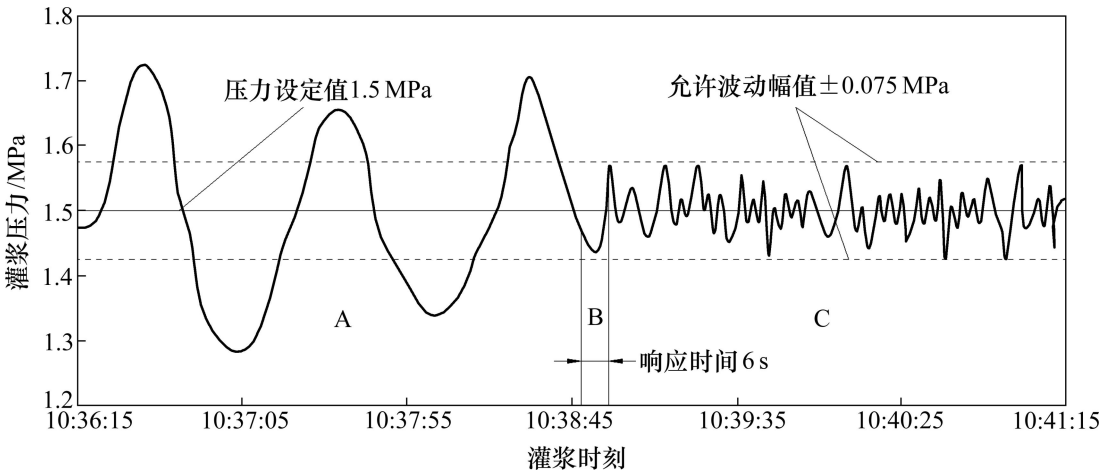


图 7 灌浆压力设定为 1.5 MPa 时压力的波动变化情况

Fig. 7 Changes of pressure under grouting pressure of 1.5 MPa

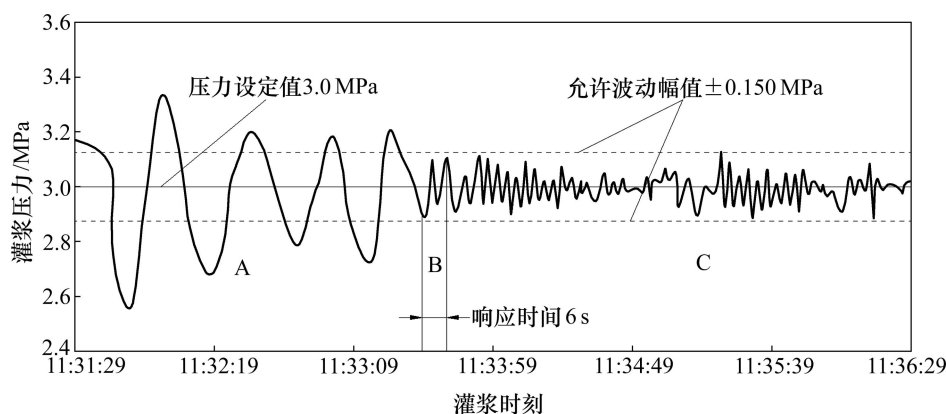


图8 灌浆压力设定为 3.0 MPa 时压力的波动变化情况

Fig. 8 Changes of pressure under grouting pressure of 3.0 MPa

1.5 和 3.0 MPa 设定压力值, 分别在 5、6 和 6 s 的响应时间内将压力的波动控制在 $\pm 0.025$ 、 $\pm 0.075$  和 $\pm 0.150$  MPa 的范围内, 达到了设计精度要求(压力设定值的 5%), 有效控制了灌浆压力的非线性超值波动。如果采用人工控制模式, 即施工员根据实际灌浆情况, 凭借操作经验调节手动阀 PV03 开度来控制压力波动, 多次实测的最佳控制结果是在 30~60 s 的操作反映时间内, 将压力波动控制在设定值的 15%~20% 范围内。可见, 人工控制误差很大, 而且严重依赖操作人员的操作经验和工作效率。

### 3 结论

1) 参数自适应模糊 PID 控制算法有效消除了系统耦合, 解决了稳态误差和余差带来的控制精度问题, 能够适应灌浆压力的非线性波动并表现出良好的控制品质, 具有良好的稳定性和较强的自适应能力。

2) 灌浆压力稳定控制系统的控制精度在压力设定值的 5% 以内, 控制响应时间为 5~6 s, 控制稳定性较好, 其控制性能优于现行人工控制模式, 满足实际灌浆工况下压力稳定控制的需要。

3) 灌浆压力稳定控制系统研究尚处于初步阶段, 仍有待于进一步的理论与试验研究, 如对灌浆管路进行静态和动态瞬变分析以改进控制算法, 从而提高控制精度, 以及在现场灌浆中应用, 以验证其控制性能等。

### REFERENCES

[1] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 2002: 75-103.

ZHANG Jing-xiu. Technology of base of dam permeate proof and grouting [M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydropower Press, 2002: 75-103.

[2] GUSTAFSON G, STILLE H. Prediction of grout ability from grout properties and hydrogeological data [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996, 11(3): 325-332.

[3] 李凤玲, 申群太, 徐力生. 灌浆压力的非线性建模预测[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6535-6537, 6541.

LI Feng-ling, SHEN Qun-tai, XU Li-sheng. Nonlinear model predictive pressure for grouting system [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6535-6537, 6541.

[4] ZHANG Min, WANG Xing-hua, WANG You. Numerical evaluation of uplifting effect for upper structure by grouting [J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(2): 553-561

[5] 李凤玲. 灌浆压力控制系统的关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 15-19.

LI Feng-ling. Research on key technologies of grouting pressure control system [D]. Changsha: Central South University, 2009: 15-19.

[6] 罗长军. 劈裂式灌浆技术在孤石滩水库闸坝接头段隐患处理中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 739-744.

LUO Chang-jun. Application of split grouting to treatment with the hidden troubles of joint segment of sluice and dam of Gushitan Reservoir [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 739-744.

[7] YANG Xiao-li, ZOU Jin-feng. Estimation of compaction grouting pressure in strain softening soils [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(4): 653-657.

[8] 王柏乐, 刘瑛珍, 吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 63-65.

WANG Bai-le, LIU Ying-zhen, WU He-he. New development of China earth and stone dam project construction [J]. Water Power, 2005, 31(1): 63-65.

- [9] 陈伟. 裂隙岩体灌浆压力及其稳定性控制方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008: 15-20.  
CHEN Wei. Study on grouting pressure and its stabilization controlling method in fractured rock mass [D]. Changsha: Central South University, 2008: 15-20.
- [10] 陈彦玉. 混凝土坝裂缝灌浆关键技术问题探讨[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 54-58.  
CHEN Yan-yu. Key technologies issues of crack grouting in concrete Dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(3): 54-58.
- [11] ZHANG Min, WANG Xing-hua, WANG You. Mechanism of grout bulb expansion and its effect on ground uplifting [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3): 874-880.
- [12] SADEGH E, MOHAMMAD R S, SAEED T. Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12(1): 39-54.
- [13] 来鑫, 乌建中, 周文, 张大兵. 桩锤同步振动系统的机电耦合特性及同步控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 920-925.  
LAI Xin, WU Jian-zhong, ZHOU Wen, ZHANG Da-bing. Synchronization control and electromechanical coupling characteristics of pile hammer synchronous vibration system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(6): 920-925
- [14] 宋淑然, 阮耀灿, 洪添胜, 代秋芳, 张丞. 果园管道喷雾系统药液压力的自整定模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 157-161.  
SONG Shu-ran, RUAN Yao-can, HONG Tian-sheng, DAI Qiu-fang, ZHANG Cheng. Self-adjustable fuzzy PID control for solution pressure of pipeline spray system in orchard [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 157-161.
- [15] 修智宏, 任光. T-S 模糊控制系统的稳定性分析及系统化设计[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 731-741.  
XIU Zhi-hong, REN Guang. Stability analysis and systematic design of T-S fuzzy control system [J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(5): 731-741.
- [16] 杜福银. 基于神经网络的风力辅助提水系统自适应 PID 解耦控制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 165-168.  
DU Fu-yin. Adaptive PID decouple control strategy for wind power aided pumping water system based on neural network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 165-168.
- [17] 文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机组的模糊 PID 控制与特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 76-81.  
WEN Le, GAO Lin, DAI Yi-ping. Study on fuzzy PID control of turbine-driven centrifugal compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 76-81.
- [18] 丁虎, 张健沛. PID 参数整定新方法在锅炉蒸汽压力系统中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 163-168.  
DING Hu, ZHANG Jian-pei. A new method for PID parameters tuning and its application in boiler steam pressure system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 163-168.
- [19] 王文全, 张立翔, 闫妍. 压力供水管路事故停泵时缓闭蝶阀关闭方式的优化[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(10): 1135-1138, 1152.  
WANG Wen-quan, ZHANG Li-xiang, YAN Yan. Optimization of closing ways of slow closing check valve by accidental pump-stop in pressure water supply pipeline [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(10): 1135-1138, 1152.
- [20] 祝汝松, 汤更生, 陈志强, 张俊生. 燃烧加热器气动阀门阀后压力的模糊控制[J]. 实验流体力学, 2010, 24(1): 89-94.  
ZHU Ru-song, TANG Geng-sheng, CHEN Zhi-qiang, ZHANG Jun-sheng. The fuzzy control of pressure after the air-driven valve in combustion heater [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(1): 89-94.
- [21] 彭彦卿, 罗键, 兰维瑶. 基于模式识别的脉冲压力自适应控制[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2351-2356.  
PENG Yan-qing, LUO Jian, LAN Wei-yao. Adaptive control of pulse pressure based on pattern recognition [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2351-2356.
- [22] 彭环云, 张可能, 徐力生. 灌浆自动记录系统打印功能的实现[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(6): 1004-1008.  
PENG Huan-yun, ZHANG Ke-neng, XU Li-sheng. Design of thermal printer for grout-recording system [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(6): 1004-1008.
- [23] DL/T5148-2012. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S]. 2012.  
DL/T5148-2012. Technical specification for cement grouting construction of hydraulic structures [S]. 2012.

(编辑 龙怀中)