

# 舞台升降台的同步控制策略研究与应用

汤子龙<sup>1</sup>, 马卫南<sup>2</sup>

(1. 甘肃工大舞台技术工程有限公司, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对舞台控制中多个升降台因负载多变、机械间隙等因素引起的不同步问题, 提出了在耦合控制算法的基础上引入位置偏差耦合的同步控制方式, 并结合模糊 PID 控制算法来实现多个升降台的同步控制。仿真研究以及工程应用表明, 基于模糊 PID 算法的位置偏差耦合控制系统较普通控制系统有更好的响应速度、控制精度以及抗干扰能力。

**关键词:** 舞台升降台; 同步控制; 模糊 PID 控制

[中图分类号] TM301.2 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2012)06-0011-03

## Research and Application of Synchronous Control Method for Stage Elevator

TANG Zi-long<sup>1</sup>, MA Wei-nan<sup>2</sup>

(1. Gansu Gongda Stage Technology & Engineering Co. Ltd, Lanzhou Gansu 730050, China;

2. Department of Electrical and information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China)

**Abstract:** For the non-synchronous problem caused by load variation and clearance between mechanical elements etc. on the stage control of multiple stage elevators, a position error-coupling synchronous control method is proposed based on the relative coupling strategy, and combined with fuzzy PID algorithm so that the synchronous control of multiple stage elevators is realized. The results of simulating and application in engineering shows that the position error-coupling synchronous control system based on fuzzy PID algorithm has more fast response speed, higher control accuracy and better anti-interference ability compared with a common control system.

**Keywords:** stage elevator; synchronous control; fuzzy PID control

## 0 引言

我国文艺舞台的繁荣, 各种剧场、演播厅等对舞台自动化要求越来越高, 相应对舞台控制系统也提出了更高的要求。升降台作为舞台下机械设备中应用最广泛的设备之一, 以多种形式出现在各种剧院以及诸多国际知名音乐厅里。它具有快速切换布景、根据表演的需求改变舞台形式的特点, 以满足舞台工艺布置和舞美设计的需要以及剧目编导人员的需求, 达到丰富舞台多功能的效果<sup>[1]</sup>。

在工业控制中, 常规 PID 控制器以结构简单, 对模型误差具有鲁棒性及易于操作等优点而得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。在现代的舞台控制系统中, 由于升降台的负载多变性、环境干扰、机械摩擦等诸多不确定性因素的存在, 造成数学模型参数不同。因此, 按照相同的参数对不同升降台进行 PID 控制, 将无法保证升降台之间的良好的配合。这就要求 PID 控制器具有一定自整定其参数的功能<sup>[3]</sup>, 以满足现代舞台控制要求。

针对以上舞台升降台控制的特点, 采用模糊 PID 控制器, 即根据一定模糊控制规则对 PID 控制器的参数进行实时优化, 以及位置偏差耦合同步控制方法来实现对舞台升降台的控制。经过实验仿真研究以及工程实践, 表明基于模糊 PID 的位置偏差耦合同步控制方法有着更好的同步效果。

## 1 升降舞台同步控制系统

### 1.1 升降舞台简介

以 3 个升降台的舞台为背景, 其结构如图 1 所示, 由 3 个升

降台构成一个圆形的升降舞台。其中每个升降台由一个 45 kW 电机来进行控制, 电机主轴通过减速器与柔性齿条结合, 把电机的旋转运动变为升降台的上升和下降运动。整个升降舞台行程为舞台台面以下 5.2 m 到舞台台面以上 1 m, 且能在行程内进行精确定位; 升降台的速度调节范围为 0.001 5 ~ 0.15 m/s; 升降

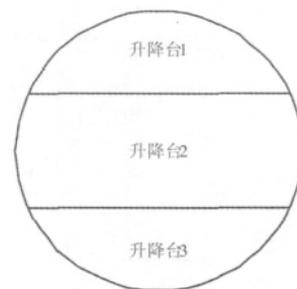


图 1 升降舞台结构

台的定位精度为  $\pm 2$  mm, 升降台之间的同步精度为  $\pm 3$  mm。

### 1.2 同步控制简介

在同步控制中, 最常见的有主从控制和并行控制。主从控制, 其结构以前一台电机的速度输出作为下一台电机的给定速度。这种结构稳态时同步性能好, 但在电机启动停止和负载扰动情况下控制对象之间会产生很大的同步误差。并行控制方式采用同一给定速度, 启动停止时的同步性能好, 但当一个控制对象出现扰动时, 其他电机不能很好的跟随。

结合前两种控制方式优缺点, 在并行控制中加入每一台电机的反馈信息, 即把每台电机的偏差值加权补偿到每一台电机给定环节中去, 得出偏差耦合的控制策略, 如图 2 所示。

由于每一台电机输入为同一给定值, 且电机的速度输入也引入了每一个升降台的反馈量, 对电机实现了补偿, 因此能得到很好的同步控制。图中的增益  $k_i$  用来补偿各个电机之间的转动惯量的不同。 $\omega^*$  为设定速度,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为电机的实际输出速度。

在实际控制中, 由于升降台的负载变化以及环境干扰, 需要

收稿日期: 2011-11-18

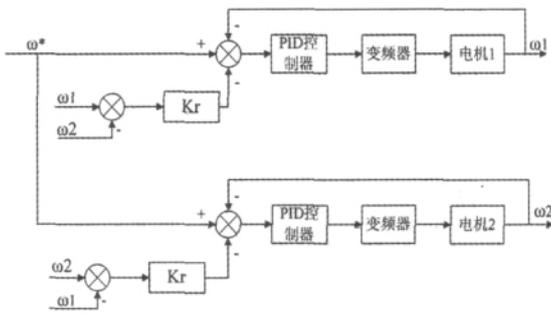


图2 两电机的偏差耦合控制

控制器的参数能够进行相应的调整。而常规PID控制器的参数整定后只能适应一定的负载与环境,当舞台布置的变化、负载和环境的改变,整个系统的同步性能会因此而受到影响。所以,需要控制器具有一定的自适应能力。采用可编程逻辑控制器(PLC)实现模糊PID控制算法,并结合现场总线技术,来满足同步控制精度和增强适应能力。

## 2 模糊PID控制器的设计

模糊PID控制器是由模糊控制器和PID控制器组成,其结构如图3所示。其中模糊控制器以误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 为输入,根据不同的误差以及误差变化率,利用模糊控制规则在线对PID参数进行修正。PID控制器在得到新的参数 $K_p, K_i, K_d$ 后,以误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 作为输入得到新的控制输出量 $U$ 。

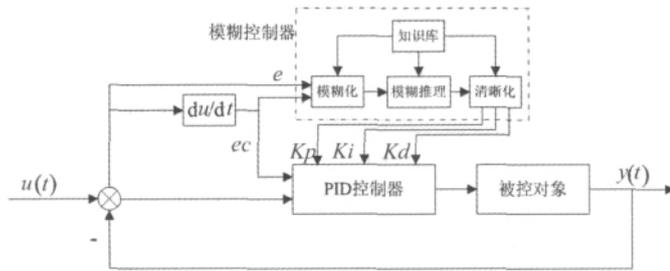


图3 模糊PID同步控制器

模糊控制器是模糊控制系统的核心部分,它主要由模糊化模块、模糊推理模块以及清晰化模块构成。而模糊推理又是模糊控制器的核心,它具有模拟人基于模糊概念的推理能力。其中,模糊化模块将得到的输入精确量转换成模糊量,模糊推理过程基于模糊蕴含关系及推理规则进行;清晰化模块则将模糊推理得到的模糊控制量变换成实际控制的清晰量。知识库中包含了具体应用领域中的相关知识和要求的控制目标。通常由数据库和模糊控制规则库组成。

输入变量误差和误差变化率的模糊子集划分为: {负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},其表示为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。隶属度函数采用三角隶属函数,边界值则采用高斯隶属函数。模糊控制规则是由多个模糊蕴含关系“若...则...”(IF...THEN...)构成。而对于模糊控制规则 IF  $E_i$  AND  $EC_i$  THEN  $\Delta K_i = U_i (i = 1, 2, \dots, 49)$ ,其模糊蕴含用最小值法:

$$u_{U_i}(\Delta K_p) = u_{E_i}(e) \wedge u_{EC_i}(ec) \wedge u_{U_i}(\Delta K_p) \quad (1)$$

模糊合成采用最大法,推理法则为:

$$u_{U_i}(\Delta K_p) = u_{U_1}(\Delta K_p) \vee u_{U_2}(\Delta K_p) \vee \dots \vee u_{U_{49}}(\Delta K_p) \quad (2)$$

清晰化方法采用加权平均法(重心法),即在一次采样时刻,  $\Delta K_p$  的值可由模糊输出  $U$  的中心确定<sup>[4]</sup>。

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{j=1}^{49} u_{U_j}(\Delta K_p) \cdot \Delta K_p}{\sum_{j=1}^{49} u_{U_j}(\Delta K_p)} \quad (3)$$

其中:  $u_{U_j}(\Delta K_p) (j = 1, 2, \dots, 49)$  是  $\Delta K_p$  的隶属度。同理得出输出量  $\Delta K_i$ 。经过调整后作为PID控制器的参数。

$$\begin{aligned} K_p &= \Delta K_p + K_{p0} \\ K_i &= \Delta K_i + K_{i0} \\ K_d &= \Delta K_d + K_{d0} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中  $K_{p0}, K_{i0}, K_{d0}$  为控制器参数的初始值。

## 3 仿真研究

### 3.1 模糊PID控制器的实现

在模糊控制规则中,包含模糊输入空间和模糊输出空间。在此,位置偏差、位置偏差变化率为模糊输入空间,比例、积分、微分的增量为模糊输出空间,均定义为 {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。根据升降舞台控制要求的同步精度为  $\pm 3$  mm 和定位精度为  $\pm 2$  mm,将其变换到位置偏差  $e$  和位置偏差变化量  $ec$  论域  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;模糊输出量  $\Delta K_p$  量化论域为  $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ ,  $\Delta K_i$  量化论域为  $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ ,  $\Delta K_d$  的量化论域为  $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ 。隶属度函数如图4所示。

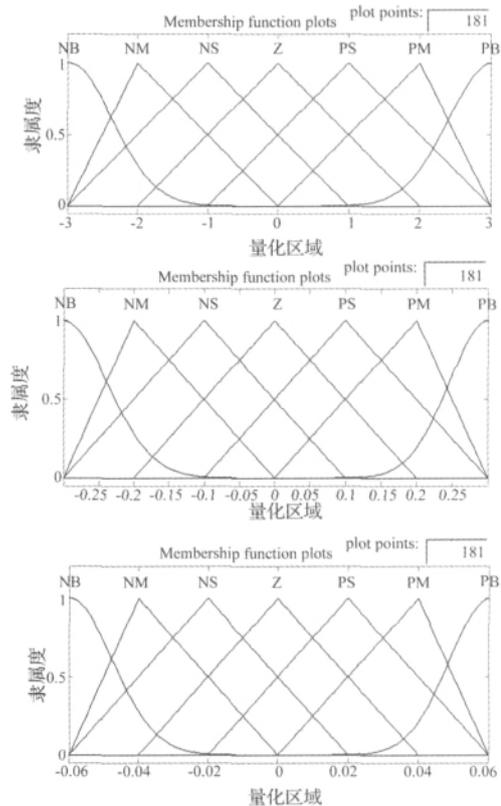


图4 隶属度函数

模糊控制规则是模糊控制的核心,它对整个系统的控制性能具有决定性的作用。从系统的稳定性、响应速度、超调量以及稳

态时的精度等各方面考虑  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的作用如下<sup>[5]</sup>：

(1) 比例系数  $K_p$  影响着整个系统的响应速度以及调节精度。 $K_p$  值越大,系统反应越快,调节精度越高,但这样也容易产生超调,导致系统的不稳定。而  $K_p$  取值过小,则系统调节精度降低,响应速度变慢,从而延长调节时间,使系统性能变坏。

(2) 积分系数  $K_i$  用于系统消除静态误差, $K_i$  取越大时,系统的静态误差消除越快,但  $K_i$  过大时,在响应过程初期会产生积分饱和,从而导致响应过程的超调。而  $K_i$  过小,系统静态误差则很

难消除,影响了系统调节精度。

(3) 微分系数  $K_d$  用于改善系统的动态特性,在系统响应过程中抑制偏差变化,对偏差变化提前进行预报。 $K_d$  过大,会使系统提前抑制,响应变慢,延长调节时间,同时也会降低系统抗干扰能力。

根据以上 PID 参数的作用,结合实际中操作人员和调试人员在升降舞台同步控制中对负载变化及出现扰动时的多年操作经验,建立以下规则表:

表 1  $\Delta K_p$  的模糊规则

$\Delta K_p$	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
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB	NB

表 2  $\Delta K_i$  的模糊规则表

$\Delta K_i$	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
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	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3  $\Delta K_d$  的模糊规则表

$\Delta K_d$	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
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

### 3.2 系统仿真

由于实际工程中采用的交流电机动态过程为非线性微分方程,考虑交流电机模型可通过矢量变换近似等效为直流电机模型,而额定励磁下直流电机是一个二阶线性环节,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1/C_e}{T_m T_l s^2 + T_m s + 1} \quad [6]$$

$T_m$  和  $T_l$  两个时间常数分别为机电惯性和电磁惯性。因此,在实验仿真中的控制对象的数学模型采用

此二阶系统模型。由于电机机电惯性和电磁惯性的时间常数不同,仿真中的电机参数选择也将有所区别。在 simulink 仿真平台下,根据设计的同步控制方案,其仿真模型如图 6 所示,图 5 为模糊 PID 控制的结构图,图 7-8 为仿真结果图。

从仿真的结果图可以看出,在电机启动以及电机的负载发生变化时,在模糊 PID 控制方式下较常规控制方式表现出更好的同步性能。

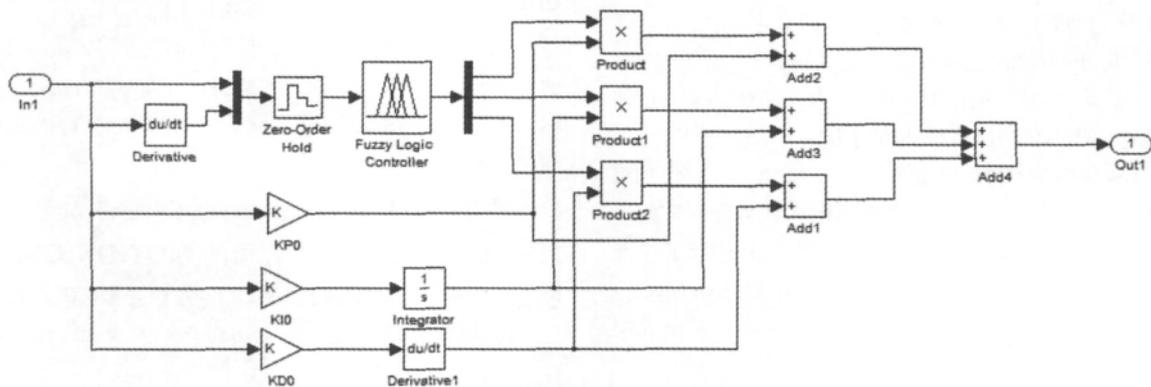


图 5 模糊 PID 控制结构图

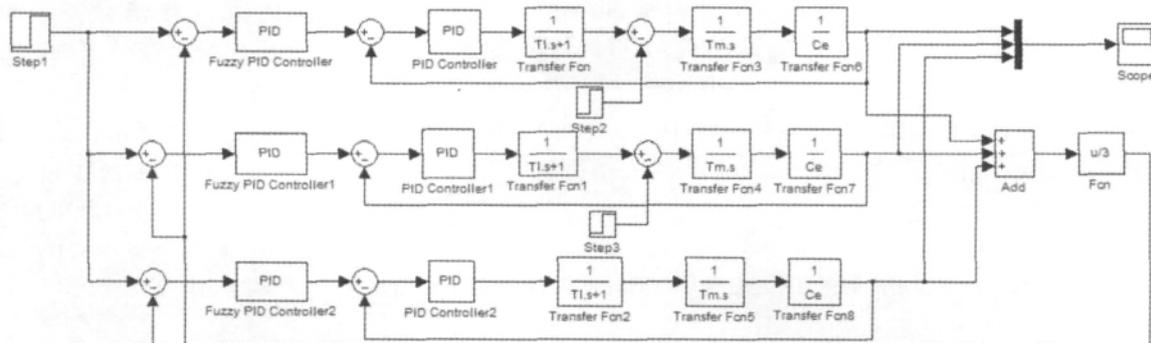


图 6 三电机偏差耦合同步控制

(下转第 48 页)

度越快,表明该算法的收敛性能越好。图2、图3分别绘制了IEEE-30和LP-67系统的补偿间隙变化曲线,显然补偿间隙呈二次下降趋势衰减至给定的精度。

### 5 结束语

本文建立了一种考虑输电网功率因数的无功优化模型,比较了模型一与模型二两种形式,并分析了相应的现代内点算法,总体具备如下特点:

(1) 显著优化输电网功率因数,提高了电网的输电效率,进而改善了供电质量。

(2) 模型二在等式约束中增加线路传输功率约束,简化了不等式约束,降低求解过程中高阶修正方程组系数矩阵产生的非零注入元素的数目,程序编写和运行的效率较高,尤其对于大型电力系统,效果更为显著。

(3) 采用现代内点算法,收敛稳定,鲁棒性强,可满足在线运行的要求。

对五个IEEE标准系统和一个实际系统进行优化计算,获得了较为理想的结果,本文的建模思想为求解含大规模复杂不等式约束的问题提供了全新的思路。

#### 参考文献:

[1] 杜志勇,王鲜芳,冯星辉.一种新型的单级功率因数校正AC/DC变换器的设计[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):110-113.

[2] 杭丽君,吕征宇,JOSEP M. GUERRERO.中大功率单级功率因数校正变换器中的偏磁分析及其数字化抑制技术[J].中国电机工程学报,2009,29(3):14-22.

[3] 邹建龙,马西奎,杨宇.功率因数校正Boost变换器中慢时标分岔的影响因素分析与分岔控制[J].中国电机工程学报,2010,30(3):1-7.

[4] 熊飞,张军明,钱照明.寄生参数对有源功率因数校正器电流畸变的影响[J].中国电机工程学报,2010,30(21):40-47.

[5] 顾军,王清灵,郭家虎.基于SVG的电网功率因数控制系统[J].电力自动化设备,2011,31(2):40-43,47.

[6] 薛斌,祝云,韦化.基于调度自动化系统的无功优化实用研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(6):40-43,56.

[7] 马晋强,L. L. Lai,杨以涵.遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(5):347-353.

[8] 陈敬宁,何桂贤.带杂交、变异因子的自适应蚁群算法在电力系统无功优化中的应用[J].继电器,2003,31(11):36-39,43.

[9] 袁辉,徐贵光,周京阳.基于模糊线性规划的无功电压优化[J].电网技术,2003,27(12):42-45,57.

[10] 朱向阳.基于改进禁忌搜索算法的配电网电压无功优化控制[J].继电器,2006,34(14):35-37.

[11] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996.

[12] 郭瑞鹏,韩祯祥,王勤.电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J].中国电机工程学报,1999,19(4):14-17.

[13] 陈星莺,钱锋,杨素琴.模糊动态规划法在配电网无功优化控制中的应用[J].电网技术,2003,27(2):68-71.

[14] 方述诚,S.普森普拉.线性优化及扩展理论与算法[M].北京:科学出版社,1994.

[15] H. Wei, H. Sasaki, R. Yokoyama. An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems[J]. IEEE Transactions On Power Systems, 1996, 11(1): 260-266.

[16] H. Wei, H. Sasaki, J. Kubokawa, et al. An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with A Novel Data Structure[J]. IEEE Transactions On Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.

【作者简介】陈宇(1975-),女,江苏南通人,本科,高级工程师,高级技师,主要从事电力系统的管理工作;薛斌(1982-),男,江苏如皋人,博士研究生,硕士,工程师,技师,主要从事电力系统的安全与维护工作。

(上接第13页)

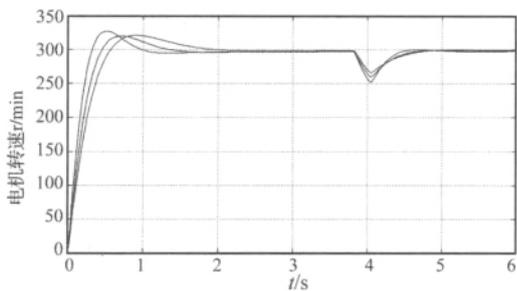


图7 常规PID同步控制

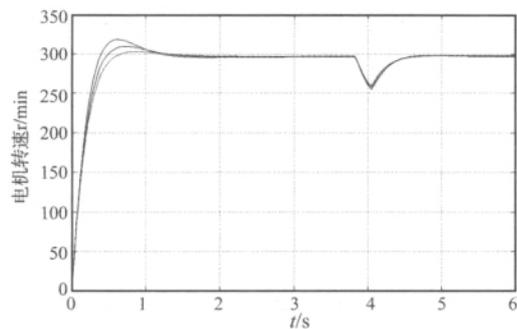


图8 模糊PID同步控制

### 4 结束语

本文以三个升降台的同步控制问题为例,开展了基于模糊PID控制的位置偏差耦合同步控制的仿真与实验研究。仿真和实验结果表明,模糊PID控制和常规PID控制都能有效实现多电机同步控制功能,但前者在控制的稳定性以及同步跟随性能方面都要优于后者,尤其在启动以及负载变化和存在干扰的情况下表现尤佳。因此,此控制方式更适合于负载多变性的多个升降台的同步控制。

#### 参考文献:

[1] 葛永飞等.舞台升降台的设计[J].起重运输机械,2005,8(5):24-25.

[2] 吴振顺等.模糊自整定PID控制器的设计及其应用[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(11):1578-1580.

[3] H. B. Kazemian. Developments of fuzzy PID controllers [J]. Expert Systems, November 2005, 22(5): 254-264.

[4] 曹新松等.基于模糊自整定PID算法的压电柔性机械臂振动控制研究[J].2010,29(12):181-187.

[5] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2007.

[6] 先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2004.

【作者简介】汤子龙(1962-),男,甘肃兰州人,高级工程师,主要研究舞台机械先进控制。马卫南(1982-),男,湖南邵阳人,兰州理工大学电气工程与信息工程学院硕士研究生,研究方向电力系统及其自动化。