

文章编号: 1000-8152(2007)01-0122-05

板料拉深成形液压系统模糊控制建模

朱 伟, 董湘怀, 张质良

(上海交通大学 国家模具CAD工程研究中心, 上海 200030)

摘要: 针对板料拉深成形系统中的变压边力液压控制动态性能和稳态精度较差的难题, 建立了一个基于模糊 PID 自适应调整的液压模糊控制模型, 并借助 MATLAB 仿真得到了控制参数的优化模糊查询表. 最后结合实际板料拉深成形系统, 选取两种变压边力加载模式进行实时变压边力模糊控制应用效果验证. 应用结果表明: 采用模糊 PID 自适应控制方式可大大改善拉深成形液压控制系统的动态响应性能和稳态精度. 当压边力输入曲线为4吨的阶跃信号, 模糊控制下系统的最大超调量仅为理想设定值的4.25%, 大大小于原来无 PID 控制时的21.24%及常规 PID 控制下的31.07%, 且达到稳定状态的调节高度也大大缩小, 仅略为5 mm 左右, 调节时间略为0.24 s; 而当输入为U型变压边力加载曲线时, 系统的最大超调量比原来无 PID 控制时下降了约5%, 且达到稳态时的调节高度也缩短了约1 mm 左右, 使整个拉深变压边力系统的动态性能和稳态精度得到了有效的提高.

关键词: 模糊控制; 板料拉深成形; 液压系统; PID 自适应控制器; MATLAB

中图分类号: TG38, TP29 **文献标识码:** A

Modeling of fuzzy control in sheet deep drawing

ZHU Wei, DONG Xiang-huai, ZHANG Zhi-liang

(National Die&Mould CAD Engineer Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: To deal with the undesirable dynamic response and the low steady-state precision of the hydraulic control in sheet-deep drawing, a fuzzy control model is built based on fuzzy adaptive PID adjustment rules. The look-up table for optimal control parameters is generated from MATLAB Toolbox. Two load profiles of variable blank holder force (VBHF) in real tests are applied for testing the real-time effect of VBHF. Experimental results show that when the input signal is a constant VBHF, the over-shoot under this fuzzy control of adaptive PID controller is less than 4.25% of the set-point value, in comparison with the 21.24% with no PID controller and the 31.07% with conventional PID controller. The regulation height and the regulation time are reduced to 5 mm and 0.24 s respectively. When the input signal is a U mode of VBHF, the over-shoot is decrease by 5% from the value when no PID is applied, and the regulation height also decreased by 1 mm. These demonstrate that the proposed fuzzy model effectively improves the dynamic response and raises the steady-state precision of the VBHF system.

Key words: fuzzy control; sheet deep drawing; hydraulic pressure system; adaptive PID controller; MATLAB

1 引言(Introduction)

由于存在诸如比例控制阀工作死区、伯努利流量公式、摩擦力等非线性特性以及阻尼系数、流量系数、油温、负载及外界工作环境时变性等原因, 现实液压控制系统中普遍存在着非线性、动态突变性、外负载干扰和交叉干扰等对系统控制性能影响较大的因素, 所以经典和后来的现代控制理论在一些特殊工程应用场合越来越难获得到满意的系统动态响应性能和稳态精度. 为更有效地解决板料拉深成形过程中有关变压边力液压控制系统动态性能较差的难题, 本研究应用模糊控制相关理论^[1~6], 建立了拉深成形液压机的变压边力模糊控制系统, 以此来提升板料拉深成形中变化压边力的应用效果.

2 比例溢流阀模糊控制器的建立(Establishment of fuzzy controller for proportional overflow valve)

2.1 液压系统的组成(Constitution of hydraulic system)

此液压系统主要用于金属板料拉深成形工序, 其倒装结构如图1所示. 通过计算机精确控制顶出缸中比例溢流阀的开度, 从而在控制主缸向下运动压制板料时, 根据液压油不可压缩原理及机械部分的作用力与反作用力, 顶出缸能够实时调节作用在压边圈上的压边力大小, 从而实现变压边力拉深成形. 由于原设备中液压系统的时间常数较大, 且存在液泵效率及局部存在漏油等可变因素的影响作用, 因此要完全依赖于建立控制对象模型的常规PID控制方式显然无法达到理

想的动态响应性能效果和稳态精度; 而且常规PID控制器还存在着参数修改不方便的缺陷, 即3个控制参数 K_p , K_i 和 K_d 可能只对某些输入值特别有效. 此时如果能借助模糊控制理论实现PID控制器的参数在线自整定, 那么就可进一步完善了PID控制器的性能, 以适应控制系统的参数变化和外界工作条件的变化^[7].

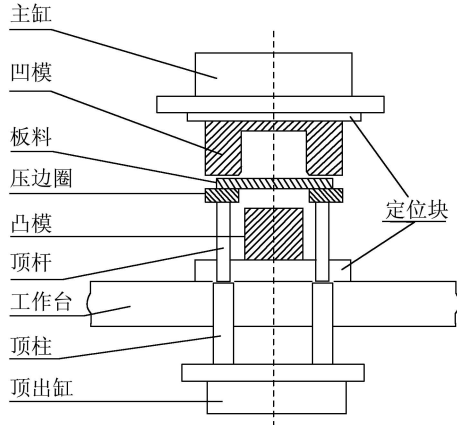


图 1 薄板拉深压机整体结构示意图
Fig. 1 Structure of deep drawing machine

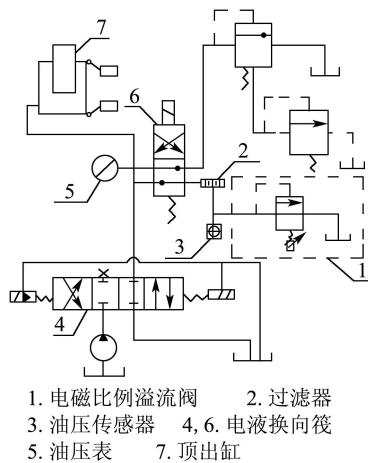


图 2 液压系统控制油路图
Fig. 2 Oil control of hydraulic pressure system

为了对此液压系统进行精确计算机数字标定, 图2中增加一个油压传感器(最大量程为10 Mpa, 精度为0.001 Mpa), 用于实时采集顶出缸油路中的真实油压大小。

2.2 模糊控制器的设计(Design of fuzzy controller)

取误差 e 和误差变化率 ec 作为输入, 取PID控制器3个参数的变化量 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 作为输出, 实现思想是先找出PID3个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 ec , 再根据事先经验建立的模糊控制规则对3个参数进行在线修改, 以此来满足不同时刻 e 和 ec 对PID参数自适应整定的要求, 从而使被控对象具有良好的动态性能. 具体控制策略流程如图3所示.

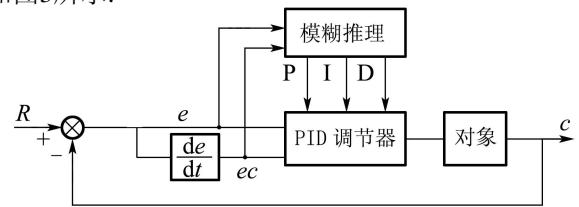


图 3 自适应模糊PID控制器
Fig. 3 Self-adaptive fuzzy PID controller

设定输入变量 e 和 ec 以及输出变量 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊集分别为:

$$e, ec, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d : \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}.$$

根据所选比例溢流阀的阀口可调压力范围为0.7~10 Mpa和实际调控要求, 相应的输入和输出变量的基本论域和模糊论域分别为:

$$\begin{aligned} \text{基本论域: } e: [-10, 10], ec: [-5, 5], \Delta K_p: [-0.3, 0.3], \Delta K_i: [-0.06, 0.06], \Delta K_d: [-3, 3]; \\ \text{模糊论域: } e: [-3, 3], ec: [-3, 3], \Delta K_p: [-0.3, 0.3], \Delta K_i: [-0.06, 0.06], \Delta K_d: [-3, 3]; \end{aligned}$$

另外, 设定各个参数的量化等级分别为 $e, ec, K_p, K_i, K_d = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$; 则相应的量化因子分别为:

$$K_e = 3 \div 10 = 0.3, K_{ec} = 3 \div 5 = 0.6, K_{up} = 1, K_{ui} = 1, K_{ud} = 1;$$

相关的隶属度离散表如表1所示.

表 1 e, ec, K_d, K_p 和 K_i 的隶属度离散化表
Table 1 Discrete membership table of e, ec, K_d, K_p and K_i

ec	e																					
	K_p			K_i					K_d													
	-3	-2	-1	0	1	2	3	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	-0.06	-0.04	-0.02	0	0.02	0.04	0.06	
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	0
NM	0	1	0.5	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0	1	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
PM	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0
PB	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0	0.5	1	0

2.3 模糊控制规则的形成与推理(Forming and reasoning of fuzzy control rules)

应用常规模糊条件和模糊关系 “If A and B then C” 的形式来建立相关初始模糊控制规则.

其基本规则是: 当误差较大时, 选择被控制量以尽快消除误差为主要出发点; 而当误差较小时, 选择保持系统稳定为主要出发点. 表2为 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 3个参数分别整定的初始模糊控制表.

表2 K_p, K_i, K_d 的初始模糊控制表

Table 2 Initial fuzzy control table of K_p, K_i, K_d

ec	e																					
	K_p							K_i							K_d							
	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB	
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	0	NB	NB	NB	NM	NM	0	0	PS	PS	0	0	0	0	PB	PB
NM	PB	PB	PM	PM	PS	0	0	NB	NB	NM	NM	NS	0	0	NS	NS	NS	NS	0	0	PS	PM
NS	PM	PM	PM	PS	0	NS	NM	NM	NM	NS	NS	0	PS	PS	NB	NB	NM	NS	0	PS	PM	
0	PM	PS	PS	0	NS	NM	NM	NM	NS	NS	0	PS	PS	PM	NB	NM	NM	NS	0	PS	PM	
PS	PS	PS	0	NS	NS	NM	NM	NS	NS	0	PS	PS	PM	PM	NB	NM	NS	NS	0	PS	PS	
PM	0	0	NS	NM	NM	NM	NB	0	0	PS	PM	PM	PB	PB	NM	NS	NS	NS	0	PS	PS	
PB	0	NS	NS	NM	NM	NB	NB	0	0	PS	PM	PB	PB	PB	PS	0	0	0	0	PB	PB	

3 实例仿真研究(Simulation study of real application)

借助MATLAB中Simulink工具箱集成的模糊

控制工具箱 “Fuzzy Logic Toolbox” 建立仿真模型, 如图4所示. 初始给定系统一个阶跃信号, 以检测系统的动态响应性能, 采样时间为1 ms.

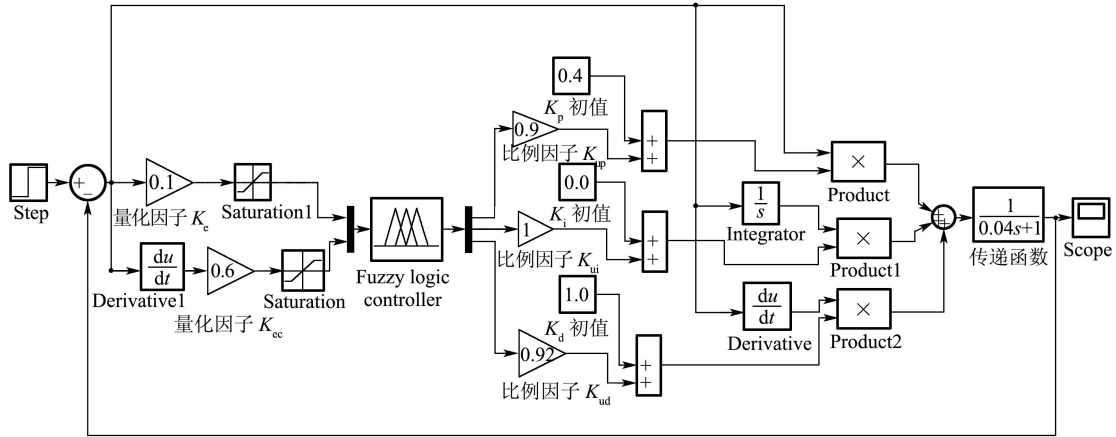


图4 Simulink仿真模型

Fig. 4 Simulink simulation model

仿真中不断地调整相关量化因子、比例因子以及参数的初值, 进一步改善所建系统模型的动态响应特性和稳态精度. 修改参数后对控制最后效果进行横向比较, 总结出以下规律:

1) 误差量化因子 K_e 大, 调节死区小, 上升速率大. 但是 K_e 取得过大, 将使系统产生较大的超调, 调节时间增大, 甚至产生振荡, 使系统不能稳定工作.

2) 误差变化量化因子 K_{ec} 大, 反应较迟钝; K_{ec} 小, 反应快, 上升速率大. 而 K_{ec} 过小, 会引起较大的超调, 使得调节时间变长, 严重时甚至不能稳定工作.

3) 单独增大 K_p 的比例因子或 K_p 的初始值都

会加快系统的响应速度, 缩短上升时间, 但过大会引起超调现象, 使系统调节时间变长. 相比而言, 增大 K_p 的初始值要比增大比例因子的作用强些, 因此当需要大幅度提高系统响应速度时, 采用增大 K_p 初值的办法, 需要微调时采用增大 K_p 的比例因子的办法.

4) 单独减小 K_i 的比例因子会使系统上升时间缩短, 但过小又使系统产生超调现象. 而增大 K_i 的初始值, 则会使系统产生稳态误差.

5) 单独增大 K_d 的比例因子可适当减小超调量, 但会延长上升时间, 并使系统进入稳态的时间变长. 改变 K_d 的初始值的作用与它相同, 但相比而言 K_d 的初始值改变的作用影响更大. 因此 K_d 的

初值可用于粗调, 而 K_d 的比例因子可用于微调.

根据上述各个参数对系统响应的作用规律, 经过反复调整仿真和比较后, 最终得到一组较为理想的参数组合:

$$K_e=0.1, K_{ec}=0.6, K_{up}=0.9, K_{ui}=1, \\ K_{ud}=0.92, K_{p0}=0.4, K_{i0}=0.0, K_{d0}=1.0.$$

在这一组参数作用下, 系统具体动态响应曲线如图5所示. 相应的误差以及参数 K_p, K_i, K_d 的变化曲线如图6和7所示.

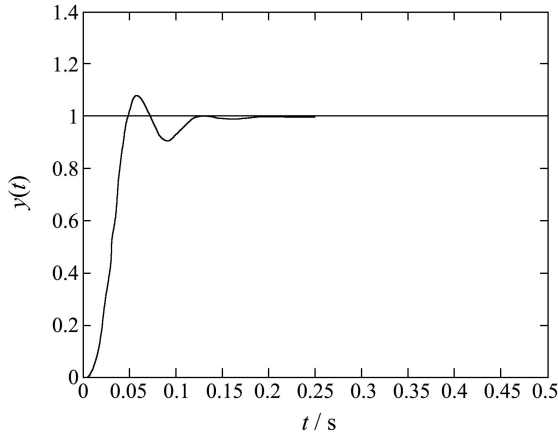


图 5 MATLAB仿真效果图

Fig. 5 Effect of simulation in MATLAB

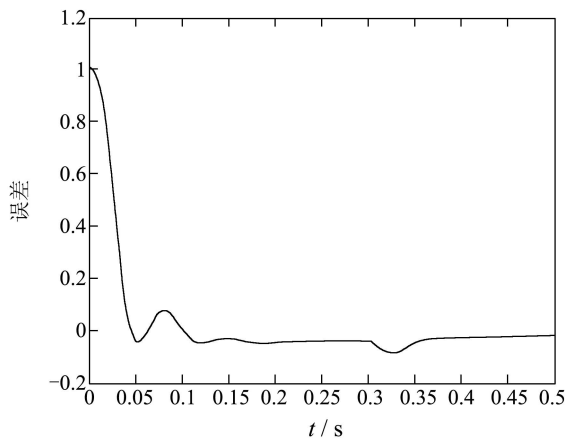


图 6 误差变化趋势图

Fig. 6 Variation trend of error

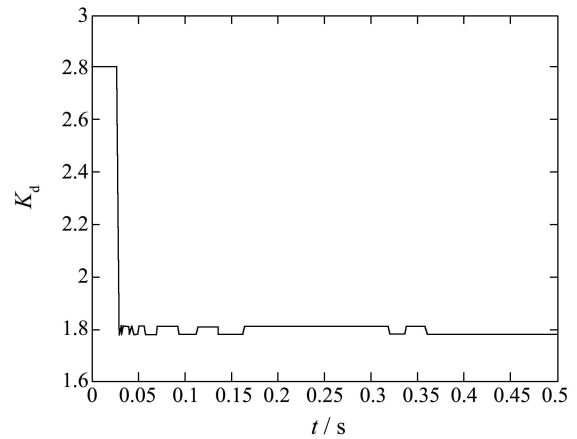
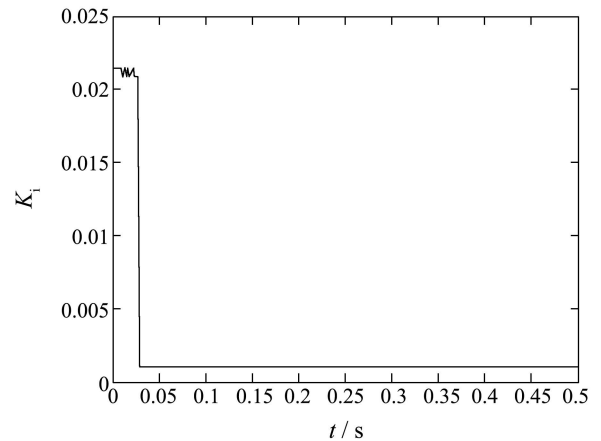
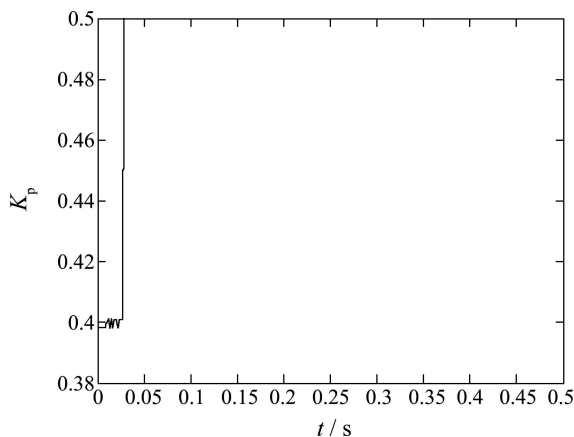


图 7 K_p, K_i, K_d 变化趋势图

Fig. 7 Variation trend of K_p, K_i, K_d

4 实例实验研究(Real application study)

MATLAB仿真结束后, 依据仿真结果编写相应的算法程序在计算机中实现模糊控制器. 实际工程应用当中, 常采用查表法的方式来具体实现模糊控制器. 本研究根据参数 K_p, K_i 和 K_d 对系统输出特性的影响情况, 归纳出在一般情况下, 在不同的 $|e|$ 和 $|ec|$ 时, 被控过程对参数 K_p, K_i 和 K_d 的自整定调整规则为:

1) 当 $|e|$ 较大时, 为了加速系统的响应速度, 并且避免因开始时偏差 e 的瞬时变大而可能引起的微分过饱和现象, 从而使得控制作用超出许可范围, 应取较大的 K_p 和较小的 K_d ; 同时为了防止积分饱和, 避免系统响应出现较大的超调, 此时应去掉积分作用, 取 $K_i=0$.

2) 当 $|e|$ 和 $|ec|$ 为中等大小时, 为了使系统响应超调减少, K_i 和 K_d 都不能取大, 但应取较小的 K_i 值. K_p 和 K_d 值的大小要适中, 以保证系统的响应速度.

3) 当 $|e|$ 较小时, 为使系统具有良好的稳态性能, 应增大 K_p 和 K_i 值; 同时为避免系统在设定值附近出现振荡现象, 并同时考虑到系统的抗

干扰性能, 应适当地选取 K_d 值. 其基本原则为: 当 $|ec|$ 较小时, K_d 值可取大些, 通常取为中等大小; 而当 $|ec|$ 值较大时, K_d 应取小些.

依据这些自整定规则进行一系列调整试验, 逐步调整出实际系统模糊控制规则表, 最终 ΔK_p , ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊调整规则见表3所示.

表3 K_p, K_i, K_d 的模糊控制表
Table 3 Fuzzy control table of K_p, K_i, K_d

ec	e																				
	K_p							K_i							K_d						
	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2	3	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	0.3	0.3	0.2	0.2	0	0.01	-0.02	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	0	0	1	-1	-2	-2	-2	-1	1
-2	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0	-0.01	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	-0.02	0	0	1	-1	-2	-2	-2	-1	0
-1	0.2	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.05	-0.04	-0.02	-0.02	0	0.02	0.02	0	-1	-2	-2	-1	-1	0
0	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.04	-0.04	-0.02	0	0.02	0.04	0.05	0	0	-1	0	-1	-1	0
1	0.1	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.04	-0.02	0	0.02	0.02	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0
2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0	0	0.03	0.02	0.04	0.05	0.05	2	0	1	1	1	1	3
3	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	0	0	0.02	0.04	0.04	0.05	0.05	3	2	2	2	1	1	3

为了验证实际液压系统的模糊控制效果, 选取两条变压边力控制曲线进行实例验证. 一条为常规的定常值压边力控制曲线, 另一条为U型的变压边力控制模式. 模糊控制实际应用效果具体如图8所示.

当压边力输入为4 T(吨)的阶跃信号(图8(a)), 系统的最大超调量仅为理想设定值的4.25%, 大大小于原来无PID控制时的21.24%及常规PID控制下的31.07%, 且模糊控制下达到稳定状态的调节拉深高度也大大缩小, 仅略为5 mm左右, 调节时间略为0.24 s, 系统动态性能和稳态精度得到大大提高; 而当设定压边力控制曲线为U型时(6吨-4吨-6吨), 其最终模糊控制效果如图8(b)所示. 模糊控制下系统的最大超调量小于设定曲线对应值的10%, 达到稳态时的调节拉深高度约为2 mm左右; 反观无PID控制时, 其最大超调量为14.67%, 调节拉深高度为3 mm左右.

5 结束语(Conclusion)

采用模糊自适应PID调节方式来控制板料拉深成形过程中施加压边力作用的复杂液压系统, 根据自然语言建立了相应的模糊控制模型. 实践结果证明: 采用模糊控制方法可以使被控系统的动态响应速度和超调量得到很好的控制, 达到满意的结果.

参考文献 (References):

- [1] SANTOS M, DEXTER A L. Control of a cryogenic process using a fuzzy PID scheduler[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(10): 1147 - 1152.
- [2] MANUKID P, CHAROEN N. K_i nematics control of a pneumatic system by hybrid fuzzy PID[J]. *Mechatronics*, 2001, 11(8): 1001 - 1023.
- [3] RODRIGO M A, SECO A, FERRER J, et al. Nonlinear control of an activated sludge aeration process: use of fuzzy techniques for tuning PID controllers[J]. *ISA Trans*, 1999, 38(3): 231 - 241.
- [4] GHOSHAL S P. Optimizations of PID gains by particle swarm optimizations in fuzzy based automatic generation control[J]. *Electric Power Systems Research*, 2004, 72(3): 203 - 212.
- [5] LU Jialiang, CHEN Guangrong, YING Hao. Predictive fuzzy PID control: theory, design and simulation[J]. *Information Sciences*, 2001, 137(1-4): 157 - 187.

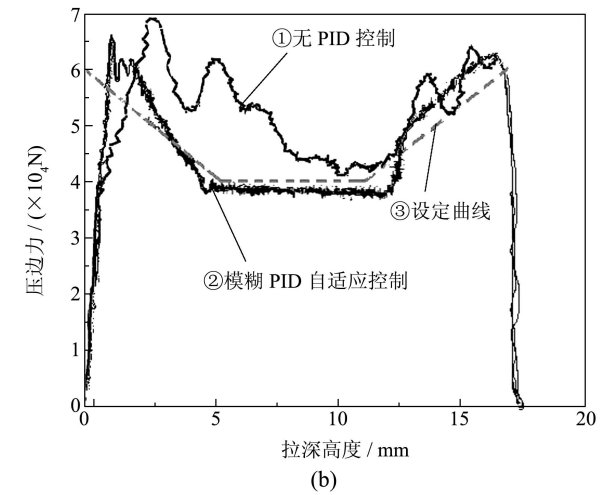
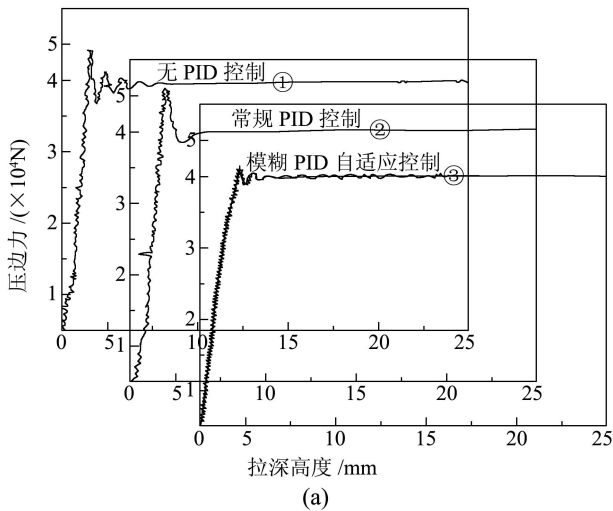


图8 模糊控制应用效果图

Fig. 8 Application effects of fuzzy PID controller