

基于自适应模糊PID的快速锻造油压机仿真分析

徐琬婷¹, 万鸾飞¹, 李浩然²

(1. 芜湖职业技术学院, 安徽 芜湖 241006; 2. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:快速锻造油压机是冶金行业的重要设备之一,其主要特点是锻造速度快、锻造精度高。在实际设计和应用过程中,锻压机的主工作缸和其它协同模块的高精度控制是保证锻件高精度、高质量的重要因素之一。随着工业的发展,人们对锻压机的锻造精度也提出了更高的要求,传统的PID控制技术已无法满足高精度快锻压机的要求。针对这一情况,我们将自适应模糊PID控制方法,应用到快速锻造油压机的控制上,通过MATLAB进行仿真和分析,从仿真结果可以看出,自适应模糊PID算法把PID控制简便性、可靠性与模糊控制的智能型、灵活性融为一体,发挥了传统PID控制与自适应模糊控制的各自长处。

关键词:模糊自适应;PID控制;锻压机;高精度

中图分类号:TP273+4 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2017)02-0029-04

Simulation Analysis on Fast Forging Hydraulic Press Based on Adaptive Fuzzy PID

XU Wan-ting¹, WAN Luan-fei¹, LI Hao-ran²

(1. Wuhu Institute of Technology, Wuhu, Anhui 241006, China;

2. Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: The rapid forging hydraulic press is one of the most important equipment in metallurgical industry. In the actual design and application process, main cylinder and other collaborative module high precision forging machine is one of the important factors to guarantee the high quality of high precision forging. With the development of industry, forging precision forging machine of people also put forward higher requirements, traditional PID control technology has been unable to meet the requirements of high precision fast forging press. In view of this situation, we will present an adaptive fuzzy PID control method applied to the control of fast forging press, through the analysis of the MATLAB simulation and test, the results show that the adaptive fuzzy PID algorithm combines the simplicity and reliability of PID control with the intelligence and flexibility of fuzzy control, and the advantages of traditional PID control and adaptive fuzzy control are given.

Keywords: fuzzy adaptive; PID control; high precision forging machine; high-precision

0 引言

随着自由锻造技术的发展,快速锻造压机由于自动化程度高、锻造次数高、行程速度快在金属成型、金属锻造和重工业中使用越来越广泛。为了降低企业生产成本,提高生产效率,对锻造产品的质量和尺寸精度要求也越来越高,这就对快速锻造压机的锻造频次和控制精度要求也越来越高。而提高快速锻造压机的控制精度,关键在于控制其核心部件即主工作液压油缸的位置精度。PID控制器具有以下优点:控制系统鲁棒性能好,对外部扰动不敏感、可靠性高、算法简单,因此被广泛应用于快速

锻造液压机,尤其是锻造次数在80次/min以上的锻造系统中^[1]。而锻压设备在实际生产过程中,由于主油缸工作压力和锻件材料的力学性能是时刻变化的,且不是线性时变系统,因此很难精准地建立快速锻造液压机实际工作过程中的数学模型,这给提高快速锻造机的精度和准确度带来了很大的麻烦。模糊控制方法就是为了解决此类问题,它是基于人类经验之上的智能控制方法。本文将模糊控制方法应用到PID参数寻优中形成自适应模糊PID控制,通过MATLAB进行仿真和分析。从仿真结果可以看出,自适应模糊PID算法把PID控制简便性、可靠性与模糊控制的智能型、

灵活性融为一体,发挥了传统PID控制与自适应模糊控制的各自长处。

1 快速锻造液压机控制系统

快速锻造液压机由主机部分(包括机架、拉杆、活动梁等)、电气控制系统(包括电气控制柜、控制台、模拟屏等)及操作机装置、液压控制系统组成。液压控制系统由液压油箱、主工作油缸、电机、控制阀组、位移传感器、过滤器、A/D转换器等组成。图1为快速锻造油压机液压系统工作原理简化图。

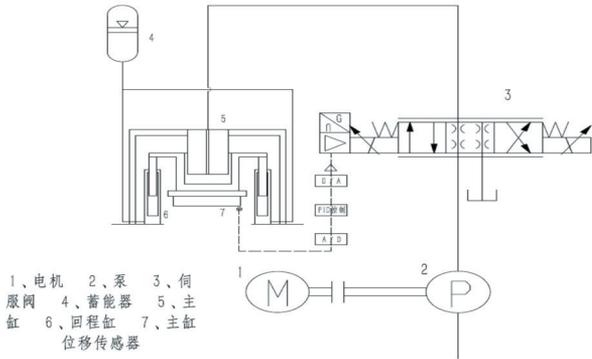


图1 液压系统简化原理图

锻件的精度主要由快锻压机主工作缸锤头的位置控制精度而决定。通过主工作油缸位移传感器、电液伺服阀、A/D转换器组成的双闭环控制系统,PLC电控模块控制液压油缸实现锤头的精确打击,实现锻造过程中锻件变形量的精确控制。电气控制采用T-S模糊控制与PID控制相结合的策略,对主机工作缸锤头位置、速度及操作机的位置及速度进行精确控制。

2 自适应模糊PID控制器

模糊自适应控制技术是人们利用模糊数学的方法,把规则的动作、条件用模糊集表示,同时把这些模糊控制规则存入计算机知识库中,变换成可以被计算机处理器调用的规则,根据实际响应应用模糊推理来实现PID参数的整定。实现PID参数整定,最重要的就是找出微分系数 k_d 及积分系数 k_i 、比例系数 k_p 所要修正的方向,以及它们与误差 e 、误差变化率 ec 间的模糊关系^[2]。

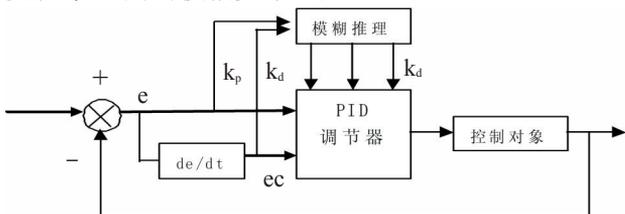


图2 模糊PID控制器结构图

2.1 输入输出变量的确定

自适应模糊PID控制器以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,输出语言为PID控制器的3个参数 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 。

2.2 变量的模糊化设计

将锻压机工作缸的偏差、偏差变化率的模糊论域均定义为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$,并建立基本论域表。再对各模糊子集确定量化论域中各元素的隶属函数表。本文中偏差 e 、偏差变化率 ec 、 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 采用了相同的隶属度函数^[3],详见表1。

表1 隶属度函数表

	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0.5
Z	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

2.3 模糊推理规则

压机工作过程中,持续检测误差 e 及误差变化率 ec ,通过PLC模块对 K_p, K_i 以及 K_d 进行基于模糊控制的在线动态修改,以满足不同误差和误差变化率情况下对控制参数的要求,从而使得其获得较好的动态性和静态性能^[4]。由此可以总结出一般情况下,在 $|e|$ 和 $|ec|$ 不同取值时,控制过程对于 K_p, K_i 和 K_d 的自整定要求^[5-6]:

(1)当 $|e|$ 较大时,为了减小系统的响应时间,应选取较大的 K_p 和较小的 K_d ;同时,为了避免过大的超调,取 $K=0$ 。

(2)当 $|e|$ 和 $|ec|$ 大小适中时,为了减小系统响应的超调量,应将 K_p 值选取得小一些;同时,为保障系统的响应速度, K_i 和 K_d 的取值要适度。

(3)当 $|e|$ 较小时,适当提高 K_p, K_i 值,可以使系统获得较好的稳态进度;同时,为了避免在平衡点附近出现振荡,应适当地选取 K_d 值。当 $|ec|$ 较大时, K_d 应选择较低;相反地,当 $|ec|$ 较小时, K_d 应选择较大值。

通过对上述控制规则的总结,归纳出模糊控制规则表。 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊规则分别如表2、表3、表4所示。

写入模糊规则控制表如下:

1. If(e is NB)and(ec is NB) then (ΔK_p is PB)(ΔK_i is NB)(ΔK_d is PS) (1)
2. If(e is NM)and(ec is NB) then (ΔK_p is PB)(Δ

K_i is NB)(ΔK_d is PS) (1)

...

49. If(e is PB)and(ec is NB) then (ΔK_p is PB)(ΔK_i is NB)(ΔK_d is PB) (1)

表2 ΔK_p 控制规则表

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

表3 ΔK_i 控制规则表

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

表4 ΔK_d 控制规则表

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

根据表2、表3、表4,并通过模糊理论算法,求得 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊控制查询表。

3 快锻压机液压控制系统数学模型的建立

快锻压机液压控制系统主要包含以下几个部分:PLC控制器、伺服放大器、主缸位移传感器、电液伺服阀、液压缸及负载,通过位置传感器的反馈形成闭环系统^[5],结构如图3所示。

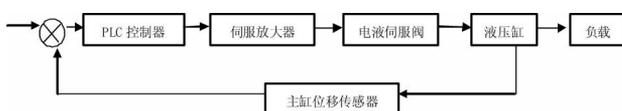


图3 主缸压下回路伺服系统结构图

锻压机的控制原理就是将主缸位移传感器的反馈信号与计算机的输入指令信号进行比较,然后将比较结果传给控制器,通过控制器中事先写入的控制算法程序,得出一个输出指令信号,该指令信号经过伺服放大器放大后,输入给伺服阀控制单元,从而调节伺服阀阀芯的开口度,不断调整主缸位置。主缸的位置信号经过位移传感器再次返回给控制器,如此反复不断进行比较再修正,进行主缸的自动控制和调整^[7]。

3.1 主缸压下回路建模

为了更好地实现控制,对主缸压下回路控制系统进行系统的建模。根据伺服阀阀芯以及液压缸的流量连续性方程,流量方程、液压缸负载的力平衡方程,经过一些列数学公式变换,得出在没有负载情况下,液压缸运行的传递函数为:

$$\frac{X_p}{X_v} = \frac{K_p / A_p}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (1)$$

式中: X_p 为液压缸活塞位移(m); X_v 为液压缸阀芯位移(m); A_p 为主缸有效面积(m^2); ω_h 为液压固有频率(rad/s); ζ_h 为液压阻尼比。

3.2 液压系统模型的建立

综合以上公式,可以计算得出锻压机液压系统的总传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_a K_f K_q K_{sv} / A_p}{s \left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\zeta_v}{\omega_v} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2)$$

式中: K_a 为伺服放大器增益(A/V); K_f 为位置传感器电压位移系数(V/m); K_q 为滑阀流量增益(m^3/s)/m; K_{sv} 为伺服阀流量增益(m^3/s)/A; ω_v 为伺服阀固有频率(rad/s); ζ_v 为伺服阀阻尼比。

设定快速锻压机型号,将各参数值代入式(2),求得传递函数为:

$$G(s) = \frac{3.82}{s(3.95 \times 10^{-6} s^2 + 0.00279 s + 1)(4.16 \times 10^{-4} s^2 + 0.01 s + 1)} \quad (3)$$

4 液压控制系统MATLAB仿真

利用对液压控制系统进行仿真,建立系统仿真框图,如图4所示。按照仿真的一般性步骤选择步长、示波器参数(X轴和Y轴)进行仿真运算,得到系统的阶跃响应曲线,如图5所示。由仿真曲线可以看出,与传统PID控制相比,自适应模糊PID控制下的阶跃响应超调量更小,调节时间也非常短,无论是动、静态性能,还是适应性和鲁棒性方面,都要明显优于传统PID控制方式^[8]。

$$\text{土地城镇化指数: } g(y) = \sum_{i=1}^m w(y_i)Y_i \quad (6)$$

上述表达式中的人口城镇化和土地城镇化的指标权重值分别用 $w(x_i)$ 和 $w(y_i)$ 来表示,而标准化处理之后的标准值则分别用 X_i 和 Y_i 来表示。

2.4 构建协调发展度模型

协调发展度模型是评价 2 个系统间协调度、发展度与协调发展度的综合性评价模型。笔者研究过程中采用了协调发展模型^[9]进行衡量四川省城镇化过程中人口与土地二因素的协调发展状况。

$$C = \left[\frac{f(x) \times g(y)}{\left(\frac{f(x) + g(x)}{2} \right)^2} \right]^k \quad (7)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(x) \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

其中,公式(7)表示的是耦合度模型, C 表示的土地城镇化和人口城镇化的协调度, $C \in (0,1]$ 。 k 为调节系数,本文中 $k=2$ 。公式(8)为耦合协调度模型, T 为发展度, α 、 β 为待定系数,人口城镇化和土地城镇化是城镇化进程中的两个重要指标,其指标值的大小直接决定了城镇化的水平,笔者在参考了大量文献之后对 α 和 β 进行取值。公式(9)中, D 为衡量人口城镇化和土地城镇化发展状况的重要评价指标。

根据前人的相关研究^[9-15],采用基本等量与就近取整的基本原则对人口城镇化和土地城镇化的协调类型进行分类,将其分为了三个协调区间和协调发展亚型(表 2)。

表 2 人口城镇化与土地城镇化协调发展类型划分标准

协调区间	协调发展度 D	协调发展亚类	协调发展亚型
失调区间	[0.00,0.10)	极度失调衰退类	
	[0.10,0.20)	严重失调衰退类	
	[0.20,0.30)	中度失调衰退类	
	[0.30,0.40)	轻度失调衰退类	$f(x)>g(y)$:土地城镇化滞后型;
过渡区间	[0.40,0.50)	濒临失调衰退类	$f(x)=g(y)$:人口、土地同步型;
	[0.50,0.60)	勉强失调衰退类	$f(x)<g(y)$:人口城镇化滞后型
协调区间	[0.60,0.70)	初级协调发展类	
	[0.70,0.80)	中度协调发展类	
	[0.80,0.90)	良好协调发展类	
	[0.90,1.00)	优质协调发展类	

3 四川省人口城镇化与土地城镇化协调发展评价

3.1 评价结果

以熵值法计算出各指标对应的权重值,并且用公式(5)~(6)来对 2003—2013 年期间的四川省人

口城镇化指标和土地城镇化指数进行详细的分析,得出结果(表 3)。

表 3 四川省人口城镇化指数与土地城镇化指数

因素	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
人口构成	0.000	0.022	0.039	0.067	0.083	0.104	0.121	0.143	0.162	0.178	0.200	0.198
人口素质	0.000	0.011	0.026	0.029	0.028	0.069	0.083	0.078	0.083	0.094	0.107	0.123
产业结构	0.006	0.000	0.021	0.044	0.032	0.054	0.078	0.096	0.100	0.105	0.118	0.114
生活水平	0.072	0.047	0.065	0.116	0.099	0.162	0.231	0.374	0.412	0.506	0.549	0.523
$f(x)$	0.078	0.079	0.151	0.256	0.242	0.389	0.513	0.690	0.757	0.884	0.974	0.957
城镇规模	0.023	0.058	0.073	0.035	0.050	0.092	0.125	0.173	0.236	0.285	0.336	0.330
投入水平	0.111	0.100	0.108	0.118	0.128	0.159	0.171	0.172	0.171	0.189	0.281	0.175
产出水平	0.000	0.017	0.050	0.082	0.094	0.158	0.174	0.243	0.310	0.340	0.349	0.336
$g(y)$	0.133	0.176	0.231	0.235	0.272	0.410	0.470	0.588	0.717	0.813	0.966	0.840

对表 3 的人口城镇化指数和土地城镇化指数进行分析,采用公式(7)~(9)对 2003—2014 年四川省的各个年度的发展度、协调发展度等指标进行分析,根据表 2 的划分标准进行判断和分类,最终得到表 4 的结果。

表 4 四川省人口城镇化与土地城镇化协调发展评价结果

年份	$f(x)$	$g(y)$	C	T	D	耦合发展类型
2003	0.067	0.081	0.983	0.074	0.270	中度失调衰退类人口滞后型
2004	0.068	0.126	0.829	0.097	0.284	中度失调衰退类人口滞后型
2005	0.130	0.167	0.969	0.148	0.379	轻度失调衰退类人口滞后型
2006	0.223	0.261	0.988	0.242	0.489	濒临失调衰退类人口滞后型
2007	0.212	0.334	0.903	0.273	0.497	濒临失调衰退类人口滞后型
2008	0.337	0.411	0.981	0.374	0.606	初级协调发展类人口滞后型
2009	0.445	0.497	0.994	0.471	0.684	初级协调发展类土地滞后型
2010	0.606	0.584	0.999	0.595	0.771	中度协调发展类土地滞后型
2011	0.663	0.664	1.000	0.663	0.815	良好协调发展类人口滞后型
2012	0.773	0.736	0.999	0.755	0.868	良好协调发展类土地滞后型
2013	0.853	0.847	1.000	0.850	0.922	优质协调发展类土地滞后型
2014	0.957	0.840	0.992	0.899	0.944	优质协调发展类土地滞后型

3.2 结果分析

3.2.1 人口城镇化与土地城镇化演化特征分析

对表 3 的内容进行分析可知,四川省人口城镇化与土地城镇化指数在 2003—2013 年期间呈现上升趋势,但从二者的内部演化特征看,各因素的贡献情况不同。

1)在 2003—2014 年期间,四川省人口城镇化各因素指标总体呈上升趋势。在人口城镇化内部,首先,产业结构和人口素质曲线呈“波动上升”趋势。因为在西部大开发战略的推动下,四川居民的收入水平不断增加,尤其是第三产业的发展速度较快,产业结构得到优化。其次,生活水平和产业结构指数在 2006—2007 年间出现了下降趋势,因而人口城镇化指数下降。在 2006—2007 年,四川省二、三产