

DOI: 10.3901/JME.2008.09.100

电液伺服位置、压力复合控制原理的仿真及试验*

权龙¹ 许小庆¹ 李敏¹ 张昭凯² 王景财²

(1. 太原理工大学机械电子工程研究所 太原 030024;

2. 大连重工起重集团有限公司 大连 116025)

摘要: 为了对主机中广泛应用的电液位置、压力复合控制过程进行改进,首先在建立的试验台上对电液伺服位置、压力两种控制方式的机理进行研究,明确了位置控制和压力控制的特点及其各自应采用控制器的结构形式。进一步研究串联和并联两种形式位置、压力转换控制策略,提出串联和并联相结合的位置、压力复合控制方法,只需改变位置设定值,就可实现无冲击的位置控制和压力控制转换,简化了控制过程。对控制特性进行数字仿真和试验验证,研究工作对提高主机的生产效率和性能具有理论和实际意义。

关键词: 伺服系统 压力控制 位置控制 复合控制

中图分类号: TH137

Simulation and Test of Electro-hydraulic Servo Position and Pressure Hybrid Control Principle

QUAN Long¹ XU Xiaoqing¹ LI Min¹ ZHANG Zhaokai² WANG Jingcai²

(1. Institute of Mechatronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. Dalian Heavy Machinery Co. Ltd., Dalian 116025)

Abstract: In order to improve the controlling performance of the position and pressure hybrid controlling process widely used in hydraulic controlled equipment, the separate position and pressure control process is researched on the established electro-hydraulic servo testing stand at first. The characteristics of each process, the structure and parameters of the controller are affirmed by analyzing the test results. Further the series and the parallel two kinds of pressure and position transform control principle are researched and improved. A new series and parallel combined pressure and position hybrid control method is put forward, which can transform the position control to pressure control without any crash by only changing the set value of position, so the control processes is simplified. Finally the control performance is proved with simulations and experiments. The results are of theoretical and practical significance to the improvement of the production efficiency and performance of the electro-hydraulic control equipment.

Key words: Servo system Pressure control Position control Hybrid control

0 前言

应用电液控制技术的许多主机设备中,为了满足工艺要求,常常需要对工作机构的位置和压力,甚至速度都进行控制,如各种成型机械的工作过程,轧机的压下、热连轧卷取机踏步避让、钢坯修磨机砂轮压下等都是位置和压力的复合控制过程。目前,

虽然单独的电液位置、压力伺服系统相关理论已比较成熟^[1-2],但对怎样将这两种控制回路合理、有机结合起来的控制原理还有待完善,尚未见有系统性的研究工作能说明采用怎样的控制策略实现转换最合理。所以针对位置、压力控制的特点,研究其转换机理,设计出能够应用现有理论成果、并具有普遍意义的转换控制策略,对提高主机的生产效率和改善控制性能就具有理论和实际意义。

本文在建立的试验台上,分别对电液位置伺服、压力伺服两种控制方式的机理进行了研究,明确了

* 国家自然科学基金(50575156)和国家教育部博士点基金(20070112007)资助项目。20070811收到初稿,20080524收到修改稿

两种回路的特点、控制器应采用的结构形式和参数范围。进一步研究了并联和串联两种位置、压力转换控制策略，并提出新的并联、串联和并联相结合的两控制方法。新方法的特点是只改变位置设定值就可实现位置控制和压力控制无冲击的转换，简化了控制过程。

1 位置、压力控制机理

为了能够从机理上分析位置伺服和压力伺服控制各自的特点，分析对比各种转换控制原理的优劣，建立图1所示的试验系统，根据该系统进行建模、数字仿真和试验研究。

系统由先导型伺服阀、恒压式变量泵(最大排量 $28 \text{ mL} \cdot \text{r}^{-1}$ ，最高压力 25 MPa ，电动机转速 $1450 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)、蓄能器(容量 16 L)、带集成式行程传感器的液压缸(活塞直径 50 mm ，活塞杆直径 36 mm ，最大行程 0.4 m)、模拟负载的惯性小车(质量 260 kg)、挡块、起安全作用的溢流阀、压力传感器及液压管道组成。整个系统应用集数据采集、过程控制、数据处理、显示(具有虚拟仪器功能)于一体的实时

硬件 dSPACE1103 卡，实现全数字控制，完成试验和测试，试验中用到的状态量液压缸速度和加速度，通过对位置信号微分及滤波直接获得。

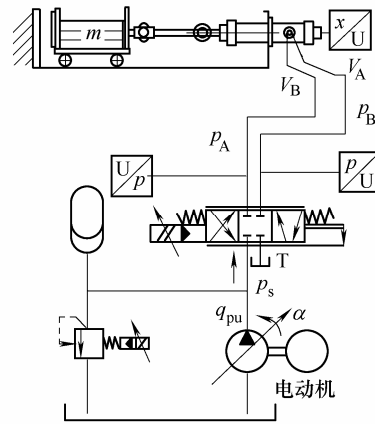


图1 模拟试验系统

V_A, V_B —— 液缸两腔的体积 p_s —— 液压泵出口处的压力
 p_A, p_B —— 液缸两腔的压力 α —— 变量液压泵斜盘的摆角
 q_{pu} —— 液压泵输出的流量 m —— 负载等效质量

图2、3是根据图1所示原理导出的系统分别控制液缸输出力和位置的传递函数框图。

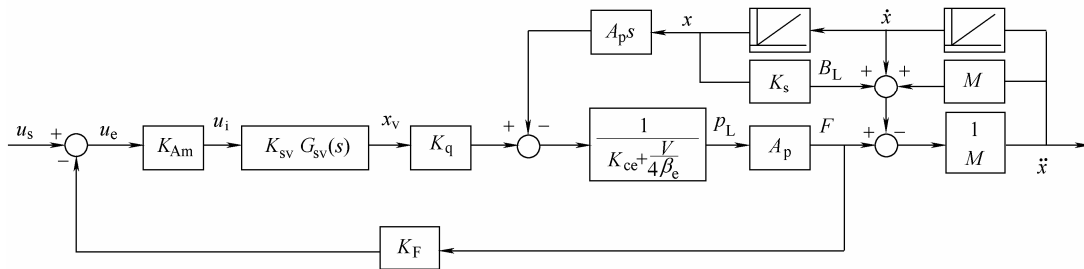


图2 压力控制传递函数框图

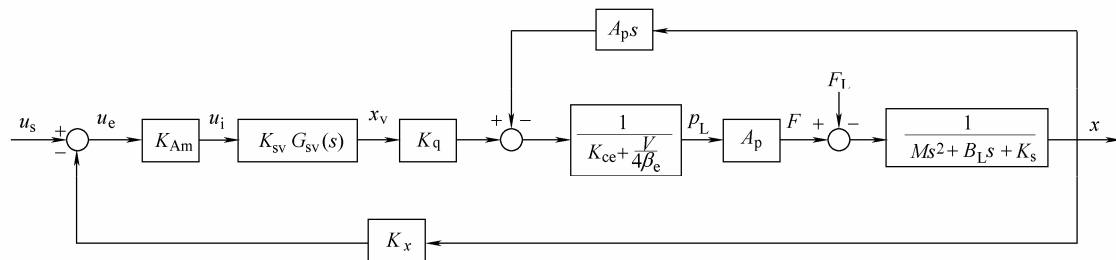


图3 位置控制传递函数框图

u_s —— 设定值 K_{Am} —— 伺服放大器增益 K_{sv} —— 伺服阀阀芯位移增益
 $G_{sv}(s)$ —— 伺服阀传递函数 x_v —— 伺服阀阀芯位移 K_q —— 伺服阀流量增益
 K_{ce} —— 伺服阀压力流量系数 V —— 液缸容腔的总体积 β_c —— 油液综合体积弹性模量
 A_p —— 液缸等效作用面积 B_L —— 液缸阻尼系数 K_s —— 负载弹性系数
 K_F —— 力反馈增益 K_x —— 位移反馈增益

分析图2、3可以看出，控制位置，检测反馈点取自液缸的位移，负载力 F_L 是扰动量，液缸输出力随着负载的大小改变，是开放的，系统的运动特性主要由液缸的特性所决定。控制力时，由于

结构设计的原因，常常用压力控制代替，检测信号取自液缸两个腔的压力，位置是开放的，是扰动量，系统的输出特性主要由液缸两个腔的容腔体积大小所主导。因为压力是要靠负载来建立，所以

压力控制过程是在执行机构接触到施力构件之后才开始进行,而在接触之前,执行器主要受到惯性力和摩擦阻力作用。图 4、5 是试验所获得的分别采用位置闭环和压力闭环控制,液压缸位移和速度的响应曲线。

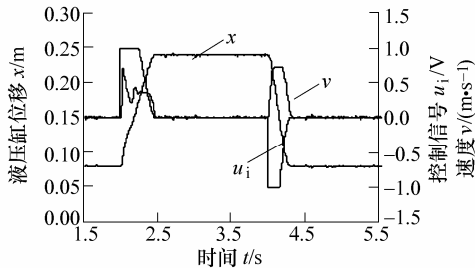


图 4 位置闭环控制液压缸位移、速度响应曲线

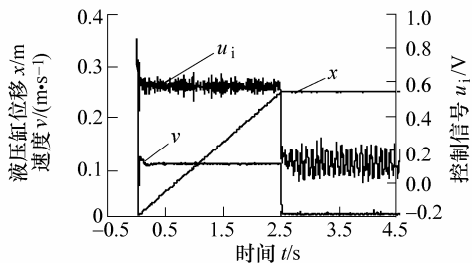


图 5 压力闭环控制液压缸位移、速度响应曲线

由于两种控制方式有着机理上的差别,所用控制器的结构、参数也不相同,所以不能用一个控制器将两种控制方式统一起来。位置闭环控制,伺服阀开口在全行程范围变化,稳定性也好,系统的闭环增益取 10,响应也没有发生振荡,行程为 160 mm,响应时间为 0.5 s。采用压力控制,如图 5 所示的试验结果,受稳定性的影响,系统的闭环增益只能取 0.2,二者相比增益相差 50 倍,在接触限位之前速度几乎不变,但只有 0.1 m/s,完成同样的行程则要运行 2 s 时间。所以为了提高生产效率,在实际应用中都要采用位置或速度、压力的复合控制,理想情况应是执行器先以最快的速度平稳运行到指定位置,再平稳转换为压力控制。下面探讨两种控制过程怎样转换,在什么工作点转换效果最佳。

2 开关转换位置、压力控制

实现位置和压力复合控制,有并联和串联两种方式。并联控制,采用开关来切换位置和压力控制器的输出,一般情况是先用位置回路控制液压缸到预定位置,然后再转换成压力控制,建立所需压差,

优点是可根据现有理论成果分别设计位置和压力控制策略,开关转换的关键技术是怎样在两种控制方式之间切换,在什么位置切换,必须先精确确定,并要通过外界指令控制转换。由于两个控制器同时工作,控制不好,转换过程就会引起冲击,一旦转换不及时,位置回路产生过冲,就会以很大的力作用于工件,不易实现安全保护。本文提出通过比较液压缸实际位移与转换点位置坐标,实现自动切换的并联复合控制原理如图 6 所示。

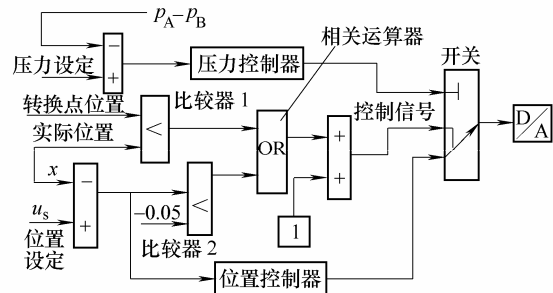


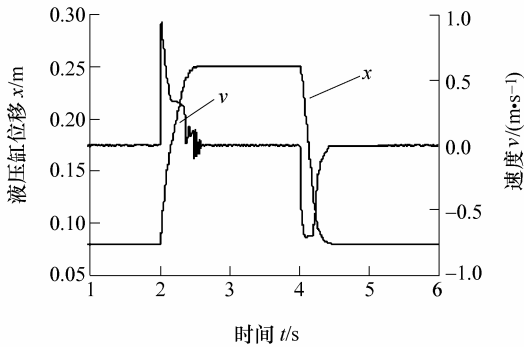
图 6 开关切换压力、位置复合控制原理

位置闭环采用比例和压差反馈的控制器结构,压力闭环采用比例微分控制器。图 6 中,比较器 1 的作用是判断液压缸实际位移与转换点的接近程度,一旦达到转换位置,运算器就输出 0,再通过相关运算器控制开关使系统转换为压力控制,这样就不会使液压缸发生过冲,并具有输出力保护功能。比较器 2 的作用是保证液压缸能够采用位置闭环自动退回原位,当位置控制回路的偏差小于某一最大负值,液压缸就自动快速退回。这样只要改变位置设定值,系统就能在位置和压力控制之间自动切换,特别适合用于成型机械等主机的工艺过程。

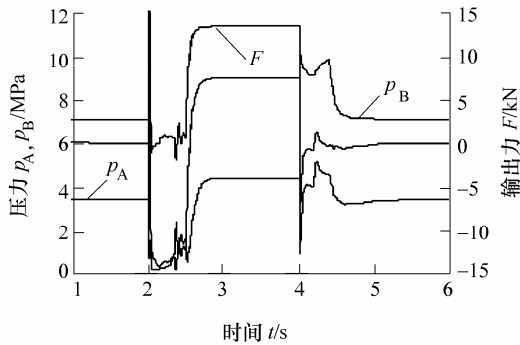
图 7、8 是采用该原理复合控制位置和压力的仿真与试验结果。

仿真与试验结果的一致性非常好,只是在从位置向压力转换的时间上略有差别,仿真是还没有接触限位块之前就已由位置控制转化为压力控制,转换后液压缸以恒定的速度向前运动,直到碰到限位块,由于挡块的刚性作用,引起速度的振荡。试验中是在液压缸正好接触到限位块的情况下,再转换为压力控制,所以输出力响应非常快。仿真与试验最大的区别是试验中存在小振幅的压力波动,原因是实际系统中本身就存在压力波动,再经过微分处理,就在控制信号上叠加了这一振动信号,引起输出压力的波动,但液压缸位置并不改变,所以不影响控制效果。压力波动就相当于在控制信号上叠

加颤振信号，对提高系统的灵活性、减小死区和减小静摩擦力有益。

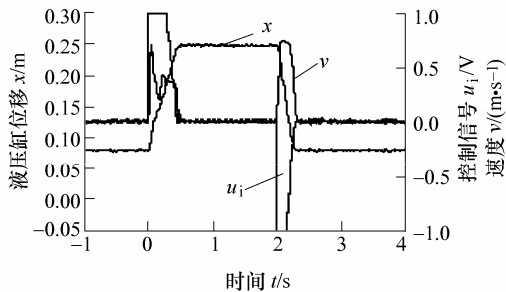


(a) 液压缸位移和速度响应曲线

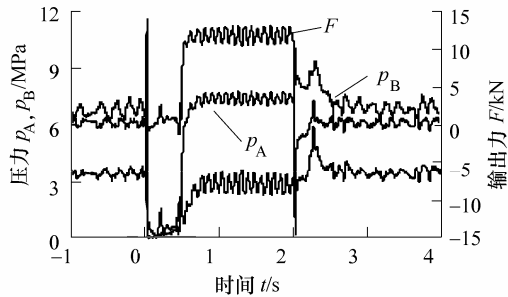


(b) 液压缸两个腔压力和输出力响应曲线

图 7 压力、位置开关转换控制仿真结果



(a) 液压缸位移和速度响应曲线



(b) 液压缸两个腔压力和输出力响应曲线

图 8 压力、位置开关转换控制试验结果

研究进一步表明，开关转换，过早转入压力控制，在未接触负载之前有一段空行程，因压力控制回路的增益非常低，使液压缸运动的速度很慢，10 mm 的行程要耗时 0.1 s，而如果采用位置控制则只

需 30 ms，如果压力设定值较低，缸的速度还要慢，压力设定值大，在接触负载瞬间就会造成大的冲击，引起设备大的振动，影响正常使用。

3 串联转换位置、压力控制

串联转换，就是压力闭环和位置闭环两种控制器成串联布置，同时起作用。可以有位置外环、压力内环和压力外环、位置内环两种组合。位置内环、压力外环组合时，压力环对位置控制器的结构没有影响，但位置闭环会对压力控制回路产生作用，位置反馈是硬反馈，会造成压力控制回路大的误差。位置闭环的控制增益将放大压力回路的增益，引起压力控制的不稳定。另外位置闭环中的加速度反馈或压差反馈也都会引起压力闭环的不稳定，只有在位置闭环采用比例控制，降低压力闭环控制增益的情况下才能稳定工作，这将影响位置响应的快速性，这些特征已被仿真和试验所证实，因此不适合用于压力、位置的复合控制。

位置外环、压力内环的控制原理是由德国 SMS 公司提出，用于热卷取机的踏步控制^[3]，压力和位置都是闭环控制，压力控制回路的设定值通过改变位置环中限幅器的大小来改变，控制过程的转换是通过位置的设定值来强制执行。控制过程是先设定一个位置量，同时设置位置控制器的限幅器处于最大值，使系统快速运行到指定位置，然后改变限幅器的值为系统所需的压力设定值，再设定一较大的位移量，系统就转换为压力控制。对这种转换方式，虽然多篇文献都给出了原理框图^[4-6]，作了介绍，但对两种控制器之间的耦合关系、参数之间的匹配、内在机理未见有研究工作报道。

通过分析可以发现，该控制原理的优点是可以限制执行器输出的最大压力值，位置设定信号超限也不至于引起安全事故，不足是为避免对位置回路的影响，限幅器的最大值要根据控制过程来判断和不断更改，转换要两步才能完成。通过研究，提出串并联混合的控制方式对其进行改进，控制原理如图 9 所示。

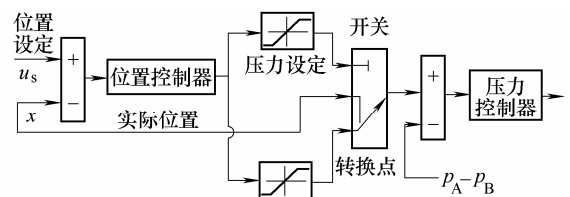


图 9 串并联混合压力内环、位置外环控制原理

改进后的控制器结合开关切换的优点，但结构

较开关转换简单。位置控制器的输出端并联两个限幅器，一个用作压力的设定值，一个作为位置控制器输出的饱和限。先设定一个较大的位置，当液压缸的实际位置达到转换点的设定值，系统就由位置控制自动转换为压力控制，减小位置设定值小于转换位置值，压力设定值就反向，液压缸反向运行到小于转换点设定值，液压缸就会以位移控制方式自动退回。比较液压缸实际位置与转换点设定值，只须改变位置设定值就可实现位置和压力控制过程的切换。图 10、11 是采用改进后的原理复合控制位置和压力的仿真与试验结果。

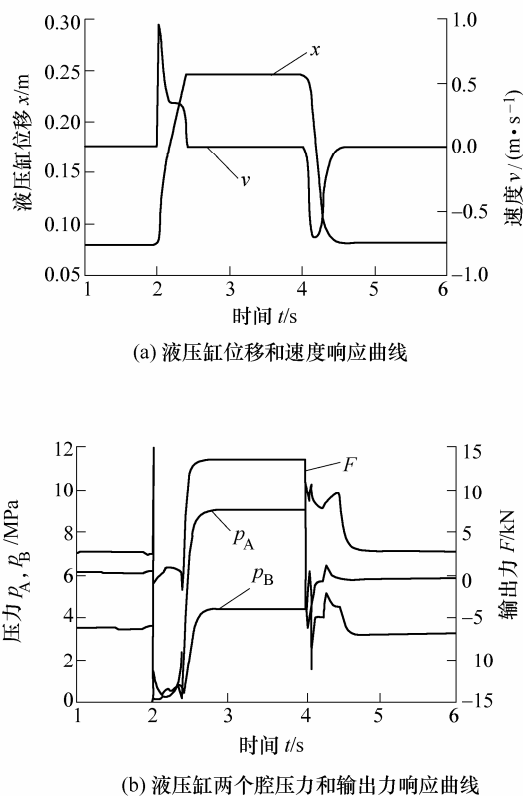


图 10 位置外环、压力内环控制仿真结果

对比仿真与试验结果，无论位置、速度还是液压缸两个腔的压力，它们在变化趋势、响应时间和波形上都非常接近。特别明显地是系统在启动瞬间，压力变化的幅度非常大，活塞杆伸出过程压力 p_A 快速上升， p_B 快速降低，然后 p_A 又降低到与 p_B 接近的值，当液压缸位置接近设定值后，两个腔的压力就又恢复到原始的平衡值。活塞杆收回过程也有同样的变化趋势，在非常短的时间内输出力就达到了设定值。

研究证实，采用压力在前、位置在后的串联方式，位置闭环对压力控制器没有影响，但压力控制器要对位置控制回路产生影响，压力闭环中的压差

反馈就相当于加速度反馈，会提高系统的稳定性，因为在接触限位之前，系统已转换为压力控制，所以不会对位置控制精度产生影响。压力闭环的增益将降低位置闭环的增益，所以必须对位置闭环的增益进行调整，以保证原有的位置控制特性。压力闭环中的微分反馈，同样对提高位置闭环的稳定性有益，同时不影响稳态控制精度，但由于其容易引入噪声，增益的取值要能同时满足两种回路的要求。

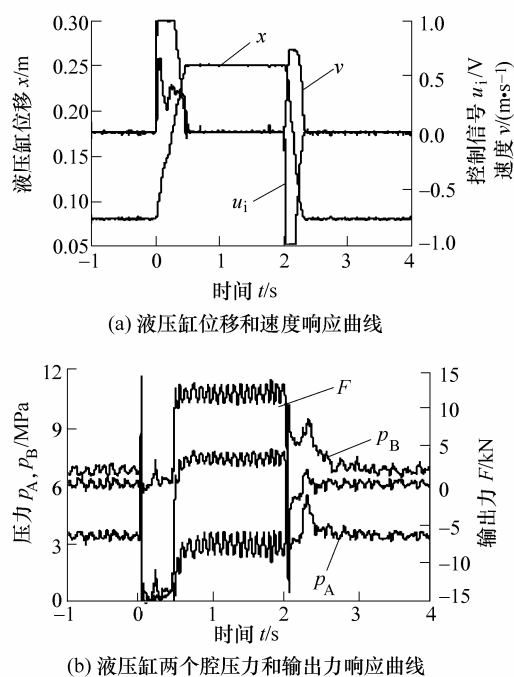


图 11 位置外环、压力内环控制试验结果

4 结论

(1) 采用同一个伺服阀控制位置和压力，由于系统的传递特性有着机理上的差别，特别是闭环控制增益相差几十倍，必须采用不同结构的控制器和参数。

(2) 改进后的开关转换和新提出的串并联混合压力、位置复合控制策略，通过改变位置设定值就可实现位置控制与压力控制的转换，而且不影响各自的控制特性，能满足主机快速、平稳运行的要求。其中串并联混合具有结构简单、自动实现系统安全保护的优点。开关切换则不须要改变现有位置、压力控制器的结构和参数，易于设计。

(3) 采用串联方式复合控制位置和压力，虽然压力内环是硬反馈，但位置控制都在接触限位之前进行，不影响位置的控制过程，而在压力外环，位置内环的方式中，位置反馈是硬反馈，压力控制又在接触负载之后进行，会对压力控制造成大的影响，

所以只有采用位置闭环在外,压力闭环在内的结构,压力、位置两个控制器才不会相互影响。

参 考 文 献

- [1] BOES C. Hydraulische Achsantriebe im digitalen Regelkreis[D]. Aachen: RWTH, 1995.
- [2] Murrenhoff H. Servohydraulik Umdruck zu Vorlesung[M]. Aachen: RWTH, 1998.
- [3] 吴晓明, 栾海英, 张强, 等. 热轧带钢地下卷取机踏步系统的应用研究[J]. 液压与气动, 2003(10): 46-48.
WU Xiaoming, LUAN Haiying, ZHANG Qiang, et al. Application research on automatic jumping control system used in the hot rolling mill[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2003(10): 46-48.
- [4] 王益群, 吴晓明, 曹栋璞, 等. 热连轧卷取机电液伺服控制系统的设计[J]. 液压气动与密封, 2002(5): 1-3.
WANG Yiqun, WU Xiaoming, CAO Dongpu, et al. Design of electro-hydraulic servo control system for coiler of hot continuous mill[J]. Hyd. Pneum. & Seals, 2002(5): 1-3.
- [5] 王益群, 曹栋璞, 陈星, 等. 热连轧卷取机踏步系统鲁棒 H_{∞} 控制研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 62-64.
WANG Yiqun, CAO Dongpu, CHEN Xing, et al. Robust H_{∞} control of step-by-step system for coiler of hot continuous mill[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(10): 62-64.
- [6] 吴晓明, 张强, 栾海英, 等. 智能复合控制在助卷辊踏步控制中的应用研究[J]. 机床与液压, 2004(3): 75-77.
WU Xiaoming, ZHANG Qiang, LUAN Haiying, et al. Application of intelligent hybrid controller in step-by-step system for hot mill coiler[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2004(3): 75-77.

作者简介: 权龙, 男, 1959年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液伺服及比例控制技术。获国家科技进步二等奖1项, 省级成果奖3项, 国家发明专利3项, 发表论文70余篇。
E-mail: quanlong@tyut.edu.cn