

基于 ARM9 和自适应模糊 PID 算法的蜂窝纸板飞剪控制系统

齐建虹, 蔡锦达

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 针对现代印刷包装工业对蜂窝纸板剪切机高实时性和高精度的控制要求, 研发了基于 ARM9 S3C2416 和工业触摸屏的蜂窝纸板飞剪控制系统。采用了自适应模糊 PID 控制算法对伺服跟踪飞剪过程进行严格控制, 明显提高了其动态响应性能及定长剪切的精度, 使控制系统具有结构小、可靠性高、抗干扰能力强、控制精度高、实时性好、鲁棒性高等优点。

关键词: 蜂窝纸板剪切机; ARM9; 触摸屏; 飞剪机构; 模糊 PID

中图分类号: TB486+.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)21-0075-05

Honeycomb Cardboard Flying Shear Control System Based on ARM9 and Adaptive Fuzzy PID Control Algorithm

QI Jian-hong, CAI Jin-da

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to the high real-time and high precision control requirements of modern printing and packaging industry for honeycomb cardboard cut machine, a flying shear control system based on ARM9 S3C2416 and industrial touch screen for honeycomb cardboard was developed. The process of servo tracking flying shear was controlled strictly using adaptive fuzzy PID control algorithm. It significantly improves the dynamic response performance and precision of fixed-length shear. The control system has advantages of small structure, high reliability, strong anti-jamming capability, high control accuracy, good real-time, and robustness.

Key words: honeycomb cardboard cut machine; ARM9; touch screen; flying shear; fuzzy PID

蜂窝纸板剪切机是蜂窝纸板生产线的最后一道工序, 可将连续的蜂窝纸板剪切成规定尺寸的纸板, 它广泛应用于印刷业、包装业和加工业等十多个相关行业, 并已经逐渐成为这些行业不可缺少的关键设备。近几年来, 随着国内包装行业的蓬勃发展, 用户对蜂窝纸板的质量和规格有了更高的要求, 因此对蜂窝纸板剪切控制系统提出了一些更严格的技术指标, 如剪切精度、剪切速度、剪切范围、可靠性、操作方便性等。

目前, 国内蜂窝纸板剪切机缺少高精度的尺寸定位系统和尺寸设置装置, 尤其在高速剪切情况下精度难以达到要求。传统用 PLC 开环控制飞剪机构与纸板之间的跟随, 存在稳定性差、定位精度不高、实时性差等缺点; 传统 PID 控制器很难保持纸板与飞剪机构

之间的精确跟踪, 直接影响到纸板剪切的精度和纸板切割面的平整度, 更严重时出现卡刀现象, 已不能满足高速定长剪切系统对动态响应和定位精度提出的严格要求。为了改善控制系统在纸板定长剪切中的动态性能和切割精度, 提出了以 ARM9 S3C2416 和工业触摸屏为控制核心, 采用自适应模糊控制策略与 PID 控制算法相结合的蜂窝纸板飞剪控制系统。采用基于自适应模糊 PID 算法的伺服跟踪控制技术对位置和速度进行精确跟踪, 实现了飞剪控制系统高精度、高鲁棒性控制。

1 飞剪控制系统工作原理

蜂窝纸板剪切机的主要工作是对连续生产的蜂

收稿日期: 2013-03-31

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302); 2012 年度上海“联盟计划”资助项目(LM201276)

作者简介: 齐建虹(1990-), 女, 甘肃人, 上海理工大学硕士生, 主攻机械自动控制和嵌入式系统开发。

通讯作者: 蔡锦达(1963-), 男, 上海人, 硕士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为机械电子及自动化。

纸板以一定速度在传送带上运行,基于 ARM9 S3C2416 的控制器(以下简称“控制器”)根据光电编码器发来的脉冲可以计算出纸板走过的长度以及运行的速度,并根据运行速度实时求得伺服电机的速度给定信号。当纸板达到设定的剪切长度时,控制器发出跟踪信号至伺服电机驱动器,由伺服电机带动飞剪机构由零位启动,在此过程中伺服电机编码器会不断检测和记录飞剪机构的速度,通过自适应模糊 PID 控制器严格控制位置和速度的跟踪,实现纸板与飞剪机构的位置同步和速度同步。当飞剪机构的速度与纸板速度相同时,控制器发出剪切信号,打开飞剪机构上的飞剪气动电磁阀,飞剪机构下刀进行纸板剪切。剪切完毕后,控制器发返回信号至伺服驱动器,飞剪机构快速返回零位,最后停在零位等待下次剪切。蜂窝纸板飞剪控制系统工作原理示意图 1。

Fig. 1 Working principle schematic diagram of honeycomb cardboard flying shear control system

Fig. 3 Program flow chart of the flying shear control system

抬剪、落剪等一系列动作。正常启动后先使飞剪机构回到零位等待追踪信号,当达到剪切长度时,飞剪机构加速前进,同时各种速度、长度数据被记录并计算,利用控制器的高速计数器采集纸板和飞剪机构的实时速度,通过控制算法处理及运算后输出一个标准模拟量信号控制伺服电机驱动器对伺服电机进行调速,实现飞剪机构和纸板的同步运动,能够满足剪切精度要求。当飞剪机构与纸板同速时发出剪切信号,这时意味着达到设定的剪切长度并且速度相等,控制器记录下相关数据,当剪切动作完毕后,飞剪机构快速返回到零位等待下一个工作周期。

3 自适应模糊 PID 控制器

纸板所走的长度是由光电编码器来记录,而飞剪机构所走的长度取决于伺服电机。常规 PID 控制器不具有在线参数整定功能,对系统模型的精确性依赖较强,对于非线性、时变且受随机干扰的系统,一般难以获得较好的控制性能。由于纸板飞剪控制系统是一个非线性、强耦合、时变的复杂系统^[1],飞剪机构对纸板的跟踪剪切是一个变速过程,且剪切点是不断变化的,这样的复杂性和不确定性使得系统很难建立精确的模型,故常规 PID 控制器很难保证剪切精度。而且由于系统要求输出的误差尽可能小,所以该控制系统采用自适应模糊 PID 控制算法进行控制^[2]。

3.1 自适应模糊 PID 控制原理

PID 的数字形式控制规律为:

$$e(k) = r(k) - c(k) \quad (1)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \int_0^k e(k) dt + K_d \frac{de(k)}{dt} = K_p e(k) + K_i \int_0^k e(k) dt + K_d \Delta e(k) \quad (2)$$

式中: $r(k)$ 为控制系统的参考输入; $c(k)$ 为被控对象的输出反馈信号; $u(k)$ 为控制器输出的计算结果; $e(k)$ 为输入的误差值; $\Delta e(k)$ 为输入误差的变化率; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数。

为了缩短调节时间,加快响应速度,这里采用增量式 PID 控制算式为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3)$$

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]$$

$$= (K_p + K_i) e(k) - K_p e(k-1) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (4)$$

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (5)$$

自适应模糊 PID 控制器主要由参数自整定的 PID 控制器和模糊推理器 2 部分组成。根据误差 e 和误差变化率 Δe 采用模糊推理方法实现在线对参数 K_p, K_i, K_d 的自动调整^[3]。自适应模糊 PID 控制原理见图 4。

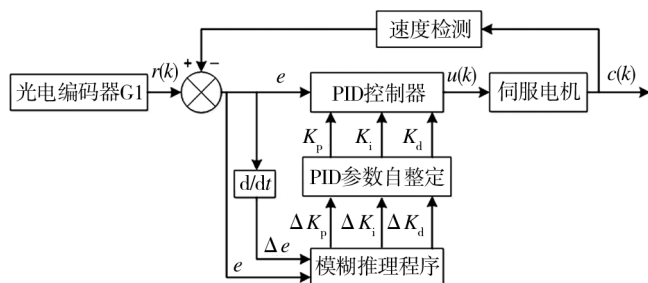


图 4 自适应模糊 PID 控制原理

Fig. 4 Block diagram of adaptive fuzzy PID control principle

3.2 自适应模糊 PID 控制器设计

利用 ARM9 S3C2416 采集光电编码器的脉冲信号,通过不断检测纸板和飞剪机构的速度跟踪误差 e 和速度跟踪误差变化率 $\Delta e (de/dt)$ 2 个输入量的大小,依据模糊推理方法实现对参数 K_p, K_i, K_d 的在线调整,以满足在不同时刻误差 e 和误差变化率 Δe 对 PID 参数自调整。

3.2.1 模糊规则的建立

将系统误差 e 和误差变化率 Δe 变化范围定义为模糊集上的论域, e 和 Δe 均取为 $[-6, 6]$, $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 分别取为 $[-3, 3], [-0.06, 0.06], [-3, 3]$, 模糊语言集均为 [负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正大 (PS), 正中 (PM), 正小 (PB)], 该飞剪控制系统的模糊控制器的输入、输出变量都采用正态型高斯分布^[1]。

模糊控制器为 DISO (两输入单输出) 结构,每个输入输出各有 7 种状态,针对 PID 的 3 个控制参数,根据实际控制要求分别建立模糊控制规则表^[4]。

1) 当 $|e|$ 较大时,为使系统具有较好的快速跟踪性能,使误差绝对值以最大速度减小,并为避免开始时误差瞬间变大可能引起微分过饱和而使控制作用超出许可范围,应取较大的 K_p , 较小的 K_d 。为了防止积分饱和,避免出现较大超调,需对积分作用加以限

制,通常取 K_i 为 0。

2) 当 $|e|$ 和 $|\Delta e|$ 为中等大小时,为使系统具有较小的响应超调又不影响系统的响应速度,应取较小的 K_p ,大小适中的 K_i 和 K_d ,其中 K_d 的取值对系统的响应速度影响较大,应大小适中。

3) 当 $|e|$ 较小时,即接近设定值时,为了使系统具有较好的稳态性能,应取较大的 K_p 和 K_i ,取较小的 K_d ,同时为了避免系统在设定值附近出现振荡,应增强系统的抗干扰性能,应适当选取 K_p 。当 $|\Delta e|$ 较小时, K_d 值可取大些,通常取为中等大小;当 $|\Delta e|$ 较大时, K_d 应取小些。

对于模糊自适应 PID 的参数整定,可根据语言变量误差 e 及误差的变化 Δe ,应用模糊逻辑推理,总结出自适应模糊 PID 控制器模糊控制规则表,见表 1。

表 1 PID 模糊控制规则
Tab.1 PID fuzzy control rules

$e(k)$		$\Delta e(k)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ΔK_p	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	ΔK_i	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	ΔK_d	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	ΔK_p	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	ΔK_i	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	ΔK_d	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ΔK_p	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ΔK_i	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PS
	ΔK_d	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ΔK_p	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	ΔK_i	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	ΔK_d	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ΔK_p	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	ΔK_i	NM	NM	ZO	PS	PS	PM	PB
	ΔK_d	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	ΔK_p	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	ΔK_i	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	ΔK_d	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	ΔK_p	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
	ΔK_i	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	ΔK_d	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

3.2.2 输入量的模糊化和去模糊化

对 PID 参数分别进行模糊推理,根据 Mamdani 推理法,可形成 3×9 条模糊推理规则,对于误差 e 、误差

变化率 Δe 的单个实时精确量,可根据模糊输入变量的值,查表得到模糊推理输出值,再分别和输出量的量化因子相乘,得到的结果再四舍五入,就求出了对应整数论域的相应元素,即可以用于查询控制规则表,从而实现输入量的模糊化。去模糊化即清晰化,是把模糊量转变为精确量的过程,也称为模糊判决^[1],模糊量的精确化采用加权平均法^[5]。

3.2.3 自适应模糊 PID 算法的实现

通过光电编码器和伺服电机编码器分别检测纸板和飞剪机构的实际运行速度,然后计算得出速度误差值 e 和速度误差变化率 Δe ,利用自适应模糊整定 PID 控制器对误差值进行自整定,将校正值转化为模拟电压给定信号输出给伺服电机,控制伺服电机调节转速^[6],从而形成伺服系统的闭环控制,实现纸板和飞剪机构速度和位置的精确跟踪。根据以上分析,自适应模糊 PID 控制器的控制程序流程见图 5。

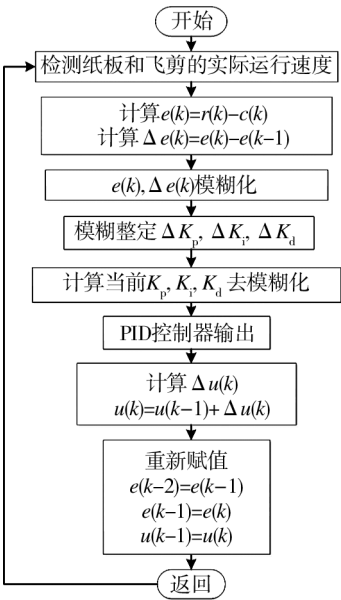


图 5 自适应模糊 PID 控制算法流程
Fig. 5 Flow chart of adaptive fuzzy PID control algorithm

3.3 自适应模糊 PID 控制仿真分析

文中研究的是蜂窝纸板飞剪控制系统,采用伺服电机为执行电动机。设输入信号为电动机电枢电压 U ,输出信号是电动机转速 ω 。伺服电机相关方程式为^[7]:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = U - E \tag{6}$$

$$E = K_e \omega = K_e \frac{d\theta}{dt} \tag{7}$$

$$M_d = K_m I \quad (8)$$

$$M_d = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + f_m \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

上述各式中: L, R, I 为电枢绕组的电感、电阻和电流; E 为电动机的反电动势; K_e 为反电动势比例系数; θ 为电动机转角; ω 为电动机转速; M_d 为电动机的电磁转矩; M_c 为电机负载阻力矩; K_m 为电动机的力矩系数; J 为电动机轴上的转动惯量; f_m 为阻尼系数。

将(6)一(9)式消去 I 可得到:

$$JL \frac{d^3 \theta}{dt^3} + (JR + f_m L) \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (Rf_m + K_e K_m) \frac{d\theta}{dt} = K_m U \quad (10)$$

将(13)式进行拉普拉斯变换得:

$$JLs^3 \theta(s) + (JR + f_m L)s^2 \theta(s) + (Rf_m + K_e K_m)s \theta(s) = K_m U(s) \quad (11)$$

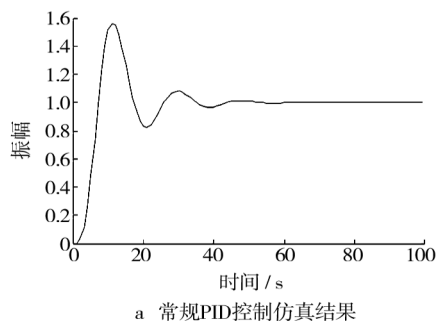
电动机转速 ω 与转角 θ 的关系是 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, 故 $\omega(s) =$

$s\theta(s)$, $\theta(s) = \frac{1}{s}\omega(s)$, 则电动机的闭环传递函数 $G_m(s)$ 为:

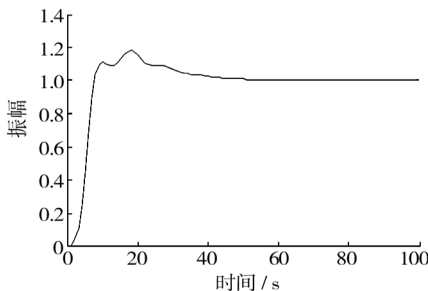
$$G_m(s) = \frac{\omega(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{JLs^2 + (JR + f_m L)s + (Rf_m + K_e K_m)} \quad (12)$$

利用 Matlab 中的 Simulink 工具箱^[8], 以某包装机械企业实际的蜂窝纸板定长剪切控制系统为对象进行了自适应模糊 PID 控制系统仿真。采用阶跃信号对定长飞剪控制系统进行了常规 PID 控制和自适应模糊 PID 控制的仿真实验比较。在电机角速度的传递函数 $G_m(s)$ 中令 $J=0.198\ 201\ 3\ \text{kg} \cdot \text{m}^3$; $f_m=10^{-4}\ \text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$; $R=25\ \Omega$; $U=380\ \text{V}$; $L=0.3744\ \text{H}$; $K_m=0.727\ \text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$; $K_e=0.2\ \text{V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$, 仿真时间为 10 s。仿真结果见图 6。

由图 6 可知, 采用自适应模糊 PID 控制器, 没有



a 常规PID控制仿真结果



b 自适应模糊PID控制仿真结果

图 6 常规 PID 控制和自适应模糊 PID 控制仿真结果比较

Fig. 6 Simulation results comparison between traditional PID control and adaptive fuzzy PID control

常规 PID 控制器产生的过超调, 克服了应用常规 PID 控制时, 因伺服驱动系统的非线性造成的较大跟踪偏差, 有较好速度跟随特性和抗干扰性, 为进一步提高蜂窝纸板飞剪控制系统的剪切精度奠定了理论基础。

4 结语

蜂窝纸板飞剪控制系统融入了 ARM 嵌入式控制技术、气压传动技术和自适应模糊 PID 控制技术, 解决了纸板生产流水线上高精度自动同步定长剪切的难题。采用基于 ARM9 的工业触摸屏替代 PLC, 在降低成本的同时还提高了设备的稳定性、可靠性和实时性, 为设计和实现基于微处理器和触摸屏的定长剪切控制系统提供了典型应用方案。本控制系统将基于 ARM9 的触摸屏和自适应模糊 PID 控制算法相结合,

既显示了基于 ARM9 的触摸屏灵活方便、功能强大和实时性高的特点, 也大大提高了控制系统的智能化程度。自适应模糊 PID 控制器的动态响应快、超调量小、稳态精度高、抗干扰能力强, 能够满足飞剪跟踪的要求。经现场生产测试: 该控制系统能有效抑制纯滞后的影响, 且系统动态跟踪性能良好、稳定性好、鲁棒性强。

参考文献:

- [1] 赵庆海, 贾中华. 模糊自适应 PID 控制在张力控制中的应用[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 87-89.
ZHAO Qing-hai, JIA Zhong-hua. Application of Self-adaptive Fuzzy-PID in the Tension Control[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 87-89.

(下转第 84 页)

- Control Systems Research and Development[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2001.
- [6] GLENN D. Introduction to Packaging Machinery [M]. USA: Packaging Machinery Manufacturers Institute (PMI), 1997.
- [7] 孙茂泉, 严伟跃. 称重式液体灌装机控制系统[J]. 轻工机械, 2007(6): 324-328.
- SUN Mao-quan, YAN Wei-yue. The Control System of Weighing Liquid Filling Machine [J]. Light Industry Machinery, 2007(6): 324-328.
- [8] 李文友, 胡振泉, 叶保华. 高精度桶装液体灌装生产线的研制[J]. 包装与食品机械, 2005, 23(4): 4-6.
- LI Wen-you, HU Zhen-quan, YE Bao-hua. The Development of Precision Barreled Filling Machine [J]. Packaging and Food Machinery, 2005, 23(4): 4-6.
- [9] 张聪. 自动化食品包装机[M]. 广州: 广东科技出版社, 2003: 46-56.
- ZHANG Cong. The Automatic Food Packaging Machine [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 2003: 46-56.
- [10] 黄小兰. 基于 PLC 的旋转型灌装机控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- HUANG Xiao-lan. The Control System Research for Rotary Filling Machine Based on PLC [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [11] 杨启龙. 灌装机加塞机构的改进与设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- HUANG Qi-long. Filling Machine Stoppering Improvement and Design [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [12] 郑友林. 一种灌装机: 中国, CN103332309A [P]. 2013-10-02.
- ZHEN You-lin. A Filling Machine: China, CN103332309A [P]. 2013-10-02.
- [13] 薛孝锋. 容积式伺服灌装生产线: 中国, CN103332641A [P]. 2013-10-02.
- XUE Xiao-feng. Servo Volumetric Filling Machine: China, CN103332641A [P]. 2013-10-02.
- [14] 冯清华. 伺服电机运动控制器的研制[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- FENG Qing-hua. The Development of the Servo Motor Motion Controller [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2004.
- [15] 周振雄, 徐玉娇. 全自动六线同步灌装控制系统设计[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2012(5): 32-35.
- ZHOU Zhen-xiong, XU Yu-jiao. Automatic Six-wire Synchronous Filling Machine Control System Design [J]. Journal of Beihua University (Natural Science Edition), 2012(5): 32-35.

(上接第 79 页)

- [2] 胡姣, 钱晓龙, 王策, 等. 基于运动控制器的飞剪定长切割系统的实现[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 247-249.
- HU Jiao, QIAN Xiao-long, WANG Ce, et al. The Application of Flying Shear Used to Cut to Specified Length Based on Motion Controller [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 247-249.
- [3] 周晋军, 李少纲. 模糊控制在涂布生产中的应用研究[J]. 包装工程, 2006, 27(10): 114-115.
- ZHOU Jin-jun, LI Shao-gang. Application Research of Fuzzy Control Technology in Production of Coated Paper [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(10): 114-115.
- [4] 宁辰校, 李兰, 张戌社. 基于 PLC 的定长切割飞刷智能控制系统研究[J]. 河北科技大学学报, 2009, 30(3): 219-222.
- NING Chen-xiao, LI Lan, ZHANG Xu-she. Study on Fixed-length Cutting Saw's Intelligent Control System Based on PLC [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2009, 30(3): 219-222.
- [5] 盛强. 基于 PLC 的钢管定长切割模糊智能控制系统研究[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(9): 54-55.
- SHENG Qiang. Steel Pipe's Fixed-length Cutting Control System Based on Fuzzy Intelligent and PLC [J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(9): 54-55.
- [6] 杨原清, 刘卫东, 李乐. 基于自适应模糊 PID 算法的切纸机伺服控制器设计[J]. 2010(3): 55-58
- YANG Yuan-qing, LIU Wei-dong, LI Le. Design of Guillotine Servo Controller Based on Fuzzy PID Algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2010(3): 55-58.
- [7] 尹亮, 宫文宁. 模糊自适应 PID 控制算法分析[J]. 变频器世界, 2011(9): 86-88.
- YIN Liang, GONG Wen-ning. Analysis of Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm [J]. The World of Inverters, 2011(9): 86-88.
- [8] 张铮, 郑文超, 陈水胜, 等. 铝型材生产线同步定长切割系统[J]. 湖北工业大学学报, 2009, 24(4): 28-30.
- ZHANG Zheng, ZHENG Wen-chao, CHEN Shui-sheng, et al. Synchronous and Fixed-scale Cutting System of Aluminum Profile on Product Line [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2009, 24(4): 28-30.