

瓦楞纸板横切机速度控制系统设计

杨新顺

(重庆化工职业学院, 重庆 401220)

摘要: **目的** 提高瓦楞纸板横切机速度跟踪精度, 减小其剪切误差。**方法** 基于模糊控制设计一个速度控制系统。介绍横切机的工作原理。针对其速度跟踪控制, 阐述具体的控制算法。基于模糊控制设计一种速度跟踪控制器, 以解决其非线性、数学模型不精确等问题, 主要包括模糊化、隶属度函数、模糊规则等。以 DSP 为核心, 搭建实验平台。同时详细阐述硬件电路结构, 包括 IPM 模块、驱动隔离电路、速度和位置检测电路等。**结果** 实验结果表明, 即使存在干扰, 控制系统仍可以在很短的时间内完成速度响应。同步区速度偏差较小、跟踪精度高。**结论** 所述控制系统能够提高剪切效率、降低剪切误差, 满足横切机的设计要求。

关键词: 横切机; 瓦楞纸板; 模糊控制; 速度跟踪; DSP

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0132-05

Speed Control System Design for Corrugated Cardboard Crosscut Machine

YANG Xin-shun

(Chongqing Chemical Industry Vocational College, Chongqing 401220, China)

ABSTRACT: To improve the speed tracking precision of corrugated cardboard crosscut machines and reduce its shearing error. A speed control system was designed based on the fuzzy control. The working principle of cross-cutting machine was introduced. Aimed at the speed tracking control, a control algorithm was expounded. A speed tracking controller was designed based on fuzzy control to solve problems such as nonlinearity, inaccurate mathematical model, mainly including fuzzification, membership functions and fuzzy rules. The experimental platform was set up with DSP as the core. The hardware circuit structure was also expounded, including IPM module, driving isolating circuit, speed and position detection circuit, etc. The control system still could obtain speed response in a short time even if interference existed. It also had small synchronous speed deviation and high tracking accuracy. The control system described can improve the shearing efficiency and reduce the shearing error. It meets the design requirements of cross-cutting machine.

KEY WORDS: crosscut machine; corrugated cardboard; fuzzy control; speed tracking; DSP

瓦楞纸在包装工业中的应用十分广泛, 绝大多数轻工业产品均会采用瓦楞纸板箱进行包装^[1]。横切机是瓦楞纸板生产线中的重要设备, 其运动性能势必影响成型纸板的质量、生产效率、材料损耗以及制造成本等^[2-3]。同时横切机也是瓦楞纸板生产线中控制过程比较复杂的一部分^[4], 因此, 保证成型纸板质量的关键在于提高横切机控制系统的综合性能。我国瓦楞纸板横切机的发展水平依旧较低, 很难满足当今市场在宽幅、高效、高档、高速、高质等方面的要求^[5-8]。在某种程度上, 瓦楞纸板生产线性提高的关键在于

横切机控制技术的发展和运用。

目前, 横切机大多采用机械刀或者电脑刀^[9]。采用机械刀的横切机, 通过调整变速箱传动比来改变瓦楞纸板的长度。受齿轮间隙、机械磨损等的影响, 纸板剪切不仅效率低而且误差较大^[10-11]。采用电脑刀的横切机大多采用普通变频器或单片机进行控制, 虽然效率较高, 但是仍有一些缺陷。例如: 普通变频器为开环控制, 无法实现速度跟随, 造成剪切误差偏大。单片机若要实现速度闭环控制耗时较长, 高速情况下定位精度较低, 剪切误差较大^[12-14]。另外, 横切系

收稿日期: 2017-03-02

作者简介: 杨新顺 (1979—), 男, 硕士, 重庆化工职业学院高级工程师, 主要研究方向为机电产品研发及设计。

统是一种时变、非线性的复杂系统，传统 PID 控制很难保证横切精度，达不到预期的控制效果。近年来，智能控制算法在横切机控制系统中的应用越来越广泛，如神经网络控制、滑模控制、模糊控制等^[15-16]。其中模糊控制不需要确定被控对象精确数学模型，能够提高系统动态跟随性能，可用于横切过程的精确控制。甚至可以实现不同速度、不同厚度的瓦楞纸板的定长切割，具有良好的静态、动态性能。

在现有研究的基础上，文中基于模糊控制设计一种瓦楞纸板横切机速度控制系统，利用 DSP 设计一种实验平台，并通过实验验证文中所述方法的可行性和有效性。

1 横切机工作原理

横切机即“飞剪”，可用于实现瓦楞纸板的定长剪切。如图 1 所示，工作过程可描述为：通过人机界面设定瓦楞纸的剪切长度、进给速度，进而确定刀辊电机的运动规律；工作过程中，瓦楞纸板从横切机上下刀辊中间穿过，实现定长剪切。剪切过程中必须满足在剪切位置瓦楞纸板的进给速度 v_0 等于切刀线速度的水平分量 v_1 ，即速度同步。如果 $v_0 < v_1$ ，即进给速度小于切刀线速度水平分量，容易造成纸板撕裂；如果 $v_0 > v_1$ ，即进给速度大于切刀线速度水平分量，容易导致纸板起皱。另外，在一个剪切周期 T 内，穿过切刀的纸板长度应等于设定长度，而且误差要控制在允许范围内。

为满足上述工艺要求，需要解决 2 个“同步”问题，即位置同步、速度同步。其中位置同步可保证剪切长度的精确性；速度同步可进一步减小剪切误差，同时保证产品质量。这 2 个问题的关联性较强，所以控制难度比较大。为提高横切机剪切精度，文中以速度跟踪控制为研究对象，以确保切点处的“速度同步”，进而改善系统工作过程的动态性能。

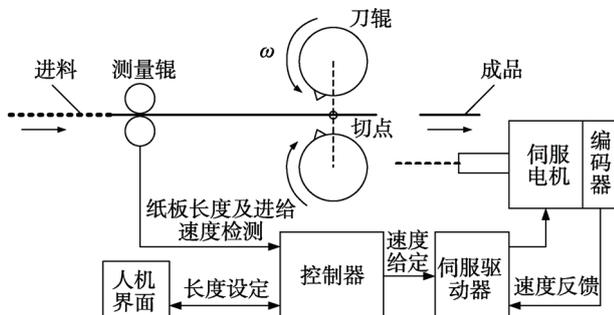


图 1 横切机工作过程
Fig.1 The working process of cross-cutting machine

2 控制算法

2.1 控制原理

在一个剪切周期 T 内，切刀运动轨迹可分为补偿

区和同步区。如图 2 所示，CZA 表示补偿区，ABC 表示同步区。当切刀位于同步区时，切刀线速度 v 的水平分量 v_1 须等于瓦楞纸板进给速度 v_0 。如此，当刀刃到达剪切点 B 时，切刀线速度 v 和瓦楞纸板进给速度 v_0 完全相同，剪断纸板。切刀在补偿区进行速度、时间调整。 θ 表示同步角，其大小应根据瓦楞纸板的厚度确定。

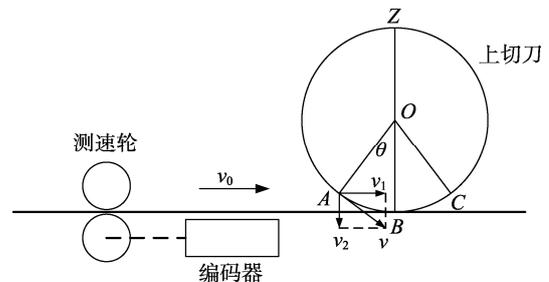


图 2 切刀运动轨迹

Fig.2 Motion curve of parting tool

根据切刀旋转周长 P 与设定剪切长度 L 之间的关系，可确定切刀运动规律，大体包含 5 种情况，如下所述。

- 1) $P > L$ ，即旋转周长大于剪切长度，对应切刀运动规律为同步运动—加速—减速—同步运动。
- 2) $P = L$ ，即旋转周长等于剪切长度。在整个周期内，切刀做匀速运动且速度与瓦楞纸板进给速度相同。
- 3) $P < L < 2P$ ，即剪切长度大于旋转周长但小于旋转周长 2 倍，对应切刀运动规律为同步运动—减速—加速—同步运动。
- 4) $L = 2P$ ，即剪切长度等于旋转周长的 2 倍，对应切刀运动规律为同步运动—减速—零—加速—同步运动。
- 5) $L > 2P$ ，即剪切长度大于旋转周长的 2 倍，对应切刀运动规律为同步运动—减速—停止—加速—同步运动。

2.2 模糊控制

在实际工作过程中，受振动、摩擦等因素的影响，速度同步效果不够理想。为了减小横切机的速度跟踪误差，可通过速度控制，提高其剪切精度，故设计了一种模糊控制器，见图 3。

文中以纸板进给速度作为参考值，切刀同步区速度与纸板进给速度保持一致，在补偿区进行速度调整。速度调整就是伺服电机脉冲频率的改变。在实际工作过程中，通过编码器实时检测反馈脉冲个数，并计算出电机实际旋转速度，与理论值比较得到速度偏差。该速度偏差作为模糊控制器的输入量，通过模糊处理得到控制变量，即输出量。根据控制变量，调整脉冲频率 $f' = k(u)f$ ，其中 f 为调整前脉冲频率； f' 为调整后脉冲频率； $k(u)$ 表示与控制量有关的比例系数，

进而实现速度的跟踪控制。由图3可知：根据速度参考值和实际速度反馈值，由比较器计算速度偏差 e ；通过求导可得误差变化率 Δe ；利用模糊控制器实现 e 和 Δe 的模糊化、模糊推理、解模糊化等处理，同时得到控制量 u ；根据控制量 u ，结合伺服驱动装置实现横切电机的实时模糊控制。

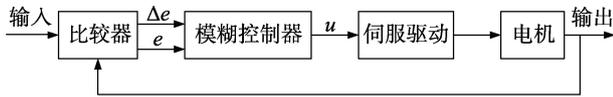


图3 模糊控制框图
Fig.3 Fuzzy control block diagram

模糊控制可模拟人类思维，主要用于一些很难建立数学模型的场合。作为模糊控制核心，如图3所示模糊控制器涉及到模糊化处理、隶属度函数、模糊规则、模糊推理、解模糊化等关键模块。

1) 模糊化处理。输入变量和输出变量的模糊子集均为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，其中NB表示负大，NM表示负中，NS表示负小，ZO表示0，PS表示正小，PM表示正中，PB表示正大。根据模糊子集可将输入变量误差 e 、误差变化率 Δe 以及输出变量 u 简单量化为13个等级，即{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}。

2) 隶属度函数。采用如图4所示的三角形隶属度函数处理输入和输出变量的模糊子集。

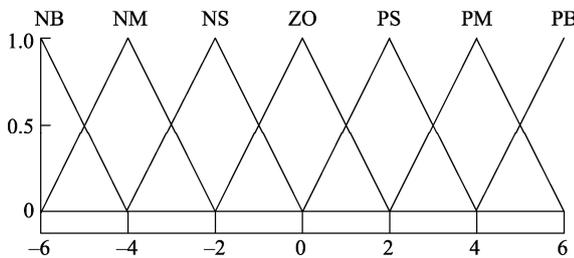


图4 隶属度函数
Fig.4 Membership dunction

3) 模糊规则。根据设计者经验进行总结、归纳，进而得到模糊控制规则 and 对应条件语句，模糊规则见表1。

表1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules

e	Δe						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NM	NB	NB	NB

4) 模糊推理和解模糊化。采用 Mamdani 方法实现模糊推理，解模糊化则用于实现输出变量的清晰化，文中采用平滑性较好的重心法。

3 控制系统设计

横切机控制系统主要包括：DSP 微控制器，PWM 隔离驱动电路，IPM 模块，电压、电流、速度检测电路以及保护电路等。其中 DSP 微控制器选用 TMS320F2812 芯片，IPM 模块选用基于 IGBT 的智能功率控制模块。控制系统结构见图5。以 DSP 作为运动控制核心，进行长度和速度检测、位置+电压+电流反馈控制、驱动控制、同步跟踪等，进而实现数字控制。具体地讲，采用光电耦合器进行脉宽调制信号(PWM)和功率控制器件的隔离与控制；霍尔电流和电压传感器信号经滤波、调幅、限幅处理后传送至 DSP 的 A/D 接口；采用增量式光电编码器实现伺服电机的速度和位置检测，编码器信号经光电隔离处理后传送至 DSP 的 QEP 接口；利用测长轮测定瓦楞纸板的进给速度，经光电隔离处理后传送至 DSP 的 CAP 接口。

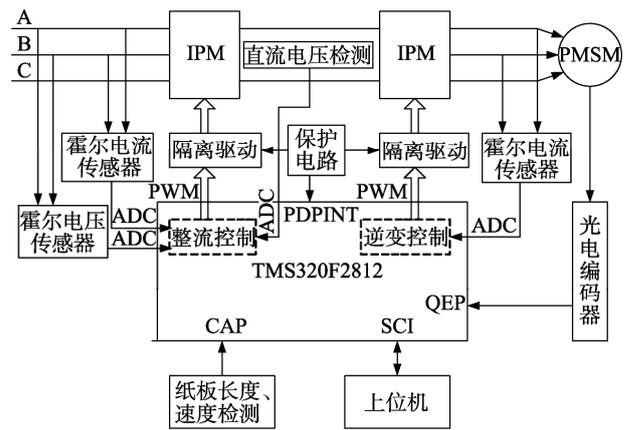


图5 控制系统结构
Fig.5 Control system structure

3.1 运动控制器

TMS320F2812 系统主要由 3.3 V 低压供电 CPU、中断管理模块、片内存储器、事件管理器等组成。TMS320F2812 运算速度比较高，例如：乘法运算仅仅需要 1 个机器周期，即 6.67 ns。DSP 数据处理速度较快，其运算速度和精度可为双 PWM 驱动控制、反馈信号处理提供支撑。另外，TMS320F2812 还集成了大部分数字接口电路，可用于运动控制。外围电路设计只需通信接口电路、保护电路、模拟信号处理电路等即可，在很大程度上简化了系统设计过程，不但可以降低成本而且能够提高可靠性。

3.2 IPM 模块

双 PWM 变频器的逆变和整流部分控制需要多个 IGBT 开关管，如果利用 IPM 智能控制模块就可以大

大地减小体积。文中所选 IPM 智能控制模块选用 6MBP50JB(JA)060，其内部 IGBT 具有低功耗、过热保护、高可靠性、软开关等特性。同时，内置欠压保护、短路保护、过电流保护、过热保护等电路。该模块作为双 PWM 变频器的功率器件具有硬件电路设计简单、接线简单、电源体积小、开发周期短、可靠性和安全性高等优点。

3.3 PWM 驱动隔离电路

逆变桥和整流电路均采用 PWM 驱动。通常情况下，单个桥臂的上、下管在闭合和断开的瞬间容易导致直通短路，进而损坏功率器件。为避免此现象，可在 PWM 控制信号中加入死区，同时利用高速光耦 CPL4504 进行信号隔离。另外，还可以用 74HC244 提升 DSP 的驱动能力。

除上述各部分外，基于 DSP 片内的正交解码单元处理增量式光电编码器信号实现瓦楞纸板和切刀的位置、速度检测。为提高信号的抗干扰性，可选择差分输出光电编码器，同时利用 AM26LS32 芯片实现信号转换，将差分信号转换为单端信号。AM26LS32 还具有信号整形作用。

4 实验及结果分析

所述伺服驱动系统和控制系统是横切机的关键部分，其性能直接决定横切机的剪切精度和效率。为验证控制策略的可行性和有效性，基于 DSP 搭建控制系统并进行实验研究。为便于实验，文中选用功率较小的交流永磁伺服电机（切刀驱动装置）作为被控对象，其参数设置：额定功率为 0.1 kW，额定转速为 3000 r/min，额定电压为 100 V，额定电流为 1.1 A，频率为 50 Hz，转矩为 0.16 N·m，瞬时最大转矩为 0.48 N·m，转动惯量为 0.025 g·m²。

在实际生产过程中，横切系统需要频繁的启动、停止、加速、减速、正转、反转等，可针对性地进行相关实验。实验过程中，电机依次进行正转、反转实验，即启动—加速—匀速运转—减速—停止等，实验持续半小时以上。整个过程中，电机不仅运转正常而且状态良好，表明所选伺服电机可以满足瓦楞纸板横切机的工作要求。

验证横切机的速度跟踪效果，其在很大程度上可用于评判横切机控制效果是否理想，即速度跟踪测试比较重要。实验过程中，刀辊周长为 600 mm，设定剪切长度为 2000 mm，属于长料剪切。针对纸板速度恒定、纸板速度随机波动 2 种情况进行实验，利用示波器获取纸板和刀辊速度曲线，见图 6。当速度发生变化时，控制系统可以在很短的时间内完成速度响应且跟踪精度较高。结果表明，所设计控制系统的速度跟踪效果十分理想，可以满足横切机控制要求。

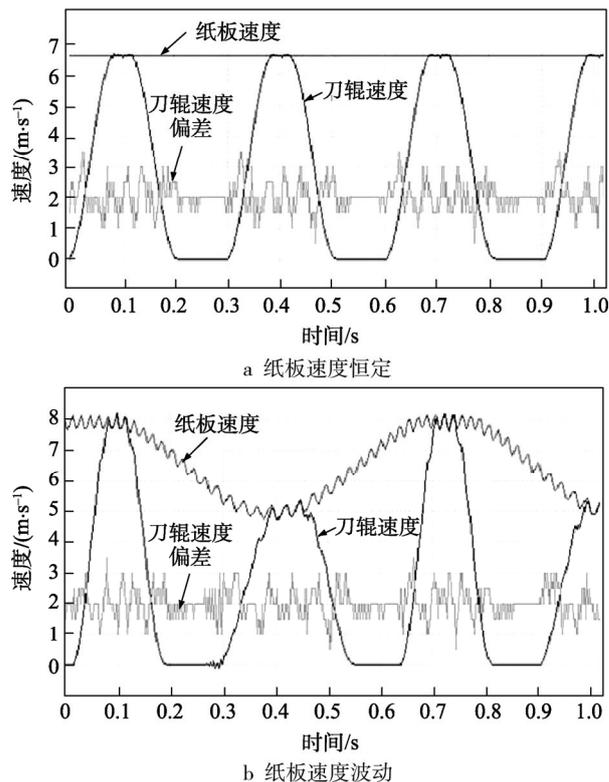


图 6 速度跟随实验结果

Fig.6 Speed tracking experimental results

综上所述，文中所述瓦楞纸板横切机速度控制系统具有跟踪精度高、响应时间短、控制效果良好等特性，可以降低剪切误差，提高剪切效率，因此该系统能够达到横切机的设计要求。

5 结语

当前绝大多数轻工业产品采用瓦楞纸板箱进行包装，因此瓦楞纸在包装工业中的应用十分广泛。横切机作为瓦楞纸板生产线末端的重要设备，其运动性能直接决定纸板的质量、生产效率、制造成本等。文中以瓦楞纸板横切机速度控制为研究对象，基于模糊控制设计了一种速度跟踪控制系统。并采用 TMS320F2812 DSP 设计了一种控制平台。通过实验验证了所述控制方法和系统的可行性和有效性，具有跟踪精度高、响应时间短、控制效果良好等特性。不仅满足横切机设计要求，而且可对后续相关设备研制具有一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 蔡锦达, 刘劲阳, 杨宝山. 基于自适应模糊 PID 飞剪冲切机控制研究[J]. 控制工程, 2016, 23(5): 695—697.
CAI Jin-da, LIU Jin-yang, YANG Bao-shan. Flying

- Shear Punching Machine Based on Adaptive Fuzzy PID Control Algorithm[J]. *Control Engineering of China*, 2016, 23(5): 695—697.
- [2] WU H Z, LUO N H, WANG C Y. Study on Control Strategy of the Rotary Synchronous Fixed-length Cutting system[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2013(6): 713—725.
- [3] 郭建峰, 王满利, 王成硕. 基于 TRIO 运动控制器的瓦楞纸板横切机控制系统设计[J]. *自动化技术与应用*, 2010, 29(8): 5—7.
GUO Jian-feng, WANG Man-li, WANG Cheng-shuo. The Design of Corrugated Cardboard Crosscut Machine Control System on Basis of TRIO Motion Controller[J]. *Techniques of Automation & Application*, 2010, 29(8): 5—7.
- [4] 余发山, 郑俊锋, 张伟. 瓦楞纸板横切机飞剪控制算法设计与仿真[J]. *电气技术*, 2009, 30(5): 41—43.
YU Fa-shan, ZHENG Jun-feng, ZHANG Wei. The Design and Simulation of Control Algorithm for Corrugated Cardboard Crosscut Machine Fly Shear[J]. *Electrical Engineering*, 2009, 30(5): 41—43.
- [5] 张宇华, 姜建国, 余发山. 基于双 PWM 的瓦楞纸板横切机控制系统设计[J]. *微电机*, 2010, 43(8): 87—89.
ZHANG Yu-hua, JIANG Jian-guo, YU Fa-shan. Design of the Corrugated Cardboard Crosscut Machine's Controlled System Based on Dual-PWM[J]. *Micromotors*, 2010, 43(8): 87—89.
- [6] 余永维, 杜柳青, 冯文杰. 瓦楞纸自动横切机控制系统设计[J]. *包装工程*, 2010, 31(1): 93—95.
YU Yong-wei, DU Liu-qing, FENG Wen-jie. Control System Design for the Corrugated Board Automatic Cross-cutting Machine[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(1): 93—95.
- [7] 康启来. 瓦楞纸箱及其纸板的检测和质量控制[J]. *中国包装*, 2012, 32(10): 38—41.
KANG Qi-lai. Testing and Quality Control of Corrugated Boxes and Cardboard[J]. *China Packing*, 2012, 32(10): 38—41.
- [8] YE Jian-mei, LIU Bin. Corrugated Single Plane Pressure Control System Based on S7-300[J]. *Advances in Engineering Design and Optimization III*, 2012, 201: 392—395.
- [9] 叶建美, 谢子青. 基于 S7-300 的瓦楞纸温控系统设计[J]. *包装工程*, 2010, 31(11): 96—98.
YE Jian-mei, XIE Zi-qing. Design of Thermal Control System for Corrugated Paper Based on S7-300[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(11): 96—98.
- [10] 余发山, 杨晓邦, 张伟. 基于模糊 PID 控制的瓦楞纸板横切机速度跟随控制器设计[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(3): 316—320.
YU Fa-shan, YANG Xiao-bang, ZHANG Wei. Design on Speed to Follow Controller of Cross-cutting Machine Based on Fuzzy PID Control[J]. *Journal of Heinan Polytechnic University (Natural Science)*, 2009, 28(3): 316—320.
- [11] 巩桂芬, 贾丽平. 关于瓦楞纸板质量控制的研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(10): 126—128.
GONG Gui-fen, JIA Li-ping. Study of Corrugated Board Quality Control[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(10): 126—128.
- [12] 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]. *微特电机*, 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.
- [13] 王建华, 詹国兵. 造纸机多电机同步速度链控制系统研究[J]. *机械工程与自动化*, 2015(4): 148—149.
WANG Jian-hua, ZHAN Guo-bing. Research on Multi-motor Synchronous Speed Chain Control System of Paper Machine[J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2015(4): 148—149.
- [14] 崔皆凡, 刘艳, 闫红, 等. 基于模糊控制的多电机神经元 PID 同步控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2013, 2(2): 81—83.
CUI Jie-fan, LIU Yan, YAN Hong, et al. Multi-motor Neuron PID Synchronous Control Based on Fuzzy Control[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013, 2(2): 81—83.
- [15] 蔡锦达, 齐建虹. 基于 ARM9 的自适应模糊 PID 定长切割控制系统[J]. *控制工程*, 2014, 21(3): 315—320.
CAI Jin-da, QI Jian-hong. Adaptive Fuzzy PID Algorithm Fixed-length Cutting Control System Based on ARM9[J]. *Control Engineering of China*, 2014, 21(3): 315—320.
- [16] 余发山, 张伟, 刘艳昌. 基于模糊控制的瓦楞纸板横切机速度跟随控制[J]. *电气传动*, 2008, 38(9): 75—77.
YU Fa-shan, ZHANG Wei, LIU Yan-chang. Speed Following Control of Corrugated Cardboard Crosscut Machine Based on Fuzzy Controller[J]. *Electric Drive*, 2008, 38(9): 75—77.