

瓦楞纸箱印刷多轴控制方法设计

李厥瑾

(山东电子职业技术学院, 济南 250200)

摘要: **目的** 为提高瓦楞纸箱印刷过程多轴同步控制精度, 采用偏差耦合控制设计一种多轴同步控制算法。**方法** 在介绍瓦楞纸印刷机结构的基础上, 以印刷模块多电机控制为研究对象, 基于偏差耦合控制阐述多轴位置控制问题。为减小同步误差, 设计一种变论域模糊控制算法。在传统模糊控制的基础上, 引入伸缩因子以实现模糊控制输入和输出的动态调节。集合 ARM 和 FPGA 设计多轴同步控制器。最后, 进行实验研究。**结果** 电机同步误差会在 1 s 内趋于 0, 同步性能比较理想; 变论域模糊控制可将最大同步位置误差控制在 2 rad/s 内; 各色套印的准确度较高, 并没有出现错印等情况。**结论** 所述瓦楞纸箱多轴控制方法响应速度较快、运行稳定, 可以完全满足瓦楞纸箱印刷要求。

关键词: 瓦楞纸箱; 印刷; 偏差耦合; 同步控制; 变论域模糊控制

中图分类号: TS803.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)03-0240-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.03.034

Design of Multi-axis Control Method for Corrugated Carton Printing

LI Jue-jin

(Shandong College of Electronic Technology, Jinan 250200, China)

ABSTRACT: The work aims to design a multi-axis synchronous control algorithm by deviation coupling control, in order to improve the accuracy of multi-axis synchronous control in corrugated carton printing process. Based on the introduction to the structure of corrugated printing machine and with multi-motor control of printing module as the research object, the multi-axis position control was expounded based on the deviation coupling control. In order to reduce the synchronous error, a variable-domain fuzzy control algorithm was designed. On the basis of traditional fuzzy control, flex factor was introduced to realize dynamic adjustment of input and output of fuzzy control. A multi-axis synchronous controller was designed based on ARM and FPGA. Finally, an experimental study was carried out. The synchronous error of the motor tended to 0 within 1 s, and the synchronous performance was ideal. The variable-domain fuzzy control method could control the maximum synchronous position error within 2 rad/s. The accuracy of color overprinting was relatively high, and there were no misprints. The corrugated carton multi-axis control method has a relatively fast response speed and stable operation, which can fully meet the requirements of corrugated carton printing.

KEY WORDS: corrugated carton; printing; deviation coupling; synchronization control; variable-domain fuzzy control

随着高端消费市场的不断发展, 人们对产品外包装表面的印刷质量的要求越来越高, 同时, 工业自动化水平的不断提高, 也为高质量印刷提供了技术支撑。以瓦楞纸箱印刷为例, 传统印刷设备大多

采用机械传动, 但是机械传动精度不高, 缺乏柔性, 长时间工作势必造成设备磨损, 导致精度下降^[1]。由于各单元动力均由主电机提供, 所以无法对各单元进行单独调试。为解决此问题, 许多学者考虑使

收稿日期: 2020-06-24

作者简介: 李厥瑾 (1974—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为控制系统设计。

用电机直接驱动各轴，通过多轴控制实现印刷同步控制^[2-3]。

多轴同步控制方式主要包括并行控制、偏差耦合控制、相邻交叉耦合控制等。总体来说，并行同步控制结构比较简单，但是同步精度较低，不适合高精度场合。偏差耦合控制则是将单台电机的实际转速和其余电机转速相比较，通过补偿每台电机的误差来实现多轴的同步控制。相邻交叉耦合控制的精度较高，但其仅调节相邻电机，主要适用于电机数目较多的系统，控制过程较复杂^[4-7]。综合考虑，文中选用偏差耦合控制来实现瓦楞纸印刷系统的同步控制，通过变论域模糊控制来提高印刷精度，并通过实验验证所述系统的可行性和有效性。

1 瓦楞纸箱印刷工作原理

瓦楞纸印刷机结构见图 1，该设备主要由送纸模块、印刷模块、开槽模块以及模切模块组成。文中所研究瓦楞纸印刷机包括 4 个印刷模块，每个模块可印刷 1 种颜色。纸箱最初放置在送纸模块拖纸架上，根据参数，单张纸箱由吸风送纸装置和送纸辊运送到印刷模块；在印刷模块，经多色精准套印后运送至开槽模块；开槽模块对瓦楞纸进行压痕、开槽处理，然后送至模切模块；模切模块利用模切版切除多余部分，至此，基本完成瓦楞纸箱的印刷、成型等生产流程。

以印刷模块为研究对象，利用 4 台电机直接驱动各印刷模块，不同印刷模块之间的同步情况将决定多色套印的精度。如果各电机之间同步效果不理想，那么瓦楞纸箱就会出现印刷偏差，导致废品率升高。为确保套印精度，就必须将各电机之间的同步误差控制在工艺允许的范围之内。

2 印刷多轴控制器设计

2.1 偏差耦合控制原理

如上所述，文中选用偏差耦合控制实现多电机同步控制。相对而言，偏差耦合控制的精度比较高且非常适合电机数目小于 6 的场合^[8]。多轴位置同步控制问题可描述为：针对系统给定期望位置 q_d ，设计控制规律 τ ，确保位值误差和同步误差均收敛于 0。

位置误差矢量可定义为：

$$e = q - q_d \quad (1)$$

式中： q 为实际位置； q_d 为期望位置。

根据偏差耦合控制原理，各轴的同步误差可以定义为该轴误差与其相邻两轴误差之间的关系，即：

$$\begin{cases} E_1 = 2e_1 - (e_2 + e_n) \\ E_2 = 2e_2 - (e_3 + e_1) \\ \vdots \\ E_i = 2e_i - (e_{i+1} + e_{i-1}) \\ \vdots \\ E_n = 2e_n - (e_1 + e_{n-1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： e_i 为第 i 轴的位置误差； E_i 为第 i 轴的同步误差。

如果式 (2) 所述同步误差均等于 0，就可以确保 $e_1 = e_2 = \dots = e_n$ ，即实现同步控制^[9]。如果将式 (2) 调整为矩阵形式，则有：

$$E = Te \quad (3)$$

即：

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_{n-1} \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & \dots & -1 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & \dots & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_{n-1} \\ e_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

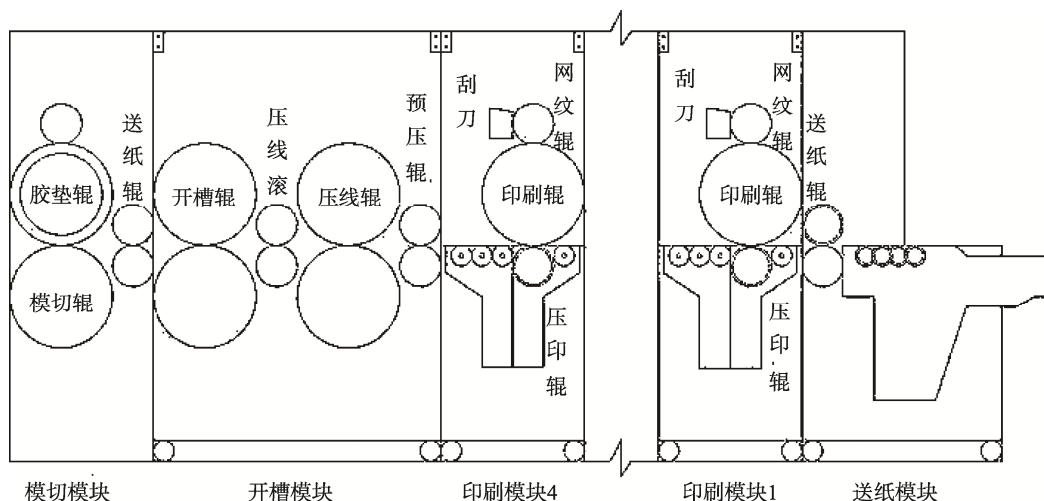


图 1 瓦楞纸印刷机结构
Fig.1 Schematic structure of corrugated printing machine

式中： T 为同步转换矩阵。

耦合误差^[10]可定义为：

$$\varepsilon = e + \beta E \tag{5}$$

综合以上各式可以得到：

$$\varepsilon = (I + \beta T)e \tag{6}$$

式中： I 为单位对角矩阵； β 为耦合误差系数。

综上所述， β 满足 $0 < \beta \leq 1$ ，该值越大，同步控制作用就会越强。当 $e \rightarrow 0$ 以及 $E \rightarrow 0$ ，则有 $\varepsilon \rightarrow 0$ ，表明同步控制便可实现。

2.2 变论域模糊控制

所谓变论域模糊控制，就是在保持模糊规则不变的前提下，将伸缩因子引入模糊论域，使得论域范围随着误差的变化而变化，从而让论域中不同语言值的隶属度函数也发生相应的变化^[11]。

如上所述，模糊控制器输入可定义为同步误差及其变化率，即： $X_e = [-E, E]$ ， $X_{ec} = [-E_c, E_c]$ ；模糊控制器输出可定义为 $X_{ecc} = [-D, D]$ 。如果通过引入伸缩因子使模糊控制器的论域发生变化，那么则有：

$$\begin{cases} X_e = [-aE, aE] \\ X_{ec} = [-bE_c, bE_c] \\ X_{ecc} = [-cD, cD] \end{cases} \tag{7}$$

式中： a 和 b 为模糊输入论域的伸缩因子； c 为模糊输出论域的伸缩因子，其对应表达式可描述为：

$$\begin{cases} a = 1 - \lambda \exp[-\eta^2] \\ b = 1 - \lambda \exp[-\eta^2] \\ c = [a + b]/2 \end{cases} \tag{8}$$

式中： λ 和 η 均为常量且满足 $\lambda \in (0, 1)$ ， $\eta > 0$ 。

在模糊控制过程中，如果控制器的输入 E 和 E_c 不断变小，那么对应伸缩因子 a ， b 和 c 也会随之变小。此时论域范围收缩，即增加模糊规则，进而提高控制精度^[12]。

2.3 伸缩因子设计

变论域模糊控制和模糊控制的最大区别在于：变论域模糊控制能够根据系统输入变化来调整收缩因子，因此，设计伸缩因子是变论域模糊控制器设计的一个关键步骤。

文中考虑使用模糊推理法设计伸缩因子，其模糊规则可遵循准则如下所述。

1) 如果 E 和 E_c 比较大，那么控制系统主要目的就是使被控对象尽快恢复到稳定状态，减小同步误差，此时可考虑扩大输入论域，即增大 a 和 b 。这种情况下，系统响应速度会提高，系统输出也会增大。

2) 如果 E 和 E_c 很小，那么系统接近稳定，此时应保持系统稳定同时减小同步误差，所以可以考虑缩小输入论域，即减小 a 和 b 。这种情况下，系统输出也会减小。

定义变论域模糊控制器的输入变量的模糊划分为{NB/负大, NM/负中, NS/负小, ZO/零, PS/正小, PM/正中, PB/正大}，输出变量的模糊划分为{NB/负大, NM/负中, NS/负小, ZO/零, PS/正小, PM/正中, PB/正大}。输入论域和输出论域伸缩因子的模糊划分为{B/大, M/中, S/小, ZO/零}。根据伸缩因子的调节规律，可以得到伸缩因子的模糊控制规则^[13-14]，具体见表1—3。

3 实验研究

3.1 实验平台搭建

文中以 ARM 和 FPGA 的双核心模式进行实验平台搭建。选用 ARM 芯片 S3C2440 作为主控制器，从控制器选用 EP4C 系列 FPGA。该实验平台主要包括人机交互模块、电机驱动模块、接口模块、复位模块以及数据存储模块^[15-16]。

主控制器核心为 S3C2440 芯片，外围配置 NAND Flash 存储器，用于记录电机运行过程的实时数据、

表 1 伸缩因子 a 的模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules for flex factor a

E	E_c						
	PB/正大	PM/正中	PS/正小	ZO/零	NS/负小	NM/负中	NB/负大
PB/正大	B/大	B/大	B/大	S/小	M/中	B/大	B/大
PM/正中	B/大	M/中	M/中	S/小	S/小	M/中	B/大
PS/正小	M/中	M/中	M/中	Z/零	S/小	M/中	M/中
ZO/零	M/中	M/中	S/小	Z/零	Z/零	S/小	M/中
NS/负小	M/中	S/小	M/中	Z/零	S/小	M/中	M/中
NM/负中	B/大	Z/零	M/中	S/小	S/小	M/中	B/大
NB/负大	B/大	Z/零	B/大	S/小	M/中	B/大	B/大

表 2 伸缩因子 b 的模糊控制规则
Tab.2 Fuzzy control rules for flex factor b

E	E_c						
	PB/正大	PM/正中	PS/正小	ZO/零	NS/负小	NM/负中	NB/负大
PB/正大	B/大	B/大	M/中	M/中	M/中	B/大	B/大
PM/正中	B/大	B/大	S/小	S/小	S/小	B/大	B/大
PS/正小	M/中	M/中	S/小	Z/零	S/小	M/中	M/中
ZO/零	M/中	S/小	Z/零	Z/零	Z/零	S/小	M/中
NS/负小	M/中	M/中	S/小	Z/零	S/小	M/中	M/中
NM/负中	B/大	B/大	S/小	S/小	S/小	B/大	B/大
NB/负大	B/大	B/大	M/中	M/中	M/中	B/大	B/大

表 3 伸缩因子 c 的模糊控制规则
Tab.3 Fuzzy control rules for flex factor c

E	E_c						
	PB/正大	PM/正中	PS/正小	ZO/零	NS/负小	NM/负中	NB/负大
PB/正大	B/大	M/中	S/小	S/小	S/小	M/中	B/大
PM/正中	B/大	B/大	S/小	S/小	S/小	B/大	B/大
PS/正小	M/中	S/小	S/小	Z/零	S/小	M/中	M/中
ZO/零	M/中	M/中	Z/零	Z/零	Z/零	S/小	M/中
NS/负小	M/中	M/中	S/小	Z/零	S/小	M/中	M/中
NM/负中	B/大	M/中	S/小	S/小	S/小	M/中	B/大
NB/负大	B/大	B/大	M/中	S/小	M/中	B/大	B/大

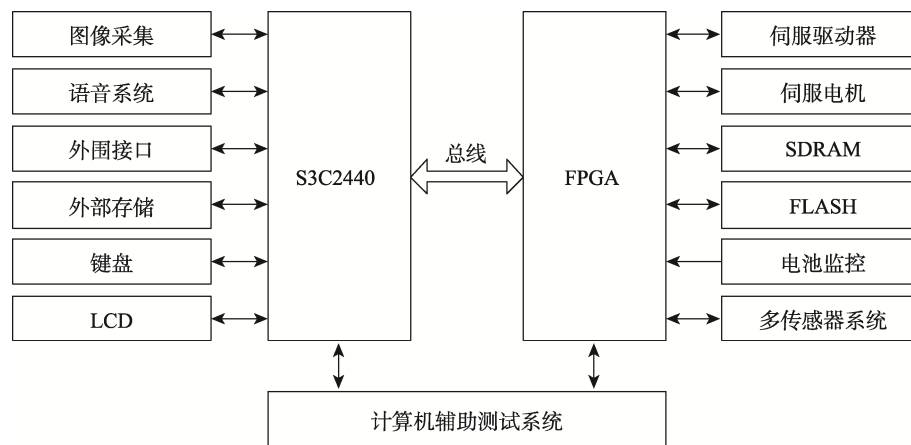


图 2 实验平台结构
Fig.2 Block diagram of experimental platform structure

位置误差数据、同步误差数据、控制变量等。

人机交互模块选用 LCD 和按键相结合的方式，LCD 和按键通过 IO 口与 FPGA 直接相连，ARM 控制器通过总线实现 FPGA 控制。

FPGA 主要完成复杂的运动控制，ARM 根据采集到的误差和同步误差，根据控制算法将控制量输送到 FPGA。FPGA 接收到控制指令经处理后发送到隔

离电路，然后发送到各伺服电机驱动器，进而实现各轴电机驱动，实现位置误差或同步误差补偿。

3.2 实验结果

为验证所述控制系统的可行性和有效性，文中进行相应实验研究。将上述同步控制方法移植到某工厂印刷生产线中，选择 2 种不同尺寸的瓦楞纸进行印刷

测试。设定印刷速度为 100 张/min, 选定 2 种颜色(黑色和红色)进行印刷实验, 结果见表 4。从数据可以看出, 印刷误差小于 0.3 mm, 印刷精度比较高, 验证了所述多轴控制方法的有效性。

实际印刷结果见图 3。从实验结果可以看出, 各色套印的准确度比较高, 并没有出现错印等情况。

在实验该过程中, 实时采集各印刷轴位置并计算同步误差, 同步误差曲线见图 4。实验结果表明, 电机同步误差则会在 1 s 内趋于 0, 同步性能比较理想; 该系统可将最大同步位置误差控制在 2 rad/s 内; 另外, 系统响应速度较快, 运行稳定, 完全可以满足瓦楞纸箱印刷要求。

表 4 套印误差
Tab.4 Printing error

采样点	误差方向	黑色套印误差/mm	红色套印误差/mm
1	x	0.06	0.11
	y	0.27	0.24
2	x	0.16	0.11
	y	0.22	0.23
3	x	0.09	0.02
	y	0.26	0.25



图 3 实际印刷结果
Fig.3 Actual printing results

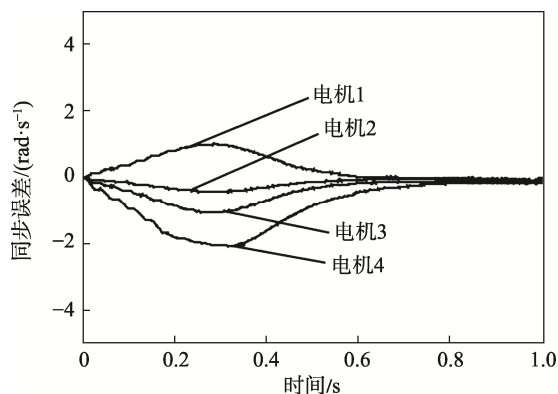


图 4 同步误差曲线
Fig.4 Synchronous error curve

4 结语

以瓦楞纸板印刷过程多轴同步控制为研究对象, 为提高多轴同步控制精度以及印刷精度, 文中采用偏差耦合控制设计了一种多轴同步控制系统。详细论述了偏差耦合控制原理, 在此基础上引入了一种变论域模糊控制方法, 可用于消除各轴之间同步误差。实验结果表明, 电机同步误差可在 1 s 内趋于 0, 可将最大同步位置误差控制在 2 rad/s 内; 印刷误差小于 0.3 mm。系统响应速度较快, 运行稳定, 印刷精度较高, 具有一定的推广和借鉴价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(19): 126—128.
GONG Gui-fen, JIA Li-ping. Study of Corrugated Board Quality Control[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 126—128.
- [3] 吴上生, 任帅康, 何国胜. 瓦楞纸箱印刷过程分析与控制系统研究开发[J]. 机电工程技术, 2019, 48(10): 34—37.
WU Shang-sheng, REN Shuai-kang, HE Guo-sheng. Research and Development of Corrugated Carton Printing Process Analysis and Control System[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(10): 34—37.
- [4] 梁浩, 赵东亚, 张贝贝, 等. 瓦楞纸板传输过程滑膜同步控制方法[J]. 机械工程与自动化, 2016(4): 146—148.
LAING Hao, ZHAO Dong-ya, ZHANG Bei-bei. Sliding Mode Synchronization Control of Corrugated Paperboard Transmission System[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(4): 146—148.
- [5] 孙瑞芳, 张晓龙, 谢晓全, 等. 工业机器人非线性 PID 偏差耦合同步控制策略[J]. 轻工机械, 2019, 37(3): 55—59.
SUN Rui-fang, ZHANG Xiao-long, XIE Xiao-quan, et al. Nonlinear PID Bias Coupling Synchronous Control Strategy for Industrial Robots[J]. Light Industry Machinery, 2019, 37(3): 55—59.
- [6] 胡鹏荣, 陶乐仁, 何俊, 等. VRF 制冷系统频率与阀开度同步控制模型与试验验证[J]. 流体机械, 2020, 48(5): 76—81.
HU Peng-rong, TAO Le-ren, HE Jun, et al. Synchronous Control Model and Experimental Verification of Frequency and Valve Opening of VRF Refrigeration System[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(5): 76—81.

- [7] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(11): 77—83.
PENG Xiao-yan, LIU Wei, ZHANG Qiang. Synchronized Control of Multi-motor Based on the Improved Relative Coupling Control[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11): 77—83.
- [8] 许宏, 李乐宝, 张怡, 等. 变摩擦负载下双电机同步控制系统设计与实验[J]. 中国机械工程, 2011, 22(24): 2908—2913.
XU Hong, LI Le-bao, ZHANG Yi, et al. Design and Experiment of Double-motor Synchronous Control System with Variable Friction Load[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 2908—2913.
- [9] 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.
- [10] 王珏, 金涛涛, 张军. 基于超扭曲非奇异滑模的多电机协调控制[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 3257—3262.
WANG Jue, JIN Tao-tao, ZHANG Jun. Multi-motor Coordination Control Based on Super-twisting Non-singular Sliding Mode[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 3257—3262.
- [11] 蒋鹏程, 汤占军, 刘萍兰. 基于变论域模糊控制光伏 MPPT 算法的仿真研究[J]. 电子科技, 2018, 31(1): 1—5.
JIANG Peng-cheng, TANG Zhan-jun, LIU Ping-lan. Simulation Study of Photovoltaic MPPT Based on Variable Universe[J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(1): 1—5.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 严亮, 舒志兵. 基于 ARM+FPGA 的机器人多轴运动控制器的设计与研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 12—18.
YAN Liang, SHU Zhi-bing. Design and Research of Robot Multi Axis Motion Controller Based on ARM+FPGA[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(11): 12—18.
- [16] 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.