

包装机械

## 枕式包装机运动分析及控制系统设计

王中元, 武艳慧

(内蒙古机电职业技术学院, 呼和浩特 010070)

**摘要:** **目的** 针对枕式包装机的运动控制问题, 实现电子凸轮、三轴同步控制等关键技术。**方法** 以三伺服枕式包装机为例, 介绍其具体结构, 包括送膜、送料、横封横切、纵封装置和制袋成型器等。对枕式包装机的运动特点进行分析, 同时简述其功能。设计一种枕式包装机控制系统, 并详细论述基于 DSP 的通用运动控制器结构。最后, 给出软件设计方法, 结合三次多项式、定步法和查表法实现电子凸轮; 采用主从同步控制实现枕式包装机的三轴同步控制。**结果** 该控制系统可以满足枕式包装机的运动控制要求, 能够提高包装质量、精度和效率, 降低次品率。**结论** 通过实验验证了所述控制方法和系统的可行性和有效性。

**关键词:** 枕式包装机; 通用运动控制器; 电子凸轮; 三轴同步控制

**中图分类号:** TB486<sup>+</sup>.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)01-0163-06

## Motion Analysis and Control System Design for Pillow Packaging Machines

WANG Zhong-yuan, WU Yan-hui

(Inner Mongolia Technical College of Mechanics and Electrics, Hohhot 010070, China)

**ABSTRACT:** The work aims to realize such key techniques as electronic CAM and three-axis synchronous control, etc. with respect to the motion control of pillow packaging machines. Taking the three-servo pillow packaging machine as an example, its specific structure was introduced, including mechanisms such as film-feeding, material-feeding, horizontal sealing, vertical sealing and pocket making former. The movement characteristics of pillow packaging machines were analyzed and its functions were described at the same time. A control system of pillow packaging machine was designed, and the structure of general motion controller was discussed in detail based on DSP. Finally, the software design methods were given. The electronic CAM was realized on the basis of cubic polynomial, given-step and look-up table methods. The three-axis synchronous control of pillow packaging machine was realized by using master-slave synchronous control. The control system could satisfy the requirements of pillow packaging machine for motion control and improve the packaging quality, precision and efficiency with defective rate reduced. The feasibility and effectiveness of the control methods and the system described above are verified by experiments.

**KEY WORDS:** pillow packaging machine; general motion controller; electronic CAM; three-axis synchronous control

在现代工业中, 包装机械的应用十分广泛。在某种意义上, 包装机械对许多行业的发展起着至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。近些年来全自动包装机械的研发、使用和推广备受关注, 许多高新技术和智能控制算法在包装机械中得以应用, 包装机械的智能化、自动化、多

功能化水平不断提高<sup>[3-5]</sup>。

包装机械是指完成全部或部分包装过程的机器, 包装过程包括成型、充填、裹包等主要包装工序, 清洗、干燥、杀菌、贴标、捆扎、集装和拆卸等前后包装工序, 以及转送、选择等其他辅助工序<sup>[6-7]</sup>。与传统包装机械

收稿日期: 2016-06-04

基金项目: 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJSY16425)

作者简介: 王中元 (1981—), 男, 硕士, 内蒙古机电职业技术学院讲师, 主要研究方向为机电一体化。

相比,自动包装机械在包装质量、包装效率、废品率等方面具有十分明显的优势。自动包装机械运动过程的智能化控制是保证其可靠性、稳定性的关键<sup>[8]</sup>。总体来说,自动包装机的运动控制主要包括各轴的单独控制以及多轴的同步控制。基于智能控制器和伺服系统可以保证各轴运动的准确性,在此基础上采用多轴同步控制算法,例如主从同步控制、相邻交叉耦合控制等,以及一些智能控制算法,如神经网络控制、滑模控制、模糊控制,来确保多轴同步控制的准确性<sup>[9-10]</sup>。针对枕式包装机运动控制及相关功能的实现,文中介绍枕式包装机的结构和主要功能,并对其运动过程进行分析;基于DSP设计一种运动控制系统,为实现电子凸轮和三轴同步控制,给出软件设计方法。

## 1 自动包装机

### 1.1 结构

以三伺服枕式包装机为例阐述自动包装机系统结构,见图1,其中A部分为送膜机构,B部分为送料机构,C部分为横封横切机构。总体来说,自动包装机主要由送膜装置、送料装置、横封横切装置、纵封装置、制袋成型器等组成。送膜装置通过主动辊和压紧辊配合工作,利用两者与包装膜之间的摩擦力实现薄膜牵引,其中主动辊由伺服电机直接驱动。由于主动辊的旋转半径是固定的,如果一段时间内伺服电机转速不变,那么理论上来说包装膜进给速度同样是不变的。

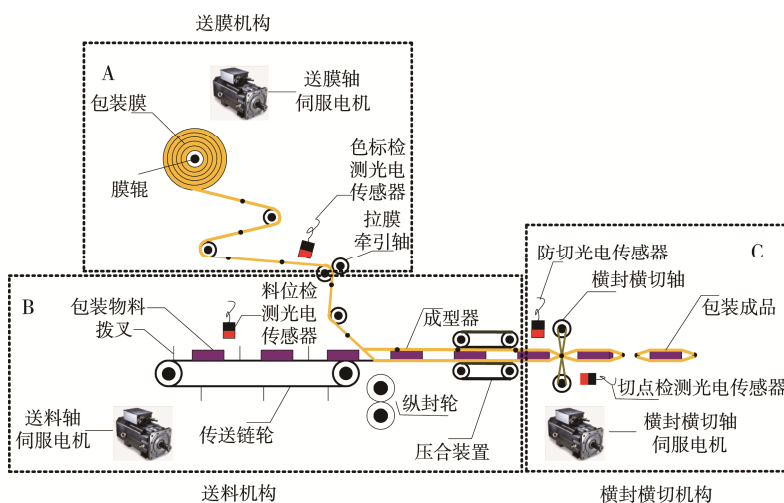


图1 自动包装机系统结构

Fig.1 Automatic packaging machine system structure

送料装置由链轮、链条和拨叉组成,其中链轮由伺服电机直接驱动,待包装物料由拨叉直接送入制袋成型器内。横封横切装置大多采用回转式辊形封切的形式,安装有刀刃和加热电极。下辊轴由伺服电机直接驱动,通过齿轮传动实现上、下辊轴的相向运动。一般情况下,横封轴进行凸轮运动,可实现包装膜的横向封合与切断。纵封装置大多采用辊式回转的形式,安装有加热电极,通过两辊筒等速相向回转可实现包装膜的纵向封合。另外,通过齿轮链条传动,纵封器辊筒旋转速度与包装膜进给速度相同,因此纵封装置对包装膜具有一定的牵引作用。

制袋成型器可将包装膜折叠成筒形,便于物料填充、纵向热封、横向热封等。

### 1.2 运动分析

包装工艺流程可以描述为:送膜装置将包装薄膜匀速传送至制袋成型器,经制袋成型器处理后,包装薄膜会变成筒状;同时送料装置会将待包装物料推入筒状包装膜内;由纵封装置完成纵向封合,横封横切

装置完成横向封合、切断等;成品输出。为保证自动包装机的包装效率和精度,其整个运动过程需满足以下几个条件:速度匹配,即送膜速度、送料速度、横封横切速度三者相同;位置匹配,即物料要处于包装薄膜的中间位置,横封切点和色标点重合。

横封轴进行凸轮运动,主要原因在于相同时间 $T$ (包装周期)内,加工袋长 $L$ 和横封轴旋转周长 $S$ 不一定相等。同时加工袋长是可以变化的,而横封轴旋转周长是固定的。如果横封轴匀速转动,势必会导致横封横切速度与送膜速度存在差异,产生相对运动引起“划膜”,造成比较大的包装误差。横封轴需要做凸轮运动以实现送膜、送料、横封横切之间的速度匹配。横封轴运动循环过程见图2。

在包装过程中,物料与包装薄膜之间的位置匹配是否精确是影响包装质量的重要因素。物料应处于筒状包装膜的特定位置,以印有色标的包装膜为例,物料应在相邻的2个色标的中间位置,这样可以最大程度地降低横封刀具损坏物料的可能性。另外,横封切点和色标点的位置是否匹配也是影响包装质量的重

要因素。在横封切断工序中，切点和色标点的重合可以避免横封刀具切到物料，可提高包装精度、降低次品率。

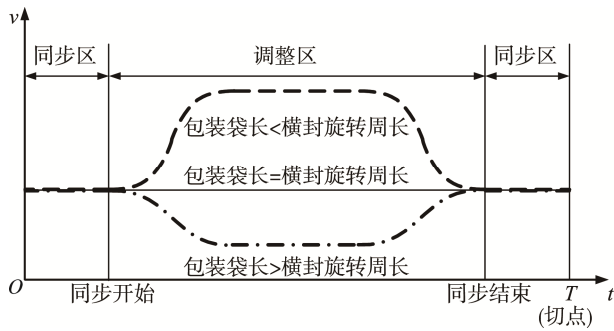


图 2 横封运动循环过程  
Fig.2 The movement cycle of horizontal sealing

### 1.3 功能简介

1) 电子凸轮。由伺服电机驱动横封轴实现凸轮运动以取代传统机械凸轮，具有输出柔性和可控性，可根据具体要求实时更改凸轮运动参数。

2) 位置跟踪。理论上，包装膜进给速度和横封横切速度是相同的，但是受拉拽、摩擦、振动等因素的影响，两者之间出现速度差，导致切点和色标点无法重合。自动包装机的位置跟踪功能可实时检测色标点的位置，进而保证横封刀具准确地切到色标点上。

3) 物料跟随。保证物料与包装膜之间的位置匹配，检测错位物料。

4) 电子防切。对错位物料不进行包装，或切到物料后自动恢复、调整，可以提高包装效率，前者还可以避免刀具和物料的损坏。

5) 自动接膜、空槽检测、恒温控制、故障报警等。可以实现自动换膜，对空物料位不进行包装，热封机构温度相对恒定，故障提示和排除，以提高生产效率、降低废品率。

## 2 硬件系统设计

自动包装机控制系统是基于伺服驱动控制技术进行搭建的，其硬件系统结构见图 3。人机界面是开发人员或操作人员与控制系统联系的主要平台。通过人机界面可以设定或修改一些参数，如包装长度、包装速度、凸轮偏心量、热封温度等，以及对刀、各轴单独控制等操作。另外，包装过程中的实时参数也可以由人机界面显示出来，便于相关人员监控包装过程、整定参数等。该运动控制系统选用 Eview MT4300C 系列触摸屏，支持多串口同时通讯、64K 色显示方式以及 C 语言宏代码，RISC 处理速度可以达到 200 MHz，具有灵活、易用等特点。人机界面见图 4。

作为自动包装机的控制核心，通用运动控制器的

作用非常重要，它可以获取由人机界面所设定的参数，通过分析、计算得到脉冲控制参数，并将这些参数传送至各伺服驱动器，进而实现自动包装机各机构的协调运动。通过光电传感器和编码器将色标、物料、各轴位置以脉冲个数的形式反馈给运动控制器，分析运动误差并进行计算补偿，以实现闭环控制。

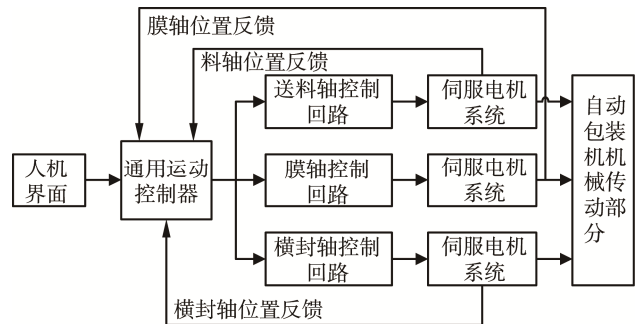


图 3 运动控制系统  
Fig.3 Motion control system block diagram



图 4 人机界面  
Fig.4 Human-computer interface

考虑到自动包装机的运动控制需求，基于 DSP 设计了一种通用多轴运动控制器，其结构见图 5。DSP 芯片选用 Motorola DSP56F807，其内核为 16 位可编程数字信号处理器。外围功能模块主要包括：异步串行通信模块 SCI，用于触摸屏通信；通用 I/O 模块

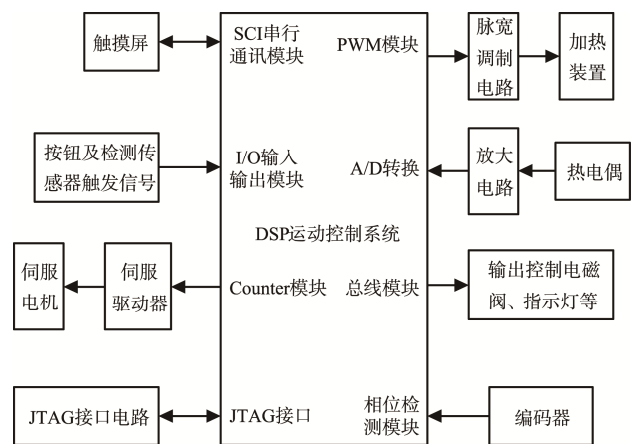


图 5 通用运动控制器  
Fig.5 General movement controller

GPIO,用于接收按钮及检测传感器触发信号;Counter模块,用于伺服电机控制;脉宽调制模块 PWM,通过脉宽调制电路控制加热装置;模数转换器 ADC,采集热电偶信号;CAN总线模块,用于控制电磁阀、信号灯等;相位检测器,用于检测编码器信号;JTAG接口等。该控制器适用于多种伺服电机的控制与应用,利用PC机编写应用程序,通过JTAG接口下载与调试。

各轴驱动系统采用伺服电机及相应伺服驱动器,伺服驱动器接收从运动控制器发出的脉冲信号,进而控制伺服电机按设定的轨迹和速度运转。

### 3 软件设计

自动包装机控制系统软件设计主要包括电子凸轮控制模块、三轴同步控制模块、人机界面设计、电子防切控制模块、恒温控制模块、故障报警程序设计等。

人机界面设计,包括可视化界面编程、基于MODBUS协议的触摸屏与通用运动控制器通讯程序等。自动包装机主要功能的实现,包括电子凸轮、位置跟踪、物料跟随、电子防切、自动接膜、空槽检测、恒温控制、故障报警等。电子凸轮和三轴同步控制作为核心,是实现其他功能的基础和前提,因此文中将重点介绍其软件设计方法。

#### 3.1 电子凸轮

电子凸轮主要包括凸轮曲线生成、离散化处理和伺服电机升降速控制等,关键在于电子凸轮加减速曲线设计。目前,常用的加减速曲线设计方法包括:直线、指数、多项式、抛物线和S曲线等。其中直线和指数加减速法的冲击比较严重;抛物线和S曲线加减速法虽然可以减少冲击,但是控制过程复杂、难以实现;多项式加减速法不仅可以减小冲击,而且算法相对简单。比较常用的柔性多项式加减速法包括三次多项式和五次多项式,虽然后者柔性更好,但是其加工效率相对较低。综合考虑,在满足无冲击、高效率的前提下,文中采用三次多项式进行凸轮加速、减速曲线设计,方程为:

$$v(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+a_3t^3$$

式中:  $a_0, a_1, a_2, a_3$  为待定系数,可通过边界条件求得。

针对电子凸轮加减速曲线,采用定步法进行离散化处理,得到一个关于脉冲频率  $f_i$  和脉冲个数  $k_i$  的控制表格。通过查表法,根据控制表格中的脉冲频率、脉冲个数实现伺服电机的升降速控制<sup>[11]</sup>。

综上所述,电子凸轮的实现过程见图6。通过触摸屏设置包装工艺参数,例如包装速度、包装袋长、

偏心量等;通过通用运动控制器获取参数,生成电子凸轮速度曲线并进行离散化处理得到伺服电机控制表格;利用查表法实现伺服电机的升降频控制,输出凸轮运动<sup>[12-13]</sup>。

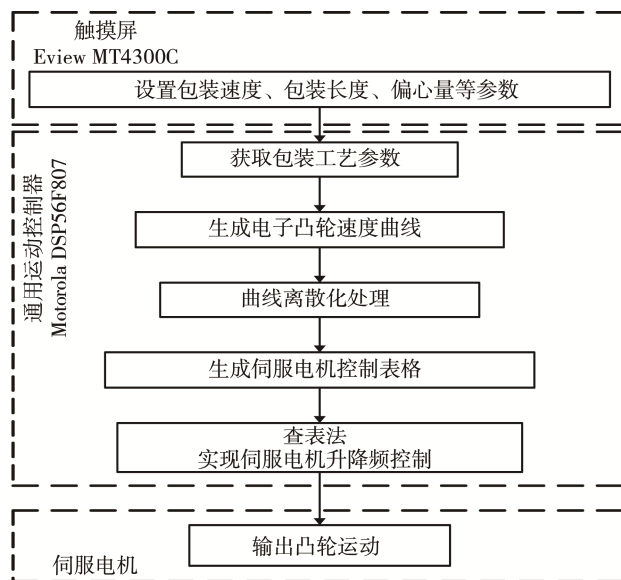


图6 电子凸轮实现过程

Fig.6 The realization of electronic CAM

#### 3.2 三轴同步控制

三轴同步是指送膜轴、送料轴、横封横切轴的速度与位置匹配控制。参考多轴同步控制算法,文中选用“主从同步控制”实现自动包装机的速度、位置同步,以保证包装质量和效率。

三轴同步控制<sup>[14-16]</sup>原理见图7,定义送膜轴为主动轴,料轴和横封横切轴为从动轴。送膜轴跟踪误差可表示为  $e_1$ 、送料轴和横封横切轴的跟踪误差可分别表示为  $e_2$  和  $e_3$ 。根据主从同步控制原理,送膜轴同步误差可表示为  $\epsilon_1=0$ ;送料轴同步误差可表示为  $\epsilon_2=e_2-e_1$ ,若能使  $\epsilon_2 \rightarrow 0$ ,可实现送膜轴和送料轴的速度或位置匹配,即物料跟踪功能;横封轴同步误差可描述为  $\epsilon_3=e_3-e_1$ ,若能使  $\epsilon_3 \rightarrow 0$ ,可实现切点和色标点速度或位置匹配,即色标自动追踪功能。

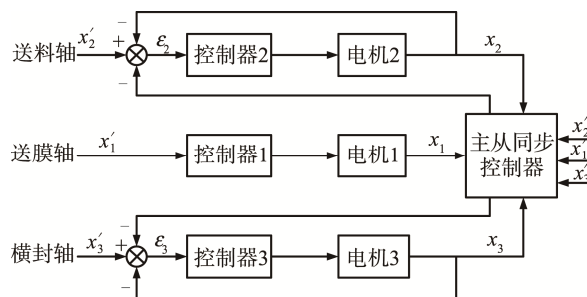


图7 三轴同步控制原理

Fig.7 Three-axis synchronous control principle diagram

## 4 实验验证

为验证所述控制系统和方法的可行性和有效性, 文中针对电子凸轮运动精度和三轴同步控制精度 2 个方面进行实验验证。考虑同步误差, 生成电子凸轮曲线的部分程序如下。

```
void H_axis(float L, float N, float K)
//定义修正包装长度(考虑同步误差)、包装速度、
伺服电机分辨率
{
    float a, b, c, d; //三次多项式系数
    EccSet(P); //设定电子凸轮偏心量
    table0[0]=F3; //同步区频率//
    table0[20]=F3;
    table1[0]=num; //同步区脉冲个数计算
    table1[20]=num;
    table0[10]=F4; //调整区频率极值//
    yy=num;
    /*凸形曲线计算方法*/
    if(L<S)
    {
        for(temp1=1;temp1<10;temp1++)
        {
            tt=t1+t2*temp1/10;
            t=tt/T;
            X4=a*t*t*t+c*t;
            X5=b*t*t+d;
            table0[temp1]=X5-X4;
            table0[20-temp1]=table0[temp1];
        }
        for(temp2=1;temp2<10;temp2++)
        {
            table1[temp2]=table0[temp2]*t2/10+0.5;
            if(temp2==5)
            {
                table1[temp2]=2*table1[temp2];
            }
            table1[20-temp2]=table1[temp2];
            yy=yy+table1[temp2];
            if(temp2==9)
            {
                table1[10]=K-2*yy;
            }
        }
    }
    /*凹形曲线计算方法*/
    if(L>S)
    {
        for(temp1=1;temp1<10;temp1++)
        {
            tt=t1+t2*temp1/10;
            t=tt/T;
            X4=a*t*t*t+c*t+F3;
            X5=b*t*t+d;
            table0[temp1]=X4-X5;
            table0[20-temp1]=table0[temp1];
        }
        for(temp2=1;temp2<10;temp2++)
    }
```

```
{
    table1[temp2]=table0[temp2]*t2/10+0.5;
    if(temp2==5)
    {
        table1[temp2]=2*table1[temp2];
    }
    table1[20-temp2]=table1[temp2];
    yy=yy+table1[temp2];
    if(temp2==9)
    {
        table1[10]=K-2*yy;
    }
}
}
/*数据存储, 生成电机控制表格*/
for(temp3=0;temp3<21;temp3++)
{
    TABLE0[temp3]=table0[temp3];
    TABLE1[temp3]=table1[temp3];
}
}
```

以某型号的枕式包装机作为实验平台, 去掉其复杂的机械凸轮和链条传动结构。结合上述控制系统, 利用伺服电机直接驱动各轴。首先, 进行包装误差测试, 即设定包装速度为每分钟 50 包, 包装长度在 100 ~ 500 mm 内随机选取, 横封轴旋转周长为 370 mm, 电子凸轮偏心量为 5。横封轴作电子凸轮运动, 当包装长度为 100, 125, 135, 150, 175, 200, 210, 220, 249, 277, 300, 319, 340, 353, 370, 386, 400, 435, 450, 460 mm 时, 测得的偏差数值分别为 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0, 0.2, 0.1, 0.3, 0.2, 0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1, 0.3, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1 mm。然后, 进行色标跟踪误差测试, 即设定包装速度为每分钟 50 包, 包装长度为 300 mm, 电子凸轮偏心量为 5, 对送膜轴、送料轴、横封轴进行三轴同步控制, 跟踪包装膜色标, 测得偏差数值分别为 1.5, 1.5, 2, 0.5, 1, 0, 0.5, 0.5, 0.5, 0, 0, 0.5, 0, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0.5 mm。

由实验结果可知, 基于电子凸轮技术可将包装误差控制在 1 mm 以内, 与传统枕式包装机械相比, 其包装精度大大提高, 而且输出柔性比较理想, 凸轮形式的更改也十分方便, 只需简单修改设定参数即可。同时, 基于三轴同步控制的色标跟踪技术, 其最大误差仅为 1.5 mm, 在偏差允许的范围。另外, 包装速度最大可达每小时 800 包。

## 5 结语

在现代工业中, 自动包装机械的应用十分广泛。针对枕式包装机械的运动控制问题, 文中设计了一种运动控制系统, 在以下几个方面展开了工作: 以三伺服枕式包装机为例, 介绍了其结构、功能和运动特点, 重点介绍了送膜轴、送料轴、横封横切轴、纵封装置

和制袋成型器等,以及电子凸轮、位置跟踪、电子防切、空槽检测等功能;设计了一种自动包装机控制系统,包括人机界面、通用运动控制器、伺服系统等,重点介绍了基于 DSP 的通用运动控制器结构;给出了软件设计方法,主要包括电子凸轮实现方法和三轴同步控制方法。

文中所述控制系统、控制方法具有通用性,它不仅仅适用于枕式包装机,对其他形式的包装机械同样具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘祎,李虹,李瑞琴,等.现代包装机械设计质量综合评价体系研究[J].包装工程,2015,36(21):75—78.  
LIU Yi, LI Hong, LI Rui-qin, et al. Comprehensive Evaluation System for the Design Quality of Modern Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21): 75—78.
- [2] 杨祖彬,曾莉红.基于食品安全的我国食品包装机械技术发展路径探讨[J].包装工程,2011,32(13):117—121.  
YANG Zu-bin, ZENG Li-hong. Discussion on Technical Development Path of China's Food Packaging Machine Based on Food Safety[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13): 117—121.
- [3] 罗少锋,刘振华,闫济军,等.对军用包装机械建设发展的思考[J].包装工程,2015,36(7):149—153.  
LUO Shao-feng, LIU Zhen-hua, YAN Ji-jun, et al. Consideration on Construction and Development of Military Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 149—153.
- [4] 杜巧连,陈旭辉,舒柏和.自动化包装机械控制系统的设计方法研究[J].机械管理开发,2015(6):27—32.  
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. Study on the Design Method of Packaging Machinery Automation Control System[J]. Mechanical Management and Development, 2015(6): 27—32.
- [5] 唐宗美,杨光友,马志艳,等.包装设备控制系统综述[J].包装工程,2013,34(5):107—110.  
TANG Zong-mei, YANG Guang-you, MA Zhi-yan, et al. Summarization of Packaging Equipment Control System[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(5): 107—110.
- [6] 韩占华,郭飞.自动化在包装机械中的应用和展望[J].包装与食品机械,2011,29(3):49—52.  
HAN Zhan-hua, GUO Fei. Application and Prospects of the Automation in the Packaging Machinery[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(3): 49—52.
- [7] 戴宏民,戴佩燕,周均.中国包装机械发展的成就及问题[J].包装学报,2012,4(1):61—65.  
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. Achievements and Problems in China's Packaging Machinery Developments[J]. Packaging Journal, 2012, 4(1): 61—65.
- [8] 卫光,郭坤.三伺服枕式包装机电子凸轮控制系统的应用研究[J].包装与食品机械,2012,30(6):57—59.  
WEI Guang, GUO Kun. The Research and Implementation of Electronic Cam of Three-servo Pillow Packaging Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2012, 30(6): 57—59.
- [9] LIU R, SUN J Z, LUO Y Q, et al. Research on Multi-motor Synchronization Control Based on the Ring Coupling Strategy for Cutter-head Driving System of Shield Machines[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(2): 65—72.
- [10] CHEN C S, CHEN L Y. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. Mechatronics, 2011, 21(3):625—632.
- [11] 王安敏,鹿虎.基于C8051单片机的电子凸轮的实现[J].机械传动,2010(10):84—87.  
WANG An-min, LU Hu. The Implementation of Electronic Cam Based on C8051 MCU[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010(10): 84—87.
- [12] 卫军朝,张国渊,陈垚,等.一种基于DSP+FPGA的电子凸轮控制方法[J].机电工程,2013,30(6):721—724.  
WEI Jun-chao, ZHANG Guo-yuan, CHEN Yao, et al. Control Method of Electronic Cam Based on DSP and FPGA[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(6): 721—724.
- [13] 王吉岱,张兆健,梁存仙,等.包装机械电子凸轮关键技术研究与应用[J].包装工程,2013,34(7):48—51.  
WANG Ji-dai, ZHANG Zhao-jian, LIANG Cun-xian, et al. Research and Application of Electronic Cam Key Technology in Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 48—51.
- [14] 曹玲芝,李春文,牛超,等.基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J].电机与控制学报,2008,12(5):586—592.  
CAO Ling-zhi, LI Chun-wen, NIU Chao, et al. Synchronized Sliding-mode Control for Multi-induction Motors Based on Adjacent Cross-coupling[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 586—592.
- [15] 程斯一,纪文刚,王志俊.基于模糊PID的多伺服电机交叉耦合同步控制[J].北京石油化工学院学报,2014,22(4):54—57.  
CHENG Si-yi, JI Wen-gang, WANG Zhi-jun. The Cross-coupled Synchronous Control of Multi Servo Motors Based on Fuzzy-PID[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2014, 22(4): 54—57.
- [16] 张承慧,石庆升,程金.一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(15):59—63.  
ZHANG Cheng-hui, SHI Qing-sheng, CHENG Jin. Synchronization Control Strategy in Multi-motor Systems Based on the Adjacent Coupling Error[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(15): 59—63.