

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.11.021

往复式高速枕式包装机多轴控制模式研究

Multi-axis control mode of reciprocating high-speed pillow packing machine

林潘忠¹ 孙蓓蓓² 郎文昌²LIN Pan-zhong¹ SUN Bei-bei² LANG Wen-chang²

(1. 温州职业技术学院机械工程系, 浙江 温州 325035; 2. 东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189)

(1. Department of Mechanical Engineering, Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

摘要:采用运动控制器结合 PLC 的控制方式, 实现运动轴的同步控制和封切温度的精确控制, 并通过触摸屏实现往复式枕式包装机系统的参数设置及运行状况显示。将该系统应用于双端封往复式高速枕式包装机样机中, 提高了包装机的包装精度和速度, 简化了枕式包装机的伺服布置。

关键词:枕式包装机; 双端封往复式; 多轴控制模式; 系统研究

Abstract: The control mode of motion controller in combination of PLC is adopted to realize the synchronous control of motion axis and the precise control of sealing temperature, and the parameter setting and operation status display of reciprocating pillow packing machine system are realized through touch screen. The system is applied to the prototype of the double-end reciprocating high-speed pillow packing machine, which can improve its packaging precision and speed and simplify the servo arrangement.

Keywords: pillow packaging machine; double-end seal reciprocating; multi-axis control mode; system research

枕式包装机生产对象量大面广, 广泛应用于食品、医药、农业、电子等领域, 可完成物料自动填充、封口、切断等一系列动作。随着包装机械技术的不断发展, 枕包机的生产效率、稳定性以及可靠性需满足更高的要求, 如何提高枕式包装机的包装速度和精度成为了国内外研究的重点^[1]。在运动控制系统方面, 绝大部分自动包装机都采用三伺服控制系统, 主要研究包装机械智能化控制^[2-3]和伺服系统控制^[4-6]。基于智能控制器和伺服系

统可以在一定程度上提升枕包机的智能化水平和效率, 随着精度和稳定性要求的提升, 单纯依靠 PLC 控制已很难满足多轴控制的要求。

在铝塑版板式药品枕式包装机械研究方面, 90% 的中国外包联动线整体速度 < 240 包/min, 其主要原因是枕包环节制约了整线速度。就复合膜而言, 在一定热封温度下, 薄膜从常温开始升温再到完全热封, 用时是固定的。单封切往复式枕包机其热封与切断处于同一时间, 热封时间有限, 为保证热封效果, 只能控制设备运行速度, 导致设备速度无法进一步提升, 生产效率较低。

针对上述问题, 试验拟以往复式枕式包装机为研究对象, 对其机械结构和控制系统进行优化改进, 采用运动控制器结合 PLC 控制的方式, 实现运动轴的同步控制和封切温度的控制, 减轻控制系统编程难度, 提升机器运行精度和稳定性, 旨在降低枕式包装机控制系统故障率。

1 枕式包装机机械结构与工作流程

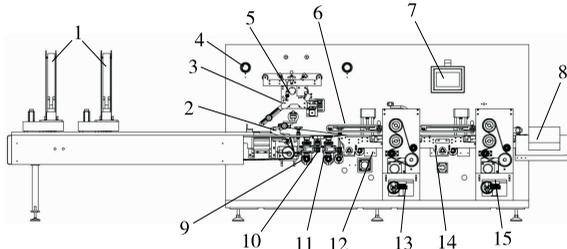
枕式包装机是一种以复合膜为主要包装材料, 对食品、药品及其他日化材料进行快速包装的智能设备^[7], 包装速度 > 200 包/min。双端封往复式高速枕式包装机机械结构如图 1 所示, 主要由送料装置、送膜装置、放膜装置、双膜对接装置、预热封装置、热封切装置等组成。送料装置由一道加料组件与二道加料组件构成, 中间装有补料检测组件, 保证物料准确传送。放膜装置为双膜对接放膜方式, 在物料包装输送装置的上方处装有一道下压排气装置, 对物料包装袋内的空气进行排空处理。

双端封往复式枕式包装机包装工艺流程如图 2 所示。双端封同步封切机构由预热封装置和正常封切装置组成双端封结构, 热封时, 装有物料的包装膜首先经过第一道无纹路、无切断功能的预热封装置进行预先热封处理, 然后进入封切装置进行第二道热封并同时由切刀进行切断处理。两道端封均采用伺服电机单独驱动, 封合时间点任意可调, 从而保证两次封合的位置完全吻合。

基金项目:温州市重大科技专项(编号:2018ZG024); 浙江省自然科学基金项目(编号:LY19E010004)

作者简介:林潘忠(1989—), 男, 温州职业技术学院讲师, 硕士。
E-mail: linpanzhong@163.com

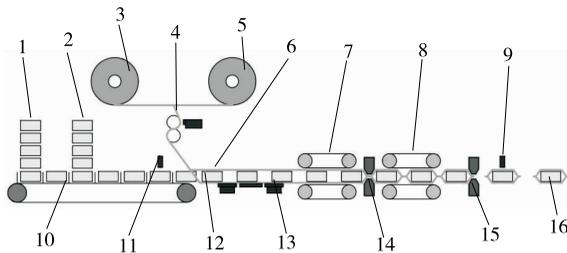
收稿日期:2019-08-19



1. 伺服加料器 2. 制袋器 3. 放膜部 4. 承膜辊 5. 双膜对接装置 6. 上压刷 7. 操作面板 8. 出料输送 9. 牵引轮部 10. 中封加热 11. 中封轮 12. 送料输送 13. 预热封装置 14. 过渡输送 15. 封切装置

图1 枕式包装机机械结构

Figure 1 Mechanical structure of pillow packaging machine



1. 加料 2. 补料 3. 膜 A 4. 双膜对接 5. 膜 B 6. 物料入袋 7. 一次排气 8. 二次排气 9. 异常品剔除 10. 送料 11. 物料异常检测 12. 膜成型制袋 13. 中封 14. 端封预热封 15. 端封热封切 16. 成品输出

图2 枕式包装机工艺流程图

Figure 2 Process flow chart of pillow packing machine

包装袋经过二次热封而封合,提高了热封时间,包装更加牢固可靠。

2 多轴控制模式研究

2.1 现有控制系统分析

枕式包装机的控制系统由单变频发展到目前的三伺服系统^[8-9],控制精度不断提高。要实现高速、高精度的包装过程,其控制重点在于送料、送膜以及横封横切轴三轴的配合^[10]。单封切往复式枕式包装机主要部件包含加料、送料、承膜、放膜、双膜对接、成型制袋、中封、上排气、端封前输送、端封热封切、成品输出部件,其中承膜、送料和端封热封切部件均已采用独立伺服驱动,而放膜、中封、上排气、端封前输送和成品输出部件则通过机械传动相连接,再由一个电机驱动,整机伺服布局较为复杂,其布局图如图3所示。

由于复合膜存在拉伸率因素,设备运行时需要送膜线速度和中封牵引线速度存在一个微小的差值,这样才能保证复合膜在牵引时始终处于张紧的状态,从而保证设备正常运行,而不同成分的复合膜拉伸率不同,上述速



图3 现有整机伺服布局图

Figure 3 Servo layout of existing products

度差也应随着复合膜拉伸率的不同进行相应的改变。单封切往复式枕式包装机送膜和中封等部件为机械联动关系,在线运行速度差难以调节,因此在高速运行模式下会影响产品的外观和包装质量,次品率高。此外,单封切往复式枕式包装机存在多个部件的联动关系,容易出现振荡现象,各机组互相干扰,在设备装配、调试和后期保养维护上较为麻烦,且高速运行时噪音较大。

2.2 多轴系统非线性同步控制理论

在实际应用中,根据拉格朗日方程,忽略非线性摩擦和外部扰动的影响,多个运动轴的机械系统的动力学方程可以表示为:

$$F = M_x(q)\ddot{x} + U_x(q, \dot{q}) + G_x(q), \quad (1)$$

式中:

\ddot{x} ——运动末端加速度, m/s^2 ;

$M_x(q)$ ——对称正定惯性矩阵;

$U_x(q, \dot{q})$ ——离心力和哥氏力矢量, N ;

$G_x(q)$ ——重力矢量, N ;

x ——末端位姿向量。

对于多轴系统的位置误差控制问题^[11-12],当给定期望位置 q_d ,通过设计控制力矩 F 使位置误差和同步误差渐近趋向于零,定义位置误差矢量为:

$$e = q_d - q, \quad (2)$$

式中:

e ——位置误差矢量;

q ——实际位置。

同步误差矢量定义为该轴的位置误差与其相邻两轴的位置误差,各轴的位置关系如下:

$$\begin{cases} E_1 = 2e_1 - (e_2 + e_n); \\ E_2 = 2e_2 - (e_3 + e_1); \\ \vdots \\ E_i = 2e_i - (e_{i+1} + e_{i-1}); \\ \vdots \\ E_n = 2e_n - (e_1 + e_{n-1}), \end{cases} \quad (3)$$

式中:

e_i ——第 i 个轴的位置误差;

E_i ——第 i 个轴的位置同步误差。

在式(3)中,如果位置同步误差 E_i 均为零,则同步的

位置误差 $e_1 = e_2 = \dots = e_n$ 即可自动实现,将式(3)整理成矩阵形式可表示为:

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

即

$$E = T \cdot e, \quad (5)$$

式中:

$$E = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n]^T;$$

$$e = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^T.$$

定义耦合的位置误差变量如下:

$$\epsilon = e + \varphi E. \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得:

$$\epsilon = Ie + \varphi Te, \quad (7)$$

式中:

I ——单位对角矩阵;

φ ——同步控制相关的正数。

其中, φ 越大,同步控制作用也越强,由式(7)可知,当 $e=0, E=0$ 时,耦合的位置误差 $\epsilon=0$ 。

2.3 枕式包装机控制系统设计

基于目前单封切往复式枕式包装机传动复杂、送膜线速度和中封牵引线速度差无法调节等问题,在三伺服控制基础上对枕式包装机的控制系统进行优化,通过运动控制器驱动独立的伺服电机来控制各运动部件,各部件主轴间均存在相应的联动关系。采用该种控制模式后,送膜线速度和中封牵引线速度均可独立调节,极简的传动模式为设备装配和后期维护带来了极大的便利。而温度控制和色标跟踪等其他部件则采用 PLC 控制方式,根据包装工艺流程,控制系统整体框图如图 4 所示。

2.3.1 运动轴控制及同步控制原理

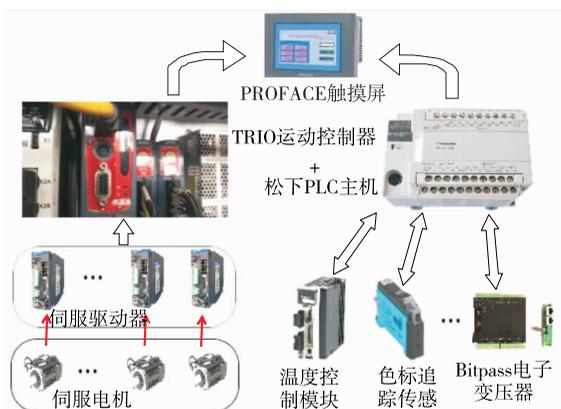
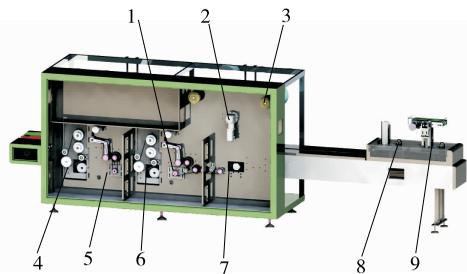


图 4 控制系统整体框图

Figure 4 The overall diagram of control system

装置时,其控制方便、通用性强,但对于精度要求高,如同步控制或反应灵敏性要求高时难以做到或编程非常困难,而且成本较高。采用运动控制器代替 PLC 控制各轴转动,运动控制器为 TRIO MC4N P908 型,配备专用的 TRIO 扩展 I/O 模块,具有控制精度高、反应灵敏等优点。设备共有 12 根可控轴,在运行过程中,加料、补料、送料、放卷、送膜、中封、端封预热封、中输和端封热封切 9 大部件主轴可以同时进行差速运动控制,均由独立的伺服驱动控制,从而实现包装机的速度、位置同步,以保证包装质量和效率。各轴的独立伺服布局如图 5 所示。



1. 中封伺服 2. 放膜伺服 3. 放卷伺服 4. 封切伺服 5. 中输伺服 6. 端封预热伺服 7. 送料伺服 8. 补料伺服 9. 给料伺服

图 5 各轴独立伺服布局

Figure 5 Independent servo layout of axis

在实际控制中,根据主从同步控制原理^[13-14],定义放膜轴为主动轴,其余 8 轴均为从动轴。放膜轴位置误差可表示为 e_1 、其余各轴的位置误差可分别表示为 e_i ($i=2,3,\dots,9$),主动轴的同步误差可表示为 $\epsilon_1=0$,各轴同步误差可表示为 $\epsilon_i=e_i-e_1$,若能使 $\epsilon_i=0$,即可实现放膜轴和其余各轴的速度或位置匹配,实现同步控制。伺服电机的运动均由 TRIO 运动控制器控制,驱动系统采用伺服电机及相应伺服驱动器,各轴的运转速度根据编程事先输入的逻辑关系实现关联,当其中一轴速度出现变化时,其余各轴均会做出相应变化。

2.3.2 封切温度控制模块和其他硬件设计

除运动轴外,系统中其他控制采用 PLC 控制,设计成本低、效率高。

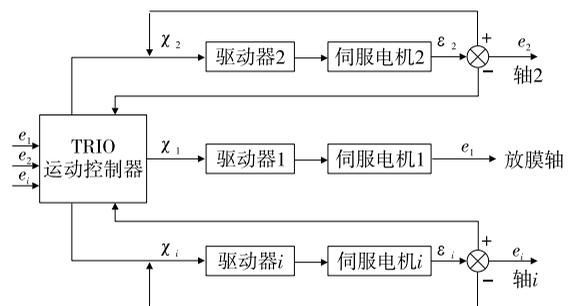


图 6 同步控制原理

Figure 6 Principle of synchronization control

针对枕式包装机功能实现目标,选择松下 FP0R-C16T PLC 主机,主要组成单元包括 CPU、电源、温度控制以及基本 I/O 模块等。温度控制模块采用松下 FP0-TC8 热电偶和松下 FP0R-DA4 模拟量模块完成温度模拟量的采样,并将温度信号传送至 PLC 进行处理,实现包装机封装温度的精确控制。在物料传输方面,通过色标传感器、物料检测传感器反馈给 PLC,实现闭环控制。当物料供应出现无料情况时,机器不停止运行,但送膜和刀封电机相对无料位置会停止运行,待无料工位运行完后重新启动运行。

由于枕式包装机包装对象多样,采用 PROFACE 触摸屏作为枕式包装机的控制媒介,通过该触摸屏可实现包装参数的输入、包装速度设定和各轴点动控制等功能,触摸屏主控界面如图 7 所示。

3 实例论证

为验证所述控制系统和双端封热封结构的有效性,



图 7 触摸屏主控界面

Figure 7 Master screen of touchscreen

表 1 现有枕式包装机与样机包装参数对比

Table 1 Comparisons of packing parameters between existing pillow packers and prototypes

包装机	包装对象	最高稳定包装速度/ min^{-1}	机械速度/ min^{-1}	包装精度/mm	气密合格率/%
PLC 控制的单封切枕式包装机	铝塑药板	240	30~295	± 2.0	99.92
试验样机	铝塑药板	321	30~365	± 1.5	99.96

由表 1 可知,基于运动控制器控制的多轴同步控制技术可将包装误差控制在 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 以内,与传统枕式包装机械相比,其机械速度和包装速度都有大幅提高,包装精度大大提高;包装对象的参数设置十分便捷,只需通过触摸屏修改设定即可。

4 结论

以双端封往复式枕式包装机为例,介绍了其结构、功能和特点。双端封热封系统使每个产品的相同位置可以受到两次热封,提升了单位时间内的有效热封时间,提高了包装质量。在系统控制方面,研究了多轴非线性同步

在实验室阶段研制适合铝塑版包装的食品、药品双端封枕式包装机样机如图 8 所示。该枕式包装机采用上述控制系统,摒弃了现有产品复杂的运动轴机械连接方式,中封、放膜、放卷、封切、中输、端封预热、送料、补料和给料机构等主轴均采用运动控制器控制的伺服电机直接驱动。



图 8 枕式包装机样机

Figure 8 Prototype of pillow packaging machine

以包装尺寸 $60 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的铝塑药板为例,目前通用的单封切枕式包装机的包装速度为 $220 \text{ 包}/\text{min}$ 左右,最高速度为 $240 \text{ 包}/\text{min}$,但随着包装速度的增加,封切时间缩短,包装气密性合格率减低,次品率也随之增加,在 $240 \text{ 包}/\text{min}$ 的包装速度下,通过色标跟踪误差测试,测得偏差数值为 2 mm 。

对上述样机进行试验,测得最高稳定包装速度可达 $321 \text{ 包}/\text{min}$,较现有产品提高了 33% ;色标跟踪误差测试测得偏差数值为 1.5 mm ,与现有产品相比,其包装精度提高了 25% 以上;通过真空检测测试包装气密性(以 1 万包 为例),将铝塑复合袋放置在色水中真空 ($80 \pm 13 \text{ kPa}$,保压 30 s 检漏,以封口无漏气和气泡为标准,合格率达 99.96% 以上,铝塑板密封性好,具体参数对比如表 1 所示。

控制在枕式包装机中的应用,采用 TRIO 运动控制器 + PLC 的控制,驱动各轴的伺服电机均由运动控制器控制,送膜线速度和中封牵引线速度均可独立调节,解决了由于复合膜拉伸率因素导致的各项问题,提高了枕式包装机的包装精度和效率。该控制算法有待优化,通过对多轴系统相关控制算法的研究和学习,如迭代学习控制、容错控制等方法应用于枕式包装机控制系统,以期找到更佳控制效果的控制算法。此外,装备制造业引入大数据控制,实时对用户参数进行分析,实现远程运维,也是枕式包装机的发展方向。

(下转第 121 页)

跃的纯鲜亮色与同类色和复古色的结合,给人以质朴与和谐之感;扁平化的文字多采用无边角装饰的无衬线字体,更显厚重凝练,视觉冲击力强,更易于识别;扁平化的版式设计重视空白的使用,适当留白是为了避免造成不必要的视觉污染,既可给观者以多重想象的空间,又可带来强烈的视觉舒适感。

乡土食品包装的材料与工艺也应定位在简约与朴实上,但并不意味着用简单材料进行简易包装;还应防止过度包装,既不能因太随意而使人们对其健康与安全性产生怀疑,也不能因过度包装而造成乡村环境的污染,进而影响人们对乡村的美好记忆。因此,绿色生态的天然材料成为首选,这是乡土食品保持质朴特性的关键。因此,需要明确消费者的需求,以回归自然、绿色生态,体现“自然朴实、素雅本真”为主旋律,走生态设计之路^[13]。这需要一个“度”的把握,从环保、节约能源的角度考虑,尽可能选择精致、实用的包装结构,进行适度设计,以追求便利、降低成本和提高包装的环保性为根本目标^[14]。

4 结语

人们对乡土食品的喜爱与关注除了其原生性的品质外,更多的是能够体味其所承载的浓郁的乡土情怀。在乡村产业需要再度振兴的关键时期,作为乡村重要产业之食品业,同样也面临着需要再度提升自身品质的挑战。除保持产品本身特有的绿色生态品质外,其包装设计需借助多维表现手法以实现材料、视觉元素的地域性、朴实性、原生性特点。其未来设计趋势需在对乡村文化调研的基础上,从地域性上把握乡土情怀、从整体性上整合乡土情怀,方能使乡土食品更深入人心,进一步促进乡村整体的经济与社会的发展。

参考文献

- [1] 欧阳国辉, 郭佳. 乡土食品的文化意义与现代传承[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 218-220.
- [2] 张嘉欣, 朱力. 设计伦理观念下的乡土食品包装设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 101-104.
- [3] 黄献文. 论新感觉派[M]. 武汉: 武汉出版社, 2000: 105.
- [4] 周建军. 90年代乡土诗简论[D]. 重庆: 西南师范大学, 2002: 1.
- [5] 王锐. 民族地域文化对现代包装设计的影响[J]. 民族艺术研究, 2010, 31(3): 102-107.
- [6] 吴余青. 朴拙之美: 包装设计中传统文化元素的创新与应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 110-113.
- [7] 谭亚平. 农产品包装设计的朴实感研究: 以生鲜农产品为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2015: 12.
- [8] 西安铭遥创意设计. 森林牛品牌包装设计[EB/OL]. (2017-08-14) [2019-05-29]. http://www.cndesign.com/opus/b2fad798-82c7-402e-bd1d-a7cf00fe3217_7.html.
- [9] 北京绿十字. 乡建中的超级IP——单县[EB/OL]. (2018-09-13) [2019-06-03]. http://www.sohu.com/a/253644320_797346.
- [10] 王宝升. 地域文化与乡村振兴设计[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2018: 42.
- [11] 郑笑仁, 唐勇. 乡村振兴战略背景下农产品包装设计探析[J]. 湖南包装, 2019, 34(4): 99-101.
- [12] 李莉, 陈竑. 从“PENTAWARDS”获奖作品看全球食品包装设计创意潮流[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 98-105.
- [13] 魏颖艳. 自然朴实, 素雅本真: 陇南农特产包装生态设计方法探析[J]. 湖南包装, 2019, 34(1): 121-124.
- [14] 吴锦花, 胡建辉. 闽北特色农产品的包装设计研究: 以顺昌竹林竹荪为例[J]. 湖南包装, 2019, 34(4): 106-108, 135.

(上接第 107 页)

参考文献

- [1] 赵志旭, 王丛岭, 吴岳榕. 基于 PLC 糖果包装机控制系统设计[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 77-79.
- [2] 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, 30(6): 27-29.
- [3] 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.
- [4] 赵国军, 李忠虎, 张祥. 粉状稀土原料定量称重包装控制系统的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(4): 46-53.
- [5] LIU Ran, SUN Jian-zhong, LUO Ya-qin, 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, 52/54: 65-72.
- [6] 卫军朝, 张国渊, 陈彦, 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.
- [7] 王中元, 武艳慧. 枕式包装机运动分析及控制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(1): 163-168.
- [8] 阳斌. 伺服技术在枕式包装机中的应用[J]. 食品与机械, 2005, 21(3): 49-51.
- [9] 李敏, 孙琪, 赵敏. 基于 PLC 的三伺服枕式包装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 197-201.
- [10] ZHANG Yong, DENG Hua, ZHANG Yi. Synchronization control of space voltage vector controlled multi-PMSM based on adjacent cross-coupling[J]. Advanced Materials Research, 2012, 383/390(9): 6 931-6 937.
- [11] 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.
- [12] 吴晓强, 黄云战, 赵永杰. 基于运动控制器的食品成品箱码垛机设计[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 104-106, 110.
- [13] ZHANG Peng, ZHANG Jian-hua, HE Dong-sheng, et al. Based on adjacent cross-coupling of multi-motor synchronous drive[J]. Advanced Materials Research, 2011, 201/203: 1 093-1 097.
- [14] 田素娟, 肖俊生. 包装机械多轴相邻交叉耦合同步控制[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 140-146.