

基于模糊 Smith 控制的热收缩包装机机械节能研究

轩建举, 李艳

(许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000)

摘要: **目的** 为了更加高效地提高热收缩包装机在机械节能控制方面的稳定性, 优化控制器的控制性能。**方法** 在充分研究 ARM Cortex-M3 核心控制器 LPC1500 的基础上, 利用嵌入式环境进行热收缩包装机的机械节能控制器硬件的开发, 包括 A/D 采集模块、信息采集模块以及驱动执行模块等, 结合模糊 Smith 在反馈调节上的优点, 提高节能控制性能, 再建立机械节能控制的控制器的约束参量的数学模型, 进行机械节能方面的深入研究。**结果** 实验测试结果表明, 采用模糊 Smith 设计的预估器性能更加良好, 热收缩包装机节能控制可靠性高, 并且能够降低包装机在能量方面的消耗。**结论** 在热收缩包装机控制方面采用的策略具有优化节能效果, 具有广阔的市场应用前景。

关键词: 热收缩包装机; 模糊 Smith; 节能控制器; 优化

中图分类号: TB486.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)15-0214-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.034

Mechanical Energy Saving of Thermal Shrinkage Packaging Machine Based on Fuzzy Smith Control

XUAN Jian-ju, LI Yan

(Xuchang Electric Vocational College, Xuchang 461000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the stability of thermal shrinkage packaging machine in mechanical energy saving control and optimize the control performance of the controller more efficiently. On the basis of fully studying the ARM Cortex-M3 core controller LPC1500, the hardware of the mechanical energy saving controller of the thermal shrinkage packaging machine was developed with embedded environment, including A/D acquisition module, information acquisition module and drive execution module, etc. In combination with the advantages of fuzzy Smith in feedback regulation, the energy saving control performance was improved, and then the mathematical model of the constraint parameters of the controller for the mechanical energy saving control was established to conduct in-depth research on mechanical energy saving. The experimental test results showed that, the performance of the predictor designed by fuzzy Smith was better, the energy saving control reliability of the thermal shrinkage packaging machine was high, and the energy consumption of the packaging machine could be reduced. The strategy adopted in the control of thermal shrinkage packaging machine has the advantages of optimizing the energy saving effect and has a broad market application prospect.

KEY WORDS: thermal shrinkage packaging machine; fuzzy Smith; energy saving controller; optimization

近年来, 我国包装行业飞速发展, 各种工业化自动包装机械迅速崛起^[1-2]。热收缩包装机也称作收缩机, 广泛应用在纸盒、药品以及各种化妆品等的包装

中。热收缩包装机主要是将收缩薄膜包在包装件外面^[3], 其功耗大, 且易对元器件造成损坏, 因此, 需要对其机械节能进行优化设计, 以降低包装机能耗,

收稿日期: 2018-10-22

作者简介: 轩建举 (1980—), 男, 许昌电气职业学院讲师, 主要研究方向为电气自动化技术。

并提高它的机械控制的稳定性^[4-6]。

在处理纯滞后被控对象问题时,由于 Smith 算法比较方便,所以其应用十分广泛,但是传统 Smith 预估器很难达到比较满意效果^[7]。模糊控制器不依赖被控对象的精确数学模型,鲁棒性好、抗干扰能力强。文中阐述拟模糊控制和 Smith 预估控制的优势,将二者进行结合,提出一种基于模糊 Smith 反馈调节的节能控制方法,进行包装机的功率消耗方面的优化设计,从而达到节能的目的。

1 控制器的硬件设计

1.1 控制器的整体结构

控制器原理见图 1,它的控制系统主要分为包装信息的采集单元、负责集中控制的嵌入式控制单元、负责进行 A/D 转换的 A/D 转换单元、负责电机驱动的电动驱动单元以及进行直接核心控制单元 LPC1500 和上位机通信系统等^[8-10]。

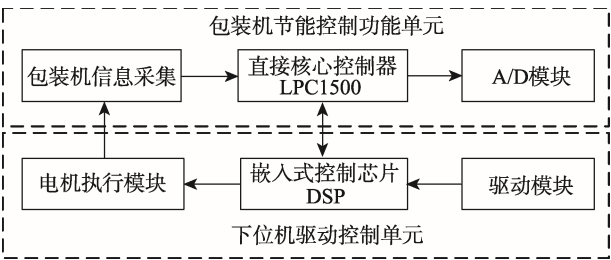


图 1 控制系统的功能结构组成
Fig.1 Functional structure of the control system

对控制器各个单元模块功能的设计如下所述。

1.1.1 A/D 采集与转换单元

A/D 采集与转换模块可对节能控制器的控制信息进行采集和数/模转换,其主要是通过一种 16 位的 DSP 来实现模数转换的,这个 DSP 是定点处理器,并且还可以通过建立多个任务来进行模数转换。A/D 负责模数转换的电路见图 2。其中,连续 16 次采集模拟信号并求取平均值,然后进行 AD 转换变成数字信号,传给 LPC1500 进行处理。

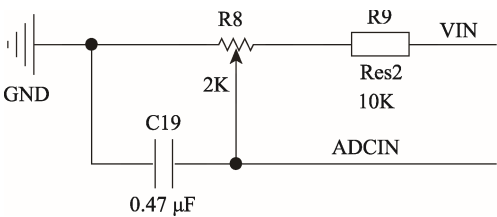


图 2 AD 采集电路
Fig.2 AD acquisition circuit

对机械节能控制器的控制参量进行设定以及对控制算法进行写入,是在 ARM-Linux 平台上进行的,控制器的 AD 单元由模数转换模块、数模转换模块以

及信号处理器等 3 个部分组成。控制器的数模转换模块具有 0~10 W 的输入功率,利用节能控制器进行自我调整,最终模数转换的模块输出的频域响应见图 3。

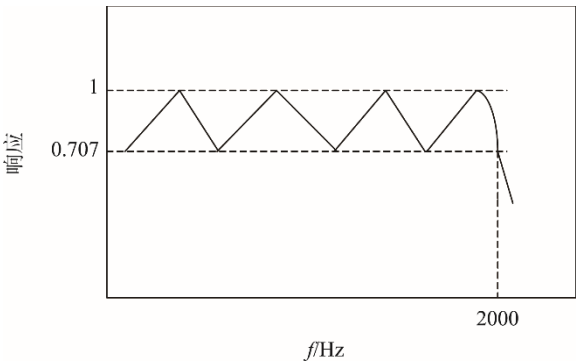


图 3 模数转换模块的频域响应
Fig.3 Frequency domain response of A/D module

1.1.2 电动执行机构单元

电动执行机构的主控芯片是 ADSP21160,主要是利用嵌入式控制来进行定点数字信号处理器和浮点数字信号处理器的程序加载,并且,利用 12 位的模数转换芯片来配合电动执行机构的控制。在整个控制器的核心单元中,通过放大器来实现包装机在节能方面的控制^[11-12],该模块主要通过放大器和反馈网络实现对交流小信号的放大,进而驱动执行机构进行工作。

电机的运动控制芯片采用的是 PCL6045BL 处理器,是专为步进和伺服控制而进行设计的,硬件结构见图 4。

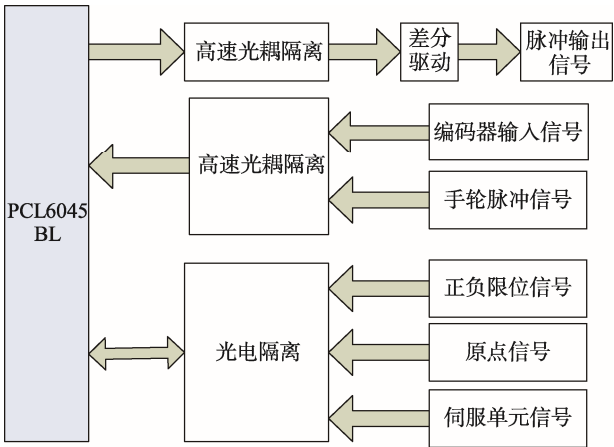


图 4 伺服电机驱动电路
Fig.4 Servo motor driver circuit

2 热收缩包装机的模糊 Smith 控制器

2.1 约束参量的分析

在包装机的机械节能控制中,首先要把约束参数

数学模型构建出来,然后采用反馈误差进行矫正的方法,对节能的性能进行控制,以达到优化的目的。下面以包装机的旋转角速度作为输入变量,进而构建一个控制器,其闭环传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_0(s)} \quad (1)$$

结合执行器在控制误差方面的跟踪补偿方法进行轨迹跟踪,得出该控制器的数学线性模型为:

$$Y(s) = \frac{e^{-L_m s}}{(\lambda_1 s + 1)} R(s) + \frac{(\lambda_2 s + L_m)s}{\lambda_2 s + 1} D(s) \quad (2)$$

在参数控制过程中,控制变量有 $\phi, \phi', \alpha, \theta, \delta_\phi$ 等这几个,此时,如果模型的约束参数存在不确定性,那么在功率方面的损耗就会有以下特征方程:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_0(s)e^{-\tau s}}{1+G_c(s)G_m(s)+G_c(s)(G_0(s)e^{-\tau s}-G_m(s)e^{-\tau_m s})} \quad (3)$$

通过构建一个时滞的2个自由度的方程函数,来对包装机在节能控制方面的功能增益进行描述,其中功率增益的表达式为 $K = \Delta K \cdot K_m$,其中 $\Delta K > 0$ 。设整个过程的学习步长为 η ,在经过 n 步训练后^[17],就可以实现控制方面的约束参数的定量分析,这样就为节能控制器的优化提供了一个很好的参量输入基础。

2.2 控制器控制规律的优化

通过研究模糊控制理论和 Smith 控制理论,利用模糊 Smith 反馈调节来进行包装机的机械节能控制^[13-16],经过对参量的分析,构建 Smith 控制方程如下:

$$W(n+1) = W(n) - \eta \frac{\partial E}{\partial W} + \partial \Delta W(n) \quad (4)$$

选取相对比较合适的步长和初值,将初始功率损耗的几个变量 $x_1, x_2 \dots x_n$,分别乘以权重值 $w_{1j}, w_{2j} \dots w_{nj}$,然后进行所有值的加权,并且对模态变量进行不断跟踪和反复补偿^[18],就能够得到控制器约束泛函数为:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\frac{2}{m} \sum_{k=1}^m [r(k) - y(k)] \frac{\partial y_E}{\partial v} x_j'(k) \quad (5)$$

之后,通过构建非线性耦合的 PID 模块,并且在惯性环节上实时加入时滞变量,就能够调度功率损耗,其中,确定时滞耦合系统整个过程的传递方程为:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \delta_i(k) x_i(k) \quad (6)$$

节能控制参数调节主要利用最大灵敏度反馈的方法来实现,然后建立节能控制的闭环规律。在输入端加入持续的扰动,自变量序列 $r(k) \in R_n$,然后通过控制规律中加入一个时滞积分项,就能够得到包装

机节能控制的误差调节的迭代方程式:

$$w'_{sjh}(n_0+1) = w'(n_0) - \eta'_{sjh} \frac{\partial J}{\partial w'_{ij}} \quad (7)$$

由于输入端加入持续扰动,因此,加入模糊 Smith 反馈调节才能减小控制器的能量消耗,实现机械节能控制,得到控制规律的 Input/Output 模型,具体的模型结构见图 5。

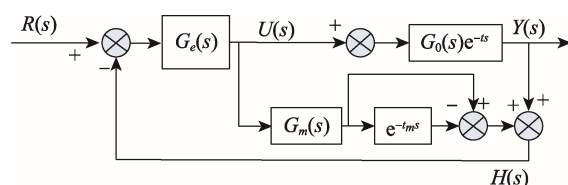


图 5 控制器规律的输入/输出模型
Fig.5 Input/output model of control rule

在图 5 中, $G_0(s)e^{-\tau s}$ 是控制器的自适应修正参数的表达式; $G_c(s)$ 是控制器的跟踪误差的表达式; $Y(s)$ 与 $e^{-t_m s}$ 是控制器的开环控制方程式里面的参数。在控制器的模型中,如果 $G_m(s) = G_0(s)$, $t_m = \tau$ 时,就可以得到动态跟踪的函数方程为:

$$H(s) + Y(s) = G_m(s)U(s) \quad (8)$$

然后得到节能控制器的整个信息融合的传递函数:

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1.7e^{-30s}}{7s+1} & \frac{0.59e^{-27s}}{8s+1} \\ \frac{-0.6e^{-25s}}{10s+1} & \frac{1.5e^{-28s}}{9s+1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)中,控制器的输入向量可以利用 $G_m(s)$ 来实现自适应调节,从而达到减少控制器能量消耗的目的。

3 仿真实验测试分析

3.1 控制器输出接口

设定控制器的模数转换模块的分辨率为 12 位,而控制指令的切换模式是利用知识规则库进行引导,根据里面的控制规则,可以设置采样的周期为 0.03 s,模糊 Smith 控制器的运算周期为 0.35 s。得到控制器的输出接口在存在控制触发信号时的规律见 1。

表 1 输出接口触发控制规律
Tab.1 Control rule triggered by output interface

PORTW4-PORTW0	R (输入端 1)	S (输入端 2)	Q _n (输出)
10001000100000	1	0	Q _{n-1}
11001000100001	1	0	1
10001110001001	0	0	1

3.2 Smith 预估器仿真输出接口

Smith 预估器的优越性在于它能够将滞后部分从对象传递函数的闭环中分离, 而且它与传统的 PID 控制器相比, Smith 预估器能够让系统的动作更加灵敏, 并且使得过渡过程缩短, 而且超调量减小, 这样就能更好地改善控制器系统的性能。采用 Smith 预估器进行控制后的响应曲线见图 6。

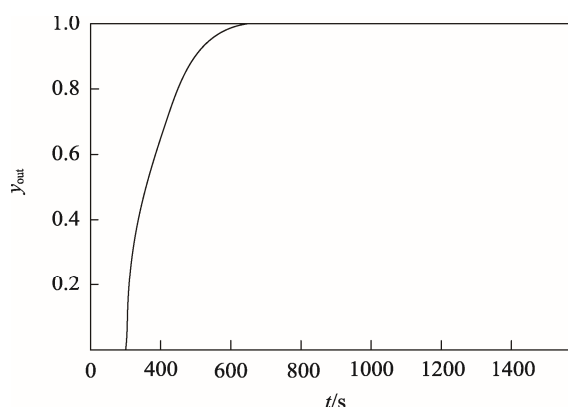


图 6 模型精确时的 Smith 预估控制曲线
Fig.6 Smith estimation control curve when the model is accurate

3.3 能量消耗

根据控制参量的分析和设定, 进行机械节能控制的仿真, 最终得到控制输出的收敛性曲线见图 7。

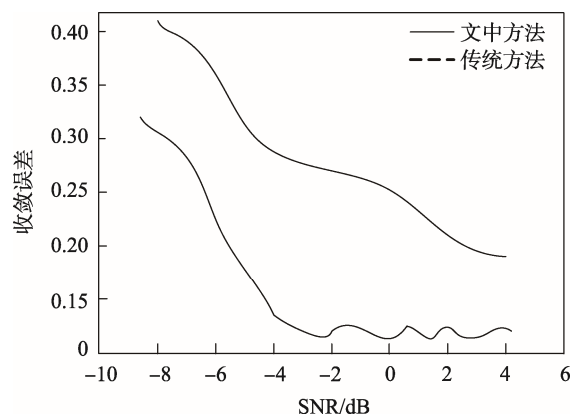


图 7 控制收敛性曲线对比
Fig.7 Control convergence curve comparison

通过控制输出的收敛性曲线可知, 利用文中的控制方法, 收敛速度更快, 能更好地进行系统的控制, 使得机械节能控制更有效。在得到控制器输出的收敛函数之后, 采用不同方法进行节能后的输出功率以及消耗功率的对比, 其结果见图 8。

由图 8 可以得出, 设计的控制器的控制思想, 降低了消耗功率, 在执行相同的任务量时, 消耗功率相对较少, 从而提高了机械节能性能。

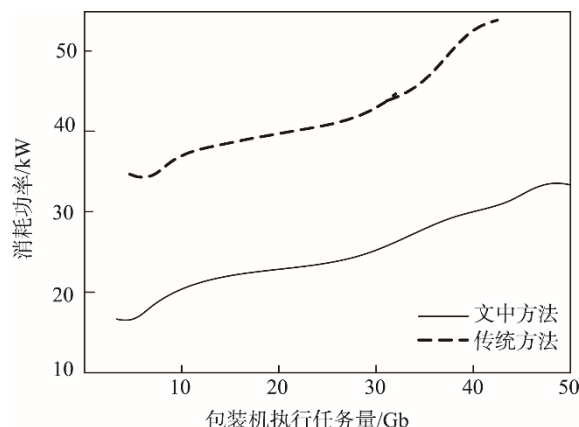


图 8 消耗功率对比
Fig.8 Comparison of power costs

4 结语

实验测试结果表明, 采用模糊 Smith 设计的预估器性能更加良好, 热收缩包装机节能控制可靠性高, 并且能够降低包装机在能量方面的消耗。热收缩包装机控制采用的策略具有优化节能效果, 具有广阔的市场应用前景。

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] 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.
- [3] 潘佳斌, 钱静, 殷献华. 热收缩包装机内部温度场仿真[J]. 轻工机械, 2017, 35(4): 86—91.
PAN Jia-bin, QIAN Jing, YIN Xian-hua. Simulation of Temperature Field In Heat Shrinkable Packaging Machine[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(4): 86—91.
- [4] 杨兴明, 余忠宇. 两轮移动倒立摆的开关切换模糊极点配置控制器设计[J]. 电路与系统学报, 2012, 17(4): 58—62.
YANG Xing-ming, YU Zhong-yu. Design of the Fuzzy Pole Configuration Controller for Two-Wheel Moving Inverted Pendulum[J]. Journal of Circuit and Systems, 2012, 17(4): 58—62.
- [5] 潘松年. 包装工艺学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011.

- PAN Song-nian. Packaging Technology[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2011.
- [6] 王莉, 王向武. 热收缩包装机如何提高包装合格率[J]. 中国包装工业, 2002(2): 36—37.
- WANG Li, WANG Xiang-wu. How to Improve the Packing Pass Rate[J]. China Packaging Industry, 2002(2): 36—37.
- [7] 邵惠鹤. 工业过程高级控制[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- SHAO Hui-he. Advanced Control of Industrial Processes[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003.
- [8] FEYZMAHDAVIAN H R, CHARALAMBOUS T, JOHANS SON M. Exponential Stability of Homogeneous Positive Systems of Degree One With Time Varying Delays[J]. IEEE Transaction Son Automatic Control, 2014, 59(6): 1594—1599.
- [9] 于镭, 常军, 黄存柱. 基于 DSP 的自动包装机控制系统的软件设计[J]. 微型机与应用, 2010, 28(1): 3—5.
- YU Lei, CHANG Jun, HUNG Cun-zhu. Software Design of Automatic Packer Control System Based on DSP[J]. Microcomputer & Its Applications, 2010, 28(1): 3—5.
- [10] 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.
- [11] 杨亮, 傅瑜, 付根平, 等. 基于能效优化的仿人机器人跑步步态优化与控制[J]. 计算机科学, 2016, 43(6): 270—275.
- YANG Liang, FU Yu, FU Gen-ping, et al. Optimization and Control of Humanoid Robot Running Gait Based on Energy Efficiency Optimization[J]. Computer Science, 2016, 43(6): 270—275.
- [12] 赵国荣, 韩旭, 杜闻捷, 等. 具有传感器增益退化的不确定系统融合估计器[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1413—1418.
- ZHAO Guo-rong, HAN Xu, DU Wen-jie, et al. Uncertain System Fusion Estimator with Sensor Gain Degradation[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1413—1418.
- [13] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 303—306.
- ZHU Jing. Fuzzy Control Principle and Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 303—306.
- [14] 赵东亚, 邹涛, 王治平. Smith 预估控制研究进展[J]. 化工进展, 2010, 29(8): 1406—1410.
- ZHAO Dong-ya, ZOU Tao, WANG Zhi-ping. Smith Estimated the Progress of the Control Research[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(8): 1406—1410.
- [15] 杜锋. 基于新型 Smith 预估器的网络控制系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- DU Feng. Research on Network Control System Based on New Smith Stimator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [16] 曾庆良, 顾强, 仇毅, 等. 基于 Smith 模糊 PID 控制的温室监控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 1964—1966.
- ZENG Qing-liang, GU Qiang, ZHANG Yi, et al. The Design of Greenhouse Monitoring System Based on Smith Fuzzy PID Control[J]. Computer Measurement and Control, 2015, 23(6): 1964—1966.
- [17] 宋志峰, 郭建英, 郑兆顺. 热收缩包装机的机械节能控制器设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(24): 115—120.
- SONG Zhi-feng, GUO Jian-ying, ZHENG Zhao-shun. Design of Mechanical Power-Saving Controller for Heat Shrinkable Packaging Machine[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(24): 115—120.
- [18] 陈颖峰, 王玉红, 王蕾. 基于 ARM 和 LabVIEW 的网络数据采集测试系统设计[J]. 现代电子技术, 2016, 39(13): 88—92.
- CHEN Ying-feng, WANG Yu-hong, WANG Lei. Design of Network Data Acquisition and Test System Based on ARM and LabVIEW[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(13): 88—92.