

模糊 PID 控制在复合纸板分切机速度控制中的应用

苏绍兴, 黄金梭

(温州职业技术学院 浙江省温州轻工机械科技创新服务平台, 温州 325035)

摘要: **目的** 为了实现在高强度复合纸板生产过程中对分切机输送速度的精确控制, 以提高纸板的整体强度和生产效率, 研究电机速度控制的方法。 **方法** 介绍高强度复合纸板的制作工艺流程, 并围绕分切机中驱动电机的速度控制进行硬件系统设计, 采用 PID 控制和模糊控制的复合嵌套控制方法, 设计一套参数自整定的模糊 PID 速度控制系统, 并进行系统仿真。 **结果** 模糊 PID 控制系统的超调量小于 5%, 调节时间比传统 PID 控制方法缩短 30% 以上, 调节后期的振荡基本消除。 **结论** 模糊 PID 的复合嵌套控制方法具有超调很小、响应速度快等优越性, 改善了系统的动态性能, 增强了系统的抗干扰能力。

关键词: 速度控制系统; 模糊 PID; 复合纸板

中图分类号: TB484.1; TB486+.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)09-0080-05

Application of Fuzzy-PID Control in Crosscut Feeding Speed Control of the Composite Paperboard

SU Shao-xing, HUANG Jin-suo

(Wenzhou Vocational & Technical College, Wenzhou 325035, China)

ABSTRACT: **Objective** To accurately control the feeding speed of the Cross-Cut machine during the manufacturing process of the high-strength paper board, which will help to improve its integral strength and production efficiency, the method of controlling the motor speed was studied. **Methods** Firstly, the manufacturing flow of the high-strength composite paper board was introduced, and a hardware system focused on the speed control of the Cross-Cut machine was designed. A nested control method with PID and fuzzy control was adopted for designing the fuzzy-PID speed control system, which was capable of self-tuning its parameters, and the system was simulated. **Results** The overshoot of the Fuzzy-PID control system was less than 5%, the adjusting time was reduced by more than 30% in comparison with the traditional PID control method, and the oscillation was almost excited at the late stage. **Conclusion** This nested fuzzy-PID control has the advantage of low overshoot and fast response, which improves the system's dynamic property and strengthen its anti-interference.

KEY WORDS: speed control system; fuzzy PID; composite paper

随着木材资源的日渐紧张和对其需求的不断增加, 高强度复合纸板将会成为未来“以纸代木”工程主要的材料, 其市场潜力和应用价值巨大^[1-2]。分切机速度的实时控制技术及其设备是生产高强度复合纸板的关键技术之一^[3]。目前, 国内虽然对于类似柔性

材料在输送过程中速度控制的相关研究已比较普遍, 但是针对复合纸板, 尤其是高强度复合纸板流水线的输送速度的具体技术研究和设备开发相对较少, 其主要还是靠引进国外先进设备和技术^[4-5]。这样, 增加了未来国内高强度复合纸板的市场竞争成本和风险。

收稿日期: 2014-02-13

基金项目: 浙江省科技厅公益性技术应用研究项目(2013C31092)

作者简介: 苏绍兴(1963—), 男, 浙江温州人, 温州职业技术学院教授, 主要研究方向为自动控制技术。

综合瓦楞纸板楞形结构和蜂窝纸板立柱式排列方法的优点,设计出了新颖的高强度复合纸板的工艺结构,并研制了高自动化高智能的成套设备样机。通过对纸板的工艺分析可知,张力会对板材的厚差、内部瓦楞纸芯变形、起皱翘曲和纸板综合强度产生影响^[6],而一定张力下的高速度运行则直接影响了生产的效率。文中主要针对成套设备里瓦楞分切机的纸板输送速度进行研究,将模糊 PID 算法应用于速度的实时控制,设计了速度控制系统。

1 高强度复合纸板生产工艺及其瓦楞纸芯分切机

1.1 生产工艺

原纸经过瓦楞机后形成瓦楞结构纸板,然后输送到达分切机,分切机根据用户对纸板厚度的要求对瓦楞纸进行切割,通过分切机上的立柱装置直接把平放的瓦楞纸立起,添加粘合剂,将一排排立着的瓦楞纸进行合并,再将上下两侧添加粘合剂后,在立着的瓦楞纸上下复合上纸面,就形成了复合高强度纸板,最后根据被包装产品的需要切割纸板。高强度复合纸板的生产工艺流程见图 1。

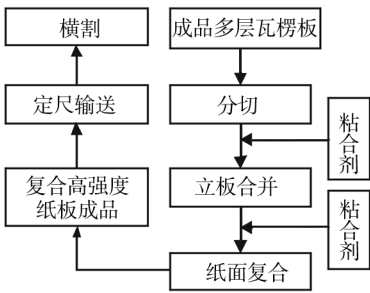


图 1 高强度复合纸板生产工艺流程

Fig. 1 Production flowchart of the high-strength composite board

该复合纸板的纸芯形状模仿瓦楞纸板的楞型,原纸消耗少,而且可利用现有成熟的瓦楞纸芯生产技术来实现,生产成本较低。复合纸板的衬纸面纸与纸芯的结合模仿蜂窝纸板的立柱式结构,综合力学性能远远高于瓦楞纸板^[7],见图 2。改进过的高强度复合瓦楞纸板不仅拓展了在包装领域的适用范围,还能取代一般木材满足重型包装、建筑装修装饰、家具展览、殡葬行业等高强度、防潮、防水、卫生的使用要求,实施“以纸代木”工程,在一定程度上可解决我国木材资源

稀缺而需求巨大的矛盾,具有可观的市场应用前景^[7]。

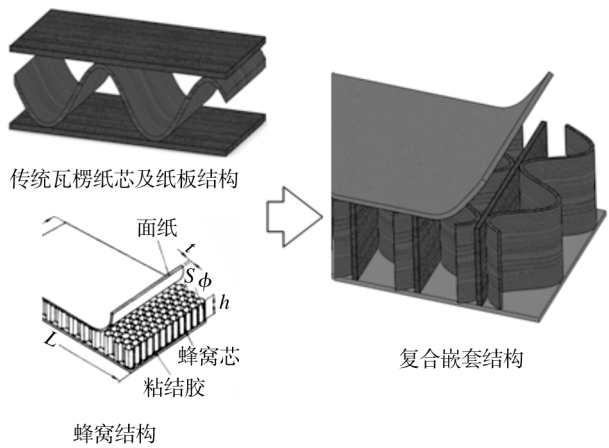


图 2 复合工艺结构方案

Fig. 2 Design of the composite structure

1.2 分切机系统介绍

在整套生产工艺流程中,瓦楞纸芯分切机的分切速度影响着纸板的质量和生产效率。分切机的样机外形见图 3。成品瓦楞纸芯从分切机的右侧进入分切滚刀部分,经切割后同时由滚刀以一定线速度往左送出。



图 3 分切机

Fig. 3 Cross-cutter machine

其中,分切滚刀轴的转动由电机经过一定传动比的齿轮传动后驱动,因此,通过准确控制电机转速便可实现对分切机输送线速度的控制。电机转速控制系统由 PLC、DA 模块、变频器、电机和编码器等构成,见图 4。

电机 M 当前的转速 n_i 可通过安装在电机轴上的编码器测得。在 PLC 控制逻辑中,将编码器的输出脉冲频率 f 转化成转速 n_i 后与设定的速度 n_0 进行比较,利用模糊 PID 控制原理求得输出转速 $n_i + \Delta n$ 。根据该输出转速,通过 DA 模块向变频器输入模拟电流,达到调节电机 M 转速的目的。如此不断循环,实

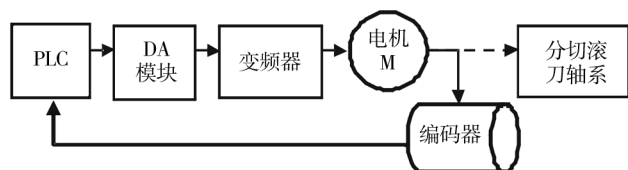


图4 电机速度控制系统

Fig.4 Chart of motor speed control system

现对电机转速的实时控制。

2 瓦楞纸芯分切机的模糊PID速度控制器的设计

2.1 模糊PID控制器的系统框架设计及参数整定

虽然传统PID控制方法在控制结构简单、鲁棒性强等方面具有优势,但由于瓦楞纸芯分切机是一个多变量、非线性时变的复杂系统,所以应用该静态控制系统时,速度的波动将会造成纸板流水线出现卡滞或拉扯现象,严重影响纸板的整体质量和生产效率。为了实现对分切机运行速度控制的稳定性和可靠性,结合模糊控制和PID控制的特点,将人的经验和逻辑判断的智慧提炼成模糊控制的知识库(即规则库和隶属函数),用于在线实时调整非线性PID控制系统中的各个参数^[8-9],从而达到精确控制电机转速的目的,模糊PID控制系统的框架见图5。

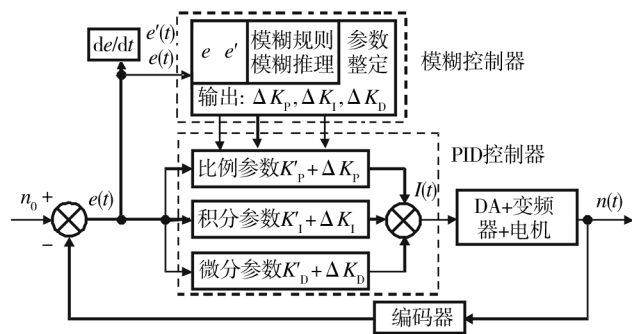


图5 模糊PID控制系统

Fig.5 Chart of fuzzy-PID control System

采用二维模糊控制器作为PID参数整定的工具^[10],把任意时刻电机转速与设定转速之间的偏差量 $e(t)$ 和偏差变化速率 $e'(t)$ 作为模糊控制器的输入变量,根据模糊控制规则及其推理,输出语言变量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ ^[10]。在初始参数 K_p', K_i', K_d' 的基础上,最终实现实时调节PID控制器的3个参数 $K_p, K_i,$

K_d 。

为了将复杂系统简单化,现采用有限整数的离散论域替代原本连续变化的输入输出变量的连续论域,并以控制查询表的形式设计。在分切机的速度控制系统中,要求系统的稳态误差在5%以内,故大致取 $e(t)$ 和 $e'(t)$ 的论域为 $[-3, 3]$,量化为子集 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,其对应的7级模糊等级为 $\{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$,子集中的各个元素分别表示:负偏大、负偏中、负偏小、零、正偏小、正偏中、正偏大。同样,取 ΔK_p 的论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,量化等级为 $\{NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL\}$ 。取 ΔK_i 和 ΔK_d 的论域为 $\{-2, -1, 0, 1, 2\}$,量化等级为 $\{NL, NS, ZO, PS, PL\}$ 。

2.2 模糊PID控制的模糊规则

PID参数的整定是PID控制器设计的核心内容,过去常用人工试凑的方法根据被控过程的特性调整比例参数 K_p 、积分参数 K_i 和微分参数 K_d 。除了能够进行PID控制以外,模糊PID控制器还能根据模糊控制规则自动实时地在线调整PID参数,从而稳定地控制分切机的进给速度,模糊控制的具体规则如下^[11-13]所述。

1) K_p 的作用是缩短系统的响应时间,提高系统的调节精度,属于粗调范畴。在速度调节初期或停止时,由于偏差 e 较大,为了提高系统响应速度,迅速调节速度接近目标值,应取 K_p 为较大值。同时,在偏差瞬间变大的情况下会引起微分饱和,控制作用会因此超出许可范围。为了避免上述情况的发生,应取 K_d 为中等偏下的值。另外,为了抑制系统的超调,取 $K_i=0$ 。

2) K_i 的作用是将系统稳态误差尽快地消除。静差消除的速度与 K_i 的数值成正比,但在响应过程初期会因产生积分饱和而引起较大超调。由此,在速度调节的中期,即偏差 e 和偏差变化率 e' 为中等大小时,为了减小系统调节的幅度,应取 K_p 为较小的值;并保持一定的稳定性,应使 K_i, K_d 取中等或尽量偏小的值。

3) K_d 的作用是影响系统的动态性能,抑制偏差的波动,但 K_d 过大会延长调节时间。由此,在速度调节的末期,此时的偏差较小,为了保持系统的稳定性,应增大 K_p, K_i 。同时,为了避免速度在设定值附近出现振荡,并使系统具有良好的稳态性能, K_d 应该在偏差变化率增大时,取小值;偏差变化率减小时,取大

值。

根据以上 PID 参数整定的规律分析,制定出以下模糊控制规则的赋值表,见表 1—3。

表 1 K_p 模糊赋值

Tab.1 Fuzzy assignment table of K_p

ΔK_p	e'						
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
e	NL	PL	PL	PM	PM	PS	ZO
	NM	PL	PL	PM	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NL
	PL	ZO	ZO	NM	NM	NL	NL

表 2 K_I 模糊赋值

Tab.2 Fuzzy assignment table of K_I

ΔK_I	e'						
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
e	NL	NL	NL	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NL	NL	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NL	NM	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PL
	PL	ZO	ZO	PS	PM	PM	PL

表 3 K_D 模糊赋值

Tab.3 Fuzzy assignment table of K_D

ΔK_D	e'						
	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
e	NL	PS	NS	NL	NL	NM	PS
	NM	PS	NS	NL	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PL	PS	PS	PS	PS	PL
	PL	PL	PL	PM	PM	PS	PL

最终修定参数为:

$$K_p = K'_p + \Delta K_p$$
$$K_I = K'_I + \Delta K_I$$
$$K_D = K'_D + \Delta K_D$$

式中, K'_p, K'_I, K'_D 为初始 PID 参数; $\Delta K_p, \Delta K_I, \Delta K_D$ 为模糊控制器的 3 个输出参数。在系统运转过程中,

可通过查询模糊规则表自动完成参数的在线修定。

2.3 模糊推理与模糊量化

模糊推理是通过由专家经验和隶属函数构成的知识库对输入模糊集进行运算分析而给出模糊结论的过程。文中采用目前应用比较广泛的 Mamdani 极大极小运算法对上文所述的模糊命题集进行模糊推理运算^[14]。为了运算简便,减少内存空间的占用,采用三角形隶属函数来描述推理结果的隶属度。

由于 Mamdani 极大极小运算法所推理出来的结果是模糊命题,需要从中判决出一个精确的控制量来驱动被控对象,此过程就是模糊量化,也称做解模糊。文中从众多解模糊方法中采用了一种应用广泛的“重心法”^[15]。例如,在量化比例参数 ΔK_p 时,公式为:

$$\Delta K_p^* = \frac{\sum_{i=1}^p k_{pi} \mu(\Delta k_{pi})}{\sum_{i=1}^p \mu_i}$$

(1)

式中: ΔK_p^* 为量化后的输出量; μ 为隶属函数; p 为单点集数。

3 仿真结果

在 Matlab 的 Simulink 环境下建立仿真模型,根据试验情况确定系统的开环传递函数为:

$$G(S) = \frac{65.78}{S(0.0009S^2 + 0.2153S + 3.306)}$$

(2)

输入单位阶跃响应信号,分别得到模糊 PID 控制和 PID 控制下的系统响应曲线,其结果见图 6。

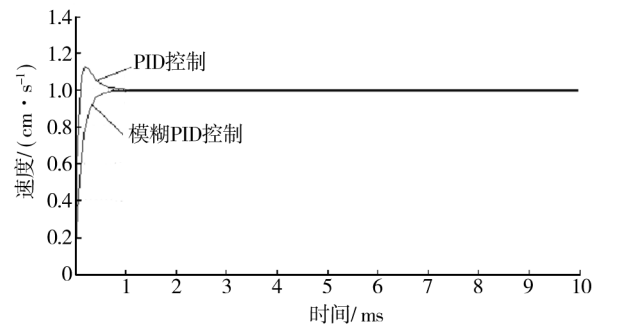


图 6 2 种控制系统的单位阶跃响应

Fig.6 Unit step response of the two control systems

从图 6 可以看出,传统 PID 控制下系统的超调量很大,调节时间较长,存在振荡现象,过渡过程时间长;模糊 PID 控制时只有很小的超调,响应速度也比

较快,获得了很好的控制效果。

4 结语

文中设计了一套横切机输送速度控制系统,通过理论分析和试验说明系统的设计是可行的,能够保持高效率运行,将投入生产实际设备。文中设计的模糊 PID 复合控制方法可以实现对分切机输送的速度控制,能改善系统的动态性能,增强系统的抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 邓继泽. 包装纸板现状和发展趋势[J]. 中华纸业, 2012, 33(23): 60—65.
DENG Ji-ze. Current Situation and Development Trend of Packaging Board[J]. China Pulp & Paper Industry, 2012, 33(23): 60—68.
- [2] 刘爱平, 于伸. 纸板家具设计与制作工艺探析[J]. 包装工程, 2011, 12(4): 57—60.
LIU Ai-ping, YU Shen. Analysis of Design and Production Process of Cardboard Furniture[J]. Packaging Engineering, 2011, 12(4): 57—60.
- [3] 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(11): 93—95.
YU Yong-wei, DU Liu-qing, FENG Wen-jie. Control System Designed for the Corrugated Board Automatic Cross-cutting Machine [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11): 93—95.
- [4] 邓小龙, 李勇, 张珏, 等. 基于 CC-link 的蜂窝纸板生产线控制系统的模块化设计[J]. 包装工程, 2010, 31(9): 87—91.
DENG Xiao-long, LI Yong, ZHANG Jue, et al. Modular Design of Honeycomb Paperboard Production Line Control System Based on CC-link[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(9): 87—91.
- [5] 关朴芳. 基于模糊 PID 的锂电池极片卷绕设备张力控制[J]. 福建工程学院学报, 2013, 11(4): 377—380.
GUAN Pu-fang. The Tension Control of Lithium Battery Electrode Winding Equipment Based on fuzzy PID[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2013, 11(4): 377—380.
- [6] 刘冰, 阮红斌, 曹海斌, 等. 蜂窝-瓦楞复合纸板的面外承载及静态缓冲性能研究[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 4—8.
LIU Bing, RUAN Hong-bin, CAO Hai-Bin, et al. Research on Outside Bearing and Static Cushion Performance of Honeycomb Corrugated Composite Paperboard [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 4—8.
- [7] SU Shao-xing, DONG Ling-jiao. Study on Manufacturing Technology of High-strength Composite Board[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 389: 310—312.
- [8] 薛雷, 孙以泽, 李培兴, 等. 基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 16—20.
XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, et al. Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Pantyhose Packaging Machine Based on Fuzzy-PID[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 16—20.
- [9] WAI R J, KUO M A, LEE J D. Cascade Direct Adaptive Fuzzy Control Design for a Nonlinear Two-axis Inverted-pendulum Servomechanism[J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transaction, 2008, 38(2): 439—454.
- [10] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2008.
SHI Xin-min, HAO Zheng-qing. Fuzzy Control and MATLAB Simulation [M]. Beijing: Beijing Jiaotong Publishing House, 2009.
- [11] SERVET S, MEHMET K, HASAN A. Design and Simulation of Self-tuning PID-type Fuzzy Adaptive Control for an Expert HVAC System[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36: 4566—4573.
- [12] HANG C C, SIN K K. A Comparative Performance Study of PID Auto-tuners[J]. Control Systems Magazine, 1991, 11(5): 41—47.
- [13] 耿涛, 赵金, 刘洋. 基于模糊推理的专家自整定 PID 控制器[J]. 华中科技大学(自然科学版), 2010, 38(6): 4—7.
GENG Tao, ZHAO Jin, LIU Yang. Fuzzy Reasoning-based Expert Self-tuning PID Controller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 4—7.
- [14] AKGUNA A, SEZER B E A, NEFESLIOGLU H A. An Easy-to-use MATLAB Program (MamLand) for the Assessment of Landslide Susceptibility Using a Mamdani Fuzzy Algorithm[J]. Computers & Geosciences, 2012, 38(1): 23—34.
- [15] 魏克新, 高强, 陈在平. 模糊控制中解模糊方法的研究[J]. 控制与策略, 1997, 12(7): 477—481.
WEI Ke-xin, GAO Qiang, CHEN Zai-ping. The Study of Defuzzification Methods in the Application of Fuzzy Control [J]. Control and Decision, 1997, 12(7): 477—481.