

包装机混合式定量称量系统设计

李明辉, 闫琛钰

(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要:目的 克服单纯的容积式定量与称量式定量的缺陷,以及包装机定量称量系统的时滞性问题。方法 通过分析包装机的工作原理以及影响其称量精度与速度的因素,采用混合式定量的方法,并采用双自由度 Smith 预估补偿,从而克服传统 Smith 预估器对参数模型精度要求较高的缺陷。结果 仿真证明双自由度 Smith 预估器控制时波动较小,在时间为 10 s 时即可到达稳态,且有外在扰动时系统超调比传统 Smith 控制缩减 1 倍。结论 通过 Matlab 进行了仿真研究,表明双自由度 Smith 预估补偿可减少称量系统的质量误差,大大提高了系统输出的精度,可显著改善定量称量包装系统的控制效果。

关键词: 计量装置; 滞后延迟; 双自由度 Smith 预估

中图分类号: TB486.3; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0158-05

Design of Hybrid Quantitative Weighing System for Packaging Machine

LI Ming-hui, YAN Chen-yu

(Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to overcome the defects of the simple packaging metering devices of volume and weighing, and the time lag of the quantitative weighing system of the packing machine. By analyzing the working principle of the packing machine and the factors affecting its weighing precision and speed, the composite ration method and the double freedom Smith predictor were adopted to overcome the shortcomings of the traditional Smith predictor for the high precision of the parameter model. Simulation proved that the double freedom Smith prediction controlled less volatile and reached the steady state when time was 10 s. When there was external disturbance, the system overshoot was 1 time less than traditional Smith control. In conclusion, through Matlab simulation, the results show that double freedom Smith predictor can reduce the weight error of the weighing system and greatly improve the accuracy of the system output, and can significantly improve the control effect of the quantitative weighing and packing system.

KEY WORDS: measuring equipment; lagging and time-delay; double freedom smith predictor

包装物料供送计量装置是按一定工作要求,将包装物料从料仓输送到包装工位并充填到包装容器中。包装物料的种类繁多,质地、状态和形状千差万别,因此,如何选择和设计包装物料的计量方法及供送方式,是实现物料包装的关键,这也是包

装机械设计的一个重要组成部分^[1-2]。在供送和称量时,要保证产品形状的完整以及称量精度,因此,要同时考虑生产效率与包装质量。包装机械称量速度是影响生产效率的一个重要因素。

经分析包装机的工作过程和工作原理,影响其

收稿日期: 2016-03-21

作者简介: 李明辉 (1972—), 男, 河南信阳人, 博士, 陕西科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能及高级过程控制。

称量精度的因素有以下几点：空中柱料的影响，当振动给料装置停止给料时，在空中仍有一部分物料还未落入称量机构中，会造成超重^[3]；落料冲击的影响，当物料从空中落入称量装置时，会产生一定的冲击，使得所测质量有所波动，造成虚假质量；执行机构的动作滞后性以及惯性的影响^[4-5]。提高计量精度和速度可以从改进送料设备的特性和改进称量算法 2 个途径进行。

1 供送计量方案设计

1.1 供送部分

槽式振动给料装置利用振动技术，对松散状颗粒物料或粉料进行中短距离的输送给料。振动输送给料装置由激振器、料槽、底座和隔振橡胶弹簧组成。振动输送装置与计量装置之间的垂直距离应尽量短，以减少物料冲击引起的虚假质量。目前，槽式振动给料器其落料口为平口，物料直接落入计量装置内，现对其出口进行改进，增加一段延伸段，物料运动到此处时顺延此延伸段进入计量装置，缩短落料口与计量装置之间的距离，见图 2，可对落料过程进行缓冲，降低冲击度，从而减少在落料过程中由冲击而造成的误差。

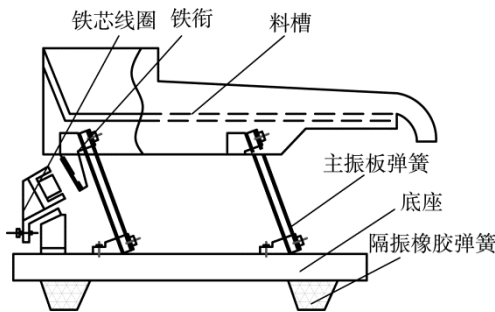


图 2 槽式振动给料器结构
Fig.2 The diagram of the recessed vibration feeding fixtures

1.2 计量部分

对于粉剂、颗粒物常用的计量方式为容积式计量和称量式计量。容积式计量是利用容积来计量充填物料的质量，其结构简单，造价低，计量速度快。对于像砂糖、食盐这类密度稳定、颗粒均匀、黏附性小、不易吸潮结块、流动性好的松散颗粒物料，优先选用容积式计量的方法^[6]。容积式计量装置对计量物料的密度要求较高，若计量物料的密度不稳定，物理化学性质不稳定，则会大大影响计量精度。

量杯式计量装置见图 3。

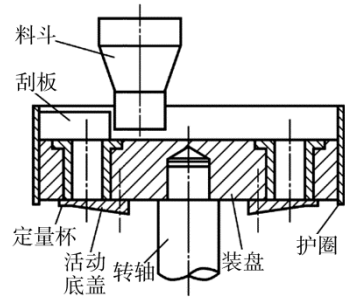


图 3 容积式计量装置结构
Fig.3 Diagram for displacement metering mechanism

称量式计量方法针对于物料颗粒大小不均匀，物料密度变化较大，物料易受潮结块且价格较高的包装物。称量式计量装置与容积式计量相比较，其称量精度高，但称量速度慢、结构复杂^[7]。

混合式定量是将容积式定量与称量式定量相结合，融合二者的优点^[8]。容积式粗给料器快速往料斗中充填大部分目标量但不计量，即粗加料；打开活动底盖将该部分物料投入称量计量装置中，由细给料器进行补料，达到预设质量后，细给料器停止工作，即细给料；打开称量料斗的活动料门，将物料投入包装容器内，至此完成 1 次自动定量充填过程^[9]，其工作流程见图 4。混合式定量使得加料速度大幅提高，并且能够减少因落料冲击和落差引起的称量误差。称量过程曲线见图 5。

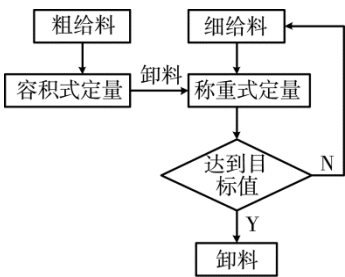


图 4 混合式定量工作流程
Fig.4 Mixed flow chart

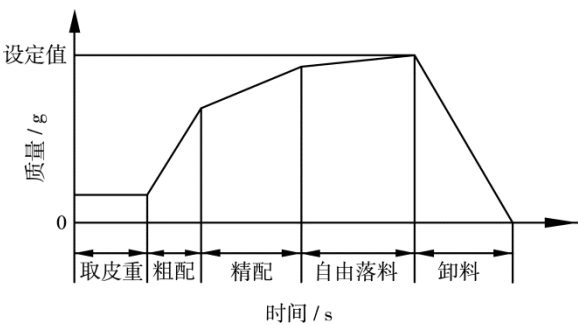


图 5 称量过程曲线
Fig.5 Weighing process curve

2 双自由度 Smith 预估在称量部分的应用

2.1 PID 控制基本原理

比例积分微分控制简称为 PID 控制。根据系统的误差, PID 控制器利用误差的比例、积分、微分 3 个环节的不同组合计算出控制量^[10-11]。

2.2 史密斯预估补偿算法

史密斯(Smith)预估控制是一种广泛应用的对纯滞后对象进行补偿的控制方法。实际应用中,将 PID 控制器与一个补偿环节相并联,该补偿环节即为 Smith 预估器。从而使系统闭环特征方程不含纯滞后项,消除纯滞后现象所造成的影响。使超调量明显降低,提高了控制质量^[12]。Smith 预估补偿的基本控制策略是:构造一个过程参考模型,从系统闭环中将迟延环节 $e^{-\tau s}$ 移出,避免 $e^{-\tau s}$ 对系统反馈信号影响,使系统调节品质,稳定性等得到相应改善。从而提高系统的响应速度以及增强系统的适应性^[13]。传统的 Smith 预估器方框图见图 6。

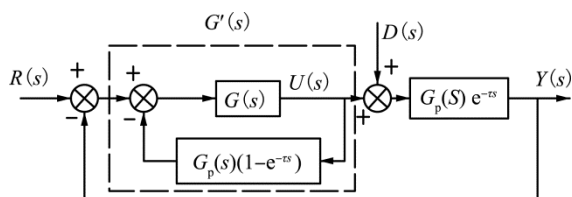


图 6 传统的 Smith 预估器

Fig.6 Traditional Smith predictor block diagram

2.3 双自由度 Smith 预估器

在模型精确的前提下,传统 Smith 预估器才能使系统达到完全补偿^[14]。在实际系统中,由于建模误差和对象自身参数的时变性造成的影响,导致模型失配严重,因此,采用双控制器方案,构成双自由度 Smith 预估控制系统,分别设计控制器,以实现设定值跟踪和对外在扰动的控制。双自由度 Smith 预估器结构见图 7。

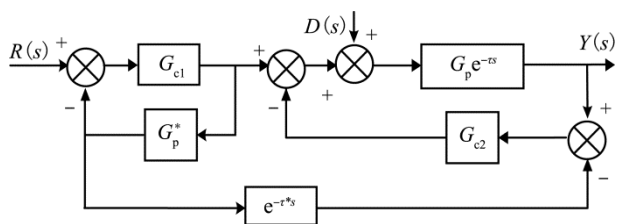


图 7 双自由度 Smith 预估器结构

Fig.7 Double freedom Smith predictor structure

当模型准确时,图 7 中,从 $R(s)$ 及 $D(s)$ 到 $Y(s)$ 的闭环传递函数分别为:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_{c2}(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{c1}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_{c1}(s)G_p(s)} \quad (2)$$

由式(1)可知,扰动响应与设定值跟踪控制器和过程模型无关,只由干扰衰减控制器 $G_{c2}(s)$ 调节。由式(2)可知,模型准确时,设定值响应与扰动响应分离,仅由 $G_{c1}(s)$ 控制^[15]。

2.4 双控制器设计

1) 数学模型描述。设被控对象为二阶惯性加纯滞后形式,其具体的数学表达式为:

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-\tau s} \quad (T_1 \neq T_2) \quad (3)$$

2) 设定值跟踪控制器设计。在模型准确的前提下,控制器 $G_{c1}(s)$ 和被控对象不含纯滞后的部分 $G_p(s)$ 组成设定值跟踪回路。令:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + \lambda_1 s} e^{-\tau s} \quad (4)$$

式(4)中 $\lambda_1 > 0$ 为一可调参数,即

$$\frac{G_{c1}(s)G_p(s)}{1 + G_{c1}(s)G_p(s)} = \frac{1}{1 + \lambda_1 s}, \text{ 则:}$$

$$G_{c1}(s) = \frac{1}{\lambda_1 s G_p(s)} \quad (5)$$

由式(5)可知, λ_1 的变化影响系统响应速度及稳定性, λ_1 增大,系统响应速度变慢,稳定性增强; λ_1 减小,系统响应速度变快,稳定性减弱;当 λ_1 趋近于 0 时,系统的设定值响应趋于最优。

3) 干扰衰减控制器设计。在模型准确的前提下,被控对象 $G_p(s)e^{-\tau s}$ 和干扰衰减控制器 $G_{c2}(s)$ 组成负载扰动控制回路。

$$G_{c2}(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)G_p(s)(1 - e^{-\tau s})} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, $G_{c2}(s)$ 即为传统 Smith 预估结构中的总的补偿控制器。为了使式(6)中不含时滞项,令:

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = (1 - G_{c2}^*(s)e^{-\tau s})G_p(s)e^{-\tau s} \quad (7)$$

式中: $G_{c2}^*(s)$ 为一有理式。令式(6)和式(1)右边相等得:

$$G_{c2}(s) = \frac{G_{c2}^*(s)}{G_p(s)(1 - G_{c2}^*(s)e^{-\tau s})} \quad (8)$$

为了满足完全扰动抑制, 需令:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{Y(s)}{D(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} (1 - G_{c2}^*(s)e^{-\tau s}) G_p(s) e^{-\tau s} = 0 \quad (9)$$

得 $G_{c2}^*(0) = 1$ 。因此, 可令:

$$G_{c2}^*(s) = \frac{1}{(1 + \lambda_2 s)^i}, i = 1 \text{ 或 } 2 \quad (10)$$

式中: λ_2 为一可调参数, 用来优化负载扰动响应, 它是干扰衰减和鲁棒性能之间的折衷。当 λ_2 变小时, 系统干扰抑制能力变强, 但鲁棒性能变弱; 当 λ_2 趋近于 0 时, 系统干扰性能趋于最优。将式(10)代入式(9)可得:

$$G_{c2}(s) = \frac{1}{G_p(s)((1 + \lambda_2 s)^i - e^{-\tau s})} \quad (11)$$

$i=1$ 或 2 的原则是使控制器 $G_{c2}(s)$ 在物理上能够实现。

3 定量称量系统的控制仿真

根据参考文献[4], 物料质量与给料量间的传递函数为:

$$W(s) = \frac{1.48}{(2.5s + 1)(8.26s + 1)} e^{-1.5s} \quad (12)$$

由式(12)可以看到, 被控对象为二阶惯性加纯滞后形式。为了消除定量称量系统的滞后现象, 实现较好的控制效果, 现在采用上述 PID+双自由度 Smith 预估补偿器来克服定量称量系统的滞后。其控制系统仿真框图见图 8, 针对定量称量包装控制系统设计相应的控制方案。利用 Matlab 进行仿真研究, 输入信号选取方波信号代替传统的阶跃输入, 来模拟一次称量过程中发生突变或出现扰动的情况, G_{c1} , G_{c2} 采用 PID 控制, 设定值跟踪控制器 G_{c1}

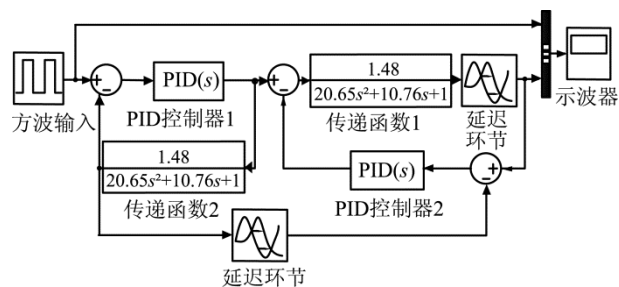


图 8 定量称量系统控制仿真

Fig.8 Quantitative weighing control system simulation diagram

的参数 $K_p=3.59$, $K_i=0.35$, $K_d=4.32$, 干扰衰减控制器 $G_{c2}(s)$ 的参数 $K_p=4.18$, $K_i=0.4$, $K_d=10.877$ 。当控制器参数设定为上述值时其控制效果最好。

输出仿真结果见图 9, 由图 9 可以看出响应速度较快且基本无超调, 经过短暂震荡后能够迅速跟踪设定值, 控制效果较好。

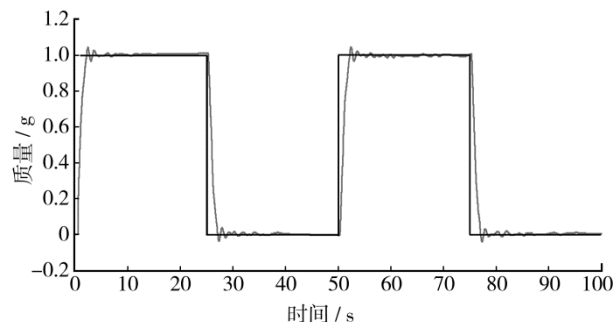


图 9 双自由度 Smith 预估控制系统仿真曲线

Fig.9 Double freedom Smith prediction control system simulation curve

在 $t=15$ s 时, 给予系统 30% 的扰动, 其系统响应曲线见图 10, 可以看出, 传统的 Smith 预估曲线震荡大, 不稳定, 双自由度 Smith 预估曲线波动较小, 遇到扰动时系统能够快速达到稳态, 其抗干扰能力优于传统 Smith 预估, 能够达到较好的控制效果。

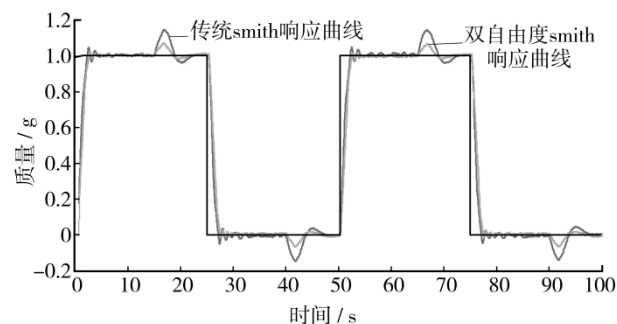


图 10 加入干扰后的控制系统仿真曲线

Fig.10 Control system simulation curve after interference is added

4 结语

采用组合式称量的方法可以克服容积式定量计量精度较低, 称量式计量速度较低的缺陷, 并针对定量称量包装系统具有大惯性滞后、非线性时变等特点, 采用双自由度 Smith 预估, 克服了传统 Smith 预估器依赖于精确数学模型的缺陷, 使其适用于包装机称量系统, 通过 Matlab 对控制方法进行仿真, 比较分析传统 Smith 预估控制与双自由度

Smith 预估控制的控制效果。仿真结果表明: 双自由度 Smith 预估控制的控制效果优于 Smith 预估控制, 具有一定的工程应用价值, 并在河南某公司的包装机称量系统上试运行情况良好。

参考文献:

- [1] 孙智慧, 高德. 包装机械[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
SUN Zhi-hui, GAO De. Packaging Machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2010.
- [2] 张晓春. 茶叶制袋充填包装机关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
ZHANG Xiao-chun. Research on the Key Technology of Tea Bag Filling Packing Machine[D]. Hefei: University of Science & Technology China, 2012.
- [3] 苏俊明, 李振亮, 李亚, 等. 称重式包装机系统延时和空中料柱的预测补偿方法[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 85—92.
SU Jun-ming, LI Zhen-liang, LI Ya, et al. Predictive Compensation Method of System Delay and Materials Stayed in the Air of Weighing Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 85—92.
- [4] 吴宇平, 章家岩, 章磊, 等. 定量称重包装系统 RBF 神经网络 PID 控制研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 299—302.
WU Yu-ping, ZHANG Jia-yan, ZHANG Lei, et al. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2014, 35(3): 299—302.
- [5] 聂学俊, 岳森峰, 李坤. 食品机械自动称重系统计量精度研究[J]. 食品与机械, 2014(4): 67—69.
NEI Xue-jun, YUE Sen-feng, LI Kun. Measuring Accuracy Research on Automatic Weighing System of Food Machine[J]. Food & Machinery, 2014(4): 67—69.
- [6] 张西良, 毛翠云. 固体物料定量充填技术综述[J]. 包装工程, 2002, 23(5): 18—20.
ZHANG Xi-liang, MAO Cui-yun. Review of Solid Material Quantitative Filling Technique[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(5): 18—20.
- [7] 王红. 智能全自动称重包装系统控制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
WANG Hong. The Research of Intelligent Automation Weighing and Packing System Control[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [8] 张西良, 路欣, 毛翠云. 粉粒状物料混合式定量充填技术研究[J]. 计量学报, 2003, 24(4): 310—313.
ZHANG Xi-liang, LU Xin, MAO Cui-yun. Study on the Techniques of Composite Type Quantifying-Filling for Powder and Particle Materials[J]. Metrologica Sinica, 2003, 24(4): 310—313.
- [9] 余勃, 张西良. 混合式定量加料过程的 PID-模糊控制[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 12—14.
SHE Bo, ZHANG Xi-liang. PID-Fuzzy Control in the Process of Composite Type Quantifying Feed[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 12—14.
- [10] 陈满儒, 王海峰, 张文明. 神经网络 PID 在包装机控制系统中的应用研究[J]. 包装工程, 2009, 30(4): 10—11.
CHEN Man-ru, WANG Hai-feng, ZHANG Wen-ming. Applied Research of Neural Network PID in Control System of Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 10—11.
- [11] 朱鹏飞, 黄松和, 冷东. 组合秤下料机构自适应控制[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 90—94.
ZHU Peng-fei, HUANG Song-he, LENG Dong. Self-adaptive Control System for Feeding Mechanism of the Combination Weigher[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 90—94.
- [12] 陆萍蓝, 张火明, 毛汝东. 史密斯预估补偿控制与 PID 控制的比较研究[J]. 中国计量学院学报, 2009, 20(2): 171—179.
LU Ping-lan, ZHANG Huo-ming, MAO Ru-dong. Investigation on Comparison between the Smith Predictive Compensation Control and the PID Control[J]. Journal of China University of Metrology, 2009, 20(2): 171—179.
- [13] 杨海勇. 史密斯预估补偿控制及 MATLAB 仿真[J]. 科技资讯, 2007(29): 5—6.
YANG Hai-yong. Smith Predictive Compensation Control and MATLAB Simulation[J]. Science & Technology Information, 2007(29): 5—6.
- [14] 东方. 基于 Smith 预估器的大时滞系统控制方法研究与仿真[J]. 制造业自动化, 2010, 32(8): 177—179.
DONG Fang. The Study and Simulation on the Control Methods in Large Time Delay System Based on Smith Predictor[J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(8): 177—179.
- [15] 孙立强, 郑恩让. 时滞系统的双自由度 Smith 模糊 PID 控制器设计与仿真[J]. 化工自动化及仪表, 2014(5): 486—488.
SUN Li-qiang, ZHENG En-rang. Design and Simulation of Smith Fuzzy PID Controller with Double-freedom for Time-delay Systems[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2014(5): 486—488.