

基于 RST 的包装机混合式定量称重控制模型设计

丰会萍¹, 徐文力², 胡亚南¹, 祁广利²

(1.西京学院, 西安 710021; 2.陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 提高包装机混合式定量的称重精度。**方法** 针对包装机混合式定量称重系统具有非线性和时滞性的特点, 构造三支路结构的双自由度数字控制器 (RST 控制器), 等效为前向预测控制器和无延时控制器, 以消除系统扰动和滞后的影响, 设计基于 RST 的包装机定量称重控制系统。运用 Simulink 工具与传统 PID 控制器和 PID-Smith 控制器进行仿真对比。**结果** RST 控制器相较于 PID 控制器和 PID-Smith 控制器超调量小、调节时间短、跟踪能力好、鲁棒性强, 能够有效地提高包装机称重控制系统的稳定性和控制精度。**结论** RST 控制器能够提高包装机混合式定量称重精度, 从而提高包装机的包装精度。

关键词: RST; 定量称重; 混合式; 称重控制; Smith; PID

中图分类号: TB486; TS736^{+.3} **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)01-0110-06

Design of Hybrid Quantitative Weighing Control Model for Packaging Machines Based on RST

FENG Hui-ping¹, XU Wen-li², HU Ya-nan¹, QI Guang-li²

(1.Xijing University, Xi'an 710021, China; 2.Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the accuracy of hybrid quantitative weighing for packaging machines. With respect to the hybrid quantitative weighing system for the packaging machines featured by nonlinearity and time delay, the double-freedom-degree digital controller (RST controller) of a three-branch structure was constructed. Equivalent to a forward predictive controller and a no-time-delay controller, the RST controller could eliminate the effects of disturbances and delays on the system. A quantitative weighing control system for packaging machines based on RST was designed. The simulation comparison of traditional PID controller and PID-Smith controller was conducted with Simulink tool. The simulation results showed that, compared with the PID controller and the PID-Smith controller, the RST controller had less overshoot, shorter adjustment time, better tracking ability and stronger robustness. It could effectively improve the stability and control accuracy of the weighing control system for the packaging machines. The RST controller can improve the accuracy of hybrid quantitative weighing for packaging machines, so as to improve the packaging accuracy of the packaging machine.

KEY WORDS: RST; quantitative weighing; hybrid; weighing control; Smith; PID

随着经济发展和国民生活水平的提高, 高端小包装类产品日益受到广大消费的喜爱^[1]。高端小包装食品包装机计量精确、包装效率高, 其主要技术受限于国外发达国家, 而国内包装机定量控制受到以下几点因素影响而不能达到要求: 物料冲击, 在卸料时物料在重力作用下自上而下的落入料斗, 物料

对料斗产生一定的冲击力, 使称重传感器检测获得虚假信号^[2-3]; 检测滞后, 当称重传感器检测到包装物料达标后, 由于执行机构滞后和空中滞留物料加入料斗的影响, 造成物料超重; 物料密度和形状, 由于物料密度和物料形状、大小存在差别, 造成粗加料阶段误差较大; 外界干扰, 料斗振动、信号传输受到扰

收稿日期: 2017-06-04

基金项目: 国家自然科学基金 (41171275); 西京学院科研基金 (XJ160231)

作者简介: 丰会萍 (1982—), 女, 硕士, 西京学院讲师, 主要研究方向为机械设计及其自动化。

动以及物料特性改变等因素影响^[4]。

通过对上述包装机称重精度影响因素的分析可得，混合式定量称重包装机的称重系统具有非线性及时滞性的特性。在以往的包装机混合式定量称重控制中，通常运用传统 PID 控制器和 PID-Smith 控制器，因控制结构简单和依赖于精确数学模型，并不适用于较为复杂的控制系统，特别是大滞后、强非线性的包装称重系统，在设定值附近易产生超调量，造成产品包装质量不合格。RST 控制器具有控制精度高、抗干扰能力强、鲁棒性强的优点，其可以等效为一个前向预测控制器和一个无延时控制器，以消除系统扰动和滞后的影响。文中针对包装机称重控制过程进行研究分析，设计 RST 控制器并确定其参数，对包装定量称重系统进行控制。运用 Matlab 软件验证基于 RST 的包装机称重控制系统的鲁棒性、抗干扰能力及跟踪能力。

1 混合式定量称重原理及流程

混合式定量称重是在容积式称重和称量式称重相结合的称重方式，即加料过程细分为粗加料和精加料 2 个过程^[5]。由图 1 可知，包装定量称重控制系统运行后，设定包装产品规格（标准量）和粗给量，系统由粗给料（容积式称重）系统快速向料斗加料，安装在料斗装置下的称重传感器检测获取重力信号，经控制器计算标准量值和采样值的误差信号作为精给料（称量式称重）系统的设定值，精给料器进行给料工作。同时，控制器实时在线计算料斗内物料质量采样值与标准量值的误差值，若误差值为 0，则控制器发送停止精加料和卸料命令，结束工作；若误差值大于 0 且未达到阈值，则传送误差值作为精给料设定值，精给料驱动器持续工作；若误差值大于 0 且达到阈值，则控制器发送停止精加料和卸料命令，结束工作。

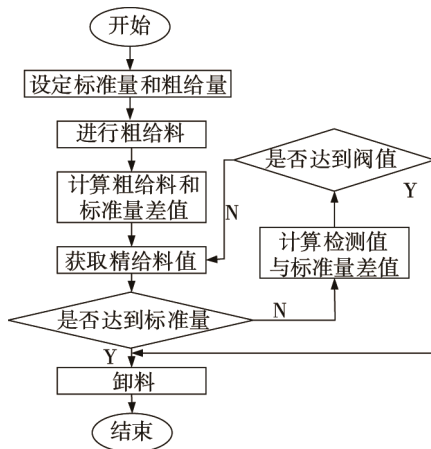


图 1 混合式定量称重流程

Fig.1 Hybrid quantitative weighing flow chart

由图 1 可知，精给料的设定值为标准量值和物料采样值的误差值，则精给料过程即可弥补粗给料误差，降低称重绝对误差，提高包装精度。由此也可得出，

如何提高精给料的控制精度是包装精度的关键所在。

2 包装机定量称重 RST 控制器设计

2.1 RST 控制器

实际控制系统一般采用传统 PID 控制器，而 PID 控制器仅有一个自由度，其调节特性和跟踪特性是相互耦合，很难满足复杂且要求较高的控制需求。如图 2 所示，RST 控制器是由 R, S, T 三路数字控制器组合而成，其分别可以用 $R(q^{-1}), S(q^{-1}), T(q^{-1})$ 表示。RS 控制器完成调节特性和 T 控制器完成跟踪控制器的双自由度控制器，实现调节特性和跟踪特性的独立控制。RST 控制器特性设计依据系统控制指标，满足系统的动静态性能需求下，用于改善系统稳定性、鲁棒性及准确性^[6-7]。

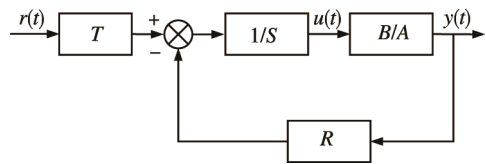


图 2 RST 控制器结构

Fig.2 Structure of RST controller

则可得控制信号为：

$$u(t) = -\frac{R(q^{-1})}{S(q^{-1})}y(t) + \frac{T(q^{-1})}{S(q^{-1})}r(t) \quad (1)$$

式中： q^{-1} 为时延算子。系统输入到系统输出的闭环脉冲传递函数为：

$$H_{cl}(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})T(q^{-1})}{A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})} \quad (2)$$

式中：

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} = 1 + q^{-1}A^*(q^{-1});$$

$$A^*(q^{-1}) = a_1 + a_2q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a+1};$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} = q^{-1}B^*(q^{-1});$$

$$B^*(q^{-1}) = b_1 + b_2q^{-1} + b_3q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1};$$

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1q^{-1} + \dots + s_{n_s}q^{-n_s} = 1 + q^{-1}S^*(q^{-1});$$

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1q^{-1} + \dots + r_{n_r}q^{-n_r}。$$

系统的特征多项式 $P(q^{-1})$ 为系统闭环传递函数的分母，其决定系统的动态性能。

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}) = 1 + p_1q^{-1} + p_2q^{-2} + \dots \quad (3)$$

2.2 RST 控制器参数设计

RST 控制器的参数设计的实质是多项式 $R(q^{-1}), S(q^{-1}), T(q^{-1})$ 系数的确定，引入多项式 $T(q^{-1})$ 是为增加控制系统的自由度，从而提高系统的跟踪能力和抗干扰能力^[8]。对 RST 控制器参数的具体设计过程如下所述。

1) 对象模型离散化。控制对象的数学模型精度直接关系着控制器设计的优劣^[9]。RST 控制器的控制对象的数学模型一般用多项式进行表示, 如式(4)模型是对对象模型离散化处理所得, 其由时延算子 q^{-1} 、分母项多项式 $A(q^{-1})$ 和分子项多项式 $B(q^{-1})$ 这 3 部分组成。

$$H(q^{-1}) = \frac{q^{-d}B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (4)$$

2) 选择闭环极点, 确定特征多项式 $P(q^{-1})$ 。依据理想性能指标, 令:

$$P(q^{-1}) = 1 + p_1q^{-1} + p_2q^{-2} \quad (5)$$

由 $u(t) = P(q^{-1})y(t)$ 可得:

$$y(t+2) = -u(t+2) - p_1y(t+1) - p_2y(t) \quad (6)$$

当系统的输入 $r(t)=0$ 时, 令 $p_1=-0.75, p_2=0$, 可以得到 $y(t+1)=0.75y(t)$, 即对象的下一时刻衰减到上一时刻的 75%。

3) 求解多项式 $R(q^{-1}), S(q^{-1}), T(q^{-1})$ 。利用 Bezoutd 等式确定多项式 $R(q^{-1}), S(q^{-1})$ 的系数是 RST 控制器参数设计的重要环节^[10]。由参数设计的前两步骤得到 $A(q^{-1}), B(q^{-1}), P(q^{-1})$, 因此可利用 Bezoutd 等式进行求解多项式 $R(q^{-1}), S(q^{-1})$ 的系数, Bezoutd 等式见式(7)。

$$P(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1}) + q^{-d}B(q^{-1})R(q^{-1}) \quad (7)$$

因为仅有当 $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 互质时 Bezoutd 等式才有唯一解, 所以应满足:

$$n_p = \text{deg } P(q^{-1}) \leq n_A + n_B + d - 1$$

$$n_s = \text{deg } S(q^{-1}) = n_B + d - 1$$

$$n_r = \text{deg } R(q^{-1}) = n_A - 1$$

式中: n_s, n_r 为多项式 $S(q^{-1}), R(q^{-1})$ 的阶数。把特征多项式 $R(q^{-1})$ 以向量形式进行表达为:

$$M \cdot x = p \quad (8)$$

式中: $x^T = [1, s_1 \dots s_{n_s}, r_0 \dots r_{n_r}]$; $p^T = [1, p_1 \dots p_{n_p}, 0 \dots 0]$;

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & b'_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & \dots & 0 & b'_2 & b'_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n_b} & a_{n_b-1} & \dots & 0 & b'_{n_b} & b'_{n_b-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n_b+d-1} & a_{n_b+d-2} & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_{n_b+d} & a_{n_b+d-1} & \dots & a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n_A} & a_{n_A-1} & \dots & a_j & 0 & 0 & \dots & b'_1 \\ 0 & a_{n_A} & \dots & a_{j+1} & 0 & 0 & \dots & b'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{n_A} & 0 & 0 & \dots & b'_{n_b} \end{bmatrix} \circ$$

对式(8)对关系矩阵 M 进行逆运算可得:

$$x = M^{-1}p \quad (9)$$

即可求解出 $S(q^{-1})$ 和 $R(q^{-1})$ 。 $T(q^{-1})$ 的求解与控制系统的跟踪能力有关, 一般是设定期望跟踪模型, 当系统输入发生变化时, 使系统输出 $y(t)$ 跟踪 $y^*(t)$ 进行跟踪变化, 以滞后系统举例, 其数学模型为^[11]:

$$H_m(q^{-1}) = \frac{q^{-(d+1)}B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} \quad (10)$$

则 $y^*(t+d+1) = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})}r(t)$, 其意义是滞后 d 时刻后的期望输出, 因此, $T(q^{-1})$ 是确保跟踪模型输出与系统模型输出一致。故:

$$T(q^{-1}) = GP(q^{-1}) \quad (11)$$

式中: $G = \begin{cases} 1/B(1), & B(1) \neq 0 \\ 1, & B(1) = 0 \end{cases}$ 。

RST 控制器的闭环极点配置见图 3。

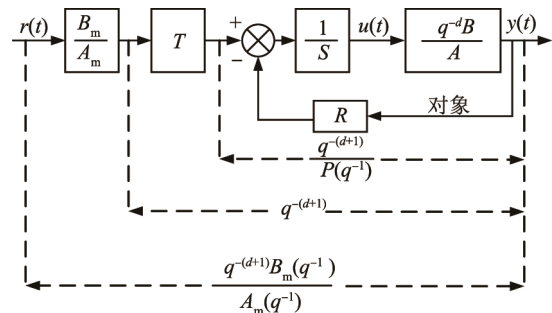


图 3 RST 控制器参数设计

Fig.3 Parameter design of RST controller

3 包装机混合式定量称重 RST 控制系统设计

3.1 控制方案

包装机物料称重过程受到物料冲击料斗、空中滞留物料、执行器惯性、物料密度和形状以及其他外界干扰因素的影响, 导致包装机称重系统具有非线性和滞后性^[12-13]。文中分析包装机定量称重工艺和定量称重原理, 设计适合于包装机定量称重系统的 RST 控制器, 包装机混合式定量称重 RST 控制方案见图 4。

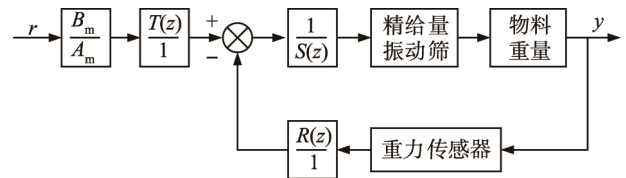


图 4 包装机定量称重 RST 控制系统

Fig.4 RST control system for quantitative weighing of packaging machine

包装机的振动筛控制一般采用频率控制, 不同频率的控制信号传输到振动筛电机, 对应的电机转速不同, 振动筛的振动频率不同, 从而实现精给量的调节^[14]。

3.2 参数设计

文中以 DXDK-100NWB 茶叶包装机（包装速度 30 ~ 60 包/min、计量范围 8 ~ 15 g、包装精度 1% ~ 2.5%）的精给料部分为控制对象，运用模型辨识的方法，采用输入的激励信号和重力信号辨识得到包装机定量称重的脉冲数学模型为：

$$sys(s) = \frac{0.0143s + 0.2153}{s^2 + 0.9735s + 0.0913} e^{-3s} \quad (12)$$

设置采样时间 $T_s=1$ s，加零阶保持器对 $sys(s)$ 进行离散化和标准化处理后得：

$$sys(q^{-1}) = \frac{0.197z^{-1} + 0.112z^{-2}}{1 - 1.29z^{-1} + 0.3211z^{-2}} z^{-3} \quad (13)$$

控制对象的离散数学模型 $sys(q^{-1})$ 获得后，即可确定控制参数 R, S, T 的多项式系数。跟踪模型的自然频率 ω_0 选取尽量小，但过小会增加调节时间；阻尼系数 ζ 选取尽量大，但过小会增加系统超调量，经过多次调试，最终选取 $\omega_0=0.11, \zeta=0.75$ 为最佳^[15-16]。离散化得到跟踪模型传递函数为：

$$H_G(q^{-1}) = \frac{0.089907 + 0.0597q^{-1}}{1 - 1.3269q^{-1} + 0.4998q^{-2}} = \frac{B_m(q^{-1})}{A_m(q^{-1})} \quad (14)$$

调节模型的 ω_0 和 ζ 选取原则与跟踪模型相同，经过多次调试，最终选取 $\omega_0=0.12, \zeta=0.55$ 为最佳。离散化的调节模型传递函数为：

$$H_T(q^{-1}) = \frac{0.0591 + 0.0595q^{-1}}{1 - 1.38321q^{-1} + 0.5767q^{-2}} = \frac{0.0591 + 0.0595q^{-1}}{P(q^{-1})} \quad (15)$$

考虑到称重系统的稳态误差和抗干扰能力，

$S(q^{-1})$ 的多项式应包含因子项 $(1 - q^{-1})$ ，则令 $H_s=[1, -1]$ 。经过计算可获得 RST 控制器的参数为：

$$R(q^{-1}) = 0.8914 - 1.1521q^{-1} + 0.3732q^{-2};$$

$$S(q^{-1}) = 0.2 + 0.0852q^{-1} - 0.0134q^{-2} - 0.0045q^{-3} - 0.1785q^{-4} - 0.0888q^{-5};$$

$$T(q^{-1}) = 1 - 1.3742q^{-1} + 0.4868q^{-2}$$

3.3 RST 控制器仿真分析

由于包装机混合式定量称重过程受到空中滞料和振动筛惯性的影响属于大滞后控制系统，目前包装称重控制系统一般采用传统 PID 和 Smith 控制算法，利用 PID 控制器起调节作用，Smith 控制器起补偿滞后作用^[17]。文中分别对设计的包装机称重系统的 PID 控制系统、PID-Smith 控制系统、RST 控制系统进行 Matlab 仿真比较分析。RST 控制器参数： $R=[0.8914 \ -1.1521 \ 0.3732]$ ， $S=[0.2 \ 0.0852 \ -0.0134 \ -0.0045 \ -0.1785 \ -0.0888]$ ， $T=[1 \ -1.3742 \ 0.4868]$ 。PID-Smith 控制器参数： $P=0.574, I=0.127, D=-0.023$ 。PID 控制器参数： $P=0.602, I=0.034, D=0$ 。文中运用 Simulink 软件对 3 种控制器的仿真对比模型，文中设定采样时间为 1 s。输入阶跃脉冲信号，仿真时间定为 250 s，并在 120 s 的时候加入幅值为 0.3 的干扰脉冲信号，来验证控制系统的优越性，是对包装机称重系统进行仿真实验，后续将展开基于 RST 的包装机定量称重控制系统的设备调试和包装过程验证。利用包装机定量称重传递函数构建 Smith 预估器模型，见图 5。

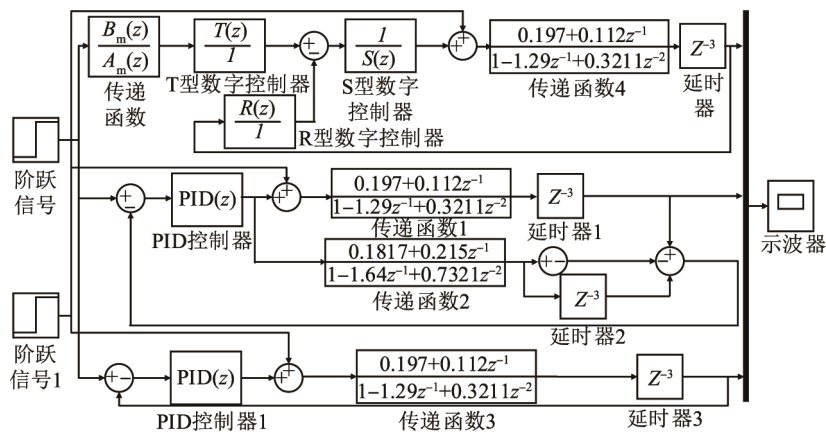


图 5 RST, PID 和 PID-Smith 控制器的仿真模型

Fig.5 Simulation models of RST, PID and PID-Smith controllers

3.3.1 控制器性能比较

RST, PID-Smith 和 PID 控制器的超调量分别约为 1%、15%和 20%，稳定时间约为 70, 80, 130 s。RST 的控制性能最好，PID-Smith 次之，PID 效果不好，见图 6。对比 3 个控制器的跟踪能力比较，RST 的跟踪能力最好，PID-Smith 较好，PID 效果稍差。另外，

在 $t=120$ s 的时候加入幅值为 0.3 的干扰信号，图 6 中响应曲线出现波谷，对比干扰信号产生的波谷可表明：RST 控制的抗干扰能力最强，PID-Smith 的最差。综上所述，RST 控制器的系统具有响应曲线到达稳定时间短，超调量小，跟踪能力和抗干扰能力强的优点，因此 RST 控制的性能的最优。

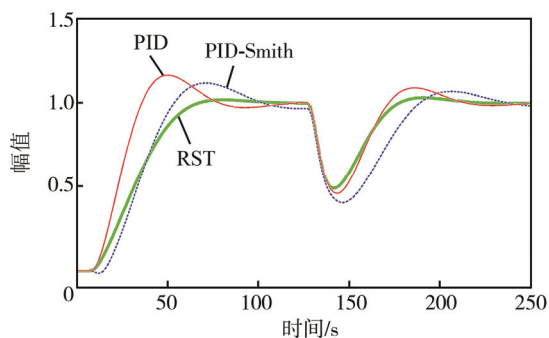


图6 RST, PID 和 PID-Smith 控制器的性能比较

Fig.6 Performance comparison of RST, PID and PID-Smith controllers

3.3.2 模型失配的鲁棒性比较

为验证 RST 包装机定量称重控制系统应对模型失配状况的能力,使系统模型时间常数增加 30%,对 3 种包装机定量称重控制系统进行仿真实验,见图 7。由图 7 可知,RST, PID-Smith 和 PID 控制器的超调量分别约为 2%, 20%和 30%,达到稳定时间约为 60, 120, 110 s。由响应曲线形状可看出, PID 和 PID-Smith 的响应曲线出现震荡现象,超调量较大,虽然这 2 种控制器的响应速度较快,但是由于曲线波动致使系统达到稳定时间较长。RST 控制在时间常数增加而影响太大,其跟踪能力最好,虽然抗干扰能力有所下降,但仍是三者受到较大干扰后达到稳定状态最快的控制器。由此可得:RST 控制抵抗模型失配能力较强,鲁棒性好,从而证明 RST 控制应用于非线性 and 滞后性的包装机混合式定量称重控制系统较传统 PID 控制器和 PID-Smith 预估控制器更具有较强的适应性和有效性。

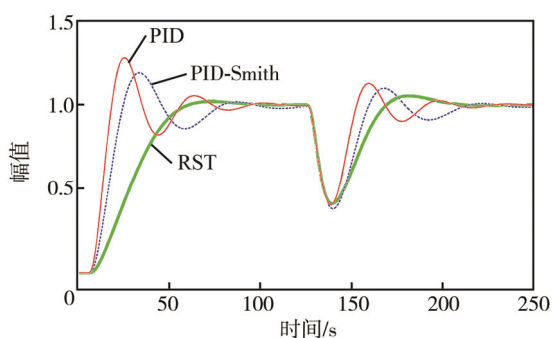


图7 系统模型时间常数增加 30%对比仿真

Fig.7 The simulation comparison of system model time constant increased by 30%

4 结语

针对包装机定量称重控制系统具有非线性和时滞性,导致包装产品重量精度较差的问题,提出了一种基于 RST 的包装机混合式定量称重控制系统。文中对包装机的定量称重系统进行研究,分析了引起定

量称重误差的主要因素,提出了实时在线调整精给量的设定值的方法,并设计与 RS 数字调节控制器和 T 数字跟踪控制相结合的 RST 控制器对包装机定量称重系统进行控制,并将其与传统 PID 控制和 PID-Smith 控制的控制器性能、抗干扰能力、跟踪能力及模型失配鲁棒性进行了仿真对比。实验结果表明,RST 控制较传统 PID 控制和 PID-Smith 控制超调量小、达到稳定时间短、跟踪能力强、鲁棒性好,能够有效地提高定量称重控制系统的稳定性和控制精度。将该系统应用于包装机混合式定量称重控制系统中,能够改善产品包装精度,提高产品质量,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 康瑞芳,刘鑫.基于 DSP 全自动食品包装控制系统设计[J].控制工程,2017,24(2):336—340.
KANG Rui-fang, LIU Xin. Motion Analysis and Control System Design for Automation Packaging Machine [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(2): 336—340.
- [2] 李明辉,闫琛钰.包装机混合式定量称重系统设计[J].包装工程,2016,37(19):158—162.
LI Ming-hui, YAN Chen-yu. Design of Hybrid Quantitative Weighing System for Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(19): 158—162.
- [3] 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.
- [4] 张俊,李明.基于 PLC 的模糊控制器在定量包装秤中的应用[J].制造业自动化,2014,36(5):110—82.
ZHANG Jun, LI Ming. Application of Quantitative Packaging Machine Based on PLC Fuzzy Controller[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 110—82.
- [5] 吴宇平,章家岩,章磊.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),2014,31(3):299—302.
WU Yu-ping, ZHANG Jia-yan, ZHANG Lei. A Study of Quantitative Weighing Packaging System Based on RBF Neural Network PID Control[J]. Journal of Anhui University of Technology(Natural Science), 2014, 31(3): 299—302.
- [6] CUENCA A, SALT J. RST Controller Design for a Non-uniform Multi-rate Control System[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(10): 2210—2217.
- [7] SOFIANE K, HADRAOUI, HAZEM N N. A Measurement-based Technique for Designing Fixed-order RST Controllers and Application to a Coupled Water Tank System[J]. Systems Science & Control Engineering: An Open Access Journal, 2014, 2(1): 21—26.

- [8] SOFIANE K. HADRAOUI M R. Design of a Fixed-order RST Controller for Interval Systems: Application to the Control of Piezoelectric Actuators[J]. *Asian J Control*, 2012, 15(1): 151—155.
- [9] 董婷. 一种自动称重包装控制系统设计[J]. *控制工程*, 2017, 24(2): 372—377.
DONG Ting. Control System Design of Automatic Weighing Packaging Machinery [J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(2): 372—377.
- [10] 胡青. 基于 RST 算法的直流电机传动系统的离散控制器设计[J]. *科技资讯*, 2009(34): 58—59.
HU Qing. Design of Discrete Controller for DC Motor Drive System Based on RST Algorithm[J]. *Science & Technology Information*, 2009(34): 58—59.
- [11] 徐文力. 造纸废水处理污泥干化段控制系统的设计与实现[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
XU Wen-li. Design and Implementation of Sludge Dewatering Control System for Papermaking Wastewater Treatment process[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2016.
- [12] 丰会萍, 胡亚南, 闫琛钰, 等. 基于 TIA Portal 的多功能茶叶包装机控制系统设计[J]. *食品与机械*, 2017, 33(7): 85—88.
FENG Hui-ping, HU Ya-nan, YAN Chen-yu, et al. Design of Control System for Multi-function Tea Packaging Machine Based on TIA Portal[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(7): 85—88.
- [13] 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.
- [14] 李明辉, 宋忠柱, 徐文力, 等. RST 数字控制器及其在时延系统中的应用[J]. *中国造纸学报*, 2017, 32(1): 45—49.
LI Ming-hui, SONG Zhong-zhu, XU Wen-li, et al. RST Digital Controller and Its Application in Time Delay System[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2017, 32(1): 45—49.
- [15] 卫光, 郭坤. 三伺服枕式包装机电子凸轮控制系统的应用[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.
- [16] 郁洋. 基于小波去噪的自动包装机控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
YU Yang. Research on Automatic Packaging Machine Control System Based on Wavelet Denoising[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [17] 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.
ZHAO Guo-jun, LI Zhong-hu, ZHANG Xiang. Design of Powdery Rare Earth Materials Quantitative Weighing and Automatic Packaging Control System[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(4): 46—53.