食品包装高精度计量控制方法

李丽，李虹飞
（济源职业技术学院，河南 济源 454650）

摘要：目的 为提高食品包装过程计量组件的称量精度和效率，采用智能控制算法设计一种高精度计量控制系统。**方法** 在分析动态称量系统工作原理的基础上，建立称量过程数学模型，将控制对象由放料阀门开度转换为电机轴位置。考虑到传统 PID 控制的缺陷，结合 PI Ziegler-Nichols 和预测控制设计一种高精度计量控制系统。该控制系统可实现比例和积分系数的在线调整，能够抑制参数变化、负载扰动；预测控制可提高系统收敛速度和跟踪能力。最后进行仿真和实验研究。**结果** 仿真结果表明，智能控制算法具有比较强的自适应、自整定能力，计量精度可以达到静态称量水平，均高于 99.5%。**结论** 食品包装高精度计量控制系统具有精度高、稳定性好、称量效率高等特点，在实际应用中对称量过程的控制效果相对较好。

关键词：包装；计量；PI Ziegler-Nichols；预测控制
中图分类号：TB486 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2021)15-0253-05
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.15.032

High Precision Measurement Control Method of Food Packaging

LI Li, *LI Hong-fei*
(Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 454650, China)

ABSTRACT: In order to improve the weighing accuracy and efficiency of food packaging process measurement components, an intelligent control algorithm is used to design a high-precision measurement control system. Based on the analysis of the working principle of the dynamic weighing system, a mathematical model of the weighing process is established, and the control object is converted from the opening of the discharge valve to the position of the motor shaft. Considering the defects of traditional PID control, a high precision measurement control system is designed by combining PI Ziegler-Nichols and predictive control. The control system can adjust the scale and integral coefficient on-line, and can restrain the parameter change and load disturbance. Predictive control can improve the convergence speed and tracking ability of the system. Finally, the simulation and experimental research are carried out. The simulation results show that the intelligent control algorithm has strong self-adaptive and self-tuning ability, and the measurement accuracy can reach the static weighing level, which is higher than 99.5%. Food packaging high precision measurement control system has the characteristics of high precision, good stability, high weighing efficiency, in the practical application of the weighing process control effect is relatively good.

KEY WORDS: packaging; measurement; PI Ziegler-Nichols; predictive control

收稿日期：2020-10-24
基金项目：河南省教育厅重点教研教改项目（2017SJGLX160）
作者简介：李丽（1981—），女，硕士，济源职业技术学院讲师，主要研究方向为电气自动化。

在实际生产过程中，只要涉及包装基本都需要对包装物料进行称量，尤其是粉状物料。从研究进展和研究成果来看，食品包装机械着重探讨如何实现高精度、高效率的动态称量[1—2]。许多文献将称量方式分为 2 类：动态称量和静态称量。其中，静态称量需要物料在称量传感器上保持一定时间，所以耗时长、效率低，但是精度高[3—5]。相对而言，动态称量的效率比较高，因此其在食品包装领域的应用比较广泛。动态称量过程容易受物料冲击、物料滞空、外部干扰等影响，具有比较明显的非线性、时变和时滞等特点，因此其称量精度不高。如果采用传统 PID 控制，很难提高称量精度而且稳定性比较差，无法获得满意的控制效果[6—11]。为解决此问题，许多线性或非线性智能控制算法在动态称量中的应用越来越广泛，例如 Ziegler-Nichols 控制，该控制理论可实现 PI 参数的在线调整，实现过程比较简单。预测控制则可以实现多步预测、滚动优化、反馈校正等功能，因而控制效果比较好、鲁棒性强。

综上所述，为提高食品包装过程计量精度，文中结合 Ziegler-Nichols 控制和预测控制设计一种高精度计量控制系统，并通过仿真和实验验证所述方法的有效性。

1 自动称量系统

通常情况下，食品包装计量系统主要由称量传感器、控制器、直流伺服电机、滚珠丝杠螺母副等组成。控制器通过直流伺服电机实现滚珠丝杠螺母副作往复直线运动，进而完成出料口阀门的开启或关闭。多数情况下，出料口会配置 2~3 个阀门，文中以 2 个阀门出料为研究对象。当实际质量和设定质量之间差距比较大时，2 个阀门同时开启，出料口快速进行放料；当实际质量和设定质量之间差距比较小时，大阀门迅速关闭，小阀门继续放料；当实际质量和设定质量之差在误差允许范围内时，小阀门关闭，称量结束[12—14]。食品包装计量系统结构见图 1。由图 1 可知出料口阀门开度和出料质量之间呈现比较复杂的非线性关系。为提高控制精度，同时降低控制难度，文中选用了一种半闭环式控制策略，具有稳定性好、精度高等特点[15—17]，控制系统结构见图 2。

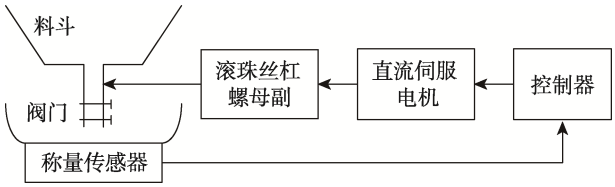

图 1 食品包装计量系统结构
Fig.1 Structure of food packaging measurement system

2 称量系统数学模型

通过对包装计量系统各部分进行分析，文中选定出料口阀门开度作为控制对象，分别建立了各模块的数学模型，并进行拉氏变换进而得到各模块传递函数。

位置调节器可看作比例控制模块，其传递函数可表示为：

$$G_1(s)=K_1 \tag{1}$$

式中：K_1 为比例放大系数。

功率放大器同样可以看成比例控制模块，其传递函数可表示为：

$$G_2(s)=K_2 \tag{2}$$

式中：K_2 为放大倍数。

如果直流伺服电机的负载转矩为 0，那么其输入量可定义为偏差 $e_i(t)$，输出量可定义为电机轴位置 $\theta_o(t)$，其传递函数可表示为：

$$G_3(s)=\frac{\theta_o(s)}{e_i(s)}=\frac{K_T}{s\left[(L_a s+R_a)(Js+B)+K_T\cdot K_b\right]} \tag{3}$$

式中：K_T 为电机转矩，其为常数；L_a 为电机等效电感；R_a 为电机等效电阻；J 为电机轴等效总转动惯量；B 为电机轴等效总粘性阻尼系数；K_b 为电机反电动势，其为常数。

对于滚珠丝杠螺母副，其输入量为电机输出角度 $\theta_i(t)$，滚珠丝杠将电机输出角度转换为直线位移信号控制出料阀门的开度，故其输出量可定义为阀门直线位移 $x_o(t)$，那么滚珠丝杠螺母副的传递函数可表示为：

$$G_4(s)=\frac{x_o(s)}{\theta_i(s)}=\frac{\dfrac{L}{2\pi}}{\dfrac{J}{K}s^2+\dfrac{B}{K}s+1} \tag{4}$$

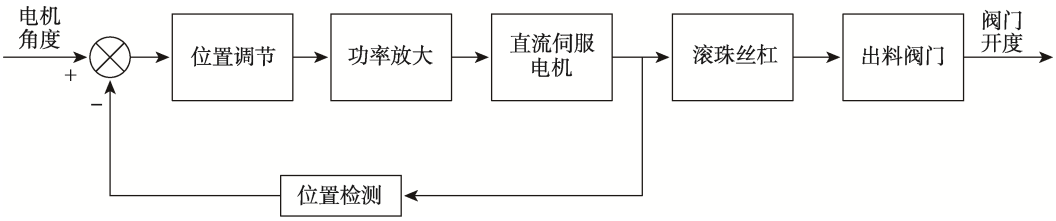

图 2 控制系统结构
Fig. 2 Control system structure

式中：L 为位移量；K 为电动机轴等效刚度系数。

位置检测元件主要用来判断电机轴位置，可看作比例控制模块，其传递函数可表示为：

$$G_5(s)=K_5 \tag{5}$$

综合上述，可得包装计量控制系统的传递函数为：

$$G(s)=G_1(s)\cdot G_2(s)\cdot G_3(s)\cdot G_4(s)\cdot G_5(s) \tag{6}$$

3　智能称量控制器设计

3.1　PI Ziegler-Nichols 控制器

根据 PI Ziegler-Nichols 控制原理，其结构见图 3，其中 e_N 为偏差；Δe_N 为偏差变化率；α 为一种调节因子；k 为反馈系数。

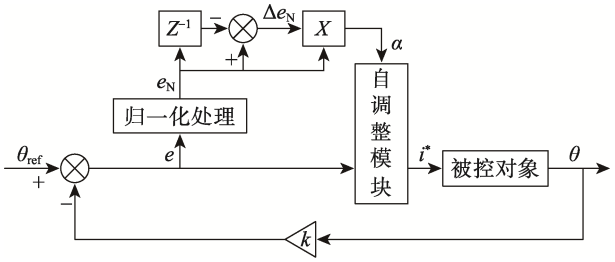

图 3　控制器原理

Fig.3 Controller schematic

另外，Δe_N 和 e_N 可分别表示为：

$$e(k)=\theta_{ref}-\theta_f \tag{7}$$

$$e_N(k)=e(k)\big/\left|\theta_{ref_max}\right| \tag{8}$$

$$\Delta e_N(k)=e_N(k)-e_N(k-1) \tag{9}$$

式中：θ_{ref} 为位置设定值；θ_f 为位置反馈值；θ_{ref_max} 为最大设定值；$e(k)$ 为偏差。

一般情况下，调节因子 α 可表示为：

$$\alpha(k)=e_N(k)\times\Delta e_N(k) \tag{10}$$

传统 PI 控制算式可描述为：

$$y(k)=K_p e(k)+K_i\sum_{i=0}^{k}e(i) \tag{11}$$

式中：$y(k)$ 为输出量；K_p 为比例系数；K_i 为积分系数。

定义调整函数为：

$$K_p^t=K_p\left(1+k_1\left|\alpha(k)\right|\right) \tag{12}$$

$$K_i^t=K_i\left(0.5+k_2\alpha(k)\right) \tag{13}$$

式中：K_p^t 为校正比例系数；k_1 为比例调整率；K_i^t 为校正积分系数；k_2 为积分调整率。

文中设定调节因子 α 的取值范围为 $[-1,1]$，那么 PI Ziegler-Nichols 控制算式可描述为：

$$y^*(k)=K_p^t e(k)+K_i^t\sum_{i=0}^{k}e(i) \tag{14}$$

式中：$y^*(k)$ 为控制器输出量。

3.2　预测控制器

根据模型控制算法，文中提出了一种预测控制方法。该控制方法可以描述被控对象的动态行为，根据不同情况可得到不同预测输出，进而选择最优控制策略。可见该系统具有较好的性能优化能力。

在每次递增时，滚动优化算法都会作用于控制系统，因此开环预测模型可以描述为：

$$Y_m(k+1)=Y_0(k+1)+\boldsymbol{A}\Delta U(k) \tag{15}$$

式中：$Y_0(k+1)$ 为不考虑 $\Delta U(k)$ 时的预测结果；$\boldsymbol{A}$ 为被控对象动态矩阵。闭环反馈的预测模型可以描述为：

$$y_p(k+i/k)=y_m(k+i/k)+h_i e(k)\quad i=1,2,3,\cdots,p \tag{16}$$

即：$y_p(k+i/k)=y_m(k+i/k)+h_i\left[y(k)-y_m(k)\right]$，式中 h_i 表示预测误差的修正系数。

所述控制方法需要确定一组 M 个控制增量，即：

$$\Delta U(k)=\left[\Delta u(k),\Delta u(k+1),\cdots,\Delta u(k+M-1)\right]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

在一定预测时域内，式（17）所示控制增量可使预测值无限接近设定值。

另外，滚动优化函数可描述为：

$$F=\left\|Y_r(k+1)-Y_p(k+1)\right\|_Q^2+\left\|\Delta U(k)\right\|_R^2 \tag{18}$$

式中，下标 Q 为预测输出误差加权值，下标 R 为控制量增加权阵，二者均不小于 0。在实施过程中，仅需将 $\Delta u(k)$ 施加于系统，可令：

$$d^{\mathrm{T}}=[1,0,0,\cdots,0]\left[\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}Q\boldsymbol{A}\right]^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}Q=\left[d_1,d_2,\cdots,d_p\right] \tag{19}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为一种 $P\times M$ 模型矩阵；M 为控制时长度；P 为预测时长最大值。

d^{T} 点积计算公式可表示为：

$$\Delta u(k)=d^{\mathrm{T}}\left[Y_r(k+1)-Y_p(k+1)\right] \tag{20}$$

$$u(k)=u(k-1)+\Delta u(k) \tag{21}$$

4　仿真和实验

为验证所述控制系统的可行性和有效性，文中进行了相关仿真和实验研究。包装计量控制系统模型可描述为：

$$G(s)=\frac{0.0026}{0.06s^3+0.3s^2+0.73s}\mathrm{e}^{-10s}$$

作为对比，文中以常规 PID 控制为参照对象进行仿真分析，仿真结果见图 4。

由图 4 可以看出，与常规 PID 控制相比，所述智能称量控制算法的收敛速度比较快，调整过程也较平

稳。仿真结果表明，该智能称量控制算法具有较理想的自适应、自整定能力，可以更好地适应称量过程的复杂工况，确保称量精度。

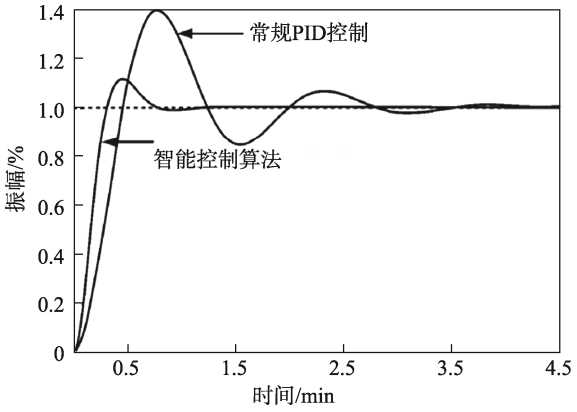

图 4　仿真结果
Fig.4 Simulation results

在实际生产过程中，分别进行静态测试和动态测试，各重复 500 次，计算实际质量平均值，并与设定值进行比较。静态测试时，需要确保物料在称量装置上保持一段时间，直到称量数值稳定，称量精度高；动态测试时，控制器需要实时采集物料质量，通过分析、预测控制出料阀门开度，称量过程较快。测试过程中，包装质量分别设定为 50，80，100 kg，具体实验结果见表 1—2。

表 1　静态测试结果
Tab.1 Static test results

设定质量/(kg·包$^{-1}$)	实际质量平均值/(kg·包$^{-1}$)	测量精度/%
50	50.10	99.8
80	80.12	99.85
100	100.15	99.85

表 2　动态测试结果
Tab.2 Dynamic test results

设定质量/(kg·包$^{-1}$)	实际质量平均值/(kg·包$^{-1}$)	测量精度/%
50	50.12	99.76
80	80.13	99.83
100	100.16	99.84

从实验结果可以看出，采用文中所述方法可确保动态称量精度非常接近静态称量，均高于 99.5%。另外，所述控制系统的计量范围可以达到 100 kg。

如果设定称量误差为±0.5%，经统计分析可以发现：静态称量结果均满足称量标准要求；动态称量结果满足概率接近 98.5%，说明动态称量稳定性比较高。

与静态称量相比，动态称量的生产能力可以达到 1000 包/h，称量效率大幅度提高。实验结果表明：食品包装高精度计量控制系统具有精度高、稳定性好、称量效率高等特点。

5　结语

以包装过程智能计量为研究对象，为提高计量精度设计了一种智能控制方法。在建立称量过程数学模型的基础上，将放料口阀门开度转化为电机轴旋转角度。提出了一种基于 PI Ziegler-Nichols 和预测控制的智能称量控制器。仿真结果表明：所述控制方法具有比较强的自适应、自整定能力，在实际应用中对称量过程的控制效果相对较好。计量控制系统精度高、稳定性好、效率高，可满足包装称量要求，具有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 胡攀，梁岚珍，李靖. 动态定量称重系统控制策略的研究[J]. 自动化博览, 2009, 26(11): 78—80.
HU Pan, LIANG Lan-zhen, LI Jing. The Study of Control Strategy for Dynamic Quantitative Weighing System[J]. Automation Panorama, 2009, 26(11): 78—80.

[2] 伍凌川，李全俊，黄权. 动态称量技术在发射药称重过程中的应用[J]. 兵器装备工程学报，2017, 38(2): 70—74.
WU Ling-chuang, LI Quan-jun, HUANG Quan. Application of Dynamic Weighing Technology in Propellant Powder Weighing[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(2): 70—74.

[3] 陈锐鸿. 在线动态称重系统开发及质量采集算法研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 94—98.
CHEN Rui-hong. Development of Online Dynamic Weighing System and Research on Weight Acquisition Algorithm[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 94—98.

[4] 张营，巩永光，田涛. PI Zieggler-Nichols 预测控制在机器人位置伺服控制中的应用[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 269—271.
ZHANG Ying, GONG Yong-guang, TIAN Tao. Application of PI Ziegler-Nichols Predictive Control in Robot Position Control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(3): 269—271.

[5] 索小娟，卫前伟. 改进模糊 PID 的称重式包装机智能控制[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(1): 55—60.
SUO Xiao-juan, WEI Qian-wei. Intelligent Control of Weighing Packaging Machine Based on Improved Fuzzy PID[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(1): 55—60.

[6] 王有贵，吴双双，陈红江. 称重传感器蠕变误差的神

经网络补偿方法[J]. 计量学报, 2018, 39(4): 510—514.
WANG You-gui, WU Shuang-shuang, CHEN Hong-jiang. Compensation Method for Creep Error of Load Cell Based on Neural Networks[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(4): 510—514.

[7] 马子龙. 高精度自动装料计量系统设计与实现[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 182—184.
MA Zi-long. Design and Realization of High Precision Automatic Charging and Metering System[J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 182—184.

[8] 高参, 高美凤. 双工位定量称重控制系统的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(10): 67—70.
GAO Can, GAO Mei-feng. Research on Quantitative Weighing System with Double Work Station[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(10): 67—70.

[9] 戴必柱, 高长水, 王颐壕, 等. Plan54 油站的密封腔压力自随动控制技术研究[J]. 流体机械, 2020, 48(1): 42—45.
DAI Bi-zhu, GAO Chang-shui, WANG Yi-hao, et al. Study on Pressure Follow-Up Control of Sealing Chamber for Plan54 Oil Station[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(1): 42—45.

[10] 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, 30(4): 67—69.
NIE Xue-jun, YUE Sen-feng, LI Kun. Measuring Accuracy Research on Automatic Weighing System of Food Machine[J]. Food & Machinery, 2014, 30(4): 67—69.

[11] 曾琳, 张文涛. 基于 RBF 神经网络的智能 PID 控制算法[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(1): 17—20.
ZENG Lin, ZHANG Wen-tao. Intelligent PID Control Based on RBF Neural Network[J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 39(1): 17—20.

[12] 田智慧, 张永胜, 王国平. 自动称量配料控制系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 140—144.
TIAN Zhi-hui, ZHANG Yong-sheng, WANG Guo-ping. Design of Automatic Weighing Batching Control System[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(1): 140—144.

[13] 高鹏, 周一届. 螺杆式粉料计量包装机粉料流动分析与数值仿真[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 79—82.
GAO Peng, ZHOU Yi-jie. Analysis and Numerical Simulation of Powder Flow in the Packaging Machine of Screw Powder[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 79—82.

[14] 卢君宜, 周丽红. 动态定量称重系统控制策略的研究[J]. 科技通报, 2017, 33(7): 77—80.
LU Jun-yi, ZHOU Li-hong. Study of Control Strategy for Dynamic Quantitative Weighing System[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(7): 77—80.

[15] 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.

[16] 常波, 阎有运, 梁硕. 基于模糊算法的配料称重控制策略研究与应用[J]. 电子测试, 2009(5): 1—5.
CHANG Bo, YAN You-yun, LIANG Shuo. Research and Application of Control Strategy of Ingredients Weighing Based on Fuzzy Algorithms[J]. Eiectronic Test, 2009(5): 1—5.

[17] 胡攀, 梁岚珍, 李靖. 动态定量称重系统控制策略的研究[J]. 自动化博览, 2009, 26(11): 78—80.
HU Pan, LIANG Lan-zhen, LI Jing. The Study of Control Strategy for Dynamic Quantitative Weighing System[J]. Automation Panorama, 2009, 26(11): 78—80.