

# 基于模糊内模的肥料包装机称量控制系统设计

罗启平, 李婷

(广西机电职业技术学院, 南宁 530007)

**摘要:** **目的** 为提高肥料包装计量精度, 设计一种肥料包装机控制系统。**方法** 建立肥料动态称量系统数学模型。结合模糊控制和内模控制理论的先进控制算法, 设计肥料包装计量精度控制系统。采用内模控制使PID控制器参数简化, 同时模糊控制的引入实现了控制参数的在线调整。利用肥料质量偏差及其变化率, 基于Mamdani二维模糊控制器实现内模控制参数 $\lambda$ 的自动调整。**结果** 实验结果表明, 在模糊内模PID控制下, 质量最大相对误差为1%; 质量绝对误差的平均值为0.2 kg; 控制算法超调量较小、具有很好的动静态性能; 系统称量误差大幅度减小。**结论** 所述控制方法和系统可以提高称量包装设备的效率和精度。

**关键词:** 肥料包装机; 称量; 内模控制; 模糊控制

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)21-0219-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.21.032

## Design of Weighing Control System of Fertilizer Packing Machine Based on Fuzzy Inner Mould

LUO Qi-ping, LI Ting

(Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to design a control system of fertilizer packaging machine to improve the precision of fertilizer packaging measurement. The mathematical model of dynamic weighing system of fertilizer was established. Combined with the advanced control algorithm of fuzzy control and internal model control theory, the precision control system of fertilizer packaging measurement was designed. The internal mode control was adopted to simplify the PID controller parameters, and the introduction of fuzzy control realized the on-line adjustment of controller parameters. Based on Mamdani two-dimensional fuzzy controller, fertilizer weight deviation and its change rate were used to realize automatic adjustment of internal model control parameters. The experimental results showed that the maximum relative error of weight was 1% under the control of fuzzy internal model PID. The average absolute error of weight was 0.2 kg. The control algorithm had small overshoot and good dynamic and static performance. The system weighing error was greatly reduced. The control method and system described can improve the efficiency and accuracy of weighing packaging equipment.

**KEY WORDS:** fertilizer packaging machine, weighing, internal model control, fuzzy control

目前, 农业用肥的种类越来越多, 肥料包装市场不断扩大, 绝大多数企业选择使用肥料包装机进行生产。所谓肥料包装机是包装机械的一种, 专用于有机

肥料的自动包装。肥料包装机由机械装置和控制系统2部分组成。其中, 机械装置为整个包装流程提供支撑, 包括: 传送系统、送料机、上料机、定量给料、

收稿日期: 2019-12-26

基金项目: 广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(KY2016YB647)

作者简介: 罗启平(1981—), 男, 硕士, 广西机电职业技术学院副教授、高级工程师, 主要研究方向为电气自动化。

称量单元、横封器、纵封器、打印单元等组成。控制系统则是包装机械正常运作的保证,包括:核心控制器、信号采集电路、人机交互界面、伺服电机等<sup>[1-2]</sup>。在整个包装流程中,定量称量至关重要。称量的准确性和效率将直接决定产品质量和成本<sup>[3-4]</sup>。考虑到称量包装系统具有强干扰、大滞后、非线性等特点,诸多学者将先进控制理论和技术应用到包装机械的定量称量中<sup>[5-8]</sup>。例如:常波等以工业玻璃配料为研究对象,采用模糊控制算法对称量速度进行控制,以期寻找精度和速度之间的最佳结合点,实验结果表明:控制效果比较理想<sup>[9]</sup>;胡攀等<sup>[10]</sup>基于BP神经网络改进了PID控制方法,以期解决动态定量称量系统参数不确定性、大滞后、随机干扰因素多等问题,同样取得了不错的控制效果。文中在现有研究的基础上,以肥料包装动态称量作为主要研究对象,提出一种模糊内模PID控制算法,旨在提高包装效率和精度。

# 1 肥料包装机系统

## 1.1 系统结构

肥料包装机控制系统结构见图1。从图1中可以看出,控制系统硬件主要包括:嵌入式控制模块、称量传感器、伺服电机驱动模块等。控制系统作用在于:肥料包装机的开启、关闭;各传感器开关控制以及信号采集;夹袋、蹲袋、送料等单元控制;封口器温度控制等,最终效果是协调各机械装置正常运转。

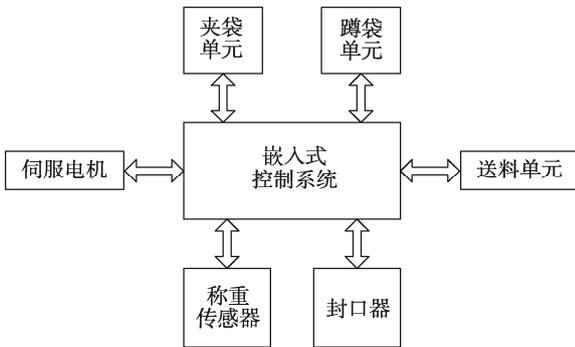


图1 肥料包装机控制系统

Fig.1 Control system of fertilizer packaging machine

如上所述,影响称量精度的关键因素包括电机和称量传感器控制。根据肥料包装要求,伺服电机需要具有比较高的运动精度。动态称量是肥料包装流程的核心,称量传感器的精准度和灵敏度在某种程度上直接影响系统性能。一般情况下,称量传感器由电阻应变计和弹性敏感元件组成,弹性敏感元件可将肥料压力转换为弹性应变值;电阻应变计则将应变值转换为电阻变化值。如此,便可以将肥料质量转换为可以测量的电信号。另外,除称量传感器外,称量装置还包括进料斗、称量斗、进料装置,通过控制进料装置的

阀门开启和关闭可实现称量过程控制。

## 1.2 动态称量数学模型

肥料动态称量过程可近似等效为一个二阶系统,见图2。该等效系统的数学表达式为:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) + g(t) \tag{1}$$

式中:  $m$  为称量斗质量;  $C$  为等效阻尼系数;  $k$  为弹性系数;  $f(t)$  为肥料质量;  $g(t)$  为称量过程冲击力;  $x(t)$  为称量斗相对位移。

称量过程冲击力往往受肥料下落速度和高度影响,文中采用3级给料方式,粗给料阶段该冲击力比较大,但是其对称量精度的影响不大。另外,冲击力带来的称量误差可通过控制系统自动调整来弥补,所以  $g(t)$  可以忽略不计。那么式(1)可简化为:

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) \tag{2}$$

式中:可以发现,如果称量斗质量  $m$  不变,该模型就是典型二阶时变非线性系统。对式(2)进行拉氏变换,可得传递函数:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \frac{1}{k} \times \frac{1}{\left( \frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_0} s + 1 \right)} \tag{3}$$

式中:  $\omega_0$  为自然频率,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ;  $\varepsilon$  为阻尼比,

$$\varepsilon = \frac{c}{2\sqrt{mk}}。$$

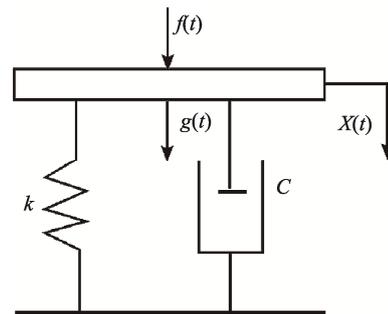


图2 肥料动态称量系统模型

Fig.2 Model of dynamic fertilizer weighing system

# 2 模糊内模PID控制器设计

## 2.1 内模PID控制算法

为提高肥料称量精度,文中设计了一种基于内模PID控制的称量控制方法。通常情况下,内模控制包括2部分,即内模控制器和被控对象数学模型<sup>[11-13]</sup>。被控对象数学模型前文已求出,内模控制器结构见图3。

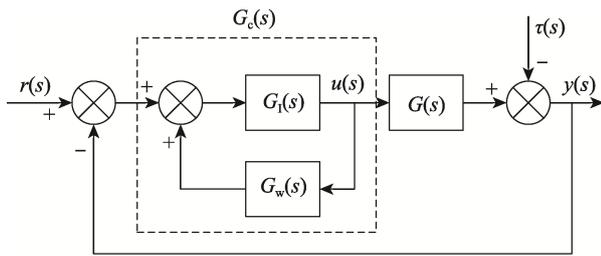


图 3 内模控制器结构

Fig.3 Structure of internal model controller

图 3 中  $r(s)$  为肥料质量设定值； $y(s)$  为肥料质量实际值； $u(s)$  为控制器输出量； $\tau(s)$  为系统外部扰动； $D(s)$  为系统扰动模型； $G(s)$  为被控对象模型； $G_1(s)$  为内膜控制器模型； $G_w(s)$  为过程模型。图 3 中所示的几种传递函数可以描述为：

$$G_c(s) = \frac{G_1(s)}{1 - G_1(s)G_w(s)} \quad (4)$$

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (5)$$

$$\frac{y(s)}{\tau(s)} = \frac{D(s)}{1 + G_c(s)G(s)} \quad (6)$$

内模系统的传递函数可以描述为：

$$y(s) = \frac{G_1(s)G(s)}{1 + G_1(s)[G(s) - G_w(s)]} r(s) + \frac{1 - G_1(s)G_w(s)}{1 + G_1(s)[G(s) - G_w(s)]} \tau(s) \quad (7)$$

通常情况下，内模控制器<sup>[14-16]</sup>的设计步骤如下所述。

首先，将过程模型  $G_w(s) = G'(s)$  分解成 2 部分，即： $G'(s) = G'_+(s)G'_-(s)$ 。其中， $G'_+(s) = 1$  为全通部分，有零或极点位于  $s$  右半平面的部分； $G'_-(s)$  为最小相位部分，所有开环零、极点都位于  $s$  面左半部分。

然后，设计内模控制器  $G_{IMC}(s)$ ，文中使用滤波器  $1/(\lambda s + 1)^r$ ，那么内模控制器可表示为：

$$G_{IMC}(s) = \frac{G'^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r} \quad (8)$$

式中： $\lambda$  为可调参数； $r$  为  $G'^{-1}(s)$  相对阶次。

图 3 中虚线框圈出的部分表示等效控制器，综上所述可得：

$$G_c(s) = \frac{G'^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - G'_+(s)} \quad (9)$$

另外，PID 控制器可描述为：

$$C(s) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (10)$$

如果把  $C(s)$  表示成  $C(s) = f(s)/s$  的形式，结合式 (9) 则有：

$$f(s) = \frac{sG'^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^r - G'_+(s)} \quad (11)$$

将式 (11) 使用泰勒级数展开，即：

$$C(s) = \frac{1}{s} \left( f(0) + f'(0)s + \frac{f''(0)}{2}s^2 + \dots \right) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s + \dots \right) \quad (12)$$

对比式 (10) 和式 (12) 可以得到： $K = f'(0)$ ， $T_i = f'(0)/f(0)$ ， $T_d = f''(0)/(2f'(0))$ 。进一步将  $C(s)$  写成  $C(s) = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s$ ，那么则有： $k_p = f'(0)$ ， $k_i = f(0)$ ， $k_d = f''(0)/2$ 。这样就可以将 PID 控制的各个系数明确表示出来。

## 2.2 模糊控制器

为实现前文所述滤波器参数  $\lambda$  的在线调节，文中根据肥料质量偏差  $e$  及其变化率  $e_c$ ，基于 Mamdan 二维模糊控制器，利用模糊控制规则实现参数  $\lambda$  的自动调整。模糊控制器结构见图 4。

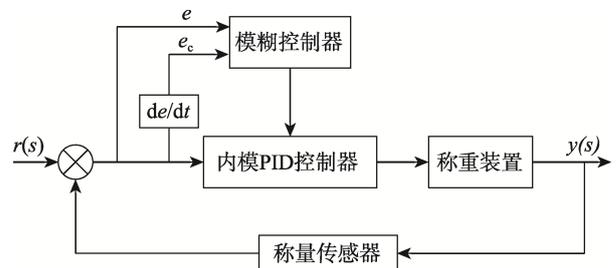


图 4 模糊控制器

Fig.4 Fuzzy controller

根据模糊控制原理，模糊控制器的输入变量和输出的模糊论域范围均设定为  $[-6, 6]$ ；与之相对应的语言论域均设定为  $[NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB]$ ；隶属度函数选用对称三角函数。模糊规则确定依据可描述为： $\lambda$  值变大，系统响应速度加快，这样有利于减小扰动影响；但是  $\lambda$  值过大容易导致系统振荡，超调量变大； $\lambda$  值变小，系统超调量减少，但是系统动态性能和稳态精度并不理想。

控制器输出解模糊化可采用面积重心法，即：

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_c(u_j) \cdot u_j}{\sum_{j=1}^n \mu_c(u_j)} \quad (13)$$

式中： $\mu_c$  为隶属度； $u_j$  为输出  $u$  的第  $j$  个分量。

### 3 仿真和实验研究

#### 3.1 仿真

根据上述分析可以发现,称量控制系统存在比较明显的滞后性和非线性,称量过程可近似看作二阶系统。为验证所述模糊内模 PID 控制算法在肥料称量包装控制系统中的有效性,文中首先进行仿真分析并以内模 PID 控制和传统 PID 控制作为对比,仿真结果见图 5。

从仿真结果可知:与传统 PID 控制、内模 PID 控制相比,所述模糊内模 PID 控制具有更加优秀的性能指标,即响应速度快,超调量比较小,调节时间更短,系统稳态误差更小等。

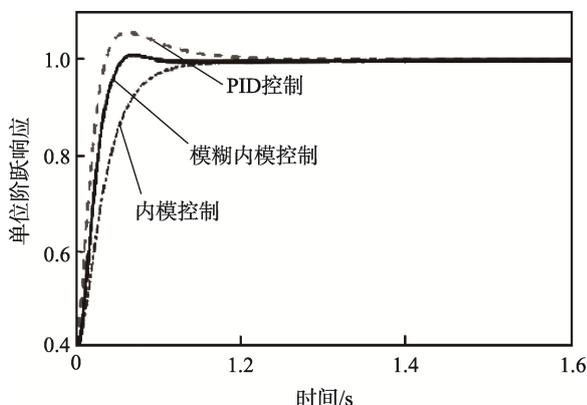


图 5 仿真结果  
Fig.5 Simulation result

#### 3.2 实验

为进一步验证所述肥料包装控制系统的性能,文中进行了相关实验测试。以现有肥料包装平台为基础,伺服电机驱动器型号为 HSV1 系列,额定输出功率为 1.5 kW;称量传感器型号为 F2806,其量程范围为 1~200 kg;核心控制器选用 STM32 系列;上位机为 PC 机。搭建包装称量控制系统并移植到肥料包装平台。以传统 PID 控制和文中所述控制方法作为对比对象,分别测量其包装精度。包装质量设定值为每袋 50 kg,实验结果见表 1 和表 2。

由表 1 可知,传统 PID 控制下,质量最大相对误差为 3.6%,质量绝对误差的平均值为 0.79 kg,控制效果并不理想。

由表 2 可知,在模糊内模 PID 控制下,质量最大相对误差为 1%;质量绝对误差的平均值为 0.2 kg;控制效果明显改善。数据对比表明:采用所述肥料包装控制系统,称量不确定度大幅度降低,相对误差较小,可以满足肥料包装控制要求。说明所述控制方法具有比较好的抗干扰性能、准确性。在具体实验过程中,称量效率明显提高,实际包装速度可以达到 1200 包/h,大大提高了整个系统的工作效率。

表 1 PID 控制下实验结果  
Tab.1 Experimental results under PID control

序号	测量值	序号	测量值
1	50.5	11	50.2
2	50.8	12	49.3
3	50.3	13	49.5
4	49.2	14	50.2
5	49	15	49.0
6	48.8	16	50.7
7	50.3	17	51.0
8	50.6	18	50.9
9	49.1	19	49.1
10	48.2	20	48.5

表 2 模糊内模 PID 控制下实验结果  
Tab.2 Experimental results under fuzzy internal model PID control

序号	测量值	序号	测量值
1	50.2	11	50.2
2	50.3	12	49.7
3	50.1	13	49.6
4	49.9	14	50.2
5	50	15	50.0
6	49.8	16	50.2
7	50.1	17	50.0
8	50.3	18	50.1
9	49.8	19	49.9
10	49.5	20	49.5

### 4 结语

以肥料包装称量控制为研究对象,重点讨论了如何提高称量精度。建立了称量过程数学模型,同时提出了一种模糊内模 PID 控制器,所述控制方法具有比较理想的抗干扰能力。实验结果表明:与传统 PID 控制相比,模糊内模 PID 控制的称量精准度明显提高,可满足肥料包装控制要求。基于模糊内模的肥料包装机控制系统具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘占跃. 化肥自动定量包装的 PLC 控制[J]. 化学工程与装备, 2012(3): 48—50.  
LIU Zhan-yue. PLC Control of Fertilizers Automatic Weighing and Quantitative Packing[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2012(3): 48—50.
- [2] 邱永萍, 孙绪伟, 朱雪峰. 基于嵌入式 ARM 的肥料包装机控制系统研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 90—94.

- QIU Yong-ping, SUN Xu-wei, ZHU Xue-feng. Research on Control System of Fertilizer Packaging Machine Based on Embedded ARM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 90—94.
- [3] 吴宇平, 章家岩, 章磊, 等. 定量称量包装系统 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, 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, 31(3): 299—302.
- [4] 盛碧琦, 胡云琴, 应忠于. 基于 AVR 单片机的定量称量系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(5): 59—61.
- SHENG Bi-qi, HU Yun-qin, YING Zhong-yu. The Weighing System Design Based on AVR Microcontroller[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2015(5): 59—61.
- [5] 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—112.
- ZHANG Jun, LI Ming. Application of Quantitative Packaging Machine Based on PLC Fuzzy Controller[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(5): 110—112.
- [6] 赵国军, 李忠虎, 张祥. 粉状稀土原料定量称量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.
- [7] 伍凌川, 李全俊, 黄权. 动态称量技术在发射药称量过程中的应用[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.
- [8] 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.
- [9] 常波, 阎有运, 梁硕. 基于模糊算法的配料称量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]. Electronic Test, 2009(5): 1—5.
- [10] 胡攀, 梁岚珍, 李靖. 动态定量称量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.
- [11] 李明辉, 杨星奎, 云卫涛, 等. 基于模糊内模控制的汽轮机调速系统研究[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(3): 172—174.
- LI Ming-hui, YANG Xing-kui, YUN Wei-tao, et al. Research on Steam Turbine Governing System Based on Fuzzy Internal Model Control[J]. Turbine Technology, 2018, 60(3): 172—174.
- [12] 覃羨烘. 基于模糊内模-PID 的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 166—171.
- QIN Xian-hong. Temperature Control of Hot Sealing Cutter of Packaging Machine Based on Fuzzy Internal Model -PID[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 166—171.
- [13] 赵伟, 孙建平. 基于内模控制的 PID 控制器的设计与仿真[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(9): 55—56.
- ZHAO Wei, SUN Jian-ping. Design and Simulation of PID Controller Based on Internal Model Control[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(9): 55—56.
- [14] 翟奕博, 刘锁清, 李军红. 模糊内模 PID 控制在湿法脱硫系统中的应用[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(11): 45—49.
- ZHAI Yi-bo, LIU Suo-qing, LI Jun-hong. Application of Fuzzy Internal Model PID Control in Wet Desulfurization System[J]. Automation and Instrument, 2017, 32(11): 45—49.
- [15] 李若茜, 凌智, 李东海, 等. IMC-PID 控制器在轧机液压自动位置控制系统中的应用[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 106—109.
- LI Ruo-xi, LING Zhi, LI Dong-hai, et al. Application of IMC-PID Controller in Hydraulic Automatic Position Control System of Rolling Mill[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2017, 45(7): 106—109.
- [16] 曹晓玲, 尹二新, 刘锁清. 二阶时滞工业系统的自调整模糊内模 PID 控制[J]. 工业控制与应用, 2015, 34(4): 24—28.
- CAO Xiao-ling, YIN Er-xin, LIU Suo-qing. Design of Fuzzy Internal Model PID Controller for the Second-order Industrial Systems with Time Delay[J]. Industry Control and Applications, 2015, 34(4): 24—28.