

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80459

# 气动执行机构在食品分拣机械中的精准定位与误差补偿模型

王建祖

(天水凿岩机械气动工具研究所, 甘肃 天水 741020)

**摘要:** [目的] 研究气动执行机构在食品分拣机械中的精准定位与误差补偿模型, 提高定位精度和动态响应。[方法] 分析气缸直径、位置传感器分辨率、摩擦力等因素对定位精度的影响, 提出一种基于 Stribeck 摩擦模型的修正方法, 并采用 ARIMA 模型进行气压波动预测补偿。结合模糊 PID 自整定算法和双闭环控制架构优化控制策略。[结果] 通过数字孪生平台验证, 负载突变时最大跟踪误差从 0.38 mm 降至 0.05 mm, 稳定时间减少至 0.48 s。连续 24 h 试验中, 定位误差标准差在  $\pm 0.03$  mm 以内。在工业验证阶段, 定位时间从 120 ms 减少至 85 ms, 废品率降至 0.15%。[结论] 试验模型可显著提高食品分拣机械的定位精度、动态响应和稳定性。

**关键词:** 气动执行机构; 食品分拣机械; 精准定位; 误差补偿

## Modeling of precise positioning and error compensation of pneumatic actuators in food sorting machinery

WANG Jianzu

(Tianshui Institute of Rock Drilling Machine &amp; Pneumatic Tools, Tianshui, Gansu 741020, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the accurate positioning and error compensation model of pneumatic actuators in food sorting machinery, and to improve positioning accuracy and dynamic response. [Methods] The effects of cylinder diameter, position sensor resolution, and friction force on positioning accuracy were analyzed. A correction method based on the Stribeck friction model was proposed, and the ARIMA model was employed to predict and compensate for pressure fluctuations. The control strategy was optimized by integrating a fuzzy PID self-tuning algorithm with a dual closed-loop control architecture. [Results] Validated through a digital twin platform, the maximum tracking error under sudden load changes was reduced from 0.38 mm to 0.05 mm, and the stabilization time was shortened to 0.48 s. In a continuous 24-hour experiment, the standard deviation of the positioning error remained within  $\pm 0.03$  mm. During industrial validation, the positioning time was reduced from 120 ms to 85 ms, and the defect rate dropped to 0.15%. [Conclusion] The proposed model significantly improves the positioning accuracy, dynamic response, and stability of food sorting machinery.

**Keywords:** pneumatic actuator; food sorting machinery; precise positioning; error compensation

随着自动化和智能化技术的迅速发展, 食品分拣系统中的精确控制成为提高分拣效率和质量的关键因素。气动执行机构作为常见的驱动方式之一, 被广泛应用于食品分拣机械中。然而, 气动执行机构由于其控制精度和运动特性, 常常存在定位误差问题, 直接影响分拣机械的准确性和稳定性。崔崑等<sup>[1]</sup>提出的改进 4-3-3-4 插值法

通过优化机器人轨迹规划, 减少了机器人的运动时间和能耗, 提高了控制精度, 并有效降低了分拣误差, 提高了分拣成功率。侯义锋等<sup>[2]</sup>设计了一种基于机器视觉的砂糖橘分拣机器人, 采用视觉识别技术精确识别和分拣果实, 大大提高了分拣的准确性和效率。

随着工业机器人定位误差补偿技术的不断进步, 梁

通信作者: 王建祖 (1969—), 男, 天水凿岩机械气动工具研究所高级工程师, 硕士。E-mail: wangjz1969@163.com

收稿日期: 2025-05-19 改回日期: 2025-07-02

引用格式: 王建祖. 气动执行机构在食品分拣机械中的精准定位与误差补偿模型[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 86-94.

Citation: WANG Jianzu. Modeling of precise positioning and error compensation of pneumatic actuators in food sorting machinery[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 86-94.

春苗等<sup>[3]</sup>综述了机器人定位误差的控制方法及其研究进展,为气动执行机构的误差补偿提供了更多的技术路径。潘海鸿等<sup>[4]</sup>提出了一种超精密抛光机床的定位误差补偿模型,基于 Spline 与 GLS 的结合,其不仅提高了定位精度,也为相关领域的误差补偿方法提供了启示。在气动执行机构的食品分拣应用中,精准定位与误差补偿需融合多感知与机器视觉技术。郭联金<sup>[5]</sup>设计的柔性分拣系统通过视觉模块和压力检测实现了 0.3 mm 的定位精度,但未深入分析气动动态特性;王华<sup>[6]</sup>采用棋盘格标定和气压控制将机械手抓取误差降至 3 mm,但果蔬分拣场景需更高精度;王成军等<sup>[7]</sup>指出机器视觉与气压控制的闭环反馈是补偿气压波动偏差的关键。综上,通过结合多种技术手段,如视觉引导、误差补偿算法及深度学习等方法,能够有效提升气动执行机构在食品分拣机械中的定位精度,进而提高分拣效率和稳定性。

目前,现有的研究方法还存在一些不足。例如,视觉引导技术虽在静态环境中表现出色,但在复杂或动态环境下,其识别精度受到光照变化、物体表面反射特性等因素的影响,可能导致定位误差。而误差补偿算法通常假设系统参数在一定范围内是稳定的,然而在长期运行中,气动执行系统的摩擦力、气压波动等因素可能发生变化,影响补偿效果。此外,深度学习虽在许多应用中表现出色,但需要大量的训练数据,训练过程较为复杂,且可能不适应一些低成本或资源有限的工业场景。

研究拟提出一种结合 Stribeck 摩擦模型<sup>[8]</sup>、ARIMA 气压波动预测<sup>[9]</sup>以及热膨胀补偿机制<sup>[10]</sup>的多维误差补偿策略。引入模糊 PID 自整定算法和双闭环控制架构,进一步优化控制策略,使得系统在面对突变负载和长时间运行的情况下,仍能保持高精度和高稳定性。旨在为气动执行机构定位与误差补偿研究框架的完善提供依据。

## 1 气动定位系统建模与误差溯源

### 1.1 气动执行机构结构

食品分拣机械中气动执行机构的典型结构如图 1 所示,其核心组件包括执行气缸、高速电磁阀组、位置传感系统和系统控制器。

执行气缸采用 ISO15552 标准双作用直线气缸,活塞杆端部集成食品级聚氨酯缓冲垫。气缸两腔通过对称布局的进/排气回路与电磁阀组连接,气路中设置精密减压阀(精度 ±20 kPa)及流量调节器(调节范围 0.05~10.00 L/min)。高速电磁阀组配置两位五通先导式电磁阀(响应时间 ≤8 ms),采用 PWM 调制驱动方式(载波频率 5 kHz)。阀组通过 CAN 总线与控制器实现实时通信,总线刷新周期 ≤1 ms。位置传感系统在活塞杆侧向安装磁致伸缩线性位移传感器(分辨率 0.5 μm,重复精度 ±1 μm),输出信号经 24 位 AD 转换模块处理后输入

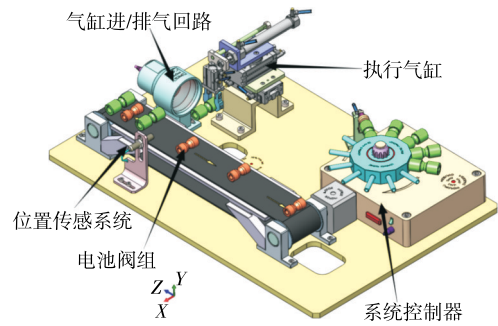


图 1 系统拓扑图

Figure 1 System topology diagram

PLC。传感器防护等级达 IP67,满足食品加工环境要求。系统控制器根据目标位置指令,通过 PID 算法计算电磁阀开度→阀芯位移改变气流通路→气缸腔室压力变化驱动活塞运动→位置传感器实时反馈位移量→形成闭环控制回路。

### 1.2 运动学与动力学建模

基于图 2 所示系统拓扑,建立执行机构的简化力学模型,并推导其核心方程。

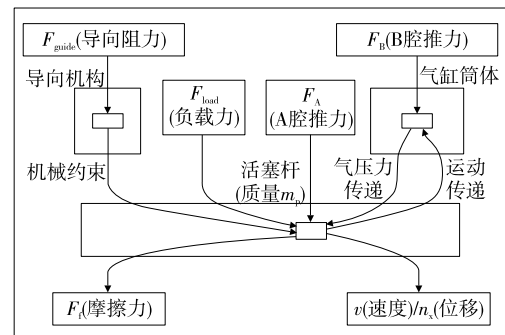


图 2 气动执行机构简化力学模型

Figure 2 Simplified mechanical model of pneumatic actuator

气动执行机构的运动形式为直线往复运动。设活塞杆位移为  $x$ (以中位为零点,向 A 腔运动为正方向),其运动速度  $v = \dot{x}$ ,加速度  $a = \ddot{x}$ 。末端执行器(如吸盘、推杆)的位置由  $x$  直接确定。运动学关系相对简单,可表示为:

$$P_{\text{end-effector}} = x \cdot \hat{d}, \quad (1)$$

式中:

$P_{\text{end-effector}}$ ——末端执行器在运动方向上的位置向量;

$\hat{d}$ ——该方向的单位向量。

活塞杆及负载的总质量为  $m_{\text{total}} = m_p + m_{\text{load}}$ 。作用于活塞杆轴线方向上的合力驱动其运动。根据牛顿第二定律:

$$m_{\text{total}} \ddot{x} = F_{\text{net}}, \quad (2)$$

$$F_{\text{net}} = F_A - F_B - F_f(v) - F_{\text{load}} - F_{\text{guide}}, \quad (3)$$

式中:

- $F_{\text{net}}$ ——活塞杆轴线方向的合外力, N;
- $F_A = P_A \cdot A_A$ ——A 腔气体压力产生的推力, N;
- $F_B = P_B \cdot A_B$ ——B 腔气体压力产生的推力, N;
- $F_f(v)$ ——摩擦力, N;
- $F_{\text{load}}$ ——外部负载力(包括物料重力、惯性力、接触力等, 方向与运动方向相反时为正), N;

$F_{\text{guide}}$ ——导向机构产生的等效摩擦阻力或侧向力引起的阻力矩在运动方向的分量, N。

因此, 完整的动力学方程为:

$$m_{\text{total}} \ddot{x} = P_A A_A - P_B A_B - F_f(v) - F_{\text{load}} - F_{\text{guide}} \quad (4)$$

该方程揭示了定位精度的根本挑战: 目标位移  $x$  是由腔室压力  $P_A$ 、 $P_B$  通过克服摩擦力  $F_f(v)$ 、负载力  $F_{\text{load}}$ 、导向阻力  $F_{\text{guide}}$  并驱动质量  $m_{\text{total}}$  加速/减速来实现的。任何影响这些力或压力精确生成、传递和控制的因素, 均将直接导致位移误差  $\delta x$ 。

腔室压力  $P_A$ 、 $P_B$  并非独立变量, 其由气体流入/流出腔室的流量、腔室体积变化以及气体的可压缩性共同决定。根据质量守恒定律和理想气体状态方程(假设等温过程):

A 腔压力变化率:

$$\dot{P}_A = \frac{\kappa R T}{V_A(x)} (\dot{m}_{A,\text{in}} - \dot{m}_{A,\text{out}}) - \frac{\kappa P_A}{V_A(x)} \dot{V}_A(x), \quad (5)$$

式中:

- $\kappa$ ——比热比, 空气比热比约为 1.4;
- $R$ ——气体常数, 空气气体常数为 287 J/(kg·K);
- $T$ ——气体温度, K;
- $V_A(x)$ ——A 腔体积(随位移  $x$  变化,  $V_A(x) = V_{A0} + A_A x$ ,  $V_{A0}$  为死区体积),  $\text{m}^3$ ;

$\dot{m}_{A,\text{in}}$ ,  $\dot{m}_{A,\text{out}}$ ——流入/流出 A 腔的质量流量(由电磁阀开度、上下游压力差决定),  $\text{kg/s}$ ;

$\dot{V}_A(x) = A_A v$ ——A 腔体积变化率,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

B 腔压力变化率:

$$\dot{P}_B = \frac{\kappa R T}{V_B(x)} (\dot{m}_{B,\text{in}} - \dot{m}_{B,\text{out}}) + \frac{\kappa P_B}{V_B(x)} A_B v \quad (6)$$

该模型描述了气压建立和变化的动态过程。电磁阀的控制信号首先影响质量流量, 进而影响腔室压力, 最终通过动力学方程影响位移。该链路的动态响应以及阀的非线性流量特性, 是制约系统响应速度和定位精度的核心内在因素。精确的压力控制和快速的压力响应是实现高精度定位的关键前提。

### 1.3 关键参数影响机理

(1) 气缸直径的力学约束: 气缸理论输出力由式(7)确定。

$$F = \frac{\pi D^2}{4} P \eta - F_f, \quad (7)$$

式中:

- $F$ ——气缸的理论输出力, N;
- $D$ ——缸径, mm;
- $P$ ——工作压力, MPa;
- $\eta$ ——机械效率;
- $F_f$ ——摩擦力, N。

(2) 位置传感器分辨率的控制精度限: 传感器分辨率  $\Delta x$  与控制系统定位精度存在以下关系:

$$\delta_{\text{min}} = \sqrt{(2\Delta x)^2 + \left(\frac{v_{\text{max}}}{K_v}\right)^2}, \quad (8)$$

式中:

- $\delta_{\text{min}}$ ——位置传感器分辨率的控制精度下限, mm;
- $v_{\text{max}}$ ——最大运动速度, mm/s;
- $K_v$ ——速度误差系数。

当采用 0.5  $\mu\text{m}$  分辨率传感器时, 在  $v_{\text{max}} = 500 \text{ mm/s}$  工况下, 理论定位精度  $\delta_{\text{min}}$  可达  $\pm 2.1 \mu\text{m}$ 。但实际应用中需考虑信号传输延迟( $\leq 0.1 \text{ ms}$ )及电磁干扰引起的噪声。

### 1.4 动态误差传递机理

(1) 非线性摩擦力的 Stribeck 模型修正: 摩擦力是影响气动执行机构精度的关键因素之一。在气动系统中, 摩擦力通常是非线性的, 特别是在低速运动的情况下。为了准确地建模摩擦现象, 通常采用 Stribeck 效应模型。Stribeck 模型能够有效地描述摩擦力随相对速度变化的过渡过程。其修正后的摩擦力为:

$$F_f(v) = F_s + (F_d - F_s) \cdot e^{-\frac{|v|}{v_s}}, \quad (9)$$

式中:

- $F_f(v)$ ——摩擦力(随相对速度  $v$  变化), N;
- $F_s$ ——静摩擦力(速度为 0 时的摩擦力), N;
- $F_d$ ——动摩擦力(速度较高时的摩擦力), N;
- $v$ ——相对速度(执行机构的运动速度), m/s;
- $v_s$ ——Stribeck 速度常数, m/s。

$v_s$  用于描述摩擦力从静摩擦力过渡到动摩擦力的速度<sup>[11]</sup>。该模型能够很好地模拟气动执行机构在低速运动时摩擦力的非线性过渡, 尤其是在起动和停止过程中, 摩擦力会随相对速度变化而迅速变化。因此, 摩擦力的精确建模对于优化气动执行机构的控制系统至关重要。

(2) 气体可压缩性导致的压力迟滞方程: 气动系统的工作介质通常为空气, 空气具有可压缩性, 这意味着气体在压力变化时表现出一定的迟滞现象。气体的压缩性会导致气缸腔内压力的变化滞后于气流的变化, 进而影响定位精度和响应速度<sup>[12]</sup>。为了解决该问题, 使用式(10)来描述压力迟滞。

$$\Delta P = k \cdot (\dot{V} - V_{\text{desired}}), \quad (10)$$

式中:

$\Delta P$ ——气缸腔内的压力差(实际压力与理想压力的差值),Pa;

$k$ ——气体的弹性系数(与气体的温度、密度和气缸体积等因素有关), $(\text{Pa}\cdot\text{s})/\text{m}^3$ ;

$\dot{V}$ ——气流的体积流量(气体在单位时间内的流动量), $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$V_{\text{desired}}$ ——期望的体积流量(理想情况下所需的气流量), $\text{m}^3/\text{s}$ 。

通过对气体可压缩性所引起的压力迟滞现象进行建模,可以有效预测系统在压力变化过程中的滞后效应,从而帮助调整控制策略,减少系统响应的滞后,提升系统的精度和稳定性。

(3) 热膨胀对导向机构的影响量化分析:在实际工作中,气动执行机构的导向机构通常由金属材料构成,这些材料在温度变化时会发生热膨胀。热膨胀导致的尺寸变化会直接影响定位精度,尤其是在高温环境下,误差会显著增加<sup>[13]</sup>。因此,需要对热膨胀效应进行量化分析,以评估其对系统精度的影响。热膨胀引起的尺寸变化可以通过式(11)计算。

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (11)$$

式中:

$\Delta L$ ——尺寸变化(因温度变化而导致的长度差),m;

$L_0$ ——原始长度(导向机构的初始长度),m;

$\alpha$ ——材料的线性热膨胀系数(材料每升高1℃温度时长度的变化量), $^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$\Delta T$ ——温度变化(系统工作过程中温度变化的幅度), $^\circ\text{C}$ 。

### 1.5 误差敏感度排序

Sobol方法是一种基于方差分解的全局灵敏度分析方法,能够将模型输出的不确定性分解为各个输入参数的不确定性贡献,从而定量评估各参数对模型输出的影响。Sobol方法的核心思想是通过输出方差的分解来计算每个输入变量的主效应和交互效应。假设有一个多输入单输出的模型:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (12)$$

式中:

$x_1, x_2, \dots, x_n$ ——模型的输入参数;

$y$ ——输出结果(即误差)。

通过方差分解来计算输出的总方差:

$$\text{Var}(y) = \mathbb{E}[y^2] - (\mathbb{E}[y])^2. \quad (13)$$

然后,使用Sobol方法将方差分解为各个输入参数的主效应(单一因素对输出方差的贡献)和交互效应(不同输入之间的交互对输出方差的贡献)。

步骤1:主效应 $S_i$ 代表单个输入变量 $x_i$ 对输出方差的贡献,其计算式为

$$S_i = \frac{\text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y)}, \quad (14)$$

式中:

$y_i$ ——当输入 $x_i$ 变化时,输出 $y$ 的方差。

步骤2:交互效应代表两个输入变量 $x_i$ 和 $x_j$ 之间的交互对输出方差的贡献,其计算式为

$$S_{ij} = \frac{\text{Var}(y_{ij})}{\text{Var}(y)} - S_i - S_j, \quad (15)$$

式中:

$y_{ij}$ ——输入 $x_i$ 和 $x_j$ 共同变化时输出 $y$ 的方差。

步骤3:总效应 $S_{\text{total}}$ 表示所有输入变量的总效应,包括单独和交互作用的影响:

$$S_{\text{total}} = \frac{\text{Var}(y_{\text{total}})}{\text{Var}(y)}, \quad (16)$$

通过Sobol全局灵敏度分析,得出各参数对气动定位系统误差的影响程度排序:

(1) 供气压力:供气压力对气动执行系统的影响最大,特别是在气流速度和气缸压力的变化过程中,供气压力的波动会直接影响执行机构的运动轨迹和位置。根据Sobol分析,供气压力的主效应和交互效应在总方差中的比重最大。

(2) 环境温度:环境温度对定位精度的影响较为显著。温度变化不仅会导致热膨胀效应引起的尺寸变化,还会影响气体的物理属性(如气体密度),进而影响气流和压力。因此,环境温度是影响气动定位系统误差的重要因素。

(3) 负载质量:负载质量影响气动系统的惯性特性。负载质量越大,执行机构需要提供的力越大,进而影响加速度和响应速度。如果负载质量变化过大,气动系统的响应精度将显著降低。

(4) 摩擦系数:摩擦系数主要影响摩擦力的大小,摩擦力的变化通常是随着速度的变化而变化。虽然摩擦力在低速运动时对误差影响较大,但其对整体误差的贡献相对较小,通常排在最后。

## 2 误差补偿模型构建

### 2.1 前馈补偿模块设计

2.1.1 基于LuGre摩擦模型的预补偿器 摩擦是气动执行机构定位精度的一个重要因素。在低速和启动过程中,摩擦力的非线性行为尤其显著<sup>[14]</sup>。为了准确建模和补偿摩擦力,LuGre摩擦模型被广泛应用于气动系统中。该模型通过描述摩擦力的滑移速度依赖性,能够有效地补偿摩擦力引起的误差。LuGre摩擦模型基本式为:

$$F_f = \sigma \cdot z + (\lambda \cdot \dot{z} + F_s) \cdot \text{sgn}(v), \quad (17)$$

式中:

$F_f$ ——摩擦力, N;  
 $\sigma$ ——摩擦层的刚度系数, (N·s)/m;  
 $z$ ——摩擦层的变形量(随相对速度的变化而变化), m;  
 $\lambda$ ——摩擦层的阻尼系数, (N·s)/m;  
 $F_s$ ——静摩擦力, N;  
 $\dot{z}$ ——摩擦层的变形速度, m/s;  
 $\text{sgn}(v)$ ——速度的符号函数(表示摩擦方向)。

在设计前馈补偿器时,可以基于 LuGre 模型来预测并补偿摩擦力的变化。具体来说,可以通过监测执行机构的相对速度  $v$  基于 LuGre 模型实时估计摩擦力  $F_f$ , 并通过前馈补偿进行调整,使系统能够在摩擦力影响较大时仍保持精确定位。前馈补偿器的控制式可以表示为:

$$u_{\text{feedforward}} = -K \cdot F_f, \quad (18)$$

式中:

$u_{\text{feedforward}}$ ——前馈补偿控制信号;  
 $K$ ——补偿增益系数(调整补偿量的大小);  
 $F_f$ ——由 LuGre 摩擦模型计算得到的摩擦力。

2.1.2 气压波动预测模型 气动系统的定位精度受气压波动的影响较大,尤其是在系统负载发生突变时,气压波动的影响尤为明显<sup>[15]</sup>。为了减少这种影响,使用 ARIMA (自回归积分滑动平均)模型进行气压波动的预测和补偿。

ARIMA 模型是一种经典的时间序列预测方法,被广泛应用于对具有季节性或趋势性的气压波动进行建模和预测。ARIMA 模型通过自回归(AR)项、差分(I)项和滑动平均(MA)项来描述时间序列数据的变化特性。ARIMA 模型的数学表达式为

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 e_{t-1} + \theta_2 e_{t-2} + \dots + \theta_q e_{t-q} + e_t, \quad (19)$$

式中:

$y_t$ ——时刻  $t$  的气压值, Pa;  
 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ ——AR 项的系数(描述气压与过去值之间的关系);  
 $e_t$ ——误差项(残差,表示预测与实际气压值之间的差异);  
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ ——MA 项的系数(描述误差项与过去误差之间的关系)。

ARIMA 模型的关键步骤包括:

时间序列分析:通过历史数据分析气压波动的趋势和季节性,选择适当的 AR、I、MA 项。

模型拟合:使用历史数据拟合 ARIMA 模型,并估计各参数  $\phi_1, \phi_2, \dots, \theta_q$ 。

预测与补偿:根据拟合的 ARIMA 模型,预测未来一段时间内的气压波动,并在控制系统中进行补偿。

为了减少气压波动对定位精度的影响,将 ARIMA 模型的输出(即预测的气压波动)输入到前馈补偿控制器中,进行实时补偿。补偿式为

$$u_{\text{pressure}} = -K_{\text{pressure}} \cdot (P_{\text{predicted}} - P_{\text{actual}}), \quad (20)$$

式中:

$u_{\text{pressure}}$ ——基于气压波动的补偿控制信号;  
 $K_{\text{pressure}}$ ——补偿增益系数;  
 $P_{\text{predicted}}$ ——通过 ARIMA 模型预测的气压值, Pa;  
 $P_{\text{actual}}$ ——当前时刻的实际气压值, Pa。

## 2.2 反馈控制策略优化

2.2.1 模糊 PID 参数自整定算法 PID 控制器是气动执行系统中最常用的控制策略之一,其结构简单且易于实现,但其控制效果受参数调节的影响较大。传统 PID 控制器的参数(比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  和微分系数  $K_d$ )一般是通过经验或者试验方法进行调节,该方法可能需要大量的时间和试验数据。因此,采用模糊 PID 参数自整定算法,动态调整 PID 控制器的参数,以适应系统的变化,达到更优的控制效果。

模糊 PID 参数自整定算法的核心思想是通过模糊控制规则,根据系统的当前误差和误差变化率,自动调整 PID 参数。模糊 PID 控制器的基本框架包括:

输入变量:系统的当前误差  $e(t)$  和误差变化率  $\Delta e(t)$ 。

输出变量:PID 控制器的比例系数  $K_p$ 、积分系数  $K_i$  和微分系数  $K_d$ 。

(1) 模糊控制器的设计步骤:

误差  $e(t)$  和误差变化率  $\Delta e(t)$  的取值范围通常通过试验确定。例如,误差  $e(t)$  可以取值为负大(NB)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正大(PB)。

误差变化率  $\Delta e(t)$  的取值范围也是如此。

构造模糊控制规则:使用模糊规则基来关联误差和误差变化率与 PID 参数。一个常见的模糊控制规则可以如下定义:

$$\text{If } e(t) \text{ is NB and } \Delta e(t) \text{ is NB, then } K_p \text{ is PB.} \quad (21)$$

当误差为负大且误差变化率为负大时,比例增益  $K_p$  应取较大的正值。

(2) 模糊化和去模糊化步骤:

模糊化:将实际的误差和误差变化率值映射到模糊集合中。

去模糊化:根据模糊控制规则计算出模糊集合的中心值,然后将其映射回 PID 参数的具体数值。

调整 PID 参数:根据模糊控制器输出的 PID 参数,动态调整控制器的  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ ,以适应不同的系统状态,优化控制效果。

模糊 PID 自整定算法可以根据系统的实时误差和误差变化,自动调整控制参数,从而实现更精准的控制,提

高系统的动态响应性和稳定性。

**2.2.2 双闭环控制架构** 为了进一步提高气动执行系统的精度和响应速度,采用双闭环控制架构,即位置环和压力环。在气动系统中,位置控制和压力控制是两个重要的控制目标,其分别影响系统的定位精度和动态响应。

双闭环控制架构的基本框架:

位置环:负责控制气动执行机构的位置,确保其达到期望的位置值。

压力环:负责控制气缸腔内的压力,确保压力变化对执行机构的影响最小化。

在双闭环控制架构中,位置控制和压力控制是相互独立的闭环控制系统,但它们通过控制信号的相互作用来优化整个系统的性能。

位置环控制的目标是控制执行机构的位置 $x(t)$ ,使其达到目标位置 $x_{\text{desired}}(t)$ 。位置环控制器通常使用PID控制策略,其基本控制方程为

$$u_{\text{position}} = K_p \cdot e_{\text{position}} + K_i \cdot \int e_{\text{position}}(t) dt + K_d \cdot \frac{de_{\text{position}}(t)}{dt}, \quad (22)$$

式中:

$e_{\text{position}}(t) = x_{\text{desired}}(t) - x(t)$ ——位置误差, mm;

$K_p, K_i, K_d$ ——位置控制的比例、积分和微分增益。

该控制器的作用是通过调节气动执行机构的输入信号,减少位置误差,使执行机构尽量快速且精确地达到目标位置。

压力环控制的目标是控制气缸内部的气压,确保气压的变化不会导致执行机构的位置误差。压力环控制器也使用PID控制策略,控制方程为

$$u_{\text{pressure}} = K_{p_{\text{pressure}}} \cdot e_{\text{pressure}} + K_{i_{\text{pressure}}} \cdot \int e_{\text{pressure}}(t) dt + K_{d_{\text{pressure}}} \cdot \frac{de_{\text{pressure}}(t)}{dt}, \quad (23)$$

式中:

$e_{\text{pressure}}(t) = P_{\text{desired}}(t) - P(t)$ ——压力误差, Pa。

$K_{p_{\text{pressure}}}, K_{i_{\text{pressure}}}, K_{d_{\text{pressure}}}$ ——压力控制的比例、积分和微分增益。

通过控制气缸腔的压力,可以减小气体的可压缩性带来的压力迟滞效应,从而提高执行机构的响应速度和精度。

## 2.3 数字孪生验证平台

**2.3.1 AMESim/Simulink 联合仿真系统** AMESim是一个多领域仿真软件平台,能够进行液压、气动、机械、电气等系统的建模与仿真,被广泛应用于复杂系统的动态分析。而Simulink是MATLAB的一个图形化建模与仿真工具,特别适合控制系统的设计与验证。通过将AMESim和Simulink结合,形成联合仿真平台,可以在数字孪生系统中实现更精确的模型分析和验证。

### 2.3.2 联合仿真流程

(1) 建模与仿真:在AMESim中建立气动执行系统的物理模型,包括气缸、气路、压力传感器、位置传感器等模块。模型中应考虑气体动力学、摩擦力、热膨胀等影响因素。

在Simulink中,设计相应的控制算法,利用Simulink的PID控制器、模糊控制器等模块实现气动系统的控制策略。

(2) 接口与联动:通过Simulink和AMESim的接口工具箱(如Simscape和AMESim Connector),实现两大平台的无缝连接。仿真过程中,Simulink中的控制信号(如位置命令、压力调节)将实时反馈到AMESim模型中,反之,AMESim中的物理参数(如位置、压力)也会传递到Simulink中进行控制调整。

(3) 关键验证指标:在数字孪生平台上进行验证时,阶跃响应超调量和稳态误差带为两个关键的性能指标,需要重点关注,以确保系统的实际表现符合设计要求。

阶跃响应超调量是衡量控制系统响应速度和稳定性的一个重要指标,表示系统响应首次达到稳态值前的超调部分<sup>[16]</sup>。过高的超调量通常意味着系统的控制响应过于激烈,可能导致系统过度振荡或不稳定。为了确保系统具有良好的稳定性与响应性,超调量应控制在一个合理的范围内。阶跃响应超调量 $< 5\%$ ,表达式为

$$\text{Overshoot} = \frac{\text{Peak Value} - \text{Steady - State Value}}{\text{Steady - State Value}} \times 100\% \quad (24)$$

在仿真中,需确保系统能够快速响应目标位置,且不会超出预设的误差范围。

稳态误差带是系统在达到稳态时,位置误差的允许范围。稳态误差是控制系统在长时间运行后,实际输出与目标输出之间的差距。在气动定位系统中,较小的稳态误差意味着系统能够精确控制执行机构的位置。为了确保系统精度,稳态误差带应保持在一个非常小的范围内。稳态误差带为 $\pm 0.05$  mm,表达式为

$$\text{Steady - State Error} = |x_{\text{actual}} - x_{\text{desired}}|, \quad (25)$$

式中:

$x_{\text{actual}}$ ——实际位置;

$x_{\text{desired}}$ ——期望位置。

在仿真过程中,需确保执行机构的定位误差始终控制在0.05 mm以内,从而满足高精度定位的要求。

## 3 试验验证与分析

### 3.1 试验平台搭建

**3.1.1 试验环境配置** 严格参照GB 16798—2023搭建试验平台,关键环境参数:温湿度控制采用独立风冷机组( $\pm 0.5$  °C精度),环境温度维持在 $(20 \pm 2)$  °C,相对湿度 $(45 \pm 5)\%$  RH;洁净度要求为空气悬浮粒子数 $\leq$

10 000 个/m<sup>3</sup>(对应 ISO 8 级洁净车间);所有接触部件采用 304 不锈钢或食品级聚氨酯(FDA 21 CFR 认证)材料;清洁系统集成 CIP 在线清洗装置,喷淋压力为 0.3 MPa,水温

为 60 ℃。

3.1.2 测试对象 选择番茄与坚果两类典型物料构建对比试验组,其分拣产线参数见表 1。

表 1 分拣产线测试对象技术参数

Table 1 Technical parameters of test objects for sorting lines

分拣线	分拣速度/min <sup>-1</sup>	定位精度/mm	气动执行器型号	负载质量范围/g	物料特性	检测传感器
番茄	120	±0.30	SMC CJ2B20-300	50~200	软质/易破损	视觉定位系统
坚果	90	±0.15	FESTO DFM-20-100	5~20	硬质/高密度	激光测距传感器

番茄分拣线用于验证系统对柔性物体的防过冲保护能力,重点在于克服物料形变引起的定位偏差;坚果分拣线则考验系统的微动定位精度,要求能够补偿坚果表面凹凸不平所导致的反射信号波动。

3.1.3 数据采集 搭建的多源信息同步采集系统的关键配置:位移检测采用 Keyence LK-G5000 激光传感器(采样率 50 kHz,分辨率 0.1 μm);压力监测使用 OMEGA PX409-200G5V 压力变送器(量程 0~1 MPa,精度 ±0.1% FS);温度采集采用 PT100 铂电阻(测温范围 -20~100 ℃,精度 ±0.3 ℃);同步控制器为 NI cDAQ-9188XT(支持 16 通道同步,时间同步误差 <1 μs)。数据存储格式为 TDMS 二进制文件,能够同步记录时间戳、位移、压力、温度等 24 维数据,且采样周期统一为 1 ms。

3.2 性能对比测试

3.2.1 突变负载动态响应对比 在番茄分拣线上设置周期性突变负载工况,通过电磁制动器在 0.5~1.2 s 区间施加 20 N 阶跃负载扰动,模拟物料卡滞现象。测试传统 PID 与试验模型在以下场景的表现:负载突变幅度 0→20 N,运动轨迹 50 mm 阶跃位移指令,采样频率 1 kHz,进行位移、压力、控制量的同步采集,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,传统 PID 控制曲线在 0.5~1.2 s 负载突变

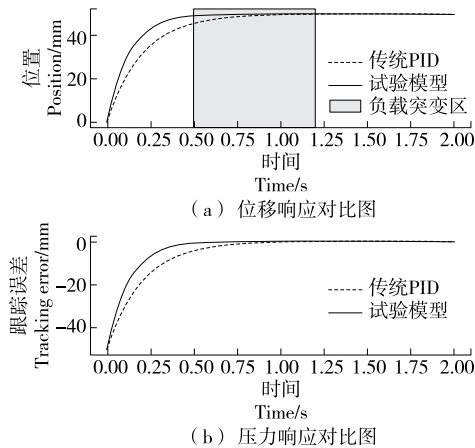


图 3 突变负载定位响应对比

Figure 3 Comparison of mutant load positioning response

区间出现明显振荡,最大跟踪误差达 0.38 mm,稳定时间(2% 误差带)为 0.82 s;试验模型控制曲线超调量仅为 1.8%,稳定时间缩短至 0.48 s。传统 PID 的 3σ 误差波动带为 ±0.15 mm,而试验模型波动带收窄至 ±0.05 mm,动态扰动抑制能力提升了 67%,验证了前馈压力补偿模块对突变负载的有效抵消作用。

3.2.2 运行稳定性测试 在坚果分拣线上进行耐久性测试,监测参数包括环境温度,模拟车间昼夜循环(18 ℃→26 ℃→18 ℃);定位目标为周期性 100 mm 往复运动(频率 0.5 Hz);数据记录则每 10 s 统计一次定位误差的标准差。

如图 4 所示,误差标准差在 18~26 ℃ 环境温度变范围内呈周期性波动,最大累积漂移量出现在第 18 h 高温段(26 ℃),达 0.15 mm;在 23 ℃ 以下时误差标准差稳定在 ±0.03 mm 以内。温度变化与定位误差存在约 2 h 的相位滞后,相关系数为 0.76(P < 0.01)。表明系统在连续运行 16 h 后误差仍满足坚果分拣 ±0.15 mm 的精度要求,验证了热膨胀补偿机制的有效性。

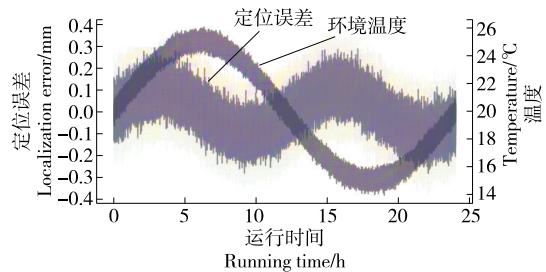


图 4 24 h 连续运行稳定性

Figure 4 Stability of 24-hour continuous operation

3.2.3 误差分布特性对比 从两种分拣线各提取 10 000 次定位操作的误差样本,采用统计方法包括核密度估计(KDE),带宽选择使用 Silverman 准则;同时进行分布拟合,检验误差样本的正态性,使用 Shapiro-Wilk 检验进行验证。

由图 5 可知,传统 PID 控制误差呈右偏分布(偏度 0.8),均值 μ 为 0.18 mm,标准差 σ 为 0.310 mm,3σ 边界达 ±0.930 mm;试验模型误差分布接近正态特性(偏度

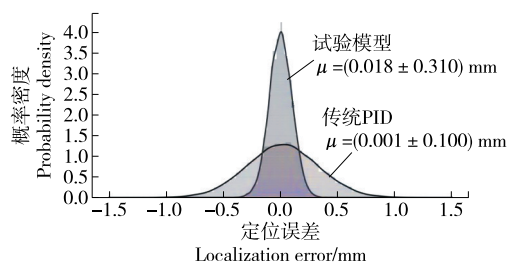


图5 误差分布特性

Figure 5 Error distribution characteristics

-0.02, 峰度 0.3), 均值  $\mu$  为 0.001 mm, 标准差  $\sigma$  为 0.100 mm,  $3\sigma$  边界缩小至  $\pm 0.300$  mm。Shapiro-Wilk 正态性检验表明, 传统 PID 误差分布拒绝正态假设 ( $W=0.82$ ,  $P<0.001$ ), 而试验模型接受原假设 ( $W=0.98$ ,  $P=0.32$ )。表明补偿模型可显著改善误差分布的集中性与对称性。

### 3.3 验证实验

为验证试验方法的实用性, 与 A 食品机械有限公司合作, 在其坚果分拣生产线 (型号 NZFJ-2022) 进行为期 30 d 的工业级测试。测试严格遵循 GB/T 19001—2016 质量管理体系要求, 重点监测以下核心指标: 动态性能 (单次定位时间, 按照 ISO 9283 标准)、质量指标 (废品率, 依据 GB 19891—2005 缺陷分类标准)、能耗效率 (单位产量压缩空气消耗量)。测试期间共处理坚果物料 125 万件, 环境温湿度波动范围控制在  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ 、 $(45 \pm 10) \% \text{RH}$ 。在连续 2 000 次分拣操作中, 同步记录改造前后的定位时间数据, 并采用移动平均 (窗口宽度 50 次) 消除随机波动, 结果如图 6 所示。

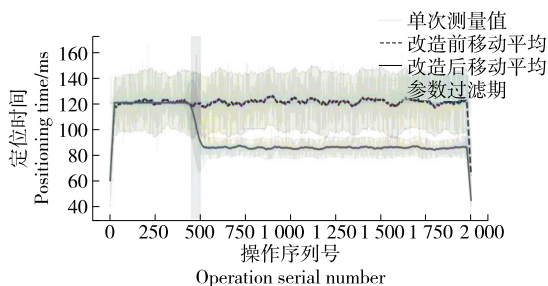


图6 定位时间优化对比

Figure 6 Positioning time optimization comparison

由图 6 可知, 改造前平均定位时间为 120 ms, 95% 置信区间为  $\pm 23.5$  ms; 实施试验模型后平均时间降至 85 ms, 置信区间收窄至  $\pm 7.4$  ms。过渡期 (450~500 次操作) 参数切换阶段用时 50 次完成稳定。稳态阶段 ( $>500$  次) 时间标准差从 12.3 ms 降至 3.8 ms, 变异系数降低了 69%。证明试验方案可显著提升定位速度与稳定性。

随机抽取 30 个生产批次 (每批次 5 000 件), 并按照行

业标准进行分类统计。缺陷类型包括定位偏移破损 (A 类)、漏拣 (B 类) 和误拣 (C 类)。准入阈值为总废品率  $\leq 0.5\%$  (依据 GB/T 35090—2025)。结果如图 7 所示。

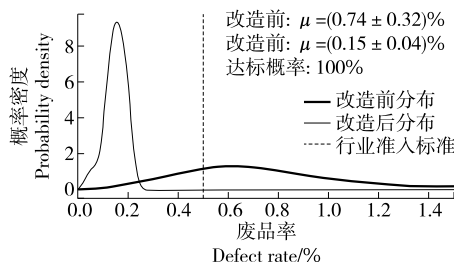


图7 废品率控制效果代码

Figure 7 Scrap rate control effect code

由图 7 可知, 改造前概率密度呈右偏分布, 平均废品率为  $(0.74 \pm 0.32) \%$ , 最高达 1.28%; 实施试验模型后呈正态分布, 均值降至  $(0.15 \pm 0.04) \%$ 。核密度估计显示, 改造后分布  $3\sigma$  上限为 0.27%, 远低于行业准入标准。统计检验表明, 改造后批次达标概率为 100%, 较改造前提升了 53 个百分点。表明试验方案可降低废品率数量级。

## 4 结论

本研究提出了一种气动执行机构精准定位与误差补偿模型, 综合考虑气动系统中的多种误差源, 引入模糊 PID 自整定算法和双闭环控制架构, 进一步提升气动执行系统的精度与响应速度。验证实验结果表明, 改进后的模型可显著提高动态响应的稳定性, 负载突变情况下最大跟踪误差从传统 PID 控制的 0.38 mm 减至 0.05 mm, 稳定时间从 0.82 s 缩短至 0.48 s。同时, 系统在长时间运行过程中, 定位误差标准差保持在  $\pm 0.03$  mm 以内, 证明了热膨胀补偿机制的有效性。在实际应用中, 改造后的系统定位时间显著降低, 从 120 ms 降低至 85 ms, 废品率从 0.74% 减少至 0.15%, 有效提升了生产效率和稳定性。后续研究可以集中考虑通过更复杂的系统动态增强模型的鲁棒性, 例如执行机构中的非线性效应或外部扰动 (如振动) 对末端执行器与物料接触瞬态冲击的影响, 并结合机器学习算法预测和适应系统行为的变化, 进一步提升误差补偿效果。

### 参考文献

- [1] 崔崑, 袁瑞, 孙立涛, 等. 基于机器视觉和改进 BOA 的食品分拣机器人轨迹规划方法研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 80-85.
- CUI W, YUAN R, SUN L T, et al. Research on trajectory planning method for food sorting robot based on machine vision and improved BOA[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 80-85.
- [2] 侯义锋, 钱俊, 王梁, 等. 砂糖橘采摘机器人分拣机构设计[J].



- 中国农机化学报, 2023, 44(9): 183-189.
- HOU Y F, QIAN J, WANG L, et al. Design of sorting mechanism of the clementine picking robots[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 183-189.
- [3] 梁春苗, 姚宁平, 姚亚峰, 等. 煤矿用钻孔机器人钻臂定位误差补偿研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(3): 153-163.
- LIANG C M, YAO N P, YAO Y F, et al. Positioning error compensation of drilling robot arm for coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(3): 153-163.
- [4] 潘海鸿, 喻洪基, 陈旭红, 等. 用于超精密抛光机床的 Spline+GLS 定位误差补偿模型[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(5): 156-159, 163.
- PAN H H, YU H J, CHEN X H, et al. Spline+GLS positioning error compensation model for ultra-precision polishing machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(5): 156-159, 163.
- [5] 郭联金. 多感知水果抓取及分拣控制系统的设计[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 89-94, 99.
- GUO L J. Design of control system for multi-sensory fruit grabbing and sorting[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 89-94, 99.
- [6] 王华. 一种气动机器人垃圾分拣系统的设计与分析[J]. 液压与气动, 2022, 46(9): 86-91.
- WANG H. Design and analysis of a pneumatic robot garbage sorting system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(9): 86-91.
- [7] 王成军, 韦志文, 严晨. 基于机器视觉技术的分拣机器人研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(3): 893-902.
- WANG C J, WEI Z W, YAN C. Review on sorting robot based on machine vision technology[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(3): 893-902.
- [8] 齐智斌, 郭联龙, 兰帅航, 等. 基于改进 Stribeck 模型的伺服系统摩擦补偿研究[J]. 微电机, 2024, 57(8): 20-25, 42.
- QI Z B, GUO L L, LAN S H, et al. Research on friction compensation of servo system based on modified Stribeck model[J]. Micromotors, 2024, 57(8): 20-25, 42.
- [9] 陈春俊, 杨露, 何智颖, 等. ARIMA-BP 神经网络高速列车隧道压力波预测模型研究[J]. 中国测试, 2021, 47(10): 80-86.
- CHEN C J, YANG L, HE Z Y, et al. Research on tunnel pressure wave prediction model of high-speed train based on ARIMA-BP neural network[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(10): 80-86.
- [10] 张淑娥, 孟宪盖, 韩中合. 蒸汽湿度微波谐振腔热膨胀自补偿测量系统研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(6): 442-447.
- ZHANG S E, MENG X G, HAN Z H. Study on a thermal expansion self-compensation system for wetness measurement of moist steam based on microwave resonator[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(6): 442-447.
- [11] 邓柯楠, 高栋, 马守东, 等. 基于迁移学习的铣削机器人定位误差补偿方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 170-180.
- DENG K N, GAO D, MA S D, et al. An efficient error compensation method for milling robot based on transfer learning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 170-180.
- [12] 张浩楠, 康宁波, 何建国, 等. 基于理想气体状态方程和道尔顿分压定律的气调包装气体混配系统[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 97-103.
- ZHANG H N, KANG N B, HE J G, et al. Gas mixing system of modified atmosphere packaging based on ideal gas law and Dalton's law of partial pressure[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 97-103.
- [13] 曾凌霄, 刘子豪, 严志鹏, 等. 多通道次品虾自动剔除系统构建及关键控制参数优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 105-110.
- ZENG L X, LIU Z H, YAN Z P, et al. Detection of defective shrimp and optimization for key parameters in multi-channel automatic elimination system[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 105-110.
- [14] 王子啸, 王旺平, 宋少云. 基于 ADAMS 的胶辊磨谷机脱壳效率影响参数仿真分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 83-87.
- WANG Z X, WANG W P, SONG S Y. Simulation analysis of the influencing parameters on the shelling efficiency of rubber roller husker based on ADAMS[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 83-87.
- [15] 曹现刚, 费佳浩, 王鹏, 等. 基于多机械臂协同的煤矸分拣方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 7-12.
- CAO X G, FEI J H, WANG P, et al. Study on coal-gangue sorting method based on multi-manipulator collaboration[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 7-12.
- [16] 林雪, 黄鹏程, 田立权, 等. 多功能一体包馅机的设计及其参数优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 116-119, 161.
- LIN X, HUANG P C, TIAN L Q, et al. Design and parameters optimization of multifunctional encrusting machine[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 116-119, 161.