

超高压食品处理装置同步控制系统研究

Research of super high pressure food processing equipment's synchronization control system

罗伟

LUO Wei

(湖南铁道职业技术学院, 湖南 株洲 412001)

(Human Railway Professional & Technology College, Zhuzhuo, Hunan 412001, China)

摘要: 高压灭菌容器严格的密封性能要求推动堵头运动的同步系统必须具备极高的同步精度, 然而, 由于负载的动态变化, 摩擦以及油液的泄漏, 堵头在实际运动过程中将产生偏转情况, 影响高压容器的密封性能。针对该问题, 建立了同步系统的数学模型, 提出了同步系统的控制方法: 对堵头水平运动采用 PID 控制, 对堵头偏转运动采用模糊 PID 控制。仿真结果表明: 在该控制策略下堵头水平运动精度高, 纠偏能力强。可为提高高压容器的灭菌效果提供可靠的参考依据。

关键词: 高压灭菌; 同步系统; 模糊 PID; 数学建模

Abstract: High pressure sterilization equipment's strict sealing requires the synchronization system which push plug's movement must have high synchronization accuracy. However, because of the dynamic load, friction, oil leakage, the plug easily prone to deflection, which are greatly affecting the sealing performance. Considering about this problem, the synchronous system's mathematical model was established. And then, the control method was also proposed: a PID control was using to the horizontal motion. And the fuzzy PID was used to control the deflection movement. The simulation results show that: the plug under this control strategy not only has a high precision horizontal motion, but also has a strong restore balance ability. All of these provide a reliable reference to improve the effect of sterilization equipment.

Keywords: high pressure sterilization; synchronous system; fuzzy PID; mathematical modeling

高压杀菌技术是一种利用高压水杀灭食品中的微生物的非热力加工技术, 与传统灭菌方式不同, 它不会破坏食品中的水分和活性^[1-2], 同时还可能使食品的一些营养成分改性, 获得新的口感, 已被应用于水产品的加工^[3]。目前已

经受到食品行业的高度关注。然而, 这种高压技术需要高压容器长期保持严密的密封性能, 而在实际工作过程中, 由于负载的动态变化、摩擦和液压油泄漏, 同步系统往往发生偏转现象^[4]。这种不同步现象直接造成堵头在运动过程中与高压容器内壁发生强烈的刮擦、碰撞。严重破坏了高压容器的密封性能。因此, 要保证高压容器的密封性, 必须保证同步系统具备较高的同步精度。

目前, 在高压灭菌高压缸的同步性能方面, 国内外已有较多研究, 许多研究者^[5-6]采用并联调速阀同步回路, 这种同步回路结构简单, 调速方便, 在许多简单的同步系统中也经常被采用, 但该系统同步精度不高, 在负载波动变化时最大误差达到了 20%, 不适合密封性能较高的高压灭菌装置; 部分研究者^[7-8]通过将两个液压缸串联, 实现两缸的位置同步, 这种串联的液压缸结构简单, 但是由于液压缸自身可能存在油液泄露问题, 两同步缸的进油量并不完全一致, 这样的同步系统精度很低, 尤其是在油缸往复动作过程中, 这种误差经多次积累, 将会加剧高压容器的内壁磨损。另外, 还有研究者^[9]对高压容器采用了高强度的耐磨性材料, 这种方法虽然在一定程度上提高了高压灭菌容器的密封性能, 但同时也大大增加了灭菌设备的成本。

实际上, 在其它类似装备的液压同步系统方面, 已有研究者结合先进控制算法做过许多液压同步性能方面的研究, 如阳立业^[10]针对模锻压机同步系统设计了同步系统的 PID 控制算法, 这种控制方法在某一简单工况下使模锻压机达到了较高的同步精度。这说明将先进控制算法利用到高压灭菌同步系统同样有望获得较高的精度。

高压灭菌同步系统区别于其他装备同步系统, 它不仅需要具备堵头纠偏功能, 同时还应具备推动堵头水平移动功能, 充分考虑到高压灭菌加压过程中工况多变特点, 本研究针对堵头的两种运动提出不同的控制方法: 对堵头水平移动采取 PID 控制, 对堵头偏转运动采取模糊 PID 控制方法, 并借助 Matlab 软件进行仿真分析, 验证此控制策略的有效性。

作者简介: 罗伟(1979—), 男, 湖南铁道职业技术学院副教授, 硕士。
E-mail: 29607150@qq.com

收稿日期: 2016-01-07

1 问题描述

超高压灭菌设备如图1所示,由两个同步系统及一个高压水供给系统组成。在初始状态,堵头与高压容器分离,包装好的食品从高压容器两端进入,待其进入高压容器后,分离的堵头在同步缸的推动下将高压容器完全密封。此时,高压供水系统开始向高压容器供高压水,高压容器最高水压能达到500 MPa^[1],在此超高压作用下,物料中的绝大部分细菌、酵母菌以及霉的细胞壁发生破裂,且物料的营养成分不发生变化,从而能长时间保持着原有的生鲜风味。

要达到500 MPa的高压必须要求高压容器具备十分严密的密封性,然而,由于加压过程中高压容器中水压的动态变化,以及液压缸、液压阀的油液泄漏,液压缸制造精度不够等问题,同步系统在实际工作过程中很难保证同步缸时刻保持着位置同步,这种不同步现象造成堵头在直线运动过程中自身发生偏转,从而与高压容器内壁发生强烈的刮擦,甚至是剧烈的碰撞,严重破坏高压容器的密封性能。为提高高压容器的密封性能,首先必须最大限度地减少两个液压缸的同步误差。

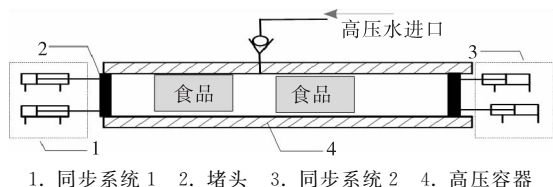


图1 高压灭菌装置原理图

Figure 1 Principle diagram of high pressure sterilization device

2 同步系统建模

图2为高压灭菌设备液压同步系统原理图。液压油在液压泵的作用下,分别经过两个伺服阀,进入两个同步缸,从而推动堵头移动,在移动过程中,计算机不断采集两个同步缸的位移数据,根据同步缸位移的偏差情况,通过计算机内部的控制算法,从而控制伺服阀的电磁阀电压,进一步调节两液压缸的移动速度。

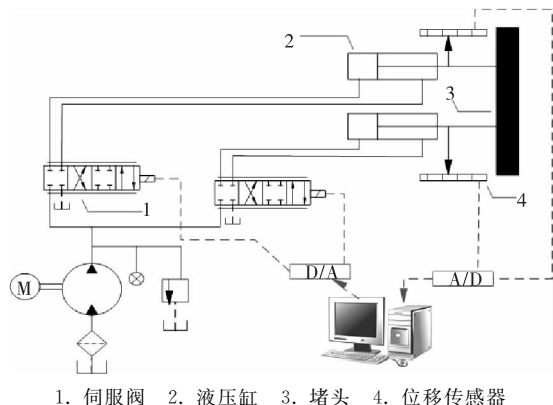


图2 高压灭菌装置同步系统图

Figure 2 Diagram of high pressure sterilization device synchronization system

2.1 伺服阀的建模

同步系统在实际工作过程中,对于堵头的移动速度变化范围不大,伺服阀处于线性工作区^[12],此时输出流量与输入电压可表示为:

$$Q_i = K_L u_i, \quad (1)$$

式中:

K_L —— 补偿系数;

Q_i —— 第 i 个伺服阀流量, L/min;

u_i —— 第 i 个伺服阀电压, V。

2.2 同步液压缸建模

同步液压缸采用的是一种非对称结构油缸,其详细数学模型建立过程在诸多文献已有说明,本研究直接引用文献^[13],根据流量连续性因此有:

$$Q_i = A_e \frac{dx_i}{dt} + \frac{V_i}{4\beta_e} \cdot \frac{dp_i}{dt} + c_k p_p + c_{te} p_i, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

$$p_i = \frac{F_i}{A_2}, \quad (3)$$

$$A_e = \frac{A_1 + A_2}{2}, \quad (4)$$

$$c_{te} = \frac{1 + \eta^2}{1 + \eta^3} c_t, \quad (5)$$

$$c_k = \frac{\eta^3 + \eta^2}{1 + \eta^3} c_t, \quad (6)$$

$$\eta = \frac{A_1}{A_2}, \quad (7)$$

式中:

Q_i —— 第 i 个 (i 为 1 或 2) 液压缸的负载流量, L/min;

p_i —— 第 i 个 (i 为 1 或 2) 液压缸的负载压力, MPa;

A_e —— 液压缸有杆腔和无杆腔的有效面积之和的平均值, m^2 ;

c_{te} —— 外部泄漏系数, $m^5 / (N \cdot s)$;

c_e —— 内部泄漏系数, $m^5 / (N \cdot s)$;

η —— 液压缸有杆腔的面积与无杆腔面积的比值;

V_i —— 第 i 个液压缸进油腔的体积, m^3 ;

β_e —— 油液体积弹性模量, N/m^2 ;

F_i —— 第 i 个缸受到的作用力, N;

A_1 —— 无杆腔有效面积, m^2 ;

A_2 —— 有杆腔有效作用面积, m^2 。

2.3 堵头运动状态建模

在实际运动过程中,两同步缸的活塞与堵头通过球铰接在一起,因此分析过程可将活塞与堵头作为一个整体进行受力分析,堵头与活塞在实际运动过程中,受到油液对活塞的粘性阻力,因此可将堵头受力简化为如图3所示。

根据牛顿第二运动定律可得:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} = F_1 + F_2 - F_L, \quad (8)$$

式中:

M —— 堵头和两活塞缸质量, kg;

x —— 堵头水平位移, m;

c —— 系统阻尼系数, $N \cdot m/s$;

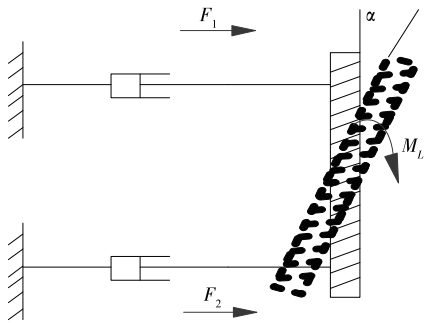


图 3 堵头受力分析图

Figure 3 Diagram of stress analysis of plug

F_L ——堵头所受到的负载, N;

F_1, F_2 ——两同步缸作用力, N.

对堵头的偏转情况进行分析,堵头在偏转过程中受到增压容器内壁对堵头的偏转抗力,该抗力矩在微小范围内与偏转角度成正比,因此根据分析可得:

$$(F_1 - F_2)l + M_L = J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + B \frac{d\alpha}{dt} + K\alpha, \quad (9)$$

式中:

M_L ——外界扰动转矩, N·m;

K ——增压容器抗偏能力系数, N/rad;

J ——堵头转动惯量, N·m·s²;

B ——转动粘性阻尼系数, N·m/s;

l ——同步缸距离堵头中心的距离, m.

结合堵头的偏转情况,根据图 3 几何变形规律可得:

$$x_1 = x + l\alpha, \quad (10)$$

$$x_2 = x - l\alpha, \quad (11)$$

令:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_6]^T = [x \ \alpha \ \dot{x} \ \dot{\alpha} \ p_1 \ p_2]^T;$$

$$y = [y_1 \ y_2]^T = [x \ \alpha]^T;$$

$$u = [u_1 \ u_2]^T;$$

$$f = [F_L \ M_L]^T.$$

则根据式(1)~(11),高压灭菌装置同步系统的状态方程可写为:

$$\dot{x} = Ax + B_1u + B_2f, \quad (12)$$

$$y = Cx, \quad (13)$$

其中式(12)~(13)中矩阵 A 、 B_1 、 B_2 、 C 分别表示为:

$$A = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6];$$

$$a_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T;$$

$$a_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T;$$

$$a_3 = \frac{1}{M} [0 \ 0 \ -c \ 0 \ A_2 \ A_2]^T;$$

$$a_4 = \frac{1}{J} [0 \ -K \ 0 \ -B \ A_2l \ A_2l]^T;$$

$$a_5 = -\frac{V}{4\beta_e} [0 \ 0 \ A_e \ A_e l \ c_{ve} \ 0]^T;$$

$$a_6 = -\frac{V}{4\beta_e} [0 \ 0 \ A_e \ -A_e l \ 0 \ c_{ve}]^T;$$

$$B_1 = \frac{4K_L\beta_e}{V} \begin{bmatrix} 0_{4 \times 2} \\ I_{2 \times 2} \end{bmatrix};$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \\ 0_{2 \times 2} \end{bmatrix};$$

$$C = [I_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 4}].$$

3 同步系统控制方法

由式(12)~(13)可知,高压灭菌同步系统实际上是两输入两输出的系统,即同步系统不仅能将堵头向前推进,并且能及时将堵头纠偏,从而实现堵头在高压容器内无碰撞的运动。由于堵头在高压容器内的水平移动精度没有严格的要求,因此对于堵头的推进可采用简单的 PID 控制,但在移动过程中对堵头的偏转有着严格的限定,同步缸由于受到波动变化的高压水作用。普通的 PID 很难保证在复杂工况下同步系统仍具有很好的同步性,因为普通 PID 3 个控制参数 (k_p, k_i, k_d) 不能随工况变化而动态调整。为此,针对堵头的偏转运动设计了自适应性较强的模糊 PID 控制策略。如图 4 所示,对于两输入两输出的同步系统,采用 PID 控制堵头的水平移动,采用模糊 PID 控制堵头的偏转运动, PID 控制参数整定方法可采用 Ziegler-Nichols^[14] 整定法,模糊 PID 控制原理如图 4 所示,该控制策略主要是根据堵头在高压容器内的实际偏转情况对 PID 控制参数 (k_p, k_i, k_d) 进行动态修正。

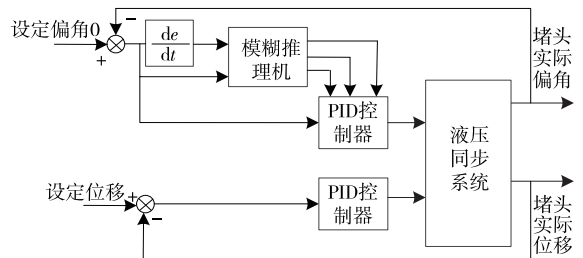


图 4 同步系统控制原理图

Figure 4 Principle diagram of synchronization control system

主要过程:

(1) 模糊化过程:模糊 PID 通过在线检测偏转角度 e 、角度偏差率 ec 实时调制 PID 控制参数。由图 5 可知,模糊推理机的输入变量为堵头偏转角度 e 、角度偏差率 ec ,输出变量为 PID 参数 k_p, k_i, k_d ,为此首先对 $e, ec, \Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 进行模糊化处理,为减小系统的稳态误差,对输入输出变量的大小情况均采用 7 个模糊状态表示: {负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},将该状态简写为: {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},其中 NB 代表负大。定义完输入输出的模糊状态后,选正态分布函数为输入输出变量的模糊隶属度函数。

(2) 模糊规则表建立:简单的 PID 参数不能随着工况动态变化,为适应高压灭菌同步系统的动态负载变化,在充分考虑 k_p, k_i, k_d 对同步系统的作用基础之上,结合工程实际经验设计 PID 参数增量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 如文献[15]的表 3~5 所示。如文献[15]表 3 中第一条规律:如果 e 为 NB 并且 ec 为

NB时, k_p 则取值 PB, 即当堵头偏角很大而且具有较大的偏转趋势时, k_p 将为一个负的最大值, 从而纠正堵头角度位置。

(3) 清晰化过程: 根据模糊规则表, 运用最大隶属度解模糊器进行模糊判决, 经过推理运算, 可获得 k_p 、 k_i 、 k_d 3个参数的大小:

$$k_p = k_{p0} + \Delta k_p, \quad (14)$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i, \quad (15)$$

$$k_d = k_{d0} + \Delta k_d, \quad (16)$$

式中:

k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} ——PID 3个参数的初值。

4 仿真分析

查阅高压灭菌设备说明书, 确定同步系统仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

无杆腔面积 A_1/m^2	有杆腔面积 A_2/m^2	液压缸初始 容积 V/m^3	油液泄露系数 $c_l/$ ($m^5 \cdot N^{-1} \cdot s^{-1}$)	转动粘性阻尼系数 $B/(N \cdot s \cdot rad^{-1})$	移动粘性阻尼系数 $c/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	油液弹性模量
3.23×10^{-3}	2.11×10^{-3}	4.7×10^{-3}	4.5×10^{-13}	4.52×10^9	6.3×10^6	7.6×10^8

根据本研究的控制算法结合表 1 仿真参数对高压灭菌设备同步系统进行仿真, 设置堵头水平负载 F_L 为 600 kN, M_L 为线性增长力矩, 其变化规律见图 5; 通过仿真, 可得出堵头的水平移动速度和偏转情况见图 6~7。由图 6 可知, 堵头水平移动在 PID 控制作用下, 堵头初始速度为 0, 经过 1.5 s 左右, 立刻上升到 0.05 m/s, 然后保持该速度运动, 整个速度变化过程中速度超调量为 0.008, 超调很小。这种移动精度完全能够满足堵头的水平运动要求。此外, 对堵头偏转情况分析, 图 7 为堵头偏转运动分别在 PID 控制器和模糊 PID 控制效果下的对比图, 在普通 PID 控制作用下, 堵头峰值偏转角增大到了 0.022 rad, 且堵头恢复平衡状态需 11.8 s 左右, 而在模糊 PID 控制作用下, 堵头峰值偏转角为 0.018 rad, 其恢复到平衡状态需 10.5 s 左右, 无论从峰值还是从纠偏时间, 模糊

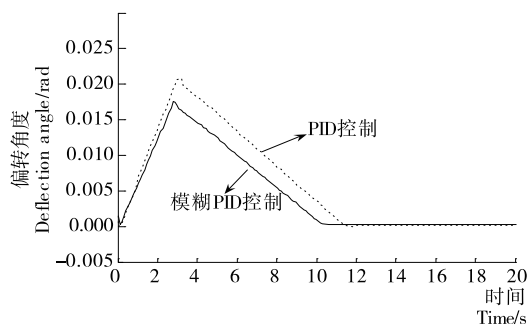


图 7 堵头偏转

Figure 7 Deflection of plug

PID 的控制精度均高于普通 PID。

为衡量堵头在复杂工况下同步系统的纠偏性能, 设置一个脉动外力矩, 其变化规律见图 8。图 9 为该脉动力矩扰动

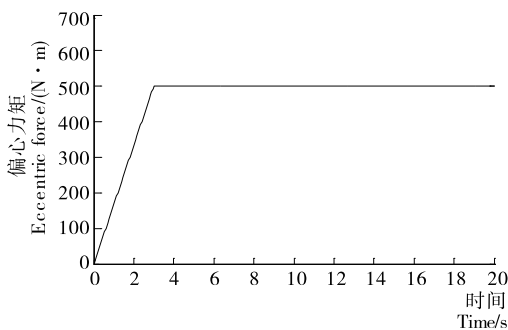


图 5 线性负载

Figure 5 Linear load

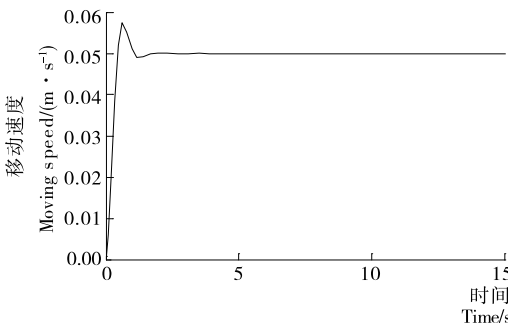


图 6 堵头移动速度

Figure 6 Blocking movement speed

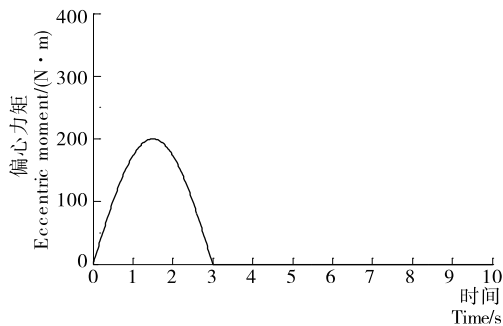


图 8 脉动变化负载

Figure 8 Fluctuating load

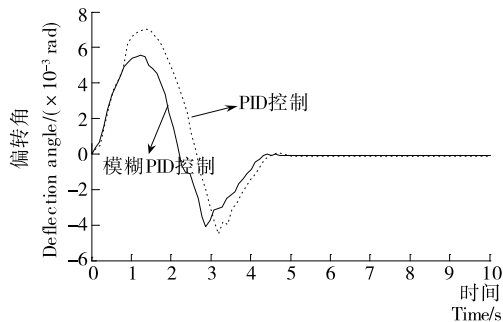


图 9 堵头偏转角度

Figure 9 Angle of head deflection

- [2] 方政, 高彦祥. 柑橘加工副产物中有效成分开发利用的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2005(4): 9-13.
- [3] 汪海波, 汪芳安, 潘从道. 柑橘皮果胶的改进提取工艺研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 136-141.
- [4] 王健, 黄国林. 柑橘皮中果胶的萃取方法研究进展[J]. 四川食品与发酵, 2007, 43(4): 12-15.
- [5] 付复华, 李忠海, 单杨, 等. 柑橘皮渣综合利用技术研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 178-184.
- [6] 付复华, 李忠海, 单杨, 等. GC—MS 法分析三种柑橘皮精油成分[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 30-34.
- [7] 方德秋, 肖顺元. 柠檬醛及香精油的抗菌性研究概述[J]. 天然产物研究与开发, 1994, 6(2): 75-78.
- [8] 苏力坦·阿巴拜克力, 古丽加汗·沙吾提, 热孜万·米吉提, 等. 柑皮挥发油对衣蛾驱虫作用的初步研究[J]. 新疆大学学报: 理工版, 2001, 18(1): 105-107.
- [9] 张薇, 李霞, 邓子牛. 柑橘香精油的提取和浓缩方法综述[J]. 作物研究, 2005(5): 432-435.
- [10] Boldyrev V V, Tkáčová K. Mechanochemistry of solids: past, present and prospects[J]. Journal of Materials Synthesis and Processing, 2000, 8(3/4): 121-132.
- [11] 宋春娜, 王洋, 金礼吉, 等. 微切助互作技术辅助提取穿心莲内酯的工艺研究[J]. 时珍国医国药, 2008, 19(11): 2 638-2 641.
- [12] Kaupp G. Organic solid-state reactions with 100% yield[J]. Cheminform, 2005, 36(36): 130-131.
- [13] Korolev K G, Lomovskii O I, Rozhanskaya O A, et al. Mechanochemical preparation of water-soluble forms of triterpene acids[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2003, 39(4): 366-372.
- [14] Lomovsky O, Korolyov K, Kwon Y S. Mechanochemical solubilization and mechanochemically assisted extraction of plant bioactive substances[J]. Science and Technology, 2003, 1(1): 7-20.
- [15] Liu Ying, Jin Li-ji, Li Xiao-yu, et al. Application of mechanochemical pretreatment (MCPT) to aqueous extraction of isofraxidin from *Eleutherococcus senticosus*[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(20): 6 584-6 589.
- [16] Jin Li-ji, Li Hua-qiang, Wu Fei-fei, et al. Application of mechanochemical pretreatment prior to aqueous extraction of eleutheroside B from *Eleutherococcus senticosus*[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(32): 10 695-10 701.
- [17] 刘莹, 金礼吉, 徐永平, 等. 机械化学法辅助提取刺五加总黄酮的工艺研究[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(12): 2 889-2 891.
- [18] 李化强. 微切助技术提取辣椒活性成分及其对蛋鸡影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [19] Li Hua-qiang, Jin Li-ji, Wu Fei-fei, et al. Effect of red pepper (*Capsicum frutescens*) powder or red pepper pigment on the performance and egg yolk color of laying hens[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2012, 25(11): 1 605-1 610.
- [20] 赵其阳, 焦必宁, 付陈梅, 等. 柑桔皮及其果汁中香精油含量的蒸馏滴定方法研究[J]. 中国南方果树, 2006, 35(5): 9-11.

(上接第 116 页)

下普通 PID 和模糊 PID 的控制效果, 在两者控制作用下, 堵头偏转趋势大致相同, 均近似一个完整周期正弦变化图, 但 PID 控制下, 堵头峰值偏转角达到了 $0.007\ 2\ \text{rad}$, 而模糊 PID 峰值偏转角为 $0.005\ 9\ \text{rad}$ 。这是由于非线性扰动作用下, 模糊 PID 能根据外界负载变化情况动态修正 PID 控制参数 k_p 、 k_i 、 k_d , 从而达到了更好的控制效果。

5 结论

(1) 通过对高压灭菌装置同步系统各个液压元件分析, 建立了高压灭菌装置同步系统的整体数学模型, 为研究其控制策略提供了理论依据。

(2) 考虑到外界负载复杂变化情况下, 提出了同步系统的控制策略, 对堵头水平移动采取了 PID 控制方法, 对堵头的偏转运动采取了模糊 PID 控制方法。通过仿真验证该控制方法的有效性, 仿真结果表明: 该控制方法完全满足堵头的水平移动和纠偏要求, 且模糊 PID 纠偏方法比普通 PID 纠偏精度要高。

参考文献

- [1] 彭静, 袁龙, 卢立新, 等. 软包装太湖白虾超高压杀菌效果及动力学研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(3): 24-27.
- [2] 田海娟. 超高压灭菌技术在紫苏豆酱中的应用[J]. 中国调味品, 2013, 38(3): 80-83.
- [3] 陈扬易, 谢晶, 钟小凡, 等. 超高压处理技术在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 266-269.
- [4] 黄志建, 姜维, 费望龙. 液压同步控制在摊铺机液压系统中的应用[J]. 液压与气动, 2012(9): 89-91.
- [5] 朱传敏, 于立, 周贤德. 同等方式的比例同步控制系统设计[J]. 现代制造工程, 2012(1): 112-116.
- [6] 王国政, 王国涛. 隧道掘进机刀具破岩综合试验台电气系统的研制[J]. 隧道建设, 2015, 35(3): 279-284.
- [7] 邹学新, 廖金军, 李欣. 液压系统流—压互补同步回路仿真研究[J]. 液压气动与密封, 2013(6): 26-30.
- [8] 陈红锋. 几种液压同步回路的设计应用[J]. 机械工程师, 2013(3): 125-127.
- [9] 于勇, 潘芳, 苏光明, 等. 超高压技术在粮食产品加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 248-253.
- [10] 阳立业. 基于遗传 PID 的巨型模锻液压机同步系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 28-44.
- [11] 方桂花, 李晓燕, 李斌. 超高压灭菌设备液压同步系统仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 218-220.
- [12] 陈晋市, 刘昕晖, 王同建. 平衡阀对起重机起升系统抖动现象的影响因素[J]. 中国工程机械学报, 2010(1): 158-163.
- [13] 赵斌. 基于电液比例技术的液压同步控制系统研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007: 10-30.
- [14] 李俊, 李运堂. 四旋翼飞行器的动力学建模及 PID 控制[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2012(1): 58-61.
- [15] 虞朝永. 大型船舶蔬菜储藏仓库自动控制系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 128-131.