

# 高温高压灭菌锅系统非线性参数辨识

汤植平<sup>1</sup> 师 佳<sup>2</sup>

(1.厦门大学信息科学与技术学院 福建 厦门 361000;2.厦门大学化学化工学院 福建 厦门 361000)

**【摘要】**高温高压灭菌是食品加工业的一个重要生产过程。该过程代表的是一个多变量、非线性且多阶段操作的复杂间歇过程。精确的参数辨识是设计高温高压灭菌锅系统的基础,对灭菌锅系统的建模与仿真具有十分重要的意义。本文利用偏最小二乘算法对高温高压灭菌锅系统进行了参数辨识,同时用辨识到的参数进行了系统仿真。通过辨识结果和理论值,以及仿真结果和实际测量到系统数据的比较,表明辨识结果有较高的准确度。

**【关键词】**高温高压灭菌锅;间歇过程;非线性参数辨识;系统仿真

## 0.引言

高温高压灭菌锅是利用高温高压水蒸气对锅内待消毒罐头进行高温消毒的一种设备。虽然高温高压灭菌锅在现代工业生产过程中扮演着日益重要的角色,但目前对灭菌过程的研究仍处于建模和对其简单控制的阶段,而且基本未考虑锅内罐头模型,这使得建立的高压锅模型不够完整,不够精确,同时也影响到对该过程的参数辨识、仿真、控制及优化。

灭菌过程往往是生产过程的一个重要组成部分,它也广泛应用于食品、制药及发酵工业等,因此对工业灭菌过程的深入了解具有重要意义。由于高温高压灭菌是一个多变量、非线性且多阶段操作的复杂间歇过程,且其待辨识的参数具有非线性的关系,因而对参数的精确辨识对完善高压锅模型,提高其实用性、安全性具有重要意义。

当前非线性参数辨识方法主要可分为两种:模型和输入输出数据已知;模型未知但输入输出数据已知。其中待辨识的参数之间的关系均是非线性的。对于第一种情形的参数辨识主要有改进最小二乘法<sup>[1,2,3]</sup>,LM算法<sup>[4,5]</sup>等;而对于模型未知的情形则主要是利用神经网络<sup>[6]</sup>和遗传算法<sup>[7]</sup>进行参数辨识。同时由于实际工业过程中输入输出数据难免带有噪声和许多不可避免的扰动,因而在参数辨识之前对测量数据进行一定的优化处理<sup>[8]</sup>对提高辨识精度有较大的帮助。

本文基于高温高压锅系统模型,对高压锅冷凝推动力参数、蒸发推动力参数、气相液相热传递参数,以及五个阀门特性参数进行了参数辨识,并对辨识结果的准确性进行了验证,为下一步辨识高压锅内罐头模型,完善高压锅系统模型奠定基础。

## 1.系统模型

### 1.1 高温高压灭菌锅系统模型

高温高压灭菌锅系统的结构如图1所示。

系统主要由一台高温高压灭菌容器和五个控制阀门系统组成。高温高压灭菌容器是一个密闭的承压容器,能够实现需要灭菌的罐头产品。五个控制阀门主要用于控制灭菌锅内水蒸气、空气和水的质量,从而间接地调节容器内的温度和压力,进而控制罐头的温度和压力,实现高温灭菌的目的。

图1中,阀门 $V_{ai}$ 用于控制进入容器内的高压干空气的

流量 $F_{ai}$ ,阀门 $V_{si}$ 用于控制进入容器内的高温高压饱和水蒸汽的流量 $F_{si}$ ,阀门 $V_{wi}$ 用于控制进入容器内的冷却水流量 $F_{wi}$ ,阀门 $V_{go}$ , $V_{wo}$ 分别为排气阀和排水阀,分别用于排出锅内气体和冷却水,排出气体和冷却水的流量为 $F_{go}$ , $F_{wo}$ 。图1中的其他符号说明请参见附表。

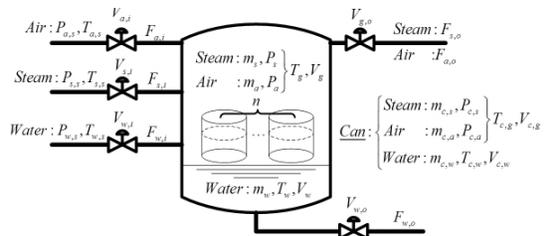


图1 高温高压灭菌锅系统结构图

### 1.2 高温高压灭菌过程与控制要求

为了保证安全生产,达到灭菌要求同时提高生产效率,在不同阶段都需要对关键过程变量进行控制,使其满足一定的控制要求。高温高压灭菌锅进行灭菌过程一般有以下几个阶段:

1.2.1 物品填装阶段。即将待灭菌罐头制品装入灭菌锅内,然后密闭。

1.2.2 加压升温阶段。首先打开阀门 $V_{si}$ , $V_{s,o}$ ,通入高温高压水蒸汽,目的是为了排出锅内空气,此后关闭阀门 $V_{go}$ ,继续通入高温水蒸汽,当锅内达到灭菌温度时,进入下一阶段。本阶段关键是既能在最短的时间完成升温升压以提高生产效率,同时保证国内罐头具有安全压力差。

1.2.3 保温保压灭菌 通过调节通入的高温高压水蒸汽流量以保证锅内保持一定的温度及压力直至达到灭菌效果。

1.2.4 降温降压  $V_{wi}$  通过打开阀门 通入冷却水,同时打开泄气阀  $V_{go}$  进行减温减压。为了保证在该阶段罐头和锅内压差不能太大,必须同时通入高压空气达到控制锅内压强的目的。

### 1.2.5 开锅取物

### 1.3 高温高压灭菌锅系统的数学模型

为了降低该模型的复杂度,同时突出灭菌过程的主要特性,忽略次要因素,本文作出如下假设:

收稿日期:2010-1-24

作者简介:汤植平(1984-05),男,汉,福建省龙岩人,厦门大学硕士学位,研究方向为控制理论与控制工程。

师佳,男,汉,厦门大学副教授,博士学位,研究方向为化学化工。

- 1.3.1 完全绝热且不考虑锅壁热容;
  - 1.3.2 锅内罐头不与冷凝水接触;
  - 1.3.3 锅内空气与水蒸汽完全混合,不存在温度梯度;
  - 1.3.4 罐头内空气与水蒸汽完全混合,不存在温度梯度;
  - 1.3.5 通入的空气不含水蒸气;
- 在灭菌锅内,由于同时存在空气、水蒸汽、水三种物质。根据质量和能量守恒原理可得如下方程:

动态模型部分:

$$\frac{dm_a}{dt} = F_{a,i} - F_{a,o} \quad (1)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = F_{s,i} - F_{s,o} - \Psi \quad (2)$$

$$\frac{dm_w}{dt} = F_{w,i} - F_{w,o} + \Psi \quad (3)$$

$$\frac{dE_{all}}{dt} = E_{a,i} + E_{s,i} + E_{w,i} - E_{g,o} - E_{w,o} \quad (4)$$

$$\frac{dE_w}{dt} = E_{w,i} - E_{s-w} + \Phi - E_{w,o} \quad (5)$$

其中  $m_a, m_s, m_w$  分别为高压锅内干空气、水蒸气、液态水的质量,  $\Psi$  代表水蒸气冷凝速率,是指灭菌锅内水蒸气冷凝成为液态水的速率,  $\Phi$  为灭菌锅气液两相传递的能量,  $E_{a,i}, E_{s,i}, E_{w,i}$  分别为干空气、高温水蒸气、冷却水带入的热焓,  $E_{g,o}, E_{w,o}$  分别为高压锅排气阀、排水阀带出热焓,  $E_{s-w}$  为水蒸气液态水之间传递的热焓。当  $\Psi > 0$  时,水蒸气冷凝为液态水,所带入热焓为  $E_{s-w} = \Psi H_w(T_g)$ , 当  $\Psi < 0$  时,液态水蒸发为水蒸汽,所带出热焓为  $E_{s-w} = \Psi H_w(T_w)$ 。

静态模型部分:

$$\Psi = k_{s-w}(m_s - m_s^{eq}) \quad (6)$$

$$m_s^{eq} = \frac{P_s^{eq} V_g M_w}{R_s T_g} \quad (7)$$

$$P_s^{eq} = \exp\left(A - \frac{B}{T_g - C}\right) \quad (8)$$

$$V_g = V - \frac{m_w}{\rho_w} \quad (9)$$

$$\Phi = k_{sw} S(T_g - T_w) \quad (10)$$

$$E_{a,i} = F_{a,i} H_a(T_{a,s}) \quad (11)$$

$$E_{s,i} = F_{s,i} H_s(T_{s,s}) \quad (12)$$

$$E_{w,i} = F_{w,i} H_w(T_{w,s}) \quad (13)$$

$$E_{g,o} = E_{a,o} + E_{s,o} = F_{a,o} H_a(T_g) + F_{s,o} H_s(T_g) \quad (14)$$

$$E_{w,o} = F_{w,o} H_w(T_w) \quad (15)$$

$$E_{s-w} = \Psi H_w(T_g) \quad (16)$$

其中  $m_s^{eq}$  表示在当前状态下与灭菌锅内的水保持平衡的饱和水蒸气应有的质量。当  $m_s > m_s^{eq}$  时,锅内水蒸气过饱和,它将冷凝为液态水使之趋于饱和状态,有冷凝速率方程:  $\Psi = k_{s-w}(m_s - m_s^{eq})$ ; 反之,当  $m_s < m_s^{eq}$  时,液态水转化为水蒸汽,有  $\Psi = k_{w-s}(m_s - m_s^{eq})$ 。其余参数说明请参见附表。

由于高温高压灭菌锅是通过向锅内不断注入高压空气、高压水蒸汽、高压干空气和冷却水获取能量,同时它也通过排气阀门和排水阀门排出能量,因此,在对锅内能量进行恒算时,可从总能量和液相能量两个方面进行恒算。

恒算模型部分:

$$E_w = m_w H_w(T_w) \quad (17)$$

$$E_g = E_{all} - E_w = m_a H_a(T_g) + m_s H_s(T_g) \quad (18)$$

执行机构部分

动态模型部分

$$u_k = \frac{1}{\tau k_s + 1} u_{k,r} \quad \text{其中 } k=a, s, w, (g, o), (w, o) \quad (19)$$

静态模型部分

$$F_{k,i} = k_k f_k(u_k) \sqrt{P_{k,s} - P_g} \quad \text{其中 } k=a, s, w \quad (20)$$

$$F_{g,o} = F_{a,o} + F_{s,o} = k_g f_g(u_g) x_a \sqrt{P_g - P_o} + k_g f_g(u_g) x_s \sqrt{P_g - P_o} \quad (21)$$

$$F_{w,o} = k_{w,o} f_{w,o}(u_{w,o}) \sqrt{P_g + P_w - P_o} \quad (22)$$

待辨识的参数有  $k = (k_a, k_s, k_w, k_{g,o}, k_{w,o})$  初值  $k_0 = (1.0; 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$

罐头模型部分

在灭菌锅内,罐头是灭菌锅产品的载体。罐头只与锅内的气相部分进行能量交换但与灭菌锅无物质间的交换。罐头模型也可分为物质衡算模型及能量衡算模型两部分。

罐头内的物质衡算

假定在罐头内,同时存在空气、水蒸汽和水三种物质,但由于罐头是密闭的,不与外界进行物质交换,同时经过大量的实验表明,罐头内只存在极少的水和空气,同时罐头内的空气和水在灭菌过程中基本保持一致,因此,对于罐头内部水 and 空气之间的能量交换对于整个模型影响不大,我们可以将罐头看成一个密闭实体,即只存在水。

罐头内的能量衡算

因可以将罐头看成一个只存在水的密闭实体,同时罐头总能量的变化是由与锅内气相能量之间的能量传递引起,故有罐头总能量守恒方程:

$$\frac{dE_{w,can}}{dt} = k_{w,can} S_{w,can} (T_g - T_{w,can})$$

其中,  $S_{w,can}$  表示罐头表面积。本文假设罐头为圆柱体。

综上所述,将静态模型、恒算模型及已知参数代入动态模型部分,可以得出高温高压灭菌锅参数辨识模型为:

$$\frac{dm_a}{dt} = F_{a,i} - F_{a,o} \quad (23)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = F_{s,i} - F_{s,o} - k_{s-w} \left( m_s - \frac{(e^{\frac{16.28886}{T_s-46.13}})(1-\frac{m_w}{1000})18}{8.314T_g} \right) \quad (24)$$

$$\frac{dm_w}{dt} = F_{w,i} - F_{w,o} + k_{s-w} \left( m_s - \frac{(e^{\frac{16.28886}{T_s-46.13}})(1-\frac{m_w}{1000})18}{8.314T_g} \right) \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{ad}}{dt} = & F_{a,i}(T_{a,i} - 273.15) + F_{s,i}(2018.12 + 1.75498T_{s,i}) \\ & + F_{w,i}(-1149.91 + 4.20671T_{w,i}) - F_{a,o}(T_g - 273.15) \\ & - F_{s,o}(2018.12 + 1.75498T_g) - F_{w,o}(-1149.91 + 4.20671T_w) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{dE_w}{dt} = F_{w,i}(-1149.91 + 4.20671T_{w,i}) - F_{w,o}(-1149.91 + 4.20671T_w) + k_{zw}(T_g - T_w) \quad (27)$$

$$+ k_{s-w} \left( m_s - \frac{(e^{\frac{16.28886}{T_s-46.13}})(1-\frac{m_w}{1000})18}{8.314T_g} \right) * (-1149.91 + 4.20671T_g)$$

其中待辨识的参数有  $k=(k_{s-w}, k_{sw})$ , 它们的初值为  $k_0=(10.0, 1.0)$ 。因此本文待辨识的参数为  $k=(k_{s-w}, k_{sw}, k_a, k_s, k_w, k_{g,o}, k_{w,o})$ , 且初值为  $k_0=(10.0, 1.0, 1.0; 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)$

### 2. 参数辨识方法

根据高温高压灭菌锅的系统结构在 MATLAB 中创建灭菌锅的仿真模型如图 2 所示。该图中共有五个阀门, 从上到下分别代表进干空气阀、进水蒸气阀、进水阀、排气阀及排水阀。在该系统中可测量变量主要有流量(如  $F_{a,i}, F_{a,o}$ )、温度(如  $T_g, T_w$ )及压力(如  $P_a, P_s, P_g$ )

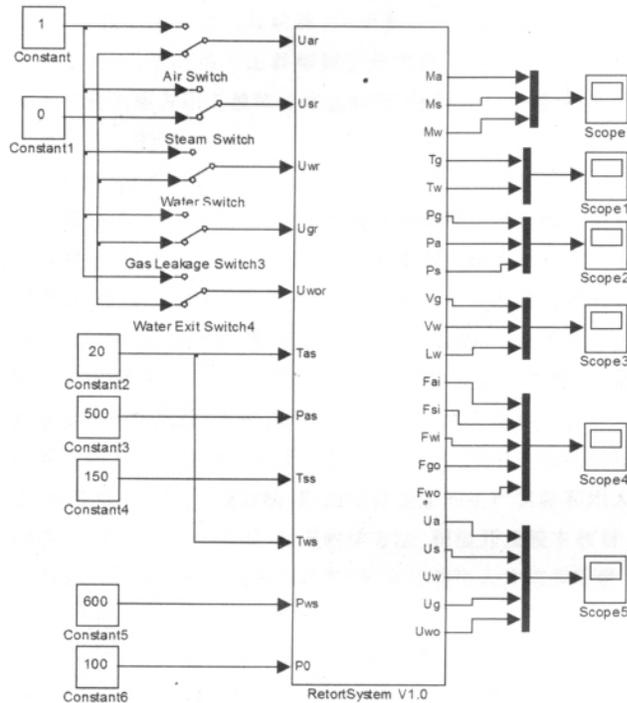


图 2 高温高压灭菌锅仿真模型

#### 2.1 辨识方法

因高压锅模型为多阶段非线性过程, 且其在升温升压阶

段各个测量量的变化较为明显, 同时考虑到模型的特殊性(因该模型不考虑锅壁热容, 在升温阶段只通水蒸气,  $T_g=T_w$ , 无法辨识  $k_{sw}$ ), 因此在升温的同时可以同时通入水(先通入一定量的水再通水蒸气也可达到该效果)使得  $T_g$  与  $T_w$  保持一定的温度差。在操作过程中则表现为将进水蒸气阀、进水阀打开, 其余三个阀门均关闭, 即流量为 0。

由高压锅参数辨识模型(式(23-27))可知, 辨识的关键问题是得出  $m_a, m_s, m_w$

将式(24)+(25)可得:

$$\frac{dm_s}{dt} + \frac{dm_w}{dt} = F_{s,i} + F_{w,i} \quad (28)$$

在高压锅初始阶段, 因  $m_{s0}=0.017089, m_{w0}=0$ , 且  $F_{s,i}, F_{w,i}$  可测, 由式(28)可得出  $d(m_s+m_w)$  采样值, 进而得出  $m_s+m_w$  值。

由式(26)可得出  $dE_{ad}$ , 因  $E_{ad}$  初始能量已知进而得到  $E_{ad}$ 。将  $E_{ad}$  代入式(18)可得:

$$m_s(2018.12 + 1.75498T_g) + m_w(-1149.91 + 4.20671T_w) - E_{ad} = 0 \quad (29)$$

将式(29)简化为:

$$Am_s + Bm_w = C \quad (30)$$

其中  $A=2018.12 + 1.75498T_g, B=-1149.91 + 4.20671T_w, C=E_{ad}$  进一步简化为  $A(m_s+m_w) + (B-A)m_w = C$ 。

因  $A, B, E_{ad}, m_s+m_w$  已知, 可得:

$$Cm_w = F \quad (31)$$

由式(31)可得出  $m_w$ , 因  $m_s+m_w$  已知, 进而可得到  $m_s$ 。

辨识结果:

通过大量的实验发现直接对采集到的输入输出数据进行参数辨识, 结果与设定值有较大的偏差, 因而对数据进行除噪, 剔除奇异点以及进行一定的归一化处理, 处理后辨识出来的结果与参数设定值间的偏差在工业允许的范围。参数辨识结果如表一所示。

表一

参数	设定值	辨识结果
$k_{s-w}$	10.0	9.8547
$k_{sw}$	1.0	1.0198
$k_a$	1.0	
$k_s$	1.0	
$k_w$	1.0	
$k_{g,o}$	1.0	
$k_{w,o}$	1.0	

### 3 结论

本文基于高温高压灭菌锅系统模型, 利用非线性参数辨识方法辨识了模型中的所有参数, 对下一步研究高压锅内罐模型奠定了一定的基础。通过大量的实验及其仿真结果表明, 本文所辨识的参数结果与参数设定值基本一致, 验证了高温高压模型的可靠性, 参数辨识算法是正确的。

附录

本文中有关变量、符号的物理意义如下:

$P_{a,s}$ : 高压干空气压力(KPa)  $P_{a,s}$ : 高温水蒸气压力(KPa)

$P_{w,s}$ : 冷却水压力(KPa)  $T_{a,s}$ : 高压干空气温度(293.15K)

$T_{s,s}$ : 高温水蒸气温度(423.15.15K)  $T_{w,s}$ : 冷却水温度(293.15 K)

A:安托尼方程常数(16.28886)      B:安托尼方程常数(3816.44)

C:安托尼方程常数(46.13)       $P_s^{eq}$ :饱和蒸汽压力(KPa)  
 $V$ :高压锅体积( $M^3$ )       $V_g$ :锅内气相体积( $M^3$ )  
 $M_w$ :水摩尔质量(18 kg/kmol)       $R_g$ :气体常数(8.314)  
 $V_{g,i}$ :锅内气相温度(K)       $\rho_w$ :液态水密度(1000kg/ $M^3$ )  
 $\Phi$ :气相到液相能量传递速率(kJ/s)      S:高压锅横截面

积( $M^2$ )  
 $T_w$ :锅内液相温度(K)       $H_a(T)$ :空气热焓函数(kJ/kg)  
 $H_s(T)$ :水蒸气热焓函数(kJ/kg)       $H_w(T)$ :液态水热焓函数(kJ/kg)

$k_{s,w}$ :冷凝推动力常数(10.0)       $k_{w,s}$ :气相液相热传递常数(1.0)  
 $k_a:V_{a,i}$  阀门特性常数(1.0)       $k_s:V_{s,i}$  阀门特性常数(1.0)  
 $k_w:V_{w,i}$  阀门特性常数(1.0)       $k_{g,o}:V_{g,o}$  阀门特性常数(1.0)  
 $k_{w,can}$ :罐头液相传热系数  
 $k_{w,o}:V_{w,o}$  阀门特性常数(1.0)       $\tau_k:V_{k,i}$  阀开度动态时间常数(k=a,s,w)

$k_{g,o}:V_{g,o}$  阀开度动态时间常数       $\tau_{w,o}:V_{w,o}$  阀开度时间常数  
 $u_{k,i}:V_{k,i}$  阀开度设定信号(k=a,s,w)       $u_{(g,o)}:V_{g,o}$  阀开度设定信号

$u_{(w,o)}:V_{w,o}$  阀开度设定信号  
 论文中  $H_a(T), H_s(T), H_w(T), f_k(u_k), x_a, x_s, F_{w,o}, P_g, P_w, S_{w,can}$  计算公式如下:

$$H_a(T) = T - 273015$$

$$H_s(T) = 2018.12 + 1.75498T$$

$$H_w(T) = -1149.91 + 4.20671T$$

$f_k(u_k)$  根据阀门类型的不同, 阀门开度函数可取:

线性阀:  $f_k(u_k) = k u_k$

等百分比阀:  $f_k(u_k) = k^{u_k - 1}$

快开阀:  $f_k(u_k) = \sqrt{u}$

$$x_a = \frac{m_a}{m_a + m_s}$$

$$x_s = \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

$$F_{w,o} = k_{w,o} f_{w,o}(u_{w,o}) \sqrt{P_g + P_w - P_o}$$

$$P_g = P_a + P_s = \frac{m_a R_g T_g}{V_g M_a} + \frac{m_s R_g T_g}{V_g M_w}$$

$$P_w = \frac{m_w}{\rho_w S}$$

$$S_{w,can} = 2\pi R_{can} h_{can} + 2\pi R_{can}^2$$

【参考文献】

[1] Svante wold, Johan Trygg, Anders Berglund and Henrik Antti. Some recent developments in PLS modeling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Volume 58, Issue 2, pages 131-150, 2001.  
 [2] Fengjiao He, Ming Zhong. [New MSPQC-PLS method for the early clinic identification of commonly encountered Candida species]. *Talanta*, Volume 80 Issue 3, Pages 1210-1215, 2010.  
 [3] S. Joe Qin. [Recursive PLS algorithms for adaptive data modeling]. *Computer & Chemical Engineering*, Volume 22, Issue 4-5, Pages 151-158, 2008.  
 [4] D.I. Abu-Al-Nadi, T.H. Ismail, M.J. Mismar. [Interference suppression by element position control of phased arrays using LM algorithm]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Volume 60, Issue 2, pages 151-158, 2006.  
 [5] 康而良, 王靖, 孙力. [大型发电机突然三相短路实验数据分析和动态参数辨识]. 哈尔滨: 大电机技术, 2005.  
 [6] Ivan Gabrijel, Andrej Dobnikar. [On-line identification and reconstruction of finite automata with generalized recurrent neural networks]. *Neural Networks*, Volume 16, Issue 1, Pages 101-120, 2003.  
 [7] F. Alonge, F.D' Ippolito, F.M. Raimondi. [Least squares and genetic algorithms for parameter identification of induction motors]. *Control Engineering Practice*, Volume 9, Issue 6, Pages 647-657, 2001.  
 [8] M. Springmann, M. Kuna. [Identification of material parameters of the Rousslier model by non-linear optimization]. *Computational Materials Science*, Volume 26, Pages 202-209, 2003.