

罐头食品蒸汽灭菌过程的数学建模与仿真

龚哲衍, 曹志凯, 周华, 江青茵, 师佳
(厦门大学 化学化工学院, 厦门 361005)



摘要: 食品加工中的罐头食品蒸汽灭菌过程是一种典型的多阶段间歇式生产过程。针对该过程, 从物质守恒和能量守恒两方面, 建立起通过热传递而相互关联的灭菌锅系统模型和罐头系统模型, 而两者又构成了灭菌系统完整的数学模型。在此模型基础上进行了整个过程的仿真计算。通过对仿真结果与实验数据的对比, 验证了所建模型的有效性。该模型为研究该类生产过程的优化控制策略提供了一个有效的模拟和测试平台。

关键词: 灭菌过程; 过程建模; 过程仿真; 间歇过程

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2013) 10-2492-07

Modeling and Simulation for Sterilization Process of Canned Food

GONG Zhe-yan, CAO Zhi-kai, ZHOU Hua, JIANG Qing-yin, SHI Jia

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In the food industry, the sterilization of canned food is a typical multi-stage batch process. *The mathematical models of the retort system and the can system were proposed on the basis of mass and energy conservation. The dynamical model of sterilization process was composed of these two subsystems which were connected by heat transfer. With the simulation of whole model, not only the accuracy of the mathematical model was demonstrated, but also an effective platform for testing was provided for the optimization and controller design for such production processes.*

Key words: sterilization process; process modeling; process simulation; batch processes

引言

现代工业生产模式大致可分为连续型和间歇型两种。随着全球市场竞争的日益加剧, 具有投资小、生产方式灵活的间歇型生产方式在现代工业中占有了越来越重要的地位。在现代工业生产中, 间歇型生产模式多用于高附加值产品的生产和加工过程, 典型的如精细化工品生产、集成电路生产、食品加工以及生物制药等^[1]。近几年, 针对间歇过程的各种探究在不断深入^[2], 这对于揭示间歇过程的特点, 进而研究并提高间歇型生产过程的各项性能指标,

达到优化产品质量的目的具有重要意义。

灭菌过程是现代食品、制药及发酵工业中一个典型的生产环节^[3]。它在很大程度上决定了产品的生产质量, 同时也是影响企业成本和生产效率的关键一环。目前, 对工业生产中的灭菌过程, 在实际生产过程的操控方面, 多数操作仍然依靠工人的操作经验。人工操作往往造成产品质量波动较大, 并存在一定安全隐患, 同时也不便于对整个生产过程进行优化和管理。如果能针对蒸汽灭菌生产过程建立数学模型并进行计算机仿真, 就可以测试不同操作条件对灭菌产品质量的影响, 也可以进行生产自动化控制系统设计及过程优化方面的研究, 从而使得该生产过程更加安全、迅速、有序、和节能。目前, 国内外对于食品灭菌过程的建模与系统仿真的报道不多且不全面, 在国内的研究文献中, 并没有发现对该生产过程的报道。在国外的文献中, 虽已涉及灭菌过程的建模和仿真研究^[4,5], 但往往只是对灭菌过程中的一个或几个阶段进行考虑, 缺乏对整个灭菌流程全面的数学建模和系统仿真^[6-8], 这使得

收稿日期: 2010-10-20 修回日期: 2011-01-25
基金项目: 国家自然科学基金(61174093); 中央高校基本科研业务费专项资金(2010121047)
作者简介: 龚哲衍(1986-), 男, 福建, 硕士生, 研究方向为化工过程仿真与控制; 曹志凯(1964-), 男, 福建, 硕士, 副教授, 研究方向为化工过程建模与优化; 周华(1976-), 男, 湖南, 博士, 助教, 研究方向为过程系统工程; 江青茵(1955-), 女, 福建, 硕士, 教授, 研究方向为流程工业过程与控制; 师佳(1972-), 男, 四川, 博士, 副教授, 研究方向为先进过程控制、系统建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2492 •

模型缺乏完整性和适用性, 影响到后续对该过程的系统仿真、控制及优化方面的理论研究。

对罐头食品蒸汽灭菌过程进行数学建模的难点在于: 该系统具有相互关联的两个子系统——灭菌锅子系统和罐头子系统, 每个子系统内部都包含汽液两相复杂的物质传递和能量传递现象, 同时两个子系统之间以及系统与外部环境之间也存在能量交换, 这使得整个系统的动态特性较为复杂, 要准确反映过程的动态, 建模中就必须考虑到所有影响过程动态变化的关键因素。本文针对罐头的高压灭菌这一实际生产过程, 基于物质衡算和能量衡算原理, 建立了较为完整的灭菌生产过程动态数学模型。该模型通过热传递相互关联的灭菌锅子系统模型和罐头子系统模型共同构成, 并同时包括了系统中执行装置——调节阀的动态模型, 这使得整个模型不仅能够完整反映生产过程的动态, 还能够模拟各种操作条件变化对生产过程的影响。通过对比实验数据与模型计算结果, 证明了该模型能够较好地反映实际生产过程的动态性能。利用该模型建立的整个生产过程仿真系统, 不仅对全面了解实际工业生产的特性具有重要意义, 同时也为后续自动控制系统的的设计以及生产过程的优化研究奠定了良好的基础。

1 高压蒸汽灭菌锅系统与灭菌过程

1.1 罐头蒸汽灭菌锅系统的组成

罐头食品加工工业中的高压蒸汽灭菌系统组成如图 1 所示。该系统主要由高压灭菌容器和五个实现控制操作的阀门构成。高压灭菌容器是一个密闭的承压容器, 能够容纳需要灭菌的罐头产品。五个操作阀中的三个 $V_{s,i}$ 、 $V_{a,i}$ 和 $V_{w,i}$ 为进料阀, 主要用于控制进入容器内的高温水蒸汽、压缩空气和冷却水的流量, 另外两个阀门 $V_{g,o}$ 和 $V_{w,o}$ 为出料阀, 分别用于排气减压和排水。通过对这五个控制阀的操作, 可以调节容器及罐头内的温度、压力等生产过程参数, 实现高温灭菌的生产目的。

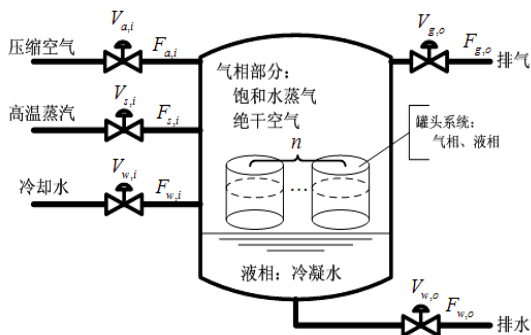


图 1 间歇式高压蒸汽灭菌锅系统示意图

1.2 灭菌过程

工业生产中, 罐头食品的蒸汽灭菌过程是一个典型的多阶段间歇型生产过程, 对于一批罐头产品的高温灭菌一般分为以下六个操作阶段:

第一阶段: 罐头制品的填装阶段。即将待灭菌的罐头制品装入灭菌承载容器内, 然后密闭。

第二阶段: 升温排气阶段。该阶段需要同时打开蒸汽阀 $V_{s,i}$ 和排气阀 $V_{g,o}$, 通过通入高温高压饱和蒸汽, 对容器内的罐头进行加热并迅速排出容器内的大部分绝干空气, 防止蒸汽—空气混合物影响灭菌过程的热传递效率^[9]。

第三阶段: 加压升温阶段。当容器内的空气含量低于某一规定值后, 关闭排气阀 $V_{g,o}$, 继续通入高温高压蒸汽进行加热升温, 直到温度达到预定的灭菌温度。

第四阶段: 恒温灭菌阶段。这一阶段通过调节高温高压蒸汽流量来维持容器内气相部分恒定于规定的灭菌温度, 直至达到理想的灭菌效果。由于不同类型的食品罐头具有不同的灭菌指标要求, 要求的灭菌温度和灭菌时间都不尽相同。为了保证灭菌质量, 该阶段需要对容器内的温度进行严格控制, 如果实际温度低于规定的灭菌温度, 可能达不到理想的灭菌效果; 若高于规定的灭菌温度, 则可能破坏食品的营养成分。因此恒温灭菌阶段是整个生产过程的关键阶段, 它不仅决定着罐头产品加工质量, 也是影响生产效能的一个关键阶段。

第五阶段: 降温减压阶段。在完成恒温灭菌过程后, 需要对罐头进行降温减压。该阶段需要通入冷却水来快速降低容器内气相的温度, 由于温度的迅速降低会造成锅内气相压力的迅速下降, 为了维持罐头内外的压力平衡, 避免罐头产品爆裂和变形, 该阶段需要同时调节排气阀 $V_{g,o}$ 和高压空气阀 $V_{a,i}$ 来实现安全、高效的降温减压操作, 以最终实现低温常压下的开锅取物。

第六阶段: 开锅取物阶段。即在低温常压下开启灭菌锅, 取出完成灭菌的罐头制品, 并排除锅内的冷凝水, 为下一批次的罐头灭菌过程做好准备。

完整的罐头食品高温灭菌过程可用图 2 所示的流程表示, 其中第三、四、五生产阶段为加工过程的关键阶段。为了保证生产过程的安全和产品质量, 同时实现最高的生产效率和最低的生产能耗, 就需要对这三个生产阶段中的关键过程变量进行严格控制和优化。而要进行对生产过程控制和系统优化的研究, 首先应对灭菌过程建立有效的数学模型和仿真平台。

2 高压蒸汽灭菌过程的数学建模

2.1 高压蒸汽灭菌过程中的物质与能量传递

虽然蒸汽灭菌过程中不存在需要考虑的化学反应现

象,但在不同生产阶段,都存在着复杂的物态变化和能量转移现象,其中较为复杂的是水蒸汽的冷凝和蒸发现象,以及由此而造成的物质和能量转移,这种复杂的物质和能量转移是造成生产过程关键变量——压力和温度变化的主要因素。图 3 为高压蒸汽灭菌过程中所涉及的物相和物质能量转移示意图。为了保证建模精度,在每一个生产阶段都需要对可能存在的物质和能量转移现象进行深入分析和建模。

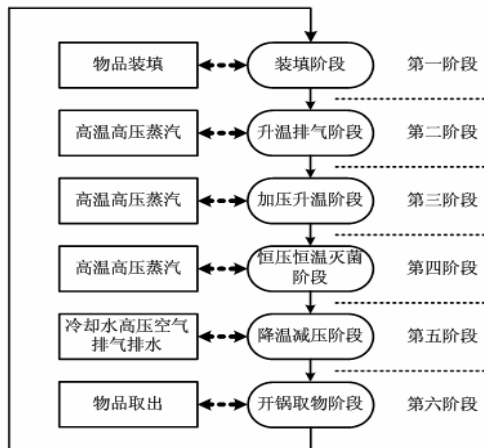


图 2 罐头高压蒸汽灭菌过程流程图

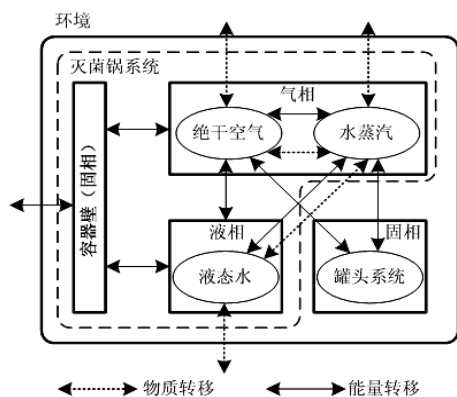


图 3 高压蒸汽灭菌过程物质与能量转移示意图

2.2 建模假定

为了在建模过程中对物质和能量转移过程进行统一描述,同时突出过程的主要特性,忽略次要因素,本文在对蒸汽灭菌过程的建模中考虑如下假定条件:

1. 模型不考虑锅壁热容。
2. 任意时刻气液两相内部不存在温度梯度。
3. 任意时刻锅内及罐头内的水蒸汽均处于饱和状态。

采用假定条件 1 是因为锅壁热容在生产各阶段都是次要因素,对过程动态特性影响不大。采用假定 2 是为了避免建立复杂的分布参数模型,保证后续模型仿真计算具有适当的计算复杂度。采用假定 3 是因为灭菌过程的各生产阶段气相中的水蒸汽都相对处于过剩状态。

要因素,对过程动态特性影响不大。采用假定 2 是为了避免建立复杂的分布参数模型,保证后续模型仿真计算具有适当的计算复杂度。采用假定 3 是因为灭菌过程的各生产阶段气相中的水蒸汽都相对处于过剩状态。

2.3 灭菌锅过程的数学建模

基于上述假定,灭菌过程的建模又分为灭菌锅子系统建模和罐头子系统建模两部分展开。这两部分子系统模型通过简单的能量传递联系,并构成整个系统的动态模型。在下面建模过程中,未予以说明的符号意义请参见模型变量及参数列表 1。

表 1 系统模型变量及参数表

符号	符号说明	参数值	单位
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	
M_w	水摩尔质量	18	kg/kmol
P_o	常压	101.325	kPa
Q	热焓		kW
R	灭菌锅半径	0.3	m
R'	罐头半径	0.1	m
R_g	摩尔气体常数	8.314	kJ/(kmol·K)
T_o	常温	298.15	K
h	灭菌锅高度	1	m
h'	罐头高度	0.2	m
h_c	对流传热系数	0.00483	kW·m ⁻² ·K ⁻¹
k'_1, k'_2	罐头热传递系数	23	kW·m ⁻² ·K ⁻¹
k_a, k_s, k_g	空气阀, 蒸汽阀, 排气阀的特性系数	0.35	
k_{sw}, k'_{sw}	气液相热传递系数	0.1	kW·m ⁻² ·K ⁻¹
k_{s-w}, k'_{s-w}	蒸发冷凝系数	0.8	s ⁻¹
k_w	冷却水阀的特性系数	0.05	
$k_{w,o}$	排水阀的特性系数	0.167	
ρ_w	液态水密度	1000	kg/M ³
θ	斯坦芬—波尔兹曼常数	5.68×10 ⁻¹¹	kW·m ⁻² ·K ⁻¹
ε	灭菌锅的热辐射系数	0.94	

注:符号中下标 a 表示空气组分; g 表示气相; s 表示水蒸汽; w 表示液态水; i 代表进料; o 代表出料。

2.3.1 灭菌锅子系统建模

(1) 质量衡算

在灭菌锅内,同时存在绝干空气、水蒸汽、水三种物质,在符号描述中分别用下标 a, s, w 表示。根据质量守恒原理可得如下方程:

· 空气质量(m_a)衡算:

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

· 水蒸汽质量(m_s)衡算:

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

· 液态水质量(m_w)衡算:

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

式(1)(2)中的符号 F 代表质量流量, 第二下标 i, o 分别标注流入和流出物。方程(2)、(3)中的 Ψ 为锅内水蒸汽的冷凝速率或高温下液态水的蒸发速率, 该变量根据水蒸汽的饱和平衡原理按如下公式计算:

$$\Psi = \begin{cases} k_{s-w}(m_s - m_s^{eq}), & m_s > m_s^{eq} \\ k_{w-s}(m_s - m_s^{eq}), & m_s < m_s^{eq} \end{cases} \quad (4)$$

其中, k_{s-w} 和 k_{w-s} 分别为蒸发和冷凝系数, m_s^{eq} 代表某一温度下的平衡饱和蒸汽质量, 根据下式计算:

$$m_s^{eq} = \frac{P_s^{eq} V_g M_w}{R_g T_g} \quad (5)$$

$$V_g = V - \frac{m_w}{\rho_w} \quad (6)$$

$$P_s^{eq} = \exp\left(A - \frac{B}{T_g - C}\right) \quad (7)$$

其中, 式(7)是气相温度为 T_g 时计算饱和平衡蒸汽压的安东尼方程, (6)式为灭菌容器内气相体积的计算公式, 而方程(5)为理想气体方程。计算式(4)表明: 当水蒸汽质量大于平衡饱和蒸汽质量时(即 $m_s > m_s^{eq}$ 时), 锅内水蒸汽处于过饱和状态, 水蒸汽将冷凝为液态水, 使之趋于饱和状态; 当水蒸汽质量小于平衡饱和蒸汽质量时(即 $m_s < m_s^{eq}$ 时), 表明锅内水蒸汽未到饱和, 液态水将发生蒸发现象。本文假设灭菌容器为圆柱状, 总体积 V 按下式计算:

$$V = \pi R^2 h \quad (8)$$

在方程(1-3)中的压缩空气, 水蒸汽和水的质量流量 $F_{a,i}, F_{s,i}, F_{w,i}$ 分别由对应的进料阀 $V_{a,i}, V_{s,i}$ 和 $V_{w,i}$ 控制, 可由阀门的特性方程来统一描述:

$$F = kf(u)\sqrt{\Delta p_u} \quad (9)$$

其中, Δp_u 为阀门两端物料的压差, u 为阀门实际开度, $f(u)$ 为阀门开度函数, 若采用线性阀, 可按下式计算:

$$f(u) = u \quad (10)$$

为了模拟实际生产系统中阀门的动态特性, 仿真中阀门的实际开度 u 与给定开度信号 u_r 之间的动态特性采用如下—阶传递函数近似描述:

$$u = \frac{1}{\tau s + 1} u_r \quad (11)$$

(2) 能量衡算

容器内总能量的变化为进入容器的物质带入的能量减去转移出去的能量, 故有:

· 总能量(E_{all})衡算:

$$\frac{dE_{all}}{dt} = Q_{a,i} + Q_{s,i} + Q_{w,i} - Q_{g,o} - Q_{w,o} - Q_{rad} - Q_{conv} \quad (12)$$

其中, $Q_{a,i}, Q_{s,i}, Q_{w,i}$ 分别代表单位时间内压缩空气、高温蒸汽和冷却水带入容器内的热焓, $Q_{g,o}, Q_{w,o}$ 分别为单位时间排气和排水带出容器的热焓。所有物质热焓的计算公式如下:

$$Q = FH(T) \quad (13)$$

上式中 $H(T)$ 为物质热焓函数, 在 273.15K~423.15K 之间, 空气、高温饱和蒸汽以及水三种物质的热焓函数可利用《化学化工物性数据手册》^[10] 中的物性数据采用回归拟合方式得到, 分别为:

· 空气热焓函数:

$$H_a(T) = T - 273.15 \quad (14)$$

· 水蒸汽热焓函数:

$$H_s(T) = 2018.12 + 1.75498T \quad (15)$$

· 液态水热焓函数:

$$H_w(T) = -1149.91 + 4.20671T \quad (16)$$

式(12)中, Q_{rad} 代表辐射传热损失热焓, 根据辐射传热方程有:

$$Q_{rad} = \theta \varepsilon [S_g(T_g^4 - T_0^4) + S_w(T_w^4 - T_0^4)] \quad (17)$$

Q_{conv} 代表对流传热损失热焓, 可按下式计算:

$$Q_{conv} = h_c [S_g(T_g - T_0) + S_w(T_w - T_0)] \quad (18)$$

式(17)和(18)中的 T_0 代表环境温度, S_g 和 S_w 分别为灭菌锅内处于气相部分和液相部分的锅壁面积, 计算公式如下:

$$S_g = \pi R^2 + 2\pi Rh - \frac{2m_w}{\rho_w R} \quad (19)$$

$$S_w = \pi R^2 + \frac{2m_w}{\rho_w R} \quad (20)$$

为了反映容器内液相和气相之间的能量传递分量, 还需要建立液相或气相的能量守恒方程, 由于液相成分简单, 故考虑建立液相能量守恒方程。

· 液相能量(E_w)衡算:

$$\frac{dE_w}{dt} = Q_{w,i} + Q_{s-w} + \Phi - Q_{w,o} \quad (21)$$

其中, $Q_{w,i}$ 和 $Q_{w,o}$ 分别为冷却水带入和带出热焓, 由公式(13)计算, Q_{s-w} 表示液态水蒸发或水蒸汽冷凝造成的热焓转移, 计算公式为:

$$Q_{s-w} = \begin{cases} \Psi H_w(T_g), & \Psi \geq 0 \\ \Psi H_w(T_w), & \Psi < 0 \end{cases} \quad (22)$$

上式中, $\Psi \geq 0$ 表示水蒸汽冷凝为液态水, 为带入热焓, 而 $\Psi < 0$ 表示液态水蒸发为水蒸汽, 为带出热焓。式(21)中的 Φ 代表气液两相间的表面能量传递, 计算公式为:

$$\Phi = k_{sw} S(T_g - T_w) \quad (23)$$

其中, k_{sw} 为热传递系数, S 为气液两相的接触面积, 可近似为灭菌容器的横截面积 πR^2 。

根据能量守恒原理可知: 容器内部的总能量等于灭菌锅内气相能量 E_g 、锅内液相能量 E_w 以及罐头的能量 E_{all} 之和, 故有:

· 气相能量衡算:

$$E_g = E_{all} - E_w - E'_{all} = m_a H_a(T_g) + m_s H_s(T_g) \quad (24)$$

根据此平衡方程, 结合式(14)(15)可导出容器内气相温度 T_g 的计算公式:

$$T_g = \frac{E_{all} - E_w - E'_{all} + 273.15m_a - 2018.12m_s}{m_a + 1.75498m_s} \quad (25)$$

此外, 由液相能量的计算公式

$$E_w = m_w H_w(T_w) \quad (26)$$

可得液相温度 T_w 的计算公式为:

$$T_w = \frac{0.2377E_w}{m_w} + 273.15 \quad (27)$$

2.3.2 罐头子系统建模

由于罐头子系统只与灭菌锅内的气相部分接触并进行能量交换^[7]。为了简化计算, 假设在罐头内只存在空气、水蒸汽和水三种物质。下面仍从罐头内的物质质量衡算与能量衡算两方面对罐头系统进行建模。

(1) 质量衡算

由于罐头是密闭的, 不与外界进行物质交换, 所以罐头内空气的质量将维持不变, 在建模时, 只需从水蒸汽和水两方面考虑物质的守恒和转移。

· 罐头内水蒸汽质量(m'_s)衡算:

$$\frac{dm'_s}{dt} = -\Psi' \quad (28)$$

· 罐头液态水质量(m'_w)衡算:

$$m'_w = m'_{w0} - m'_s + m'_{s0} \quad (29)$$

其中 m'_{w0} 、 m'_{s0} 分别为罐头内液相水初始质量和水蒸汽初始质量, Ψ' 为罐头内水(水蒸汽)的蒸发(冷凝)速率, 该过程变量的定义与计算方法与式(4)中的 Ψ 类似。

(2) 能量衡算

罐头子系统总能量的变化是由罐头与锅内气相之间的能量传递引起, 假设锅内有 n 个罐头, 故有:

· 总能量衡算:

$$\frac{dE'_{all}}{dt} = n[k'_1 S'_g (T_g - T'_g) + k'_2 S'_w (T_g - T'_w)] \quad (30)$$

其中, k'_1 和 k'_2 分别表示罐头内气相与液相部分与灭菌锅内气相部分之间的平均热传导系数, S'_g 和 S'_w 分别代表罐头内气相与液相部分与罐头壁的接触面积, 其定义和计算方法与式(18)中的 S_g 和 S_w 类似。

· 液相能量(E'_w)衡算:

$$\frac{dE'_w}{dt} = n[k'_2 S'_w (T_g - T'_w) + Q'_{s-w} + \Phi'] \quad (31)$$

其中, Q'_{s-w} 为罐头内部汽相(液相)水冷凝(蒸发)造成的热焓转移, Φ' 代表罐头内气液两相间的热传递, 这两个过程变量的定义与计算方法分别与式(21)中的 Q_{s-w} 和 Φ 类似。

由于罐头内部的总能量等于罐头内的气相能量 E'_g 和液相能量 E'_w 之和, 故有:

· 气相能量(E'_g)衡算:

$$E'_g = E'_{all} - E'_w = m'_a H_a(T'_g) + m'_s H_s(T'_g) \quad (32)$$

根据该平衡关系式可计算出罐头内气相的温度 T'_g :

$$T'_g = \frac{E'_{all} - E'_w + 273.15m'_a - 2018.12m'_s}{m'_a + 1.75498m'_s} \quad (33)$$

同样, 由

$$E'_w = m'_w H_w(T'_w) \quad (34)$$

可计算出罐头内液相温度 T'_w :

$$T'_w = \frac{0.2377E'_w}{m'_w} + 273.15 \quad (35)$$

2.3.3 模型小结

本节对蒸汽灭菌过程中的灭菌锅子系统和罐头子系统分别从物质衡算和能量衡算两个方面建立了过程的数学模型, 其中式(1)(2)(3)(12)(21)以及(28)(30)(31)共同构成了灭菌过程的动态模型, 而式(25)(27)和(33)(35)则共同构成了过程的静态模型部分, 灭菌锅子系统与罐头子系统通过衡算关系式(24)发生关联。从建模过程不难看出, 建模中不仅考虑了灭菌锅内部物质和能量的转移, 同时还考虑了环境对过程的影响。此外, 模型中还对系统执行机构——阀门可能存在的动态特性进行了近似建模, 这使所得模型更加完整, 更符合真实的蒸汽灭菌生产过程, 这为后续对灭菌过程动态特性仿真和分析研究奠定了良好的基础。

3 蒸汽灭菌过程的模型仿真

本节将利用上一节所建立的数学模型对高温蒸汽灭菌过程进行计算机仿真。仿真的作用在于:

· 验证模型的合理性。

· 考察并分析不同阶段、不同条件下灭菌过程中各关键过程变量的动态变化特性。

· 为后续的控制系统设计建立仿真测试平台。

为了验证模型的合理性, 在进行模型仿真之前, 需要选择合理的模型参数, 使模型尽可能符合真实灭菌过程。在参考相关文献[5-7]实际工业数据的基础上, 选择了灭菌锅及罐头的半径及高度等参数值, 通过比对不同参数设置下的仿真结果与实际工业数据, 确定出了合理的阀门特性

系数 k 、罐头传热系数 k'_1, k'_2 、饱和蒸汽的蒸发冷凝系数 k_{s-w}, k_{w-s} 以及气液相热传递系数 k_{sw}, k'_{sw} , 详见表 1。根据实际实验数据的操作条件, 图 4-图 6 给出相同操作条件下实际实验数据曲线和模型仿真曲线的对比。

对比图 4 和图 5 中的模型仿真结果和实际实验数据可以看出: 仿真曲线与实验曲线具有相同的动态变化趋势, 同时在初始条件一致的情况下, 仿真数据与实验数据较为接近, 这表明仿真模型具备较高的精确度, 能够较好地模拟出实际过程的动态变化特性。

图 6 是在更加复杂工况下的仿真对比, 模拟的是降温减压阶段通入冷却水后, 灭菌锅内温度和压力的变化情况。从图(a)的压力变化曲线可以看出, 在冷却水进入灭菌锅后, 仿真曲线能够较好地模拟出初期压力迅速下降的情况。工业实验数据表明, 由于压缩空气对容器内压力的补偿作用, 压力下降一段时间后反而呈现出上升趋势, 这种动态变化在仿真结果中也得到了适当的体现。图(b)为该冷却过程的温度变化曲线, 仿真结果比实际过程的降温速度稍慢, 这主要是模型中没有考虑锅壁热容和对系统、环境的散热因

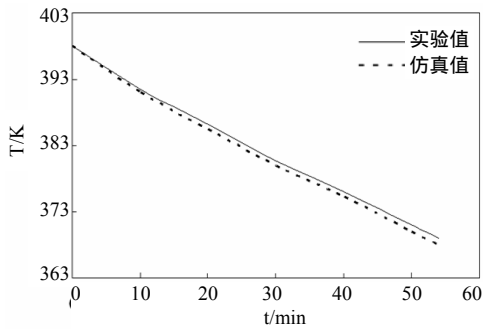


图 4 恒温灭菌阶段, 自然冷却工况下, 锅内温度实验值和模型仿真值的对比

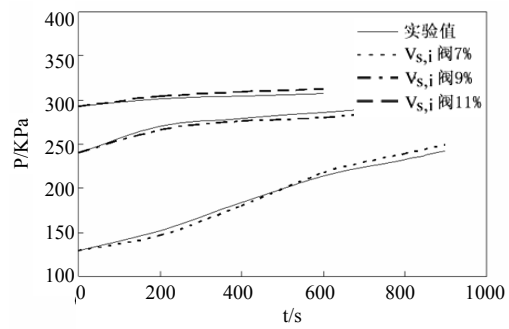
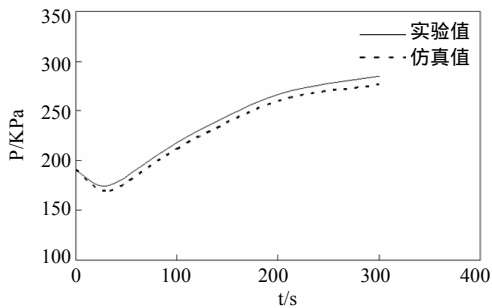
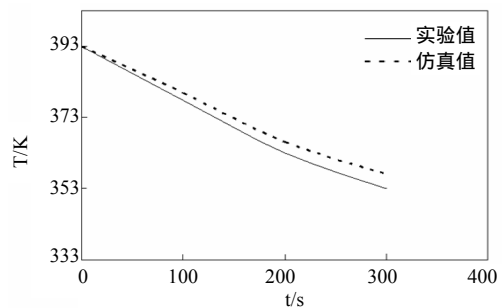


图 5 排气阀开度为 50%, 不同蒸汽阀开度下锅内压力变化实验值与仿真值的对比

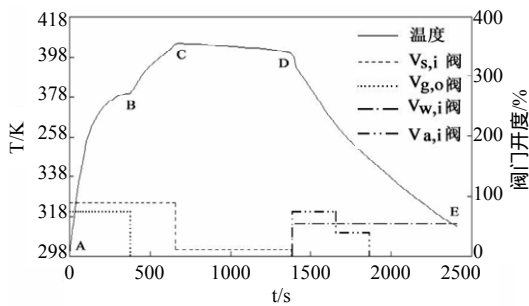


(a) 压力仿真与实验结果对比

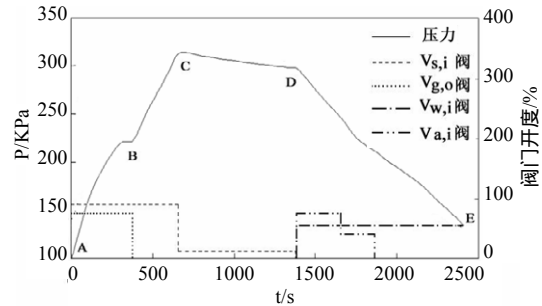


(b) 温度仿真与实验结果对比

图 6 温度 393K, 压缩空气阀和排气阀开度均为 10%, 冷却水流量为 0.2kg/s 时, 容器内压力(a)和温度(b)变化的实验值和模型仿真值的对比



(a) 温度变化曲线



(b) 压力变化曲线

图 7 一个完整批次灭菌过程的温度(a)和压力(b)的变化仿真曲线

素而造成的,但从温度变化的动态趋势考察,模型仿真结果与实验结果是一致的。

图 7 为手动操作下一个完整生产批次的气相温度和压力变化仿真曲线。从图中可以看出,AB 段为升温排气阶段,该阶段既要升温又要排气,所以工况为进气阀 $V_{s,i}$ 和排气阀 $V_{g,o}$ 同时开启;BC 段为加压升温阶段,只有进气阀 $V_{s,i}$ 开启,直到容器内气相温度达到设定值;CD 段为恒温灭菌阶段,以很小开度开启进气阀 $V_{s,i}$,以补偿散热和罐头食品升温造成的温度下降;DE 段为降温减压阶段,开启冷却水进水阀 $V_{w,i}$,进行冷却降温,同时为了补偿压力的过快下降,同时开启高压空气阀 $V_{a,i}$ 。整个操作过程中,由于采用人工手动操作,恒温灭菌阶段很难维持灭菌温度恒定,这不仅影响灭菌效果和产品质量,同时也可能带来更多的能量损失。基于本文所建仿真系统平台,可以进一步对灭菌过程进行控制系统设计及系统优化的深入研究。

从以上几个仿真实验可以看出,本文描述的数学模型具有良好的建模精度,能够近似模拟蒸汽灭菌过程的动态变化,基于该模型建立的全过程仿真平台为后续控制系统的设计及优化研究奠定了良好的基础。

4 结论

本文针对食品工业中的罐头高压蒸汽灭菌过程,从物质衡算和能量衡算两个方面建立了整个生产过程完整的数学模型。该模型是由相互关联的灭菌锅子系统和罐头子系统两部分组成的。通过模型仿真与实验结果的对比,验证

了该数学模型的有效性。该模型的建立为后续灭菌过程的控制系统设计以及操作条件优化等各项研究工作奠定了良好的模拟和测试基础。

参考文献:

- [1] 徐延卿,杨超然,魏新喜. 基于 PLC 架构的杀菌锅 DCS 控制系统设计与实现[J]. 中国仪器仪表, 2008, 27(5): 50-52.
- [2] R Simpson, C Cortes, A Teixeira. Energy consumption in batch thermal processing: model development and validation [J]. Journal of Food Engineering (S0260-8774), 2006, 73(3): 217-224.
- [3] 陈今润, 祖正荣, 程若愚. 工控组态软件在药品灭菌局控制系统中的应用[J]. 自动化仪表, 2002, 23(4): 60-62.
- [4] Peter J Fryer, Phillip T Robbins. Heat transfer in food processing: ensuring product quality and safety [J]. Applied Thermal Engineering (S1359-4311), 25(16): 2499-2510.
- [5] H M Park, W S Jung. Recursive solution of an inverse heat transfer problem in rapid thermal processing systems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer (S0017-9310), 2001, 44(11): 2053-2065.
- [6] T Miri, A Tsoukalas, S Bakalis, et al. Global optimization of process conditions in batch thermal sterilization of food [J]. Journal of Food Engineering (S0260-8774), 2008, 87(4): 485-494.
- [7] A A Teixeira, G S Toker. On-line retort control in thermal sterilization of canned foods [J]. Food Control (S0956-7135), 1997, 8(1): 13-20.
- [8] 李伟伟, 陈双叶, 余春暄. 基于 LPC2210 的嵌入式智能灭菌控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2008, 31(22): 53-56.
- [9] 屠用利. 罐头杀菌操作的控制[J]. 食品工业, 1996, 31(6): 43.
- [10] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [11] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [12] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [13] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [14] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [15] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [16] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [17] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [18] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [19] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [20] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [21] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [22] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [23] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [24] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [25] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [26] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [27] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [28] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [29] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [30] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [31] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [32] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [33] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [34] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [35] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [36] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [37] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [38] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [39] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [40] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [41] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [42] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [43] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [44] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [45] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [46] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [47] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [48] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [49] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [50] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [51] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [52] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [53] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [54] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [55] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [56] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [57] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [58] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [59] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [60] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [61] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [62] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [63] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [64] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [65] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [66] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [67] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [68] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [69] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [70] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [71] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [72] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [73] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [74] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [75] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [76] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [77] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [78] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [79] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [80] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [81] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [82] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [83] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [84] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [85] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [86] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [87] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [88] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [89] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [90] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [91] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [92] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [93] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [94] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [95] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [96] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [97] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [98] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [99] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.
- [100] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002, 3.

(上接第 2491 页)

- [4] Oikonomou V P, Tzallas A T, Fotiadis D I. A Kalman filter based methodology for EEG spike enhancement [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine (S0169-2607), 2007, 85(2): 101-108.
- [5] 吴丹, 封洲燕, 王静. 微电极阵列神经锋电位信号的去噪方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(1): 104-110. (Wu D, Feng Z Y, Wang J. Novel denoising approach to neuronal spike signals recorded by microelectrode array [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(1): 104-110. (in Chinese))
- [6] Liu X F, Yang X Q, Zheng N N. Automatic extracellular spike detection with piecewise optimal morphological filter [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2012, 79(1): 132-139.
- [7] Paralikar K J, Rao C R, Clement R S. New approaches to eliminating common-noise artifacts in recordings from intracortical microelectrode arrays: inter-electrode correlation and virtual referencing [J]. Journal of Neuroscience Methods (S0165-0270), 2009, 181(1): 27-35.

- [8] Oweiss K G, Anderson D J. Noise reduction in multichannel neural recordings using a new array wavelet denoising algorithm [J]. Neurocomputing (S0925-2312), 2001, 38-40(6): 1687-1693.
- [9] Yang R G, Ren M W. Wavelet denoising using principal component analysis [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2011, 38(1): 1073-1076.
- [10] Citi L, Carpaneto J. On the use of wavelet denoising and spike sorting techniques to process electroencephalographic signals recorded using intraneural electrodes [J]. Journal of Neuroscience Methods (S0165-0270), 2008, 172(2): 294-302.
- [11] Wan H, Liu X Y, Niu X K, et al. The design and implementation of anti-interference system in neural electrophysiological experiments [C]// Electrical Engineering and Control. Chennai, India: Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., (978-3-642-21764-7), 2011: 605-611.