

双极性频率可调高压脉冲电源的建模与仿真

Modeling and simulation of bipolar frequency adjustable high voltage pulse power supply

王 卓 李震梅 李海涛 李宗哲

WANG Zhuo LI Zhen-mei LI Hai-tao LI Zong-zhe

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of
Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

摘要:采用模块化设计,确立了同时灭除青霉菌、酵母菌、大肠杆菌 3 种菌的灭菌系统结构,分别建立了双极性方波且频率可调的高压脉冲电源和处理室等效模型。结果表明,该系统在频率为 100~1 000 Hz,脉宽为 10 μ s 稳定运行时,可输出不同峰值的多个双极性方波波形,并分别对不同的病菌进行灭菌处理;系统电源在 100 Hz 稳定运行时,可产生幅值分别为 4.417, 6.153, 9.663 kV 的 3 种脉冲;在 1 000 Hz 稳定运行时,可产生幅值分别为 4.272, 6.082, 9.393 kV 的 3 种脉冲。当处理室间距为 3 mm 时,青霉菌、酵母菌、大肠杆菌的较好处理电压峰值分别为 3.75, 6.00, 9.00 kV,故该电源稳定运行时产生的 3 种电压脉冲能够满足对青霉菌、酵母菌和大肠杆菌同时进行灭除的要求。

关键词:高压脉冲;双极性方波;频率可调;连续;多模块;低温灭菌

Abstract: In order to solve the problem that the high-pressure sterilization system cannot remove multiple strains at the same time, this article uses a modular design to establish a sterilization system structure that eliminates three strains (*Penicillium*, yeast, *Escherichia coli*), and establishes a bipolar square wave and a high-frequency pulse with adjustable frequency Equivalent model of power supply and processing room, respectively. The system can output multiple bipolar square wave waveforms with different peak values when the frequency is 100~1 000 Hz with the pulse width of 10 μ s, and can sterilize different pathogens separately. Simulation results show that the power supply can generate three pulses with amplitudes of 4.417, 6.153 and

9.663 kV, respectively, at 100 Hz stable operation, and can generate three pulses with amplitudes of 4.272, 6.082 and 9.393 kV, respectively, at 1 000 Hz stable operation. When the treatment room spacing is 3 mm, the best treatment voltage peaks of *Penicillium*, yeast, and *E. coli* are 3.75, 6.00 and 9.00 kV, respectively. Therefore, the three voltage pulses generated during stable operation of the power supply can meet the requirements for simultaneous eradication of *Penicillium*, yeast and *E. coli*.

Keywords: high voltage pulse; bipolar square wave; frequency adjustable; continuous; multi-module; low temperature sterilization

传统热灭菌技术会破坏食品中的蛋白质、维生素和酶等营养物质,故非热灭菌技术是当前的研究热点^[1-3]。高压脉冲电场灭菌具有处理温度低、处理均匀、杀菌效果好等特点^[4-6],是非热灭菌的主要技术^[7-8]。

孙学兵等^[9]提出高压脉冲电场灭菌技术分为间接式和连续式两种模式。其中,间接式不适合大规模应用;连续式杀菌可对食物进行连续不断的处理,处理时间短且适合流水线作业。由于连续灭菌的双极性方波杀菌效果好,有望成为未来高温灭菌领域应用的主要方向^[10-11]。但连续灭菌的双极性方波杀菌系统针对单一病菌,若要杀菌多种病菌,需采用多个灭菌系统进行分段式处理,步骤复杂且效率低。文章拟提出双极性频率可调高压脉冲电源,其不仅可产生双极性方波,还可以通过多模块协同的方式产生具有幅值不同、频率可调的双极性电压脉冲,分别对多种病菌进行灭菌处理,达到单个灭菌系统处理多种病菌的目的,旨在为连续型高压灭菌系统技术的开发应用提供依据。

1 高压脉冲杀菌系统设计

1.1 高压脉冲电源设计

图 1 为同时灭除 3 个菌种的灭菌系统结构图。该系

基金项目:山东省自然科学基金项目(编号:ZR2019QEE018)

作者简介:王卓,男,山东理工大学在读硕士研究生。

通信作者:李震梅(1965—),女,山东理工大学教授,硕士。

E-mail: lzm650208@126.com

收稿日期:2020-06-29

统由多模块串联,利用多个电容串联对不同处理室进行放电,具体过程:① 含菌液经过处理室一,高压脉冲电源的模块一内部电容 C_2 、 C_3 与模块二的 C_4 、 C_5 串联对处理室一放电,灭除菌种 1;② 灭除第一种菌种的含菌液进入处理室二,脉冲电源模块一内部的 C_2 、 C_3 ,模块二的 C_4 、 C_5 与模块三的 C_6 串联对处理室二放电,灭除菌种 2;③ 灭除 2 种菌种的含菌液进入处理室三,脉冲电源的模块一、模块二与模块三串联,即电容 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 串联对处理室三放电,灭除菌种 3;④ 得无菌液。

三模块高压脉冲电源如图 2 所示,若使输出信号迅速到达负载端所需脉冲幅值,要先向电容 C_0 充电(S_{u2} 断

路),当达到 C_0 额定电压时, S_{u2} 导通,三模块系统运行。三模块系统稳定工作过程分为 7 步,其开关控制时序见表 1,负载端波形周期 $T=1/f$, $t=T/2$ 。

(1) $0\sim t/6$ 时间段:IGBT 开关 S_p 、 S_{u2} 、 S_2 、 S_4 、 S_6 、 S_8 、 S_{10} 、 S_{12} 处于闭合状态,系统运行第 1 步骤, C_0 与 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 的并联模块构成回路,实现电容 C_0 向 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 充电,系统运行 $t/6$ 后, S_p 、 S_{u2} 、 S_2 断开。

(2) $t/6\sim t/3$ 时间段:IGBT 开关 S_{u1} 、 S_1 、 S_4 、 S_6 、 S_8 、 S_{10} 、 S_{12} 处于闭合状态,系统运行第 2 步骤, C_1 与 C_2 串联后与 C_3 、 C_4 的并联模块构成回路,实现电容 C_1 与 C_2 串联向 C_3 、 C_4 充电,其中 C_5 、 C_6 、 C_7 的电压大于 C_1 与 C_2 串联后的电压和,故 D_8 为断开状态,初始电源向 C_0 充电,系统运行 $t/6$ 后, S_{u1} 、 S_1 断开。

(3) $t/3\sim t/2$ 时间段:IGBT 开关 S_p 、 S_2 、 S_4 、 S_6 、 S_8 、 S_{10} 、 S_{12} 闭合,系统运行第 3 步骤, C_0 与 C_1 — C_2 的并联模块构成回路,实现电容 C_0 向 C_1 、 C_2 充电,系统运行 $t/6$ 后, S_p 、 S_2 断开。

(4) $t/2\sim 2t/3$ 时间段:IGBT 开关 S_{u1} 、 S_1 、 S_4 、 S_5 、 S_8 、 S_{10} 、 S_{12} 闭合,系统运行第 4 步骤, C_1 、 C_2 、 C_3 构成回路 I,实现 C_1 与 C_2 串联向 C_3 放电; C_3 与 C_4 串联后与 C_5 、 C_6 的并联模块构成回路 II,实现 C_3 与 C_4 串联向 C_5 、 C_6 充电; C_7 电压大于 C_3 与 C_4 串联后的电压和,故 D_{10} 处于断开状态;初始电源向 C_0 充电,系统运行 $t/6$ 后, S_u 、 S_1 断开。

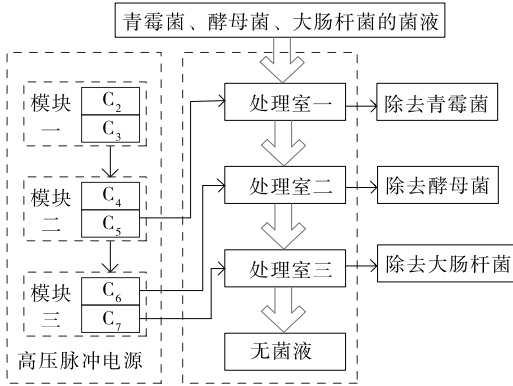


图 1 3 个菌种的灭菌系统结构图
Figure 1 Structure diagram of a sterilization system that eliminates three strains

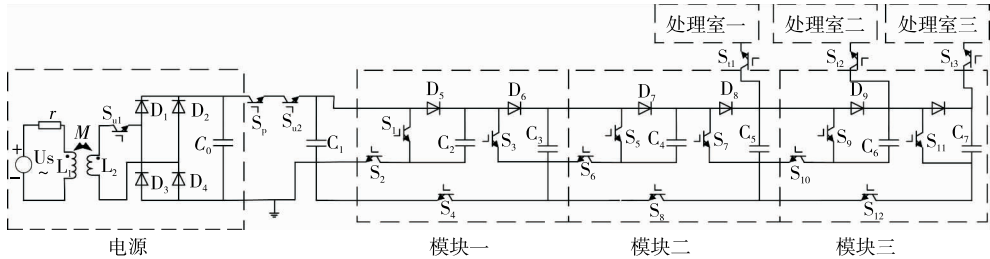


图 2 三模块高压脉冲电源
Figure 2 Three-module high-voltage pulse power supply

表 1 系统开关时序表[†]

Table 1 System switch timing chart

开关	$0\sim t/6$	$t/6\sim t/3$	$t/3\sim t/2$	$t/2\sim 2t/3$	$2t/3\sim 5t/6$	$5t/6\sim 11t/12$	$11t/12\sim t$
S_1 、 S_{u1}	0	1	0	1	0	1	1
S_2 、 S_p	1	0	1	0	1	0	0
S_3 、 S_7 、 S_{11}	0	0	0	0	0	0	1
S_4 、 S_8 、 S_{12} 、 S_{u2}	1	1	1	1	1	1	0
S_5	0	0	0	1	0	1	1
S_6	1	1	1	0	1	0	0
S_{t1} 、 S_{t2} 、 S_{t3} 、 S_9	0	0	0	0	0	1	1
S_{10}	1	1	1	1	1	0	0

[†] “0”表示开关处于断开状态;“1”表示开关处于闭合状态。

(5) $2t/3 \sim 5t/6$ 时间段: IGBT 开关 S_p 、 S_2 、 S_4 、 S_6 、 S_8 、 S_{10} 、 S_{12} 闭合, 系统运行第 5 步骤, C_0 与 C_1 、 C_2 的并联模块构成回路, 实现电容 C_0 向 C_1 、 C_2 充电, 系统运行 $t/6$ 后, S_p 、 S_2 、 S_6 、 S_{10} 断开。

(6) $5t/6 \sim 11t/12$ 时间段: IGBT 开关 S_1 、 S_4 、 S_5 、 S_8 、 S_9 、 S_{12} 闭合, 系统运行第 6 步骤, C_1 、 C_2 、 C_3 构成回路 I, 实现 C_1 与 C_2 串联向 C_3 放电; C_3 、 C_4 、 C_5 构成回路 II, 实现 C_3 与 C_4 串联向 C_5 放电; C_5 、 C_6 、 C_7 构成回路 III, 实现 C_5 与 C_6 串联向 C_7 充电; 初始电源向 C_0 充电, 系统运行 $t/12$ 后, S_4 、 S_8 、 S_{12} 断开。

(7) $11t/12 \sim t$ 时间段: IGBT 开关 S_1 、 S_3 、 S_5 、 S_7 、 S_9 、 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 闭合, 系统运行第 7 步骤, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 与 R_1 构成回路 I, 实现 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 串联向负载 R_1 放电; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 和 R_2 构成回路 II, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 串联向负载 R_2 放电; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 和 R_3 构成回路 III, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 串联向负载 R_3 放电; 初始电源向 C_0 充电, 系统运行 $t/12$ 后, S_1 、 S_3 、 S_5 、 S_7 、 S_9 、 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 断开。随后该电路运行第 1 步骤, 系统进行周期性循环。

1.2 处理室等效电路

处理室为同轴处理室, 杀菌时容器中流动待处理溶液, 处理室可以等效为电容与电阻并联, 等效电容影响放电波形上升速度, 等效电阻影响脉冲宽度。其纵向截图如图 3 所示。

等效电容可表示为:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (1)$$

式中:

C —— 等效电容, nF;

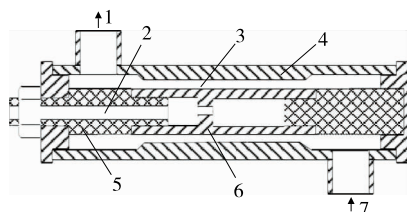
ϵ —— 同轴电极处理室中处理液的介电常数;

l —— 同轴电极高度, mm;

r_1 、 r_2 —— 内、外电极半径, mm^[12]。

用纯水的介电常数 ($\epsilon = 80$) 计算求得处理室的等效电容约为 1.2 nF。

等效电阻可表示为:



1. 处理液出口 2. 高压线 3. 处理液 4. 外电极(接地) 5. 聚四氟乙烯 6. 内电机(高压) 7. 处理液进口

图 3 同轴处理室纵截图

Figure 3 Vertical screenshot of the coaxial processing room

$$R_\infty = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{2\pi x l G}, \quad (2)$$

式中:

R_∞ —— 等效电阻, Ω ;

x —— 液体位置具体同轴距离, cm;

l —— 同轴电极高度, cm;

G —— 电导率, 此处取 5.1 mS/cm。

经计算同轴电极处理室的等效电阻为 49.2 Ω 。

其中青霉菌、酵母菌、大肠杆菌的电场处理较好强度分别为 12.5, 20.0, 30.0 kV/cm。由于所用同轴处理室的宽度为 $r_2 - r_1 = 3$ mm, 所以青霉菌、酵母菌、大肠杆菌的较好处理方波电压峰值分别为 3.75, 6.00, 9.00 kV。

在固定电场强度和脉冲宽度条件下, 细菌的失活率由所施加的脉冲数决定, 两者关系如图 4 所示^[13], 即在一定范围内, 灭菌效果随脉冲数的增多而增加。故灭菌效果与灭菌时间和频率有关^[14], 其关系式为:

$$C = t f, \quad (3)$$

式中:

C —— 高压脉冲电场的脉冲数;

t —— 处理室内花费时间, s;

f —— 频率, Hz。

处理室等效电路如图 5 所示, 负载端开关控制时序见表 2。 S_{r1} 与 S_{r2} 处于闭合状态, 输出正向波形; S_{r3} 与 S_{r4} 处于闭合状态, 输出反向波形, 通过控制 4 个 IGBT 开关实现输出双极性方波灭菌的目的。

负载开关对应 4 个状态:

(1) $0 \sim (t-10)$ 时间段: 负载端处于第 1 状态, 此过程 S_{r1} 、 S_{r2} 、 S_{r3} 、 S_{r4} 关断, 实现多模块系统的储能。

(2) $(t-10) \sim t$ 时间段: 负载端处于第 2 状态, 此过程 S_{r1} 与 S_{r2} 导通, S_{r3} 与 S_{r4} 关断, 对负载输出正向脉冲信号。

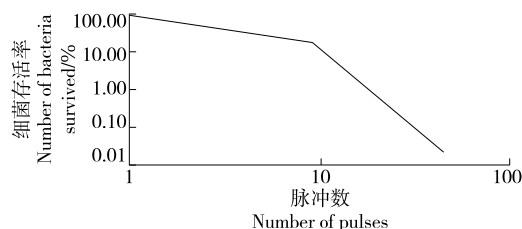


图 4 细菌灭活数与脉冲数的关系

Figure 4 The relationship between the number of bacterial inactivation and the number of pulses

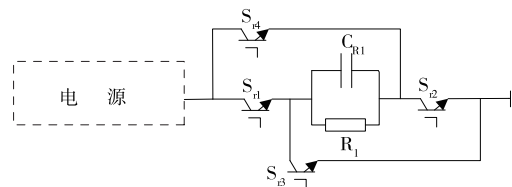


图 5 负载端结构图

Figure 5 Load side structure diagram

表 2 负载开关时序表[†]

Table 2 Timing chart of load switchus

开关	0~(t-10)	(t-10)~t	t~(2t-10)	(2t-10)~2t
S _{r1} , S _{r2}	0	1	0	0
S _{r3} , S _{r4}	0	0	0	1

[†] “0”表示开关处于断开状态;“1”表示开关处于闭合状态。

(3) $t \sim (2t-10)$ 时间段:负载端处于第 3 状态,此过程 S_{t1}、S_{r1}、S_{r2}、S_{r3}、S_{r4} 关断,实现多模块系统的储能。

(4) $(2t-10) \sim 2t$ 时间段:负载端处于第 4 状态,此过程 S_{r1} 与 S_{r2} 关断, S_{t1}、S_{r3} 与 S_{r4} 导通,对负载输出反向脉冲信号。

负载端 4 个步骤循环进行,产生双极性方波连续脉冲波形。

2 灭菌系统的整机电路

灭菌系统的整机电路图如图 6 所示。当频率为 1 000 Hz 稳定运行时,其电容 C₁~C₇ 均有不同的初始电压。实际操作中,存在开关和二极管的损耗,其系统在第 1 步骤运行时,C₀、C₁、S_p、S_{u2} 构成回路 I,内部电流为 i_1 ; C₁、C₂、D₅、S₂ 构成回路 II,内部电流为 i_2 ; C₂、C₃、D₆、S₂、S₄ 构成回路 III,内部电流为 i_3 ; C₃、C₄、D₇、S₆ 构成回路 IV,内部电流为 i_4 ; C₄、C₅、D₈、S₆、S₈ 构成回路 V,内部电流为 i_5 ; C₅、C₆、D₉、S₁₀ 构成回路 VI,内部电流为 i_6 ; C₆、C₇、D₁₀、S₁₀、S₁₂ 构成回路 VII,内部电流为 i_7 。计算公式:

$$V_{onD_i} = V_{onS_i} = V_{on}, \quad (4)$$

$$r_{onD_i} = r_{onS_i} = r_{on}, \quad (5)$$

$$-V_{C_0}(t) + V_{C_1}(t) + 2V_{on} + 2r_{on}(i_1) + r_{esr}(2i_1 - i_2) = 0, \quad (6)$$

$$-V_{C_1}(t) + V_{C_2}(t) + 2V_{on} + r_{on}(2i_2 - i_3) + r_{esr}(2i_2 - i_1 - i_3) = 0, \quad (7)$$

$$-V_{C_2}(t) + V_{C_3}(t) + V_{on} + r_{on}(3i_3 - i_2) + r_{esr}(2i_3 - i_2 - i_4) = 0, \quad (8)$$

$$-V_{C_3}(t) + V_{C_4}(t) + 2V_{on} + r_{on}(2i_4 - i_5) + r_{esr}(2i_4 - i_3 - i_5) = 0, \quad (9)$$

$$-V_{C_4}(t) + V_{C_5}(t) + V_{on} + r_{on}(3i_5 - i_4) + r_{esr}(2i_5 - i_4 - i_6) = 0, \quad (10)$$

$$-V_{C_5}(t) + V_{C_6}(t) + 2V_{on} + r_{on}(2i_6 - i_7) + r_{esr}(2i_6 - i_5 - i_7) = 0, \quad (11)$$

$$-V_{C_6}(t) + V_{C_7}(t) + V_{on} + r_{on}(3i_7 - i_6) + r_{esr}(2i_7 - i_6) = 0, \quad (12)$$

式中:

r_{esr} —— 电容的等效串联电阻, Ω ;

V_{onS_i} —— 系统第 i 个开关的 S_{u2} 通态电压, V;

r_{onS_i} —— 系统第 i 个开关的等效电阻, Ω ;

V_{onD_i} —— 系统第 i 个二极管的导通电压, V;

V_{C_i} —— 系统第 i 个电容电压, V;

r_{onD_i} —— 系统第 i 个二极管的电压, Ω ^[15]。

依次计算第 2~7 个动作,得到对负载放电阶段电容 C₁~C₇ 的电压值:

$$V_{C_1} = V_{C_2} = 414.56 \text{ V}, V_{C_3} = V_{C_4} = 822.54 \text{ V}, V_{C_5} = V_{C_6} = 1\,813.21 \text{ V}, V_{C_7} = 3\,305.29 \text{ V}。$$

放电时各电容串联对负载放电,其负载端电压为:

$$V_{R_1} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} = 4.284 \text{ kV}, \\ V_{R_2} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} + V_{C_6} = 6.100 \text{ kV}, \\ V_{R_3} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} + V_{C_6} + V_{C_7} = 9.406 \text{ kV}。$$

同理可得,系统在频率为 100 Hz 时,放电阶段电容 C₁~C₇ 的电压为:

$$V_{C_1} = V_{C_2} = 438.57 \text{ V}, V_{C_3} = V_{C_4} = 881.61 \text{ V}, V_{C_5} = V_{C_6} = 1\,741.45 \text{ V}, V_{C_7} = 3\,503.39 \text{ V}。$$

放电时各电容对负载放电,其负载端的电压为:

$$V_{R_1} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} = 4.381 \text{ kV}, \\ V_{R_2} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} + V_{C_6} = 6.123 \text{ kV}, V_{R_3} = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} + V_{C_5} + V_{C_6} + V_{C_7} = 9.406 \text{ kV}。$$

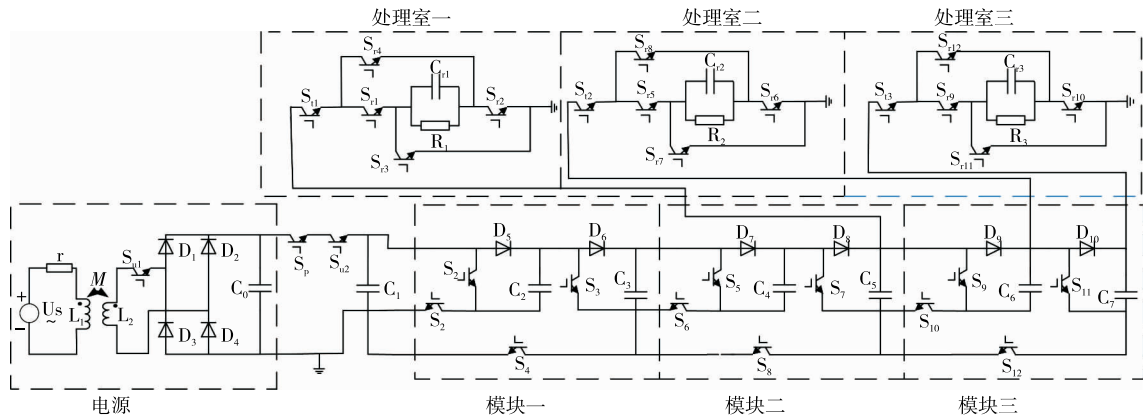


图 6 灭菌系统的整机电路图

Figure 6 The circuit diagram of the sterilization system

3 仿真分析

当系统在频率分别为 100,1 000 Hz 稳定运行时,若输出电压幅值满足要求,则初始交流电源经变压器产生峰值分别为 1 050,4 900 V 的交流电压。当系统在频率为 100 Hz 稳定运行时,负载端两端电压如图 7 所示。

系统放电时开关动作时间 $t_{R_3}=10\ 009\ 990\ \mu\text{s}$, $t_8=10\ 010\ 000\ \mu\text{s}$, $t_{R_1}=10\ 014\ 990\ \mu\text{s}$, $t_1=10\ 015\ 000\ \mu\text{s}$, 周期 $T=10\ \text{ms}$, 频率 $f=1/T=100\ \text{Hz}$, 脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 。由表 3 可知, R_1 两端的峰值电压 $U_{R_1}=4.417\ \text{kV}$, R_2 两端的峰值电压 $U_{R_2}=6.176\ \text{kV}$, R_3 两端的峰值电压 $U_{R_3}=9.687\ \text{kV}$, 与理论值接近, 可满足试验要求。

9.687 kV, 与理论值较接近, 可满足试验要求。

当系统在频率为 1 000 Hz 稳定运行时, 负载端两端的电压如图 8 所示。

系统放电时开关动作时间 $t_{R_3}=10\ 014\ 490\ \mu\text{s}$, $t_8=10\ 014\ 500\ \mu\text{s}$, $t_{R_1}=10\ 014\ 990\ \mu\text{s}$, $t_1=10\ 015\ 000\ \mu\text{s}$, 周期 $T=1\ \text{ms}$, 频率 $f=1/T=1\ 000\ \text{Hz}$, 脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 。由表 4 可知, R_1 两端的峰值电压 $U_{R_1}=4.272\ \text{kV}$, R_2 两端的峰值电压 $U_{R_2}=6.082\ \text{kV}$, R_3 两端的峰值电压 $U_{R_3}=9.393\ \text{kV}$, 与理论值接近, 可满足试验要求。

综上, 当系统的双极性方波频率为 100~1 000 Hz, 脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 时, 青霉菌的较好处理电场强度为 $12.5\ \text{kV/cm}$,

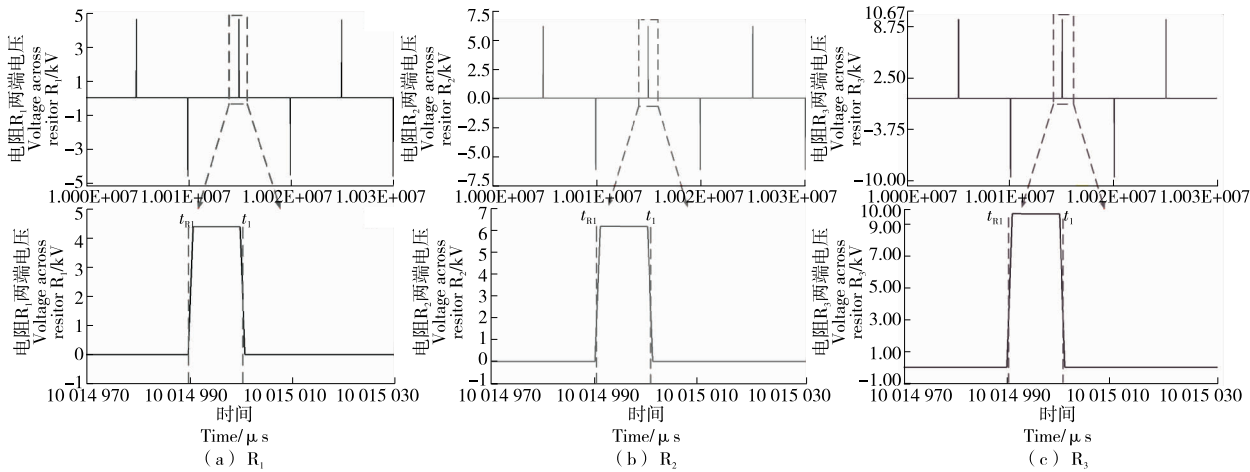


图 7 100 Hz 时负载 R_1 、 R_2 、 R_3 两端电压

Figure 7 Voltage across the load R_1 , R_2 , R_3 at 100 Hz

表 3 100 Hz 负载电压对比

Table 3 Comparison of 100 Hz load voltage

项目	理论值/kV	仿真值/kV	误差/%
R_1	4.381	4.417	0.80
R_2	6.123	6.176	0.86
R_3	9.626	9.687	0.63

即电压峰值为 3.75 kV, 此波形可以灭除 95.00% 的青霉菌^[16]; 酵母菌的较好处理压强为 $20.0\ \text{kV/cm}$, 即电压峰值为 6.00 kV, 此波形可以灭除 99.75% 的酵母菌; 大肠杆菌的较好处理电场强度为 $30.0\ \text{kV/cm}$, 即电压峰值为 9.00 kV, 此波形可以灭除 99.60% 的大肠杆菌^[17]。当脉宽为 $10\ \mu\text{s}$ 时, 高压杀菌的效果与频率呈正比^[13-14], 故该

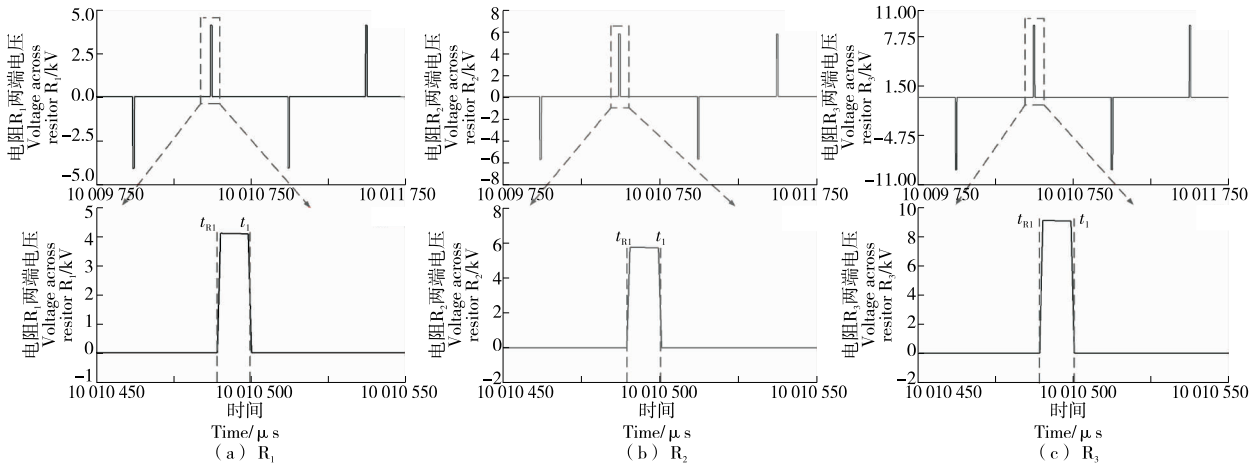


图 8 1 000 Hz 时负载 R_1 、 R_2 、 R_3 两端电压

Figure 8 Voltage across the load R_1 , R_2 , R_3 at 1 000 Hz

表 4 1 000 Hz 负载电压对比

Table 4 1 000 Hz load voltage comparison

项目	理论值/kV	仿真值/kV	误差/%
R ₁	4.284	4.272	0.28
R ₂	6.100	6.082	0.29
R ₃	9.406	9.393	0.18

杀菌系统可以通过调节频率和幅值得到较好的杀菌效果。仿真结果表明该系统满足同时灭除青霉菌、酵母菌和大肠杆菌的要求。

4 结论

仿真结果表明,试验设计的多模块杀菌系统在频率范围为 100~1 000 Hz,脉宽为 10 μ s 时可产生幅值不同的双极性高压方波,从而实现连续灭除不同菌种的目的,改善了传统杀菌系统效率较低且无法对多种菌群进行处理的问题。该系统在运行过程中开关较多,且承受的电压大,存在击穿的危险,所以对开关的要求高,价格贵,不利于商业使用,该系统可继续研究一个合适的开关方式来保证其开关安全。

参考文献

[1] 李立, 孙智慧, 苗卿华. 超高压加工技术在食品工业中应用的研究进展[J]. 食品工业科技. (2020-08-14) [2020-10-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200814.0944.004.html>.

[2] BEVERIDGE J R, MACGREGOR S J, MARSILI L, et al. Comparison of the effectiveness of biphasic and monophasic rectangular pulses for the inactivation of micro-organisms using pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(4): 1 525-1 531.

[3] 尹倩, 徐维昌, 金妙仁, 等. 高压脉冲电场杀菌技术在酱油生产中的应用初探[J]. 现代食品, 2018(9): 44-46.

[4] 夏涛, 吴云峰, 王胜利, 等. 高压脉冲电场杀菌系统中高压脉冲发生器研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 229-231, 236.

[5] 曹丽娜, 章建浩, 王晓婷, 等. 高压电场低温等离子体对槟榔包装产品冷杀菌效能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 133-139, 193.

[6] 让一峰, 陈晓婵, 田一雄, 等. 高压脉冲电场强化杀菌对哈密瓜汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 49(17): 105-109.

[7] BALASUBRAMANIAM V M, MARTINEZ-MONTEAGU-DO S I. Principles and application of high pressure-based technologies in the food industry[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6: 435-462.

[8] HUANG Hsiao-wen, LUNG Hsiang-mei, YANG Bing-huei, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing [J]. Food Control, 2014, 40 (31): 250-259.

[9] 孙学兵, 方胜, 陆守道. 高压脉冲电场杀菌的工业化展望[J]. 食品与机械, 2002, 18(1): 6-8.

[10] BEVERIDGE J R, MACGREGOR S J, ANDERSON J G, et al. The influence of pulse duration on the inactivation of bacteria using monopolar and bipolar profile pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33 (4): 1 287-1 293.

[11] 时兰春, 王伯初. 高压电脉冲灭菌理论的研究进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002(4): 144-147.

[12] 延二宝. 高压脉冲电场灭菌技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010: 26-28.

[13] 王丹. 桃汁高压脉冲电场非热杀菌研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005: 30-31.

[14] 裴长达. 卷心菜汁高压脉冲电场非热杀菌研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 47-48.

[15] KHOSRAVI R, REZANEJAD M. A new pulse generator with high voltage gain and reduced components[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2 795-2 802.

[16] 方婷, 魏奇, 陈锦权. 高压脉冲电场处理室的改进及其对液体食品的杀菌效果[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(4): 183-188.

[17] 张涛. 高压脉冲电场灭菌参数及电穿孔机制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018: 13-15.

(上接第 117 页)

[7] 余璐涵, 陈旭, 蔡茜茜, 等. 汪少芸鱼糜蛋白冷冻变性规律及调控方法研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 1-8.

[8] 肖军. 低温作业的职业危害防护[J]. 职业卫生, 2011(1): 96-97.

[9] 孙文志, 卢振义, 张维英, 等. 远洋金枪鱼围网渔船总布置特征[J]. 船舶工程 2011, 33(1): 5-8.

[10] 海洋餐桌 日本: 金枪鱼从捕捞到拍卖的“鲜”字秘[EB/OL]. (2019-02-15) [2020-11-10]. <http://tv.cctv.com/2019/02/15/VIDE34009VM3vIZSdKOFld4190215.shtml>.

[11] 贾瑞修, 刘冲, 李经民. 刀具尺寸对超声切割系统振动性能

影响的研究[J]. 机电技术, 2020(4): 20-23.

[12] 舒望, 陈光伟. 基于铂电阻和硬件闭环控制的食物干燥设备恒温控制系统[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 104-108.

[13] 王学防, 朱国平, 叶旭昌, 等. 中西太平洋金枪鱼围网流木鱼群中鲣鱼种群结构分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28 (2): 293-299.

[14] 李磊, 汪磊, 周婧. 基于 PLC 控制的自动称重配料设备设计与试验[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 109-113.

[15] 闵莉, 王洪畅, 陈颖. 五轴铣削加工刀轴矢量平滑控制算法[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 141-144.