

高压脉冲电场杀菌系统中高压脉冲发生器研究进展

Research advance of high-voltage pulsed generator in high-voltage pulsed electric field sterilization system

夏 涛 吴云峰 王胜利 戴 磊 胡波洋 苗 玲
XIA Tao WU Yun-feng WANG Sheng-li DAI Lei HU Bo-yang MIAO Ling

(电子科技大学能源科学与工程学院, 四川 成都 611731)
(School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology
of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

摘要:文章综述高压脉冲发生器的设计原理,分析国内外高压脉冲发生器的研究进展及其优缺点,并讨论系统设计的要点以及应用现状与展望。
关键词:食品冷杀菌;高压脉冲电场;高压脉冲发生器
Abstract: The text summarized the design principle of high pulse generator and its application and prospect, analyzed its advantages and disadvantages round the world and concluded the difficulties in the design.
Keywords: food nonthermal sterilization; high-voltage pulsed electric field; high voltage pulse generator

食品杀菌技术发展到今天,种类繁多,这些方法大致可分为加热处理和非加热处理两大类。传统的加热处理对食品的风味、营养价值等会产生一定的副作用,因而非热处理受到越来越广泛的关注。非热处理包括超高压杀菌法^[1]、化学杀菌法^[2]、紫外线杀菌法^[3]、膜分离技术杀菌法^[4]、辐射杀菌法^[5]、臭氧杀菌法^[6]、高压脉冲电场(high-voltage pulsed electric field, HPEF)杀菌法^[7]和超声波杀菌法^[8]等。高压脉冲电场杀菌是一种新兴的非热处理杀菌技术,其杀菌机理是在两个电极间产生瞬时高压脉冲电场作用于液体食品而杀菌^[9],具有杀菌时间短、效率高、能耗少等优点^[10]。PEF 杀菌设备进行食品加工的基本电气要求:脉宽窄(1~20 μs)、较快的脉冲前后沿(小于 1 μs)、脉冲重复频率可调范围大(0~10 kHz)、脉冲电场强度高(35 kV/cm)等^[11]。高压脉冲电场杀菌技术以其良好的应用特性,成为国内外学者研究开发的热点^[12]。高压脉冲发生器是 PEF 杀菌系统中的关键部件之一,目前进入工业化应用的指数衰减波发生器杀菌效率不

及方波脉冲发生器的效率高,但方波脉冲发生器电路结构复杂,成本比较高。因此研发造价合理以及波形稳定的方波脉冲发生器是 PEF 杀菌技术走向工业化应用的关键^[13]。

1 高压脉冲发生器原理

1.1 高压直流电源

高压直流电源的作用是将电网输入的交流电整流再逆变成高压交流电,然后经过整流变成高压直流电。其主要由整流、功率因数校正、逆变、变压器升压和倍压整流组成^[14]。

1.2 高压脉冲波形

研究设计的高压脉冲发生器产生的脉冲波形主要有方波、指数衰减波以及震荡波等。这几种脉冲波形的杀菌处理效果以方波最好,震荡波最差^[15],且方波脉冲的前后沿越快,对脉冲能量的利用越高,杀菌效率越高^[16]。指数脉冲一般由电阻—电容组成的电路产生,其结构简单,价格便宜,已进入工业化应用。但低于最高电压 36.8% 的电压无杀菌作用,且会使食品温度升高,浪费能量。而方波脉冲杀菌效果好,其一般通过电容器组、电感、电阻以及放电开关组成脉冲形成网络(PFN),但相对于指数脉冲发生器,其制作成本高且调试麻烦^[17]。震荡波由于不能对处于高强度电场中的微生物持续施加脉冲作用,因而防止了微生物细胞膜产生大面积不可逆破坏,故其对食品中微生物的致死效果最差^[18]。

2 国内外高压脉冲发生器研发概况

19 世纪 60 年代,高压脉冲电场被证明对微生物细胞具有破坏力。自 Sale 等^[19]系统地研究脉冲电场对微生物失活的影响之后,国内外许多研究机构和企业都开始关注对 PEF 技术中关键部件高压脉冲发生器的研究与设计。

产生高压脉冲输出的方法有多种,其中一种常见的高压脉冲发生器是由 Marx 电路产生,其原理图见图 1^[20]。Marx

作者简介:夏涛,男,电子科技大学在读硕士研究生。
通讯作者:吴云峰(1972—),男,电子科技大学副教授,博士。
E-mail: yfwu@uestc.edu.cn
收稿日期:2015-11-27

电路通过电容并联充电、串联放电来实现高压输出。传统的 Marx 发生器由火花隙开关来控制,导致其重复频率不高。随着半导体开关的发展,逐渐代替火花隙开关,从而提高了 Marx 输出的重复频率。

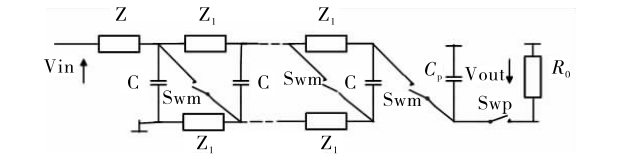


图1 传统 Marx 发生器电路原理图

Figure 1 Circuit diagram of traditional Marx generator

Shi Hao-zheng 等^[21]通过 IGBT 串联法设计了一套输出 150 kV/10 A、脉宽为 1~20 μs 的 Marx 型高压脉冲发生器。李志强等^[20]以及甘延青等^[22]均对此展开了研究设计。Marx 型发生器所需直流电源电压较低、无需使用变压器,因此其体积比较小,但需通过 LC 充电来补充脉冲期间失去的电荷,所以其重复频率不太高^[23]。另外,随着 Marx 脉冲发生器级数的增大,导致输出脉冲前沿时间变长,不利于杀菌效率的提高。

通过脉冲变压器升压后也可得到高压脉冲发生器,其基本原理图见图 2。研究者^[24]曾利用 IGBT 模块逆变和脉冲变压器升压搭建了高压脉冲发生器。应雪正^[25]以及陈杰等^[26]通过脉冲变压器升压法获得高压脉冲发生器。

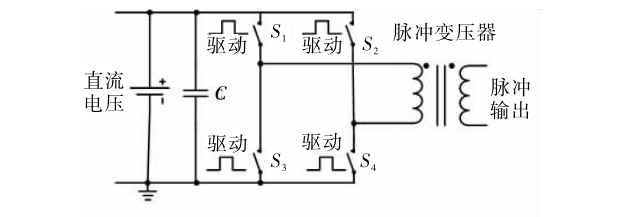


图2 脉冲升压型高压脉冲发生器原理图

Figure 2 Schematic diagram of the Inverter/Transformers high voltage pulse generator

利用脉冲变压器升压法研究设计的脉冲发生器由于均使用脉冲变压器升压,从而降低了高压直流电源的电压等级,简化了变压器初级电路的设计,因而得到广泛应用。但脉冲变压器的应用同时也限制了输出脉冲宽度的变化范围,且脉冲变压器对快前沿脉冲响应较差。另外由于变压器的恢复时间问题,导致脉冲重复频率不能太高。所以研究设计价格低廉、寄生参数小的大功率脉冲变压器是提高此类型高压脉冲发生器参数的一个方向。

除了以上两种方法,还可以直接利用开关来控制高压电路的充放电,从而省去脉冲变压器的使用。但是用作高压脉冲发生器的调制开关一般都需要进行串并联组合运用才能达到使用目的。典型的基于固态开关串联调制的通用电路拓扑结构见图 3^[27]^[28]^[283]。Seung-Bok 等^[28]利用 IGBT 串联技术研制了一台电压幅值 40 kV、电流 150 A、频率 3 kHz、脉宽 0~5 μs、脉冲前沿小于 100 ns 的高压脉冲发生器。孔甘银等^[29]通过开关的串并联得到高压脉冲输出。利用此方法

设计的脉冲发生器具有很宽的脉宽和频率调节范围。但该类型脉冲发生器需要一台和输出脉冲幅度相等的高压直流电源作为初级电源,因而其体积庞大,价格昂贵。系统电路设计时需要考虑串并联均压均流、触发隔离以及保护等技术难题,所以电路设计比较复杂。

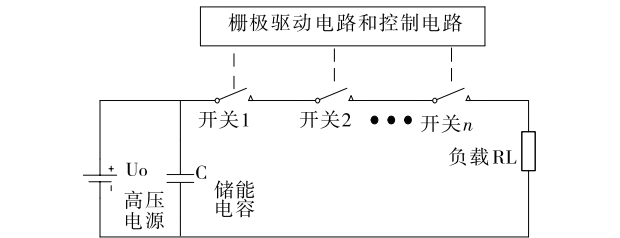


图3 固态开关型高压脉冲发生器原理图

Figure 3 Schematic diagram of the solid state high-voltage pulse generator

近年来又出现基于传输线变压器 (transmission line transformer, TLT) 耦合多开关驱动变阻线的脉冲发生器^[30]和加法型全固态脉冲发生器^[31]。前者原理可概括为:当电容性储能元件充电完成后,因 TLT 的耦合作用,任意开关导通都将触发其余开关同时导通,储能元件通过 TLT 驱动变阻线输出高压脉冲。后者主要应用于超高压、大功率脉冲。

3 PEF 系统中高压脉冲发生器设计的要点

高压脉冲发生器主要包括充电电路、脉冲成形电路两大部分。此外,脉冲变压器是高压大功率脉冲发生器中的关键部件,其功率转换效率高并对减小脉冲发生器的体积和重量起到决定作用^[32]。

3.1 充电电路

目前比较常见的高压脉冲发生器充电电路包括电阻充电电路和电感充电电路。电阻充电电路结构简单、技术成熟,但其充电效率低,一般适用于中小功率、脉宽窄或工作比很低场合;电感充电电路,由于其效率较高,故在大功率、高频场合下经常使用^[33]^[37]^[43]。另外,还有回扫充电电路、阶梯充电电路等^[33]^[381]^[399]。实际应用中需根据具体要求选择合适的充电电路。

3.2 高压脉冲成形

高压脉冲成形是高压脉冲发生器的主要部分。对于一般的指数型脉冲,可以通过控制调制开关的导通,使储能电容通过调制开关对负载放电,从而在负载上得到输出脉冲。该方法简单、技术成熟,但其杀菌效率明显低于方波脉冲。

目前高压方波脉冲的产生一般采用全桥逆变加脉冲变压器升压,其原理图见图 2。这种脉冲成形电路的优点是降低了初级电路的设计难度,但也存在很大的缺陷,如初级的震荡会传递到次级,从而使输出波形变差,其占空比的调节也比较困难,在频率较低时脉冲变压器体积较大且难设计。随着高压大电流开关的发展,使用高压直流电源、高压调制开关,可以通过控制开关的导通和关断在负载上得到脉冲输出。该开关通过简单的电路,将功率 MOSFET 或者 IGBT 串并联,通过选用低感元件及合理的布局,从而实现脉宽和

频率宽范围可调的高压脉冲发生器,且寿命长易于维修,但串并联开关器件导通和关断的控制电路设计比较复杂,需考虑均压均流同步等问题。

另外,还有一种线型脉冲调制器,其以人工线(脉冲形成网络)做储能元件,用氩闸流管或晶闸管 SCR 做开关,实现全部放电的脉冲调制器^[30]。其中人工线由电容和电感组成,随着其级数的增加,输出脉冲的波形越趋于方波。但人工线参数一旦确定,其输出脉宽就基本确定,所以该方法不适用于要求输出脉宽大范围可调的场合。实际应用中根据实际输出脉冲的指标要求来选取合适的脉冲成形电路。

3.3 高压脉冲变压器的设计

高压脉冲发生器中为了解决调制开关器件的电压等级以及阻抗匹配等问题,一般采用脉冲变压器。脉冲变压器的使用会使其最大输出脉冲受限于脉冲变压器磁芯的可利用伏秒特性^[34],为了增加输出脉宽,一般增加去磁电路,以使其磁芯复位^{[27]284-285}。利用脉冲变压器升压的高压脉冲发生器,其初级电路电压等级降低、设计难度减小。但这种结构要求脉冲变压器初级必须流过较大的电流,在脉冲变压器升压比较大时初级电流更大。因此在设计中要根据输出电压幅值、功率大小、脉冲调制开关的开关能力和脉冲参数的要求等方面进行权衡以确定合适的脉冲变压器升压比。

脉冲变压器的漏感以及回路分布电感会影响输出脉冲的前后沿,因此在对输出脉冲前后沿要求较高或要求输出窄脉冲时,应设法减小脉冲变压器的漏感以及合理布局放电回路。

4 结束语

目前食品杀菌用高压脉冲发生器仍以指数衰减波为主,其技术相对比较成熟,但其存在杀菌效率低、能耗高等缺点;而杀菌效率高、能耗低的方波脉冲发生器由于电路复杂,成本高等因素使其目前仍处于实验室阶段,大规模工业化应用仍有一定的差距。因此研制大功率、控制精度高、快速前后沿、应用范围广的食品杀菌用高压脉冲发生器才能推动 PEF 食品杀菌技术的商业化步伐。

参考文献

[1] 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):266-270.
[2] 张鹰,白卫东,刘晓艳,等.低盐腌菜保藏技术研究进展[J].现代食品科技,2013(4):921-924.
[3] 李名流.制药用水系统的消毒与灭菌方法[J].现代制造,2013(14):11-14.
[4] 罗红,刘文炜,江滢,等.大蝎子草不同膜分离片段的体外抗菌活性研究[J].华西药学杂志,2014,29(4):398-400.
[5] 贾增芹,李克迪.电离辐照杀菌对食品包装材料性能的影响[J].食品与机械,2012,28(6):246-250.
[6] 龚媛,刘敦华,曲云卿,等.响应面法优化臭氧与紫外复合处理枸杞干果杀菌工艺[J].食品工业科技,2015,36(12):254-258.
[7] Raso J, Barbosa-Cánovas G V. Nonthermal preservation of foods using combined processing techniques[J]. Critical Reviews in

Food Science & Nutrition, 2003, 43(3): 265-285.
[8] 李梦颖,李建科,何晓叶,等.食品加工中的热杀菌技术和非热杀菌技术[J].农产品加工:学刊,2013(16):109-113.
[9] 李英梅,杜颜.高压脉冲电场杀菌技术在紫菜食品加工中的应用[J].包装与食品机械,2010,28(5):60-63.
[10] 孙炳新,王月华,冯叙桥,等.高压脉冲电场技术在果蔬汁加工及贮藏中的研究进展[J].食品与发酵工业,2014,40(4):147-154.
[11] Wang Chang-jiang, Zhang Q Howard, Streaker C. A 12 kV solid state high voltage pulse generator for a bench top PEF machine[C]// The Third International Power Electronics and Motion Control Conference. Beijing: [s.n.], 2000: 1 347-1 352.
[12] 李钢,栾海.高压脉冲电场杀菌技术在食品工业中的应用[J].哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2003,19(2):206-207.
[13] 吴海霞.高压脉冲电场杀菌技术在食品工业中的应用进展[J].农业与技术,2009,29(3):132-135.
[14] 张海波.X 光机串联谐振式高压直流电源研究[D].重庆:重庆大学,2013:9.
[15] 汤国强,沙俊杰,黄宝军.油田污水处理中高压脉冲电场杀菌方法的研究[J].化工自动化及仪表,2015(8):901-903.
[16] Moonesan M S, Jayaram S. Effect of pulsewidth on medium temperature rise and microbial inactivation under pulsed electric field food treatment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1 767-1 772.
[17] 应雪正,王剑平,叶尊忠.国内外高压脉冲电场食品杀菌关键技术概况[J].食品科技,2006,31(3):4-7.
[18] 田红云,孔繁东,祖国仁.高压脉冲电场杀菌技术的研究与展望[J].饮料工业,2004,7(4):1-5.
[19] Sale A J H, Hamilton W A. Effects of high electric fields on microorganisms: I. Killing of bacteria and yeasts[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects, 1967, 148(148): 781-788.
[20] 李志强,杨建华,张建德,等.固态化脉冲形成网络 Marx 脉冲发生器[J].强激光与粒子束,2014,26(6):253-256.
[21] Shi Hao-zheng, Lu Yuan-da, Gu Tian-yu, et al. High-voltage pulse waveform modulator based on solid-state Marx generator [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1 983-1 990.
[22] 甘延青,宋法伦,卓婷婷,等.紧凑型重复频率快前沿 Marx 发生器研究[J].强激光与粒子束,2013,25(z1):164-168.
[23] 黄军,戴广明,田为.几种全固态刚管调制器的对比[J].现代雷达,2010,32(3):80-83.
[24] Alkhafaji S R, Farid M. An investigation on pulsed electric fields technology using new treatment chamber design[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(2): 205-212.
[25] 应雪正.基于计算机控制的高压脉冲发生器的研究[D].杭州:浙江大学,2006:24.
[26] Chen Jie, Zhang Ruo-bing, Xiao Jian-fu, et al. Influence of pulse rise time on the inactivation of staphylococcus aureus by pulsed electric fields[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(8): 1 935-1 941.

(下转第 236 页)

non-Halal chicken[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(1): 130-133.

[31] Zheng Li-yun, Sun Da-wen. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes[J]. Trends in Food Science and Technology, 2006, 17(1): 16-23.

[32] 谷小慧. 超声波对冷冻肉品质影响的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2013: 20-32.

[33] Gambuteanu C, Petru A. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork longissimus dorsi[J]. Food Technology, 2013, 37(1): 98-107.

[34] Gambuteanu C, Petru A. Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimus dorsi muscle[J]. Food Science Technology, 2015, 52(4): 2 130-2 180.

[35] 马艳. 鸡肉脱脂技术及脱脂处理对肉品质影响的研究[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2008: 14-19.

[36] 卢春艳. 养殖大黄鱼脱脂脱腥工艺优化及其风味成分研究[D]. 浙江: 浙江工商大学, 2011: 35-44.

[37] Park S H, Roh Y R. Cooker: The South Korea, 0113773[P]. 2001-03-01.

[38] Chemat F, Zill-e-Huma, Khan M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 813-835.

[39] Arroyo C, Cebrian G, Pagan R, et al. Inactivation of *Coronobacter sakazakii* by ultrasonic waves under pressure in buffer and foods[J]. Food Microbiol., 2011, 144: 446-454.

[40] Mcclements D J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(9): 293-299.

[41] Knorr D, Zenker M, Heinz V, et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(5): 261-266.

[42] Wang Yan, Hu Yan-chun, Wang Jian-hua, et al. Ultrasound-assisted solvent extraction of swainsonine from *Oxytropis ochrocephala* Bunge [J]. Med. Plant Res., 2011, 5 (6): 890-894.

[43] Hyoungill L, Feng Hao. Effect of power ultrasound on food quality[M]. New York: Springer, 1970: 559-582.

[44] Pagan R, Mañas P, Alvarez I, et al. Resistance of *Listeria monocytogenes* to ultrasonic waves under pressure at sublethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) temperatures[J]. Food Microbiology, 1999, 16: 139-148.

[45] Hanieh S, Niels H, Nonboe K U, et al. Combined steam and ultrasound treatment of broilers at slaughter: A promising intervention to significantly reduce numbers of naturally occurring campylobacters on carcasses[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 176(4): 23-28.

[46] Morild R K, Christiansen P S, Anders H, et al. Inactivation of pathogens on pork by steam-ultrasound treatment[J]. Journal of Food Protection, 2011, 74(5): 769-775.

[47] Smith D P. Effect of ultrasonic marination on broiler breast meat quality and *Salmonella* contamination[J]. International Journal of Poultry Science, 2011, 10(10): 757-759.

[48] Siró I, Vén C, Balla C, et al. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91 (2): 353-362.

[49] Stadnik J. Influence of sonification on the oxidative stability of beef [J]. Roczniki Instytutu Przemysłu Miesnegoi Tłuszczowego, 2009, 47(1): 63-68.

[50] Barbieri G, Rivaldi P. The behaviour of the protein complex throughout the technological process in the production of cooked cold meats[J]. Meat Science, 2008, 80(4): 1 132-1 137.

[51] Reza Kasaai M. Input power-mechanism relationship for ultrasonic irradiation: Food and polymer applications[J]. Natural Science, 2013, 5(8B): 14-22.

[52] Mañas P, Pagán R. Microbial inactivation by new technologies of food preservation [J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, 98(6): 1 387-1 399.

[53] Hao Feng, Yang Wei-qing, Hielscher T. Power ultrasound[J]. Food Science and Technology International, 2008, 14 (5): 433-436.

[54] Arzeni C, Martinez K, Zema P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 463-472.

[55] Zhang Wang-gang, Xiao Shan, Ahn Dong-u. Protein oxidation: Basic principles and implications for meat quality[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(11): 1 191-1 201.

[56] Ashokkumar M, Sunartio D, Kentish S, et al. Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2008, 9: 155-160.

(上接第 231 页)

[27] 郑新. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[28] Ok S B, Ryoo H J, Jang S R, et al. Design of a high-efficiency 40-kV, 150-A, 3-kHz solid-state pulsed power modulator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(10): 2 569-2 577.

[29] 甘孔银, 汤宝寅, 王浪平, 等. 10 kV 绝缘栅双极型晶体管固体开关的研制[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 1 033-1 036.

[30] 闫克平, 邓官垒, 刘振, 等. 基于传输线变压器耦合多开关驱动变阻线的脉冲功率系统: 中国, 201110072045.6 [P]. 2011-03-24.

[31] 杨景红, 郑新, 钱锰. 加法器结构的大功率固态脉冲调制器的研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(4): 80-83.

[32] 袁同山. 医用加速器高精度功率源的关键技术[J]. 工业技术创新, 2014(4): 436-439.

[33] 魏智. 发射机高压脉冲调制器的设计与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[34] 江婷婷. 高压脉冲电场杀菌装备中脉冲升压型高压脉冲发生器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 74.