

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.025

液体食品连续通电加热装置*

王冉冉¹ 田富洋¹ 朱敏¹ 张世福¹ 任杰¹ 李法德²

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

【摘要】 为实现液体食品的通电加热,结合整流逆变技术设计了液体食品连续通电加热装置,系统由可控脉冲电源、加热室、液泵和流量控制4部分组成。可控脉冲电源输出双极性高频方波脉冲电压,频率、电压和占空比可调,输出功率可达50 kW。实验证明,该装置加热速度快、控制简单方便、极板污染很少,能够满足液体食品的加工要求。

关键词: 液体食品 通电加热 双极性方波 食品杀菌

中图分类号: TS203 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0132-05

Continuous Ohmic Heating Device of Liquid Food

Wang Ranran¹ Tian Fuyang¹ Zhu Min¹ Zhang Shifu¹ Ren Jie¹ Li Fade²

(1. Mechanical & Electronic Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract

In order to achieve ohmic heating for liquid food, by using rectifier and inverter technology, continuous ohmic heating device was designed. The equipment was consisted of controllable pulsed power supply, ohmic heating chamber, pump and flow controller. Controllable pulsed power supply can output bipolar-rectangle waveform pulse voltage with high frequency. The frequency, amplitude and duty ratio were adjustable. The output capacity could reach to 50 kW. The result showed that the device could be controlled speedily and easily. It could meet the requirement of liquid food process and without pollution.

Key words Liquid food, Ohmic heating, Bipolar-rectangle waveform, Food sterilization

引言

在液态食品传统的热处理单元操作中,间壁式换热器具有非常重要的地位和作用,但食品中的某些成分极易在换热器加热表面上形成污垢层。这样不仅降低传热效率、增加能耗、降低产品质量,而且还会增加环境负担和清洗费用。因此,换热器加热表面的结垢问题是食品工业特别是对富含蛋白质液体食品加热中的一个严重问题。

近年来,食品的通电加热(ohmic heating)也称为欧姆加热技术,受到了人们的重视。通电加热技

术具有加热快速、无加热面、易控制、电能转换率可达95%和环境友好,并能实现固体食品和含有颗粒的液固混合食品的高温快速杀菌等优点。该技术被认为是食品加工操作过程中最具有发展潜力的热处理技术之一,在加热、漂烫、蒸发浓缩、脱水、发酵、提取、灭菌、巴氏杀菌和战场与星际探险的食品加热等领域具有广泛的前景^[1-6]。

通电加热技术在国外已经进行了大量的研究,并逐步商业化^[7],但在国内对通电加热技术的研究还处于刚起步阶段,并且多数研究是利用静态通电加热装置对不同类型食品进行的杀菌或加热处理等

收稿日期: 2011-07-05 修回日期: 2011-08-11

*教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(2008)和山东省自然科学基金资助项目(ZR2011CM028)

作者简介: 王冉冉,博士生,主要从事电气工程及农产品加工研究,E-mail: wranran@163.com

通讯作者: 李法德,教授,博士生导师,主要从事农业装备、农产品加工机械研究,E-mail: li_fade@yahoo.com.cn

实验。孙玉利等设计了小型连续式通电加热实验系统对豆浆进行了通电加热实验,发现随着通电加热时间的延长,豆浆在电极表面上形成了污垢层^[8~9]。

基于以上原因,本文设计液体食品连续通电加热装置,可控脉冲电源输出双极性高频方波脉冲电压,频率、电压和占空比可调,输出功率可达 50 kW。

1 系统组成与功能

液体食品连续通电加热装置的组成如图 1 所示,由可控脉冲电源、加热室、液泵和流量控制 4 部分组成。

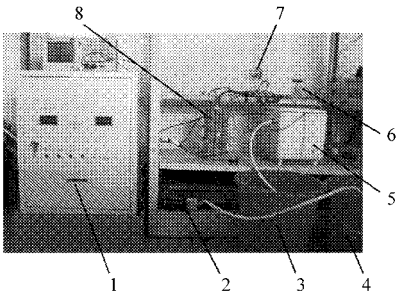


图 1 液体食品连续通电加热装置

Fig. 1 Continuous ohmic heating device of liquid food

1. 加热电源 2. 泵 3. 加工完成的食物存储罐 4. 未加工的食物存储罐 5. 保温室 6. 压力控制阀 7. 压力表 8. 加热室

可控脉冲电源为加热装置的核心部分,由整流装置、逆变装置、检测装置和控制装置组成,其作用是输出电压、频率、占空比可调的双极性方波电压。加热室内极板平行放置,为被加热的液体食品提供一个基本均匀的电场,使加热更加均匀,同时提供一个能够保持一定高温的处理环境。流量控制部分可以调节被加热液体食品的流量,并能通过提高加热室内的压力达到一个较高的温度,加速液体食品的处理速度。

2 可控脉冲电源

通电加热的电源要求通过高频电流来避免极板的腐蚀,但对于电力、电子设备,频率越高则电源的动态损耗越大,器件的发热越严重。频率应在满足不同物料要求的前提下,尽可能降低以减少损耗,所以要求设备的电源能够频率可调^[10~11]。

由于不同液体物料的电导率不同,在加热室尺寸固定的前提下,只有通过改变电源电压来保持一定的电流密度,因此系统要求输出电压可调。

频率相同的情况下,占空比减小会使电源极板的污染程度降低。但是占空比减小太多会使电源的加热效率降低,因此系统要求输出电压占空比可调。

基于上述要求,电源采用 AC-DC-AC 方式来实现双极性方波脉冲的输出。

2.1 整流部分

整流电路的作用不仅是将交流电压变为直流电压,而且还要通过调整直流电压的输出,改变双极性方波电压。因此本文选用单相全控整流桥来实现。如图 2 所示。

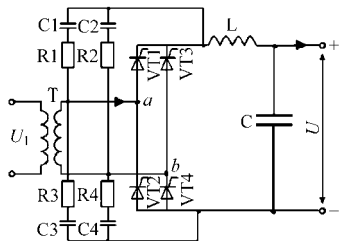


图 2 整流装置电路图

Fig. 2 Rectifier circuit

在图 2 中,C1、C2、C3、C4 与 R1、R2、R3、R4 构成整流桥的保护电路;C 与 L 构成低通滤波电路,这样其输出电压就是一个幅值近似不变的直流电压。整流桥的输出接入到逆变桥的输入,用 U 来表示,VT1、VT2、VT3 和 VT4 4 个晶闸管构成全控整流桥,其输出电压的平均值为

$$U_d = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

(1)

式中 U_d ——输出电压平均值,V
 U_2 ——输入电压有效值,V
 α ——晶闸管控制角

通过改变晶闸管的控制角改变输出电压的平均值。本文选用淄博奇正电器有限公司的 MJYD-ZL-100 型,其最大电流能达到 100 A。控制方式如图 3 所示,通过计算机 D/A 转换输出模拟电压控制其输出平均电压。

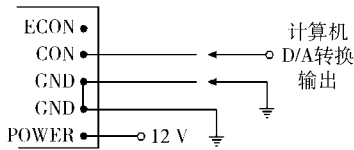


图 3 整流控制电路

Fig. 3 Control circuit of rectifier

2.2 逆变部分

逆变装置的主要作用是将直流电变为交流电,同时要通过逆变装置,改变输出电压的频率和输出波形的占空比。

逆变装置的电路图如图 4 所示。其中 V1、V2、V3、V4 选用全控器件 IGBT,通过控制系统控制 V1、V4 和 V2、V3 交替导通,在液体食品(R_L 表示)上形成交流电压。

逆变装置的驱动电路采用三菱 M57962L 型芯片。其电路图如图 5 所示,驱动电阻的选取公式为

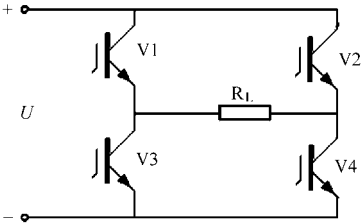


图4 逆变装置电路图
Fig.4 Inverter circuit

$$R_{EXT} = \frac{U_{CC} + U_{EE}}{I_{OP}} \tag{2}$$

式中 U_{CC} ——正向驱动电压,V
 U_{EE} ——反向驱动电压,V
 I_{OP} ——输出电流,A

根据系统要求,驱动电阻选取要考虑最大电流和导通时间两方面因素。系统选用的 $U_{CC} = 15\text{ V}$, $U_{EE} = 10\text{ V}$, $I_{OP} = 5\text{ A}$,系统开关频率最大 20 kHz ,因此选用的驱动电阻为 $5.1\text{ }\Omega/2\text{ W}$ 。

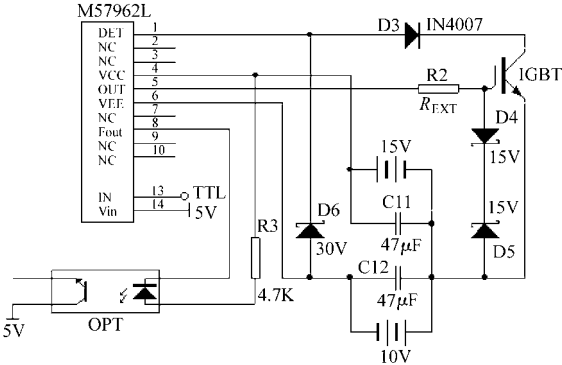


图5 IGBT驱动电路
Fig.5 Drive circuit of IGBT

在控制系统中需要注意:①V1、V3和V2、V4 2个桥臂的IGBT在换向时,由于器件关断时间大于开通时间,要注意有一定的死区时间。②交流电正半周的脉宽一定要严格等于下半周的脉宽,否则在极板上形成直流分量会引起极板的电解反应。

2.3 采集装置

负载 R_L (图4)上,波形为双极性矩形波脉冲电压,如果使用普通的万用表或者钳形表测量会有很大误差,而市售的真有效值测量仪表,价格很高。为此,本文针对该设备设计一种电流采集装置,如图6所示。

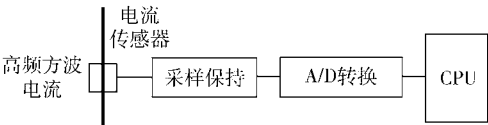


图6 采集装置电路图
Fig.6 Sampling circuit

该采集装置的电流传感器采用北京森社电子有

限公司的CHG1000F模块,能够将 20 kHz 的方波电流信号不失真地转换为电压信号。

由于系统采用的是方波信号,经过采样保持电路和A/D转换器件,将波形的峰值,也就是方波电流的幅值送入CPU,CPU根据占空比,计算有效值为

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{T} \int u_i^2 dt} = \sqrt{q} U_m \tag{3}$$

式中 U_o ——有效值,V q ——占空比
 U_m ——峰值,V

从整流输出端进行电压采样,采样信号为直流电压信号,因此在系统中将直流电压用电阻分压后接入A/D转换,送入CPU。

2.4 控制系统设计

控制系统框图如图7所示。其主要作用是通过键盘和显示,输入加工所需要的电压或电流、频率和占空比,然后CPU根据输入数值进行闭环控制,通过驱动改变晶闸管的导通角和IGBT的触发时间。

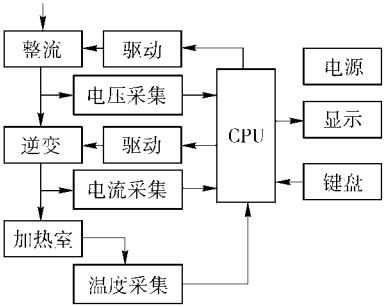


图7 控制系统框图
Fig.7 Frame of control system

设计注意事项:①控制系统电源使用隔离变压器单独供电。②由于控制系统的电压和电流的变化需要一定时间,同时为防止电压的微小波动引起控制角频繁变化,电压的容许误差设定在一个范围内。③由于逆变器输出电压与逆变前直流电压之差为固定的管压降,因此将整流后、逆变前的直流电压作为施加到加热室的脉冲电压,其有效值按式(3)计算。④由于主回路中电流较大,且泵的电磁环境对控制系统有较大影响,因此对于控制系统需要加电磁屏蔽措施。

3 加热室及流量控制

为保证液体食品物料的均匀受热,加热室采用平行极板设置,如图8所示。

工作方式(图1)为:进口接泵,通过调节泵的电压改变转速,确定流量,出口接压力表和调压阀,通过调压阀调整加热室内腔的压力,这样可以保证在超过标准大气压的加热条件下,被加热液体能够达到一定温度。

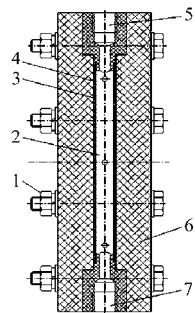


图 8 加热室结构

Fig. 8 Structure of ohmic heating chamber

1. 螺栓 2. 加热室内腔 3. 极板 4. 密封垫圈 5. 出口 6. 加热室主体 7. 进口

4 系统实现及实验

4.1 装置输出波形情况

对固形物含量为 8% 的豆浆进行了通电加热实验。利用电流传感器 (CHG - 500F 型, 北京森社电子有限公司) 和示波器 (TDS1012B - SC 型, Tektronix Inc.) 观察输出电流波形, 并进行菌落总数的实验。

实验中, 电流密度为 5 000 A/m²、电压频率为 2.5 kHz、占空比 50%, 豆浆出口温度保持 100℃、保温时间为 5 min, 连续运行 4 h, 加工豆浆 320 L, 系统稳定。其输出电流波形如图 9 所示。

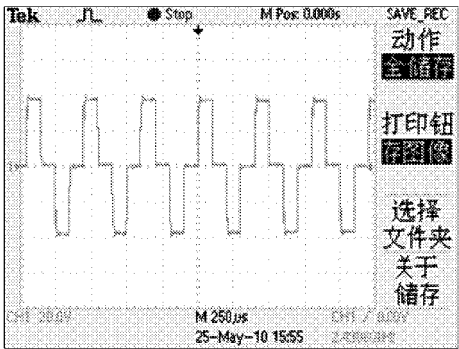


图 9 豆浆中 2.5 kHz 电流波形图

Fig. 9 2.5 kHz current waveform of soybean milk

4.2 电极污染对比

在不同频率下对豆浆作了通电加热的极板腐蚀实验, 其电流变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知, 加热频率越低, 电流下降速度越快。其原因是极板上粘附了豆浆并形成了焦糊。而当频率升高到 5 kHz 时, 在该电流下无明显腐蚀。

利用 10 kHz 交流电和工频正弦波交流电对豆浆进行加热, 并对比了极板污染情况, 如图 11 所示。从图 11 可看出, 在电压相同 (有效值同为 200 V) 的条件下, 利用 10 kHz 频率的双极性脉冲电源加热 30 min 时电极表面污染不明显, 而利用工频交流电加热 2 min 时就发现电极表面污染严重。因此, 利用本设备进行高频加热大大减少了极板的污染。

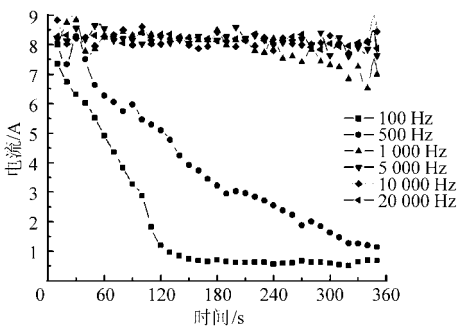


图 10 不同频率下电流变化

Fig. 10 Current curve of varied frequency

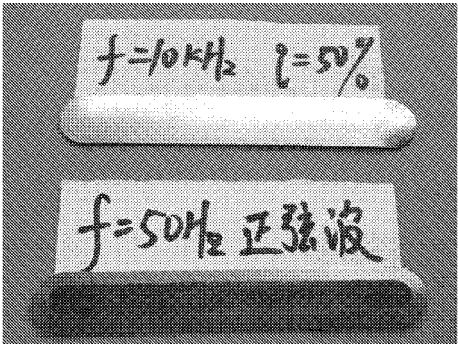


图 11 不同频率下交流电加热极板对比

Fig. 11 Ohmic heating electrode contrast of varied frequency AC power

4.3 菌落总数实验

将浸泡搓皮后的大豆打成豆浆, 利用液体食品连续通电加热装置加工后的豆浆进行了菌落总数的实验, 结果未检出细菌, 符合国家行业标准^[12]。

4.4 加热效率对比

在不同频率下加热豆浆, 加热电压为 200 V、电流 10 A, 测得不同频率下的电源效率, 如表 1 所示。

表 1 不同频率下电源效率

Tab. 1 Power efficiency of varied frequency

加热频率/kHz	10	5	1	0.5	0.1
电源效率/%	87.2	90.0	92.1	92.2	92.2

由表 1 可知, 电源加热频率越高, 电力电子器件的动态损耗越多, 电源的效率越低。当电源频率低时, 只有静态损耗和线路损耗, 电源工作效率较高。因此, 考虑节能减排, 在对液态食品加热时, 要考虑在符合要求的前提下, 尽可能降低加热频率。

5 结论

(1) 液态食品物料的处理速度可通过泵流量和电源提供不同的电压进行调节。

(2) 电源部分的电压可在 0 ~ 200 V 连续调节, 电流密度由被加热物料的电导率和电压确定, 其频率可 1 ~ 20 kHz 连续调节, 其占空比可以 0 ~ 1 连续

调节。

(3)极板与物料直接接触的情况下,长时间工作无明显腐蚀。因此整个设备清洗简单方便,维护周期长。

(4)频率越高对极板腐蚀越小,但是提高频率会使效率越低。在使用本设备进行通电加热时,需要统筹考虑极板污染和工作效率,合理选择电源工作频率。

参 考 文 献

1 李修渠. 通电加热在食品加工中的应用[J]. 食品科技,2001(6): 10~12.
Li Xiuqu. Use of ohmic heating in food industry[J]. Food Science and Technology,2001(6):10~12. (in Chinese)

2 李法德,孙玉利,李陆星. 连续通电加热条件下豆浆的电导率[J]. 农业工程学报,2008,24(12):275~278.
Li Fade,Sun Yuli,Li Luxing. Electrical conductivity of soybean milk during cooking with continuous ohmic heating device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(12):275~278. (in Chinese)

3 Sastry S K,Barach J. Ohmic and inductive heating[J]. Journal of Food Science,2000,65(Supp.8):42~46.

4 Ghnimi S,Flach-Malaspina N,Dresche M,et al. Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids[J]. Chemical Engineering Research and Design,2008,86(6):626~632.

5 Knirsch M C,Santos C A, Vicente A,et al. Ohmic heating—a review[J]. Trends in Food Science & Technology,2010,21(9):436~441.

6 Li F D, Li L T, Li Z,et al. Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering,2004,62(2):113~120.

7 Stancl J,Zitny R. Milk fouling at direct ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering,2010,99(4):437~444.

8 孙玉利. 液态食品连续通电加热系统的实验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2005.
Sun Yuli. Experimental study on continuous ohmic heating system for liquid food [D]. Taian: Shandong Agricultural University,2005. (in Chinese)

9 李陆星. 连续通电加热系统的温度分布与极板污染的实验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2007.
Li Luxing. Experimental study on temperature distribution and electrode fouling in continuous ohmic heating system [D]. Taian:Shandong Agricultural University,2007. (in Chinese)

10 王冉冉,朱敏,李法德. 食品通电加热中极板污染问题研究进展[J]. 农业工程,2011,1(1):67~71.
Wang Ranran,Zhu Min,Li Fade. Fouling and corrosion of electrode by ohmic heating in food processing[J]. Agricultural Engineering,2011,1(1):67~71. (in Chinese)

11 李陆星,许振珊,李法德. 连续通电加热系统极板污染问题的实验研究[J]. 食品科技,2010,35(7):153~156.
Li Luxing,Xu Zhenshan,Li Fade. Experimental study on electrode fouling in continuous ohmic heating system[J]. Food Science and Technology,2010,35(7):153~156. (in Chinese)

12 QB/T 2132—2008 植物蛋白饮料 豆奶(豆浆)和豆奶饮料[S]. 2008.
QB/T 2132—2008 Plant protein beverage—soymilk and soy drink[S]. 2008. (in Chinese)

(上接第9页)

5 王东亮,管继富,王文瑞. 半主动油气悬架系统模糊控制[J]. 农业机械学报, 2009,40(4):23~26.
Wang Dongliang, Guan Jifu, Wang Wenrui. Fuzzy control system for semi-active hydro-pneumatic suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4):23~26. (in Chinese)

6 Du Haiping, Kam Yim Sze, James Lam. Semi-active H_{∞} control of vehicle suspension with magneto-rheological dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(3~5):981~996.

7 Christophe Lauwerys, Jan Swevers, Paul Sas. Robust linear control of an active suspension on a quarter car test-rig [J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(5):577~586.

8 汪若尘,江浩斌,张孝良,等. 阻尼非线性半主动悬架建模与控制[J]. 农业机械学报,2008,39(12):14~17.
Wang Ruochen, Jiang Haobin, Zhang Xiaoliang, et al. Modeling and control of semi-active suspension with nonlinear damping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(12):14~17. (in Chinese)