

食品通电加热速率控制系统设计与实验

谢子明¹, 杨鹏¹, 张博¹, 李星恕^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2. 陕西省农业装备工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

摘要: 加热速率对食品品质影响很大。通电加热为食品加工提供了一种全新的加热方法, 但由于当前通电加热系统多采用恒压电源供电, 因而加热速率控制一直是业界的难点。本研究设计了一个基于单片机的食品通电加热速率控制系统, 该系统主要由单片机、调压电路、数据采集电路、功能按键、液晶显示屏、加热槽构成, 可以设定加热速率, 能实时监控加热过程中的温度变化。在加热过程中采用复合控制方法, 根据温度变化实时调节加热槽两端电压, 使加热速率保持在设定值。用该系统对牛奶进行了加热实验, 结果表明, 在设定加热速率分别为 6 °C/min、8 °C/min、10 °C/min、12 °C/min 时, 通电加热过程中牛奶的温度与时间均保持良好的线性关系, 实际加热速率与设定值之间的相对误差为 0.5~3.83%。该研究为食品通电加热过程中加热速率的控制提供了参考。

关键词: 通电加热; 加热速率; 温度; 自动控制

文章编号: 1673-9078(2014)5-161-166

Design of an Ohmic Heating Rate Control System for Food Processing

XIE Zi-ming¹, YANG Peng¹, ZHANG Bo¹, LI Xing-shu^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2. Shaanxi Engineering Research Center for Agricultural Equipment, Yangling 712100, China)

Abstract: Heating rate has a great influence on food quality, ohmic heating provides a new heating method for food processing. However, the control of the heating rate has been considered as the difficulty in food industry for the constant voltage control applied in current ohmic heating systems. In this study, an ohmic heating rate control system was designed based on single chip microcomputer (SCM), including a single chip microcomputer, a voltage regulator circuit, a data acquisition circuit, function keys, a LCD screen and a heating cell. The system could not only set the heating rate, but also give a real-time monitoring to the temperature change during the heating process. Compound control method was adopted to maintain the heating rate at the setting value during heating. Afterwards, the system was tested by heating milk. The result showed a good linear relationship between the temperature of milk and time when setting the heating rate of 6 °C/min, 8 °C/min, 10 °C/min and 12 °C/min respectively, and the relative error between actual heating rate and setting value was 0.50~3.83%. The study can provide a reference for the control of heating rate in the ohmic heating process.

Key words: ohmic heating; heating rate; temperature; automatic control

食品物料的加热处理在食品的加工过程中占有非常重要的地位, 它不仅直接影响食物的最终品质, 而且关系到加工过程中能源消耗及其加工成本的高低。食品的通电加热又称欧姆加热 (ohmic heating), 它是在电路中把物料作为一段导体, 利用物料本身在导电时所产生的热量达到加热的目的。相比于传统的加热方式, 通电加热具有加热快速、易控制、电热转化率

收稿日期: 2013-12-30

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003063-07); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (Z109021106, Z109021303)

作者简介: 谢子明 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事通电加热在食品加工中的应用方面的研究

通讯作者: 李星恕 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业机械装备开发, 农产品品质无损检测方面的研究

高、无污染等优点, 因此被认为是食品加工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、灭菌等领域具有广泛的应用前景^[1~4]。

现在大部分通电加热系统采用市电供电, 电压恒定, 在加热过程中食品电导率随温度的升高而增加^[5], 因此食品通电加热速率随着温度的升高而逐渐增大。但是加热速率对食品的加工品质有很大的影响。杨玉娥把猪里脊肉试样从 30 °C 加热到 100 °C 时发现, 在加热速率较快时猪肉的剪切力值较小, 提高加热速率可以提高猪肉的嫩度^[6]; 王君立通过实验发现, 固定加热温度和热处理时间不变 (95 °C, 5 min), 加热速率越小, 熟豆浆的粘度越大, 加热速率为 6.3 °C/min 时粘度适中^[7]; 杨铭铎在研究猪肉通电加热解冻时发

现,提高冻肉的解冻速率可以很好的保持肉的品质^[8]。因此,为了控制通电加热过程中食品的加工品质,设计一种通电加热速率的自动控制系统非常必要,但迄今为止相关的研究还未见报道。

本文设计了一种食品通电加热速率控制系统。该系统以单片机为控制器,可以设定通电加热速率、实时检测加热槽中的温度,并以牛奶为实验对象验证了该系统的控制效果。

1 通电加热速率控制系统设计

1.1 通电加热速率控制原理

通电加热过程中,通电加热产生的热量一部分用于食品的加热,另一部分用于补偿加热槽与周围环境之间的热损失,其关系如方程(1)所示。方程左端为通电加热的总功率,右端第一项为用于食品加热的功率,第二项为加热槽对外部环境的散热^[9]。不考虑其他方式的热损失,且认为食品物料的质量不变^[10]。

$$U_t I_t = mc \frac{dT_t}{dt} + hA(T_t - T_\infty) \quad (1)$$

式中 U_t : 第 t 个时间周期内施加的电压; I_t : 第 t 个时间周期内流过加热槽的电流; m : 食品物料的质量; c : 食品物料的比热容; dT_t : 第 t 个时间周期内食品物料的升温量; dt : 数据采集周期, 2 秒; h : 热传导系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; A : 加热槽外表面积; T_t : 第 t 个时间周期食品物料的初始温度; T_∞ : 环境温度。

流过加热槽的电流由电流采集电路获得; 加热槽与周围环境以自然对流方式进行热交换, 总体热传导系数 h 等于 $10 W/(m^2 \cdot K)^{[11]}$;

为使第 $t+1$ 个时间周期内的加热速率等于第 t 个时间周期的加热速率, 在第 $t+1$ 个时间周期内施加的电压 U_{t+1} 应满足如下关系式,

$$U_{t+1} I_{t+1} = mc \frac{dT_{t+1}}{dt} + hA(T_{t+1} - T_\infty) \quad (2)$$

且

$$\frac{dT_{t+1}}{dt} = \frac{dT_t}{dt} = r \quad (3)$$

式中 r : 设定的加热速率

由(1)、(2)、(3)式可得,

$$U_{t+1} = \frac{U_t I_t + hA(T_{t+1} - T_t)}{I_{t+1}} \quad (4)$$

由式(4)可知,通过调节加热槽两端的电压即可控制食品通电加热过程中的加热速率。

1.2 硬件系统总体设计

实验系统主要由通电加热控制系统、数据采集系统、输入输出设备组成,如图1所示。

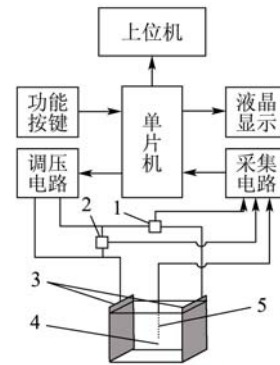


图1 系统总体结构图

Fig.1 Schematic diagram of system

注: 1.电流变送器; 2.电压变送器; 3.平行板电极; 4.加热槽; 5.K型热电偶。

通电加热控制系统主要包括调压电路和带有平行板电极的加热槽。加热槽用壁厚为 5 mm 的耐热有机玻璃制成, 装入厚度为 0.5 mm 的钛钢平行板电极后内部尺寸为 100×40×50 (长×宽×高, 单位: mm), 槽盖也由耐热有机玻璃制成。数据采集系统主要包括电流变送器 (JC5S08 型, 成都晶峰电子有限公司)、电压变送器 (JC0.002S23 型, 成都晶峰电子有限公司)、K 型热电偶、采集电路, 主要完成电流、电压、温度的实时采集。输入输出设备主要包括功能按键、液晶显示屏 (LCD1602)、上位机。功能按键用于设定加热速率等参数以及控制系统的启停; 液晶显示屏在加热过程中实时显示加热槽中的温度, 在设定参数时显示相应参数的值; 上位机接收单片机通过串口发送的温度、电压、电流等值, 用于实验分析。

1.3 调压电路设计

调压电路是通电加热控制系统的关键部分, 它由单片机控制输出电压的大小, 其包括主电路和控制电路。

1.3.1 主电路

主电路由整流滤波电路、Buck 电路和逆变电路组成, 如图 2 所示。

整流二极管 D1~D4、C0 构成整流滤波电路, 将输入的正弦交流电转变为平滑的直流电。VT0、续流二极管 D0、电感 L0、电容 C1 构成 Buck 电路, 通过控制 VT0 的导通与关断可以得到不同大小的直流电压。VT1~VT4 构成全桥逆变电路, 将调压后的直流电转变成矩形交流电。其中 VT0~VT4 均选用全控型器件 IGBT。

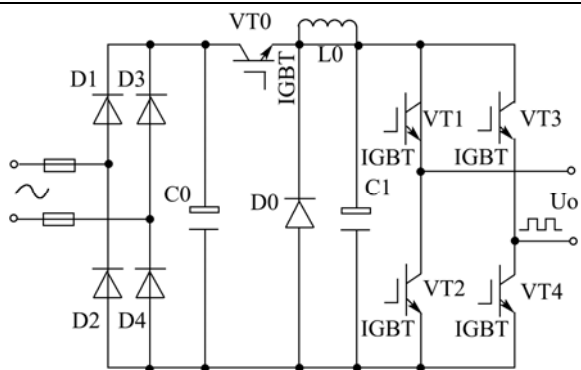


图2 主电路原理图

Fig.2 Schematic diagram of main circuit

1.3.2 控制电路

控制电路包括 Buck 电路的控制电路和逆变电路的控制电路，其主要作用是控制 VT0~VT5 的通断，使输出电压的大小和频率连续可调。

控制电路中两个主要芯片分别为 SG3525、EXB841。SG3525 是一种性能优良、功能齐全和通用性强的单片集成 PWM 控制芯片，其 9 脚电压控制输出 PWM 信号的占空比，其 11、14 引脚为图腾柱式输出，输出占空比范围为 0~49%^[12]。EXB841 是一种快速型 IGBT 驱动专用模块，最高使用频率为 40 KHz，能驱动 600 V/400 A 或者 1200 V/300 A 的 IGBT。

Buck 电路的控制电路控制 VT0 的导通与关断从而控制输出电压的大小，其电路如图 3 所示。

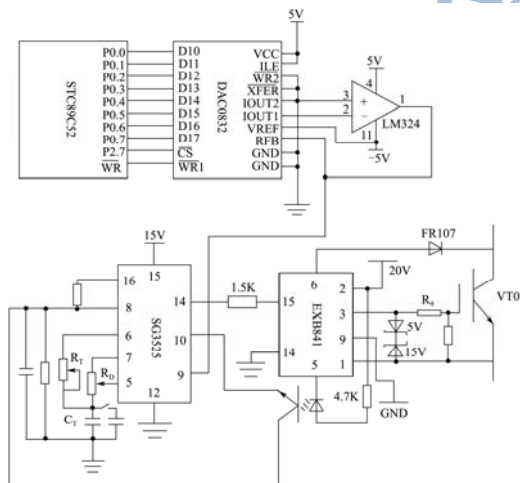


图3 Buck 电路的控制电路图

Fig.3 Control circuit of Buck circuit

单片机输出的数字量通过 DAC0832 转换输出相应的模拟电流，再经过运算放大器输出相应的电压值，并将该电压输入到 SG3525 的 9 脚。通过改变单片机输出的数字量即可改变 SG3525 输出 PWM 信号的占空比。

由于 SG3525 的驱动能力有限，SG3525 输出的 PWM 信号需经过驱动电路来控制 IGBT 的导通与关

断。Buck 电路输出的直流电压大小取决于 SG3525 输出 PWM 信号的占空比，当该占空比为 q 时，有：

$$U_{To} = q \cdot U_{Ti} \quad (5)$$

式中 U_{To} : Buck 电路的电压输出值; U_{Ti} : Buck 电路的电压输入值。

逆变电路控制电路的主要作用是控制逆变电路的两组 IGBT 交替导通，即 VT1、VT4 导通时 VT2、VT3 关断，VT1、VT4 关断时 VT2、VT3 导通，从而将调压后的直流电转变成矩形交流电。其电路如图 4 所示（其余外围电路同图 3），由一片 SG3525 同时控制 4 片 EXB841，每一片 EXB841 驱动一个 IGBT。同时，调节 R_T 的阻值或改变 C_T 的大小可以改变输出矩形交流电的频率。

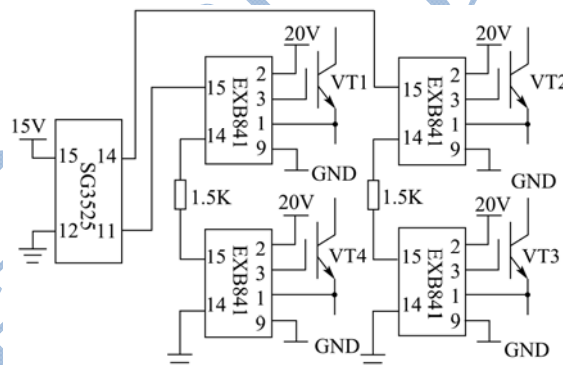


图4 逆变电路的控制电路图

Fig.4 Control circuit of inverter circuit

1.4 数据采集电路设计

1.4.1 温度采集电路

温度采集电路用于采集加热槽中的实时温度，电路如图 5 所示。MAX6675 不但可将模拟信号转换成 12 bit 对应的数字量，而且自带冷端补偿，其温度分辨能力达 0.25 °C。

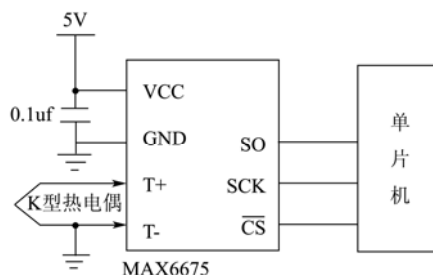


图5 温度采集电路

Fig.5 Temperature acquisition circuit

1.4.2 电压、电流采集电路

电压、电流采集电路用于采集加热槽中两电极板间的电压值与流过加热槽的电流值，其电路如图 6 所示。ADC0832 具有 8 位分辨率、双通道 A/D 转换，

因此只需一片 ADC0832 即可同时完成电压、电流采集。

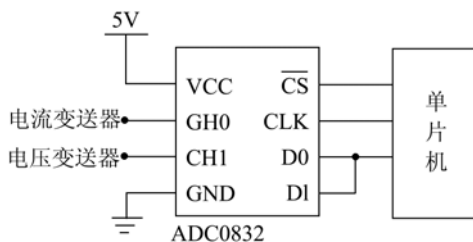


图6 电压、电流采集电路

Fig.6 Voltage and current acquisition circuit

1.5 软件设计

由于加热槽自身吸热、水分蒸发带走热量等原因，实际加热过程中

$$\frac{dT_{t+1}}{dt} \neq \frac{dT_t}{dt} \quad (6)$$

因此，式（4）变换成

$$U_{t+1} = \frac{U_t I_t + hA(T_{t+1} - T_t) + mc \left(\frac{dT_{t+1}}{dt} - \frac{dT_t}{dt} \right)}{I_{t+1}} \quad (7)$$

为消除其他因素对加热速率的影响，该系统采用复合控制(前馈-反馈控制)方式, 在加热过程中每 2 秒利用前馈控制方式调节加热槽两端电压一次。到达相应计时次数（设定加热速率大于等于 8 °C/min 时计时次数等于 5，否则等于 10）时，根据实际加热速率反馈调节用于食品加热的功率，加热速率反馈控制采用比例控制方式，如下式，

$$mc \frac{dT_{t+1}}{dt} = \left[1 - \left(\frac{T_{k+1} - T_k}{2 \times n} \times 60 - r \right) / r \right] \times mc \frac{dT_t}{dt} \quad (8)$$

即

$$\frac{dT_{t+1}}{dt} = \left[1 - \left(\frac{T_{k+1} - T_k}{2 \times n} \times 60 - r \right) / r \right] \times \frac{dT_t}{dt} \quad (9)$$

式中 T_{k+1} : 第 k+1 次调节功率时加热槽中的温度; T_k : 第 k 次调节功率时加热槽中的温度; n : 反馈调节所需计时次数; r : 设定的加热速率, °C/min。

加热速率反馈控制方框图如图 7 所示。

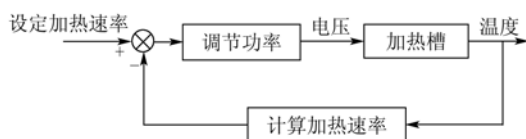


图7 加热速率反馈控制方框图

Fig.7 Block diagram of heating rate feedback control

系统工作流程如图 8 所示。其中设定的参数包括食品物料的比热容、密度、体积和加热速率。

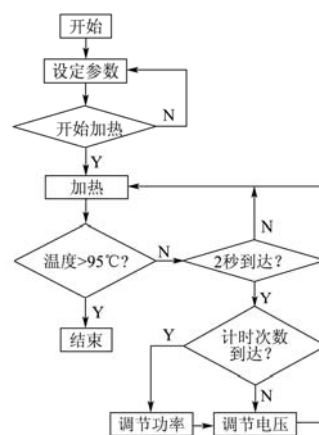


图8 系统工作流程图

Fig.8 Work flow chart of the system

2 实验

2.1 实验方法

为验证该系统的实际控制效果，利用该系统对牛奶进行加热实验。

通电加热前，量取 100 mL 牛奶，搅拌均匀后将其缓缓倒入加热槽中。

通电加热时，先通过功能按键设定物料的比热容、密度、体积和加热速率，设置完成后按下开始键便开始通电加热。实验时选取加热槽中物料的中心处为温度采集点。

2.2 结果与讨论

加热速率分别设置为 6 °C/min、8 °C/min、10 °C/min、12 °C/min 时，加热过程中流过加热槽的电流变化曲线如图 9 所示，两电极板间的电压变化曲线如图 10 所示，系统总功率变化曲线如图 11 所示。

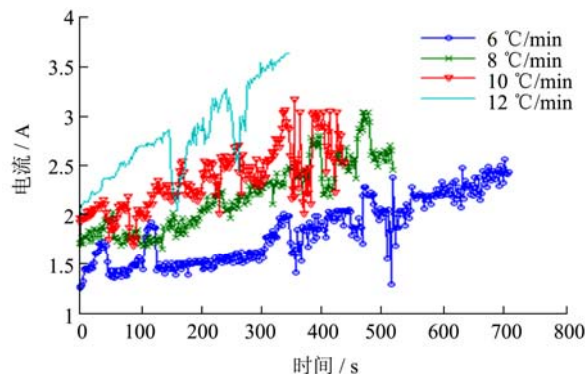


图9 电流随时间变化曲线

Fig.9 The electric current curves over time

从图 9、10 中可以看出，通电加热过程中，电流随时间的增加呈增大趋势，电压随时间的增加呈减小

趋势。这是因为通电加热过程中,随着加热时间的增加温度升高,牛奶的电导率增加,电阻减小,在保持相同加热速率的情况下,加热功率变化很小,由 $P=I^2R$ 可知,电阻变小时,电流会增大;而由 $U=IR$ 可知电阻的减小比电流的增大快。从图 11 中可以看出总功率整体呈增加趋势,因为随着温度的升高,加热槽对周围环境的热损失越大。

通电加热过程中,牛奶的温度随时间变化如图 12 所示。

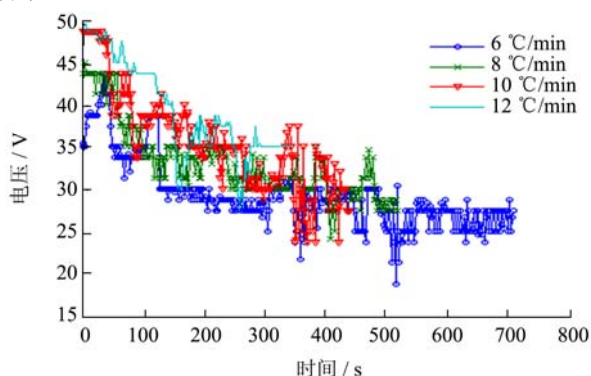


图 10 电压随时间变化曲线

Fig.10 The voltage curves over time

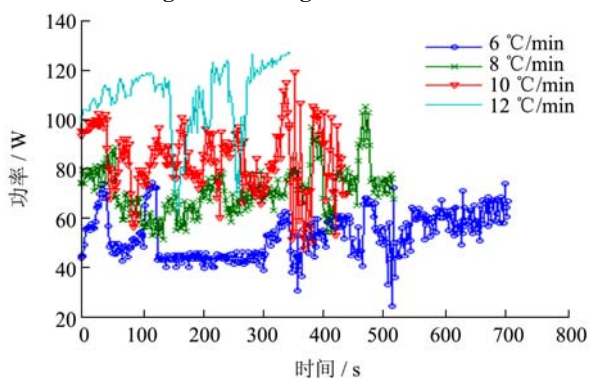


图 11 总功率随时间变化曲线

Fig.11 The power curves over time

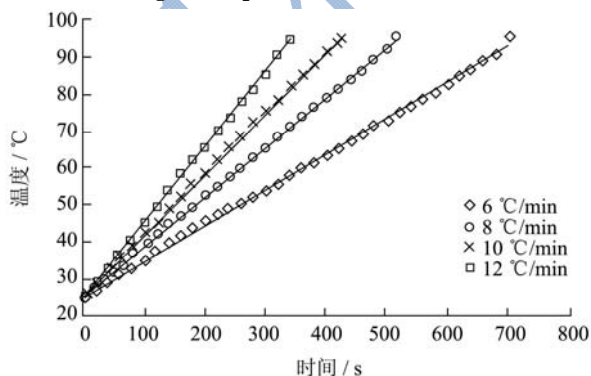


图 12 通电加热过程中温度与时间的关系

Fig.12 Relationship between temperature and time during ohmic heating

由图 12 可以看出,温度随时间均匀上升,保持了良好的线性关系。温度和加热时间的关系方程及加

热速率误差如表 1 所示。其中,误差值为正时表示实际加热速率大于设定加热速率,为负时表示实际加热速率小于设定加热速率。

表 1 温度与时间的线性拟合方程及加热速率误差

Table 1 The linear fitting equation of temperature and time and the heating rate error

设定加热速率	拟合方程 (T/°C,t/s)	R ²	实际加热速率	误差 /%
6	T=0.0961t+25.38	0.9989	5.77	-3.83
8	T=0.1327t+25.58	0.9995	7.96	-0.50
10	T=0.1640t+25.76	0.9996	9.84	-1.60
12	T=0.2034t+24.85	0.9994	12.20	1.67

注:加热速率单位: °C/min。

由表 1 可知,设定加热速率分别为 6 °C/min、8 °C/min、10 °C/min、12 °C/min 时,实际加热速率与设定值之间的相对误差最大为 3.83%,在 8 °C/min 时控制效果最佳,相对误差为 0.50%。结果说明,复合控制方法(前馈-反馈控制)能够很好的控制通电加热过程中的加热速率。

3 结论

3.1 设计了一个以单片机为控制器的食品通电加热速率控制系统,该系统可以设定加热速率,在加热过程中可以根据温度的变化自动调整加热槽两电极板间的电压,使整个加热过程速率恒定。

3.2 用该系统对牛奶进行了加热实验,在设定加热速率分别为 6 °C/min、8 °C/min、10 °C/min、12 °C/min 时,实际加热速率与设定值之间的相对误差为 0.50%~3.83%。复合控制方法(前馈-反馈控制)能够很好的控制通电加热过程中的加热速率。

参考文献

- [1] M C Knirsch, C Alves dos Santos, A A Martins de Oliveira Soares Vicente, et al. Ohmic heating-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(9): 436-441
- [2] F D Li, L T Li, Z Li, et al. Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 62(2): 113-120
- [3] S Ghnimi, N Flach-Malaspina, M Dresch. Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(a6): 626-632
- [4] 孙玉利,李法德,杨玉娥,等.通电加热技术在食品工业中的应用研究进展[J].农业工程学报,2004,20(6):296-300
SUN Yu-li, LI Fa-de, YANG Yu-e, et al. Research

- advances of application of ohmic heating in food industry [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 296-300
- [5] H Darvishi, M H Khostaghaza, G Najafi. Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013, 12(2): 101-108
- [6] 杨玉娥.通电加热对猪肉电导率和流变特性的影响[D].泰安:山东农业大学,2005
YANG Yu-e. Effect of ohmic heating on the pork's electrical conductivity and rheology characteristic [D]. Taian, Shandong Agricultural University, 2005
- [7] 王君立,唐传核,周志红,等.加工条件对微生物转谷氨酰胺酶(MTGase)酶促豆腐凝胶质构性质的影响[J].现代食品科技,2006,22(2):1-3,8
WANG Jun-li, TANG Chuan-he, ZHOU Zhi-hong, et al. The Effects of Different Processing Methods on the Texture of Microbial [J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(2): 1-3, 8
- [8] 杨铭铎,张春梅,李钢.猪肉通电加热解冻及快餐肠制作工艺研究[J].农业工程学报,2009(S1):107-111
YANG Ming-duo, ZHANG Chun-mei, LI Gang. Ohmic heating pork thawing and fabrication of fast food intestinal [J]. Transactions of the CSAE. 2009(S1): 107-111
- [9] T Tumpunuvat, W Jittanit. The temperature prediction of some botanical beverages, concentrated juices and purees of orange and pineapple during ohmic heating [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(2): 226-233
- [10] Li Xingshu. Development of tofu processing system by the application of electrical impedance spectroscopy and ohmic heating [D]. Kobe: Kobe university, 2009
- [11] 熊秀芳,李星恕,郭康权,等.豆浆通电加热过程有限元解析与验证[J].农业机械学报,2011,42(12):158-163
XIONG Xiu-fang, LI Xing-shu, GUO Kang-quan, et al. FEM Analysis and Validation of Ohmic Heating Process of Soymilk [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 158-163
- [12] 刘倩倩.矩形波交流原油脱水电源的研制[J].电力电子技术,2009,43(8):52-53
LIU Qian-qian. Development of Crude Oil Dehydration Electrical Source with Alternate Current Rectangle-wave [J]. Power Electronics, 2009, 43(8): 52-53