

# 一种微波干燥控制系统的设计

倪乘阳<sup>1</sup>, 徐欧官<sup>1</sup>, 李臻锋<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 之江学院, 浙江 绍兴 312030;

2. 江南大学 机械工程学院 江苏省食品先进制造装备重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 设计了一种适用于果蔬等农产品微波干燥的反馈控制系统; 论述了系统的实现原理及其功能模块, 探讨了系统的硬件和软件的设计思路 and 实现方法; 硬件部分包括微波干燥单元、温度检测与控制单元、重量检测单元和上位机控制单元等; 软件部分主要为 LabVIEW 控制程序; 完成系统的搭建以后, 应用纯净水加热实验对改造后的家用微波炉的输出功率进行标定, 基于实验数据建立了微波功率与控制电压间的数学模型; 以生姜为样本开展恒温干燥实验, 发现温度反馈控制调整时间不超过 1 s, 温度控制精度为 2℃; 实验结果表明微波干燥系统可实时记录温度、重量等数据, 能实现微波功率的连续、无级调节。

**关键词:** 微波干燥; 控制系统; 微波功率; 反馈控制

## Design of a Microwave Drying Control System

Ni Chengyang<sup>1</sup>, Xu Ouguan<sup>1</sup>, Li Zhenfeng<sup>2</sup>

(1. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Shaoxing 312030, China;

2. School of Mechanical Engineering, Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A microwave drying feedback control system was designed for the purpose of the microwave drying for fruits and vegetables and other agricultural products. The realization principle and each function module of the system were discussed in detail. The design ideas and realization methods of the system hardware and software were investigated. The hardware of the system consists of microwave drying unit, temperature and power control unit, weight detection unit and upper computer control unit. The software of the system is LabVIEW control program. After the system was setup, the power of a reconstructed home microwave oven was calibrated by a water heating experiment. The mathematical model between microwave power and voltage of the power control circuit was established based on the experiment data. Constant temperature drying experiment was carried out with ginger as sample. The temperature feedback control adjustment time was under 1 second and the temperature control precision was up to 2℃ during the experiment. The experiment results showed that the system could record temperature, weight and other data in real time. It was also showed that the microwave power can be adjusted continuously and steplessly based on temperature feedback control.

**Keywords:** microwave drying; control system; microwave power; feedback control

## 0 引言

干燥等加工方式不但延长农产品的货架期, 而且还大大缩小了它的重量和体积, 使其包装和运输成本降低, 增加它的附加值。微波干燥是一种全新的干燥方法<sup>[1]</sup>, 它利用微波产生交变电磁场, 在交变电磁场的作用下, 固体介质中的水分子被激化, 迅速旋转, 相互摩擦, 产生热量, 从而使固体物料实现干燥<sup>[2]</sup>。微波干燥具有能耗低、效率高、时间短、质量好等优点, 在食品、农产品的干燥加工

中应用广泛<sup>[3-7]</sup>。

本文拟设计一种微波干燥反馈控制系统, 主要用于果蔬等农产品的恒温干燥。文中首先探讨了控制系统的结构及实现原理; 然后研究了硬件的设计过程, 着重介绍微波干燥单元、温度检测与控制单元、重量检测单元和上位机控制单元等各个功能模块的设计思路 and 实现方法; 接着分析了控制系统软件的设计及实现; 最后开展实验, 应用纯净水加热实验校正改造后的微波炉的输出功率, 建立微波功率与控制电压间的数学模型; 以生姜为样本开展恒温干燥实验来验证所设计的微波干燥控制系统的可靠性。

## 1 系统结构及原理

微波干燥控制系统由微波干燥单元、温度检测与控制单元、重量检测单元和上位机控制单元构成, 系统实现原理如图 1 所示。微波干燥单元含改装后的家用微波炉、220 V 交流 (AC) 功率控制电路和用于装载样品的聚四氟乙烯容器, 是控制系统的主体; 温度检测与控制单元包括测量温度的光纤测温仪和调节电压的功率控制器, 光纤测温仪

收稿日期: 2020-09-15; 修回日期: 2020-11-14。

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (Y17F030059); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放课题 (FM-201603)。

作者简介: 倪乘阳 (1999-), 男, 江苏苏州人, 大学本科生, 主要从事复杂工业过程建模、控制及优化方向的研究。

李臻锋 (1968-), 男, 加拿大人, 博士, 教授, 博导, 主要从事检测与控制技术, 食品加工装备与控制方向的研究。

通讯作者: 徐欧官 (1978-), 男, 浙江临海人, 博士, 教授, 主要从事复杂工业过程建模、控制及优化方向的研究。

在线检测被干燥物料的温度，功率控制器根据检测的温度实时调节微波炉的输入电压，进而改变微波炉的输出功率，实现微波炉温度的调节和控制；重量检测单元主要包含电子天平，用于在线检测被干燥物料的重量，通过在线检测的物料重量来计算物料的含水率，以此判别干燥过程的启停；上位机控制单元主要包括装载 LabVIEW 应用软件的电脑、数据采集卡和调试好的控制程序，数据采集卡在采集实验过程中的温度信号，整个系统均由上位机控制，微波干燥过程完全自动控制。

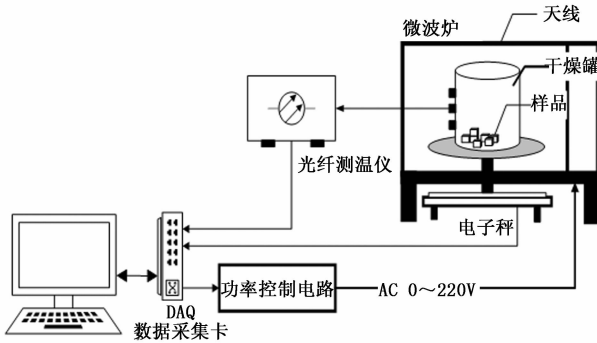


图 1 微波干燥控制系统

## 2 硬件设计

### 2.1 微波干燥单元

微波干燥单元是微波干燥控制系统的核心，微波干燥单元的设计包括微波炉的电路改造和功率控制电路的设计。

#### 2.1.1 微波炉的改造

微波干燥单元的微波炉是由家用微波炉改造而成的。家用微波炉的功率和干燥时间由外部旋钮手动控制。功率控制器仅有低火、中火、高火三种干燥档位可选，分别对应微波炉 17%、55%、100% 的输出功率，有限的输出功率选择无法实现功率的连续、无级调节，极易导致较差干燥品质。时间控制器的存在无法使微波炉开展连续的长时间的实验。因此需要对家用微波炉的线路进行改造，拆除功率控制器和时间控制器，设计一种功率控制器，使微波炉的功率实现连续可调。该功率控制器主要功能是对微波炉的输入电压实现调控，而且是无级调控，以较弱的直流电 (0~5 V) 控制较强的交流电 (0~220 V)，使得微波炉由改造前的低火、中火、高火三种档位变成微波功率 130~540 W 连续、无级可调。

#### 2.1.2 功率控制电路的设计

微波炉的核心是磁控管，微波是由磁控管产生的。微波炉输出功率的大小是通过调节磁控管的电压实现的。采用占空比相位调节电路来控制微波炉的输出功率<sup>[8]</sup>。功率控制电路主要包括光电隔离电路的设计、过零点电路的设计、可控硅的设计和占空比调节电路的设计等，功率控制电路原理图见图 2。光电隔离设计由 H11L1 实现，可控硅电路包括 BTA41-600B 和 MOC3023，占空比调节电路由

LM555 实现。

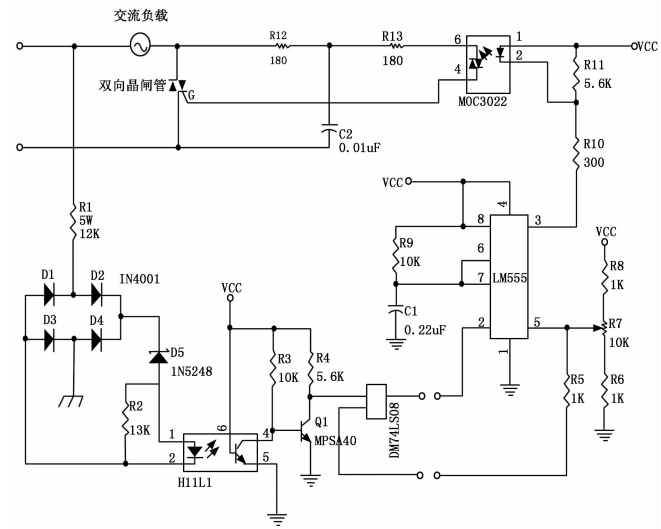


图 2 功率控制电路原理图

### 2.2 温度检测控制单元

温度检测控制单元主要由温度传感器和功率控制器等硬件构成。而温度、功率的控制需要数据采集卡和 LabVIEW 程序配合实现。

#### 2.2.1 温度传感器选择

为保证微波干燥系统温度恒定，要求系统的温度能实时、准确地被测量，ThermAgile-RD 荧光光纤测温仪被选为测温仪器，该测温仪是西安和其光电科技有限公司生产的，其测量精度为 0.1 °C。这种型号测温仪的荧光探头是由稀土材料制成的，这种材料具有化学惰性的特点，由此材料制成的探头具有不受外界微波、电、射频、磁等干扰的特点，而且还具有测温精度高、响应时间快、尺寸小等特性，适合应用于微波干燥系统。

#### 2.2.2 温度的测量与控制

在测温的过程中，光纤测温仪的探头置于被测物料的中心，彼此充分接触。探头获取的温度信号被转为标准的电压信号 (0~5 V)，数据采集卡实时采集该信号，输入 LabVIEW 程序中，通过电压-温度转换公式计算被测物料的实时温度。光纤传感器的电压-温度对应关系需要标定，标定后的关系式为：

$$T = 44.246 * U - 21.873$$

被测物料的温度调节与控制主要是通过改变微波炉的输出功率实现的，图 3 为温度反馈控制系统框图。当测温仪检测到的物料温度小于设定温度时，经 LabVIEW 控制程序中的 PID 调压模块处理，提高功率控制器的输入电压，使微波炉的输出功率增加，物料温度随之上升；当测温仪检测到的温度大于设定温度时，经 PID 调压模块处理，降低功率控制器输入电压，减少微波炉的输出功率，使物料温度下降，从而达到维持物料温度恒定的目的。

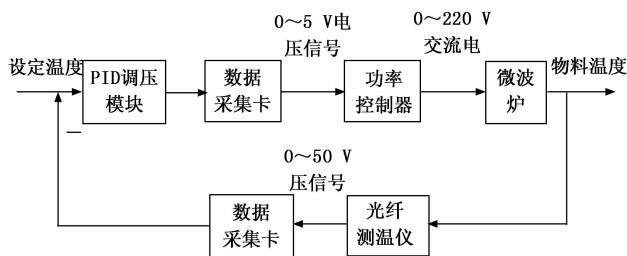


图 3 温度控制系统框图

### 2.3 重量检测单元

重量检测单元的主要设备为电子天平。它的作用是通过物料重量检测来计算物料的含水率，含水率（湿基）计算式如下：

$$W_t = \frac{M_t - M}{M_t}$$

其中： $W_t$  为干燥样品在  $t$  时刻的湿基含水率（g/g）； $M_t$  为  $t$  时刻物料的总重量（g）； $M$  为物料的绝干重量（g）。

若采用离线的方式测量物料重量，不但破坏了干燥过程的连续性，而且影响实验结果的准确性。选取 LBA5200 电子天平在线检测物料重量，它通过 RS232 串口与电脑通信。该电子天平可在线测量并记录重量信号，且精度为 0.01 g，满足要求。

### 2.4 上位机控制单元

上位机控制单元主要包括数据采集卡和安装 LabVIEW 应用软件的电脑。

本系统的输入信号为温度信号（0~5 V）和重量信号，输出信号为功率控制器的控制电压（0~5 V）。由于 LBA5200 电子天平采集的重量信号通过串口（RS232）与电脑直接通信，重量信号不必通过数据采集卡采集。所以在选择采集卡时，只需考虑模拟输入和模拟输出各一路，而且输入和输出信号均为 0~5 V 的标准电压。数据输入输出如图 4 所示。

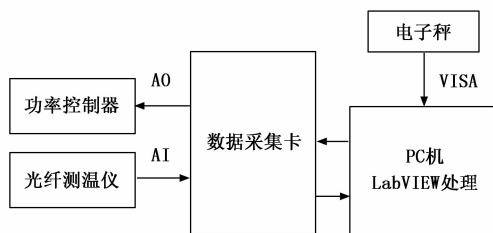


图 4 数据输入输出图

据上分析，本系统选用的数据采集卡的型号为 NIUSB-6008，该采集卡有模拟输入通道 8 路，模拟输出通道 4 路，数字输入通道和输出通道各 12 路，和带 USB 接口的 32 位计数器 1 个。NIUSB-6008 数据采集卡可以通过下载的 LabVIEW DAQ 助手与 LabVIEW 应用软件配套使用。

## 3 软件设计——LabVIEW 控制程序

LabVIEW 是由美国国家仪器公司（NI）研发的一种图形化的编程语言，是一款标准的数据采集和仪器控制应用软件，它简单易学、功能强大。虚拟仪器（VI, Virtual Instrument）是一种计算机仪器系统，显示功能在以计算机为核心所构成的硬件平台上实现，代替仪器的控制面板，测试分析功能由软件实现。VI 由两个界面组成，其一为前面板（Front Panel），用于人机交互，包括指示器（Indicators）和控件（Controls）等用来模拟仪器的输出装置和输入装置；其二为编程区，即为程序图（Diagram）。由程序图发出指令到前面板。LabVIEW 被认为是 VI 技术最具有发展前景和影响力的软件平台。

本系统采用 LabVIEW 实时记录干燥过程中物料的重量和温度，由温度反馈控制微波炉的输出功率。为了实现物料干燥的自动化控制，通过程序在线测量并实时记录温度、重量等数据，根据这些数据实现干燥过程的反馈控制。果蔬等农产品的微波恒温干燥控制系统主要包括重量控制程序和温度控制程序，其流程见图 5。重量控制程序控制干燥过程的启动或停止，当物料的含水率达到设定值时，微波炉停止工作。温度控制程序包含了温度检测，通过温度反馈控制微波炉的输出功率，使温度调节过程快速、准确、稳定。

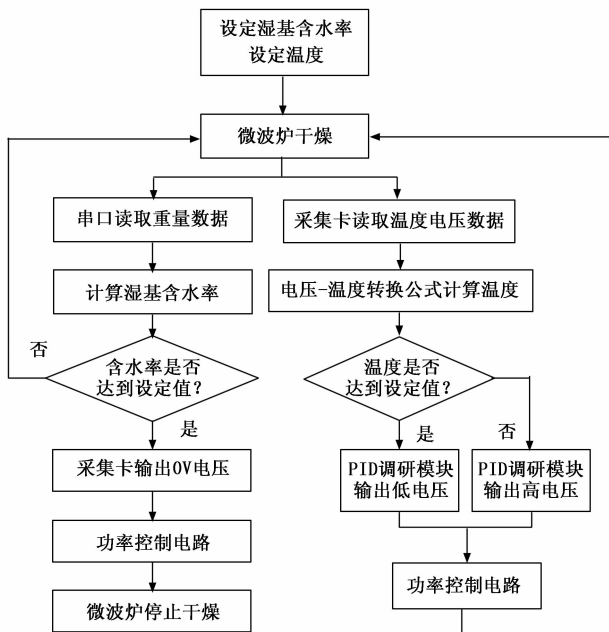


图 5 微波干燥控制程序流程图

微波恒温干燥控制程序见图 6。while 循环使微波干燥控制程序中前面板与程序图这两个界面每 1 s 运行一次。前面板含有湿基含水率设定值和温度设定值输入框，还包含重量、温度和湿基含水率等指标的显示图表。程序会自动记录重量、温度等数据，且根据重量数据会自动计算湿基

含水率，干燥的过程中只需要监测前面板。在干燥的过程中，除了物料的放置和移出微波炉这两个环节需要人工参与外，其它环节均不需要人工操作，全部由程序自动控制。微波干燥过程完全实现自动化，控制效果得到极大的提升，不仅减少了实验过程中人力的使用，而且提高了实验的准确性。

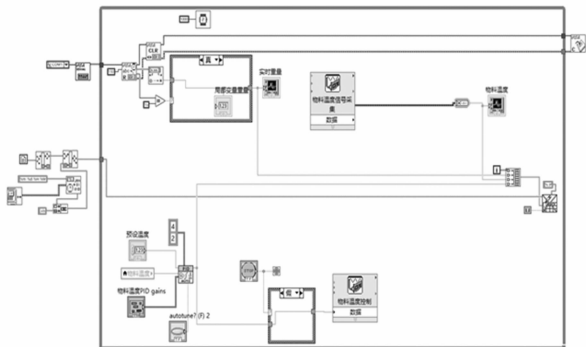


图 6 恒温干燥控制程序图

## 4 实验结果及分析

### 4.1 微波炉输出功率的标定

为实现微波炉输出功率连续并无级可调，设计了功率控制电路替换家用微波炉的控制器。采用纯净水加热实验功率控制电路的控制电压与微波炉的输出功率间的对应进行标定。

实验过程：用烧杯盛一定量的纯净水，将他们放置于微波炉中；将光纤探头置于纯净水中，实时检测水的温度；启动微波炉，记录微波炉的加热时间和温度，当水温达到 100℃ 时停止加热。实验过程中有 3 个假定：1) 忽略烧杯吸收的热量；2) 忽略水蒸气的蒸发量；3) 大气压力始终维持在一个标准大气压。

实验步骤：1) 倒 500 mL 纯净水于烧杯中，将盛有纯净水的烧杯放置于微波炉，并将光纤探头插入到水中（探头不接触杯壁或杯底）；2) 设定控制电压等参数后，启动微波炉开始纯净水加热实验，记录电压、温度等实验数据；3) 分析数据并进行相应处理。

通过下式计算微波炉的功率：

$$P = Q / (\Delta t)$$

$$Q = c \times m \times (T_1 - T_0) = c \times v \times \rho \times (T_1 - T_0)$$

式中， $P$  是微波炉功率 (W)； $Q$  是水吸收的热量 (J)； $\Delta t$  是时间间隔 (s)； $c$  是纯净水的比热容，取值  $4.2 \times 10^3 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{℃})$ ； $\rho$  是纯净水的密度，取值  $1 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$ ； $v$  是烧杯中的纯净水的体积 ( $\text{m}^3$ )； $T_1$  和  $T_0$  分别表示两个时刻的水的温度 ( $T_1 > T_0$ ) (℃)。为方便计算，将 40℃ 作为初始水温  $T_0$ ，100℃ 作为终止温度  $T_1$ 。

实验结果：功率控制电路的电压以 0.2 V 的间隔从 0 V 增加到 5 V，在给定的控制电压下进行功率标定实验。为确

保控制电压数值准确，使用万用表对与数据采集卡连接的调压模块的端电压进行测量并记录。每组实验重复三次，实验结果取平均值，标定结果见表 1。

表 1 微波炉输出功率标定实验

调压模块控制 电压 $u/V$	微波炉输出 功率 $P/W$	调压模块控制 电压 $u/V$	微波炉输出 功率 $P/W$
2.0	0	3.6	534.86
2.2	116.80	3.8	550.96
2.4	256.38	4.0	554.45
2.6	357.59	4.2	527.49
2.8	440.69	4.4	536.07
3.0	484.57	4.6	552.83
3.2	502.80	4.8	542.43
3.4	529.23	5.0	529.13

由表 1 可知，当功率控制电路电压小于 2.0 V 时，微波炉的输出功率为 0 W。主要原因有两点：1) 功率控制器的电压在 0~0.9 V 之间时，控制器处于全闭状态，控制电路的输出电压为 0；2) 功率控制器电压在 0.9~2.0 V 之间时，功率控制器的输出电压低于磁控管的触发电压，磁控管无法启动，不能产生微波。功率控制器的输出电压大于 2.0 V 时，磁控管已正常工作，能产生微波，而且微波功率随着输出电压的增加而增大。当功率控制器的输出电压在 4.2~5.0 V 之间时，微波炉的输出功率存在一定的波动，功率值随着控制电压的增加先增大而后减小。究其原因：当控制电压大于 4.2 V 时，功率控制器已处于全开状态，微波炉的输入电压已是全电压。因此，探讨并分析电压值在 2.2~4.2 V 区间内的微波炉输出功率与功率控制器控制电压之间的变化规律是合适的。利用最小二乘法对标定实验的散点图进行多项式拟合，得到的方程为：

$$P = 119.6u^3 - 1301u^2 + 4766u - 5342$$

经分析该方程的确定系数  $R^2$  为 0.998，说明方程拟合度较好。

### 4.2 苹果的恒温干燥实验

为验证控制系统的控制效果，选取生姜为样本进行恒温干燥实验。记录生姜在干燥过程中的温度、干燥时间等数据。生姜采购自当地市场，被分割成质量约为  $20 \pm 1 \text{ g}$  的立方体样品 ( $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ )；为防止氧化，将样品置于 80℃ 的水浴中浸泡 1 min。样品分别在 50℃、60℃、70℃ 和 80℃ 下恒温干燥。将光纤插入生姜样本中心检测物料温度，将检测的温度信号与设定温度信号比较，经控制程序中的 PID 调压模块处理后，由采集卡输送至功率控制器，功率控制器的输出信号调节微波炉的输出功率，最终实现物料温度的调节和控制，达到恒温干燥的目的。

干燥时，先将生姜预处理，然后放置于干燥的容器内，将光纤测温仪的探头插入生姜内部。在确认数据采集卡的数据可以正常采集和输后，在控制面板上输入湿基含

水率(生姜干燥终点对应的含水率)和干燥温度,启动微波炉开始干燥。在干燥的初始阶段,设定温度大于测温仪所测到的物料温度,温度偏差输送给控制程序的 PID 调压模块,经处理后输出高电压给功率控制器,微波炉提高输出功率对物料加热;待温度达到设定温度后,经控制程序的 PID 调压模块运算处理,输出低电压给功率控制器,使微波炉以较低的功率持续工作,保持物料温度不变。在干燥的过程中,生姜的重量、温度等数据一直由上位机记录,直至到物料的含水率达到设定值,干燥结束,停止微波炉。

不同设定温度下的生姜恒温干燥曲线如图 7 所示。在干燥的初始阶段,物料的温度快速上升,可以在短期内达到设定温度,然后以恒定的温度干燥至物料的含水率达到要求为止。在干燥的过程中,物料的温度在设定值附近上下波动。由图 7 可知,功率反馈控制调整时间不超过 1 秒,温度偏差超过  $2^{\circ}\text{C}$ ,说明微波干燥过程的温度调节快速、有效。

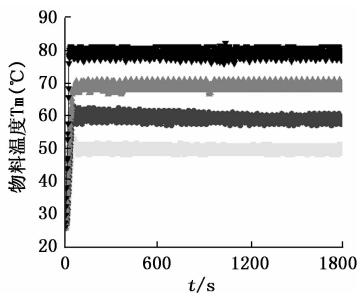


图 7 恒温干燥曲线

## 5 结束语

本文设计了一种适用于果蔬等农产品恒温干燥的微波

干燥控制系统,该系统包含微波干燥单元、温度检测与控制单元、重量检测单元和上位机控制单元等四部分。完成了微波炉的改造,对微波炉的输出功率进行标定,建立了微波炉输出功率与控制电压之间的数学关系式。生姜的恒温干燥实验表明本系统可在线采集温度、重量等数据,能实现基于温度反馈的微波炉输出功率的连续、无级调节,干燥过程的温度控制快速、有效。

### 参考文献:

- [1] Jia Y Y, Khalifa I, Hu L L, et al. Influence of three different drying techniques on persimmon chip' characteristics: A comparison study among hot-air, combined hot-air-microwave, and vacuum-freeze drying techniques [J]. Food and Bioprocesses Processing, 2019, 118: 67-76.
- [2] 惠菊. 温度湿度可控的微波干燥系统设计及果蔬干燥特性研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- [3] Li Z F, Wang N, Raghavan G S V, et al. A microcontroller-based feedback power control system for a microwave drying processes [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22 (2): 309-314.
- [4] 李静. 基于电子鼻气味检测的苹果微波干燥方案优选 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (3): 312-318.
- [5] 朱德泉, 王继先, 钱良存, 等. 猕猴桃切片微波真空干燥工艺参数的优化 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (3): 248-252.
- [6] 魏巍, 李维新, 何志刚, 等. 绿茶微波真空干燥特性及动力学模型 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (10): 367-371.
- [7] 熊永森, 王俊, 王金双. 微波干燥胡萝卜片工艺试验研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24 (6): 291-294.
- [8] 王亚林. 双向晶闸管原理及在交流调压电路中的应用 [J]. 信息通信, 2012, 21 (1): 80-83.

(上接第 252 页)

实际应用场景,针对网络通信状态不稳定、节点设备易损坏、维护人员不足的现实情况,设计了基于区块链的分布式入网终端鉴权体系<sup>[10]</sup>,并解决了区块数据结构设计、共识算法实现、区块链数据持久化及数据加密实现等几个核心技术问题,搭建了分布式网络终端授权系统,并与传统的集中式鉴权模式从性能方面进行了比较,为构建符合作战保障需求的网络终端入网鉴权服务的实现进行了探索。

### 参考文献:

- [1] Kurose J F, Ross K W. 计算机网络自顶向下方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 徐令予. 互联网安全的忠诚卫士 [J]. 中国计算机学会通讯, 2018, 12 (3): 39-46.
- [3] 何浦, 于戈, 张岩峰, 等. 区块链技术及应用前瞻综述

[J]. 计算机科学, 2017, 13 (4): 12-15.

- [4] 徐义吉. 去中心化是区块链的精髓所在 [J]. 华东科技, 2016, 23 (10): 32-35.
- [5] 杨龙飞, 琴琴, 杨天. 区块链的关键技术、应用与挑战 [J]. 中国计算机学会通讯, 2018, 23 (6): 43-47.
- [6] 祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54 (10): 2170-2186.
- [7] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [M]. bitcoin.org 2008.
- [8] 李赫, 孙继飞, 杨泳, 等. 基于区块链 2.0 的以太坊初探 [J]. 中国金融电脑, 2017, 11 (6): 57-60.
- [9] 田敬, 代亚非. P2P 持久存储研究 [J]. 软件学报, 2007, 18 (6): 1379-1399.
- [10] 廉蒯, 朱启超, 赵焯. 区块链技术及其潜在的军事价值 [J]. 国防科技, 2016, 37 (2): 30-34.