

自主转送式杂粮含水率快速测定仪设计与试验

车刚^{1,2} 陈正发¹ 王鑫^{1,2} 唐宏宇¹ 万霖^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江省农机智能装备重点实验室, 大庆 163319)

摘要: 针对杂粮含水率检测设备不配套和无法快速准确测定多种杂粮含水率的问题,参考国际干燥箱法测定标准,基于 TRIZ 理论创新设计了一种自主转送式杂粮含水率快速检测装置,实现物料盘在圆柱凸轮轨道上有序可靠的运行,并完成多工位转送机构、自动称量系统和闪烘机构等关键部件的仿真设计与装配验证。应用 PLC 耦合自主控制技术,实现定量入料、闪烘测量和快速除料 3 种工序切换,通过精准模块化运算,实时获得准确的杂粮含水率。采用二次正交旋转组合设计的方法,构建表征杂粮含水率检测精度和检测行程时间的协同评价定量模型,优化了闪烘温度、物料粒度和物料质量的参数组合,提升了该装置的运行效能与检测精准性。研究表明,该含水率检测仪的重复性和再现性可靠,检测相对偏差在 0.2% 以内,测量准确,自动化程度高,可为多样性杂粮含水率快速测定仪的广泛应用提供技术支持。

关键词: 杂粮; 含水率; 快速检测; 设计; 试验

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0357-10

Design and Experiment on Autonomous Transferring and Quick Measuring Equipment of Moisture Content of Coarse Cereals

CHE Gang^{1,2} CHEN Zhengfa¹ WANG Xin^{1,2} TANG Hongyu¹ WAN Lin^{1,2}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China
2. Heilongjiang Key Laboratory of Intelligent Equipment on Agricultural Machinery, Daqing 163319, China)

Abstract: Aiming at the problem of grain moisture detection equipment not matching and the inability to quickly and accurately determine the moisture content of various coarse cereals. According to international standard for oven method, combined with the theory of grain weightlessness, the transferring multistage type quick measuring moisture content equipment was designed by using TRIZ innovative design method, which realized orderly and reliable operation of loading disc on cylindrical cam track. The simulation design and assembly verification of key components such as multi-station transfer mechanism, automatic weighing system and flash drying mechanism were completed. The PLC coupling control technology was applied to realize the cyclic switching of three working positions: quantitative feeding, flash drying measurement and rapid material removal. Accurate moisture value of grain can be obtained in real time by precise modular operation. The quadratic orthogonal rotational combination design method was used to construct a quantitative model for synergistic evaluation of moisture detection accuracy and detection time of miscellaneous grains. The parameters combination of flash drying temperature, grain size and detection quantity was optimized, and the operation efficiency and detection accuracy of the device were improved. The results showed that the device had good performance, high degree of automation, simple structure and operation, the measurement accuracy, repeatability and reproducibility of the measurement system were reliable, and the relative deviation of detection was less than 0.2%, which provided technical support for the wide application of the rapid moisture meter for the variety of coarse cereals.

Key words: coarse cereals; moisture content; rapid detection; design; experiment

收稿日期: 2019-04-20 修回日期: 2019-05-21
基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA15B402)、国家重点研发计划项目(2017YFD04C1203)、黑龙江省特色学科建设项目(2018TSXK01)和国家粮食局公益性行业科研专项(201313001-07)
作者简介: 车刚(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备与农产品节能干燥工程研究,E-mail: chegang180@126.com

0 引言

随着人们对健康饮食理念的提升,杂粮在粮食中占比逐渐增大。杂粮是指大宗粮食以外的食用杂豆、杂粮和特种油料等^[1]。各地区杂粮品种繁多,产后杂粮含水率的准确检测是保证安全存储和商业流通的重要环节^[1-2]。近几年来,我国杂粮生产能力逐年增长,尤其黑龙江省国家商品粮基地的高粱、红小豆和谷子等杂粮产量大,尺寸差异大,如果杂粮含水率评定不准,会导致交易、储藏和运输环节的损失。因此,在收储运环节中高效评价杂粮含水率等级是战略性难题^[3-5]。

目前,我国检测粮食含水率的方法多采用间接法,如电容式、电阻式、微波式和红外式等,仍需干燥箱法校正,存在对靶性强、通用检测精度稳定性与重复性差等问题。缺少通用型全自动杂粮含水率测量仪,各种杂粮籽粒外观尺寸各异、容重偏差大,如高粱、荞麦等含水率测试偏差在 2%~3%,无法满足多样性杂粮含水率快速检测需求^[6-7]。而现有的粮食含水率间接测量仪易受环境因素、杂粮种类和物性参数的影响^[8-19],实际测试性能并不理想,测量值存在较大偏差,难以满足杂粮收储环节准确性的要求。

本文结合多品种杂粮收储环节测量作业标准,分析现有静态粮食含水率快速测定技术存在的弊端,融合 TRIZ 设计理论与机械运动学原理,进行多工位转送机构原创设计,由 PLC 自主控制定量入料、闪烘测量、快速除料等工序,通过精准转送和计量转换模块协同完成杂粮含水率的准确测定。

1 设计依据

1.1 测量方法

杂粮的品种众多,在我国东北地区收获含水率一般在 13%~18%。按照 GB/T 21305—2007《谷物及谷物制品水分的测定常规法》进行测定,采用 105℃ 或 135℃ 定时干燥法^[20]。此方法适合于麦类、稻米、小米和高粱等农产品。谷物含水率的表达方法有干基含水率和湿基含水率两种,杂粮收储计量时,一般都采用湿基含水率。湿基含水率以湿物料质量为分母,公式为

$$M_s = \frac{W}{G_s} = \frac{W}{G_g + W} \times 100\%$$

(1)

式中 M_s ——湿基含水率, %
 W ——杂粮中水的质量, g
 G_s ——干燥前杂粮的质量, g
 G_g ——干燥后杂粮的质量, g

1.2 基于 TRIZ 技术冲突的创新设计

干燥箱法测量杂粮含水率包括取料、粉碎、分样、入料、检测、除料等多个工序。人为操作存在不确定性,致使检测精确度不稳定且测量时间长。因此,基于简化工序且自主作业的角度,考虑样品盘的连续运动规律与各工序的配合关系,建立杂粮含水率快速测定仪组件间相互作用矩阵。根据组件间的相互作用关系,建立检测功能模型,如图 1 所示。

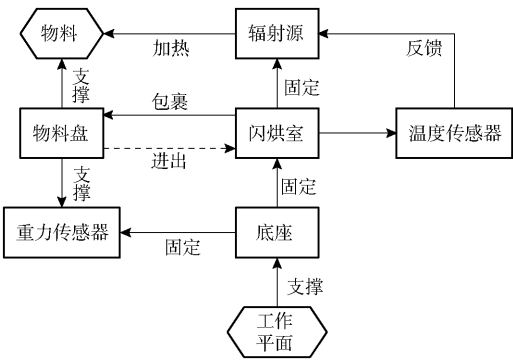


图 1 检测功能模型

Fig. 1 Functional model of measuring instrument

由检测功能模型分析可知,物料盘进出闪烘室功能性不足,使得这一步需人为操作,存在操作技术冲突。物料盘与重力传感器非实时接触,存在接触技术冲突。检测时间与入料和除料时间不同,存在时间损失冲突。因此需要改善协调度、操作性、力和时间损失。运用 TRIZ 发明技术中组合、多功能、向另一维过渡、周期作用和连续有益作用的 5 项准则,以物料盘的运动轨迹作为改进对象,提出采用封闭式三维中心对称圆柱凸轮曲线作为物料盘运动轨迹曲线,曲线概念如图 2 所示,凸轮曲线按功能划分为 AB、BC、CA 3 部分。在 BC 段中 DFE 曲线辅助完成物料盘与重力传感器的离合,其中 F 点为平行于 A、B、C 3 点所构成平面的最远点。该轨迹曲线具有封闭性、对称性、空间性和相似性,符合效率准则^[21]。

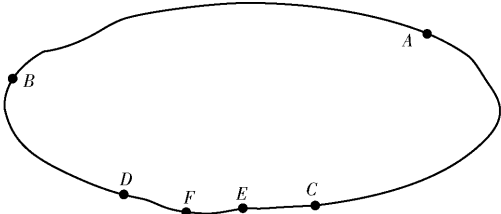


图 2 轨迹曲线概念

Fig. 2 Conception diagram of trajectory curve

圆柱凸轮机构设计如图 3 所示。圆柱凸轮机构的设计主要考虑与之配合传动机构尺寸和工位要求。转送工位采用中心对称结构,3 个精加工的凸轮轨道均布嵌合在环形板面上。凸轮轨道通过环形板上的弧形槽固定。该圆柱凸轮曲线包含部分平面圆周轨迹曲线和空间三维曲线。其中平面圆周轨迹

曲线的角速度、加速度、压力角均为固定值,运行平稳。

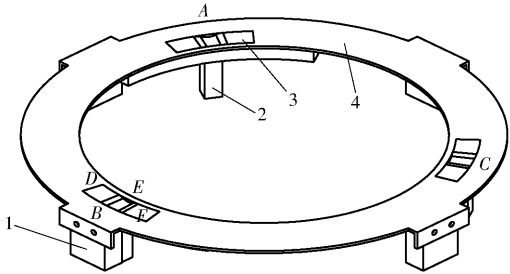


图 3 圆柱凸轮机构三维等轴测图

Fig. 3 Three dimensional structure diagram of shaft side of cam

1. 连接架 2. 凸轮支架 3. 凸轮 4. 环形板

1.3 设计规则与轨迹曲线模型

结合物料盘载重和转送速度的要求,依据圆柱凸轮从动件运动规律特性^[22],选择物料盘与凸轮之间的移动副为空间运动副, $\Phi 12\text{ mm}$ 万向球作为高副。在凸轮轨迹曲线中,根据物料盘和传感器接触距离确定凸轮升程 $h = 3.0\text{ mm}$ 。分析凸轮常用运动规律特性,凸轮升程轨迹设计满足正弦加速度运动规律,加速度连续变化,无突变值,无冲击现象。

为便于增加设计中万向球与凸轮轨迹曲线的配合性和方便性,选取 45° 作为推程转角和回程转角。利用 Matlab 计算并绘制该段万向球位移和速度曲线,如图 4 所示。

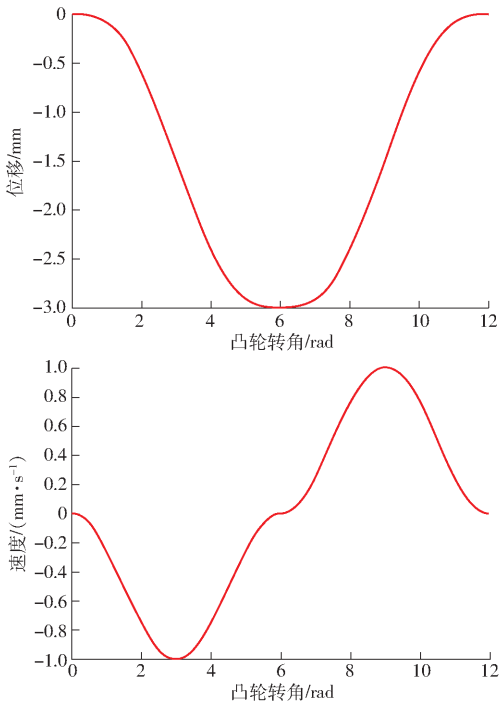


图 4 万向球位移和速度曲线

Fig. 4 Displacement and speed curves of roller

仿真计算求得凸轮配合段滚子位移曲线连续平滑、无尖点,其运动速度曲线连续平滑、无冲击,表明

凸轮设计曲线合理。

过平均圆柱半径 r_m 处的滚子中心 B 作凸轮理论轮廓线的法线 $n-n$ 与从动件速度 V_B 的夹角即为圆柱凸轮机构的压力角 α ,该角也等于凸轮理论轮廓线在 B 点切线 $t-t$ 与凸轮线速度 V_1 的夹角。如图 5 所示,高副万向球在圆柱凸轮轨道上运转时,应满足最大压力角 $\alpha_{\max} \leq [\alpha] = 30^\circ \sim 38^\circ$ ^[22], $[\alpha]$ 表示许用压力角。最大压力角为

$$\alpha_{\max} = \arctan \frac{h}{\beta r_m} \quad (2)$$

式中 r_m ——圆柱凸轮基圆半径,mm

β ——圆柱凸轮与滚子之间的当量摩擦角, $(^\circ)$

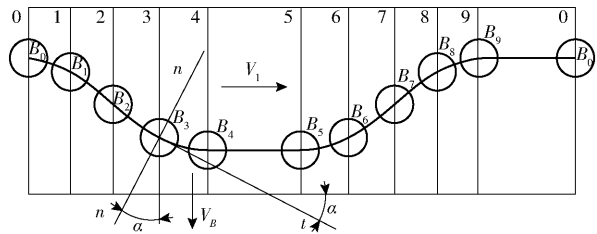


图 5 圆柱凸轮(平均半径处)的展开图

Fig. 5 Expansion diagram of cam (average radius)

根据凸轮机构尺寸最小化和防自锁原则,求得圆柱凸轮的最优尺寸参数 $r_m = 168\text{ mm}$,最大压力角 $\alpha_{\max} = 17.3246^\circ$ 。由于该轨迹为中心对称且平分 3 等份,因此选取其中 $0^\circ \sim 120^\circ$ 的轨迹函数作为代表,轨迹函数为

$$\begin{cases} x = 168 \cos j & (0^\circ \leq j \leq 120^\circ) \\ y = 168 \sin j & (0^\circ \leq j \leq 120^\circ) \\ z = s \\ s = \begin{cases} 3 \left(1 - \frac{j}{\varphi} + \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi j}{\varphi} \right) \right) & (0^\circ \leq j \leq 3.28^\circ) \\ 3 \left(\frac{j}{\phi} + \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi j}{\phi} \right) \right) & (3.28^\circ < j \leq 6.56^\circ) \\ 0 & (6.56^\circ < j \leq 120^\circ) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中 j ——物料盘转角, $(^\circ)$

s ——凸轮升程,mm

φ ——升程运动转角, $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$

ϕ ——回程运动角, $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

x, y, z —— $0^\circ \sim 120^\circ$ 轨迹上任意点坐标

2 结构与原理

2.1 基本结构

本装置由闪烘、转位、动力、测量、自主控制和辅助投料等系统组成。完成入料、闪烘测量和除料 3 种工位的自主循环作业。基本构造如图 6 所示。

加热系统由发热管、灯板、温度传感器等组成,组合热源使杂粮水分得以快速蒸发;转位机构

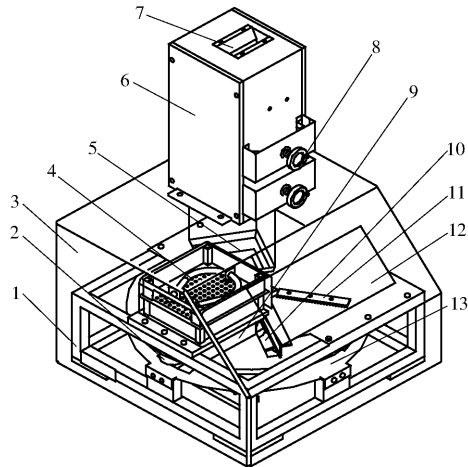


图 6 含水率快速检测装置结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of quick measuring device

1. 机架 2. 万向支座 3. 罩壳 4. 闪烘室 5. 料盘 6. 定量粉碎投料机构 7. 入料口 8. 定量调节手柄 9. 称量机构 10. 转送传动机构 11. 清扫机构 12. 控制与显示装置 13. 凸轮轨道

由凸轮轨道、导向盘和环形板等构成,完成 3 种工位循环切换;动力机构由步进电机、步进电机控制器、控制面板组成,协助完成入料、移动和除料动作;测量系统由重力传感器、数模转换电路、数码显示管和支撑柱组成,实时测量物料样品的质量,并记录数据;自主控制系统主要由 PLC 模块组成,其包含动力系统信号的输出、加热温度的控制、含水率模块的运算,并自主调节各系统的工作参数。辅助系统包括入料机构、除料机构和机架,为本装置提供协作空间。

2.2 工作原理

首先由定量粉碎投料机构定时落料到承料盘上,通过 PLC 信号输出调节步进电机转动,经由锥齿轮组将动力传给中心轴,带动导向盘定向转动。当物料盘转入闪烘室时,支撑导向板的万向支座与凸轮轨道最低点吻合,控制信号使步进电机停止。此时,导向盘协同导向板上的物料盘定位在计量工位上。加热系统开始在设定温度下进行快速干燥,重力传感器实时检测物料盘内物料的质量,当测试质量恒定时(质量变化幅度 $\pm 0.05\%$),计量模块运算并显示杂粮含水率。并启动二次入料和电机运转程序,驱使导向盘协同物料盘继续转动,当物料盘转至除料工位时,完成清扫料盘工作,进入第二轮自主循环检测。

3 关键部件设计

3.1 闪烘室设计

闪烘室采用加热管、温度传感器和物料盘 3 层梯度格局。U 形加热管下部安装均温网孔散热板,保证辐照热量的均匀扩散。如图 7 所示,闪烘室采

用干燥室底板加 4 个定位柱的框架结构,在加热管上方固定有隔板,周边安装耐热玻璃,阻断热量散失。热量由 900 W 碳素纤维加热管提供,并通过散热隔板将热量均匀地辐射至物料盘。在加热室最外层设有保护罩。PT100 铂电阻温度传感器安装在侧壁上,通过温度控制模块自主调节加热温度,即辐射温度,本文中定义为闪烘温度。顶盖上安装有排水栅孔用于排出湿分。

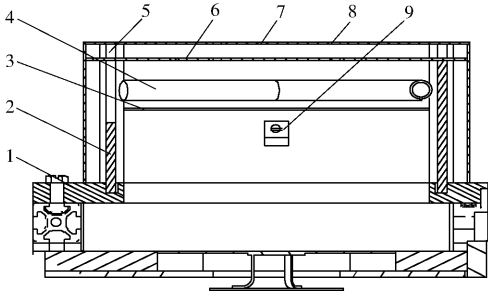


图 7 闪烘室结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of quick drying chamber

1. 干燥室底板 2. 隔热玻璃 3. 网孔散热板 4. 加热管 5. 定位柱 6. 散热隔板 7. 保护罩 8. 排水栅孔 9. 温度传感器

3.2 转送机构设计与运动分析

转送机构传递动力促使物料盘定时转位。同时在导向盘的限制下,物料盘随凸轮轨迹作空间曲线仿形运动。动力源为两相步进电机,转送动力经锥齿轮副和中心轴,传递给导向盘。导向机构中均布 3 个导向盘。导向盘均布的方型槽孔与物料盘嵌合,受凸轮轨道仿行约束,实现料盘间歇脱离导向盘的运动。因而,导向盘协同物料盘绕中心轴作圆周仿形运动。具体结构如图 8 所示。

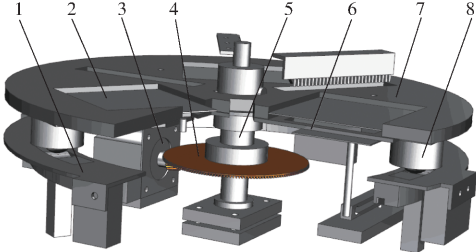


图 8 转送机构示意图

Fig. 8 Schematic of transmission mechanism

1. 凸轮导轨 2. 物料盘 3. 步进电机料盘支架 4. 锥齿轮组 5. 中心轴 6. 导向板 7. 导向盘 8. 万向支座

导向盘的定时转动属于低频仿形振动,其运转振动烈度影响测试精度。因此,应用 S996 型低频振动分析仪磁性探头吸附在凸轮轨道上进行振动检测。通过 JMtest 动态信号测试软件采集振动值(加速度)随频率的变化特征,如图 9 所示。运行中垂直于盘面方向振动较明显,加速度峰值为 0.052 m/s^2 ,频域在 1 Hz 附近出现了明显的共振峰。数值分析最大振动幅值为 0.060 mm。对照 GB/T 2298—

2010《机械振动与冲击标准》,说明机构运行振动极小。

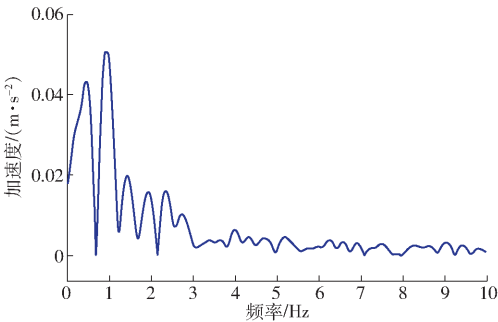


图 9 导向盘转动机构频谱图

Fig. 9 Spectrogram of steering disc rotating mechanism

3.3 称量系统设计与验证

在称量检测过程中,物料盘与 SZC 型重力传感器间歇式接触配合,对检测数据的准确性、连贯性和快速性起到重要作用。因此,联接传感器悬臂的连杆托盘采用超轻铝材结构。当带支架的物料盘随着导向盘转到传感器正上方时,万向支座与凸轮凹面吻合,传感器承受物料重量。检测精度与重力传感器承载力有密切关系。本检测装置设计测量物料质量范围 65 ~ 75 g。

通过试验验证传感器数值测量情况,如图 10 所示,传感器记录最大数值为 91.507 g (含托盘质量),最小数值为 70.173 g,均不超过有效检测量程。在 2.5 s (含延迟 0.5 s) 后质量恒定。按照工业仪表精度等级计量,检测精度为 0.017 级,属于高精度级别^[23]。

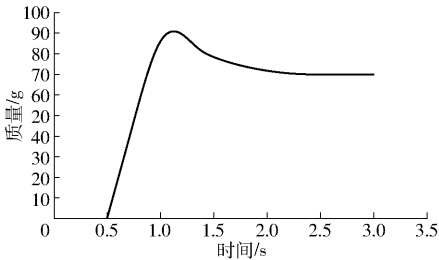


图 10 重力传感器记录数据曲线

Fig. 10 Gravity sensor recorded data curve

3.4 自主控制系统设计

自主控制系统由设备信息、信号采集和信号处理两部分组成。信号采集主要是由继电器与各种传感器完成,采集电机、重力和温度传感器的开关量与模拟量信息。信号处理主要由 PLC 和工控机完成,应用组态软件进行信号的运算与显示。采用 S7 - 224XPCN 型可编程控制器对温度控制、质量检测和电机控制信号进行汇总,通过自编程序对收集信号进行运算,从而控制步进电机启停,同时把信号传输给工控机,实现对碳素纤维加热管和重力传感器

的精准测控。检测装置的自主控制系统采用模块化设计,便于设备调试和成本控制^[24-28]。硬件控制系统如图 11 所示。

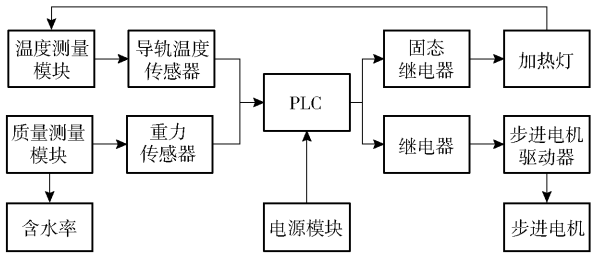


图 11 硬件控制系统原理图

Fig. 11 Schematic diagram of hardware control system

采用 V4.0 STEP7 Micro WIN SP9 软件进行控制程序编写,分别实现温度控制、质量检测 and 电机控制。闪烘室温度采用 PID 控制,由固态调压模块调节输出电压来实现温控。物料质量信号的采集和运算由 PLC 完成并显示。电机控制由脉冲输出调节电机运行。自动检测装置的导向盘定位可以通过控制脉冲个数来控制角位移,从而达到准确工位。PLC 控制流程图如图 12 所示。

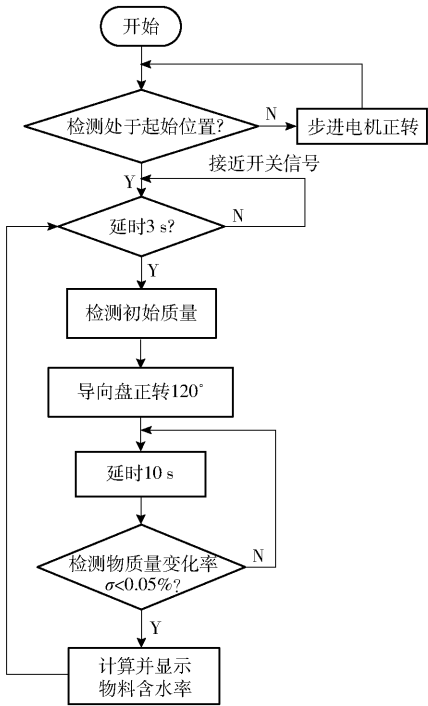


图 12 PLC 自主控制程序流程图

Fig. 12 Flowchart of PLC control program

4 运行参数优化

4.1 试验因素

影响粮食含水率检测的因素有:加热温度、物料厚度、热风风速、谷物粒度、初始含水率、加热时间等。根据国家粮食水分测定标准^[29],确定加热温度和粉碎粒度是影响检测效率的重要因素;物料量与

供热量密切相关,因此,确定试验因素为物料粒度、物料质量和闪烘温度。闪烘温度是温度传感器(图7)获取的数据,间接反映加热程度,不是物料内部温度(机构运行无法直接测量)。

本试验采用北安矮高粱为试验对象,设定检测精度 Y_1 和行程时间 Y_2 为试验指标。行程时间是指全程时间,包括自检、入料、干燥计量、出料和复位总时间,即导向盘转动 360° ,完成2份样品检测。检测相对偏差计算公式为

$$Y_1 = \frac{|M_c - M_z|}{M_c} \times 100\%$$

(4)

式中 Y_1 ——检测相对偏差, %
 M_c ——物料含水质量检测值, g
 M_z ——物料含水质量真实值(干燥箱法测得), g

4.2 试验方案

根据干燥箱法含水率测定单因素试验和淀粉糊化条件^[28],结合黑龙江省高粱收储实际状况,选取物料粒度 20 ~ 100 目,测试物料质量 5 ~ 15 g,闪烘温度 135 ~ 295℃。试验采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验设计方法,研究试验因素对检测精度和检测行程时间的规律和优化参数组合,如表1、2所示,其中 $X_1 \sim X_3$ 分别为闪烘温度、物料粒度、物料质量的编码值。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	闪烘温度/℃	物料粒度/目	物料质量/g
1.682	295.0	100.0	15.00
1	262.5	83.8	12.97
0	215.0	60.0	10.00
-1	167.5	36.2	7.03
-1.682	135.0	20.0	5.00

4.3 回归方程的建立

运用 Design-Expert 软件进行分析,并评价回归模型的各个回归系数,建立检测相对偏差 Y_1 和行程时间 Y_2 的有效回归方程

$$Y_1 = 0.209 + 0.053X_2 - 0.069X_1^2 - 0.027X_2^2 + 0.032X_1X_2 + 0.029X_1X_3$$

(5)

$$Y_2 = 411.34 - 51.14X_1 - 27.87X_2 + 15.53X_3 + 17.90X_1^2 + 15.01X_2^2 + 6.97X_3^2 - 10.08X_2X_3$$

(6)

方差分析结果表明,所建立的回归方程中回归显著,拟合程度达 89.5%。

4.4 综合优化分析

为了获得高精度的杂粮含水率快速检测仪的优化参数,需要对检测相对偏差 Y_1 和行程时间 Y_2 指

表 2 试验安排与结果

Tab.2 Experimental scheme and result

试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	Y_2/s
1	1	1	1	0.257	356.2
2	1	1	-1	0.199	348.6
3	1	-1	1	0.038	430.5
4	1	-1	-1	0.091	405.8
5	-1	1	1	0.155	470.2
6	-1	1	-1	0.231	457.0
7	-1	-1	1	0.125	540.1
8	1	-1	-1	0.192	463.4
9	1.682	0	0	0.047	337.3
10	-1.682	0	0	0.115	521.0
11	0	1.682	0	0.347	369.6
12	0	-1.682	0	0.153	472.4
13	0	0	1.682	0.390	425.0
14	0	0	-1.682	0.160	371.5
15	0	0	0	0.295	397.2
16	0	0	0	0.091	390.0
17	0	0	0	0.230	386.5
18	0	0	0	0.330	391.3
19	0	0	0	0.261	394.7
20	0	0	0	0.273	385.2
21	0	0	0	0.314	382.8
22	0	0	0	0.340	376.1
23	0	0	0	0.162	388.2

标进行加权分配,采用线性合成法对杂粮含水率快速检测仪进行评判,指标权重的设计采用主观赋值法获取。一般检测仪器精度的重要性大于检测时间。应用层次分析法,专家评分构建比较矩阵,编写 Matlab 程序计算权重并检验一致性,修正检测相对偏差权重 η_1 和行程时间权重 η_2 分别为 0.70 和 0.30。为兼顾各评价指标的影响和目标函数量纲不同,将各目标函数转换为无量纲函数,建立协同评价定量模型

$$F = \eta_1 \frac{Y_1 - Y_{1a}}{Y_{1b} - Y_{1a}} + \eta_2 \frac{Y_2 - Y_{2a}}{Y_{2b} - Y_{2a}}$$

(7)

式中 F ——综合评价模型函数
 Y_{1a} ——检测相对偏差最小值, %
 Y_{1b} ——检测相对偏差最大值, %
 Y_{2a} ——行程时间最小值, s
 Y_{2b} ——行程时间最大值, s

对于杂粮含水率快速检测来说,应具有较小检测相对偏差和较短的检测行程时间。当 F 最小时相应的 X_1 、 X_2 、 X_3 值即为最优的检测参数。应用 Design-Expert 软件进行加权综合优化处理,得到最优参数组合为:闪烘温度 285℃、物料粒度 60 目、物料质量 9.2 g,获得试验指标综合最优值为:检测相对偏差为 0.137%、行程时间为 325 s,综合评分为

0.908。由于考虑到生产实际,对参数进行取整处理,结果为:闪烘温度 285℃、物料粒度 60 目、物料质量 9.0 g。结合理论分析和生产实际,在综合优化条件下,测得检测相对偏差为 0.125%,行程时间为 319 s。优化值与验证值接近,证明优化结果真实可信。

5 质量评价与性能测试

5.1 检测质量评价

含水率测定系统的稳定性、重复性和再现性是全面评价 LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪的科学质量指标。测量稳定性是指测量系统的偏移和精度值在规定时间内保持恒定的能力。重复性反映的是测量仪器的波动,再现性则反映的是操作者的波动和操作者与测量仪器交互作用的波动^[30]。

(1) 评价试验方法

测量稳定性评价,选用采集品种和收获时间一致的高粱试样进行分析,每小时安排操作人员连续重复测定 3 次,重复操作测得 40 组谷物含水率检测值。根据 Minitab 均值极差控制图(Xbar-R)中的点及链的分布和排列进行稳定性分析评价。

重复性和再现性评价,遵照重复性和再现性分析方法,采样 10 个代表性样本。随机安排 3 名操作人员对 10 个样本各测定 3 次,运用 Minitab 软件,计算并判别测量系统的 R&R 指标能力^[31]。

(2) 稳定性分析

将测试数据输入 Minitab 得到 Xbar-R 控制图,如图 13 所示。所有极值未超出控制限范围,控制限内有极差不为零,且 70% 在下限区域,可以判定测量系统有足够的分辨率。再按照均值判定准则进行比对^[32],8 项判异标准均符合要求,因此,LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪的稳定性可靠。

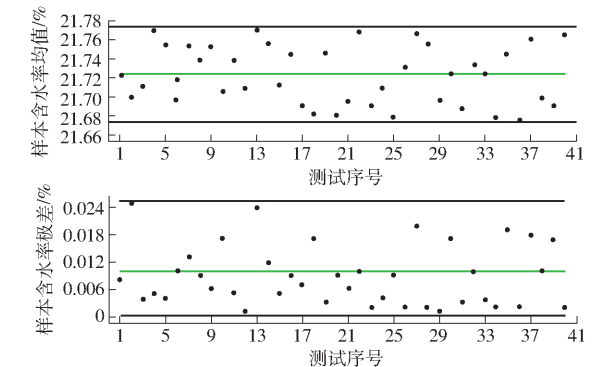


图 13 Xbar-R 控制图
Fig. 13 Control charts of Xbar-R

(3) 重复性和再现性分析

利用 Minitab 对随机 3 名操作人员测试 30 组含水率进行计算,并基于数理统计方法估计测量系统

中各变异源的方差。根据不同变差计算出重复性和再现性变差,用 6σ 质量管理法的均方误差来定义 R&R 指标^[30],进而判别本测量系统的指标能力。

从表 3 可以看出,R&R 指标变差为 4.42%,小于 10%,该含水率测量系统的重复性和再现性可以接受。R&R 指标贡献率 0.35%,说明大部分变差来源于高粱样品间的变差。取样的差异会导致误差,但都是在可接受的范围内,测量系统可靠。

表 3 重复性和再现性
Tab.3 Repeatability and reproducibility %

变异来源	标准差	研究变差	变差	贡献率
重复性	0.007 12	0.042 72	4.42	0.35
再现性	0	0	0	0
R&R 指标	0.007 12	0.042 72	4.42	0.35
样品间	0.123 05	0.738 90	99.81	99.65
总变差	0.123 29	0.739 74	100	100

5.2 性能测试

根据试验优化参数和典型杂粮生产性检验结果,2018 年 9 月由黑龙江省农垦农业机械产品质量监督检验站检测定型为 LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪,并按照技术规范进行现场检定^[33],检测杂粮品种为当地产高粱和小豆,鉴定使用样机如图 14 所示,检定结果如表 4 所示。

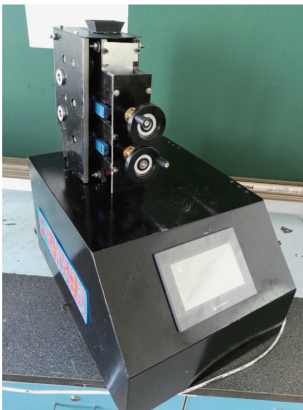


图 14 LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪样机
Fig. 14 LKS-Ⅱ measuring device for moisture content

表 4 LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪性能测试结果
Tab.4 Performance test result of LKS-Ⅱ fast measuring device

测试指标	数值	测试指标	数值
环境温度/℃	19.0	加热温度/℃	280 ± 1
相对湿度/%	40.5	测试粒度/目	60
自检时间/s	12.0	检测效率/(批·h ⁻¹)	17
含水率测试范围/%	10 ~ 18	全程检测时间/s	365
称量精度/mg	1	温度控制精度/%	96
检测稳定性指数/%	≥99	含水率检测相对偏差/%	±0.1

LKS-Ⅱ 型杂粮含水率快速测定仪检测高粱的

效率达到 17~18 批/h。仪器免除大量人工误差,如手工取放物料盘对称量系统冲击造成的精准度偏差、测试间隔放冷时间不可控对连续测试的影响、平铺托盘上物料延迟入机时对重量缺失的影响、人工操作不可避免的系统误差对测量系统精度的影响。全程检测失误率接近于零。测试和实际生产考核表明:LKS-II 型杂粮含水率快速测定仪满足寒地高粱、杂豆、粟米等农产品快速测量含水率的技术要求,在节本增效等方面性能显著。对于高粱和杂豆的含水率检测都有良好的稳定性和检测精度。

杂粮含水率在 13%~17% 时,应用本仪器与国家食品中含水率测定标准(GB 5009.3—2016)相比,高粱、红小豆等含水率相对误差在 0.1%~0.3% 之间,检测精度能达到 $\pm 0.05\%$ 。如图 15 所示,以干燥箱法作参照,与市场在售的电容式含水率检测仪和卤素含水率测量仪做对比试验,试验结果表明:与干燥箱法含水率检测相对偏差小于 0.2%,相比卤素含水率测量仪精度提高 0.5% 以上。相比电容式含水率检测仪精度提高 1.2%~2.0%。测量值更接近于干燥箱值,实测含水率略低,主要原因

是在线测定粉料带有余温,闪烘室内气态组分未能及时扩散,存在微少的挥发物未去除,导致直接读数的含水率略低。

自 2017 年以来,在黑龙江省农垦总局西部管局 7 个农场应用所设计仪器检测高粱、红小豆等杂粮收储工作,按照国家收储质量标准计算,收储杂粮水分损失减少 3%,检测效率提高 1 倍以上,同比收储可减小损失 8%~10%。

6 结论

(1) 基于机电融合对杂粮含水率检测装置的设计过程进行探讨,结合 TRIZ 理论完成控制物料盘运动的凸轮轨道设计、多工位转送机构、称量系统和闪烘机构等关键部件的设计,通过仿真分析,优化杂粮含水率快速检测装置的结构参数。按照 PLC 控制设计原则,完成自主控制检测系统设计,提高了杂粮含水率测量的精确性,缩短了检测行程时间。

(2) 通过二次正交旋转组合试验,对影响本装置检测性能的因素进行试验分析,建立检测精度和检测行程时间的有效回归模型。采用线性功效系数法进行加权综合分析,得到最优参数组合:闪烘温度 285℃、物料粒度 60 目、物料质量 9.0 g。其检测精度和行程时间较优。

(3) 运用 Minitab 软件进行检测稳定性、重复性和再现性分析,进行杂粮含水率快速测定仪的可靠性和检测质量评价,实践应用证明,该含水率测量系统可以满足生产要求,性能可靠。该仪器检测相对偏差小于 0.2%,满足国家食品中含水率测定标准(GB 5009.3—2016)中的要求。

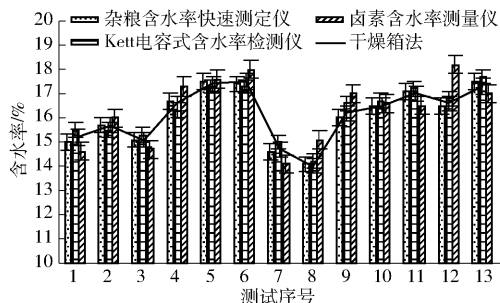


图 15 不同测量仪器检测对比结果

Fig. 15 Comparison of different measuring equipments

参 考 文 献

- [1] 滕召胜,刘坤华,唐瑞明,等.粮食水分快速检测技术综合评述[J].中国粮油学报,1999,14(3):53-57.
TENG Zhaosheng, LIU Kunhua, TANG Ruiming, et al. Comments on quick measurement of grain moisture content[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1999, 14(3): 53-57. (in Chinese)
- [2] 吴定,鞠兴荣,袁建,等.加快我国杂粮研究和开发[J].食品科学,2004,25(11):346-348.
WU Ding, JU Xingrong, YUAN Jian, et al. Wide foreground on coarse cereals development[J]. Food Science, 2004, 25(11): 346-348. (in Chinese)
- [3] 陈有庆,胡志超,王海鸥,等.谷物水分在线检测技术及发展趋势[J].农业机械,2009,28(4):85-87.
CHEN Youqing, HU Zhichao, WANG Haiou, et al. On-line detection technology and development trend of grain moisture[J]. Farm Machinery, 2009, 28(4): 85-87. (in Chinese)
- [4] 戈振扬,于英杰,张梦珠.基于电容式湿度传感器的植物粉料含水率测量[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):174-177.
GE Zhenyang, YU Yingjie, ZHANG Mengzhu. Moisture content measurement for plant material powder based on capacitive humidity sensor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 174-177. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120631&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.031. (in Chinese)
- [5] 高利伟,许世卫,李哲敏,等.中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究[J].农业工程学报,2016,32(23):1-11.
GAO Liwei, XU Shiwei, LI Zhemin, et al. Main grain crop postharvest losses and its reducing potential in China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 1-11. (in Chinese)
- [6] 翟宝峰,郭宏林,许会.粮食水分检测技术的综合分析及发展概况[J].沈阳工业大学学报,2001,23(5):413-416.

- ZHAI Baofeng, GUO Honglin, XU Hui. Synthetic analyses and development survey of moisture measuring technology of grain[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2001, 23(5): 413–416. (in Chinese)
- [7] 郭文川, 赵志翔, 杨沉陈. 基于介电特性的小杂粮含水率检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 188–193. GUO Wenchuan, ZHAO Zhixiang, YANG Chenchen. Moisture meter for coarse cereals based on dielectric properties[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 188–193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130533&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.033. (in Chinese)
- [8] 吴惠昌, 谢焕雄, 胡志超, 等. 连续单粒式谷物在线水分测定仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 282–290. WU Huichang, XIE Huanxiong, HU Zhichao, et al. Design and experiment of continuous single grain typed on-line grain moisture test apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(11): 282–290. (in Chinese)
- [9] 孙红, 陈香, 孙梓淳, 等. 基于透射光谱的玉米叶片含水率快速检测仪研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 173–178. SUN Hong, CHEN Xiang, SUN Zichun, et al. Rapid detection of moisture content in maize leaves based on transmission spectrum[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 173–178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180321&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.021. (in Chinese)
- [10] 杨柳, 杨明皓, 董兰兰. 主动屏蔽式平面探头水分在线传感器研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 77–80. YANG Liu, YANG Minghao, DONG Lanlan. Development of a coplanar electrode capacitance moisture sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 77–80. (in Chinese)
- [11] 麦智炜, 李长友, 徐凤英, 等. 浮地式粮食水分在线检测装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 207–213. MAI Zhiwei, LI Changyou, XU Fengying, et al. Design and test of grain moisture online measuring system based on floating ground capacitance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 207–213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141032&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.032. (in Chinese)
- [12] 裴珍, 朴承龙, 张宏勋. 快速失重式粉粒物料水分检测装置[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(1): 9–12. PEI Zhen, PIAO Chenglong, ZHANG Hongxun. The measuring devices of high-speed weight loss type for the moisture of granular materials[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(1): 9–12. (in Chinese)
- [13] 程卫东, 柏雪源, 王相友, 等. 干燥过程中谷物水分在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 53–55. CHENG Weidong, BAI Xueyuan, WANG Xiangyou, et al. An on-line measurement and monitoring system of grain moisture during drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 53–55. (in Chinese)
- [14] 李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 56–59. LI Changyou. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56–59. (in Chinese)
- [15] 杨清海, 滕召胜, 凌菁. 一种基于微波干燥的水分快速测定仪[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(2): 75–79. YANG Qinghai, TENG Zhaosheng, LING Jing. A high-speed moisture analyzer based on microwave drying[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2006, 20(2): 75–79. (in Chinese)
- [16] 李子忠, 郑茹梅, 龚元石, 等. 时域反射仪对水分非均匀分布土壤含水率的测定[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 19–23. LI Zizhong, ZHENG Rumei, GONG Yuanshi, et al. Measurement of soil water content by time domain reflectometry in non-uniformly wetted soils[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 19–23. (in Chinese)
- [17] 景勇, 丁岚. 电容式粮食水分仪的研究与设计[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(2): 51–54. JING Yong, DING Lan. Research on the design of capacitive grain moisture meter[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2011, 28(2): 51–54. (in Chinese)
- [18] 张亚秋, 吴文福, 王刚. 基于虚拟仪器的粮食水分检测系统神经网络温度补偿[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(5): 102–106. ZHANG Yaqiu, WU Wenfu, WANG Gang. Neural network temperature compensation for grain moisture detection system based on virtual instrument[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(5): 102–106. (in Chinese)
- [19] 滕召胜. 基于自适应加权数据融合的粮食水分快速测定仪[J]. 农业机械学报, 1999, 30(6): 64–67. TENG Zhaosheng. An intelligent instrument for quick measurement of cereal moisture content based on self-adaptive fusion of weighted data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(6): 64–67. (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T21305—2007 谷物及谷物制品水分的测定常规法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [21] 王亮申, 孙峰华. TRIZ 创新理论与应用原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [22] 西北工业大学机械原理教研室. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [23] GB/T 13283—2008 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级[S]. 2008.
- [24] 车刚, 吴春升. 典型农产品干燥技术与智能化装备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [25] 滕召胜, 宁乐伟, 张海霞, 等. 粮食干燥机水分在线检测系统研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 130–133. TENG Zhaosheng, NING Lewei, ZHANG Haixia, et al. On-line measurement system of grain dryer for monitoring moisture

- content[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(5): 130–133. (in Chinese)
- [26] 车刚,陈武东,吴春升,等. 大型 5HFS-10 负压自控粮食干燥机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(16):267–275.
CHE Gang, CHEN Wudong, WU Chunsheng, et al. Design and experiment of large-scale 5HFS-10 type automatic control negative pressure grain dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 267–275. (in Chinese)
- [27] 杨彬. 玉米含水率自动检测装置的设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.
YANG Bin. Design and experimental study of automatic detection device for corn water content [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [28] 薛令阳,王书茂,高振江,等. 真空干燥过程中物料质量在线测量设备设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(9):326–337.
XUE Lingyang, WANG Shumao, GAO Zhenjiang, et al. On-line measurement of material quality in vacuum drying process [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):326–337. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180938&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.038. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国国家计量局. JJG 658—2010 烘干法水分测定仪检定规程[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [30] 李再贵,殷丽君,高振江,等. 粮食水分分布对高频电感的影响研究[J]. 农业工程学报,2004,20(3):149–152.
LI Zaigui, YIN Lijun, GAO Zhenjiang, et al. Effects of moisture conditions of grain on inductance of high frequency coil[J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(3): 149–152. (in Chinese)
- [31] 邵俊,闫洪喜. 测量系统分析(MSA)在红外水分仪测量能力分析中的应用[J]. 现代仪器,2012,18(5): 21–24.
SHAO Jun, YAN Hongxi. Measurement system analysis (MSA) in the infrared moisture measurement capability analysis[J]. Modern Instrument, 2012,18(5): 21–24. (in Chinese)
- [32] MICHAEL D, FREDERICK C, GREGORY G, et al. Measurement system analysis reference manual[M]. Fourth edition. Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2010.
- [33] NY/T 463—2001 粮食干燥机质量评价规范[S].

(上接第 372 页)

- [8] 彭彦昆,张蕾蕾. 光谱技术在生鲜肉品质安全快速检测的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2010,27(2):62–72.
PENG Yankun, ZHANG Leilei. Advancement of rapid detection of meat quality and safety by using spectral imaging technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2010, 27(2):62–72. (in Chinese)
- [9] TIAN Youwen, ZHANG Lin. Study on the methods of detecting cucumber downy mildew using hyperspectral imaging technology [J]. Physics Procedia, 2012,33:743–750.
- [10] 张敬埔. 基于高光谱技术的羊肉含水率测定方法研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [11] 熊宇虹,温志渝,梁玉前,等. 基于支持向量机的模型传递方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2007, 27(1):147–150.
XIONG Yuhong, WEN Zhiyu, LIANG Yuqian, et al. Model transfer method based on support vector machine [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(1):147–150. (in Chinese)
- [12] 蔡丽娟. 正交法在近红外光谱分析中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
- [13] 赵政. 猪肉新鲜度光谱模型的建立及传递方法研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
- [14] 谈文艺. 基于高光谱成像技术的苹果外部损伤精确识别与分级方法研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2018.
- [15] GIORGIA S, PAOLO O, SILVIA P, et al. An advanced multivariate approach for processing X-ray fluorescence spectral and hyperspectral data from non-invasive in situ analyses on painted surfaces[J]. Analytical Chemical Acta, 2012,752:30–38.
- [16] SONG K S, LI L, LI S, et al. Hyperspectral retrieval of phycocyanin in potable water sources using genetic algorithm—partial least squares (GA-PLS) modeling[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,18: 368–385.
- [17] 张淑杰,张维维,奚云琪,等. 基于傅里叶变换的心电信号频谱分析[J]. 信息系统工程,2012(1):133–134.
- [18] 王飞跃. 基于 GM-GRNN 耦合模型的尾矿坝浸润线预测研究[C]//中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会. 第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(上册). 中国岩石力学与工程学会,2010:9.
- [19] 叶珍. 高光谱图像特征提取与分类算法研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.
- [20] 田会东,谢宝瑜,赵永超,等. 棉花枯萎病的光谱识别[J]. 棉花学报,2008,20(1):51–55.
TIAN Huidong, XIE Baoyu, ZHAO Yongchao, et al. Using spectral data to distinguish cotton fusarium wilt disease[J]. Cotton Science, 2008,20(1):51–55. (in Chinese)