

多仓自适应家用智能杂粮桶设计

姜缘俏, 郑 菲*

辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年9月13日; 录用日期: 2026年10月6日; 发布日期: 2026年10月13日

摘 要

针对家庭多品类杂粮储存中易受潮霉变、串味混杂、取粮计量不便等问题, 设计了一种多仓自适应家用智能杂粮桶。整机采用四仓独立密封结构, 每仓配置温湿度传感器与对开门式干燥剂舱: 仓内湿度超标时舱门自动开启, 食品级硅胶干燥剂经自然扩散吸附水汽, 湿度回落至适宜区间后舱门自动关闭, 构成低功耗闭环动态除湿。顶部集成扫码识别模块, 扫描杂粮包装溯源码即可自动匹配该品类适宜的存储湿度区间, 实现分仓差异化保鲜。取粮时通过触控屏设定质量, 步进电机驱动料斗式下料轮下料, 称重传感器实时反馈并在达到设定值时自动停机。完成了整机结构与控制系统设计, 对干燥剂用量、下料计量精度与整机功耗进行了理论核算, 并给出结构强度仿真与控湿性能台架试验方案。该设计不依赖真空、充氮等高能耗部件, 成本与运行功耗低, 为家庭小型储粮装备提供了一种可行的技术方案。

关键词

家用杂粮桶, 动态除湿, 溯源识别, 定量下料, 闭环控制

Design of a Multi-Chamber Adaptive Smart Coarse Cereal Storage Container for Household Use

Yuanqiao Jiang, Fei Zheng

School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology, Anshan Liaoning

Received: September 13, 2026; accepted: October 6, 2026; published: October 13, 2026

Abstract

Aiming at the problems of moisture absorption, mildew, odor mixing and inaccurate manual metering in household storage of multiple coarse cereals, a multi-chamber adaptive smart coarse cereal storage container for household use is designed. The device adopts a four-chamber independently

*通讯作者。

sealed structure, and each chamber is equipped with a temperature-humidity sensor and a double-door desiccant compartment: when the chamber humidity exceeds the upper limit, the compartment door opens automatically, and the food-grade silica gel desiccant adsorbs moisture through natural diffusion; when the humidity falls back to the appropriate range, the door closes automatically, forming a low-power-consumption closed-loop dynamic dehumidification system. A code-scanning module is integrated on the top cover; by scanning the traceability code on the cereal package, the device automatically matches the suitable storage humidity range for the corresponding category, realizing differentiated fresh-keeping among chambers. For grain dispensing, the user sets the target mass on the touch screen, a stepping motor drives the hopper-type discharge wheel, and the weighing sensor provides real-time feedback so that the motor stops automatically when the set value is reached. The overall mechanical structure and control system are designed; the desiccant dosage, dispensing accuracy and power consumption are theoretically analyzed; and structural strength simulation together with bench test schemes for humidity-control performance is presented. The design requires no high-energy-consumption components such as vacuum or nitrogen-filling devices, features low purchase and operating costs, and provides a feasible technical solution for household small-scale grain storage equipment.

Keywords

Household Coarse Cereal Storage Container, Dynamic Dehumidification, Traceability Identification, Quantitative Dispensing, Closed-Loop Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

杂粮富含膳食纤维、维生素与矿物质,是居民膳食结构的重要组成部分[1]。但杂粮大多只经过初加工,籽粒活性强、孔隙率高,在家庭厨房高温高湿环境下极易吸湿返潮,进而结块、霉变、生虫,造成营养流失与浪费[2]。储粮研究表明,环境相对湿度与粮堆微生物活动密切相关:相对湿度升高后霉菌代谢明显增强,粮食品质加速劣变[3][4],且不同粮食品种的安全储藏湿度区间存在明显差异[4]。

现有储粮技术难以直接照搬到家庭场景。大中型粮仓的温湿度远程监控技术已较成熟[5][6],真空、充氮等气调保鲜效果虽好,但设备成本、能耗与体积均不适合民用。家用层面,黄之斌等[7]针对高温高湿环境设计了生态储粮桶,验证了家用小型储粮装置的可行性;但目前市面产品与已有方案普遍采用敞口干燥剂包被动吸湿,干燥剂长期暴露、失效快,吸湿过程不可控,也无法按粮食品种差异化控湿。另一方面,二维码溯源技术已在稻米等农产品质量追溯中得到应用[8],但溯源信息目前仅服务于流通环节的质量查询,尚未与储粮环境调控形成联动。

针对上述问题,本文设计一种多仓自适应家用智能杂粮桶,重点解决三个问题:一是以对开门式干燥剂舱实现仓内湿度的闭环动态调控,替代传统被动吸湿方式;二是通过扫码识别联动本地数据库,自动匹配不同杂粮的适宜湿度区间;三是通过触控设定与称重反馈实现定量出粮,避免人工舀取造成的撒漏与计量不准。

2. 整机总体方案

2.1. 总体结构

如图1、图2所示,整机自上而下分为五个功能模块:顶部交互溯源壳体、四仓独立密封储粮主体、

对开门式干燥剂除湿舱、料斗定量下料机构和称重电控底座。

顶部交互溯源壳体集成触控 OLED 显示屏、扫码摄像头、补光灯与防尘滑盖；储粮主体由竖向密封隔板分隔为 4 个相互独立的漏斗形储粮仓，各仓配置独立的温湿度传感器，仓间水汽与气味互不串通；每个储粮仓背部对应一个对开门式干燥剂除湿舱，内置抽屉式食品级硅胶干燥剂盒；下料机构采用 304 不锈钢料斗轮槽结构，由各仓独立的步进电机驱动；称重电控底座内置高精度称重传感器、抽拉式密封接粮盒、密封电控仓与 WiFi 天线。整机各模块采用卡扣、插拔式装配，无需专用工具即可拆卸清洗。

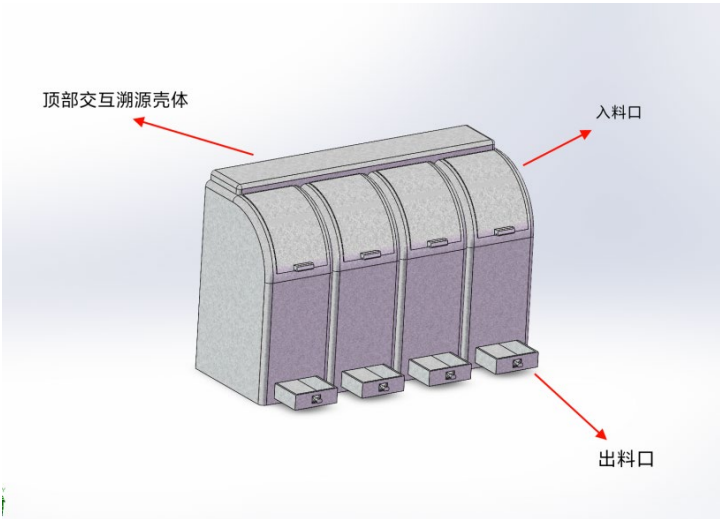


Figure 1. 3D structural model of the intelligent coarse cereal storage container

图 1. 智能杂粮桶整机三维结构图

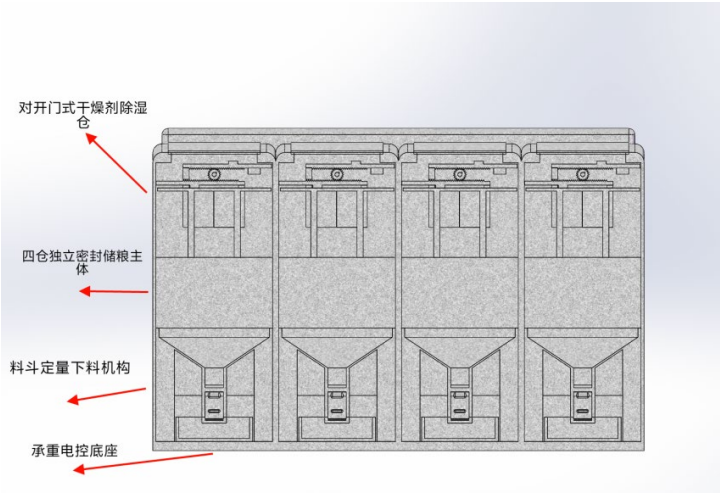


Figure 2. Sectional view of the desiccant dehumidification chamber and grain storage chamber

图 2. 干燥剂除湿舱与储粮仓内部剖视图

2.2. 工作流程

存粮时，用户将杂粮包装袋上的溯源码对准顶部摄像头，屏幕显示识别出的品类与目标存储区间，用户确认后将杂粮倒入对应储粮仓，系统自动完成该仓湿度阈值的设定。储存期间，各仓按设定的阈值

独立进行闭环控湿(详见 2.1 节)。取粮时, 用户在触控屏上选择储粮仓并输入目标质量, 下料机构启动, 称重模块实时反馈, 达到设定值后自动停机, 抽出接粮盒即可取粮。变色硅胶干燥剂失效后, 抽出背部抽屉整体更换, 无需拆机。

3. 核心机构设计

3.1. 对开门式动态除湿舱

传统家用储粮容器中的干燥剂包始终敞口放置, 无论仓内湿度是否超标都持续吸湿, 很快饱和失效; 且吸湿量不可控, 可能使谷物过度干燥、口感变差。针对这一问题, 本文设计了电控开合的对开门式干燥剂除湿舱, 结构如图 2 所示。

除湿舱由抽屉式干燥剂盒、单向透气防水膜、对开门密封挡板和步进电机齿轮传动组构成。控制逻辑为: 仓内湿度高于设定上限时, 步进电机驱动对开门挡板打开, 仓内水汽经透气膜自然扩散至干燥剂盒, 被变色硅胶吸附; 湿度回落至设定下限后, 挡板关闭, 干燥剂与仓体重新隔离。该设计使干燥剂仅在需要时投入工作, 避免了无效吸湿, 显著延长了单次填充的使用周期; 吸湿过程完全依靠水汽自然扩散完成, 无风机、压缩机等持续耗电部件, 运行安静、功耗极低。单向透气防水膜允许水蒸气分子通过, 同时阻隔液态水、粉尘与虫体, 既保护干燥剂, 也避免干燥剂颗粒污染粮食。

单向透气防水膜选用膨体聚四氟乙烯(ePTFE)防水透气膜, 其关键性能指标水蒸气透过率(WVTR)不低于 $3000 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})$ (GB/T 1037 杯式法测试条件)。本设计单仓透气窗有效面积约 0.005 m^2 ($50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$), 理论最大透湿速率约 $15 \text{ g}/24\text{h}$; 考虑实际工作湿度梯度(约 25% RH)低于 WVTR 测试梯度(90% RH), 按 30%折算后实际透湿速率仍可达约 $4.5 \text{ g}/24\text{h}$, 远大于 4.1 节估算的单仓每日所需除湿量($0.5 \sim 1.0 \text{ g}$), 透湿裕量约 5 倍, 表明该膜选型能够满足除湿舱的透湿需求, 选型合理。

3.2. 溯源识别联动自适应控湿

随着农产品溯源体系的推广, 杂粮产品包装上将普遍附带溯源二维码[8]。本设计在桶体顶部集成扫码摄像头与补光灯, 扫码后主控解析其中的品类、产地、含水率等信息, 查询本地仓储参数数据库, 自动匹配该品类适宜的存储湿度区间并设定对应储粮仓的控制阈值, 无需用户查阅资料、手动设置。无网络环境下本地数据库可离线完成匹配, 操作门槛低, 中老年用户也能直接使用。

分仓湿度阈值的设定依据粮食安全水分所对应的平衡相对湿度[2], 并结合不同品种霉菌活动特性的差异[3][4]确定, 见表 1。各仓控制过程相互独立, 任一仓除湿动作不影响其余仓室的存储环境, 实现“一种杂粮一套存储环境”的差异化保鲜。

3.3. 触控定量下料机构

传统储粮容器取粮靠人工舀取, 计量不准、易撒漏, 且频繁开盖会破坏仓内密封、加速粮食劣变。本设计采用料斗轮槽式定量下料机构: 用户在触控屏输入目标质量后, 主控按单位转角下料量换算所需脉冲数, 驱动步进电机带动下料轮匀速旋转, 轮槽内的杂粮随之落入底部接粮盒; 称重传感器实时采集出料质量, 达到设定值时电机立即停机, 阻断后续落料。料斗轮槽式结构相比螺旋输送方式不易卡料、残留少; 称重闭环反馈可自动修正不同粮食品种堆积密度差异带来的误差, 使出料精度不受粮种更换的影响。

4. 控制系统设计

4.1. 硬件组成

控制系统以 STM32F103 单片机为核心, 硬件组成如图 3 所示。每个储粮仓配置一只 SHT30 温湿度

传感器, 测量精度 $\pm 2\%$ RH, 满足仓内湿度监测要求; 称重通道由称重传感器与 HX711 模数转换模块构成, 负责出料计量与存量估算; 执行机构包括各仓除湿舱对开门步进电机与下料步进电机; 人机交互由触控 OLED 显示屏、蜂鸣器完成; ESP8266 WiFi 模块负责与手机端的数据同步。

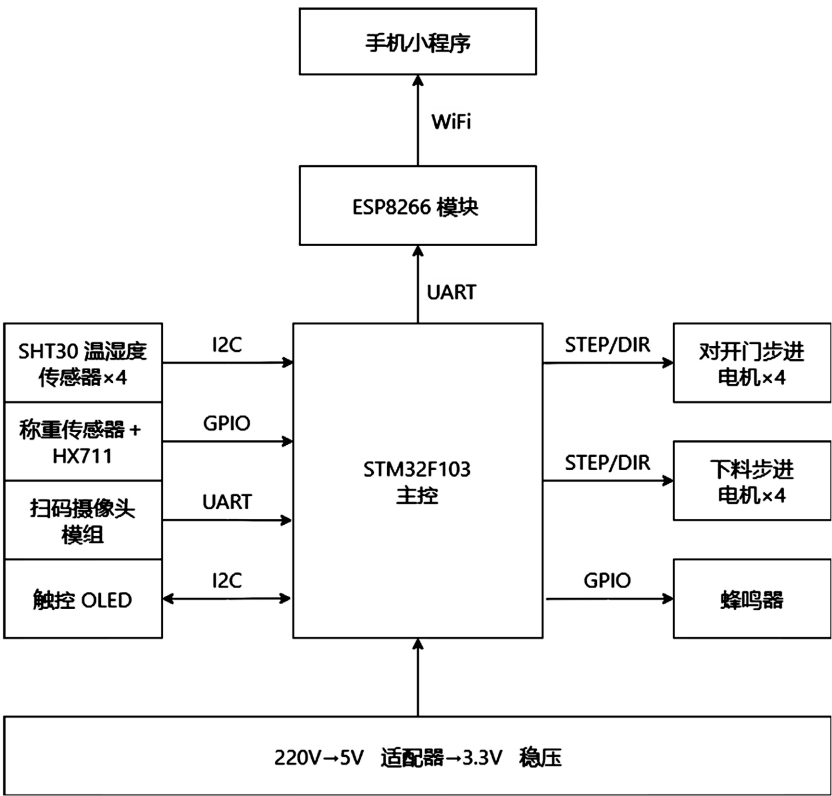


Figure 3. Hardware block diagram of the control system
图 3. 控制系统硬件组成框图

4.2. 湿度闭环控制逻辑

系统每 10 s 对各仓温湿度采样一次, 采用多点均值滤波消除环境振动、气流扰动带来的数据波动。控湿采用滞环(回差)策略, 以大米仓为例设定上限 60% RH、下限 55% RH, 回差取 5% RH: 仓内湿度高于上限时打开对应除湿舱对开门, 回落至下限后关闭舱门。回差值需在避免频繁启停与维持湿度稳定之间权衡: 若回差过小、接近传感器 $\pm 2\%$ RH 的测量误差带, 舱门会在临界湿度附近受测量噪声影响频繁启停, 加速执行机构磨损并增加干燥剂无效暴露; 若回差过大(如超过 10% RH), 仓内湿度将长时间偏离适宜区间, 削弱保鲜效果。本文取 5% RH 回差, 约为传感器测量误差的 2.5 倍, 既可抑制启停抖振, 又能将湿度波动控制在杂粮储藏可接受的范围内。四个储粮仓的控制回路相互独立, 任一仓的除湿动作不影响其余仓室。

4.3. 监测与报警功能

系统具备存量预警、温湿度超标报警与干燥剂更换提醒功能: 称重模块估算各仓余粮量, 低于设定值时提醒补充; 仓内温湿度持续超标时蜂鸣器声光报警; 主控按对开门累计开启时长估算干燥剂消耗程度, 临近失效时提醒更换。各仓温湿度、余粮量及历史变化曲线可经 WiFi 同步至手机端, 实现本地触控与远程查看双重监测, 改变传统储粮完全依靠人工开盖检查的方式。

5. 关键参数设计计算

5.1. 干燥剂用量与更换周期估算

变色硅胶干燥剂在相对湿度 90%环境下的平衡吸湿量可达自重的 30%左右[9]。按单仓充填 150 g 干燥剂、有效吸湿率 25%计, 单次填充可吸附水汽约 37.5 g。家用场景下水汽来源主要为取粮开盖置换、密封缝隙渗漏与粮食自身水分释放, 综合工程估算单仓每日吸湿量约 0.5~1.0 g, 对应单次填充使用周期约 38~75 天, 与家庭“月度检查更换”的使用习惯相符。抽屉式干燥剂盒配合变色硅胶的颜色指示, 用户可以直观判断更换时机, 维护简单。

5.2. 下料计量精度分析

下料轮沿圆周均布 8 个轮槽, 单槽容积约 12 mL, 每转下料约 96 mL。以大米堆积密度约 0.85 g/mL 计, 每转出粮约 82 g; 所用步进电机步距角 1.8°, 整周 200 步, 则单步对应下料量约 0.4 g, 理论分辨率远优于家庭取粮的精度需求。实际误差主要来自停机后的惯性落料与粮粒架桥, 为此采用“提前减速 + 点动补料”策略: 距目标值 50 g 时下料轮降速运行, 距目标值 10 g 时改为单步点动, 可将单次出料误差控制在±5 g 以内, 满足家庭按量取粮的要求。

5.3. 整机功耗估算

整机无持续运转的大功率部件。待机状态下主控休眠、传感器间歇采样、屏幕息屏, 整机待机功率约 0.7 W, 每日待机耗电约 16.8 W·h; 除湿舱门与下料电机单次动作不超过 5 s、每日按累计动作 100 s 计, 电机功率约 5 W, 每日动作耗电约 0.14 W·h。合计日均耗电约 0.017 kW·h, 年耗电约 6.2 kW·h, 年电费不足 5 元; 干燥剂按月度更换, 年耗材成本约 30 元。相比千元级家用真空储粮设备, 本设计在购置与使用成本上均有明显优势。

5.4. 分仓湿度阈值设定

粮食储藏安全取决于籽粒含水率与仓内湿度的平衡关系[2], 高湿环境会显著促进霉菌代谢活动[3][4], 而油料作物还需更低的湿度以抑制油脂氧化酸败。据此设定各品类的存储湿度区间, 如表 1 所示。用户也可在触控屏上手动微调阈值, 覆盖数据库中未收录的品类。

Table 1. Storage humidity threshold settings for typical coarse cereals
表 1. 典型杂粮品类的存储湿度阈值设定

品类	湿度控制区间	设定依据
大米	50%~60% RH	安全水分约 14%对应的平衡湿度
花生	45%~52% RH	油料作物, 低湿抑制油脂氧化酸败
藜麦	50%~58% RH	小籽粒谷物, 参照大米略下调
豆类	52%~62% RH	籽粒表皮致密、呼吸强度低, 可略高

6. 结构仿真与试验方案设计

受样机试制条件限制, 本文对关键结构进行 SolidWorks 仿真校核, 并设计控湿性能台架试验与储藏对比试验方案, 为后续样机试制与性能验证提供依据。

6.1. 满载工况结构强度仿真

在 SolidWorks Simulation 中对整机三维模型进行静力学分析: 桶体、密封隔板等注塑件取 PP 共聚物

(屈服强度 25 MPa), 下料轮槽取 304 不锈钢; 按满仓工况对仓壁与漏斗面施加压力载荷, 压力值按 $p = \rho gh$ 估算(大米堆积密度约 850 kg/m^3 、粮堆高度 0.15 m, 取 1250 Pa), 底座底面施加固定约束, 自动划分四面体网格求解。

仿真结果如图 4 所示: 满载工况下桶体最大 von Mises 应力为 0.16 MPa, 远低于 PP 材料屈服强度 25 MPa, 对应安全系数约 156; 最大变形量为 $3.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$, 主要集中于顶部盖板区域, 远小于密封配合面 0.5 mm 的变形限值。结果表明, 桶体在满载工况下强度与刚度储备充足, 结构变形不会影响密封圈贴合, 满足家用储粮使用要求。

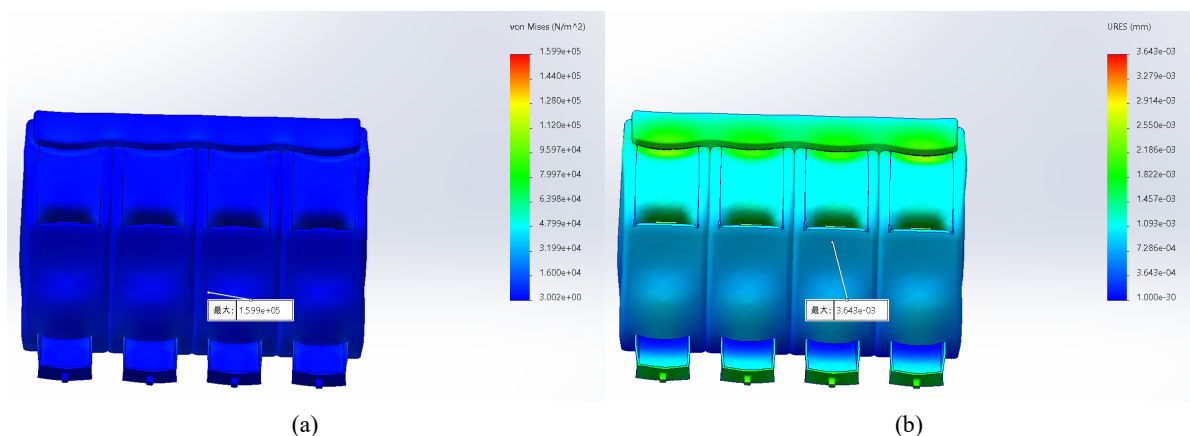


Figure 4. (a) Sectional von Mises stress nephogram of the barrel under full load; (b) Sectional displacement nephogram of the barrel under full load

图 4. (a) 满载工况下桶体剖面 von Mises 应力云图; (b) 满载工况下桶体剖面位移云图

6.2. 单仓闭环控湿台架试验方案

为验证对开门动态除湿方案的控湿效果, 设计单仓原理验证台架: 以 5 L 透明密封箱模拟储粮仓, 内置 SHT30 温湿度传感器、由单片机驱动的舵机挡板(模拟对开门机构)与 150 g 变色硅胶干燥剂, 另置一只传感器监测环境温湿度; 采用加湿器定时喷雾模拟高湿环境与粮食返潮。试验设三组: A 组为闭环动态除湿(湿度高于 60% RH 开门、低于 55% RH 关门); B 组干燥剂全程敞口(模拟传统方案); C 组为无干燥剂空白对照。三箱各装入 500 g 大米, 每日定时喷雾 10 s, 每 10 s 记录一次湿度, 连续运行 14 天。试验指标包括: 各组湿度波动区间与控湿误差、超标后回落至区间的时长、A/B 两组干燥剂质量日增量(0.01 g 电子秤称重, 反映干燥剂消耗速率)及系统日均功耗。预期 A 组湿度稳定于设定区间, 且干燥剂增重速率明显低于 B 组, 即动态开合控制可兼顾控湿精度与干燥剂寿命。

6.3. 储藏效果对比试验方案

参考模拟储粮环境开展品质试验的方法[10], 设置高湿工况(温度 28°C 、相对湿度 80%), 试验组采用本装置闭环控湿, 对照组采用普通密封桶内置敞口干燥剂包, 各装入大米、花生 500 g, 连续储存 30 天。每 5 天取样测定粮食含水率, 观察结块、霉变、异味与虫害情况; 试验结束后进行蒸煮品质评价, 对比两组杂粮的色泽、气味与口感保持情况, 量化本装置的保鲜效果。

7. 总结与展望

本文针对家庭多品类杂粮储存需求, 完成了多仓自适应家用智能杂粮桶的结构与控制系统设计, 主要创新点包括: (1) 对开门式动态除湿舱——湿度超标时舱门开启、干燥剂自然吸湿, 达标后自动关闭隔

离, 以纯物理方式实现低功耗闭环控湿, 避免传统敞口干燥剂的无效消耗; (2) 溯源识别联动控湿——扫描杂粮溯源码自动匹配品类专属的湿度区间, 实现分仓差异化保鲜, 操作零门槛; (3) 触控定量下料——触控设定、称重闭环反馈, 实现按量精准出粮。理论核算表明: 干燥剂单次填充可使用一个月以上, 单次出料误差可控制在 $\pm 5\text{ g}$ 以内, 整机年电费不足 5 元, 具备良好的民用经济性。

后续工作将从两方面展开: 一是按第 5 章方案加工单仓原理样机并开展台架与储藏试验, 获取实测数据、迭代优化控制参数; 二是拓展整机功能, 包括增设半导体制冷片实现分仓低温调控、干燥剂饱和度自动检测、NFC 溯源识别, 并开发多容量规格以适配不同家庭的储粮需求。

参考文献

- [1] 吴昆. 五谷杂粮益健康[J]. 新农村, 2025(1): 42.
- [2] 武书庚, Mark A. Myers. 谷物的储存与品质维护[J]. 中国畜牧杂志, 2010, 46(6): 52-54.
- [3] 田海娟, 蔡静平, 黄淑霞, 等. 稻谷储藏中温湿度变化与微生物活动相关性的研究[J]. 粮食储藏, 2006, 35(4): 40-42.
- [4] 黄淑霞, 蔡静平, 田海娟. 主要粮食品种储藏期间霉菌活动特性研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 99-102, 127.
- [5] 杨柳, 毛志怀, 蒋志杰, 等. 基于无线传输的粮仓温湿度远程监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 155-159.
- [6] 朱高中. 基于单片机的粮仓温湿度远程监控系统的设计[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(3): 677-681.
- [7] 黄之斌, 程绪铎. 大米的储藏特性及生态储粮桶的设计[J]. 粮食储藏, 2012, 41(6): 13-17.
- [8] 雷云, 李怡青, 李晔孜, 等. 基于二维码的稻米质量安全追溯系统的设计与实现[J]. 食品工业科技, 2015, 36(11): 257-261.
- [9] 杨保义, 张杰. 变色硅胶干燥剂吸湿性能研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 32-35.
- [10] 张玉荣, 周显青. 典型储粮环境下储藏大米糊化特性试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 125-130.