吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之十一/“新系统”分栏文章之三

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.011
韩峰，吴文福，刘哲，等. 粮食连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 83-89.
HAN F, WU W F, LIU Z, et al. Simulation experiment system of grain continuous drying process and process control[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 83-89.

粮食连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统

韩　峰[1]，吴文福[1,2]，刘　哲[1]，张亚秋[1]，王桂英[1]✉，
徐　岩[1]，金　毅[3]，陈俊轶[1]，岳中芬[4]

（1. 吉林大学 生物与农业工程学院，吉林 长春 130022；
2. 吉林工商学院 粮食学院，吉林 长春 130507；
3. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所，北京，100037；
4. 长春市神阳机电有限公司，吉林 长春 130113）

摘　要：对工艺参数优化和过程智能控制的研究是设计开发粮食干燥装备的重要内容，现有方法多采用模拟仿真、特性实验或现场实验等获取数据，与实际干燥结果存在较大差异或实验过程费时费力，易受干扰。研究参考大型连续式粮食干燥生产设备工艺和结构，设计了一种连续式粮食干燥模拟实验系统，包括进粮设备、干燥机主体、排粮设备、余热回收、冷凝装置、热风设备和测控系统，可模拟粮食干燥作业过程，优化干燥工艺参数，在室内开展粮食干燥品质变化规律、能耗规律和生产效率等实验研究。该系统不仅可作为科研机构的实验研究系统，还可用于生产一线工作人员岗前培训、大专院校相关专业的实验教学。

关键词：粮食干燥；工艺；过程控制；模拟；实验系统

中图分类号：S226.6　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1007-7561(2023)02-0083-07

网络首发时间：2023-03-14 17:14:01

网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.ts.20230313.0939.002.html

Simulation Experiment System of Grain Continuous Drying Process and Process Control

HAN Feng[1], WU Wen-fu[1,2], LIU Zhe[1], ZHANG Ya-qiu[1], WANG Gui-ying[1]✉, XU Yan[1], JIN Yi[3], CHEN Jun-yi[1], YUE Zhong-fen[4]

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China; 2. School of Grain Science and Technology, Jilin Business and Technology College, Changchun, Jilin 130507, China; 3. Grain Storage and Transportation Research Institute, Academy of National Food and

收稿日期：2022-12-20

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（32102034）；吉林大学教学模式与教学方法改革项目（2019XYB155）；国家重点研发计划（2016YFD0401001）

Supported by: National Natural Science Foundation of China (No. 32102034); Jilin University Teaching Model and Teaching Method Reform Project (No. 2019XYB155); National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFD0401001)

作者简介：韩峰，男，1978 年出生，博士，高级工程师，研究方向为粮食干燥和储藏。E-mail: hanfeng@jlu.edu.cn.

通讯作者：王桂英，女，1975 年出生，博士，工程师，研究方向为农产品清洁节能干燥技术。E-mail: guiying9602@163.com.

Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 4. Changchun Shenyang Mechanical & Electrical Co., Changchun, Jilin 130113, China)

Abstract: Research on process parameter optimization and process intelligent control is an important element in the design and development of grain drying equipment. Existing methods mostly use simulation, device experiments or field experiments to obtain data, which have large differences with the actual drying results or the experimental process is time-consuming and vulnerable to interference. In this study, with reference to the process and structure of large continuous grain drying production equipment, a continuous grain drying simulation experimental system was developed and designed, including grain feeding equipment, dryer main body, grain discharge equipment, waste heat recovery, condensing device, hot air equipment and measurement and control system, which can simulate the grain drying operation process. This system can also optimize the drying process parameters, and carry out indoor grain drying quality change law, energy consumption law and production efficiency. The system can be used as the first-line staff post. The system could be used as the pre-service training for the workers on the production line, the experimental teaching of related majors in universities and colleges and the experimental research system of scientific research institutions.

Key words: grain drying; technology; process control; simulation; experimental systems

干燥是粮食收获后处理的一个重要环节。连续式热风干燥设备是北方玉米等粮食品种机械干燥时广泛采用的一种主要设备，其工艺参数和条件对粮食入仓后储藏的质量和加工品质等具有重要影响。

粮食干燥技术的发展依赖于干燥理论和工艺的探索，国内外学者多年来也一直致力于干燥工艺理论、参数和过程控制方法的研究[1-4]，其方案一般采用以下几种方式[5-8]：

（1）模拟仿真。通过理论分析和条件假设，建立数学模型，仿真分析粮食在不同干燥条件下水分、品质等参数变化规律，但易受边界条件和物料属性等因素影响，精度较低。

（2）特性实验。通过静态薄层或深层干燥实验装置，研究粮食静态的干燥特性，优化干燥工艺，该方法不能完全真实反映在实际干燥作业过程中粮食特性的动态变化和规律。

（3）现场实验。通过在干燥生产现场进行设备改造或实验，对工艺理论和干燥参数进行研究和验证，实验过程费时费力，成本支出大，易受现场干扰因素影响。

因此，本文研发并设计一种连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统，模拟粮食干燥作业过程，优化干燥工艺参数，验证过程控制算法理论，可研究物料品质变化规律、干燥能耗规律和生产效率等，具有自动化程度高、操作方便、安全等特点；该系统可用于生产一线工作人员岗前培训、大专院校相关专业的实验教学和科研机构的实验研究。

1 系统工艺和组成

1.1 系统工艺

粮食连续干燥模拟实验系统是连续式热风干燥生产线的实物模拟系统，干燥工艺采用顺逆流，系统可根据需求调整干燥过程中多组运行参数，实现干燥过程的手动和自动控制。粮食干燥模拟实验系统如图 1 所示。

图 1 粮食干燥模拟实验系统

Fig.1 The simulation experiment system of grain drying

系统作业工艺流程如图 2 所示：

湿粮→仓前提升机→湿粮仓→电动闸门→塔前提升机→干燥机→排粮机构→塔底皮带输送机→干粮

干燥介质的循环利用：

干燥机干燥段→干燥机尾气→余热回收风道→风冷冷凝器→混风室→热风机→电加热器→风道→干燥机干燥段

冷凝介质采用外界环境冷空气，经冷凝装置间接换热对干燥尾气进行降尘除湿，实现尾气的循环利用和节能增效。

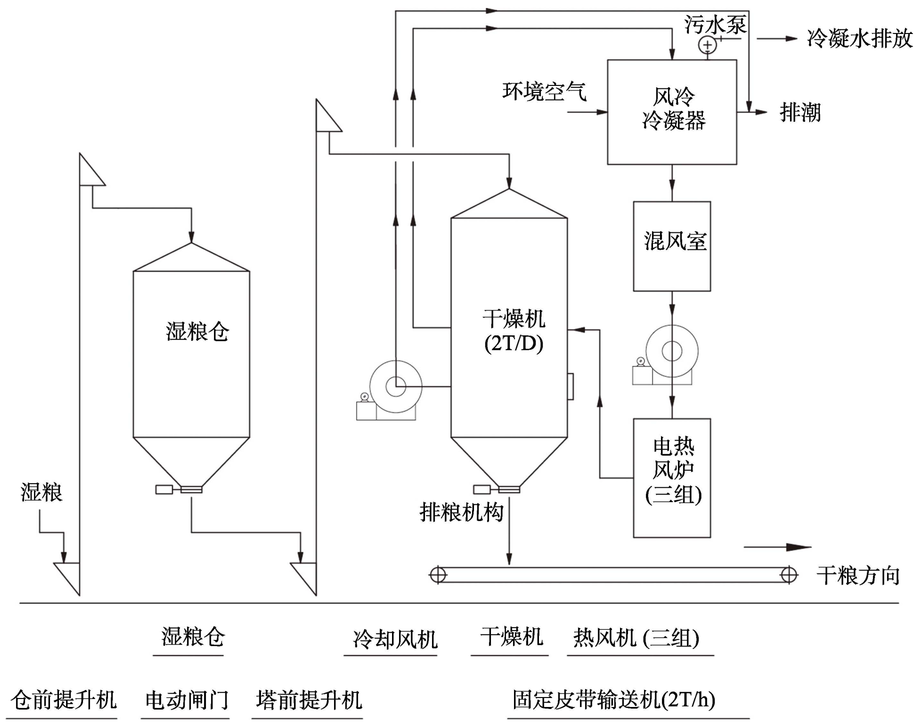


图 2　粮食干燥模拟实验系统工艺流程

Fig.2　The simulation experiment system process flow of grain drying

1.2　主要技术参数

粮食干燥模拟实验系统主要技术参数如表 1 所示：

表 1　技术参数表

Table 1　Technical parameters

项目	参数
处理量/(kg/h)	50~100
温度调控范围/℃	室温–120
温度控制精度/℃	±1
湿度检测范围/%RH	0~99
湿度检测精度/%RH	±3
降水幅度/%	10~15
水分控制精度/%	±0.5
总功率/kW	51
外形尺寸/mm	L5 700×W2 900×H5 500

1.3　系统组成及功能

粮食干燥模拟实验系统干燥机主体采用在大型粮食干燥作业中得到应用和实践，取得良好干燥效果的工艺方案。总体结构主要由进粮设备、干燥机主体、排粮设备、余热回收、冷凝设备、热风设备和控制系统等，结构和组成如图 3 所示[9]。

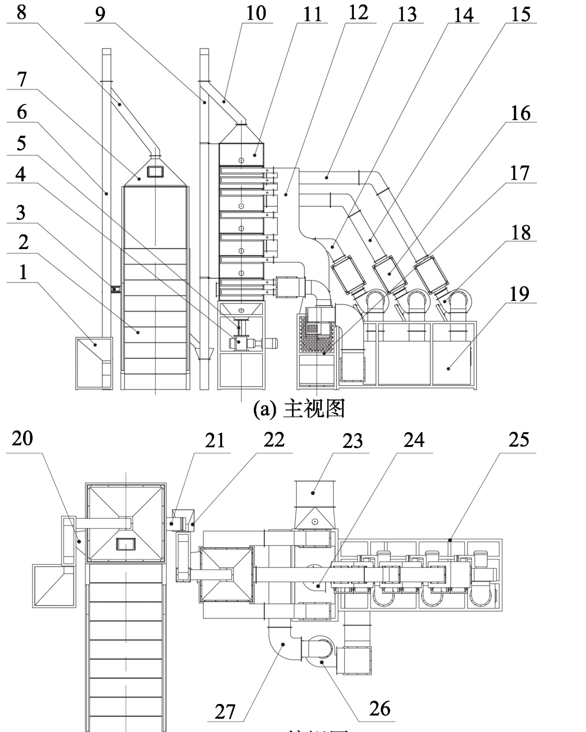
1.3.1　干燥机主体

系统干燥机主体为全金属、分层模块式设计，积木式结构，便于安装、更换和维修，可按不同产量和降水要求进行多种组合，满足不同处理量的实验设备要求。

干燥机主体采用中间进气，两侧排潮结构，干燥段内部为角状盒结构，两侧布满一排排的进气和排气角状盒。干燥机自上而下由三个干燥段和一个冷却段组成。干燥段设计为干燥层和缓苏层交替排列，利于保持粮食干燥时的品质。尾气连接回收风道，循环利用；冷却段同样采用角状盒结构，尾气回收。干燥段和角状盒结构分别如图 4、图 5 所示。

粮食在重力作用下沿角状盒外部空间呈 S 形由上向下缓慢流动，分别流经储粮段、干燥层、缓苏层、冷却段，经底部排粮机构排出，完成干燥过程，排粮速度采用变频器无级调速，排出速

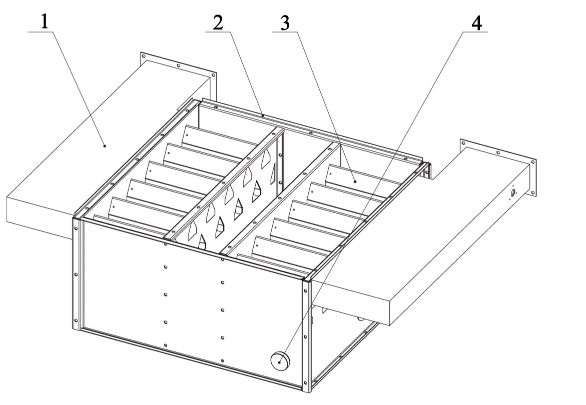
度可根据水分测控参数自动调节，控制粮食水分达到储藏或加工标准。各缓苏层设计取样孔，可在干燥实验过程中抽取中间过程样品，研究干燥时不同阶段粮食参数变化规律。



1、装粮斗 2、楼梯 3、电动闸门 4、卸料器 5、水分仪 6、仓前提升机 7、烘前仓 8、入仓流粮管 9、塔前提升机 10、入塔流粮管 11、干燥机 12、回收风网 13、上风道 14、下风道 15、中风道 16、电加热器 17、冷凝器 18、热风机 19、混风室 20、提升机连接板 21、仓底流粮管 22、提升机料斗 23、冷凝风机 24、排潮风机 25、支架 26、冷却风机 27、冷却风网

图 3 粮食干燥模拟实验系统结构和组成

Fig.3 The simulation experiment system structure and composition of grain drying



1、回收风道 2、侧板 3、角状盒 4、取样口

图 4 干燥段结构

Fig.4 Drying section structure

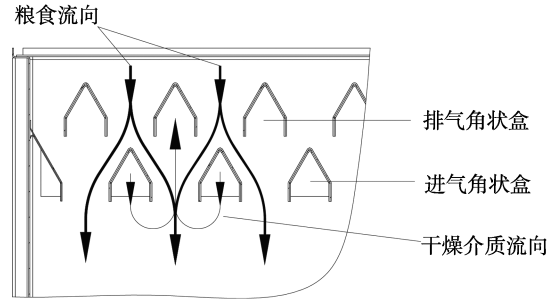


图 5 角状盒结构

Fig.5 Angular box structure

干燥段内，由热风机把干燥介质经过电热风炉加热到设定温度后，正压压入中间混风风道向两侧扩散，一部分进入进气角状盒内，另一部分穿过流动粮层向上或向下进入排气角状盒。尾气从排气角状盒排入干燥塔尾气回收风道，经过尾气回收风道进入风冷冷凝器进行冷凝除湿降尘，重新经过混风室进入热风机、电热风炉加热后，作为干燥介质进入干燥机内。被干燥粮食经过三段干燥和缓苏交替处理，进入到逆流冷却段，冷却介质从环境引入，在向上移动时与向下流动的热粮食有一个充分的热交换过程，不但保证了一定的降水率，并且保证粮粒的充分冷却。这样，出机粮食不会出现回潮、局部发热的现象，确保烘后粮食品质。

储粮段的上、下料位传感器实现自动进粮，当粮食达到高料位时，进粮系统自动停止；当粮食达到低料位时，自动启动进粮系统。防止储粮段缺粮造成热风短路影响干燥效果。

1.3.2 余热回收

为降低干燥能耗，提高能源利用效率，粮食干燥模拟实验系统设计有余热回收结构，干燥段排气角状盒出口连接密闭回收风道，尾气可通过两侧专用回收风道，将干燥段和冷却段湿热尾气回收至冷凝装置，经过冷凝器降尘除湿后，再经电加热装置补充加热，重新进入干燥机内，形成闭环系统。系统充分利用了水蒸气的汽化潜热和尾气除湿后的余热，达到节能降耗，提高能量利用效率的目的。

1.3.3 冷凝装置

冷凝装置主要功能是降低排出的高温高湿尾气的温度，使其中水分凝聚为液体分离出来，同

时具有对尾气中灰尘沉降净化的作用。冷凝装置采用了热风炉中常用的列管式结构，间接换热方式，装置串联安装在干燥机余热回收风道和电热风炉之间。工作是通过风量可调的冷凝风机引入外界低温空气，与干燥尾气进行间接换热，达到冷凝效果，冷凝效率可通过冷凝风机转速进行调节。

2 测控系统

2.1 测控系统方案

粮食干燥具有非线性、大时滞、难于控制等特点，其自动控制的精确性和智能化是确保干燥过程的稳定性，提高干燥效率和品质、降低能耗的重要手段。稳定性、准确性、鲁棒性是粮食干燥机控制器的基本要求[10-11]。

本系统结合粮食干燥水势模型[12-13]和多参数控制策略[14]，布置在线水分仪、温湿度传感器组、温度传感器、料位传感器等对粮食连续干燥过程中进行实时在线监测。根据干燥实验过程中粮食温度、湿度、水分变化等控制排粮机构的转速和风温等参数，进而控制粮食出机含水率和品质。测控系统分为硬件结构和软件结构两个部分。系统的总体方案如图 6 所示。

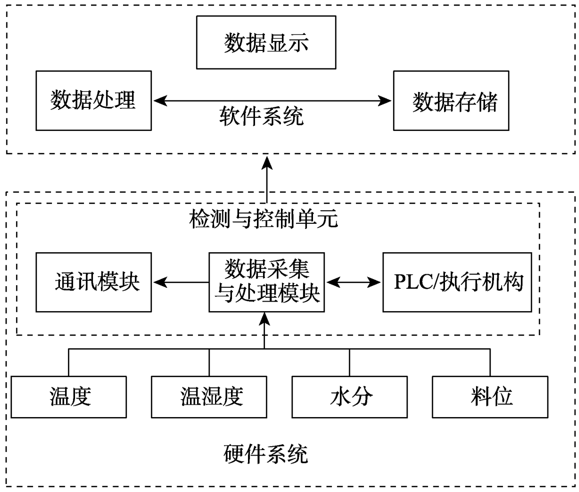


图 6 测控系统结构方案

Fig.6 Measurement and control system structure scheme

2.2 硬件结构与组成

测控系统硬件结构和组成如图 7 所示，主要实现干燥模拟实验系统的参数检测和各个运动部件的自动控制。硬件主要包括系统主机(工控机)、通讯模块、传感器、调控元件和各运动部件。调控元件选用可编程控制器（PLC）和变频器等，便于对各运动部件的调节和控制。

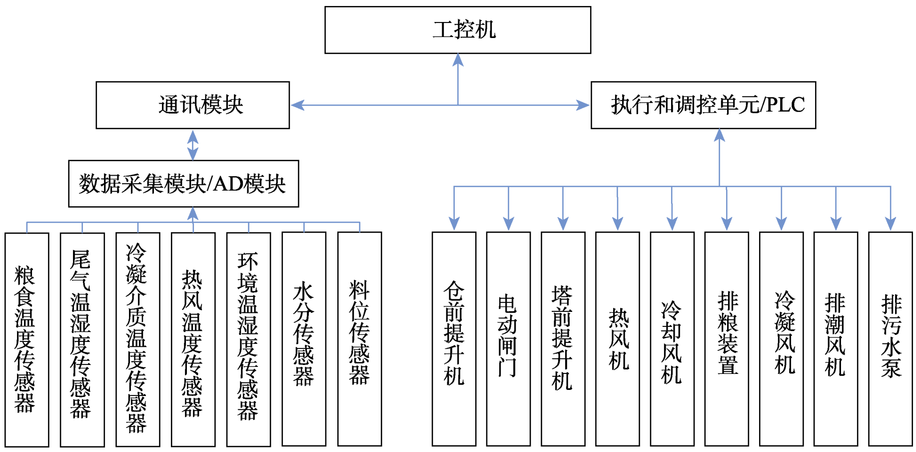


图 7 测控系统硬件结构和组成

Fig.7 Hardware structure and composition of the measurement and control system

传感器是测控系统的重要器件，其安装与布置如图 8 所示。各传感器检测参数包括干燥前粮食温度（TL1）、干燥段内缓苏层粮食温度（TL2-TL9）、干燥后粮食温度（TL10）、冷凝介质进出口温度（TJ1-TJ2）、热风（干燥介质）温度（TF1-TF3）、排出尾气温湿度（TH1-TH8）、尾气冷凝前温湿度（TH9-TH10）、尾气冷凝后温湿度（TH11）、环境温湿度（TH12）、储粮段粮食位置（LW1-LW2）、排出干粮水分（M）。

2.3 软件系统

软件系统采用图形化编程语言 LabVIEW 开发，实现对干燥实验设备机械系统检测、调节和智能化控制。系统开发基于模块化思想，主要功能模块包括参数设定、参数检测与采集、数据处

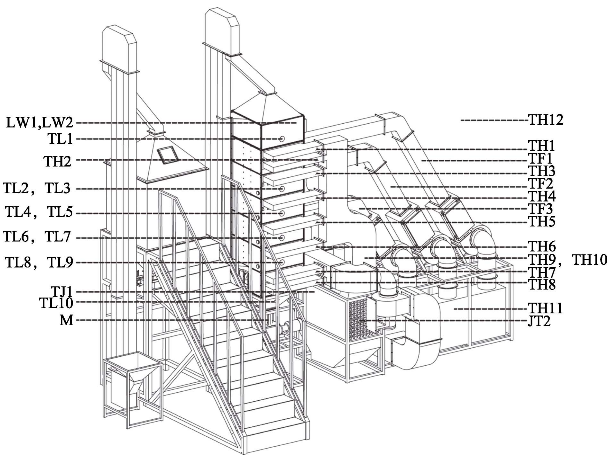


图 8　传感器分布图

Fig.8　Sensor distribution

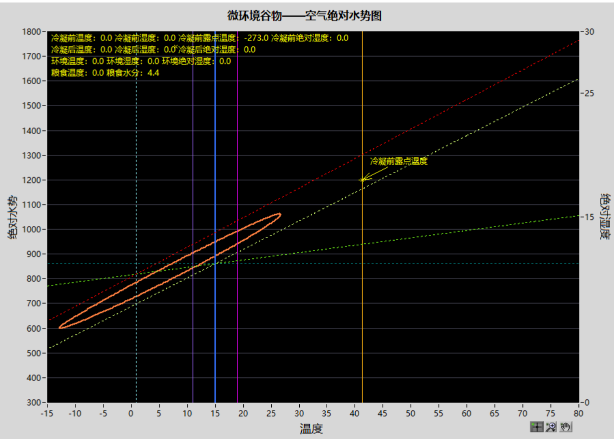


图 9　过程控制水势窗口图

Fig.9　Water potential window diagram for process control

理、数据存储、图形化显示、用户操作和智能控制等。

参数设定主要包括系统参数的初始化、通讯端口的选择、排粮速度和冷凝风机转速、热风温度、排潮工作启停范围和目标水分等参数的设定。参数检测与采集负责对所安装传感器进行周期性采集，并将数据传递给数据处理模块。数据处理、数据存储模块分别对传感器数据和设定数据进行计算处理和存储，确定测控系统对运动部件的控制动作。用户操作和智能控制可实现系统手动控制、智能联锁控制。

系统搭建了粮食连续干燥工艺和过程控制研究的模拟实验平台，设计了用户算法接口，方便使用者根据所采集参数，自主开发过程控制算法模块，用于控制输出。系统结合了水势窗口理论，对干燥过程中各缓苏层粮食绝对水势、尾气冷凝前后绝对水势变化进行图形化展示，如图 9 所示。图形中反映了干燥过程中，干燥机内各缓苏层监测点位置粮食水分迁移能力及尾气冷凝前后的湿热迁移情况，便于使用者对干燥过程工艺参数和冷凝强度参数的调节和管理[15-16]。

3　结语

粮食连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统具有自动化程度高、操作方便、安全可靠等特点，可作为生产一线工作人员岗前培训和大专院校相关专业的实验教学系统。有助于学生或研究人员了解粮食干燥设备结构、作业、工艺参数调节及动态变化过程[12-14,17-18]。系统的应用与其他粮食干燥工艺参数研究方法相比，具有以下几方面的优势：

1、干燥机参考实际生产设备工艺和外形，缩小尺寸，单位时间处理量小，可室内安装使用，节约实验研究时人力、物力和时间成本，避免外部恶劣天气对实验结果的影响；

2、系统增加余热回收和冷凝增效系统，提高能源利用效率，降低能耗；

3、干燥系统硬件较为完备，多组工艺参数可调，便于使用者进行多变量控制，进行参数优化研究；

4、系统热效率高、单位能耗低、生产率高、可用于开展玉米、稻谷、小麦、高粱等多种粮食作物的干燥实验研究。

参考文献：

[1]　肖雄峰，方壮东，李长友．我国粮食干燥机械化装备技术发展研讨[J]．中国农机化学报, 2018, 39(5): 97-103.
XIAO X F, FANG Z D, LI C Y. Discussion on development of grain drying mechanization equipment technology in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2018, 39(5): 97-103.

[2]　池桂良．玉米热风干燥模拟实验系统的研究[D]．长春：吉林大学, 2006.
CHI G L. study on simulation experiment system of hot air drying of corn[D]. Changchun: Jilin University, 2006.

[3]　YUZGEC U, BECERIKLI Y, TURKER M. Dynamic neural-network-based model-predictive control of an industrial baker's yeast drying process[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(7): 1231-1242.

[4] FORBES F J, JACOBSON A B, RHODES E, et al. Model based control strategies for commercial grain drying systems[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2010, 62(6): 773-779.

[5] 王丹阳, 王洁, 于文泽, 等. 数值模拟技术在粮食干燥过程中应用的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 129-137.
WANG D Y, WANG J, YU W Z, et al. Reseach progress on application of numerical simulation technology in the process of grain drying[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(8): 129-137.

[6] 吴文福, 韩峰, 张亚秋, 等. 粮食干燥和储藏系统理论与方法的研究—吉林大学粮食储运研究发展回顾[J]. 粮食储藏, 2021, 50(3): 1-10.
WU W F, HAN F, ZHANG Y Q, et al. Research on the theory and methods of grain drying and storage systems - Review of grain storage and transportation research development at Jilin University[J]. Grain Storage, 2021, 50(3): 1-10.

[7] 段二亚. 粮食干燥过程的数值模拟及实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
DUAN E Y. Numerical simulation and experimental study of grain drying process[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014.

[8] 刘雪强. 谷物干燥过程复杂性分析及其控制[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
LIU X Q. Complexity analysis and process control for grain drying[D]. Changchun: Jilin University, 2006

[9] 吴文福, 王桂英, 韩峰, 等. 一种冷凝循环增热连续式变温谷物干燥节能装置及其控制方法[P]. 中国: 201811222349.4. 2018.
WU W F, WANG G Y, HAN F, et al. A condensation cycle heat increase continuous variable temperature grain drying energy-saving device and control method[P]. China: 201811222349. 2018.

[10] LIU Q, BAKKERARKEMA W F. A model-predictive controller for grain drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 321-326.

[11] LIU Z, WU Z D, WANG X M, et al. Numerical simulation and experimental study of deep bed corn drying based on water potential[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 1-13.

[12] 吴玉柱. 粮食干燥积温品质特性及过程测控方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WU Y Z. Research on the quality characteristics of grain drying temperature accumulation and process measurement and control methods[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[13] 金毅. 基于等效积温的谷物干燥过程建模与智能控制[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
JIN Y. Modeling and intelligent control of grain drying process based on equivalent accumulation temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[14] 陈俊轶. 基于耦合因子的变温变湿干燥谷物品质特性及窗口控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CHEN J Y. Research on quality characteristics and windows-control method of variable temperature and humidity grain drying process by coupling factors[D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[15] 陈思羽. 基于绝对水势的储粮湿热迁移及通风管理的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
CHEN S Y. Study on heat and humidity migration and granary aeration management based on absolute water potential[D]. Changchun: Jilin Unversity, 2016.

[16] 杨春晖. 高水分玉米热风真空组合干燥特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
YANG C H. Research on characteristics of high moisture corn combination of hot air and vacuum drying[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[17] 齐德波. 连续式玉米干燥机水分预测控制模型的建立与应用[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
QI D B. Establishment and application of water prediction and control model for continuous corn dryer[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[18] 王炫全. 连续式玉米干燥机测控系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
WANG X Q. Study on the measurement and control system of continuous maize dryers[D]. Changchun: Jilin University, 2018. 完

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（http//lyspkj.ijournal.cn）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。