

# 基于深层干燥解析理论的粮食干燥自适应控制系统设计

李长友, 班 华

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘 要:** 粮食干燥系统存在多种不确定因素, 传统的靠检测出机粮水分, 控制排粮速度或进风条件的做法, 很难实现干燥过程的实时控制, 为了能根据不同的进粮水分, 自动调整干燥机的工作状况, 从而提高干燥的效率和品质, 在粮食深层干燥解析理论和高湿粮食水分在线测量技术的基础上, 研究开发了一套粮食干燥设备自适应控制系统, 能够使设备在工作过程中, 按照实时的进粮水分自动变更工作制度, 确保实时的操作条件最优。通过生产应用验证, 系统能够在 10%~35% wb 的含水率变化范围、-30℃~+40℃温度变化范围可靠地工作, 控制的干燥机出粮含水率偏差 $\leq \pm 0.5\%$  wb。形成了适宜于产业化推广应用的粮食集中干燥自适应控制系统。

**关键词:** 连续干燥机; 进机粮水分; 出机粮水分; 自适应控制

**中图分类号:** TP202.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2008)-4-0142-05

李长友, 班 华. 基于深层干燥解析理论的粮食干燥自适应控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 142-146.  
Li Changyou, Ban Hua. Design of self-adaptive control system for grain dryer based on deep-bed analytical ventilating drying theory[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 142-146.(in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

中国粮食收获后干燥自控能力很低, 基本上依赖自然晾晒, 每年因不能及时干燥造成的粮食损失高达 5%<sup>[1]</sup>。为解决粮食产后干燥问题, 自 20 世纪 70 年代末中国就开始发展粮食机械化干燥, 但至今的普及效果甚微, 干燥机械化水平一直徘徊在 1% 左右。分析其推广不开的主要原因是粮食干燥装备技术含量太低, 核心的问题出在干燥在线检测技术不过关, 控制策略与实际过程出入较大, 控制手段比较粗糙。致使干燥设备可靠性差、能耗高, 效率低, 干燥质量不易保证。

目前, 人们对粮食干燥过程实施的 PID 控制、前馈加 PID 控制、开关控制、PID 加开关控制和基于数学模型的控制等方案都是对应进机粮含水率一定, 送风条件一定的情况下开发的, 是基于给定条件下的控制策略, 属于给定条件下的确定的干燥控制系统。而在实际应用中发现, 由于时间滞后太大和进机粮水分变化频繁, 使得给定条件下的最优控制方法在另一种干燥条件下会出现很不稳定的情况<sup>[2]</sup>。1989 年 Nybrant 开发了一套用于顺流干燥机的自适应控制系统<sup>[3]</sup>。他利用排气温度来控制粮食水分, 但在试验中发现, 即使排气温度保持不变, 进机粮

水分变化时出机粮水分也是变化的。近几年, 在国内, 采取反馈出机粮水分控制排粮轮转速, 开发出了多种在确定工艺条件下的粮食干燥模糊控制系统<sup>[4-6]</sup>和谷物干燥仿人智能控制系统<sup>[7]</sup>。这种控制方案不需要粮食干燥过程模型, 结构简单, 在循环式缓苏干燥设备上应用得比较普遍, 而在连续干燥设备上, 当进粮水分或干燥介质参数波动时, 就难以评价系统的控制精度。

实际的粮食干燥系统如图 1 所示。它是一个输入能量、干燥介质(热风)、湿粮, 排出废气, 得到干粮的多种因素同时作用的复合系统。干燥系统的各环节相互制约, 系统内物料、干燥介质相互作用过程的物理性质, 设备的结构参数及其工况特性参数、运行工艺和操作条件等, 直接影响着粮食干燥系统的动态特性, 并不是人们所想象的对应一定的水分、谷物量, 通入相应地允许温度和一定数量热风的确定系统。如在中国的南方, 高温、高湿、多雨, 日间温湿度变化很大的气候特点, 使得不同田块在不同时段, 收获的粮食, 水分差异很大。况且, 农民自主经营规模小、分散而数量巨大, 难以保证大量的粮食在收获时的含水率均匀一致, 造成大型连续干燥设备的进粮水分随机波动。同时, 排粮装置工况变动(排粮装置磨损、局部阻塞、转速波动等)、大气温湿度变化、燃烧状态不稳也都是不可回避的事实, 加上粮食干燥过程的大惯性和非线性特征, 构成了干燥系统的不确定性及其复杂性。对应这些不确定因素, 确立干燥控制策略最大的难点在于正确把握干燥系统内部复杂的信息关系。实现干燥过程可靠控制的方法之一, 就是获得过程解析模型, 开发自适应系统。为了最大限度地保

收稿日期: 2006-03-25 修订日期: 2007-12-25

基金项目: 国家 863 计划(2006AA10Z262); 高等学校博士学科点专项科研基金(20060564003); 国家农业科技成果转化资金(2006E00100286); 广东省农业科技攻关计划(2005B20601001)

作者简介: 李长友(1958-), 男, 陕西蒲城人, 教授, 博士生导师, 从事农业装备技术研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: lichyx@scau.edu.cn

障粮食的品质、提高设备的工作效率，合理地利用高湿粮食呼吸热、环境温湿度、流态实时变化等形成的客观势差，实现优质干燥和高效节能，保障安全生产。本研究，在作者完成的粮食深层干燥解析理论<sup>[8,9]</sup>和高湿粮食水分在线测量方法及技术装置<sup>[10-12]</sup>的基础上，开发了一套干燥自适应控制系统。能够使设备在工作过程中，根据实时的进粮水分、机器排粮工况自动变更工作制度，保证实时的干燥操作条件最优。从根本上改变了传统的靠检测出机粮水分，控制排粮速度或进风条件的做法，大幅度提升了粮食干燥过程控制的技术水平。本文给出粮食干燥系统动态特性解析式，说明自适应控制系统的构成、控制方法以及应用效果。

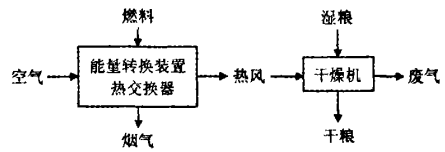
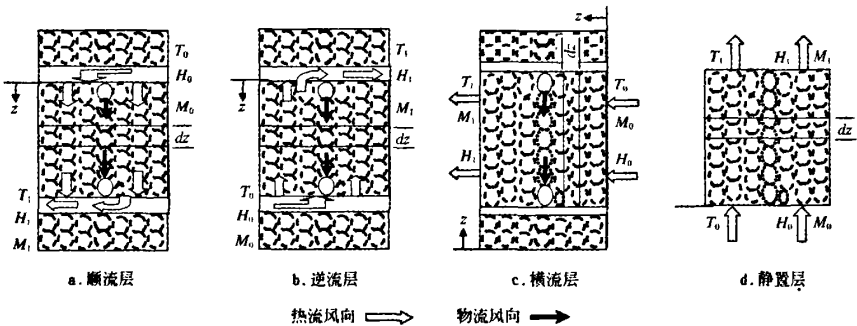


图1 粮食干燥系统流程  
Fig.1 Grain drying system flow

### 1 粮食干燥系统动态特性解析模型

实际的粮食干燥过程，从气流与谷物的流动方式分，可有顺流干燥、逆流干燥、横流干燥、静置层干燥四种基本方式，其干燥模型如图2所示。



注：T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>——热风入、出干燥层时的温度；H<sub>0</sub>、H<sub>1</sub>——热风入、出干燥层时的湿含量；M<sub>0</sub>——初期含水率，%干基；M<sub>1</sub>——热风出层处的物料含水率，%干基；z——干燥床深度变量，m；dz——干燥床深度微元，m。

图2 粮食深层干燥模型  
Fig.2 Deep-bed drying models for grain

#### 1.1 顺流式解析式

在顺流干燥方式下，热风 and 谷物同向运动，如图2a所示。高温热风（如温度T<sub>0</sub>、湿度H<sub>0</sub>）首先与最湿（如含水率M<sub>0</sub>）的粮食相遇，粮食在与热风同向流动的过程中实现干燥。由于热风的流动速度大于粮食的流动速度，所以，后方物料的干燥特性不受前方物料的影响，干燥室内的干燥状态，取决于物料条件（初期含水率、流动状态和流动速度）和送风条件（送风温度、湿度和流动速度）。在物料和送风条件不变时，顺流干燥可以看作是稳态过程。在这一过程中粮食含水比率分布服从（1）解析式<sup>[8]</sup>。

$$\phi = \frac{[\phi_0 - \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{G_0 \chi_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)}] \phi_0 \exp\{[\phi_0 \frac{\rho_b (M_0 - M_e)}{\chi_0 G_0} - \frac{1}{\phi_0 v}] \cdot kz\}}{[\phi_0 - \frac{1}{\phi_0} \cdot \frac{G_0 \chi_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)}] + \phi_0 \exp\{[\phi_0 \frac{\rho_b (M_0 - M_e)}{\chi_0 G_0} - \frac{1}{\phi_0 v}] \cdot kz\}} \quad (1)$$

式中  $\phi = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$  ——物料的自由含水比； $\phi_0$  ——热风入口处物料的自由含水比； $v$  ——谷物的流动速度，m/h； $\rho_b$  ——绝干物谷物积密度，kg/m<sup>3</sup>； $M_e$  ——平衡含水率，

%干基； $k$  ——干燥常数，h<sup>-1</sup>。

#### 1.2 逆流干燥解析式

在逆流干燥方式下，热风 and 谷物的流向相反，如图2b所示。高温热风首先与温度最高的粮食相遇，热风在排气侧，离开干燥室时与温度最低、湿含量最大的物料相接触。很显然，在逆流干燥条件下，后方物料的干燥条件要受到前方物料干燥特性的影响，在物料条件或者送风条件发生变化时，逆流干燥室的状态必然要随之变化，所以，实际的逆流干燥过程是非稳态过程。在这一过程中的粮食含水比率分布服从（2）解析式<sup>[8]</sup>。

$$\phi = \frac{[\phi_0 - \frac{\chi_r G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)}] \exp\{\epsilon [\frac{-\chi_r}{v \rho_b (M_0 - M_e)} + \frac{\phi_0}{G_0}] \cdot z\}}{\frac{\chi_0 - 2\chi_r}{\phi_0 v \rho_b (M_0 - M_e) - (\chi_0 - \chi_r)} + \exp\{\epsilon [\frac{-\chi_r}{v \rho_b (M_0 - M_e)} + \frac{\phi_0}{G_0}] \cdot z\}} \quad (2)$$

式中  $G_0$  ——单位时间通过单位干燥床面积绝干空气的质量流量，kg-DA/h·m<sup>2</sup>； $\epsilon = \mu \gamma a$  ——深层蒸发速度单位系数，kg/h·m<sup>3</sup>； $\chi = H_w - H$  ——气流的湿含量势差； $\chi_r = H_w - H_{\text{入粮口}} \geq 0$ ； $\chi_0 = H_w - H_0$ ； $H$  ——干燥空气的湿含量，kg/kg-DA； $H_w$  ——湿球温度下气流的饱和

含湿量, kg/kg-DA;  $H_1$ —废气的湿含量, kg/kg-DA。

### 1.3 横流式解析式

在横流干燥方式下,干燥物靠重力连续向下流动,热风受迫横向穿过谷物层,如图2c所示。谷物在干燥机内的滞留时间,即谷物的流动速度,可利用排粮轮的转速进行控制。对于同一物料,在相同的送风条件下,横流干燥可以看作是稳态过程,但干燥层中的物料含水率是干燥层和流动位置的函数。干燥不均匀,进风侧的谷物降水幅度大,而排气侧干燥不足。横流干燥过程中的粮食含水比率分布服从解析式(3)<sup>[8]</sup>。

$$\phi = \frac{\phi_0 \cdot \exp[\phi_0 \cdot \frac{k(M_0 - M_e)\rho_b \cdot z}{\chi_0 G_0}]}{\exp(k \frac{s}{v}) + \exp[\phi_0 \cdot \frac{k(M_0 - M_e)\rho_b \cdot z}{\chi_0 G_0}] - 1} \quad (3)$$

式中  $s$ ——物料落入干燥层后下落的距离, m。

### 1.4 静置层干燥解析式

静置层干燥,如图2d所示。干燥中热风流动而物料处于静止状态,热风的状态是干燥时间和干燥层位置的函数。物料的堆积层厚度及风量显著影响干燥速度和干燥的不均匀性,静置层干燥过程中的粮食含水比率分布服从解析式(4)<sup>[9]</sup>。

$$\phi = \frac{\phi_0 \exp[\frac{\phi_0 k(M_0 - M_e)\rho_b \cdot z}{\chi_0 G_0}]}{\exp(k\theta) + \exp[\frac{\phi_0 k(M_0 - M_e)\rho_b \cdot z}{\chi_0 G_0}] - 1} \quad (4)$$

式中  $\theta$ ——干燥时间, h。

## 2 自适应控制系统

粮食干燥自适应控制系统,由干燥专家系统、粮食水分在线检测装置、温度检测装置、热风配额调节装置、控制器等构成。系统的输入量并不预先确定,是由专家系统实时给定的。进风温度和环境温度湿度变化、进粮水分和排粮装置工况波动是该系统的扰动量,出机粮水分是反馈量;控制量是变频器赫兹数。该控制系统的控制器本身是一套完整的独立控制单元,同时它又是一个基本的数据采集节点,为上位计算机专家系统提供参数信息。能确保干燥产品的目标含水率、干燥效率以及品质指标保持在规定的范围内。

### 2.1 控制系统的构成

控制系统的构成如图3所示。主要由传感器群,水分在线测量装置,变送器,小信号处理装置,可编程触摸屏,控制器,水分检测驱动电机,安全报警系统,变频器,排粮装置,热风配额调节装置,热风导流装置,上位计算机(干燥专家系统),能量发生装置构成。系统的在线测量量包括:进风温度和环境温度湿度、进机粮和出机粮含水率。通过反馈出机粮含水率并与理论计算值比较,对排粮工况作出判断。在该系统中所有的在线

检测量,全部经过控制器转送到上位计算机(干燥专家系统)。由专家系统计算出给定值并自动设定给控制器。系统在对进风温度和环境温度湿度变化、进机粮水分和干燥设备工况波动实施前馈调节的同时,又通过比较反馈量(出机粮水分),为控制器作出新的控制策略。控制器与上位计算机之间为双向通讯,它不仅为干燥专家系统提供在线数据,同时,也在实时地接受来自干燥专家系统的计算结果,使得控制系统能够自动的迎合干燥系统条件的变化,实时调整控制策略,构成了高质量的热风干燥自适应控制系统。

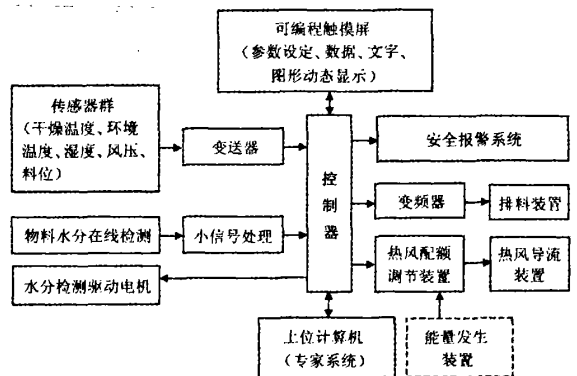


图3 粮食干燥控制系统的构成

Fig.3 Structure of control system for grain drying

### 2.2 控制器设计

控制器的任务是根据实时给定的干燥时间选择变频器的输出赫兹数,实现对排粮转速的控制;根据最优干燥温度、风量谷物比,按照控制规则调整冷风搀合量,以达到调整干燥温度的目的。控制手段采用控制工程技术成熟的PID(Proportional Integral Derivative)控制。在传统的PID控制方法和典型结构的基础上,扩充控制器参数调整知识和规则,形成专家系统。

使系统在运行过程中,能够按照实时的系统输入值、输出偏差变化范围,以调整规则的形式存于知识库,即针对粮食干燥特性和气流状态的变化特性,推理产生调整规则,确定控制模式和调整PID参数,实现控制器在线、实时地调整控制。

专家系统以知识库、推理引擎及接口为基本构成。专家知识库包含知识库和模型库。系统的设定值(如粮食种类、干燥最高和最低安全温度范围、用户要求等)、各调节规律及实时的系统输入值、输出偏差变化范围、干燥过程中的各种特征参数等全部以调整规则的形式存储到专家知识库,并按照干燥设备工艺特性,将其表达为合理的控制规则<sup>[13]</sup>。推理引擎是专家系统中具有搜索事实与规则,并根据搜索结果得出干燥设备最优工作制度和调整方案的功能单元,它可以保证系统针对稻谷干燥特性和气流状态的变化特性,按照干燥进程实时利用

知识库中的知识, 提供智能型的决策与辅助, 确定控制模式和调整 PID 参数, 并解决问题。系统使用堆栈储存动态数据簇, 结合水分参数的递推规则算法, 以实现自适应控制。

控制系统流程如图 4 所示。

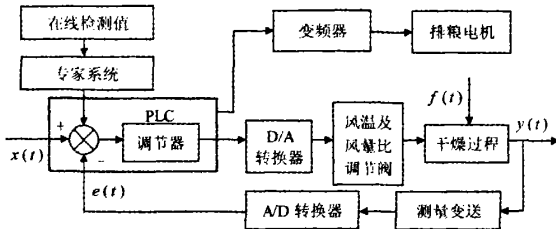


图 4 控制系统流程图

Fig.4 Flowchart of control system

### 2.3 系统的特点

1) 扰动量是热风参数变化、进粮水分波动、干燥设备结构及工况波动, 输入和输出的物料及介质量变化;

2) 在传统的 PID 控制方法和典型结构的基础上, 扩充了控制器参数调整知识, 系统在运行过程中, 能够按照实时的系统输入值、输出偏差变化范围, 及时调整规则的形式并存于知识库, 即针对粮食干燥和气流状态变化特性, 推理产生调整规则, 确定控制模式和调整 PID 参数, 实现控制器在线实时控制;

3) 控制器与服务器之间为双向通讯。

### 3 系统的应用效果

本系统 2003~2007 年度, 分别在北大荒米业铁力米场、黑龙江省虎林市 850 国营农场, 汕头市粮丰集团有限公司与图 5 所示的干燥系统中的塔式干燥机对接, 实地试验考察。依据中华人民共和国农业行业标准 (NY/T 463-2001, 粮食干燥机质量评价规范)。2004 年 12 月在北大荒米业铁力米场, 由“农业部干燥机械设备质量检验检测中心”依据上述标准, 与 5HSH-10 型水稻烘干机进行了 5 项指标的对比试验。实地测试结果: 实施干燥过程自适应控制后的燥设备单位热耗量降低率为 6.5%, 单位耗电量降低率为 6.2%, 爆腰率增值降低率为 25%, 破碎率增值降低率为 6.2%, 出机粮水份值波动范围值降低率为 18.9%。2007 年 11 月在汕头市粮丰集团, 实施高湿稻谷集中干燥现场, 通过了“农业部设施农业机械质量监督检验测试中心 (广州) / 广东省农业机械鉴定站”新产品质量检验检测鉴定。测试结果: 将稻谷的含水率由 28.4% 降到 13.6% 时的小时处理量 14.134 t/h、单位耗热量 2939 kJ/kg 水 (国标为  $\leq 7400$  kJ/kg), 单位耗电量 338 kJ/kg 水 (国标为  $\leq 600$  kJ/kg), 爆腰率增值为 1.9% (国标为  $\leq 3\%$ ), 干燥不均匀度为 0.9%、破碎率增率为 0.4%、出机粮食温度接近环境温度。系统能够在

万方数据

10%~35%较大水分变化范围和  $-30^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$  温度变化范围可靠地工作。控制干燥机出粮水分偏差  $\leq \pm 0.5\%$  wb。形成了可产业化大面积推广应用的粮食集中干燥自适应控制系统。

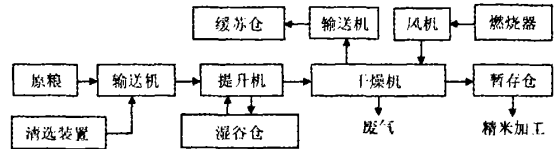


图 5 粮食集中干燥工艺流程

Fig.5 Flow of centralized grain drying process

### 4 结论

1) 粮食深层干燥属于不确定的动态系统, 造成其不确定的主要因素有进粮水分不一、排粮装置工况变动 (排粮装置磨损、局部阻塞、转速波动等)、燃烧状态不稳、大气温湿度和通风条件变化等。

2) 根据实时进粮水分和通风条件以及机器排粮工况, 对连续干燥设备实施自适应控制后, 明显降低了干燥设备的单位热耗量, 提高了粮食的干燥品质。

3) 基于粮食深层干燥动态过程解析理论和粮食水分精确在线测量技术, 开发出了粮食干燥自适应控制系统。其特点在于系统的扰动量是热风参数变化、进粮水分波动、干燥设备结构及工况波动, 输入和输出的物料及介质量变化; 控制目标和反馈量是出机粮含水率; 控制器与服务器之间为双向通讯, 系统在运行过程中, 能够按照实时的输入值、输出偏差变化范围, 及时调整规则的形式并存于知识库, 即针对粮食干燥和气流状态变化特性, 推理产生调整规则, 确定控制模式和调整 PID 参数, 实现控制器在线实时控制。

4) 应用效果证实, 实施干燥过程自适应控制后, 在进机粮水分随机波动的情况下, 也能够保证干燥出机粮含水率偏差  $\leq \pm 0.5\%$ 。系统能够在 10%~35%较大水分变化范围和  $-30^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$  温度变化范围可靠地工作。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 李军富. 我国谷物干燥机械的发展现状及对策[J]. 农机化研究, 2006 (9): 44-46.
- [2] 曹崇文, 汪喜波. 谷物干燥机的自动控制[J]. 现代化农业, 2002, (2): 40-44.
- [3] Nybrant T G. Modeling and adaptive control of concurrent-flow driers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1989, 3(3): 243-253.
- [4] 李业德, 李业刚. 顺流式谷物烘干机的模糊控制系统[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 162-164.
- [5] 李长友, 曹艳明. 谷物循环干燥机控制系统硬件设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 86-88.
- [6] 曹艳明, 李长友. 谷物循环干燥机控制系统软件设计[J]. 农

- 业机械学报, 2003, 34(1): 83-85.
- [7] 李国防, 齐玉斌, 李 栋, 等. 谷物干燥仿人智能控制系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 83-86.
- [8] Li Changyou. An analytical method of deep-bed ventilating drying process[A]. The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference[C]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007: 490-495.
- [9] Li Changyou, Shao Yaojian, Kamide. An analytical solution of the granular product in deep-bed falling rate drying process [J]. Drying Technology, 1999, 17(9): 1959-1969.
- [10] Li Changyou, Ban Hua. On-line moisture metering technology and device for paddy drying process[A]. The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference[C]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007: 490-495.
- [11] 李长友. 谷物含水率在线检测装置[P]. 中国专利: 03222718.3, 2003-12-24.
- [12] 李长友, 班 华. 一种检测谷物含水率的方法及其装置[P]. 中国专利:200610123461.3, 2007-05-16.
- [13] Ban Hua, Li Changyou. Real-time data sampling of tower dryer's control system[A]. The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference[C]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007: 657-662.

## Design of self-adaptive control system for grain dryer based on deep-bed analytical ventilating drying theory

Li Changyou, Ban Hua

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment (South China Agricultural University),  
Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Because of the uncertainty of grain drying system, it is hard to realize real-time control using the traditional control method which adjusts discharge rate and ventilating condition according to output grain moisture content. In this paper, a kind of self-adaptive control system for grain drier was developed based on analytical theory of grain deep-bed drying process and precise detection technology of high-moisture-content grain. It can change the system automatically to ensure the optimization of working condition according to real-time input-grain-moisture-content and output status. The control system was proved to be reliable, stable, accurate and practical in production application. For great moisture content differences between kernels, this device can accurately detect the moisture content of each kernel and moisture distribution with the dynamic temperature variation between  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $+40^{\circ}\text{C}$  and moisture content variation between 10%wb and 35%wb. And the error of output moisture content is less than  $\pm 0.5\%$ wb. So this adaptive control system for grain dryer is reliable and practical for industrial application.

**Key words:** continuous-flow drier; input grain moisture content; output grain moisture content; self-adaptive control system