

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.045

# 牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备设计与试验\*

王全喜<sup>1,2</sup> 王德成<sup>1</sup> 杜建强<sup>2</sup> 翟改霞<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010)

**【摘要】** 针对牧草种子干燥设备在能耗、排放和太阳能使用等方面存在的问题,提出了太阳能储热供热为主,尾气由热泵除湿后回收使用为辅的节能零排放干燥模式,完成了集热、储热和热泵等主要工作部件以及整机的结构设计,用移动式设计实现了太阳能集热可控和整机安全贮存。试验结果表明:处理量 161 kg/h,度电处理量 8.4 kg/(kW·h),干燥能力 3 367 kg·%/h,干燥强度 6.7 kg/(m<sup>3</sup>·h);太阳能相变储热干燥、太阳能-热泵联合干燥、热泵干燥和电加热干燥 4 种供热干燥模式的耗电量之比是 0.9:1.0:1.2:1.5。

**关键词:** 太阳能 干燥 牧草种子 相变储热 热泵

中图分类号: S226.6; S214 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0222-05

## Design and Experiment of Heat Pump Assisted Solar Energy Heat-storage Drying Equipment for Herbage Seed

Wang Quanxi<sup>1,2</sup> Wang Decheng<sup>1</sup> Du Jianqiang<sup>2</sup> Zhai Gaixia<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Huhhot Branch, China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Huhhot 010010, China)

### Abstract

Aiming at herbage seed drying equipment problems of power consumption, air discharge and solar energy application, a drying mode was proposed. Basis heating was supplied by thermal-stored solar energy, and air charge was dehumidified and reused by heat pump. Main working parts, such as thermal collector, thermal storage and heat pump, and whole drying machine were designed. Using movable design idea, thermal collector was controllable and whole machine was placed safely. Performance test results showed that handling capacity reached to 161 kg/h, power handling capacity achieved to 8.4 kg/(kW·h), the drying capacity reached to 3 367 kg·%/h, and dry strength achieved to 6.7 kg/(m<sup>3</sup>·h). The power consumption ration of solar PCM heat-storage drying, solar energy and heat pump teamwork drying, heat-pump drying and electricity power drying was 0.9:1.0:1.2:1.5.

**Key words** Solar energy, Drying, Herbage seed, Thermal energy storing, Heat pump

### 引言

在牧草种子商品化生产过程中,为了使牧草种子含水率达到安全水分,保证贮存和运输期间不发生霉变,要用到干燥设备。随着草业种子需求的扩

大,干燥设备的市场需求量越来越大,人们对其性能方面的要求也越来越高。目前我国干燥设备存在能耗高、污染大、效率低等问题,严重制约着高质量牧草种子的生产<sup>[1-3]</sup>。

太阳能供应具有能量密度低、不连续、随机性

收稿日期: 2012-06-20 修回日期: 2012-07-21

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B00)、农业部草原畜牧业装备技术重点实验室资助项目(2012NJ-001)和太阳能干燥技术装备国家地方联合工程实验室资助项目(2011SJO18)

作者简介: 王全喜, 博士生, 中国农业机械化科学研究院研究员, 主要从事农业机械研究, E-mail: wqx88@126.com

通讯作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 主要从事草业机械研究, E-mail: wdc@cau.edu.cn

强,受季节、地理和昼夜等规律性变化的影响,以及云雨阴晴等随机因素的制约。这都给太阳能的利用带来了困难<sup>[4-5]</sup>。太阳能集热器固定在户外,不能控制其集热的关闭,使用寿命大大降低。

针对太阳能干燥设备存在的上述问题,本文研究牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备,以满足对牧草种子进行以太阳能集热和相变储热为主,热泵除湿和加热为辅的联合干燥作业。

## 1 整机结构及工作原理

### 1.1 整机结构

如图1和图2所示,牧草种子热泵辅助型太阳能储热干燥设备主要由集热系统、储热系统、热泵系统、供热循环系统、干燥箱、机架等部分组成。

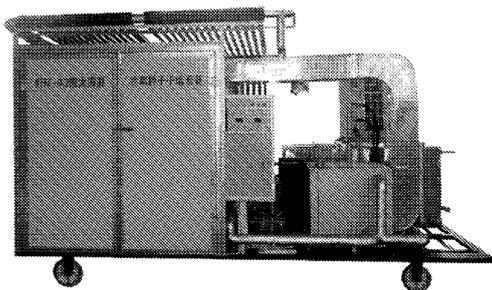
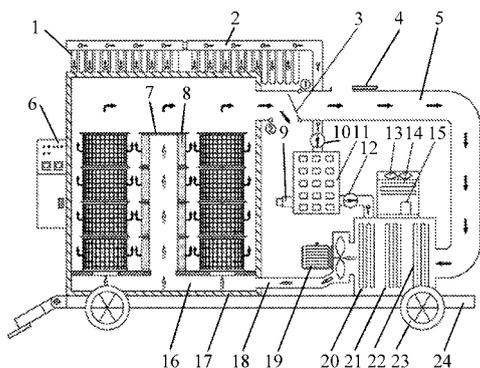


图1 干燥设备图片

Fig.1 Photograph of drying equipment appearance



δ表示热水 ↑表示热空气 ↑表示湿空气

图2 干燥设备工作原理图

Fig.2 Operating principle diagram of drying equipment

- 1.集热器 2.储热循环通道 3.风门 4.进风门 5.尾气管道
- 6.启动控制器 7.种子容器 8.种子 9.电加热器 10.储热水泵
- 11.相变储热器 12.供热水泵 13.热泵风扇 14.热泵蒸发器A
- 15.热泵压缩机 16.风箱 17.干燥箱 18.热风管道
- 19.风机电动机 20.热交换器 21.热泵冷凝器 22.热泵蒸发器B
- 23.移动轮 24.机架

设备整体设计成移动式,既解决了干燥设备入库问题,延长了设备的使用寿命,同时也实现了太阳能集热系统工作的控制;热泵为干燥设备提供辅助热源,以去除干燥尾气中的水分,实现余热回收再利用,设备使用更节能;相变储热器为干燥设备提供更

高的储存热量,提高了太阳能在能量消耗中所占比例;安装在相变储热器上的电加热器在电价低的时段或太阳能和热泵都不能满足干燥要求时使用,产生的热量储存在相变储热器内。

性能指标为:处理量 150 kg/h,度电处理量 8 kg/(kW·h),干燥能力 3 300 kg·%/h,干燥强度 6 kg/(m<sup>3</sup>·h),热空气温度 32~38℃。热泵压缩机功率 3.7 kW,额定温度 80℃,额定制热量 14 kW。风机功率 4 kW,风压 2 000 Pa,风量 5 000 m<sup>3</sup>/h。水泵功率 0.33 kW,扬程 10 m,水泵流量 5 m<sup>3</sup>/h。电加热器功率 5 kW。干燥箱内尺寸:长×宽×高为 2 000 mm×2 000 mm×2 000 mm。

### 1.2 工作原理

#### 1.2.1 种子干燥

如图2和图3所示,将种子放入种子容器,种子容器放入干燥箱风箱出风口处,启动风机和控制系统,供热水泵或热泵开启。空气流吸收热交换器或热泵冷凝器热量后,形成热空气流被鼓入风箱中,并均匀地分配到各种子容器中心。之后,热空气流强制穿越种子层,将热量传给种子。种子温度升高,种子内部的水分受热体积增大,移向种子表面,被空气流带走。当种子达到要求的含水率,种子干燥过程结束。

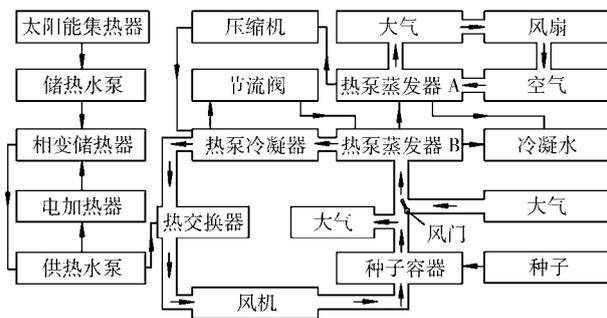


图3 干燥设备工作原理框图

Fig.3 Operating principle flow chart of drying equipment

#### 1.2.2 太阳能相变储热干燥

设备移动到户外,使集热器正对太阳,开启控制系统<sup>[6]</sup>。当太阳能集热器与相变储热器温度差为 10℃时,控制系统自动启动储热水泵,热量通过水传递给相变材料。温度差为 1℃时,控制系统自动关闭储热水泵,当相变储热器温度达到 85℃,控制系统自动关闭储热水泵。干燥时,如图2所示,当尾气湿度低于 85%时,风门处于位置②,尾气经热交换器加热,循环使用。当尾气湿度达到 85%时,风门自动变换到位置①,空气从进风门处进入,尾气直接排向大气。当干燥热风温度低于 32℃,供热水泵工作,相变储热器热量供给热交换器,热风温度达到 38℃,供热水泵工作停止。

### 1.2.3 热泵干燥

如图3和图4所示,热泵压缩机和风扇工作,热泵蒸发器A和蒸发器B表面温度降低,热泵冷凝器表面温度升高。风扇使空气流向热泵蒸发器A,热泵蒸发器A从干燥设备外部的空气中吸收热量。湿空气通过热泵蒸发器B,将热量传递给热泵蒸发器B,温度下降,水分析出。热泵蒸发器A和热泵蒸发器B吸收的热量通过热泵工质传递给热泵冷凝器。除湿后的尾气经过热泵冷凝器又被加热。干燥时,风门处于位置②,尾气经热泵系统除湿和加热,循环使用<sup>[4]</sup>;干燥热风温度低于32℃时热泵工作,热风温度达到38℃时热泵停止工作。

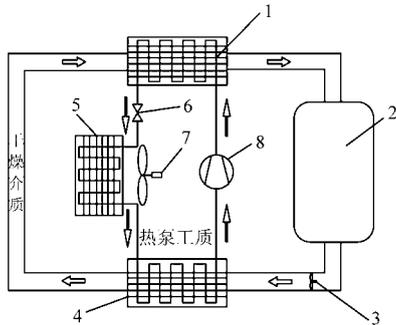


图4 热泵工作原理图

Fig. 4 Principle of heat pump

1. 热泵冷凝器 2. 干燥箱 3. 风机 4. 热泵蒸发器B 5. 热泵蒸发器A 6. 节流阀 7. 风扇 8. 压缩机

### 1.2.4 太阳能-热泵联合干燥

干燥时,先用太阳能相变储热干燥模式对种子进行干燥,相变储热器温度低于32℃时关闭供热水泵,用热泵干燥模式对种子进行干燥。

### 1.2.5 电加热干燥

如图2所示,相变储热器温度低于50℃,且当下正处于设定的电加热时间段中(干燥时除外),供热水泵启动,电加热器通电;相变储热器温度达到85℃,供热水泵停止,电加热器关闭。干燥时,当尾气湿度低于85%时,风门处于位置②,尾气经热交换器加热,循环使用。当尾气湿度达到85%时,风门自动变换到位置①,空气从进风门处进入,尾气直接排向大气。干燥热风温度低于32℃时供热水泵启动,热风温度达到38℃时供热水泵停止。

### 1.2.6 干燥模式的选择

干燥设备提供了太阳能相变储热干燥、太阳能-热泵联合干燥、热泵干燥和电加热干燥4种供热干燥模式。当太阳能储热热量能够满足种子干燥时,选择太阳能相变储热干燥模式;当太阳能储热热量不能满足干燥要求时,选择太阳能-热泵联合干燥模式;当没有太阳能时,选择热泵干燥模式;有分时电价的地方或太阳能和热泵都不能满足干燥要求时,

选择电加热干燥模式。

## 2 主要工作部件结构设计

### 2.1 太阳能集热器

如图5所示,太阳能集热器主要由超导热管、全玻璃真空管和热交换水套等部分组成<sup>[10]</sup>。特点是真空管中无水时,降低了真空管爆裂的可能性,超导热管中有相变材料,热传导速度快,集热效率提高。根据储热量549MJ的要求,选择积热面积为12m<sup>2</sup>,真空管90根,其外径为58mm,长度为2000mm。真空管材料为硼硅玻璃3.3,透光率大于0.92,太阳选择性吸收涂层的太阳吸收率大于96%,半球发射比小于0.08(80℃)。集热器日平均热效率为58%。

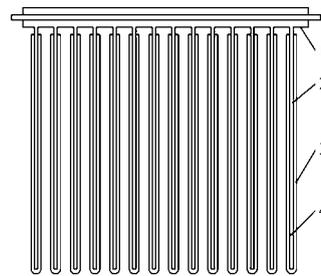


图5 太阳能集热器

Fig. 5 Solar energy thermal-collector

1. 热交换水套 2. 超导热管 3. 全玻璃真空管 4. 相变材料

### 2.2 相变储热器

储热器内部为2000mm×1000mm×1000mm(长×宽×高)的长立方体不锈钢结构(图6),外部附着厚50mm的聚氨酯发泡保温层,在保温层的外部包裹不锈钢外壳,储热器分为盖子和下部两部分,方便打开,并设置有可与外部进行热交换的管路接口、控制压力的压力阀、排污用的节流阀。储热器内放置储热模块,储热模块总体积1.8m<sup>3</sup>,储热模块内封装有相变储热材料,相变储热材料选RT80半精炼石蜡,载体选空隙率大于88%的泡沫铝<sup>[5]</sup>。石蜡的相变潜热大,无过冷现象。石蜡导热性能差,导热系数约为0.2W/(m·K)。将石蜡填充泡沫铝空隙中,制成储热模块,导热系数为23.5W/(m·K)。储热器热损系数小于10W/(m<sup>2</sup>·K)。石蜡相变温度81.5℃,熔化热209kJ/kg,密度915kg/m<sup>3</sup>,比热容3.2×10<sup>3</sup>J/(kg·K),储热器石蜡填充量1.584m<sup>3</sup>。储热器储热量549MJ(85℃冷却到32℃,释放显热246MJ,释放潜热303MJ)。

### 2.3 热泵除湿供热系统

如图4所示,热泵除湿供热系统由压缩机、风扇、热泵蒸发器A、热泵蒸发器B、热泵冷凝器、节流阀、热泵工质及其管路组成<sup>[7-8]</sup>。压缩机功率为3.7kW,蒸发器由外径13mm、长度60m的铜质无

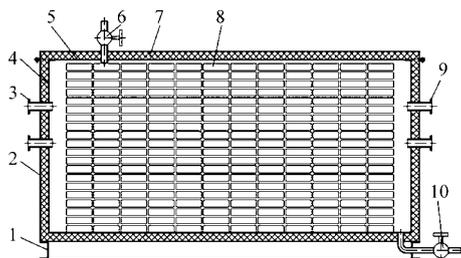


图6 相变储热器

Fig. 6 PCM heat energy storage

1. 支撑框架 2. 保温外壳 3. 进口 4. 箱体 5. 盖子 6. 压力控制阀 7. 保温层 8. 储能模块 9. 出口 10. 节流阀

缝管环绕构成, 冷凝器由外径  $\phi 4$  mm 的长度 60 m 铜质无缝管环绕构成, 蒸发器和冷凝器外部有铝质翅片, 热泵工质选 R22, 加注量 4.5 kg。制热额定温度  $80^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.4 种子容器

为了提高干燥设备的干燥能力, 增加了种子层的厚度。这样, 穿过种子层的风压要求高, 种子在没有外力限制的情况下, 就会悬浮。另外, 为了保证稳定的风压和均匀干燥种子, 要求种子层厚度始终保持均匀不变。基于上述要求, 设计了种子容器, 如图 2 所示。种子容器由内外两层圆柱形筛网构成, 在两层筛网中间放置种子。种子层厚度 150 mm。风从里层筛网中心进入, 穿越种子层排出。每层筛网由大小两种目数的筛网叠加组成。小目数筛网的丝径粗, 起到龙骨作用。大目数的筛网孔径小, 起到限制种子通过的作用。为了装卸种子方便, 种子容器采用了单元模块化设计理念, 共有 36 个, 工作时, 将他们叠放组合起来。每个种子容器的容积为  $0.14\text{ m}^3$ , 36 个种子容器合计容积为  $5.04\text{ m}^3$ 。

## 3 试验

### 3.1 试验条件

试验物料为披碱草种子, 种子干燥前含水率为 30% ~ 35%, 种子干燥后含水率应为 12% ~ 13%, 干燥热风温度为  $32 \sim 38^{\circ}\text{C}$ , 作业前储热器内温度为  $(85 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2 性能试验及对比试验

试验前对热泵辅助型太阳能储热干燥设备进行空载试运转, 并将干燥设备调整到最佳状态。性能试验测试设备的处理量、度电处理量、干燥强度和干燥能力等指标。对比试验测试在太阳能相变储热干燥、太阳能-热泵联合干燥、热泵干燥和电加热干燥 4 种干燥模式下的耗电量。

#### 3.2.1 处理量

首先称量待干燥物料, 从干燥开始至干燥结束

时止, 记录纯工作时间, 计算处理量<sup>[9]</sup>

$$E_c = \frac{m}{T_c} \quad (1)$$

式中  $E_c$ ——处理量, kg/h  
 $m$ ——待干燥物料质量, kg  
 $T_c$ ——纯工作时间, h

#### 3.2.2 度电处理量

在测定处理量的同时, 用电能表测定耗电量, 计算度电处理量<sup>[9]</sup>

$$E_p = \frac{m}{W} \quad (2)$$

式中  $E_p$ ——度电处理量, kg/(kW·h)  
 $W$ ——干燥时间内消耗电能, kW·h

#### 3.2.3 干燥强度

物料干燥过程结束, 测量干燥后物料质量及干燥牧草种子容器的容积, 计算干燥强度<sup>[9]</sup>

$$A = \frac{m - m_1}{VT_c} \quad (3)$$

式中  $A$ ——干燥强度, kg/(m<sup>3</sup>·h)  
 $m_1$ ——干燥后物料质量, kg  
 $V$ ——牧草种子容器的容积总和, m<sup>3</sup>

#### 3.2.4 干燥能力

测量干燥前和干燥后种子含水率, 计算干燥能力<sup>[9]</sup>

$$E = E_c(H_1 - H_2) \quad (4)$$

式中  $E$ ——干燥能力, kg·%/h  
 $H_1$ ——干燥前种子含水率, %  
 $H_2$ ——干燥后种子含水率, %

#### 3.2.5 含水率

从待干燥物料中按自然堆放分布情况随机取样 3 份, 每份约 20 g, 称其质量, 在  $105^{\circ}\text{C}$  干燥到质量不变时为止, 再称其质量, 计算物料含水率<sup>[9]</sup>

$$H = \frac{m_q - m_h}{m_q} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $H$ ——物料含水率, %  
 $m_q$ ——干燥前样品质量, g  
 $m_h$ ——干燥后样品质量, g

#### 3.2.6 对比试验

干燥设备分别在 4 种供热模式下工作, 试验测定 3 个批次, 披碱草种子干燥前种子含水率 33%, 干燥后种子含水率 12%, 待干燥物料质量 560 kg, 用电能表测试各干燥批次耗电量数据。

## 3.3 结果及分析

将性能试验测试数据汇总, 按式(1)~(5)计算, 形成性能指标测定记录, 见表 1。将对比试验测得各干燥批次耗电量数据汇总, 见表 2。

表1 性能指标测定结果

Tab.1 Measurement results of performance indexes

测定批次	待干燥物 料质量 $m/\text{kg}$	干燥后物 料质量 $m_1/\text{kg}$	纯工作 时间 $T_c/\text{h}$	干燥前种子 含水率 $H_1/\%$	干燥后种子 含水率 $H_2/\%$	干燥时间内 消耗电能 $W/\text{kW}\cdot\text{h}$	处理量 $E_c/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	度电处 理量 $E_p/$ $\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	干燥 强度 $A/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$	干燥 能力 $E/$ $\text{kg}\cdot\%\cdot\text{h}^{-1}$
1	561	427	3.5	33	12	18.8	160	8.5	6.7	3360
2	566	431	3.5	33	12	19.3	162	8.4	6.7	3402
3	558	425	3.5	33	12	18.9	159	8.4	6.6	3339

表2 不同供热模式耗电量

Tab.2 Power consumption on different heating modes

测定 批次	kW·h			
	太阳能相变 储热干燥	太阳能-热泵 联合干燥	热泵干燥	电加热 干燥
1	16.7	18.8	21.8	28.0
2	16.9	19.3	22.2	28.8
3	17.1	18.9	22.3	30.0

### 3.3.1 处理量

各批次处理量稳定在 160 kg/h 左右(见表1)。影响干燥速度的主要因素是干燥温度、风压和风量。干燥设备工作时,干燥温度一定,种子容器保证了种子干燥层厚度均匀一致,风阻均匀,干燥过程始终在风机风压和风量的额定状态下进行,热交换和移除种子表面溢出水分的速度高,最大限度地提高了干燥设备的处理量。

### 3.3.2 度电处理量

各批次度电处理量稳定在 8 kg/h 以上(见表1),节能效果明显。设备采用了太阳能为主要热源,太阳能集热后用石蜡相变方式进行储热,增强了储热能力。热泵提供辅助热源,并对干燥尾气除湿进行循环利用。热泵工作能效比高,节能效果明显,通常能达到 1:3 以上。种子容器允许干燥热空气的流速高、种子层厚,提高了热风和种子的换热效率。通过以上这些方式降低了干燥设备对电能的消耗。

### 3.3.3 干燥强度

各批次干燥强度稳定在 6.5 kg/(m<sup>3</sup>·h) 以上(见表1)。影响干燥强度的主要因素是干燥温度和单位体积能够放置的种子量。干燥设备工作时,干燥温度一定,要想提高干燥强度,只有增大单位体积能够放置的种子量。种子容器保证了在风机额定风压条件下,种子干燥层厚度最大,最大限度地提高了干燥设备的干燥强度。

### 3.3.4 干燥能力

各批次干燥能力都达到 3300 kg·%/h 以上(见表1)。干燥能力取决于干燥设备的处理量和干燥前后种子含水率。试验限定了干燥前后种子含水率,干燥设备的处理量高,相应的干燥能力就强。

### 3.3.5 不同供热模式对比试验

从表2的试验结果可以得出4种供热模式下耗电量之比,太阳能相变储热干燥、太阳能-热泵联合干燥、热泵干燥、电加热干燥之比为 0.9:1.0:1.2:1.5。

太阳能相变储热干燥的热源来源于太阳能,工作中电能的消耗主要是风机电动机,节约电能效果最好。太阳能-热泵联合干燥的热源主要来源于太阳能,热泵供热为辅,工作中电能的消耗主要是风机电动机和少部分热泵电动机,由于有太阳能,热泵工作时间短,节约电能效果次之。热泵干燥的热源来源于热泵供热,工作中电能的消耗主要是风机电动机和热泵电动机,热泵工作节能,节约电能较差。电加热干燥的热源主要来源于电加热器,工作中电能的消耗主要是风机电动机和电加热器,电加热器制热耗电远远高于热泵,消耗电能最大。

## 4 结论

(1)干燥设备可对牧草种子进行太阳能为主热泵为辅的联合干燥作业,节能效果明显,同时,也可以进行太阳能、热泵和电加热3种供热方式中任何一种供热模式的干燥作业。

(2)干燥设备整机结构和主要工作部件设计合理,工作安全可靠,处理量、度电处理量、干燥能力和干燥强度等性能指标能满足使用要求。

(3)太阳能相变储热干燥模式不推荐单独使用;电加热干燥模式尽可能少使用;热泵干燥和太阳能-热泵联合干燥模式推荐作为主要的干燥模式。

## 参 考 文 献

- 1 罗运俊,何梓年,王长贵. 太阳能干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- 2 张壁光,刘志军,谢拥群. 太阳能干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- 3 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009.

差,对异常值有自适应能力,使用模糊自适应卡尔曼滤波后  $x$  方向和  $y$  方向平均误差分别为 0.13 m、0.20 m,最大误差分别为 0.51 m 和 0.54 m。

表 1 模糊卡尔曼滤波前、后的误差统计  
Tab.1 Statistical results before and after filter

		$x$ 坐标/m	$y$ 坐标/m
滤波前	最大值	0.76	0.75
	平均值	0.20	0.30
	方差	0.08	0.10
滤波后	最大值	0.51	0.54
	平均值	0.13	0.20
	方差	0.03	0.05

### 3 结束语

针对农机车载 GPS 和 DR 组合导航系统实际应用,研究了一种基于模糊推理自适应卡尔曼滤波的组合导航算法。该算法在改装的农机试验平台上进行了应用。应用中使用 RTK DGPS、RTD GPS 和陀螺仪分别采集农机的位置信息和姿态信息。采用模糊卡尔曼滤波对 RTD GPS 和陀螺仪、速度传感器的数据进行了融合,并使用 RTK DGPS 作为真值参考值进行了试验验证。融合后精度较单独使用 RTD GPS 定位精度有所提高, $x$  方向和  $y$  方向平均误差分别为 0.13 m 和 0.20 m。试验表明基于模糊推理自适应卡尔曼滤波的组合导航算法是有效的。

### 参 考 文 献

- 1 李建平,林妙玲.自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J].农业工程学报,2006,22(9):232~234.  
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9):232~234. (in Chinese)
- 2 陈艳,张漫,马文强,等.基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J].农业工程学报,2011,27(3):126~130.  
Chen Yan, Zhang Man, Ma Wenqiang, et al. Positioning method of integrated navigation based on GPS and machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 126~130. (in Chinese)
- 3 张国良,曾静.组合导航原理与技术[M].西安:西安交通大学出版社,2008.
- 4 周俊,姬长英.自主车辆导航系统中的多传感器融合技术[J].农业机械学报,2002,33(5):113~116.  
Zhou Jun, Ji Changying. Multi-sensor fusion in navigation of autonomous vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5):113~116. (in Chinese)
- 5 沈云锋,马林立.基于模糊控制的舰船组合导航 Kalman 滤波器[J].系统工程与电子技术,2002,24(5):23~24.  
Shen Yunfeng, Ma Linli. Vessel composite navigation Kalman filter based on fuzzy control[J]. Systems Engineering and Electronics,2002,24(5):23~24. (in Chinese)
- 6 Farrell J A, Givargis T D, Barth M J. Differential carrier phase GPS-aided INS for automotive applications[C]//Proceedings of the 1999 American Control Conference, 1998,5: 3 660~3 664.
- 7 Price R R, Goutam Nistala. Development of an inexpensive autonomous guidance system[C]//ASAE Annual Meeting, Paper No.051139, 2005.
- 8 Guo Linsong. Develop of a low-cost navigation system for autonomous off-road vehicles [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003.

(上接第 226 页)

- 4 王全喜,杨世昆,刘贵林,等.热泵辅助型太阳能储热干燥设备:中国,ZL201020114147.0[P].2010-11-24.
- 5 王全喜,包德胜,贺刚,等.太阳能相变储热器:中国,ZL201020114134.3[P].2010-12-01.
- 6 王全喜,刘贵林.新型太阳能牧草种子干燥设备设计[C].2010 国际农业工程大会论文集,上海,2010.  
Wang Quanxi, Liu Guilin. Design on new type of grass-seed solar energy drying[C]. Proceedings of International Agricultural Engineering Conference 2010, Shanghai, 2010. (in Chinese)
- 7 Caneta Research Inc. Commercial/institutional ground-source heat pump engineering manual[M]. ASHRAE, Atlanta,1995.
- 8 Kavanaugh Stephen P, Lambert Steven E. A bin method energy analysis for ground-coupled heat pumps [J]. ASHRAE Transactions,2004(1):535~542.
- 9 GB/T 6970—2007 粮食干燥机试验方法[S]. 2007.
- 10 王全喜,翟改霞.太阳能牧草种子干燥的关键技术[C].2010 国际农业工程大会,上海,2010.  
Wang Quanxi, Zhai Gaixia. Key technique of grass-seed drying by solar energy [C]. Proceedings of International Agricultural Engineering Conference 2010, Shanghai, 2010. (in Chinese)