

紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化*

高扬¹ 王德成¹ 王光辉¹ 方宪法² 宁国鹏¹ 杨洁¹

(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, 北京 100083)

【摘要】 为研究新鲜切碎紫花苜蓿茎叶干燥分离过程中,入口温度、入口风速、转筒转速和喂料速度对出机叶料含水率、出机茎料含水率、茎叶分离率的影响,采用9GFQA-600型苜蓿干燥茎叶分离设备进行试验,设计了四因素二次正交旋转组合试验进行回归分析,建立了相应的数学模型并进行了优化。结果表明,得到的回归方程显著,具有较好的拟合度;4个因素对苜蓿茎叶干燥分离效果的影响大小依次为:入口温度、入口风速、转筒转速、喂料速度;最优参数组合为:入口温度 400℃、入口风速 14 m/s、转筒转速为 12 r/min、喂料速度 8 kg/min,在此条件下出机叶料含水率为 13.42%、出机茎料含水率为 14.24%、茎叶分离率为 77.38%。

关键词: 紫花苜蓿 茎叶分离 干燥 数学模型 工艺优化

中图分类号: S226.6; S541+.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0113-05

Effect Prediction Model and Process Optimization of the Drying and Separating for Leaf-stem of Fresh Chopped Alfalfa

Gao Yang¹ Wang Decheng¹ Wang Guanghui¹ Fang Xianfa² Ning Guopeng¹ Yang Jie¹

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

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Many factors have effects on the separating ratio, moisture contents of the stems and leaves in fresh chopped alfalfa drying and separating processing. Four major factors: inlet temperature, inlet velocity, rotational speed of rotary drum, and feeding speed were analyzed in leaf-stem separation equipment. A quadratic orthogonal rotation design with 4 factors was introduced to do the regression analysis. Then models were developed and optimized. The results showed that the developed models fit the experiment data well. The inlet temperature affected the drying and separating processing most significantly and then the let velocity, rotational speed of rotary drum, feeding speed, respectively. It was analyzed that the most optimized parameters were 400℃ of inlet temperature, 14 m/s of inlet velocity, 12 r/min of rotational speed of rotary drum, and 8 kg/min of feeding speed, respectively. Under these conditions, the leaf moisture content was 13.42%, the steam moisture content was 14.24%, and leaf-stem separation ratio was 77.38%.

Key words Alfalfa, Leaf-stem separation, Drying, Mathematical model, Process optimization

引言

对于大多数牧草来说,其叶片和茎秆中营养物

质的含量存在很大差异^[1],例如紫花苜蓿的叶片富含蛋白质和类胡萝卜素,是猪和家禽等单胃动物的优良饲料或作为反刍家畜的蛋白质补充饲料,甚至

收稿日期: 2009-12-25 修回日期: 2010-01-25

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A0902、2007BAD35B0101)和财政部、农业部国家牧草产业技术体系资助项目(nyeytx-027)

作者简介: 高扬,博士生,主要从事草业加工研究,E-mail: gaoyang_abc6666@163.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

可作为人类的蛋白副食和治疗糖尿病、甲状腺病、关节炎以及高血醇等疾病的草药;而在其茎秆中则含有大量的粗纤维,是牛、羊等复胃反刍类家畜的必需饲料,同时也是造纸和生物能源产品的重要原料。因此,通过茎叶分离可以有效提高苜蓿的利用率,并直接促进相关产业的发展^[2-4]。

目前,有关茎叶分离技术的研究多集中在采用单纯的气流分离法对干燥的饲草进行茎叶分离,而很少能够直接对新鲜牧草在干燥的同时实现茎叶分离,且多数仍然处在实验室研究阶段,还没有达到工业化生产的水平^[5-10]。本文采用自行研制的 9GFQA-600 型苜蓿干燥茎叶分离设备,研究入口温度、入口风速、转筒转速和喂料速度等干燥参数对苜蓿茎叶干燥分离效果的影响,并建立相应的数学模型,以期今后苜蓿干燥方面的研究提供参考。

1 试验设备结构及原理

9GFQA-600 型苜蓿干燥茎叶分离设备主要由干燥转筒、茎叶分离室、叶料捕集器、风机、热风炉、上料机和除尘器等组成,如图 1 所示。

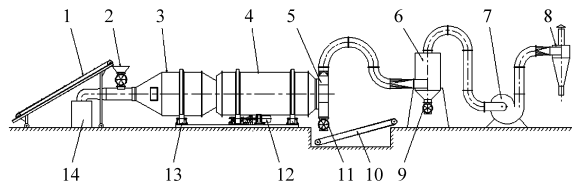


图 1 试验设备总体结构简图

Fig. 1 Total structure of experimental machine

1. 上料机 2. 喂料器 3. 预干燥段 4. 三回程干燥转筒 5. 茎叶分离室 6. 旋风式叶料捕集器 7. 引风机 8. 除尘器 9. 叶料出口 10. 接料输送带 11. 茎料出口 12. 转筒驱动电动机及传动装置 13. 支承装置 14. 热风炉

切碎的鲜苜蓿经过带式上料机进入料斗,由喂料闭风器喂入转筒。在风机的作用下,热风炉所产生的高温热风快速通过设备,物料在热风的作用下,首先进入预干燥转筒,并在转筒的转动下被抄板不断地抄起,在下落的过程中与热风充分接触。当物料含水率下降到一定程度时,即随热风进入三回程干燥转筒。当物料到达转筒尾部的茎叶分离室时,比重较小的叶片在气流的带动下进入旋风分离器(捕集器)并由其底部排出,而茎秆则直接由茎料出口排出^[11]。

2 试验设计与过程

2.1 试验物料

试验所用的物料选自河北省黄骅市,正处于现蕾期的中苜 1 号紫花苜蓿,茬次为第三茬,刈割时间

为 2009 年 8 月 20 日。测定新鲜苜蓿含水率为 70% (湿基),用切草机将苜蓿整株切成 3~5 cm 的草段。

2.2 试验设备与仪器

9GFQA-600 型苜蓿干燥茎叶分离设备(中国农业大学);DHG-9053A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司);袖珍型风速仪(日本KANOMAX 公司);AR2140 型电子天平(上海奥豪斯仪器有限公司);JJ-1000 型精密电子天平(美国双杰兄弟有限公司);KY-9Z-4C 型切草机(山东省济宁曲阜市科阳实业有限公司);国家标准检验筛(浙江省上虞市春耀仪器筛筛厂);称量瓶;计时器;自封袋;托盘。

2.3 试验流程

(1) 热风炉开启后,待各部件充分预热后,才能开始投料。预热温度不得超过 100℃,连续投料后再逐渐升温。

(2) 根据试验设计要求,分别调节入口风速、入口温度、转筒转速、喂料速度等工作参数至预定值。待茎料出口和叶料出口均达到稳定持续排料状态时,开始试验取样,分别用托盘同时接取叶料样品和茎料样品,装入相应的样品袋并作好标记,同时记录接样时间,接样时间不得少于 20 s,重复 3 次。

(3) 试验完毕后,测定每个试验组合下接得的出机叶料样品和出机茎料样品的含水率,每次测定 3 个平行样。(由于含水率测定所用样品质量远远小于接得的样品质量,因此在计算茎叶分离率时,这部分样品的质量可以忽略不计。)

2.4 指标测定

(1) 新鲜苜蓿含水率和干燥分离后样品含水率测定根据文献[12]提供的标准进行。

(2) 茎叶分离率测定方法。分别将各样品中的茎和叶分开,并分别称量,记录结果。(分样标准为直径小于 1 mm 或长度小于 1 cm 的茎秆按叶片处理,茎料样品中茎叶相连的部分按茎秆处理,叶料样品中茎叶相连的部分按叶片处理。)

茎叶分离率^[13-14]计算式为

$$\eta = \frac{W_{1L}}{W_{1L} + W_{2L}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W_{1L} ——叶料出口处分离得到的叶片质量, g

W_{2L} ——茎料出口处分离得到的叶片质量, g

2.5 试验设计

试验采用四因素二次回归正交旋转组合设计。以入口温度 x_1 、入口风速 x_2 、转筒转速 x_3 和喂料速度 x_4 为试验变量,以出机叶料样品含水率 Y_1 、出机茎料样品含水率 Y_2 和茎叶分离率 Y_3 为目标函数。每个变量取 5 个水平,因素水平组合设计如表 1 所示。

表 1 试验设计因素水平编码

Tab.1 Factors and levels of quadratic regression orthogonal rotating experiment design

编码	因素			
	入口温度	入口风速	转筒转速	喂料速度
	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$x_3/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$x_4/\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$
2	450	16	25	32
1	400	14	20	26
0	350	12	15	20
-1	300	10	10	14
-2	250	8	5	8

3 结果与分析

3.1 回归模型的建立

试验设计与结果如表 2 所示。应用 SPSS 16.0 软件中的 Regression 过程对数据进行分析,分别得到用编码值表示的出机叶料样品含水率 Y_1 、出机茎料样品含水率 Y_2 和茎叶分离率 Y_3 的二次回归方程

$$Y_1 = 15.402 - 3.114X_1 - 0.342X_2 + 0.477X_3 + 0.566X_4 + 0.119X_1X_2 - 0.014X_1X_3 + 0.001X_1X_4 + 0.198X_2X_3 - 0.085X_2X_4 - 0.030X_3X_4 + 0.112X_1^2 + 0.102X_2^2 + 0.432X_3^2 + 0.636X_4^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 16.523 - 3.098X_1 - 0.541X_2 + 0.435X_3 + 0.533X_4 - 0.097X_1X_2 - 0.082X_1X_3 - 0.066X_1X_4 - 0.061X_2X_3 + 0.023X_2X_4 + 0.166X_3X_4 + 0.194X_1^2 + 0.283X_2^2 + 0.323X_3^2 + 0.465X_4^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 66.374 + 4.958X_1 + 4.748X_2 - 2.029X_3 - 2.284X_4 + 0.276X_1X_2 - 0.399X_1X_3 - 0.341X_1X_4 + 0.257X_2X_3 - 0.028X_2X_4 - 0.223X_3X_4 - 2.556X_1^2 - 1.812X_2^2 - 1.606X_3^2 - 0.608X_4^2 \quad (4)$$

对 Y_1 方差分析结果显示,模型 $F_R = 40.977 > F_{0.01}(14,21) = 3.07$, $P_r < 0.001$,回归极显著,复相关系数 $R^2 = 0.965$,表明该模型能够解释出机叶料含水率随各因素变化的关系,拟合水平良好。对回归系数进行显著性检验结果如表 3 所示,其中一次项 X_1 、 X_2 与 Y_1 呈负相关, X_3 、 X_4 与 Y_1 呈正相关;交互项 X_1X_2 、 X_1X_4 、 X_2X_3 与 Y_1 呈正相关, X_1X_3 、 X_2X_4 、 X_3X_4 与 Y_1 呈负相关;各平方项与 Y_1 均呈正相关关系。

表 2 二次回归正交旋转组合设计及试验结果

Tab.2 Experimental levels and results of the quadratic regression orthogonal rotating test

试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	1	1	1	1	13.39	14.22	67.57
2	1	1	1	-1	12.55	13.14	73.94
3	1	1	-1	1	11.62	12.97	72.65
4	1	1	-1	-1	11.57	12.68	75.88
5	1	-1	1	1	12.68	14.83	60.02
6	1	-1	1	-1	12.31	14.25	63.66
7	1	-1	-1	1	13.32	14.34	64.19
8	1	-1	-1	-1	11.16	13.79	67.13
9	-1	1	1	1	19.63	20.13	62.15
10	-1	1	1	-1	18.44	18.98	63.31
11	-1	1	-1	1	18.26	19.34	62.47
12	-1	1	-1	-1	17.61	18.65	65.38
13	-1	-1	1	1	19.75	21.42	52.17
14	-1	-1	1	-1	18.98	19.88	56.23
15	-1	-1	-1	1	19.12	19.31	55.85
16	-1	-1	-1	-1	18.33	19.14	58.44
17	2	0	0	0	9.76	10.13	73.76
18	-2	0	0	0	21.37	23.89	48.78
19	0	2	0	0	14.12	15.78	76.32
20	0	-2	0	0	16.93	18.85	52.17
21	0	0	2	0	18.02	18.43	58.63
22	0	0	-2	0	15.67	16.52	71.51
23	0	0	0	2	19.35	19.73	62.08
24	0	0	0	-2	15.97	16.36	76.04
25	0	0	0	0	14.42	15.35	72.57
26	0	0	0	0	13.98	15.28	69.01
27	0	0	0	0	14.67	16.02	70.34
28	0	0	0	0	14.54	15.41	74.52
29	0	0	0	0	14.87	15.97	71.43
30	0	0	0	0	15.01	16.11	68.77
31	0	0	0	0	14.38	15.64	69.25
32	0	0	0	0	14.22	15.44	71.56
33	0	0	0	0	15.12	16.23	72.31
34	0	0	0	0	14.62	15.55	70.49
35	0	0	0	0	14.71	15.68	67.33
36	0	0	0	0	14.03	15.47	71.57

注:表中各试验组合结果的标准偏差均小于 5%。

对 Y_2 方差分析结果显示,模型 $F_R = 48.014 > F_{0.01}(14,21) = 3.07$, $P_r < 0.001$,回归极显著,复相关系数 $R^2 = 0.970$,表明该模型能够解释出机茎料含水率随各因素变化的关系,拟合水平良好。对回归系数进行显著性检验结果如表 4 所示,其中一次项 X_1 、 X_2 与 Y_2 呈负相关, X_3 、 X_4 与 Y_2 呈正相关;交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1X_4 、 X_2X_3 与 Y_2 呈负相关, X_2X_4 、 X_3X_4 与 Y_2 呈正相关;各平方项与 Y_2 均呈正相关关系。

表 3 叶料样品含水率回归方程系数显著性检验
Tab.3 Significance test for regression coefficient
of leaf-materiel moisture content

模型中的系数项	系数估计值	标准误差	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
常数项	15.402	0.114	134.875	<0.001
X_1	-3.114	0.140	-22.266	<0.001
X_2	-0.342	0.140	-2.443	0.023
X_3	0.477	0.140	3.408	0.003
X_4	0.566	0.140	4.046	0.001
X_1X_2	0.119	0.171	0.693	0.496
X_1X_3	-0.014	0.171	-0.080	0.937
X_1X_4	0.001	0.171	0.007	0.994
X_2X_3	0.198	0.171	1.153	0.262
X_2X_4	-0.085	0.171	-0.496	0.625
X_3X_4	-0.030	0.171	-0.175	0.863
X_1^2	0.112	0.121	0.925	0.365
X_2^2	0.102	0.121	0.843	0.409
X_3^2	0.432	0.121	3.567	0.002
X_4^2	0.636	0.121	5.249	<0.001

表 4 茎料样品含水率回归方程系数显著性检验
Tab.4 Significance test for regression coefficient
of steam-materiel moisture content

模型中的系数项	系数估计值	标准误差	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
常数项	16.523	0.104	158.312	<0.001
X_1	-3.098	0.128	-24.236	<0.001
X_2	-0.541	0.128	-4.234	<0.001
X_3	0.435	0.128	3.406	0.003
X_4	0.533	0.128	4.169	<0.001
X_1X_2	-0.097	0.157	-0.619	0.543
X_1X_3	-0.082	0.157	-0.523	0.606
X_1X_4	-0.066	0.157	-0.419	0.679
X_2X_3	-0.061	0.157	-0.387	0.702
X_2X_4	0.023	0.157	0.148	0.884
X_3X_4	0.166	0.157	1.058	0.302
X_1^2	0.194	0.111	1.753	0.094
X_2^2	0.283	0.111	2.555	0.018
X_3^2	0.323	0.111	2.916	0.008
X_4^2	0.465	0.111	4.203	<0.001

对 Y_3 方差分析结果显示,模型 $F_R = 20.572 > F_{0.01}(14,21) = 3.07, P_r < 0.001$,回归极显著,复相关系数 $R^2 = 0.932$,表明该模型能够解释茎叶分离率随各因素变化的关系,拟合水平良好。对回归系数进行显著性检验结果如表 5 所示,其中一次项 X_1 、 X_2 与 Y_3 呈正相关, X_3 、 X_4 与 Y_3 呈负相关;交互项 X_1X_2 、 X_2X_3 与 Y_3 呈正相关, X_1X_3 、 X_1X_4 、 X_2X_4 、 X_3X_4 与 Y_3 呈负相关;各平方项与 Y_3 均呈负相关

关系。

表 5 茎叶分离率回归方程系数显著性检验
Tab.5 Significance test for regression coefficient
of separation efficiency moisture content

模型中的系数项	系数估计值	标准误差	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
常数项	66.374	0.413	160.593	<0.001
X_1	4.958	0.506	9.795	<0.001
X_2	4.748	0.506	9.380	<0.001
X_3	-2.029	0.506	-4.009	0.001
X_4	-2.284	0.506	-4.512	<0.001
X_1X_2	0.276	0.620	0.446	0.660
X_1X_3	-0.399	0.620	-0.643	0.527
X_1X_4	-0.341	0.620	-0.550	0.588
X_2X_3	0.257	0.620	0.415	0.682
X_2X_4	-0.028	0.620	-0.044	0.965
X_3X_4	-0.223	0.620	-0.359	0.723
X_1^2	-2.556	0.438	-5.830	<0.001
X_2^2	-1.812	0.438	-4.134	<0.001
X_3^2	-1.606	0.438	-3.663	0.001
X_4^2	-0.608	0.438	-1.388	0.180

3.2 回归模型优化分析

3.2.1 主因素分析

本试验采用四因素二次正交旋转组合设计,试验数据进行中心标准化处理,消除量纲上的差异,编码值的取值均限制在 $[-2,2]$,在编码空间中处于完全平等的地位,所以,可直接从回归系数绝对值看出各因素对目标函数的影响程度^[15]。

由表 3 可知,回归方程 Y_1 的各因素回归系数绝对值从大到小依次为 X_4 、 X_3 、 X_1 、 X_2 ,即各因素对出机叶料样品含水率影响大小依次为:喂料速度、转筒转速、入口温度、入口风速。

由表 4 可知,回归方程 Y_2 的各因素回归系数绝对值从大到小依次为 X_4 、 X_3 、 X_2 、 X_1 ,即各因素对出机茎料样品含水率影响大小依次为:喂料速度、转筒转速、入口风速、入口温度。

由表 5 可知,回归方程 Y_3 的各因素回归系数绝对值从大到小依次为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ,即各因素对茎叶分离率影响大小依次为:入口温度、入口风速、转筒转速、喂料速度。

3.2.2 回归模型的寻优

以出机叶料样品含水率 Y_1 为指标,在区间 $[-2,2]$ 内,得到的最小值 $Y_{1min} = 9.08\%$,对应的条件为 $X_1 = 2$ 、 $X_2 = 2$ 、 $X_3 = -0.552$ 、 $X_4 = -0.445$,即入口温度为 450°C ,入口风速为 16 m/s ,转筒转速为 12.45 r/min ,喂料速度为 17.31 kg/min ,根据实际情况修正后为:入口温度为 450°C ,入口风速为 16 m/s ,转筒转速为 12 r/min ,喂料速度为 17 kg/min 。

以出机茎料样品含水率 Y_2 为指标, 在区间 $[-2, 2]$ 内, 得到的最小值 $Y_{2\min} = 10.03\%$, 对应的条件为 $X_1 = 2$ 、 $X_2 = 0.96$ 、 $X_3 = -0.673$ 、 $X_4 = -0.573$, 即入口温度为 450°C , 入口风速为 13.86 m/s , 转筒转速为 11.31 r/min , 喂料速度为 16.47 kg/min , 根据实际情况修正后为: 入口温度为 450°C , 入口风速为 14 m/s , 转筒转速为 11 r/min , 喂料速度为 16 kg/min 。

以茎叶分离率 Y_3 为指标, 在区间 $[-2, 2]$ 内, 得到的最大值 $Y_{3\max} = 77.45\%$, 对应的条件为 $X_1 = 0.948$ 、 $X_2 = 1.270$ 、 $X_3 = -0.610$ 、 $X_4 = -2$, 即入口温度为 397.5°C , 入口风速为 14.48 m/s , 转筒转速为 11.91 r/min , 喂料速度为 8 kg/min , 根据实际情况修正后为: 入口温度为 400°C , 入口风速为 14 m/s , 转筒转速为 12 r/min , 喂料速度为 8 kg/min 。

由于苜蓿贮存的安全水分必须小于 15% [10], 因此由 Y_1 和 Y_2 两个方程得出的条件理论上符合要求, 但是在实际生产过程中, 由于入口温度过高, 造成产品水分含量过低, 部分产品颜色变黄, 导致苜蓿营养物质的流失, 同时苜蓿叶片过分脆化, 使得从旋风式叶料捕集器出来的叶料粉末过多, 不利于收集。而由方程 Y_3 得出的条件, 使得茎叶分离率达到最大值, 达到并超过了 9GFQA-600 型苜蓿干燥茎叶分离设备的茎叶分离率大于 70% 的设计要求, 将由方程 Y_3 得出的条件 $X_1 = 0.948$ 、 $X_2 = 1.270$ 、 $X_3 = -0.610$ 、 $X_4 = -2$ 代入 Y_1 和 Y_2 中, 分别得物料含水率为 13.47% 和 14.18% , 符合苜蓿贮存的安全水分的要求, 因此 4 个因素对出机叶料含水率、出机茎料

含水率、茎叶分离率的影响大小次序为: 入口温度、入口风速、转筒转速、喂料速度。

3.2.3 验证试验

在入口温度为 400°C , 入口风速为 14 m/s , 转筒转速为 12 r/min , 喂料速度为 8 kg/min 的条件下将试验重复 3 次, Y_1 为 13.24% 、 13.68% 、 13.35% , 平均值为 13.42% ; Y_2 为 14.07% 、 14.75% 、 13.92% , 平均值为 14.24% ; Y_3 为 78.12% 、 77.26% 、 76.78% , 平均值为 77.38% , 3 项数据与各自模型的预测值均较为接近, 因此试验所得数学模型和最佳工艺参数组合可用于指导苜蓿茎叶干燥分离的生产。

4 结论

(1) 以入口温度、入口风速、转筒转速和喂料速度为自变量, 出机叶料样品含水率、出机茎料样品含水率、茎叶分离率为目标函数进行了四因素二次回归正交旋转组合设计试验, 并建立了相应的回归方程, 通过方差分析和显著性检验, 确立了回归方程。

(2) 经过综合分析, 4 个因素对出机叶料含水率、出机茎料含水率、茎叶分离率的影响大小次序为: 入口温度、入口风速、转筒转速、喂料速度。

(3) 优化的各因素参数分别为: 入口温度 400°C 、入口风速 14 m/s 、转筒转速为 12 r/min 、喂料速度 8 kg/min 。在此条件下出机叶料含水率、出机茎料含水率和茎叶分离率分别达到了 13.42% 、 14.24% 和 77.38% , 说明回归模型具有较好的拟合度, 能较好地预测苜蓿茎叶干燥分离的效果。

参 考 文 献

- 王鑫, 马永祥, 李娟. 紫花苜蓿营养成分及主要生物学特性[J]. 草业科学, 2003, 20(10): 39~40.
Wang Xin, Ma Yongxiang, Li Juan. Fat-breeding effects of full-grazing turkey on regressed grassland[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(10): 39~40. (in Chinese)
- Arinze E A, Schoenau G J, Sokhansanj S, et al. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems—a review & new concept [J]. Drying Technology, 2003, 21(9): 1 673~1 702.
- 杨苗萌, 李胜利. 中国苜蓿产业发展面临的问题及其对策[J]. 中国畜牧杂志, 2008, 44(20): 41~45.
- Shinners K J, Herzmann M E, Binversie B N, et al. Harvest fractionation of alfalfa[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 713~718.
- 杨明韶, 张永, 华玉革. 我国草业机械工程发展趋势的研究[J]. 农机化研究, 2004(1): 14~18.
Yang Mingshao, Zhang Yong, Hua Yuge. On the develop ting trend of herbage industry mechanical engineering in our country [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(1): 14~18. (in Chinese)
- 卢英林. 苜蓿草干燥成套设备及干燥机理[J]. 中国乳业, 2002(1): 35~36.
- 熊华, 熊仕玉. 干燥苜蓿叶茎分离装置: 中国, 01223061. 8[P]. 2002-02-27.
- 郝波. 一种茎叶分离机: 中国, 200420054763. 6[P]. 2006-04-12.
- 刘彦成. 植物茎叶的分离法及设备: 中国, 88101101[P]. 1988-09-28.
- Adapa P K, Schoenau G J, Arinze E A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer [J]. Biosystems Engineering, 2004, 91(4): 455~463.

(下转第 162 页)

参 考 文 献

- 1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2006,37(5):158~162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):158~162. (in Chinese)
- 2 Baeten J, Donne K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester[M]. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), 2008, 42: 531~539.
- 3 Van Henten E J, Van't Slot D A, Hol C W J, et al. Optimal manipulator design for a cucumber harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(2):247~257.
- 4 Tanigaki K, Fujiura T, Akase A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65~72.
- 5 张铁中,陈利兵,宋健. 草莓采摘机器人的研究: II. 基于图像的草莓重心位置和采摘点的确定[J]. 中国农业大学学报,2005,10(1): 48~51.
Zhang Tiezhong, Chen Libing, Song Jian. Study on strawberry harvesting robot: II. images based identifications of strawberry barycenter and plucking position[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(1):48~51. (in Chinese)
- 6 宋健,孙学岩,张铁中,等. 开放式茄子采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):143~147.
Song Jian, Sun Xueyan, Zhang Tiezhong, et al. Design and experiment of opening picking robot for eggplant[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):143~147. (in Chinese)
- 7 赵庆波,赵德安,姬伟,等. 采摘机器人视觉伺服控制系统设计[J]. 农业机械学报,2009, 40(1):152~156.
Zhao Qingbo, Zhao Dean, Ji Wei, et al. Vision servoing control system of fruit harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):152~156. (in Chinese)
- 8 张志勇,何东健,张建,等. 苹果采摘机器人手臂控制研究[J]. 中国农业大学学报,2008,13(2):78~82.
Zhang Zhiyong, He Dongjian, Zhang Jian, et al. Research on controlled system of apple picking robot arm[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(2):78~82. (in Chinese)
- 9 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008,24(8):279~283.
Jiang Huanyu, Peng Yongshi, Shen Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):279~283. (in Chinese)
- 10 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. 农业机械学报,2008,39(3):109~112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):109~112. (in Chinese)
- 11 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报,2008,39(3):175~179.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):175~179. (in Chinese)
- 12 谢志勇,张铁中,赵金英. 基于 Hough 变换的成熟草莓识别技术[J]. 农业机械学报,2007,38(3):106~109.
Xie Zhiyong, Zhang Tiezhong, Zhao Jinying. Ripened strawberry recognition based on Hough transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3):106~109. (in Chinese)

(上接第 117 页)

- 11 王光辉,宁国鹏,王德成,等. 一种牧草干燥与茎叶分离装置: 中国, 200810227636.4[P]. 2009-04-29.
- 12 ASAE Standards. S358.2 Dec 99—2000. Determination of forage moisture content[S]. St. Joseph, MI USA: ASAE. 2004.
- 13 Bilanski W K, Graham W D, Mowat D N, et al. Separation of alfalfa silage into stem and leaf fractions in a horizontal air stream[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1 684~1 690.
- 14 Chrisman J, Kohler G O, Mottola A C, et al. High and low protein fractions by separation milling of alfalfa[M]. Agricultural Research Services, USDA, 1971: 74~75.
- 15 蒯诗松. 回归分析及其试验设计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1986.