

山地牧草调制机关键设计参数确定与试验研究

罗亚兰, 赵春花, 卞鲁平, 陈 凯, 周 洋

(甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为确定切割速比、压辊圆周速度和拨禾速比 3 个山地牧草调制机关键设计参数, 依据牧草收获农艺要求, 以作业割茬高度低、重割次数少、压扁比例高及碎草损率失小为试验评价指标, 结合正交试验研究, 应用综合平衡法, 得到各影响因素的最优方案组合: 切割速比为 2.5、压辊圆周速度为 $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、拨禾速比为 2.5。按照该最优方案进行试验, 试验结果表明: 作业割茬为 42 mm、重割率为 0.73%、压扁比例为 46.5% 及碎草损失率为 2.3%, 符合牧草收获的作业要求。

关键词: 牧草调制机; 关键参数; 设计; 压扁; 试验

中图分类号: S225.2+1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0266-05

Design and experimental study of the key parameters on mountain mower conditioner

LUO Ya-lan, ZHAO Chun-hua, BIAN Lu-ping, CHEN Kai, ZHOU Yang

(College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to determine the cutting speed ratio, press roller circumferential speed and reel speed ratio of mountain mower conditioner three key design parameters, an experiment was conducted in the right of requirements for pasture harvesting technology, with the low working stubble height, few recutting times, high flattening ratio and small broken grass loss rate as evaluating indicators. Through the orthogonal experiments, application comprehensive balance method to obtain the optimal combination working parameters: the cutting ration was 2.5, the press roller circumferential speed was $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the reel speed ratio was 2.5. Measured with the optimal combination of operational parameters, the results showed that, the working stubble was 42 mm, the recutting rate was 0.73%, the flattening ratio was 46.5% and the crushed grass loss rate was 2.3%, which could meet the demand of forage harvest operation.

Keywords: pasture mower conditioner; key parameters; design; flattening; test

近年来甘肃省持续推进草产业开发建设, 2008 年该省人工种草留床面积达到 117 万 hm^2 , 其中紫花苜蓿达到 35 万 hm^2 , 居全国第一位。甘肃省地处低山丘陵区, 牧草大多种植在小地块梯田或坡地, 多数采用人工收获, 由于收割后不能及时压扁, 导致苜蓿营养物质流失严重^[1-2]。故实现山地苜蓿机械化收获和提高其营养价值一直是个难题。为此, 课题组研制了一种适用于山地作业的牧草调制机, 该机能将拨禾、切割、调制、输送和集条铺放一起完成, 对

牧草茎秆进行压裂搓揉, 加速干燥过程, 粗蛋白的损失率可降为 2.4%^[3-5]。拨禾系统、切割系统和压扁系统是牧草调制机的核心部分, 各系统作业性能参数的选取对收获效果至关重要, 因此, 对该机各系统工作性能参数进行优化试验研究具有重要的意义。

本文根据自行设计的山地牧草调制机, 通过改变影响该机作业性能的主要设计参数(切割速比、压扁辊圆周速度和拨禾速比)进行田间试验研究, 以期获得各系统相关作业参数的最优组合方案。

收稿日期: 2014-03-20

基金项目: 2012 农业部公益行业(农业)科研专项“苜蓿饲草料生产机械化关键工艺及装备的研发与示范”(201203024); 甘肃省农转项目“4GH120 型手扶山地多功能收割机的中试”(1105NCNA095); 2012 年甘肃省杰出青年基金项目“牧草生物力学通用数据库建立及配套割草压扁机理研究”(2012GS05590); 甘肃农业大学伏羲杰出人才培育计划“苜蓿机械化播种、收获机理研究及其应用开发”。

作者简介: 罗亚兰(1986—), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要从事农业工程技术与装备方面的研究。E-mail: 591481244@qq.com。

通信作者: 赵春花(1972—), 女, 甘肃武威人, 教授, 博士, 主要从事农业工程技术与装备方面的研究。E-mail: chhua20040630@yeah.net。

1 传动系统组成及工作原理

1.1 传动系统组成

该新型传动系统采用自动张紧链轮和上下压辊双链轮形成压扁自动调节系统与拨禾系统;偏置式曲柄滑块机构驱动卧式割台往复运动构成切割系统,其传动示意图如图1所示。

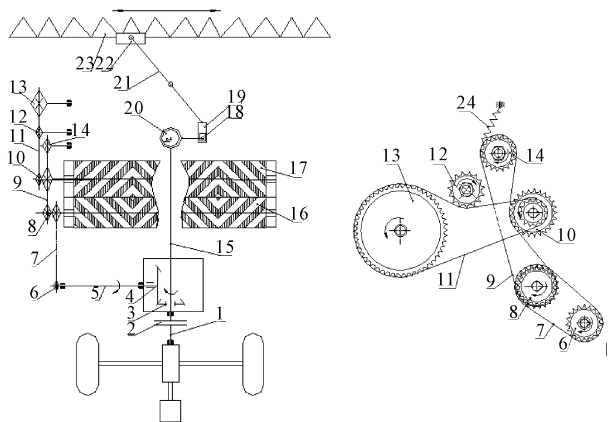


图1 手扶山地牧草调制机传动系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of drive system for walking mountain mower conditioner

注:1.减速器输出轴;2.联轴器;3.小锥齿轮;4.大锥齿轮;5.转向轴;6.转向轴链轮;7.链条(1);8.下压辊双链轮;9.链条(2);10.上压辊双链轮;11.链条(3);12.拨禾轮张紧轮;13.拨禾轮从动链轮;14.压扁轮张紧链轮;15.传动主轴;16.下压辊;17.上压辊;18.圆柱滑块;19.摇杆;20.偏心轮;21.连杆;22.滑块弯槽;23.切割器;24.拉簧

Note: 1.Reducer output shaft; 2.Coupling; 3.The small bevel gear; 4.The big bevel gear; 5.Steering shaft; 6.Steering shaft sprocket; 7.Chain(1); 8.The double sprocket of below flattening roller; 9.Chain(2); 10.The double sprocket of upper flattening roller; 11.Chain(3); 12.Tensioning wheel of reel; 13.The driven sprocket of reel; 14.Tensioning sprocket of flattening roller; 15.The main transmission shaft; 16. Below flattening roller; 17. Upper flattening roller; 18. Cylindrical slider; 19. Jointed arm; 20. Eccentric wheel; 21. Connecting rod; 22. The slider curved furrow; 23. Cutter; 24. Tension spring

1.2 工作原理

调制机工作时,微耕机减速箱输出轴传出动力,通过联轴器与传动主轴相连,使其得到动力并沿顺时针方向转动。一方面,传动主轴通过一对锥齿轮减速并转向后将动力传递到转向轴,转向轴链轮借助链条1与下压辊双链轮相连,将动力传给下压辊并使其形成沿顺时针方向的旋转运动。接着,下压辊双链轮通过链条2、上压辊双链轮和自动张紧链轮形成链传动,使上压辊沿逆时针方向转动,从而实现了上下压辊沿相对方向的转动和对牧草的嵌入、压扁及输送功能,其中,拉簧的一端与自动张紧链轮内侧相连,另一端挂在机架上,当上压辊遇到障碍物

时被顶起,弹簧受拉伸长,上压辊任与链条2相啮合进行自传使障碍物顺利通过,随后拉簧自动复位,上下两压辊继续啮合转动,构成能够自动调节间隙的压扁传动系统。最后,上压辊双链轮与链条3、拨禾轮张紧链轮和拨禾轮从动链轮一起将动力传递给拨禾装置,使其沿逆时针方向转动,形成拨禾传动系统,实现了对牧草的拨入与扶持切割功能。另一方面,传动主轴与偏心轮反螺纹相连,通过圆柱滑块、摇杆、连杆和滑块弯槽等将圆周运动转化为往复式直线运动,使切割器左右往复运动,实现了对牧草的切割功能。因此,该传动系统实现了对牧草的割前拨入、扶持切割、割后压扁、输送和集条功能,满足收获全过程。

2 系统分析与参数的确定

2.1 切割系统分析及参数确定

1) 切割系统分析。

本机切割系统选用偏置曲柄滑块机构驱动卧式往复切割器,整机动力首先通过联轴器传至主轴,再由主轴与偏心轮的反丝连接将动力传到切割系统,其中偏心轮的端部间隙插入圆柱滑块中心孔内,使其在垂直方向沿摇杆滑槽上下滑动,水平方向做往复直线运动,形成曲柄滑块机构。花键轴两端都加工有花键,下端与摇杆相连,上端驱动连杆左右摆动。连杆头部通过螺栓夹持在滑块弯槽中,滑块弯槽下端的齿条与切割器动刀杆上安装的齿条相啮合,从而带动割刀做往复式直线运动,实现了对牧草的切割功能。

2) 相关参数的确定。

机器前进速度与割刀行程的关系为

$$V_m = \frac{2hn}{60} = \frac{hn}{30}, h = \frac{30V_m}{n} \quad (1)$$

式中, V_m 为机器作业速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h 为割刀移动一个行程机器前进的距离(m); n 为曲柄转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。由于割刀的平均切割速度为

$$V_p = \frac{2Sn}{60} = \frac{Sn}{30}, n = \frac{30V_p}{S} \quad (2)$$

其中 S 为割刀行程(m),将(2)式代入(1)式得,

$$S = \frac{V_p h}{V_m} = Kh, K = \frac{V_p}{V_m} \quad (3)$$

式中 K 简称切割速比,由(3)式表明,当 S 值一定时, K 增大则 h 减小,两者呈反比关系。切割图形表明,随着 K 值的减小,直接切割区和漏割区增大,重割区减小,反之依然。若漏割区增大,有更多的牧草割茬较高,饲料损失增大。而重割区变大则消耗功

率增大。因此,在作业过程中,漏割区和重割区面积的大小直接影响牧草的切割质量和整机的功率消耗,为保证切割质量、减小切割阻力和功率消耗,要求漏割区和重割区面积越小越好^[6]。减小漏割区需要增大切割速度,目前曲柄的转速通常为 1 000 r·min⁻¹,平均切割速度约为 2.58 m·s⁻¹^[7]。本机主轴转速 $n = 990 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,采用中间型切割器,割刀行程 $S = 76 \text{ mm}$ 。由(2)式计算可得 $V_p = 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合机器前进速度 $V_m = 0.5 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,代入(3)式得 $K = 1.67 \sim 5$ 。根据不漏割条件,切割速比一般大于 1.02^[8],选取 3 组 K 值:① $K = 2.0$;② $K = 2.5$;③ $K = 3$ 。

2.2 压扁系统相关参数的确定

压辊直径过小将引起两辊间进入的牧草缠绕抱死,过大会增大牧草喂入口高度和整机重量,影响牧草的喂入性能。现有的调制机中,压辊直径一般为 170 mm ~ 264 mm^[9]。结合干旱梯田或坡地苜蓿刈割期生长高度为 380 mm ~ 700 mm,含水率为 60% ~ 70% 的具体情况,选取上下压辊直径分别为 186 mm 和 160 mm 的钢制辊。为了增大压辊对牧草的抓取能力,压辊表面设计成相互啮合的“人”字齿形^[10-11]。高东明等^[12]研究了两压辊凸凹面积比、压缩比和喂入方式对压扁比例的影响,本试验在此基础上进行喂入速度对压扁效果影响的试验研究。

假设机器前进速度为 V_m ,作业幅宽为 B_1 ,牧草生长密度为 ρ_1 ,压辊喂入速度为 V_w ,压辊作业长度为 B_2 ,聚集到压辊喂入口处的牧草密度为 ρ_2 ,为了使切割的牧草能够及时压扁,则 $V_m B_1 \rho_1 = V_w B_2 \rho_2$

$$V_w = \frac{V_m B_1 \rho_1}{B_2 \rho_2}$$

(4)

令 $k_1 = \frac{B_1}{B_2}$, $k_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2}$,则 $V_w = k_1 \cdot k_2 \cdot V_m$,根据本机作业要求取 $B_1 = 1.2 \text{ m}$, $B_2 = 1 \text{ m}$, $K_2 \approx 1.5$ 。代入(4)式得 $V_w \approx 1.8 V_m$ 。对于一般的牧草调制机其圆周速度常为机器前进速度的 3.5 ~ 4 倍^[13],所以圆周速度的大小为 $V_w < V < 4 V_m$,由 $V_m = 0.5 \sim 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 得, $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < V < 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合本机结构选取 3 组数值:① $V = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;② $V = 4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;③ $V = 4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 拨禾系统相关参数的确定

拨禾轮压板圆周速度 V_o 与机器作业速度 V_m 的关系为 $\lambda = V_o/V_m$,其中 λ 为拨禾速比。拨禾轮正常工作的必要条件为 $\lambda > 1$, λ 值越大,拨板引导和扶持牧草的能力越强,牧草切割量越大,但 λ 太大,拨板打击牧草力量过重,造成较大的田间损失^[14]。

由拨禾与重割、压扁、铺条所形成的损失简称碎草损失。参照联合收割机上拨禾轮的设计 $\lambda = 1.2 \sim 2.5$,结合收获牧草特性选取 3 个数值:① $\lambda = 2.5$;② $\lambda = 2.66$;③ $\lambda = 3$ 。

3 试验方案设计与分析

3.1 试验材料

2013 年 8 月 25 日至 27 日,在陇中黄土高原半干旱区的定西地区内官镇进行了收获试验,试验材料选用中兰二号苜蓿,6 月 10 日人工撒播,土壤类型为沙壤土,地表 0 ~ 10 cm 含水率为 20%,种植密度约为 600 株·m⁻²,株高为 500 ~ 1 000 mm,平均含水率为 70%,倒伏严重,生长期为第一年第一茬蕾花期。地块坡度 $\leq 20^\circ$ 。试验机为由微耕机带动的 9GYF1.2 手扶山地牧草调制机,柴油机输出动力为 6.3 kW。

3.2 试验方法

选取试验地测定区长度为 25 m,两端各留 5 m 的预备区,宽度大于机组往返两个行程的测试要求,机器进地后根据地形做环形切割,已割面无阻挡。用取样框分别取 5 个样点^[15],按要求割茬高度(50 mm)将各样点上的牧草全部割下后混合并称其质量换算为单位面积平均收获牧草质量。试验选取切割速比 K 、压辊圆周速度 V 和拨禾速比 λ 作为试验因素,通过改变机器作业速度、压扁系统和拨禾系统的传动比来获得不同的水平数,数值记录于表 1。为达到收获割茬小于 50 mm,重割率小于 1.5%,压扁率大于 38%,碎草损失率小于 4% 的牧草收获要求^[16],试验以割茬高度低,重割率小,压扁比例高,碎草损失率小为试验指标,结合正交试验设计,应用综合平衡法,得到影响传动系统因素的最优参数组合。

表 1 因素水平表

Table 1 The chart of factors and levels

水平 The levels	因素 The factors		
	K	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	λ
1	2	4	2.5
2	2.5	4.2	2.66
3	3	4.5	3

3.3 评价指标的测定

① 割茬高度:用 1 m 钢直尺放在地面上,沿机组前进方向在全幅内等间隔测 20 根以上,每一行程等间隔测两处。② 重割率:各测点平均每平方米的无头草数与每平方米牧草株数之比为重割率,沿机

组前进方向取 1 m 长,每一行程等间距测两处。③ 压扁比例:每根苜蓿上被压扁的长度与整株苜蓿总长度之比为单株压扁比例。平均压扁率的测定方法按 $B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{L_i}$ 计算,式中: l_i 是第 i 根苜蓿上被压扁的长度; L_i 是单根试验苜蓿的长度。 n 是测定点单位面积的牧草总数。④ 碎草损失率:单位面积内重割、拨禾、压扁、铺条过程中碎草质量与单位面积应收获牧草质量之比。沿机组前进方向取 1 m 长,将此处牧草轻轻取走,捡起地面上小于 7 cm 长的牧草称其质量。每一行程等间隔测两处。

3.4 试验结果与分析

采用多因素多指标正交表 $L_9(3^4)$ 来安排试验,试验重复 3 次,具体安排及结果如表 2 所示。当影响调制机各系统的因素改变时割茬高度在 39 ~ 49 mm 之间,重割率在 0.6% ~ 1.05% 之间,压扁率在 42% ~ 49% 之间,碎草损失率在 2% ~ 2.7% 之间;当切割速比和拨禾速比均为 3 时,割茬高度最低为 39 mm,但此时重割率最大为 1.05%,从而可知割茬高度与重割率成反比;当拨禾速比为 2.5 时,碎草损失率最小在 2% ~ 2.13% 之间;当压辊圆周速度从 4 $m \cdot s^{-1}$ 增大到 4.5 $m \cdot s^{-1}$ 时,压扁比例逐渐减小。为考察试验因素对性能指标的影响,对指标逐项进行分

析。例如将 1 水平三个试验号所得的某指标求和,再求其均值,就得到对应于 1 水平的该指标值。以此类推。其汇总结果如图 2 所示。

由图 2 中(a)和(c)所示,切割速比对割茬高度和重割率的影响最大,但两者成反比关系,如取 3 时对割茬高度效果最好而对重割率最差;由图 2(b)和(d)可知,切割速比对压扁率和碎草损失率的影响不大,当取 2 时最好,而此时割茬高度的效果最差。由于取 2.5 所对应各指标值与最优值很接近,所以综合选取切割速比 $K = 2.5$ 。

由图 2 中(b)可知,压辊圆周速度对压扁率的影响最大,选取 4 $m \cdot s^{-1}$ 最好;由图 2(d)所示,其对碎草损失率的影响次之,取 4.2 $m \cdot s^{-1}$ 最好;由图 2(a)和(c)可知,其对割茬高度和重割率的影响最小,取 4.2 $m \cdot s^{-1}$ 最好。观察压扁比例选取 4.2 $m \cdot s^{-1}$ 和 4 $m \cdot s^{-1}$ 的效果差别不大,因此,综合其他指标选取压辊圆周速度 $V = 4.2 m \cdot s^{-1}$ 。

由图 2 中(d)可知,拨禾速比对碎草损失率的影响最大,当选取 2.5 时最好;依据图 2 中的(a)、(c)、(b),其对割茬高度、重割率及压扁比例的影响次之,当取 2.5 时,对重割率和压扁比例最好,而对于割茬高度选取 3 较 2.5 稍好,综合考虑选取拨禾速比 $\lambda = 2.5$ 。从而,得到最优试验方案为 $K_2 V_2 \lambda_1$ 。

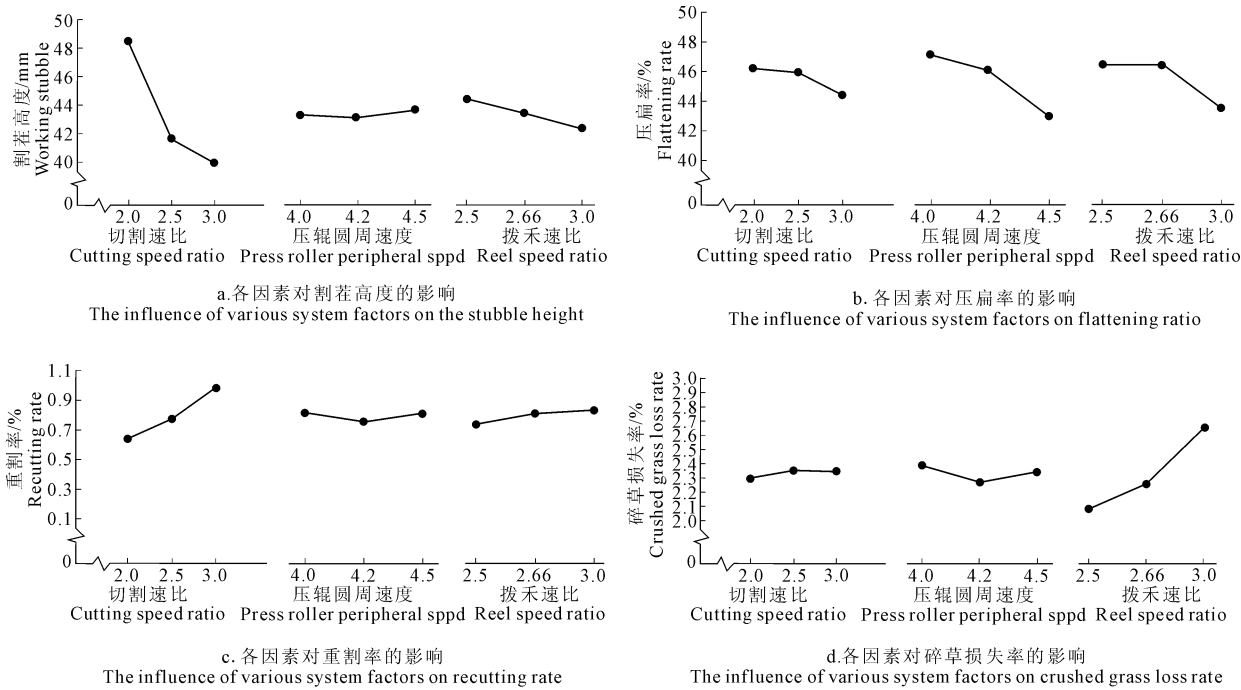


图 2 各因素对试验指标的影响

Fig.2 The influence of various system factors on the test index

3.5 最优组合试验

最优方案 $K_2 V_2 \lambda_1$ 在以上 9 个试验中没有出现,

按照前面所用的试验材料和方法,使切割速比为 2.5、压辊圆周速度为 4.2 $m \cdot s^{-1}$ 、拨禾速比为 2.5,

进行调制机传动系统作业性能的试验验证。试验结果表明,应用最优方案试验时,割茬高度达到 42 mm、重割率为 0.73%、压扁率为 46.5%及碎草损失率为 2.3%,各项试验指标均符合牧草收获农艺要求。

表 2 各系统性能试验方案与检测结果
Table 2 The experimental scheme and testing results of various system performance

实验序号 Test serial number	参数因素 Parameter factors			试验评价指标 Test evaluation index			
	切割速比 K	压辊圆周速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	拨禾速比 λ	割茬高度/mm	重割率/%	压扁率/%	碎草损失率/%
	Cutting speed ratio	Press roller circumferential speed	Reel speed ratio	Working stubble	Recutting rate	Flattening ratio	Crushed grass lass rate
1	2	4.0	2.50	49.0	0.60	49.0	2.13
2	2	4.2	2.66	48.5	0.62	47.5	2.15
3	2	4.5	3.00	48.0	0.70	42.0	2.60
4	2.5	4.0	2.66	42.0	0.80	48.5	2.30
5	2.5	4.2	3.00	40.0	0.75	45.0	2.65
6	2.5	4.5	2.50	43.0	0.72	44.2	2.10
7	3	4.0	3.00	39.0	1.05	44.0	2.70
8	3	4.2	2.50	41.0	0.90	46.0	2.00
9	3	4.5	2.66	40.0	1.00	43.0	2.32

4 结 论

1) 根据山地牧草收获性能要求,设计了一种结构简单、紧凑的牧草调制机。通过改变影响各系统作业的因素,以作业割茬高度低、重割次数少、压扁比例高及碎草损失小为试验评价指标,通过正交试验研究,应用综合平衡法得到该机作业时各因素的最优参数组合:切割速比为 2.5、压辊圆周速度为 $4.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、拨禾速比为 2.5。

2) 对最优组合作业参数进行试验,结果表明:作业割茬为 42 mm、重割率为 0.73%、压扁比例为 46.5%及碎草损失率为 2.3%,各项试验指标均符合牧草收获的性能要求。

参 考 文 献:

[1] 张英俊,王明利,黄 顶,等.我国牧草产业发展趋势与技术需求[J].现代畜牧兽医,2011,(10):8-11.

[2] 马国玉,袁洪方,刘鹏军,等.现阶段我国牧草机械的需求分析[J].农机化研究,2011,(2):222-225.

[3] 贾顺斌.苜蓿采用不同刈割方式在大田晾晒期间粗蛋白含量变化研究[J].现代农业科技,2011,(11):345-347.

[4] 张 华,杨 雪,曹喜春,等.影响紫花苜蓿营养价值的因素及

改善方法[J].饲料博览,2013,(5):12-14.

[5] 单贵莲,初晓辉,徐赵红,等.刈割时期的调制方法对紫花苜蓿营养品质的影响[J].草原与草坪,2012,32(3):17-21.

[6] 柴红伟.联合收割机往复式切割器性能研究[J].农业机械,2013,(10):133-136.

[7] CZ.卡那沃依斯基(波兰).收获机械[M].北京:中国农业机械出版社,1983.

[8] 王振强,赵春花,刘 伟.手扶牧草收割机往复式切割器主要参数试验分析[J].山西农业科学,2011,39(9):1001-1004.

[9] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(下册)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:1145-1146.

[10] Shinner Kevin J, Matthew F, Herzmman. Wide-swath drying and post cutting processes to hasten alfalfa drying[C]//ASABE Annual Conference 2006. Portland, Oregon: ASABE, 2006:1049-1050.

[11] Shinner Kevin J, Wuest J M. Intensive conditioning of alfalfa: drying rate and leaf loss[C]//ASABE Annual Conference 2006. Portland, Oregon: ASABE, 2006:1051-1053.

[12] 高东明,王德成,郝丽颖,等.割草调制机的调制机构设计与试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2013,34(3):287-292.

[13] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.

[14] 李秀荣,高晨鸣.GB/T10940—2008.往复式割草机[S].呼和浩特:中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院,2008.

[15] 敖恩查,高晨鸣.GB/T21899—2008.割草压扁机[S].呼和浩特:内蒙古畜牧业装备工程技术研究中心,2008.

[16] 杨铁军,汪世琦.GB/T9699—1999.割草压扁机试验方法[S].呼和浩特:呼和浩特畜牧机械研究院,1999.