

往复式双动刀灌木收割机设计与试验*

刘志刚^{1,2} 王德成¹ 翟改霞² 刘贵林² 张 宁² 郝兴玉²

(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: 针对旋转式切割器切割低龄小径级柠条时存在的茬口质量差、漏割率高、缠绕等难以适应柔弹性茎秆的问题,设计了一种利用无急回特性双曲柄摇杆机构带动两组刀片相向切割的往复式双动刀灌木收割机;分析了其割刀位移、速度、加速度与曲柄转角的关系,并对双动刀切割速比进行了分析与试验。结果表明:在机具前进速度 v_m 为 1.0 m/s、切割速比 λ_q 为 1.6 时收割 2 年生柠条效果最佳,其茬高不合格率为 2.3%,破茬率为 3.3%,漏割率为 2.3%,重割率为 2.7%,生产率为 0.38 hm²/h。

关键词: 双曲柄摇杆 双动刀 灌木收割机 设计 试验

中图分类号: S255.91*9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0102-05

Design and Experiment on Reciprocating Double Knife Shrub Harvester

Liu Zhigang^{1,2} Wang Decheng¹ Zhai Gaixia² Liu Guilin² Zhang Ning² Hao Xingyu²

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

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

Abstract: Aiming at poor stubble quality, high loss cutting rate and winding leakage for cutting young and small diameter caragana microphylla of rotary cutter, a kind of reciprocating double knife shrub harvester was designed, which using double crank and rocker mechanism with no fast-returning characteristic to drive two sets of knives move and cut in opposite direction. The relation between the displacement, velocity and acceleration of the cutter with crank rotation angle was analyzed. And the double-acting blade cutting speed ratio was analyzed and tested. The results showed that it was best to harvest 2 years old caragana microphylla by the machine when the machine forward velocity was 1.0 m/s and cutting speed ratio was 1.6. The fraction defective of stubble height was 2.3%, the broken stubble rate was 3.3%, the miss cutting rate was 2.3%, the recutting rate was 2.7%, and the productivity was 0.38 hm²/h.

Key words: Double crank rocker Double knife Shrub harvester Design Experiment

引言

柠条是豆科 (Leguminosae) 锦鸡儿属 (Caragana) 多年生落叶灌木,广泛分布于我国北方各省区,目前全国柠条林保有量约 200 万 hm²。柠条不但具有防风固沙、水土保持的特性,还是一种良好的饲用植物^[1]。据研究,柠条随着年龄的增长,内含家畜生长所必需的矿质元素、粗蛋白、粗脂肪含

量呈下降趋势,而粗纤维含量呈上升趋势。柠条的营养成分和粗纤维在一年中的不同生育期亦有变化。其中,从休眠期到开花期其矿质元素、粗蛋白、粗脂肪含量呈逐渐增高的趋势,而粗纤维含量则明显下降,主要营养成分向有利于家畜利用的方向变化,其中粗蛋白质量分数由 8.26% 增加到 19.61%,粗纤维的质量分数由 45.4% 降低到 27.9%。但是,柠条收割会影响到其土壤养分的含量,其中全氮、全

收稿日期: 2013-06-25 修回日期: 2013-07-10

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2013BAD22B02) 和科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目 (12C26211500972)

作者简介: 刘志刚,博士生,中国农业机械化科学研究院高级工程师,主要从事牧草收获加工机械研究, E-mail: lzhg2008@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

磷、速效磷和速效钾的含量均随收割频率的增大而减少,因此,饲用型柠条应以 2 年为一个收割周期,开花期收割最佳^[2-3]。目前,国内外灌木类收割以旋转式切割器为主,然而,旋转式切割器收割生长季低龄小径级柠条时存在切割质量差、漏割率高、缠绕等问题。为此,结合当前饲用型柠条收割的特点,参照欧美国国家收获高产人工种植饲草的双动刀割草机^[4],设计一种往复式双动刀灌木收割机,并对其进行研究与试验,以获得较好的参数和效果,从而为合理开发、科学利用柠条这一优质饲草资源提供技术支撑。

1 基本结构设计及工作原理

1.1 基本结构设计

往复式双动刀灌木收割机的主要结构如图 1 所示,主要由外滑掌、刀梁、上动刀、下动刀、压刃(托刃)器、浮动挠枝机构、偏心轴式双曲柄连杆机构、飞轮、机架、内滑掌、传动机构、悬挂架等组成。其中偏心轴式双曲柄连杆机构如图 2 所示,主要由摇杆、底座、连杆等组成。上、下动刀刀座与摇杆通过摇杆刀座连接板连接;传动系统的传动带轮、飞轮与双偏心轴分别位于穿过底座的心轴两端。双偏心轴在心轴上呈 180°对称布置,其中靠近心轴前部的偏心轴带动下动刀运动,另外一个偏心轴带动下动刀运动,2 个偏心轴所带动的两把动刀在工作中以等速作相对运动。为使刀片间隙稳定可靠,压刃器采用间隙可调的宽型压刃器。

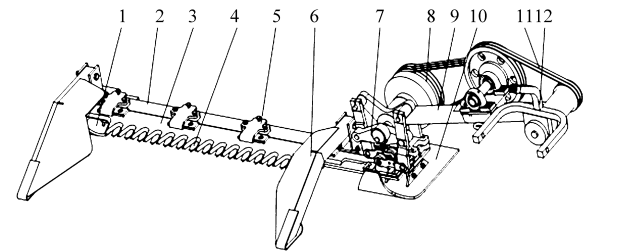


图 1 往复式双动刀灌木收割机整体结构图

Fig.1 Overall structure of reciprocating double knife shrub harvester

1. 外滑掌 2. 刀梁 3. 上动刀 4. 压刃(托刃)器 5. 浮动挠枝机构 6. 偏心轴式双曲柄摇杆机构 7. 飞轮 8. 机架 9. 内滑掌 10. 传动机构 11. 传动带 12. 悬挂架

1.2 工作原理

往复式双动刀灌木收割机采用后悬挂形式与小型四轮拖拉机挂接。工作时,拖拉机动力输出轴输出的动力经传动带轮传递给双曲柄连杆机构的偏心轴,双偏心轴通过连杆带动所对应的摇杆左右摆动,摇杆的一端与底座耳部的销轴铰接,另一端通过摇杆刀座连接板、上下动刀刀座带动上下动刀做直线

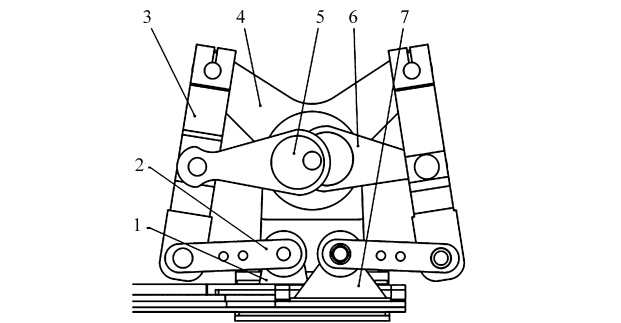


图 2 偏心轴式双曲柄摇杆机构结构图

Fig.2 Overall structure of eccentric bearing type double crank and rocker mechanism

1. 上刀座 2. 摇杆刀座连接板 3. 摇杆 4. 底座 5. 偏心轴 6. 连杆 7. 下刀座

往复运动,完成切割作业。

2 主要部件设计及参数确定

2.1 切割器割幅及动刀片结构参数的确定

往复式切割器是收割机的主要工作部件,其割幅应尽量大,但大的割幅将会有大的功率消耗与惯性振动,且由于整机过于庞大,将大大降低机具在山地丘陵地区作业的灵活性^[5]。通过实地测量统计,柠条丛根部直径一般在 400 ~ 800 mm 之间。因此,取往复式切割器有效切割幅宽 $B = 1\,000\text{ mm}$ 。

动刀片是切割器的主要工作零件,刀片的刃口有光刃和齿刃两种,由于柠条枝条硬度高于一般牧草茎秆,且有切割后的茬口低而整齐、无破茬等特殊要求,因此,选择具有切割阻力小、割茬整齐特点的光刃刃口的刀片作为该机具动刀片。另外,由于动刀片是一种易损件,应具有一定的耐磨性和一定的冲击韧性,因此,按国标规定,刀片材料为 T9 碳素工具钢^[6],刃部淬火和回火。淬火带从刃口向内 10 ~ 15 mm。淬火带硬度为 50 ~ 60 HRC,心部非淬火区的硬度不大于 35 HRC。

在本设计中,切割器刀片的选择参照牧草收割机双动刀切割器刀片几何尺寸及安装关系^[7],即刀片为外型轮廓呈六边形的梯形动刀片,如图 3 所示。主要结构参数:刃部高度 $h = 55\text{ mm}$,前桥宽 $b = 16\text{ mm}$,刀片底宽 $c = 58\text{ mm}$,刀片厚度 $d = 3\text{ mm}$,滑切角 $\alpha = 20^\circ$,刃口楔角 $\beta = 36^\circ$;两相邻刀片间的参数:刀片节距 $t = 72\text{ mm}$,两相邻刀片刃口底边间距 $e = 14\text{ mm}$;割刀行程 $S = \frac{t}{2} = 36\text{ mm}$ 。刀片设计为梯形而非三角形主要有两个原因:使刀片修磨后仍可保持原有高度;避免终了切割速度过低。刀杆上相邻刀片的底边间距 e 是为了不使初始切割速度为零。

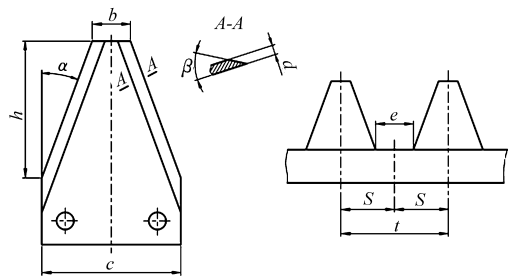


图 3 双动刀切割器刀片结构及安装主要参数示意图
Fig. 3 Sketch of blades structure and main assembly parameters of double knife cutter

2.2 无急回特性双曲柄摇杆机构设计

双曲柄摇杆机构的作用是将传动中的回转运动转变为刀片的往复直线运动,其传动简图如图 4 所示。

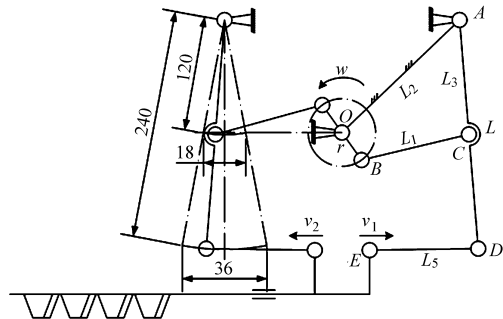


图 4 无急回特性双曲柄摇杆机构传动简图
Fig. 4 Drive system schematic of double cranks and rocker mechanism with no fast-returning characteristic

图中,四边形 $OACB$ 构成曲柄摇杆机构。为使切割效果稳定,采用无急回特性的曲柄摇杆机构,其几何特征为行程速比数 $K = 1$ (极位夹角 $\theta = 0$),存在的充要条件是曲柄与机架的平方和等于连杆和摇杆的平方和。即曲柄 OB 在 0° 与 180° 位置时, O 、 B 、 C 位于同一水平线上, OC 的长度分别为 $L_1 + r$ 和 $L_1 - r$ 。其在收割机上的具体表现为:上、下割刀往复平均速度相等。

设摇杆 AD 处于铅直位置时, DE 处于水平位置,且 $L_5 = 138\text{ mm}$ 。已知割刀行程 $S = 36\text{ mm}$,可得点 D 在以 A 点为圆心左右摆动时的极限位置在水平方向距离应为 36 mm ,则 C 点在水平方向极限位置距离为 18 mm ,由此可得 $r = 9\text{ mm}$ 。根据所确定的收割机曲柄摇杆机构外型尺寸,设定 $L_1 = 138\text{ mm}$, $L_3 = 120\text{ mm}$, $L_4 = 240\text{ mm}$,则有

$$L_2^2 + r^2 = L_1^2 + L_3^2 \tag{1}$$

可得 $L_2 = 182.7\text{ mm}$,由此确定了机构中各杆件的长度及相互位置关系。

2.3 上下割刀位移、速度、加速度与曲柄转角关系分析及仿真验证

分析图 4 所示的双曲柄摇杆机构可知,曲柄以

角速度 w 逆时针匀速转动,上下动刀以变速 v 做水平往复相向直线运动。以右侧摇杆及其所驱动的下割刀为分析对象,并设割刀向右移动时相关参数为正,摇杆处于铅直位置时下刀座位移为 0。则曲柄在一个回转周期内的转角与割刀的位移、速度、加速度关系为:曲柄转角为 0 及 2π 时,割刀位移为 18 mm ,速度为零,加速度负向最大;曲柄转角在 $\frac{\pi}{2}$ 附近时,割刀位移为 0,速度负向最大,加速度为零;曲柄转角为 π 时,割刀位移为 -18 mm ,速度为零,加速度正向最大;曲柄转角在 $\frac{3\pi}{2}$ 附近时,割刀位移为 0,速度正向最大,加速度为零。

为验证上述分析,利用 SolidWorks Motion 软件对所建模型进行运动学仿真分析。为使输出结果表达清晰,设定输入转速为 60 r/min ,即曲柄的一个回转周期为 1 s 。其结果如图 5~8 所示。

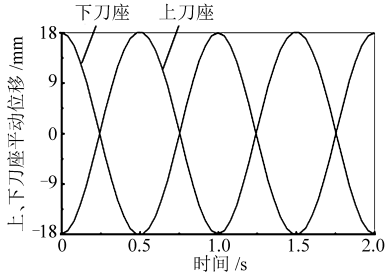


图 5 上、下刀座位移曲线
Fig. 5 Displacement curves of up and down blade holders

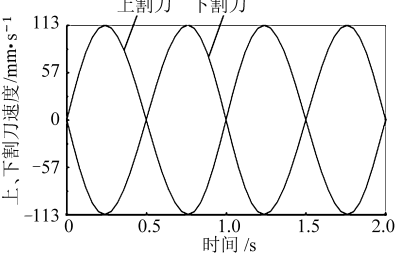


图 6 上、下割刀速度曲线
Fig. 6 Speed curves of up and down blades

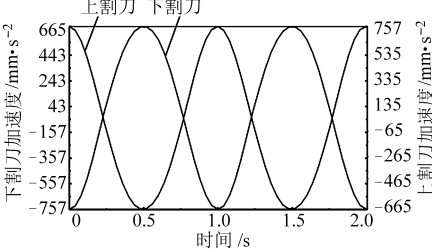


图 7 上、下割刀加速度曲线
Fig. 7 Acceleration curves of up and down blades

由图 5~8 中的运动曲线可知,其仿真结果与分析结果完全一致,而且其上、下割刀的位移、速度、加速度具有很好的对称性,这对上、下割刀惯性力的平衡较为有利。由此说明,该机构的设计合理。

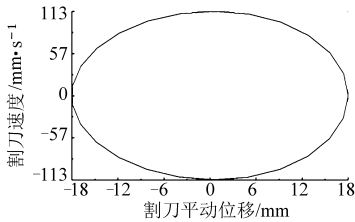


图 8 割刀位置与速度关系曲线

Fig. 8 Relation curves of cutter position and speed

2.4 切割器功率消耗估算

切割器总的功率消耗 P 包括切割作物的功率 P_q 、空运转功率 $P_k^{[8]}$ ，即

$$P = P_q + P_k = v_m B l_0 \times 10^{-3} + P_k \tag{2}$$

式中 v_m ——机具作业速度，m/s

B ——切割器割幅，m

l_0 ——茎秆切割比功，J/m²

本机与东方红-350 小型四轮拖拉机配套使用，前进速度 $v_m = 1.0$ m/s (拖拉机 II 挡，3.6 km/h)。 $B = 1.0$ m，切割柠条时 l_0 取 490 J/m^{2[9]}。 P_k 与切割器安装技术及状态有关，对单动刀切割器一般每米割幅空运转功率为 0.6 ~ 1.2 kW，双动刀取较大值 1.1 kW/m。则 $P = 1.59$ kW。

2.5 曲柄转速及切割速比的确定

由图 6 可知，割刀的速度随时间呈正弦曲线变化。在实际设计往复式切割器时，平均速度 v_f 是重要参数之一。据研究，往复式切割器在切割作物时平均速度应大于等于 0.8 m/s。由于本机为双动刀，

取单刀 $v_{fd} = 0.8$ m/s，则 $v_f = 1.6$ m/s。则曲柄转速 n 、切割速比 λ_q 为

$$n = \frac{60 v_{fd}}{2 S} \times 10^3 \tag{3}$$

$$\lambda_q = \frac{v_f}{v_m} \tag{4}$$

计算得 $n = 667$ r/min (已圆整)， $\lambda_q = 1.6$ 。

3 试验与结果分析

试验地点在呼和浩特市和林格尔县樊家窑乡进行，该地区地形条件为硬梁坡地，地势基本平坦，地表凹凸不平，林地最大坡度 25°。试验时间为 2013 年 5 月 19 日，正值柠条花期。

在试验区内选择平茬后 2 年生的柠条作为收割对象，作业地段柠条的枝条长为 1 000 ~ 1 300 mm，基部直径为 5 ~ 15 mm。植株密度为 40 ~ 80 株/丛，柠条丛底部直径 600 mm 左右，丛距 2 m，行距 4 m。

试验时，机具以 1.0 m/s 的速度前进，分别在切割速比 λ_q 为 1.2、1.6、2.0 时进行柠条的收割作业。此时， v_{fd} 分别为 0.6、0.8 和 1.0 m/s，曲柄转速 n 分别为 500、667 和 833 r/min。

本试验依据 GB/T 21899—2008 割草压扁机的测定方法。选取连续的 3 丛柠条作为测试对象^[10]，并记录每一丛柠条的总株数、破茬株数、漏割株数、重割株数(测定区内无头的柠条枝条段的个数)和留茬高度大于 40 mm 的株数。表 1 ~ 3 为试验结果。

表 1 $\lambda_q = 1.2$ 时双动刀灌木收割机收割柠条试验结果

Tab. 1 Experimental results on $\lambda_q = 1.2$ when cut shrub using double knife shrub harvester

编号	植株密度/ 株·丛 ⁻¹	破茬数 /株	破茬率 /%	漏割数 /株	漏割率 /%	重割数 /株	重割率 /%	茬高大于(等于) 40 mm 株数/株	茬高不合格 率/%
1	51	3	5.9	3	5.9	1	2.0	4	7.8
2	67	3	4.5	5	7.5	1	1.5	2	3.0
3	74	4	5.4	3	4.1	2	2.7	3	4.1
合计	192	10	5.2	11	5.7	4	2.1	9	4.7

表 2 $\lambda_q = 1.6$ 时双动刀灌木收割机收割柠条试验结果

Tab. 2 Experimental results on $\lambda_q = 1.6$ when cut shrub using double knife shrub harvester

编号	植株密度 /株·丛 ⁻¹	破茬数 /株	破茬率 /%	漏割数 /株	漏割率 /%	重割数 /株	重割率 /%	茬高大于(等于) 40 mm 株数/株	茬高不合 格率/%
1	46	1	2.2	1	2.2	2	4.3	0	0
2	75	3	4	2	2.7	1	1.3	1	1.3
3	61	2	3.3	1	1.6	2	3.3	3	4.9
合计	182	6	3.3	4	2.3	5	2.7	4	2.3

对比分析表 1、表 2 的试验结果，切割速比由 1.2 增加为 1.6 后，其破茬率、漏割率、茬高不合格率均明显下降，重割率小幅上升；对比表 2、表 3 的试验结果，切割速比由 1.6 增加为 2.0 后，其破茬

率、漏割率、茬高不合格率均小幅下降，重割率上升明显。此外，观察收割后的灌丛，发现漏割主要发生在灌丛的机具前进方向一侧。

表 3 $\lambda_q = 2.0$ 时双动刀灌木收割机收割柠条试验结果

Tab. 3 Experimental results on $\lambda_q = 2.0$ when cut shrub using double knife shrub harvester

编号	植株密度 /株·丛 ⁻¹	破茬数 /株	破茬率 /%	漏割数 /株	漏割率 /%	重割数 /株	重割率 /%	茬高大于(等于) 40 mm 株数/株	茬高不合 格率/%
1	77	4	5.2	2	2.2	3	4.0	1	1.3
2	72	1	1.4	2	2.7	3	4.2	2	2.8
3	41	1	2.4	0	0	2	4.9	0	0
合计	188	6	3.2	4	2.1	8	4.3	4	2.1

4 结论

(1)通过对具有无急回特性双曲柄摇杆机构进行运动学仿真可知,其上、下割刀的位移、速度、加速度具有较好的对称性,如设计的上、下割刀装配质量相等,其惯性力将会很好地平衡,说明该机构能够在需要高速切割的往复式切割器上应用。

(2)由于柠条丛呈散射状生长,位于灌丛外围的个别枝条具有贴地横向生长趋势,因此,利用该机具收割时,其沿机具前进方向倾斜生长的枝条容易发生漏割现象。

(3)切割速比 $\lambda_q = 2.0$ 时,由于割刀的往复速度较高,其切割部件的磨损速度将加快,且整机的可靠性会降低;此外,由试验结果可知,其破茬率、漏割率、茬高不合格率较 $\lambda_q = 1.6$ 时下降并不显著,重割率却升高明显。因此,在机具前进速度为 1.0 m/s 时,其最佳切割速比为 1.6 。

(4)往复式双动刀灌木收割机收割 2 年生饲用型柠条时,性能稳定,作业顺畅,且有收割效率高、茬口质量好等特点。因此,该机能满足低龄小径级灌木的高速收割作业。

参 考 文 献

1 刘朝霞,张晓娟,贺振平,等. 内蒙古柠条产业化的现状与对策[J]. 林业科技管理,2004(1):13,42.

2 王聪,刘强,黄应祥,等. 刈割时间与加工方法对柠条营养价值的影响[J]. 中国畜牧杂志,2006, 42(7):54~56.
Wang Cong, Liu Qiang, Huang Yingxiang, et al. Effect of cutting period and processing method on the value of caragana korshinskii[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2006, 42(7):54~56. (in Chinese)

3 常春. 柠条生长季收割关键技术研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
Chang Chun. The key technology of cutting caragana during its growing season[D]. Huhhot: Agricultural University of the Inner Mongol, 2010. (in Chinese)

4 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,2007:1 134~1 138.

5 贺德. 9GN-1.2 型柠条平茬机的研制与试验[J]. 农业装备技术,2007,33(3):52~53.

6 镇江农业机械学院. 农业机械学:下册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981:367~371.

7 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,2009:185~186.

8 徐秀英,张维强,杨和梅,等. 小型牧草收获机双动切割装置设计与运动分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):156~161.
Xu Xiuying,Zhang Weiqiang,Yang Hemei,et al. Design and kinematic analysis of double-acting cutting device of walk-type pasture reaper [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7):156~161. (in Chinese)

9 马永康,张振国,边胤. 柠条收割机切割器的设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(7):202~204.

10 陈忠加,俞国胜. 5GZ-800 型自行手扶式灌木平茬机的设计与试验[J]. 湖南农业科学,2009(5):139~142.
Chen Zhongjia, Yu Guosheng. Experimental study and design on 5GZ-800 type self-propelled walking brush cutter[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(5):139~142. (in Chinese)