

柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化*

邱述金 郭玉明 郑德聪

(山西农业大学工学院, 太谷 030801)

摘要: 根据圆盘锯式切割系统的各部件的尺寸参数、柠条参数,在三维实体建模软件UG中建立单组切割部件和切割对象柠条的简化模型,导入动力学分析软件ADAMS中,对对象进行柔性体替换,进行刚柔耦合动力学特性分析。以切割锯盘的直径、厚度和切割部件的转速为影响因素,选取切割系统与柠条的作用力在各向的分力为评价指标表征柠条平茬效率,对影响平茬效率和功率的参数进行了三因素三水平的虚拟正交试验,得到各指标的响应面回归方程,并通过田间试验进行验证及对比分析。结果表明,当切割锯盘直径为400 mm,切割锯盘厚度为5 mm,切割部件转速为1 500 r/min时,单组切割部件的切割功率为12.32 kW,柠条收获机的平茬效果最好。

关键词: 柠条收获机 圆盘锯式切割器 动力学仿真 虚拟样机

中图分类号: S225.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0072-08

引言

柠条不仅防风固沙生态效益明显,而且是加工饲料、生物质燃料转化利用价值极高的灌木类植物。柠条机械化收获技术及装备的研究刚刚起步,生产中急需研制性能可靠、实用的柠条机械化生产装备^[1-4]。国内对茎秆类作物收获过程中茎秆切割特性的研究已经取得了较大进展^[5-11]。马永康等通过对柠条枝条切割过程和不同类型切割器的分析,得到了复合式圆盘联结扇形带齿刀片切割器及其相关计算与结构参数,设计了手扶式单圆盘柠条收割机^[12-13]。刘庆庭等对甘蔗收割机单圆盘根切器进行了虚拟样机研究,发现了多刀切割和重复切割现象,得出甘蔗和根切器的相对位置影响根茬与刀片间作用力的结论^[14-16]。

应用虚拟仿真技术对其他作物联合收获机进行仿真设计及分析已有许多成果^[17-23]。贺俊林等对玉米机械化收获中不分行收获技术和减轻机收损伤等关键性难点技术进行了系统的研究,应用ADAMS软件对收获作业中分禾机理及其影响参数进行研究,通过仿真模拟确定保持玉米茎秆直立姿态的工作参数组合^[24]。王申莹等对甜菜收获机自动对行探测机构进行研究,设计出土下果实收获机械自动对行机构,对影响自动对行的参数进行虚拟正交试

验研究,并进行了田间验证试验^[25]。张伟等对马铃薯收获机虚拟样机模型进行了动态仿真分析研究,并对其摆动筛传动装置进行动力学分析,对机型进行了优化^[26]。然而目前对柠条联合收获机的仿真尚未见报道。柠条联合收获机在平茬作业时,圆盘锯式切割器高速旋转切割柠条,多个锯齿先后与柠条作用,切割部件与柠条都受到较大的冲击载荷,极易导致柠条割裂而不能复壮^[27]。为此,本文对柠条切割系统进行仿真设计及分析,确定切割系统在平茬作业时的最优工作参数组合。

1 仿真

1.1 仿真方法

应用刚体简化模型模拟柠条特性会导致仿真分析产生较大的误差,而引入柔体柠条简化模型更能模拟其特性,因此需联合应用UG和ADAMS仿真分析柠条切割机构与柠条形成的刚柔耦合机构。在UG中建立各部件的刚性体简化模型,对装配体运行运动仿真模块,定义各杆件及运动副,生成ADAMS运动仿真分析需要的中间文件。将中间文件导入ADAMS中,根据柠条特性将其转变为柔性体模型,与切割系统模型形成刚柔耦合机构,设定各运动杆件间的运动副,添加驱动型式,施加相关载荷,进行动力学仿真分析。

收稿日期: 2013-12-20 修回日期: 2014-01-29

* 山西省科技攻关重点资助项目(20090311043)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111403130001)、山西省研究生优秀创新资助项目(20133061)和山西省重点实验室基金资助项目(2013011066-9)

作者简介: 邱述金, 博士生, 主要从事农业机械设计与性能试验研究, E-mail: sxauqsj@sina.com

通讯作者: 郭玉明, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物力学和农机技术研究, E-mail: guoyuming99@sina.com

1.2 柔性多体动力学理论

虚拟构件通过虚拟铰与原有柔性体连接^[28], 虚拟构件参考系的原点为

$$r_i = r_{i-1} + A_{i-1} ({}_0s'_{(i-1)i} + u'_{(i-1)i}) \quad (1)$$

其中 $u'_{(i-1)i} = \Phi_{i-1}^R q^f_{(i-1)i}$ (2)

式中 ${}_0s'_{(i-1)i}$ ——虚拟构件原点相对柔性体参考系未变形位置矢量

$u'_{(i-1)i}$ ——虚拟构件原点相对柔性体参考系变形矢量

A_{i-1} ——柔性体参考系姿态矩阵

Φ_{i-1}^R ——模态矩阵, 列由平移模态振型构成

$q^f_{(i-1)i}$ ——模态坐标 f ——模态坐标矢量

$i, i-1$ ——构件 i 和 $i-1$ 参考系间广义坐标

局部坐标系的角速度为

$$\omega'_i = A_{(i-1)i}^T \omega'_{i-1} + A_{(i-1)i}^T \Phi_{i-1}^\theta \dot{q}^f_{(i-1)i} \quad (3)$$

式中 ω'_i, ω'_{i-1} ——局部坐标系 $i, i-1$ 模态角速度

$A_{(i-1)i}^T$ ——转置柔性体参考系姿态矩阵

对式(1)求导并乘以 A_i^T 联立式(3)得柔性铰的速度递归方程

$$Y_i = B_{(i-1)i_1}^f Y_{i-1} + B_{(i-1)i_2}^f \dot{q}_{(i-1)i} \quad (4)$$

其中 $B_{(i-1)i_1}^f = \begin{bmatrix} A_{(i-1)i}^T & -A_{(i-1)i}^T \tilde{S}'_{(i-1)i} \\ 0 & A_{(i-1)i}^T \end{bmatrix}$

$$B_{(i-1)i_2}^f = \begin{bmatrix} A_{(i-1)i}^T \Phi_{i-1}^R \\ A_{(i-1)i}^T \Phi_{i-1}^\theta \end{bmatrix}$$

$$\tilde{S}'_{(i-1)i} = {}_0S'_{(i-1)i} + u'_{(i-1)i}$$

式中波浪符号表示斜对称矩阵。

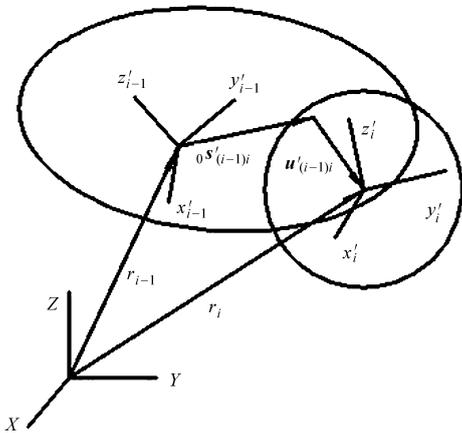


图 1 柔性铰链示意图

Fig. 1 Flexible hinge diagram

2 虚拟样机建模

2.1 建立切割系统简化模型

对晋北地区三年生柠条进行随机抽样, 进行柠条植株特性参数的测量, 所测结果如表 1 所示。

表 1 柠条参数

Tab. 1 Caragana korshinskii parameters mm

参数	平均值	标准差
柠条高度	1054	155
柠条直径	11.3	3.1
平茬高度	96.2	7.6

参考表中数据, 忽略柠条自身弯曲及变形, 取柠条高度为 1050 mm, 柠条直径为 11 mm, 平茬高度为 96 mm, 对柠条进行实体建模。

柠条收获机切割系统由 3 组相同圆盘锯式切割部件组成, 选取其中任意 1 组进行圆盘锯式切割部件建模。由于 ADAMS 建立的虚拟样机模型通常是简化模型^[29], 在保证仿真需要的部件和实际一致前提下, 把次要部件合并到主要部件, 以减少繁冗的约束。参照前期试制的柠条切割部件结构参数: 切割部件锯盘直径 $D=400$ mm, 锯盘厚度 $h=5$ mm, 对柠条切割系统进行建模并进行虚拟装配, 装配体如图 2 所示。

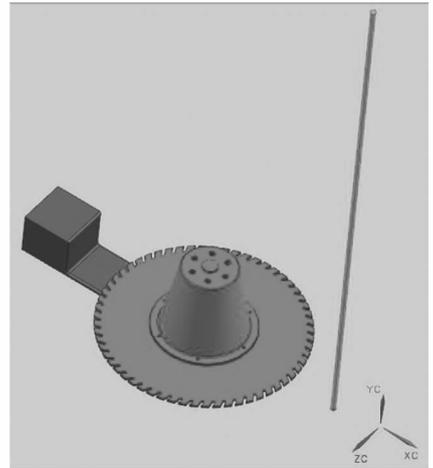


图 2 装配体示意图

Fig. 2 Assembly diagram

在 UG 中选取运动仿真模块, 将各主要部件定义为连杆, 添加其运动副、3D 接触及驱动。应用 ADAMS 求解器对运动仿真进行求解, 导出 ADAMS 软件分析所需文件。

2.2 定义接触力

在 ADAMS 中定义作用力的方法有补偿法 (Restitution) 和冲击函数法 (Impact) 两种。本文选择冲击函数法来计算碰撞作用力, 利用 Impact 函数来计算构件间的作用力, 构件间相互切入产生的弹性力和相对速度产生的阻尼力构成作用力。Impact 函数的一般表达式为

$$F =$$

$$\begin{cases} 0 & (q > q_0) \\ k(q_0 - q)^e - c_{\max} (dq/dt) \text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) & (q \leq q_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 q_0 ——两碰撞构件的初始距离
 q ——两碰撞构件的实际距离
 dq/dt ——两构件间距离随时间的变换率,即速度

k ——刚度 e ——碰撞系数

c_{\max} ——最大阻尼系数 d ——切割深度

为保证碰撞过程中阻尼力的连续性,采用 step 函数,形式为 $\text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0)$, 计算式为

$$\text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) = \begin{cases} h_0 & (x \leq x_0) \\ h_0 + (h_1 - h_0)\Delta^2(3 - 2\Delta) & (x_0 < x < x_1) \\ h_1 & (x \geq x_1) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\Delta = (x - x_0)/(x_1 - x_0)$

式中 h_0 ——step 函数的初始值

h_1 ——step 函数的最终值

x ——时间自变量

x_0 ——自变量 x 的初始值

x_1 ——自变量 x 的最终值

刚度 k 由 Hertz 弹性碰撞模型理论计算

$$k = \frac{16RE^2}{9} \quad (7)$$

其中 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}$$

式中 R_1, R_2 ——刀盘、柠条的曲率半径

E_1, E_2 ——刀盘、柠条的弹性模量

μ_1, μ_2 ——刀盘、柠条的材料泊松比

ADAMS 中接触作用力相关参数设定如表 2 所示。

表 2 Impact 参数设定

Tab. 2 Impact parameter settings

参数	数值
刚度/(N·mm ⁻¹)	1 573
应力指数	0.05
阻尼系数/(N·s·mm ⁻¹)	0.1
穿透深度/mm	10.0
静摩擦因数	0.3
动摩擦因数	0.1

2.3 生成刚柔耦合模型

采用离散化的方法生成柠条柔性体。柠条的物性参数为:泊松比 0.33,弹性模量 1.29×10^{10} Pa,密度 480 kg/m^3 ^[30]。根据上述参数,通过 Flexible bodies 下 Rigid to Flex 模块将柠条杆件生成柔性体模型。将中性文件导入到 ADAMS 中,定义各杆件属性,设置运动副及驱动,用柠条柔性体模型代替刚

性体模型,添加碰撞,生成切割系统与柠条的刚柔耦合模型如图 3 所示。

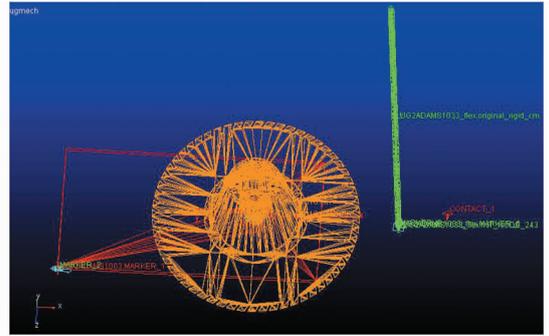


图 3 切割部件仿真图

Fig. 3 Cutting component simulation diagram

3 虚拟试验

3.1 试验方法

在柠条联合收获机切割系统虚拟样机试验中,主要研究影响柠条切割性能的机构参数和工作参数。柠条生长地貌复杂,在实际作业中柠条收获机前进速度限制为 $1.2 \sim 1.5 \text{ km/h}$,设置收获机前进速度为常量 1.5 km/h (420 mm/s),以圆盘锯式切割部件的直径、厚度和转速为影响因素,应用虚拟正交试验优化设计参数,进行三因素三水平正交试验,观察各因素对目标的影响。

通过对切割部件作业参数进行虚拟样机试验发现,切割系统是否能够顺利完成柠条平茬的关键在于切割锯盘与柠条之间的接触作用力。圆盘锯式切割部件高速旋转并随柠条联合收获机前进时,与柠条相互作用,显示多片锯齿先后切割柠条。随切割深度的增加,切割力逐渐增大,柠条断裂后切割力变小。因此取切割部件与柠条间在 x, y, z 3 个方向上的最大峰值力 F_x, F_y, F_z 3 个指标作为柠条平茬效率的试验指标。

考虑另一重要试验指标切割部件的功率,即切割部件上锯齿切割柠条所消耗的功率,其计算公式为

$$P = \frac{\pi n T}{30\,000} \quad (8)$$

其中 $T = \tau W_t$ $W_t = \frac{\pi D^3}{16} (1 - \alpha^4)$

式中 P ——锯齿切割柠条所耗功率, kW

T ——切割部件最大扭矩, N·m

τ ——最大剪应力, N

W_t ——抗扭截面系数

D ——切割部件转轴外径,取 30 mm

α ——转轴内、外径之比,取 $2/3$

3.2 试验设计

采用中心组合精度设计方案^[31], 虚拟试验因素水平设计编码如表 3 所示, 虚拟试验的响应面设计方案与试验结果如表 4 所示。

3.3 结果分析

应用 SAS 软件对虚拟试验所得数据进行响应面分析处理, 分别得到 x 、 y 、 z 轴方向力和功率与各因素值的响应面方程为

表 3 虚拟试验因素水平编码

Tab.3 Coding of virtual test factors and levels

编码	因素		
	直径 a /mm	厚度 b /mm	转速 c /($r \cdot \min^{-1}$)
-1.681 8	316	1.74	995
-1	350	3	1 200
0	400	5	15 00
1	450	7	1 800
1.681 8	484	8.26	2 005

表 4 虚拟试验的响应面设计方案和试验结果

Tab.4 Response surface design and experimental data of virtual test

试验号	A	B	C	F_x /N	F_y /N	F_z /N	P /kW
1	-1	-1	-1	4 878	475	3 515	2.98
2	-1	-1	1	6 898	398	3 775	4.80
3	-1	1	-1	6 530	523	6 490	5.49
4	-1	1	1	14 045	1 019	10 811	13.75
5	1	-1	-1	6 486	433	3 513	6.33
6	1	-1	1	7 397	403	38 25	10.34
7	1	1	-1	11 081	1 069	8 649	15.59
8	1	1	1	14 045	792	9 729	26.29
9	-1.681 8	0	0	6 329	318	3 396	2.27
10	1.681 8	0	0	12 721	811	7 848	24.25
11	0	-1.681 8	0	6 500	4 308	3 333	5.27
12	0	1.681 8	0	13 487	222	8 571	13.56
13	0	0	-1.681 8	6 582	125	3 417	3.59
14	0	0	1.681 8	17 233	221	14 369	30.39
15	0	0	0	121 52	137	7 754	12.27
16	0	0	0	121 01	150	7 665	12.13
17	0	0	0	120 98	143	7 724	12.22
18	0	0	0	121 38	136	7 690	12.17
19	0	0	0	121 14	148	7 711	12.20
20	0	0	0	120 96	139	7 734	12.24

$$F_x = -119 825 + 470.03a + 393.35b + 30.95c - 0.49a^2 + 3.06ba - 278.88b^2 - 0.047ca + 1.57cb - 0.0041c^2 \quad (9)$$

$$F_y = 13 448 - 62.39a - 381.30b - 0.59c + 0.089a^2 + 0.45ba + 17.41b^2 - 0.0061ca + 0.068cb + 0.00091c^2 \quad (10)$$

$$F_z = -67 743 + 312.99a + 1 019.37b + 0.76c - 0.33a^2 + 1.29ba - 193.20b^2 - 0.027ca + 1.01cb + 0.0036c^2 \quad (11)$$

$$P = 23.69 + 0.0077a - 4.99b - 0.051c - 0.000064a^2 + 0.017ba - 0.41b^2 + 0.000039ca + 0.0027cb + 0.000013c^2 \quad (12)$$

F_x 为切割部件正面切割柠条的受力, 此作用力有利于柠条切割, 但是不宜过大, 否则会推倒柠条; F_y 为切割部件前进时沿柠条向上或向下的力, 是切割部件与柠条之间发生相对位移的摩擦力, 因此指标 F_y 越小越好; F_z 为切割部件滑切柠条力, 因此越

大越好。同时考虑功率 P , 在收获机切割系统额定功率内取最大值, 柠条平茬效果最佳。

对各响应值进行响应面模型因素效应检验, 分析结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 对指标 F_x 影响因素主次顺序为 b 、 c 、 a , 各因素效应检验均显著; 对指标 F_y 影响因素主次顺序为 a 、 b 、 c , 切割锯盘直径的效应检验较显著; 对于指标 F_z 的影响主次顺序为 b 、 c 、 a , 切割锯盘的厚度与转速的效应检验显著; 对功率 P 的影响主次顺序为 c 、 a 、 b , 各因素效应检验均显著。

试验设计柠条收获机单组圆盘锯式切割部件功率预期为 10 ~ 13.3 kW, 即在 $10 < P < 13.3$ 条件下, 按照 F_y 取最小值, F_z 取最大值的原则进行响应面岭脊分析, 得到最佳试验因素组合 405.12 (a)、5.15 (b)、1 533.01 (c), 即圆盘锯式切割部件直径 405.12 mm、厚度 5.15 mm 和转速 1 533.01 r/min, 柠条收获机平茬效率最高。

表5 响应面模型因素效应检验

Tab.5 Response surface model factors effect test

指标	因素	自由度	平方和	均方	F	Pr > F
F_x	a	4	48 187 976	12 046 994	6.26	0.008 6
	b	4	98 734 971	24 683 743	12.84	0.000 6
	c	4	84 959 009	21 239 752	11.05	0.001 1
F_y	a	4	877 348	219 337	3.80	0.039 5
	b	4	388 342	97 086	1.68	0.2298
	c	4	182 327	45 582	0.79	0.557 6
F_z	a	4	16 837 327	4 209 332	1.37	0.312 2
	b	4	76 505 995	19 126 499	6.22	0.008 9
	c	4	49 296 108	12 324 027	4.01	0.034 2
P	a	4	370.128 494	92.532 124	6.92	0.006 2
	b	4	269.831 027	67.457 757	5.04	0.017 4
	c	4	401.200 969	100.300 242	7.50	0.004 6

4 验证试验

为了验证虚拟样机试验结果,将不同直径、厚度的切割锯盘装配在山西农业大学研制的4GN-1900E型柠条平茬收割机上,并于2013年4月在山西省定襄县柠条3年期试验田进行样机验证试验。

4.1 试验设备及器材

4GN-1900E型柠条平茬收割机主要技术参数如表6所示。

表6 4GN-1900E型柠条平茬收割机主要技术参数

Tab.6 Main technical parameters of 4GN-1900E caragana harvester

参数	数值
结构型式	前置式
配套动力/kW	58.9
切割方式	圆盘锯式切割部件
割幅宽度/mm	1 600
平茬高度/mm	2~10
作业速度/(km·h ⁻¹)	1~5

试验用主要工具及量具:皮尺(量程50 m,精度1 cm),卷尺(量程5 m,精度1 mm),标杆,数码秒表,数码相机。

4.2 试验方法

在3年生柠条种植地随机取若干2 m×20 m的地块,采用Box-Behnken设计,田间试验因素水平编码如表7所示。

表7 田间试验因素水平编码

Tab.7 Coding of field test factors and levels

编码	因素		
	直径 a/mm	厚度 b/mm	转速 c/(r·min ⁻¹)
-1	350	3	1 200
0	400	5	1 500
1	450	7	1 800

田间试验Box-Behnken设计方案与结果如表8所示,按表8中试验编号依次完成验证试验^[31],以柠条平茬效率为评价柠条平茬效果的指标,柠条平茬效率的计算公式为

$$\eta = \frac{N_1}{N_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中 N_1 ——20 m长度内平茬的柠条总数

N_0 ——20 m长度内的柠条总数

表8 田间试验Box-Behnken设计方案与结果

Tab.8 Field test Box-Behnken design and experimental data

试验 编号	因素			柠条平茬 效率 $\eta/\%$
	直径 a/mm	厚度 b/mm	转速 c/(r·min ⁻¹)	
1	350	3	1 500	68.5
2	350	7	1 500	74.5
3	450	3	1 500	69.8
4	450	7	1 500	75.5
5	400	3	1 200	67.1
6	400	3	1 800	72.3
7	400	7	1 200	68.6
8	400	7	1 800	59.6
9	350	5	1 200	70.6
10	450	5	1 200	68.3
11	350	5	1 800	70.9
12	450	5	1 800	64.7
13	400	5	1 500	88.4
14	400	5	1 500	88.7
15	400	5	1 500	87.9

4.3 试验结果分析

对田间试验Box-Behnken设计方案与结果进行响应面分析,得到柠条平茬效率与各因素值的响应面回归方程为

$$\eta = -818.37 + 2.41a + 31.69b + 0.47c - 0.0029a^2 - 0.00075ba - 2.25b^2 - 0.000065ca - 0.0059cb - 0.00014c^2 \quad (14)$$

应用SAS软件对田间试验结果进行响应面分析,结果如表9所示。

表9 η 响应面模型因素效应检验

Tab.9 Variance analysis of field test results

因素	自由度	平方和	均方	F	Pr > F
a	4	203.600 256	50.900 064	3.16	0.119 3
b	4	348.987 083	87.246 771	5.42	0.046 1
c	4	632.064 776	158.016 194	9.82	0.013 8

由表9可知,因素c对柠条平茬效率影响最显著,在柠条收获机工作参数选择过程中应首要考虑切割锯盘转速;因素a、b均显著,且b因素对指标的影响比a因素大,即样机中切割锯盘的厚度对柠条平茬质量的影响比切割锯盘直径对其影响大,在样

机结构设计过程中应首要考虑切割锯盘厚度。

对田间试验数据进行响应面岭脊分析,选择最大响应岭脊点作为最佳处理,柠条平茬率的响应值是 88.357 665,岭脊点坐标为 395.680 609 (a)、5.039 226 (b)、1 486.081 566 (c)。对比分析虚拟样机试验结果与田间试验结果,各影响因素对柠条收获机平茬效率及功率的影响趋势一致,优化得到最优参数组合为 $a_2 b_2 c_2$ 。

5 结论

(1) 采用 UG 软件建立了柠条切割系统简化装配体模型,导出 ADAMS 软件仿真分析所需文件;根据柠条特性在 ADAMS 软件中建立了柠条柔性体模

型,与切割系统形成刚柔耦合机构。

(2) 联合应用 UG、ADAMS 软件对柠条切割机构进行多体动力学仿真分析,研究了切割系统平茬作业过程中柠条与刀盘的动力学特性。

(3) 对柠条收获机圆盘锯齿式切割部件进行了虚拟试验,得到切割部件在 x 、 y 、 z 方向力和单组切割部件功率响应面方程,并与田间试验结果进行对比分析。结果表明切割部件的直径、厚度和切割部件的转速对柠条平茬效率的影响趋势一致,得到最优参数组合均为 $a_2 b_2 c_2$,即切割锯盘直径为 400 mm,切割锯盘厚度为 5 mm,切割转速为 1 500 r/min 时,单组切割部件的切割功率为 12.32 kW,柠条收获机的平茬效率最高。

参 考 文 献

- 范利海,傅万四.我国灌木收割平茬机械发展现状调查分析[J].木材加工机械,2010,21(6):30-32.
Fan Lihai, Fu Wansi. Study investigation of development of bush harvesting machinery[J]. Wood Processing Machinery, 2010, 21(6):30-32. (in Chinese)
- 梁建平,慕厚春,杨浩生,等.沙生灌木产业及平茬技术装备探讨[J].内蒙古林业科技,2010,36(2):43-46.
Liang Jianping, Mu Houchun, Yang Haosheng, et al. Discussion on desert shrubs industry and stumping technology equipment[J]. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2010, 36(2):43-46. (in Chinese)
- 王飞,俞国胜,陈忠加,等.步进手扶圆锯片式割灌木机用于灌木平茬收割试验研究[J].林业机械与木工设备,2009,37(3):18-20.
Wang Fei, Yu Guosheng, Chen Zhongjia, et al. Experimental study on the application of stepping hand-held circular saw type brush cutter in shrub harvesting[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(3):18-20. (in Chinese)
- 李宁,俞国胜,张建中,等.柠条剪断力与刀具前角之间关系的研究[J].湖南农业科学,2009(3):124-126.
Li Ning, Yu Guosheng, Zhang Jianzhong, et al. Relation between shearing forces of caragana and rake angles[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(3):124-126. (in Chinese)
- 李丹婷,张志毅.沙生灌木平茬机割刀参数的优化研究[J].农机化研究,2010,32(7):173-176.
Li Danting, Zhang Zhiyi. Optimization research on cutter parameters of desert shrub cutting stubble[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(7):173-176. (in Chinese)
- 李丹婷,张志毅,李岩,等.沙生灌木平茬机切割器刀口曲线的设计[J].农机化研究,2008,30(12):95-97.
Li Danting, Zhang Zhiyi, Li Yan, et al. The design of desert shrub stubble machine cutter's blade curve[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12):95-97. (in Chinese)
- 李红波,郭玉明.小麦茎秆变刚度模型与临界载荷[J].农业机械学报,2012,43(2):70-74.
Li Hongbo, Guo Yuming. Mechanical model with varying stiffness and critical grain load of wheat stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):70-74. (in Chinese)
- 李宁,俞国胜.灌木收割机理及装备研究[J].安徽农业科学,2009,37(4):1862-1864.
Li Ning, Yu Guosheng. On mechanism and equipment of large-scale shrub harvester[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(4):1862-1864. (in Chinese)
- 万其号.沙生灌木圆盘式切割器切割对比试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
Wan Qihao. Contrast test and study on disc cutter of sandy shrub harvester[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 郭玉明,袁红梅,阴妍,等.茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J].农业工程学报,2007,23(7):14-18.
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7):14-18. (in Chinese)
- 梁莉,郭玉明.作物茎秆生物力学性质与形态特性相关性研究[J].农业工程学报,2008,24(7):1-6.
Liang Li, Guo Yuming. Correlation study of biomechanical properties and morphological characteristics of crop stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7):1-6. (in Chinese)
- 马永康.柠条切割机理及收割机切割器设计研究[J].山西农业大学学报:自然科学版,2006,26(6):119-122.
Ma Yongkang. The cutting theory of ningtiao and the design of the cutting machine of the harvester[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2006, 26(6):119-122. (in Chinese)
- 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.

- 14 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.甘蔗收割机单圆盘根切器虚拟样机研究[J].农业机械学报,2007,38(8):78-81.
Liu Qingting, Qu Yinggang, Qing Shangle, et al. Virtual prototype study on single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(8):78-81. (in Chinese)
- 15 刘庆庭,区颖刚,卿上乐.光刃刀片切割甘蔗茎秆时根茬破坏力学分析[J].农业机械学报,2007,38(9):51-54.
Liu Qingting, Qu Yinggang, Qing Shangle. Mechanics analysis on stubble damage of sugarcane stalk during cutting by smooth-edge blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9):51-54. (in Chinese)
- 16 卿上乐,区颖刚,刘庆庭.甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J].农业机械学报,2006,37(1):51-54.
Qing Shangle, Qu Yinggang, Liu Qingting. Kinematics of single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(1):51-54. (in Chinese)
- 17 杨海,周海波,冯小川,等.锯齿形双圆盘切割器切割原理分析与仿真[J].农机化研究,2011,33(9):23-26.
Yang Hai, Zhou Haibo, Feng Xiaochuan, et al. Cutting principle analysis and simulation of hackle dual-disc cutter bar[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(9):23-26. (in Chinese)
- 18 陈国晶,赵冰,孙鹏.甘蔗收割机单圆盘切割器切割运动分析与仿真[J].农机化研究,2009,31(11):107-110.
Chen Guojing, Zhao Bing, Sun Peng. Kinematics and simulation of single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(11):107-110. (in Chinese)
- 19 刘先杰.小型甘蔗联合收割机流程虚拟仿真分析及集蔗机构的改进[D].南宁:广西大学,2006.
Liu Xianjie. Flow virtual simulation analysis and collecting device amelioration of the minitype sugarcane harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- 20 崔涛,刘佳,张东兴,等.基于ANSYS和ADAMS的玉米茎秆柔性体仿真[J].农业机械学报,2012,43(增刊):112-115.
Cui Tao, Liu Jia, Zhang Dongxing, et al. Flexible body simulation for corn stem based on ANSYS and ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):112-115. (in Chinese)
- 21 陈海涛,顿国强.基于虚拟样机动力学仿真的大豆扶禾器参数优化[J].农业工程学报,2012,28(18):23-29.
Chen Haitao, Dun Guoqiang. Optimization of parameters for soybean lifter based on dynamic simulation of virtual prototype[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(18):23-29. (in Chinese)
- 22 田凤霞,司景萍,万方军,等.基于UG、ANSYS和ADAMS的联合仿真研究[J].公路与汽运,2010(3):4-7.
- 23 蒲明辉,李兆龙,李竞,等.基于RecurDyn和ANSYS的甘蔗切割机构研究[J].农机化研究,2012,34(12):36-39.
Pu Minghui, Li Zhaolong, Li Jing, et al. Research of the sugarcane cutting mechanism based on RecurDyn and ANSYS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012,34(12):36-39. (in Chinese)
- 24 贺俊林.低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D].长春:吉林大学,2007.
He Junlin. Biomimetic surface of snapping rolls with lower damage action and simulation of no-row feed-in mechanism of corn harvesters[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- 25 王申莹,胡志超,彭宝良,等.基于ADAMS的甜菜收获机自动对行探测机构仿真[J].农业机械学报,2013,44(12):62-67.
Wang Shenying, Hu Zhichao, Peng Baoliang, et al. Simulation of auto-follow row detection mechanism in beet harvester based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):62-67. (in Chinese)
- 26 王海涛.基于ADAMS的4UX-550型马铃薯收获机仿真研究[D].兰州:甘肃农业大学,2008.
Wang Haitao. Simulation of 4UX-550 potato harvester based on ADAMS[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 27 李岩.柠条平茬断面质量评价指标体系的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
Li Yan. Research on establishment the quality evaluation indicator system for cross-section of caragana[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 28 焦晓娟,张潜涛,彭斌彬.RecurDyn多系统优化仿真技术[M].北京:清华大学出版社,2010:31-32.
- 29 张晋西,张甲瑞,郭学琴.UG NX/Motion机构运动仿真基础及实例[M].北京:清华大学出版社,2009:317-321.
- 30 武志明.柠条平茬收割机切割机理及关键技术部件的设计研究[D].太谷:山西农业大学,2013.
Wu Zhiming. Design and research of caragana korshinskii harvester cutting mechanism and key technology components[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 31 王玉顺.试验设计与统计分析SAS实践教程[M].西安:西安电子科技大学出版社,2012:47-56.
- 32 张正中,梁式,吕焕培,等.基于ANSYS/LS-DYNA的甘蔗切割动力学仿真分析[J].农机化研究,2010,32(1):64-67.
Zhang Zhengzhong, Liang Shi, Lü Huanpei, et al. Dynamic simulation analysis of sugarcane cutting on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(1):64-67. (in Chinese)
- 33 赖晓,李尚平,秦志文,等.新型甘蔗收割装置的仿真分析与试验研究[J].农机化研究,2011,33(2):102-105.
Lai Xiao, Li Shangping, Qin Zhiwen, et al. Simulation and experiment study on a new sugarcane cutting device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(2):102-105. (in Chinese)

Dynamic Simulation of Disc Saw Cutter System of Caragana Korshinskii Harvester

Qiu Shujin Guo Yuming Zheng Decong

(College of Engineering and Technology, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: The disc saw cutter system is one of the key components in caragana korshinskii harvester, and determines the cutting quality of caragana korshinskii. We established a simplified model of the cutter based on the parameters of each part of the disc saw cutter system, and built the cutting object caragana korshinskii model combining with the caragana korshinskii parameters. These parameters were introduced into dynamic analysis software ADAMS, and the cutting object was replaced as flexible body. The rigid-flexible coupling dynamic analysis of caragana korshinskii was conducted while the cutting institution was working. Considering the diameter, thickness and rotational speed of the disc saws as factors, the impact-force of x (direction of operation), y (vertical upward), and z (horizontal to left direction) axes between caragana plant and cutter were selected as the response function to represent the caragana cutting efficiency. A virtual orthogonal test of three factors and three levels was performed on parameters, which were related to the cutting efficiency and power. The response surface regression equation of each indicator was obtained, and the validation and comparative analysis was performed by field experiment. The result showed when the disc saw diameter was 400 mm, thickness was 5 mm and the rotational speed was 1 500 r/min, the cutting power of one cutting component was 12.32 kW, and the cutting efficiency was the best. This study provided the design basis for selecting the parameters of caragana korshinskii combine harvester.

Key words: Caragana korshinskii harvester Disc saw cutter Dynamic simulation Virtual prototype

(上接第 111 页)

Partial Constrained Damping Design of Sensitive Plate for Grain Loss Monitoring Sensor

Liang Zhenwei Li Yaoming Zhao Zhan Xu Lizhang Tang Zhong

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The relationship between response of grain impact sensitive plate in grain loss monitoring sensor and damping ratio was theoretically analyzed, and the importance of damping design in sensitive plate was pointed out. A method to increase the damping ratio of the system was proposed, which could quickly attenuate harmonic vibration of sensitive plate by laying a constrained damping layer on sensitive plate. Through grain collision response test on sensitive plate with different damping loss factor, optimal material and structure of the sensitive plate were determined, and the modal analysis of the sensitive plate was carried out though ANSYS software to find out the best location of constrained damping layer on sensitive plate. Grain collision response test results showed that, the time of grain collision signal waveform decayed to 1.5 V was shorten from 10 ms to about 3 ms before and after partial constrained damping treatment, which proved that the detecting frequency of grain loss monitoring sensor was greatly improved.

Key words: Combine harvester Grain loss sensor Sensitive plate Damping ratio Modal analysis