

双圆盘割草机切割器虚拟样机设计与试验*

赵满全¹ 张宁¹ 杨铁军² 史艳花³

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院, 呼和浩特 010010; 3. 武汉轻工大学机械工程学院, 武汉 430023)

摘要:应用 SolidWorks 的参数化设计功能建立 9YG-130 型双圆盘割草机切割器各零部件三维实体模型,通过约束装配完成虚拟样机设计,将模型导入动力学分析软件 ADAMS 后进行运动仿真,得到了切割机构在前进速度 2.78 m/s、刀盘转速 2 000 r/min 时刀片顶点的运行轨迹,根据运动轨迹可计算其重割面积。对模型进行四因素三水平虚拟正交试验,采用 Design-Expert 8.0 软件进行方差分析,结果表明,最佳取值为 $v_g = 57.01$ m/s, $v_j = 2.76$ m/s, $h = 34.06$ mm, $m = 3$ 时割草机的重割率得到有效降低。通过实际样机试验结果验证了该设计满足割草机对草业技术的要求,提高了设计效率和准确性。

关键词:双圆盘割草机 切割器 虚拟样机 虚拟正交试验 性能试验

中图分类号:S817.11⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1298(2014)08-0101-05

引言

近年来,随着农业产业结构的调整,农村经济向多元化方向发展,内蒙地区的牲畜量不断扩大,牧草需求量和牧草收获机械也迅速发展。针对内蒙地区牧草产草量高、密度大、茎秆较粗的特点,设计研制了 9YG-130 型双圆盘割草机,其工作平稳,对牧草适应性强,特别适应于稠密、倒伏和缠连的牧草^[1-4]。

传统的农业机械产品开发要经过理论设计、样机试制、田间试验、改进定型和批量生产等步骤^[5-7],农业机械的结构设计分析较多采用经验设计,产品设计中的安全系数一般偏高,浪费了大量材料。利用虚拟样机技术开发虚拟产品具有相当大的优越性,虚拟样机可以代替物理样机对产品进行创新设计、测试和评估,可以缩短开发周期,降低成本,改进设计,提高产品质量。国内外学者针对水稻、芦苇收获机等关键机构进行了虚拟样机设计研究,切割部件作为双圆盘割草机的关键零部件,虚拟样机设计却鲜有报道^[8-10]。国内外学者研究偏重刀片几何参数和运动参数对功率与应力的关系,针对重割率各参数关系研究较少,本文通过对双圆盘割草机的虚拟正交试验,改进设计参数,使割草机的重割率得到有效降低,提高设计效率和准确性。

1 总体方案设计与主要参数

1.1 总体方案设计

9YG-130 型双圆盘割草机由拖拉机连接机架、第一级传动和张紧轮系、变速箱和手动离合器、割草机架、切割器、四连杆机构、以及升降油缸等部件组成,如图 1 所示。

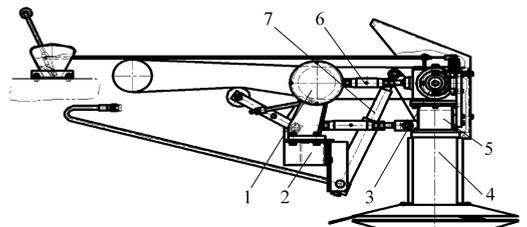


图 1 9YG-130 型双圆盘割草机结构图

Fig.1 9YG-130 model double disc mower

1. 拖拉机连接架 2. 第 1 级传动装置 3. 变速箱和手动离合器
4. 割草机架 5. 切割器 6. 升降油缸 7. 四连杆机构

1.2 主要技术参数

9YG-130 型双圆盘割草机主要技术参数为:割幅 1 300 mm,刀盘数 2 个,配套动力 11 ~ 14.7 kW,刀片数 6 片,刀盘转速 2 000 r/min,碎草率不大于 2%,割茬高度 40 ~ 60 mm,生产率 0.6 ~ 1.3 hm²/h,质量约 260 kg。

1.3 切割部件主要参数的设计与选择

刀片刃线部分所扫过的面积为余摆带,摆带带

宽与刀片刃部宽度相当^[11],刀片上任一点的速度均由刀片随切割圆盘的圆周速度与机器前进速度合成,故任一瞬间刀片刃口的绝对速度为

$$v_g = \sqrt{r^2\omega^2 + 2v_j r\omega \cos(\omega t + \beta) + v_j^2} \quad (1)$$

当 $\omega t + \gamma = \pi + 2k\pi$ ($k=0, 1, 2, \dots, n$) 时

$$v_g = v_{g\min} = r\omega - v_j \quad (2)$$

式中 v_g ——刀片刃口速度, m/s

$v_{g\min}$ ——刀片刃口最小速度, m/s

r ——刀片根部刃口半径, mm

ω ——刀盘角速度, rad/s

v_j ——机器前进速度, m/s

研究资料显示,旋转式无支承切割时刀片刃口最小极限速度为 30 m/s,其切割速度应大于最小极限速度,一般为 50~90 m/s^[3],割草机圆盘转速为

$$n = \frac{30(v_g + v_j)}{\pi r} \quad (3)$$

其中 $r = \frac{D}{2-h}$ $h = \frac{\pi D v_j}{m v_g}$

式中 D ——刀盘直径, m

h ——刀片工作刃线长度, m

m ——刀片数,取 $m=3$

不漏割条件为

$$\frac{v_g}{v_j} \geq \frac{2\pi r}{mh} \quad (4)$$

2 虚拟样机模型建立及仿真

2.1 切割器建模

双圆盘割草机切割器主要由拔草滚筒、防尘盖、支承套、切割圆盘、护盘、主立轴和刀片等组成。当主立轴旋转时,滚筒与圆盘也随着转动,由于离心力的作用,使铰接于圆盘刀架上的刀片被甩出,进行切割。在切割器滚筒上有拔草凸起,用于堆集牧草向后抛送,使机具在密度大的草场作业时也能正常切割。实体建模包括零件建模和整体装配,运用 SolidWorks 的参数化设计功能建立各零部件三维实体模型,对 9YG-130 型双圆盘割草机切割器进行单体虚拟约束装配,完成虚拟样机设计,所得模型如图 2、3 所示。

2.2 切割器仿真

(1) 三维模型导入,先利用 SolidWorks 的参数化设计功能建立各零部件三维实体模型,导入 ADAMS 环境中,原有的装配关系和质量属性均失效,只是提供了构件间的相互关系,需要给各个部件赋予质量和转动惯量。仿真时需要根据实际运动情况重新设置部件的初始位置、零部件的约束关系,并施加约束,建立切割器的虚拟样机模型。

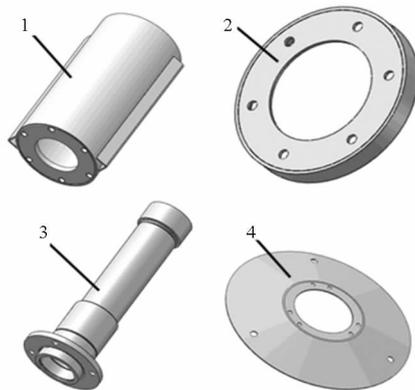


图 2 切割器主要部件

Fig. 2 Major parts of cutter

1. 拔草滚筒 2. 防尘盖 3. 支承套 4. 切割圆盘

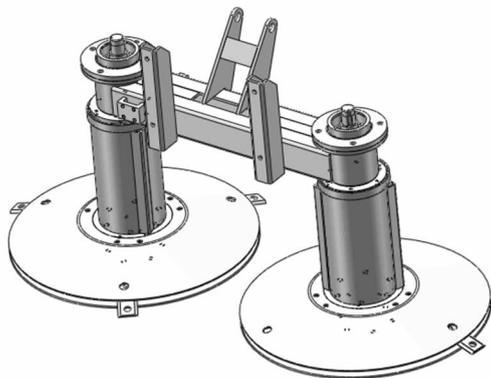


图 3 切割器装配图

Fig. 3 Assembly drawing of cutter

(2) 定义材料,为各零件加入材料、密度、泊松比、弹性模量等。

(3) 创建约束和运动副^[12-14],分析相对运动关系,利用 ADAMS/View 中约束库已创建的运动副来实现各个零部件的相对运动。

随着刀盘旋转及机器的前进,刀片的位移为刀片前进的直线位移与旋转位移的合成,在前进速度 2.78 m/s、刀盘转速 2 000 r/min,每个刀盘上 3 片刀,刀片深处长度为 32 mm 时^[1],可以得到切割刀片顶点的运行轨迹。图 4 为旋转式切割刀片重割面积图,刀片刃线部分相对于地面所扫过的面积形状为余摆带, I_{mn} 、 I'_{mn} 、 I''_{mn} 为刀片 m 、 n 的不同重割区; I_{mo} 、 I'_{mo} 、 I''_{mo} 的二次重割区; Π_l 为对应刀片的单割区。

3 参数化虚拟试验

3.1 试验方法

在割草机虚拟试验中,主要研究影响割草机重割率的结构参数和工作参数。随着原动件输入参数以及切割部件的变化,可绘制出切割部件相邻刀片上两点的工作轨迹,以此判断重割情况,通过虚拟正交试验优化最佳设计参数,观察各因素对评价指标影响规律^[15]。

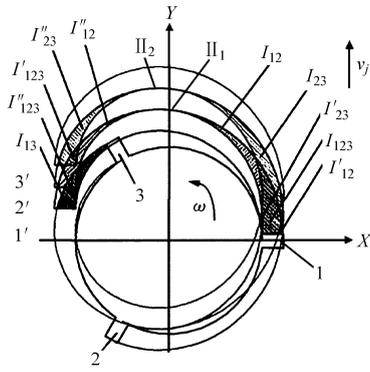


图 4 刀片切割面积

Fig. 4 Blade cutting area chart

3.2 试验设计与评价指标

由式(4)可知,旋转式割草机的不漏割条件由刀片刃口的速度、机器的前进速度、刀片根部刃口半径和刀片的工作刃线长度所决定。为了降低漏割,相邻两刀盘上的刀片轨迹一般重叠 30 ~ 60 mm,依据经验公式,针对 9YG-130 型双圆盘割草机参数取值为^[4]: $v_g = 59 \text{ m/s}$, $v_j = 2.78 \text{ m/s}$, $r = 295.5 \text{ mm}$, $h = 32 \text{ mm}$, $m = 3$,拟对虚拟样机设计进行优化,为割草机的切割部件参数设置提供理论依据。通过对切割器作业参数进行虚拟样机试验研究,选用 $L_9(3^4)$ 正交表安排虚拟试验,试验因素水平表和评价指标如表 1、表 2 所示。

表 1 虚拟试验因素水平

Tab.1 Virtual test form of levels and factors

编码	因素			
	刃口速度	前进速度	刃线长度	刀片数目
	$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$b/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	c/mm	$d/\text{片}$
-1	54	2.5	32	2
0	59	2.78	36	3
1	64	3.06	40	4

表 2 虚拟试验评价指标

Tab.2 Evaluation of virtual test

序号	试验因素				重割率/%
	A	B	C	D	
1	-1	-1	-1	-1	20.97
2	-1	0	0	0	18.53
3	-1	1	1	1	23.32
4	0	-1	0	1	25.34
5	0	0	1	-1	17.67
6	0	1	-1	0	16.42
7	1	-1	1	0	24.57
8	1	0	-1	1	22.44
9	1	1	0	-1	19.54

3.3 虚拟试验结果分析

分析本次虚拟试验的结果,校正决定系数 $R^2(\text{adj}) (0.9987 > 0.80)$ 和变异系数为 0.95%,表

明该虚拟样机试验模型拟合优度较好,可用来对割草机重割率的影响因素进行初步分析和预测,由表 3 可知,对重割率的影响因素主次顺序为 D 、 A 、 C 、 AC 、 BC ,且呈现极其显著的影响,因素 B 的影响不显著。

表 3 方差分析

Tab.3 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
模型	79.33	6	11.33	318.8	0.0137
A	15.18	1	15.18	426.5	0.0098
B	0.065	1	0.065	18.37	0.1459
C	2.456	1	2.456	689.6	0.0242
D	17.65	1	17.65	495.3	0.0090
AC	10.59	1	10.59	297.3	0.0117
BC	14.84	1	14.84	416.9	0.0099

结合各因素 A 、 B 、 C 、 D 对割草机重割率的影响情况,为更好地找到适合的拟合关系,通过 Design-Expert 8.0 软件进行二次响应面回归分析,得到多元二次响应面回归模型

$$Y = 20.97 + 2.405A + 0.19738B + 1.2092C + 4.5383D + 4.2614AC + 3.5671BC$$

分别对响应面回归方程及回归系数进行检验,回归数学模型及各项系数均在零水平上达到较高的显著水平,表明回归精度较高。由于旋转式割草机功率消耗随切割速度、机器前进速度以及作物条件等因素而变化,在保证割草机作业速度和降低消耗功率的前提下,按照重割面积越小越好的原则优化,通过虚拟正交试验结果的方差分析,由 RSM 预测最优值。结果显示,刀片刃口的速度为 57.01 m/s,前进速度为 2.76 m/s,刀片的工作刃线长度为 34.06 mm,刀片数为 3 时,重割面积最小为 14.52%。

4 性能试验

2012 年 7 月 25 日根据虚拟试验理论参数对样机进行了改进并对其性能进行了试验,试验地点为内蒙古呼和浩特市托克托县永圣域村,试验依据国家标准 GB/T 10938—2008《旋转割草机》进行。试验条件为:牧草类型为紫花苜蓿,试验地势平坦,试验地面积 5 hm²,环境温度 25 ℃,相对湿度 47%,土壤为砂壤土,牧草生长期为二龄紫花苜蓿,土壤坚实度 1494 kPa,土壤绝对含水率 14%。

主要测试仪器有:秒表、土壤水分测定仪、土壤硬度仪、盒尺、风速干湿计、数显游标卡尺、电子天平等。试验测试结果如表 4 所示。

测试结果与文献[1]比较,各项性能指标均满足设计及相关标准要求,重割碎草得到有效降低。

表4 双圆盘割草机性能试验结果

Tab.4 Double disc mower performance test results

检测项目	设计值	测试结果
纯工作小时生产率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.65 ~ 1.3	1.03
作业速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	5 ~ 10	8
碎草率/%	≤ 2	1.1
割幅/mm	1300	1300
刀盘转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2000	1930
割茬高度/mm	40 ~ 60	46
纯生产率/($\text{hm}^2 \cdot (\text{h} \cdot \text{m})^{-1}$)	> 0.6	0.7
温升/ $^{\circ}\text{C}$	≤ 32	20

5 结论

(1) 应用 SolidWorks 软件建立 9YG-130 型双

圆盘割草机切割部件各零部件三维实体模型,通过约束装配,完成虚拟样机设计,将模型导入动力学分析软件 ADAMS 后进行运动仿真,验证了机构仿真的正确性。

(2) 针对切割部件结构及作业参数不合理造成重割率增加的问题,对模型进行四因素三水平虚拟正交试验,得到了最佳刀片刃口的速度为 57.01 m/s,前进速度为 2.76 m/s,刀片的工作刃线长度为 34.06 mm,刀片数为 3 时,重割面积为 14.52%,重割率与碎草率得到了有效降低。

(3) 性能试验表明,该设计满足割草机对草业技术要求,与文献[1]比较,重割碎草得到有效降低。

参 考 文 献

- 赵满全,刘伟峰,赵士杰,等.前置式双圆盘割草机的研制与试验[J].中国农机化,2004(5):28-30.
Zhao Manquan, Liu Weifeng, Zhao Shijie, et al. The development and experiment of front-mounted disc mower[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2004(5):28-30. (in Chinese)
- 内蒙古农业大学机械厂.前置式双圆盘割草机:中国,201120138672.0[P].2011-11-30.
- 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:中国农业科技出版社,2007:1143-1145.
- 张宁,赵满全,史艳花,等.前置式双圆盘割草机切割部件的设计——基于 SolidWorks[J].农机化研究,2013,35(8):100-103.
Zhang Ning, Zhao Manquan, Shi Yanhua, et al. The superposed double disc mower cutting parts design—based on SolidWorks[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(8):100-103. (in Chinese)
- 郝云堂,金烨,季辉.虚拟样机技术及其在 ADAMS 中的实践[J].机械设计与制造,2003(3):16-18.
- Huang Z, Fang Y F. Kinematics characteristics analysis of 3-dof in-parallel actuated pyramid mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(8):1009-1018.
- 李杰,阎楚良,杨方飞.基于虚拟样机技术的联合收获机切割机构的仿真[J].农业机械学报,2006,37(10):74-76.
Li Jie, Yan Chuliang, Yang Fangfei. Research on cutter's simulation of combine harvester based on virtual prototyping technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10):74-76. (in Chinese)
- 丛宏斌,李汝莘,俞高红,等.爪式松土机仿真分析与优化设计[J].农业工程学报,2009,25(1):81-84.
Cong Hongbin, Li Ruxin, Yu Gaohong, et al. Simulation analysis and optimization design of claw scarifier[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1):81-84. (in Chinese)
- 解福祥,区颖刚,刘庆庭,等.甘蔗收割机物流虚拟试验[J].农业机械学报,2010,41(9):90-94.
Xie Fuxiang, Ou Yinggang, Liu Qingting, et al. Virtual experiment on flow simulation of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9):90-94. (in Chinese)
- 杜岳峰,朱忠祥,毛恩荣,等.基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J].农业机械学报,2011,42(增刊):1-5.
Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 42(Supp.):1-5. (in Chinese)
- 蒙建国,赵满全,黄炎,等.9YG-130 型双圆盘割草机刀片的运动仿真研究[J].农机化研究,2013,35(10):21-25.
Meng Jianguo, Zhao Manquan, Huang Yan, et al. The simulation analysis of the types of the front-mounted disc mower[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10):21-25. (in Chinese)
- 邢立冉,李汝莘,王铁新,等.分置式大蒜收获机设计与仿真[J].农业机械学报,2012,43(增刊):137-140.
Xing Liran, Li Ruxin, Wang Tiexin, et al. Design and analysis of split garlic harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):137-140. (in Chinese)
- 张杨,区颖刚,牟向伟.基于 ADAMS 的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J].农业工程学报,2009,25(7):88-93.
Zhang Yang, Ou Yinggang, Mou Xiangwei. Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):88-93. (in Chinese)
- 贺俊林,佟金,陈志,等.指形拨禾轮分禾机构的虚拟设计与运动仿真[J].农业机械学报,2007,38(6):53-56.
He Junlin, Tong Jin, Chen Zhi, et al. Virtual design and kinematic simulation for feed-in mechanism with finger rotor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):53-56. (in Chinese)
- Anders K F. Selective picking head for citrus harvester[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(3):279-287.

Design and Experiment of Virtual Prototype of Double Disc Mower Cutter

Zhao Manquan¹ Zhang Ning¹ Yang Tiejun² Shi Yanhua³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

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

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Using parametric design of SolidWorks, three-dimensional solid models of all parts of 9YG-130 double disc mower cutter were built, and the design of virtual prototype was completed by constraint assemble. Introducing the models to the dynamic analysis software ADAMS, the motion simulation was performed, and the trajectory of the cutter vertex was obtained when setting the forward speed of the cutter with 2.78 m/s, and rotation speed with 2 000 r/min. The virtual orthogonal experiment with three levels and four factors was conducted, and Design-Expect 8.0 software was used to complete analysis of variance. The results showed that the repeat cut ratio of the cutter was effectively reduced when the four factors were $v_g = 57.01$ m/s, $v_j = 2.76$ m/s, $h = 34.06$ mm, and $m = 3$. The actual prototype experiment results showed that the experiment design met the mower requirements for grass industry technology, and improved efficiency and accuracy of the design.

Key words: Double disc mower Cutting unit Virtual prototyping Virtual orthogonal test Performance test

(上接第 116 页)

Finite Element Modal Analysis and Structure Optimization of Spray Boom

Qiu Baijing He Yaojie Sheng Yunhui Yin Zhenhua Deng Wuqing

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study dynamic characteristic of spray boom, a parametric finite element model of spray boom was built in ANSYS, and the model was validated by experimental modal analysis. According to the result of spray boom modal analysis, the structure of the spray boom was optimized in ANSYS, in the condition of increasing the spray boom mass for 8.4%, increasing the first mode frequency from 9.16 Hz to 10.41 Hz, and avoiding from the resonance vibration section. Then, the deformation of the spray boom in operating before and after optimization was compared and analyzed in ADAMS. The result showed that the max horizontal deformation at the spray boom end before optimization D_b max was 39.6 mm, and the root-mean-square was 12.6 mm. The max horizontal deformation at the spray boom end after optimization D_{amax} was 10.1 mm, and the root-mean-square was 2.9 mm. The horizontal deformation was reduced.

Key words: Sprayer Spray boom Modal analysis Parametric model Optimal design