

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.019

小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验*

邬备 王德成 王光辉 付作立 郭震

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要:为解决山地丘陵地区苜蓿收获难题,对集成了滑掌、浮动弹簧、连杆臂和提升液压缸的小型自走式割草机联合仿形装置进行了理论分析。建立仿形装置虚拟样机模型,利用模型进行四因素三水平正交试验,通过回归分析和规划求解对最优参数组合进行预测,得出在山区地势较恶劣的起伏路面上工作时,仿形装置最佳设计和工作参数为:滑掌长度 188 mm,割台倾角 4.06° ,拉力重力比 0.85,前进速度 2 m/s。利用优化试制后的割草机进行田间试验,验证了仿真试验和回归预测模型的有效性。与优化前的样机相比,在同等条件下,割茬高度降低了 7%,工作速度提高了 75%。

关键词: 自走式割草机 仿形装置 虚拟样机 正交试验

中图分类号: S817.11⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0123-07

Simulation Analysis and Experiment of Profiling Device of Small Self-propelled Mower

Wu Bei Wang Decheng Wang Guanghui Fu Zuoli Guo Zhen

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In China, especially in the northwest region, alfalfa is often planted in mountains and hills, which makes mechanized harvesting become a big problem. The small self-propelled mower, which is flexible and easy to move, is regarded as a proper solution to the problem. Taking the adverse working condition and the harvest requirements of alfalfa into consideration, the profiling device is the key part of this kind of mower. The research theoretically analyzed the profiling device which consists of sliding palm, spring, linkages and elevating hydraulic cylinder. Building the virtual prototype and carrying out the orthogonal experiment by using the model, the best parameters of the device were as follows: the sliding palm length of 188 mm, the cutter bar tilt angle of 4.06° , the ratio of spring pull force to cutting table gravity of 0.85, and the advance speed of 2 m/s. By using the optimized mower conditioner test in the field, the result of test showed the validity of the simulation. Besides, under the same working condition, the height of stubble was 7% as low as which was cut by prototype without optimization, and what's more, the optimized mower worked 75% as fast as the prior machine.

Key words: Self-propelled mower Profiling device Virtual prototype Orthogonal experiment

引言

随着我国牧草产业的发展,割草机逐渐成为苜

蓿收获环节中必不可少的设备,市场需求量不断增加。目前国内市场的主流产品是纽荷兰、爱科、约翰迪尔等厂家生产的牵引式割草压扁机,均具有工作

收稿日期: 2014-10-09 修回日期: 2014-11-20

*公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203024)和现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-35)

作者简介: 邬备, 博士生, 主要从事草业机械研究, E-mail: wu_bei@126.com

通讯作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 主要从事畜牧业机械研究, E-mail: wdc@cau.edu.cn

效率高、可靠性好等优点,但是工作方式和机械结构限制了其在小地块的作业。小型自走式割草机具有转弯半径小、操作灵活、运移方便等特点,特别适宜在我国西北部和西南地区山地丘陵进行作业,是适于我国牧草种植国情的合理机型^[1-3]。相比于平原大地块的牧草种植地,山区丘陵的作业地面环境更为复杂,同时,相比于其他农业机械的仿形装置,割草机的仿形装置不仅要保障机器的通过性,还要保障牧草的割茬高度及割茬平整度,因此,仿形装置的合理分析与设计,是保证自走式割草机高效优质作业的前提。目前,国内对小型自走式割草机仿形装置的设计与研究还刚刚起步,文献[4]提出了解决问题的一个初步设想,但还很不深入。因此,本文对仿形装置进行机构运动学分析,建立虚拟样机模型,安排虚拟正交试验,旨为仿形装置的优化设计提供理论及试验支撑,以提高仿形装置的工作性能。

1 仿形装置分析

1.1 仿形装置结构

仿形装置作为自走式割草机的关键装置之一,与以往仿形装置仅仅利用一到两个关键零部件的机械功能不同。本文研究的仿形装置,其主要零部件为滑掌、连杆臂、浮动弹簧和提升液压缸^[4-6],各零部件相互关联缺一不可,形成了一个集成多个要素的联合仿形系统。该系统中,滑掌相当于信号输入模块,浮动弹簧相当于处理模块,连杆臂相当于执行模块,液压缸等其他部件则相当于辅助支撑模块。图1所示为自走式割草机仿形装置的基本结构。

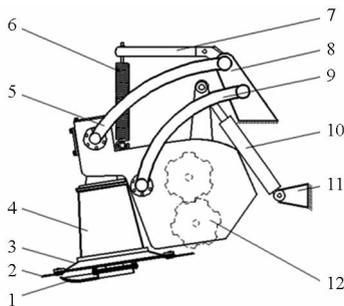


图1 仿形装置结构图

Fig.1 Structure of profiling device

1. 滑掌 2. 割刀 3. 刀盘 4. 拔草滚筒 5. 上连杆臂 6. 浮动弹簧 7. 浮动弹簧支臂 8. 机架 9. 下连杆臂 10. 液压缸 11. 液压缸支座 12. 压扁辊

机器工作时,滑掌与地面接触,割台处于半悬浮状态,由2根浮动弹簧承受其重力。当地面起伏不平时,在滑掌和弹簧的作用下,割台贴地上下浮动,保证了割茬稳定性和机器的通过性。此外,倾斜安置的刀盘使得刀刃更接近地面,能够有效降低割茬

高度。

1.2 仿形装置运动学分析

仿形装置中,决定机构运动规律的是执行模块及辅助支撑模块,即连杆臂和液压缸等零部件。本文分析2个状态下机构的位置及运动状态:一是机器前进并收割时,割台上下浮动仿形,仿形装置处于工作状态;二是机器掉头或运移时,割台需上升和下降避障,仿形装置处于升降状态。

1.2.1 工作状态

工作状态时如图2所示,连杆臂、割台与机架可简化为独立的平面四连杆机构,其中A、C为连杆臂与机架连接点,D、B为连杆臂与割台连接点,O点为刀尖位置。

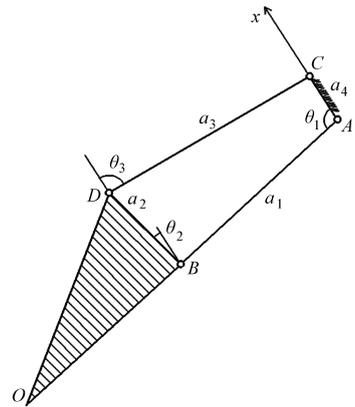


图2 工作状态运动简图

Fig.2 Plane four-bar linkage

设固定机架AC边为x轴,以 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 建立四边形,根据复数矢量法^[7],有

$$a_1 e^{i\theta_1} + a_2 e^{i\theta_2} + a_3 e^{i\theta_3} + a_4 e^{i\pi} = 0 \quad (1)$$

由复数矢量性质,有

$$a_i e^{i\theta} = a_i (\cos\theta + i\sin\theta) \quad (2)$$

联立式(1)、(2),分别取实部和虚部可求得

$$\theta_2 = 2\arctan \frac{B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A - C} \quad (3)$$

其中

$$A = a_1 \cos\theta_1 - a_4$$

$$B = a_1 \sin\theta_1$$

$$C = \frac{A^2 + B^2 + a_2^2 - a_3^2}{2a_2}$$

在式(3)中,各连杆长度尺寸均为定值。割台安装后并置于工作位置时,下连杆与机架AC边的角度 θ_1 为标准值 θ_0 , θ_0 的大小由机器的结构尺寸决定,可求得BD杆的初始位置。当机器进入工作状态,割台上下浮动, θ_1 在标准值 θ_0 左右小范围变动,BD杆的位置也随之变动。由于刀尖O和BD杆为同一刚体,因此,此模型可用来计算机器工作状态时,刀尖轨迹端点的运动状态。

1.2.2 升降状态

当连杆臂处于升降状态, 液压缸成为整个机构的一部分, 简化为平面连杆机构的运动简图如图 3 所示。

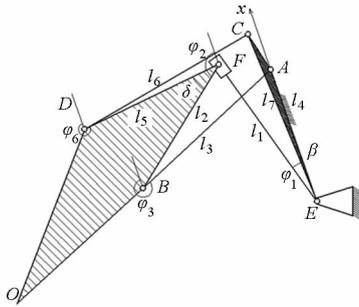


图 3 升降状态运动简图

Fig.3 Kinematic diagram in lifting state

根据图中确立的坐标系, 利用复数矢量法, 对

l_1, l_2, l_3, l_4 建立四边形, 可得

$$l_1 e^{i\varphi_1} + l_2 e^{i\varphi_2} + l_3 e^{i\varphi_3} + l_4 e^{i\pi} = 0 \quad (4)$$

再对 l_1, l_5, l_6, l_7 建立四边形, 可得

$$l_1 e^{i\varphi_1} + l_5 e^{i(\varphi_2 - \delta)} + l_6 e^{i\varphi_6} + l_7 e^{i(\pi + \beta)} = 0 \quad (5)$$

将式(2)代入式(4)、(5), 分别令实部和虚部等于零, 得各连杆方位角方程组

$$\begin{cases} l_1 \cos\varphi_1 + l_2 \cos\varphi_2 + l_3 \cos\varphi_3 - l_4 = 0 \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_2 \sin\varphi_2 + l_3 \sin\varphi_3 = 0 \\ l_1 \cos\varphi_1 + l_5 \cos(\varphi_2 - \delta) + l_6 \cos\varphi_6 - l_7 \cos\beta = 0 \\ l_1 \sin\varphi_1 + l_5 \sin(\varphi_2 - \delta) + l_6 \sin\varphi_6 - l_7 \sin\beta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

在方程组(6)中, 有 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_6$ 4 个未知量。

将方程组(6)对时间取一次导数和二次导数, 得到各连杆角速度和角加速度方程组

$$\begin{bmatrix} l_1 \sin\varphi_1 & l_2 \sin\varphi_2 & l_3 \sin\varphi_3 & 0 \\ l_1 \cos\varphi_1 & l_2 \cos\varphi_2 & l_3 \cos\varphi_3 & 0 \\ l_1 \sin\varphi_1 & l_5 \sin(\varphi_2 - \delta) & 0 & l_6 \sin\varphi_6 \\ l_1 \cos\varphi_1 & l_5 \cos(\varphi_2 - \delta) & 0 & l_6 \cos\varphi_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos\varphi_1 \\ -v \sin\varphi_1 \\ v \cos\varphi_1 \\ -v \sin\varphi_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} -l_1 \sin\varphi_1 & -l_2 \sin\varphi_2 & -l_3 \sin\varphi_3 & 0 \\ l_1 \cos\varphi_1 & l_2 \cos\varphi_2 & l_3 \cos\varphi_3 & 0 \\ -l_1 \sin\varphi_1 & -l_5 \sin(\varphi_2 - \delta) & 0 & -l_6 \sin\varphi_6 \\ l_1 \cos\varphi_1 & l_5 \cos(\varphi_2 - \delta) & 0 & l_6 \cos\varphi_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} v \sin\varphi_1 + v \sin\varphi_1 + l_1 \omega_1 \cos\varphi_1 & l_2 \omega_2 \cos\varphi_2 & l_3 \omega_3 \cos\varphi_3 & 0 \\ l_1 \omega_1 \sin\varphi_1 - v \cos\varphi_1 - v \cos\varphi_1 & l_2 \omega_2 \sin\varphi_2 & l_3 \omega_3 \sin\varphi_3 & 0 \\ v \sin\varphi_1 + v \sin\varphi_1 + l_1 \omega_1 \cos\varphi_1 & l_5 \omega_2 \cos(\varphi_2 - \delta) & 0 & l_6 \omega_6 \cos\varphi_6 \\ l_1 \omega_1 \sin\varphi_1 - v \cos\varphi_1 - v \cos\varphi_1 & l_5 \omega_2 \sin(\varphi_2 - \delta) & 0 & l_6 \omega_6 \sin\varphi_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_6 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 v 为液压缸顶出速度, 为一已知常数。将机器设计尺寸作为已知参数代入上述方程组, 用 Excel 进行运算并画出连杆臂升降状态的机构运动曲线图, 如图 4~6 所示。

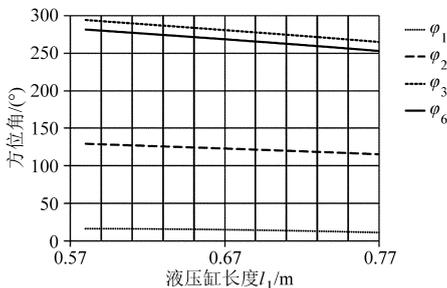


图 4 连杆位置曲线

Fig.4 Position curves of linkages

通过图 4~6, 可以分析出仿形装置升降状态时在任意时刻下任意点的位置、速度及加速度等运动状态信息。

除了仿形装置的执行模块和辅助支撑模

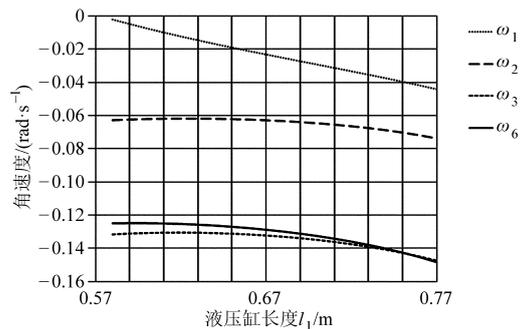


图 5 连杆角速度曲线

Fig.5 Speed curves of linkages

块, 滑掌和浮动弹簧也是仿形装置正常工作必不可少的组成部分, 装置的实际工作状态还受两个因素影响: 滑掌通过接触接收到的地表起伏状况信息以及浮动弹簧对该信息的反馈。本文通过建立虚拟样机模型和进行虚拟正交试验, 进一步研究这两个因素对仿形装置工作状态的影响。

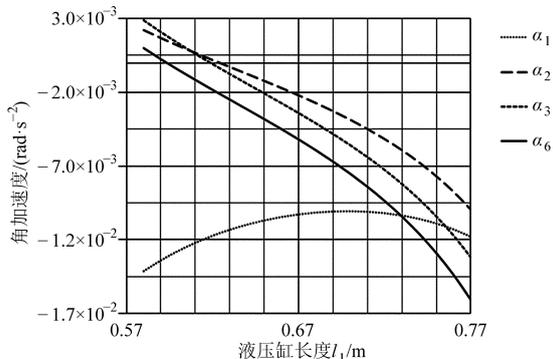


图6 连杆角加速度曲线

Fig. 6 Acceleration curves of linkages

2 虚拟样机建模与仿真

近年来,虚拟样机技术被广泛应用到农业机械研究中。通过建立虚拟模型,模拟农机关键作业机构的运动情况,或对机械与作业对象(如茎秆、叶片、土壤等)之间的相互作用关系进行仿真及分析^[8-12],取得了显著的效果。因此,本文利用ADAMS动力学仿真软件,建立仿形装置的虚拟样机,模拟仿形装置工作时与地面的相互作用以及其自身的运动状态,为仿形装置的优化设计提供参考。

2.1 建立模型

本研究的虚拟样机主要用于模拟机器在山区丘陵起伏路面行进时,仿形装置的工作情况。利用Caita建立三维模型,通过SolidWorks转存成Parasolid格式,然后导入到ADAMS中,通过这一数据接口导入的模型原始信息丢失较少,保真度高^[13-14]。对ADAMS环境中三维模型的冗余零件进行布尔操作后,需为各零件赋予材料和密度属性,软件可根据模型几何尺寸自动计算质量、转动惯量等信息,这样才能保证仿真成功。

为模拟山区丘陵地区的起伏路面,虚拟样机中的路面采用二维的正弦波路面,正弦波长为1 m,起伏路面长度为6 m,连续设置6个起伏,路面起伏高度(波谷到波峰垂直高度)为100 mm,为了保证仿真效果,在起伏路面前后各设置1 m长的水平路面。该路面模型在实际山区丘陵苜蓿收获中,属于极度恶劣的作业地面条件。

2.2 添加约束

将三维模型导入到ADAMS环境中后,需分析各零件之间的相互运动,利用ADAMS/View中的约束库为模型添加约束关系。利用旋转副实现连杆臂与机架、割台之间的旋转运动;利用滑移副和滑移驱动实现机器相对于路面的直线前进运动;利用固定副将路面实体和ground固定在一起。在弹簧支臂与割台之间建立弹簧连接,仿真过程中可通过编辑

弹簧的预载荷(Preload)和初始长度(Length at preload)两个参数实现不同弹簧的工作状态。此外,为了实现滑掌贴地仿形的运动过程,在滑掌与路面之间建立接触约束。

2.3 仿真分析

对虚拟样机进行仿真之前,可利用ADAMS自带的Model Verify工具对模型进行验证,查询系统自由度、未定义质量构件、过约束等情况进行查询^[13]。图7所示为对模型进行静平衡计算时的虚拟样机。通过在刀尖建立Marker点,可在仿真过程中测得割刀垂直位移。

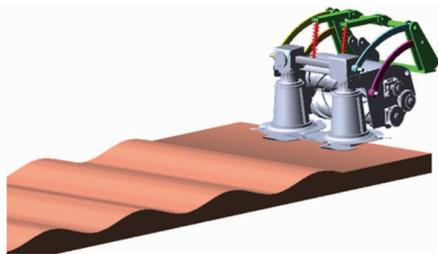


图7 仿形装置虚拟样机

Fig. 7 Virtual prototype of profiling device

从图8可看出,机器在正弦起伏路面前进过程中,由于仿形装置的作用,刀尖随路面起伏而上下移动。这说明,虚拟样机里信号输入模块滑掌对地面信息的采集是有效的,同时处理模块也对信息做出了有效反馈。通过在虚拟样机上修改机器前进速度、弹簧参数和模型尺寸等信息,可对仿形装置的工作状态做进一步研究。

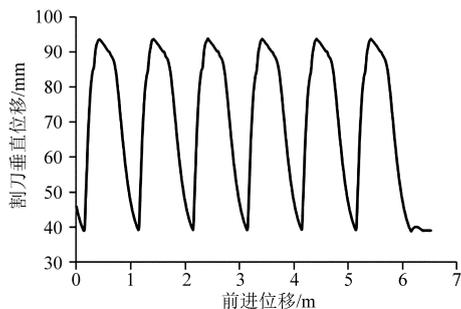


图8 割刀竖直方向位移曲线

Fig. 8 Knives displacement in vertical direction

3 虚拟样机正交试验

3.1 试验方法

仿形装置虚拟样机试验的目的,是通过模拟起伏路面收获作业时,仿形装置的工作过程以及对收获质量的影响,从而找到最佳的设计参数。根据实际生产经验,以滑掌长度、割台倾角、拉力重力比(浮动弹簧拉力与割台重力的比值)和前进速度为变量(编码为A、B、C、D),每个变量选取3个水平(表1),选用正交表 $L_9(3^4)$ ^[15]安排试验(表2),以

平均割茬高度、割茬稳定性系数和最大触土深度作为综合评价指标,找出仿形装置的最佳设计参数。

表1 因素水平
Tab.1 Factors and levels

水平	因素			
	滑掌长度 /mm	割台倾角 /(°)	拉力重 力比	前进速度 /(m·s ⁻¹)
1	128	0	0.85	1.0
2	158	3	0.90	1.5
3	188	6	0.95	2.0

虚拟试验中,在刀尖建立 Marker 点,通过测量 Marker 点到路面的垂直高度可确定割茬高度,利用 ADAMS 的后处理(Postprocess)模块,可导出整个仿真过程中,每 0.01 s 测量得到的割茬高度数据,再对数据进行处理可获得平均割茬高度和割茬平整度的指标。

平均割茬高度计算公式为

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} h_{ji}}{n_j} \quad (9)$$

式中 h_j ——第 j 组试验中平均割茬高度,mm

h_{ji} ——第 j 组试验中第 i 个测量点的割茬高度,mm

n_j ——第 j 组试验中测量点个数

割茬稳定性系数计算公式为

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (h_{ji} - h_j)^2}{n_j - 1}} \quad (10)$$

$$V_j = \frac{S_j}{h_j} \times 100\% \quad (11)$$

$$U_j = (1 - V_j) \times 100\% \quad (12)$$

式中 S_j ——第 j 组试验中割茬高度标准差,mm

V_j ——第 j 组试验中割茬变异系数,%

U_j ——第 j 组试验中割茬稳定性系数,%

由于模型中模拟的正弦起伏路面为极度恶劣作业地形,虚拟样机在进行仿真时割刀偶尔有触土现象,通过软件测量到的割茬高度数据,可得最大触土深度 d 。

3.2 试验结果及分析

3.2.1 试验结果及直观分析

根据正交表,利用仿真模型进行试验得到各指标数据。试验结果和极差分析如表 2 所示,其中最大触土深度为负值说明割刀未触土,其绝对值为最小割茬高度。对平均割茬高度指标,影响因素的主次顺序为 $B、D、A、C$;对割茬稳定性系数指标,影响因素的主次顺序为 $A、B、C、D$;对最大触土深度指标,影响因素的主次顺序为 $B、A、C、D$ 。

表2 正交试验安排、结果及极差分析

Tab.2 Results of orthogonal experiment and range analysis

指标	试验序号	A	B	C	D	平均割茬高度	割茬稳定性系数	最大触土深度
						h_j /mm	U_j %	d /mm
	1	1	1	1	1	76.19	34.31	4.63
	2	1	2	2	2	66.58	34.42	9.58
	3	1	3	3	3	61.73	28.43	25.33
	4	2	1	2	3	87.11	46.39	-6.26
	5	2	2	3	1	67.90	38.37	2.58
	6	2	3	1	2	56.42	34.01	12.05
	7	3	1	3	2	83.17	45.73	-11.01
	8	3	2	1	3	73.62	46.72	-3.37
	9	3	3	2	1	58.29	40.63	2.16
h_j	K_1	68.17	82.16	68.74	67.46			
	K_2	70.48	69.37	70.66	68.72			
	K_3	71.69	58.81	70.93	74.15			
	R	3.52	23.35	2.19	6.69			
U_j	K_1	32.39	42.14	38.35	37.77			
	K_2	39.59	39.84	40.48	38.05			
	K_3	44.36	34.36	37.51	40.51			
	R	11.97	7.78	2.97	2.74			
d	K_1	13.18	-4.21	4.44	3.12			
	K_2	2.79	2.93	1.83	3.54			
	K_3	-4.07	13.18	5.63	5.23			
	R	17.25	17.39	3.80	2.11			

对试验结果进行方差分析,如表3所示。以平均割茬高度为评价指标时,将拉力重力比看作误差项,在显著性水平为0.05的条件下,割台倾角影响显著;以割茬稳定性系数为评价指标时,将前进速度看作误差项,在显著性水平为0.1的条件下,滑掌长度影响显著。以最大触土深度为评价指标时,将前进速度看作误差项,在显著性水平为0.05的条件下,滑掌长度和割台倾角影响显著。

表3 正交试验方差分析

Tab.3 Analysis of variance for orthogonal experiment

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F
平均割茬高度	滑掌长度	19.254	2	9.627	2.254
	割台倾角	819.868	2	409.934	95.958
	前进速度	75.882	2	37.941	8.881
	残差	8.544	2	4.272	
	总计	923.548	8		
割茬稳定性系数	滑掌长度	218.002	2	109.001	15.961
	割台倾角	95.983	2	47.992	7.028
	拉力重力比	14.072	2	7.036	1.030
	残差	13.658	2	6.829	
	总计	341.715	8		
最大触土深度	滑掌长度	452.735	2	226.368	60.421
	割台倾角	458.618	2	229.309	61.206
	拉力重力比	22.735	2	11.368	3.034
	残差	7.493	2	3.747	
	总计	941.581	8		

3.2.2 回归模型的建立

本文试验采用正交拉丁方安排,满足正交多项式回归的正交条件^[15],因此,为了进一步研究各因素的显著性及主次顺序,更好地对试验结果进行预测,可对试验结果进行多元线性回归分析并建立回归模型。

对于指标平均割茬高度 h_j ,建立回归方程

$$h_j = 70.112 + 1.763A - 11.672B + 1.095C + 3.347D$$

$$N=9 \quad R=0.9929 \quad F=69.3395 \quad S=1.8118$$

对于指标割茬稳定性系数 U_j ,建立回归方程

$$U_j = 38.779 + 5.987A - 3.893B - 0.418C + 1.372D$$

$$N=9 \quad R=0.9652 \quad F=13.6116 \quad S=2.4180$$

对于指标最大触土深度 d ,建立回归方程

$$d = 3.966 - 8.627A + 8.697B + 0.598C + 1.055D$$

$$N=9 \quad R=0.9826 \quad F=28.0198 \quad S=2.8481$$

比较各方程的回归系数,可知各影响因素的主次顺序与极差分析的结果相一致,各因素影响显著程度与方差分析相一致。各回归模型 R^2 均大于0.9,拟合精度较高。

3.2.3 最优组合及验证

为了寻求最佳设计参数组合,需对以上回归方

程进行多目标规划求解,求解之前,根据实际生产需要讨论约束条件。从自走式割草机的安全设计出发,割刀是否触土是首要考虑的指标,因此确立约束条件 $d < 0$;对于平均割茬高度指标,依据国家标准^[16]要求设立约束条件 $h_j < 70$ mm;约束各因素变量值在低水平和高水平之间。以割茬稳定性系数指标为目标,进行最大值规划求解。

规划求解结果显示:滑掌长度 188 mm、割台倾角 4.06° 、拉力重力比 0.85 和前进速度 2 m/s 的组合,能在满足各约束条件的同时,得到最大割茬稳定性系数。据此结果,利用虚拟样机再安排一次验证仿真试验,所得试验结果及其与回归模型预测值的比较如表4所示。

表4 预测值及验证试验结果

Tab.4 Predicted value and result of proof test

参数	平均割茬高度 h_j/mm	割茬稳定性 系数 $U_j/\%$	最大触土 深度 d/mm
仿真值	69.77	46.96	-1.29
预测值	70.00	45.18	-1.13
误差/%	-0.33	3.80	12.4

由表4可知,虚拟试验得到的仿真值与回归模型的预测值基本吻合,说明回归模型能较好的反映试验情况,另外,将试验结果与正交表各组试验对比,可知该设计组合能达到综合的最优效果。

4 田间试验

2014年10月,根据回归模型预测的最佳设计参数,对已有样机结构进行优化改进,使其滑掌长度为 188 mm,割台倾角为 4° ,弹簧拉力重力比为 0.85。利用该样机进行了田间试验,试验地点为河北省石家庄市无极县北苏镇北苏村,北纬 $38^\circ 16'$,东经 $114^\circ 81'$ 。试验作业对象为野生苋菜,无倒伏。试验地表较平坦,无垄沟石块等。图9所示为样机在田间进行试验,图10所示为割后效果。



图9 样机田间作业

Fig.9 Prototype working in field

试验前,依据国家标准^[17]相关要求,测量地表平整度;试验时,在田间选取 20 m 长区域,样机分别以低 I、低 II 和高 II 挡不同速度进行往返两趟作业,



图10 割后效果

Fig. 10 Harvesting effect

依据国家标准^[16]相关要求,测量前进速度,同时观察割刀有无触土;作业后,根据标准对割茬高度进行测量。表5为田间试验结果与模型预测结果的对比。

表5 田间试验结果

Tab. 5 Results of field testing

指标	速度/(m·s ⁻¹)	预测值	实测值
平均割茬高度 h_j /mm	0.94	63.14	49.35
	1.44	66.49	51.2
	1.75	68.56	53.5
割茬稳定性系数 U_j /%	0.94	42.35	64.88
	1.44	43.72	72.66
	1.75	44.57	80.71
最大触土深度 d /mm	0.94	-3.54	(无触土)
	1.44	-2.49	(无触土)
	1.75	-1.83	(无触土)

试验时测得的田间地表平整度为16.13 mm,根据同样方法计算得虚拟样机模型地表平整度为69.99 mm,实际田间作业地面更为平整。

从试验结果可看出,由于虚拟样机模型中地面的地表平整度与田间试验作业地块的地表平整度有较大差异(虚拟样机中地表起伏更大,作业条件更恶劣),实测值与预测值有一定出入,考虑机器从恶劣地块(虚拟试验)到平坦地块(田间试验),割茬高度降低,割茬稳定性系数增大,符合实际作业情况。

同时,从各个指标变化趋势考虑,随着机器前进速度的增加,平均割茬高度增大,割茬稳定性系数增大,该速度范围内割刀未触土,实测值反映的趋势和结果与预测值基本一致。因此可以认为,仿真试验以及回归模型对自走式割草机仿形装置的实际作业进行了较好的模拟和预测。

此外,根据前期积累数据,优化前样机工作速度为1 m/s,平均割茬高度为53 mm。将此次试验结果与优化前机器性能对比,在相同的前进速度下,割茬高度降低了约7%。而在平均割茬高度指标基本不变的情况下,机器工作速度提高了75%。

5 结论

(1) 对集成了滑掌、浮动弹簧、连杆臂和提升液压缸的自走式割草机联合仿形装置的连杆机构进行了运动学分析,建立了工作状态和升降状态仿形装置的运动状态方程和模型。

(2) 建立了自走式割草压扁机仿形装置的虚拟样机模型,并利用虚拟样机模型进行四因素三水平正交试验,通过回归分析和规划求解对最优参数组合进行预测,得出仿形装置最佳设计和工作参数为滑掌长度188 mm,割台倾角4.06°,拉力重力比0.85,前进速度2 m/s。此条件下利用虚拟样机模拟自走式割草机在地势较恶劣的起伏正弦路面上工作,平均割茬高度为69.77 mm,割茬稳定性系数为46.96%,割刀无触土现象。

(3) 根据回归模型预测的最优设计参数,改进自走式割草机样机,在不同工作速度下进行田间试验。通过对比实测值与预测值,验证了仿真试验与回归预测模型的有效性。与优化前的样机相比,在同等工作条件下,割茬高度降低了7%,工作速度提高了75%。

参 考 文 献

- 徐柱. 中国牧草手册[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- 耿华珠. 中国苜蓿[M]. 北京:中国农业出版社,1995.
- 付作立. 双圆盘式刈割压扁机切割系统研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
Fu Zuoli. Study on cutting system for two disc mower conditioner [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 中国农业大学. 一种牧草收获机械仿形方法和装置: 中国, CN103109642A[P]. 2013-03-15.
- 中国农业大学. 一种小型自走式苜蓿刈割压扁机: 中国, CN102687621B[P]. 2012-06-20.
- 中国农业大学. 小型自走圆盘式刈割压扁收获机: 中国, CN102523820B[P]. 2011-12-20.
- 孙桓. 机械原理[M]. 6版. 北京:高等教育出版社,2001.
- 杜岳峰,毛恩荣,宋正河,等. 基于ADAMS的玉米植株收获过程仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):106-111.
Du Yuefeng, Mao Enrong, Song Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):106-111. (in Chinese)

- Transactions of the CSAE, 2008, 24(8):135-138. (in Chinese)
- 5 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4):20-24.
Peng Weiming. Numerical simulation and experimental research on the flow pattern in tangential inlet cyclone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4):20-24. (in Chinese)
- 6 唐倩雯, 尹健. 谷物气流清选系统的仿真研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(9):1890-1894.
Tang Qianwen, Yin Jian. Simulation study on air cleaning mechanism system of grain [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(9):1890-1894. (in Chinese)
- 7 吴守一. 农业机械学:下册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 1987:139-146.
- 8 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.
- 9 北京农业机械化学院. 农业机械的原理、设计与计算[M]. 北京:中国农业出版社, 1959:104-121.
- 10 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- 11 汤楚宙. 水稻联合收割机原理与设计[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 2002.
- 12 北京兆迪科技有限公司. CATIA V5 R20 实例宝典[M]. 北京:北京大学出版社, 2012:92-133.
- 13 李楚琳. Hyperworks 分析应用实例[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:87-123.
- 14 李银海, 丁启朔, 郑一平, 等. 微型联合收割机气流式清选装置的仿真研究[J]. 农机化研究, 2009(1):85-87.
Li Yin Hai, Ding Qishuo, Zheng Yiping, et al. Simulation on pneumatic cleaning mechanism for mini-combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(1):85-87. (in Chinese)
- 15 王同福, 宋玉英, 王进朝. 气流清选原理在脱粒机上的应用[J]. 河北农业大学学报, 1997, 20(1):103-109.
Wang Tongfu, Song Yuying, Wang Jinchao. The use of pneumatic separate in huller [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1997, 20(1):103-109. (in Chinese)
- 16 北京兆迪科技有限公司. CATIA V5 R21 钣金设计教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2013:60-90.
- 17 徐立章, 于丽娟, 李耀明, 等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10):78-86.
Xu Lizhang, Yu Lijuan, Li Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10):78-86. (in Chinese)
- 18 廖庆喜, 陈立, 李海同, 等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10):80-85, 79.
Liao Qingxi, Chen Li, Li Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):80-85, 79. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 129 页)

- 9 王志华, 陈翠英. 基于 ADAMS 的联合收割机振动筛虚拟设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4):53-56.  
Wang Zhihua, Chen Cuiying. Virtual design of vibrating sieve of combine harvester based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4):53-56. (in Chinese)
- 10 季顺中, 李双, 陈树人, 等. 基于 ADAMS 的高速插秧机三插臂分插机构运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊):82-85.  
Ji Shunzhong, Li Shuang, Chen Shuren, et al. Kinematical simulation of three separating planting bars of high-performance rice transplanter based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):82-85. (in Chinese)
- 11 宫成宇, 赵匀, 冯江, 等. 基于 ADAMS 玉米移栽机顶出机构的设计与仿真[J]. 农机化研究, 2013, 35(6):127-130.  
Gong Chengyu, Zhao Yun, Feng Jiang, et al. The corn transplanting machine push-out mechanism design based on ADAMS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6):127-130. (in Chinese)
- 12 赵满全, 张宁, 杨铁军, 等. 双圆盘割草机切割器虚拟样机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8):101-105.  
Zhao Manquan, Zhang Ning, Yang Tiejun, et al. Design and experiment of virtual prototype of double disc mower cutter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):101-105. (in Chinese)
- 13 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- 14 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):1-5. (in Chinese)
- 15 何为. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- 16 GB/T 10938—2008 旋转割草机[S]. 2008.
- 17 GB/T 5668—2008 旋耕机[S]. 2008.