

基于虚拟样机运动学仿真的割草机 喂草导向装置参数优化

张 雯 张衍林 李善军 孟 亮 常钧翔 王凤武

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对果园常见的单株生长的较粗难切割的杂草,设计割草机的专用喂草导向装置。联合 CREO 和 ADAMS 建立喂草导向装置与杂草的刚柔耦合模型,并对杂草在喂草导向装置喂草口角度和前进速度不同的情况下的运动规律进行分析。根据杂草顶端在空间坐标系中 X、Y、Z 轴方向上的位移变化相关关系获得杂草的偏移夹角、割草机的理论最大割幅和割茬偏移等 3 个重要指标,来表征喂草导向装置的工作效果。使用 Design-Expert 10.0 进行试验设计,试验结果表明,最优的方案为:喂草口角度为 80°、机器前进速度为 1 330 mm/s,此条件下喂草导向装置的工作效果良好,割茬平整,最大偏移量为 27.02 mm。

关键词 圆盘式割草机; 导向装置; 运动学仿真; 参数优化

中图分类号 S 224.1⁺5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2019)04-0134-09

果园因其环境适宜,容易滋生各种杂草,杂草与果树争肥争水,严重影响果树产出品质^[1]。目前常见的除草方式包括化学除草、机械除草和人工除草,其中机械除草因其省力安全等优点,常用于果园生草覆盖技术^[1]。而果园中常见的杂草如小飞蓬、一年蓬等,单株生长,且草株较高较粗,极难切割^[2]。目前市面上常见的小型除草机械多为适用于软草(如草坪草)的割草机,如背负式小型除草机和手推式小型草坪机等,这些除草机一般不适用于果园常见杂草,且操作不便、人工强度大。目前,国内外关于除草机的研究主要以往复式大型多功能的收割机为主,专用的小型除草机较少,且大多作业效果不理想^[3-5]。因此,设计研究适合于果园的专用型割草机极为重要。

近年来,国内外学者普遍采用虚拟仿真技术对机器进行动力学仿真研究。利用虚拟样机技术可节约物理样机的研发制造成本,缩短研发周期^[6-7]。目前虚拟仿真技术主要应用于玉米、大豆等作物收割机的研发上,对割草机进行研究较少^[8-10]。割草机在进行作业时,需要专用装置对草株进行导向和支撑,以顺利切割草株。草株在导向装置作用下的运动情况在实际中很难使用仪器测得,采用 ADAMS

仿真软件,建立杂草与导向装置的刚柔耦合模型,通过仿真可直观地获得草株在导向装置作用下的运动规律^[10-11]。本研究采用 ADAMS 仿真软件对草株在导向装置作用下的运动规律进行分析,旨在为圆盘式割草机喂草导向装置的设计与优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 割草机喂草导向装置设计

根据实际情况对割草机的喂草导向装置进行设计。割草机已知的参数条件:动刀盘直径是 600 mm,喂草导向装置最大直径为 800 mm。由此初步设计喂草导向装置共有 3 组喂草口,分别为第一、二、三喂草口,大小依次为 140°、97°和 50°。第一喂草口幅宽为 751.75 mm,第二喂草口幅宽为 600 mm(即为动刀盘直径)。如图 1 所示。因此,可通过改变第一喂草口的角度来优化割草机的工作效果。根据实际设计情况与加工条件对第一喂草口初步设计 8 个角度:70°~140°(每 10°为 1 个区间),即共设计 8 个喂草导向装置模型。如图 2 为第一喂草口为 80°的喂草导向装置俯视图。

1.2 虚拟样机建模及仿真

1)刚性体部件建模。联合三维软件 CREO 和

收稿日期: 2018-09-26

基金项目: 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-27)

张 雯,硕士研究生。研究方向:现代农业装备技术。E-mail: 354768842@qq.com

通信作者: 张衍林,教授。研究方向:柑橘生产机械化和生物质能装备。E-mail: zhangyl@mail.hzau.edu.cn

虚拟样机软件 ADAMS 建立割草机喂草导向装置与杂草的刚柔耦合模型。在 CREO 中建立喂草导向装置各个部件的刚性体模型。为便于仿真,可对模型进行适当的简化,直接影响喂草导向装置工作效果的是第一喂草口,因此,可去除其他喂草口。为了直观地观察喂草导向装置的工作效果,保留动刀切割系统。将简化好的模型保存为 Parasolid 文件并导入 ADAMS 中。如图 3 中蓝色部件为动刀切割系统模型,黄色部件为喂草导向装置的第一喂草口模型,棕色部件为大地模型。

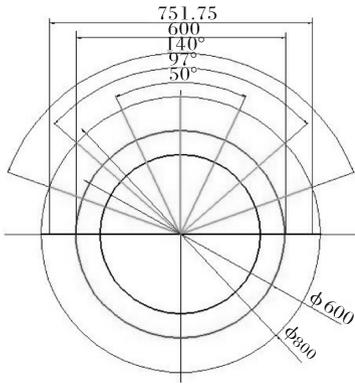


图 1 喂草导向装置设计原理图

Fig.1 Design schematic diagram of the guiding device

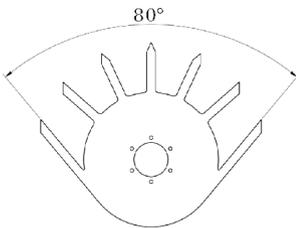


图 2 第一喂草口为 80°的喂草导向装置

Fig.2 The first grass-feeding port of the grass guiding device is 80°

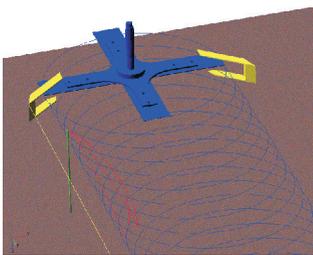


图 3 喂草导向装置喂草口为 100°时的仿真结果

Fig.3 Simulation results of the guiding device with a grass-feeding angle of 100°

2)草的柔性体建模。本研究主要考察单株生长的较粗难切割的杂草在喂草导向装置作用下的运动

情况,在实际情况下,此类杂草受到作用力时有相同的运动趋势,因此,可建立 1 株杂草模型进行代表(并弱化风力、杂草间的相互作用等因素)。根据此类杂草形状特点,建立长度为 300 mm、直径为 5 mm 的圆柱体为杂草模型。使用 ADAMS 中自带的柔性体建模模块 ADAMS/ViewFlex 中的拉伸法(Extrusion)创建草的柔性体模型^[12]。选择 ADAMS 中自带的材料模型定义杂草。如图 3 绿色部件为杂草的柔性体模型。

3)定义接触力。低版本的 ADAMS 无法直接向柔性体和刚形体之间施加接触力等约束,需创建哑物体过渡接触力^[13-16]。本研究使用高版本的 ADAMS 2013 版,可直接在刚性体与柔性体之间添加约束,接触力类型为 Flex Body to Solid(柔性体与实体)。在 ADAMS 建模中通常使用冲击函数法(Impact)定义碰撞力。使用 Impact 函数时只需确定刚度系数、阻尼系数等参数,而对于各材料的弹性模量和泊松比只需在计算刚度系数时使用。对于非旋转体的碰撞,刚度系数 K 通常使用 Hertz 弹性碰撞模型理论公式计算。

$$K = \frac{4R^{1/2}E}{3} \quad (1)$$

式(1)中, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, 其中 R_1, R_2 分别为碰撞点处两物体的曲率半径, mm。 $\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, 其中 E_1, E_2 分别为两物体的弹性模量, μ_1, μ_2 分别为两物体的泊松比。

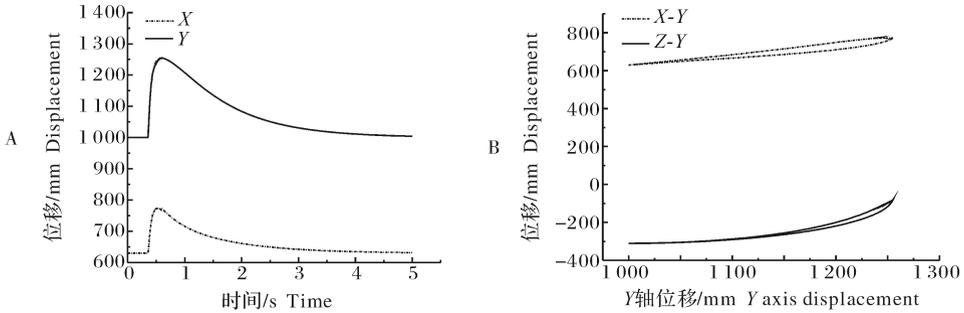
由于果园中杂草种类较多,难以一一确定每种杂草的生物力学性质,因此,参考其类似的作物(高粱、大豆等)的力学性能确定杂草模型的泊松比为 0.33、弹性模量为 1 000 MPa。因此,确定刚度系数为 2 353.51 N/mm,阻尼系数设置为 0.5 (N·s)/mm,碰撞指数设置为 0.1,渗透深度设置为 0.1 mm。摩擦系数采用 ADAMS 中 Coulomb 模型中的默认设置^[15,17]。

4)添加其他相关约束与驱动。为了简化模型,将杂草与地面的连接方式简化为柔性阻尼器 Bushing^[10]。Bushing 并不减少杂草与地面间的相对自由度,只在杂草与地面间产生一对相对位移和相对速度成正比的三分量作用力。对其他刚性部件使用 Fixed、Revolute、Translational 对其进行约束,并添加所需的驱动。

5)虚拟样机仿真结果。以喂草口为 100°、前进

速度为 1 330 mm/s 的模型为例。运行仿真之后,在 ADAMS 中标记动刀边缘位置得出动刀的轨迹,即为割草机的理论割幅(图 3 中的蓝色曲线)。标记喂草口最外缘位置即可得到割草机的实际割幅(图 3 中的黄色直线)。标记草株顶点位置即可得到草株顶端的运动轨迹,即为整株杂草的运动轨迹曲线(图 3 中的红色曲线)。使用 ADAMS 中的后处理器 Postprocessor,导出草株顶点的运动位移变化关系图像^[18]。空间坐标轴的方向如图 3 左下角所标示,Y 轴正方向为定刀前进方向,Z 轴正方向为草株生长反方向,X 轴正方向为水平向右。如图 4A

为草株顶点在 X 轴和 Y 轴的位移关于时间的关系图,图 4B 为草株顶点在 X、Z 轴位移关于 Y 轴位移的关系图。由函数关系图像可以看出草株在刚开始运动时,运行平稳,随着草株偏移角度不断增加,草株开始出现振动。在草株偏移达到最大值时振动达到最大。因此,在处理数据时需去除振动过于明显的一段。由图 4B 的 X-Y 曲线可以看出,草株与导向装置接触发生偏移的一段时间内 X 轴的位移可近似看成关于在 Y 轴位移的一次函数。由图 4B 的 Z-Y 曲线可以看出,在同时间段草株在 Z 轴的位移可近似看成关于在 Y 轴位移的二次函数。



A: X-time, Y-time 位移关系图 X-time, Y-time displacement relationship graph; B: X-Y, Z-Y 位移关系图 X-Y, Z-Y displacement relationship graph.

图 4 位移关系图

Fig.4 Displacement relationship graph

1.3 虚拟试验

1) 试验设计。由虚拟样机试验结果可知,影响杂草运动情况的因素主要为喂草导向装置前进速度、喂草导向装置第一喂草口角度以及杂草与喂草导向装置的相对位置,即割幅大小。在实际作业中割草机的前进速度主要为 2 个档位: 533、1 330 mm/s。割幅大小只会影响留茬高度,且割幅越大留茬高度越小,在试验中可通过测量最大留茬高度偏移量来表征喂草导向装置的工作效果,实际的喂草导向装置最大幅宽为 751.75 mm。在实际试验中,最大幅宽处的杂草经常出现并未进入喂草导向装置中从而未被切割的情况,因此,选择幅宽为 740 mm 进行试验。试验中动刀片距地高度设计为 100 mm,动刀片距地高度只影响割茬高度,对割茬偏移量不影响,因此,不作为试验因素考虑。设计混合水平试验对割草机在工作时杂草在喂草导向装置作用下的运动情况进行仿真分析,试验设计如表 1 所示。

表 1 虚拟试验因素水平表

Table 1 Virtual test factors and levels

水平 Level	最大喂草口夹角 A/(°) The first grass- feeding angle	前进速度 B/(mm/s) Forward speed
1	70	533
2	80	1 330
3	90	
4	100	
5	110	
6	120	
7	130	
8	140	

2) 试验过程。为了验证虚拟样机试验的结果,于 2018 年 6 月在华中农业大学校园内杂草地进行试验,杂草地生长的杂草主要为小飞蓬、一年蓬等(如图 5),满足试验要求。试验器材主要有:圆盘式小型割草机一台(技术参数如表 5 所示),手持式转速仪、卷尺(量程 3.0 m,精度 1 mm),直尺(量程 0.3 m,精度 1 mm)、秒表、相机。割草机的切割方式为圆盘式,配套 4 kW 的汽油机,割幅宽度为 750

mm, 动刀距地高度为 100 mm, 一档的前进速度为 533 mm/s, 二档前进速度为 1 330 mm/s, 动刀盘转速为 900 r/min。



图 5 圆盘式割草机和实际试验地点

Fig.5 Disc mower and actual test site

根据前期仿真分析结果, 设计混合水平试验, 如表 2 所示。

表 2 实际试验因素水平表

Table 2 Actual test factors and levels

水平 Level	最大喂草口夹角 A/(°) The first grass- feeding angle	前进速度 B/(mm/s) Forward speed
1	70	533
2	80	1 330
3	90	

2 结果与分析

2.1 虚拟试验结果

由草株在各个坐标轴的位移空间几何关系可求得以下 3 个重要参数: 草株在 XOY 平面内的最大偏角 α (如图 6 所示); 300 mm 高的草株的理论最大可切幅度 L ; 草株切断时在 Z 轴方向上的偏差高度 Δz , 即为割茬的偏差量。偏移角度 α 表示杂草在受到喂草导向装置的作用发生偏移时与 X 轴方向的夹角, 此角度越小, 杂草倾斜程度越高, 越有利于切割。割茬偏移 Δz 是由于喂草导向装置的作用使草株发生倾斜而造成的割茬高度的偏移量, Δz 越小表明效果越好。L 为排除喂草导向装置实际尺寸所计算出的割幅最大值 (在草株高 300 mm 情况下), 其值越大, 表明可实现的割幅越宽, 因此, 越大越好。

在草株的整个切割过程中, 会出现草株正被动刀切割时的时刻 T。在 T 时刻草株与动刀接触点在 XOY 平面的投影在 x、y 轴的坐标与原点 O 形成

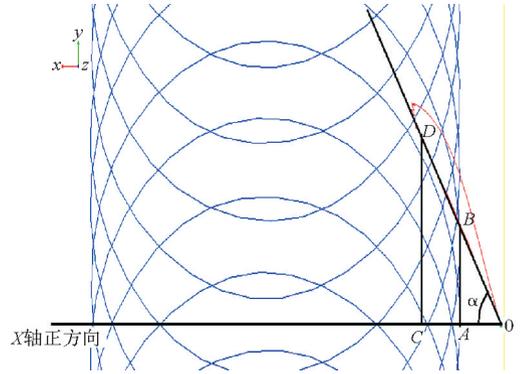


图 6 X、Y 轴位移的几何关系

Fig.6 Spatial geometric relationship of X and Y axis

的直角三角形为 $\triangle OAB$ 。由于无法直接得出时刻 T 的具体值, 因此, 引入任一时刻 t_1 (去除草株自动归位的过程和振动严重的过程), 时刻 t_1 草株顶点在 XOY 平面的投影在 x、y 轴的坐标与原点 O 形成直角三角形 $\triangle OCD$ 。由此可知, $\triangle OAB$ 与 $\triangle OCD$ 相似。OA 为草株正被切割时 (T 时刻) 接触点在 X 轴的位移, 根据实际情况求得 $OA = 70$ mm。AB 为此刻接触点在 Y 轴的位移。OC 为在某一时刻 t_1 草株顶点在 X 轴的位移, CD 为同一时刻 t_1 草株在 Y 轴的位移 (OC、CD 可在位移时间图 4A 中查到)。根据三角形相似原理可得出如下公式:

$$\frac{CD}{AB} = \frac{OC}{OA} \quad (2)$$

从而求出 AB。由 AB 值在 Z-Y 位移关系在图 4B 中查到 Z (Z 为草株顶点在 X 轴的位移为 OA 时, 草株顶点在 Z 轴方向上的坐标值), 进而求得 $\Delta z = Z - Z_0$ (Z_0 为草株顶点在 Z 轴方向上的初始坐标值)。由于草株上各个点的位移关系具有相似性, 因此, Δz 即为割茬偏移。并由公式:

$$\tan \alpha = \frac{CD}{OC} \quad (3)$$

求得 α 值。

由 X-time 关系在图 4A 可得出 300 mm 高的草株顶点在 X 轴的最大位移 Δx_{max} , 根据喂草导向装置最大喂草角与动刀的位置关系得 $L = 600 + 2\Delta x_{max}$ (600 mm 为实际割幅), 因此, 可求得理论最大可切幅宽 L。

用 Design-Expert10 软件设计虚拟试验方案。则虚拟试验的响应面设计方案与试验结果如表 3 所示。

表 3 虚拟试验的响应面设计方案与试验结果

Table 3 Response surface design and experimental data of virtual experiment

试验编号 Test number	角度 A/(°) Angle	前进速度 B/(mm/s) Forward speed	偏移角度 α /(°) Offset angle	割茬偏移 Δz /mm Cutting offset	最大可切割宽 L/mm Maximum cut width
1	120	533	68.90	149.02	760.34
2	140	533	75.44	203.24	688.42
3	90	533	56.45	54.32	862.83
4	80	533	41.86	29.75	1 010.22
5	90	1 330	54.37	45.50	922.61
6	130	1 330	71.57	161.80	746.43
7	120	1 330	67.31	124.21	791.32
8	140	1 330	75.47	204.03	702.13
9	110	1 330	63.39	84.28	832.12
10	110	533	64.84	99.05	798.41
11	80	1 330	40.33	27.02	1 011.21
12	70	533	52.33	51.94	935.68
13	100	1 330	60.33	60.49	873.45
14	70	1 330	45.14	34.25	999.86
15	100	533	60.07	66.84	829.07
16	130	533	70.96	196.93	725.93

使用 Design-Expert10 软件对所得数据进行多元回归拟合分析。分别得到 α 、 Δz 和 L 的响应面模型方程为:

$$\alpha = 61.97 + 8.91A - 0.61B - 0.85AB + 10.87A^2 + 1.57A^2B + 43.58A^3 + 3.99A^3B - 77.70A^4 - 2.69A^4B - 39.11A^5 - 1.35A^5B + 66.96A^6 \quad (4)$$

$$\Delta z = 74.96 + 92.76A - 5.13B - 6.88AB + 136.95A^2 - 19.28A^2B + 64.08A^3 - 28.63A^3B - 229.05A^4 + 20.23A^4B - 76.56A^5 + 40.10A^5B + 140.49A^6 \quad (5)$$

$$L = 834.95 - 86.19A + 24.39B - 36.54AB - 94.51A^2 - 55.14A^2B - 366.63A^3 + 146.17A^3B + 585.25A^4 + 49.48A^4B + 316.44A^5 - 122.19A^5B - 494.17A^6 \quad (6)$$

对上述各响应值进行响应面模型因素显著性检验^[19],分析结果如表 4 所示。当因素的 $P_x > F$ 值小于 0.050 0 时,此因素对这个指标为显著影响因素。而对于指标偏移角度,效应检验显著的因素有 A、A³、A⁵、A⁶,其影响因素主次排序依次为 A(最大喂草口角度)、B(前进速度);对于指标割茬偏移 Δz ,效应检验显著的因素有 A、B、A²、A²B、A³、A⁴、A⁴B、A⁵、A⁵B、A⁶,其影响因素主次排序依次为 A(最大喂草口角度)、B(前进速度);对于指标最大可切幅宽 L ,效应检验显著的因素有 A、B、A³、A⁵,其影响因素主次排序依次为 A(最大喂草口角度)、B(前进速度)。

使用 Design-Expert10 软件的 Optimization 模块进行数值优化选择,得到响应曲线图以及最优结果(如图 7 所示),最优的试验因素组合为 74.80°

(A)、1 330 mm/s(B)。此时,偏移角度为 35.52°,最大割茬偏移为 20.24 mm,最大可切割幅为 1 050.43 mm。

2.2 验证试验

使用 Design-Expert10 软件设计实际试验方案。田间试验受条件限制较多,试验指标以幅宽为 740 mm 处的杂草割茬偏移高度 Δz 为指标。每组试验取 3 株在幅宽为 740 mm 处的杂草,测量其割茬偏移量并求平均值作为 Δz 。实际试验方案与结果如表 5 所示。

使用 Design-Expert10 软件对所得数据进行多元回归拟合分析,采用软件建议的拟合方式对数据进行处理。得到割草机在幅宽为 740 mm 处的杂草割茬偏移 L 与各因素的多元回归模型方程为:

$$\Delta z = 27.15 + 10.32A - 4.6B - 1.17AB + 20.83A^2 \quad (7)$$

表 4 虚拟试验响应面模型因素显著性检验

Table 4 Virtual test response surface model factor significance test

指标 Index	因素 Factor	自由度 Degree of freedom	平方和 Sun of squares	均方 Mean square	F	$P_{\alpha} > F$
α	模型 Model	12	1 930.51	160.88	121.04	0.001 1
	A	1	19.69	19.69	14.82	0.031 0
	B	1	1.55	1.55	1.16	0.359 6
	AB	1	0.18	0.18	0.13	0.738 8
	A ²	1	1.80	1.80	1.35	0.328 8
	A ² B	1	0.34	0.34	0.26	0.648 2
	A ³	1	35.66	35.66	26.83	0.014 0
	A ³ B	1	0.30	0.30	0.22	0.667 7
	A ⁴	1	12.42	12.42	9.35	0.055 1
	A ⁴ B	1	1.16	1.16	0.88	0.418 5
	A ⁵	1	49.43	49.43	37.19	0.008 9
	A ⁵ B	1	0.059	0.059	0.044	0.847 1
	A ⁶	1	20.84	20.84	15.68	0.028 8
Δz	模型 Model	12	62 531.63	5 210.97	1 732.58	<0.000 1
	A	1	2 134.14	2 134.14	709.58	0.000 1
	B	1	109.73	109.73	36.48	0.009 1
	AB	1	11.74	11.74	3.90	0.142 7
	A ²	1	285.54	285.54	94.94	0.002 3
	A ² B	1	51.46	51.46	17.11	0.025 6
	A ³	1	77.12	77.12	25.64	0.014 9
	A ³ B	1	15.40	15.40	5.12	0.108 7
	A ⁴	1	107.94	107.94	35.89	0.009 3
	A ⁴ B	1	65.79	65.79	21.87	0.018 5
	A ⁵	1	189.40	189.40	62.97	0.004 2
	A ⁵ B	1	51.97	51.97	17.28	0.025 3
	L	模型 Model	12	1.752E+005	14 603.36	98.66
A		1	1 842.70	1 842.70	12.45	0.038 7
B		1	2 480.75	2 480.75	16.76	0.026 4
AB		1	331.12	331.12	2.24	0.231 6
A ²		1	135.97	135.97	0.92	0.408 6
A ² B		1	421.05	421.05	2.84	0.190 3
A ³		1	2 524.49	2 524.49	17.05	0.025 8
A ³ B		1	401.27	401.27	2.71	0.198 2
A ⁴		1	704.70	704.70	4.76	0.117 1
A ⁴ B		1	393.64	393.64	2.66	0.201 4
A ⁵		1	3 235.89	3 235.89	21.86	0.018 5
A ⁵ B		1	482.45	482.45	3.26	0.168 8
A ⁶		1	1 135.23	1 135.23	7.67	0.069 6

表 5 实际试验的响应面设计方案与结果

Table 5 Response surface design and experimental data of actual experiment

试验编号 Test number	角度 A/(°) Angle	前进速度 B/ (mm/s) Forward speed	割茬偏移 Δz /mm Cutting offset
1	70	1 330	34.0
2	80	533	31.3
3	90	533	64.3
4	80	1 330	23.0
5	70	533	41.3
6	90	1 330	52.3

影响因素主次为 A²、A、B、AB，效应检验显著的因素有 A²、A、B。由此可知，割草机喂草导向装置喂草口角度比割草机前进速度对割茬偏移的影响更为显著。使用 Design-Expet10 软件的 Optimization 模块进行数值优化选择，得到响应曲线图以及最优结果（如图 8 所示），最优的试验因素组合为 77.73°(A)、1 330 mm/s(B)。此时，最大割茬偏移为 21.55 mm。对比虚拟试验结果与实际试验结果可知，各影响因素对割草机割茬偏移的影响趋势一致，考虑实际情况，优化得到的最优的参数组合是：割草机的喂草导向装置最大喂草角的角度为 80°；前进速度为 1 330 mm/s。

对上述回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验，分析结果如表 6 所示。对于割茬偏移 Δz ，

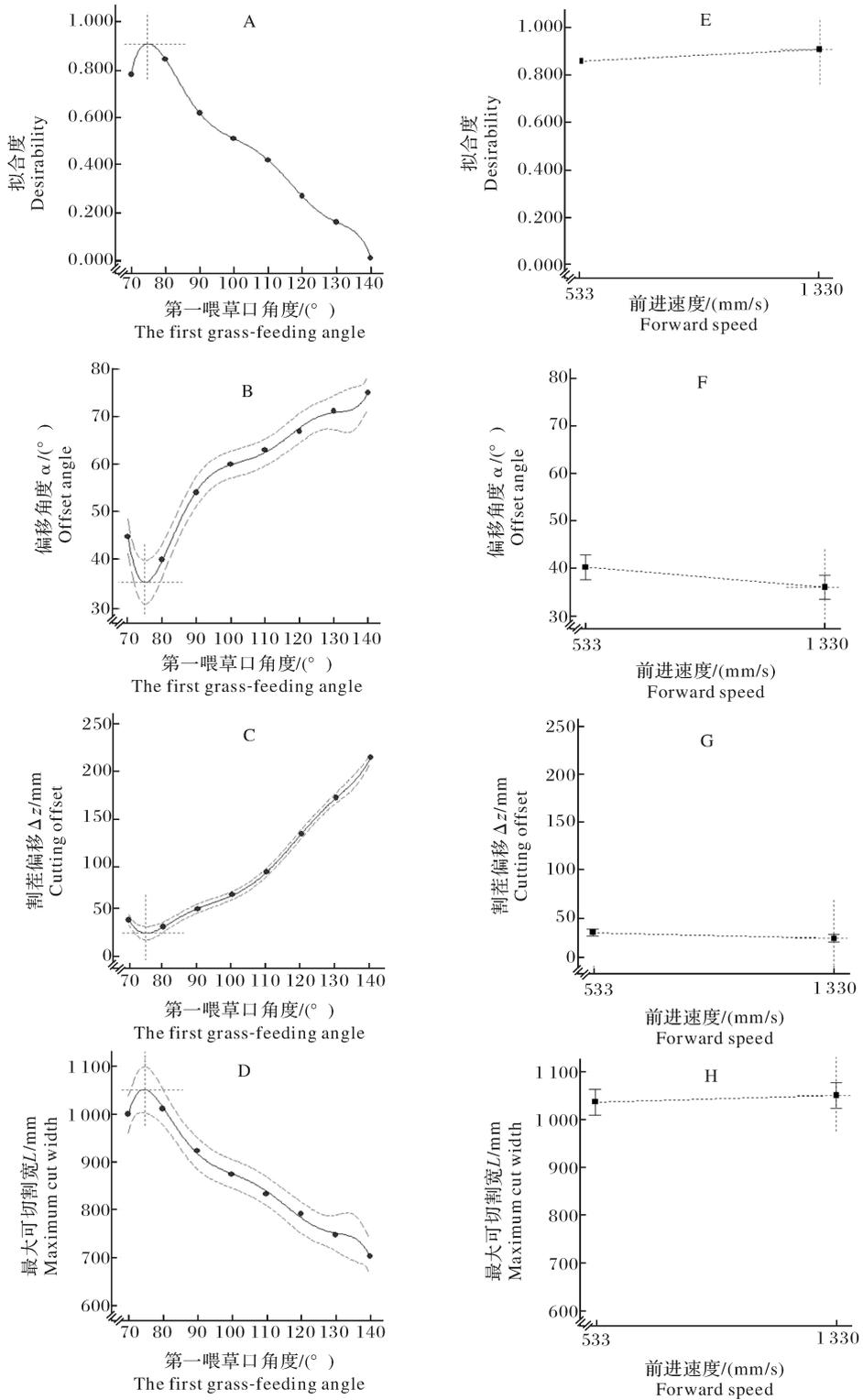


图 7 虚拟试验的响应曲线图以及最优结果

Fig.7 Response curve and optimal results

表 6 实际试验响应面模型因素效应检验

Table 6 Actual test response surface model factor significance test

因素 Factor	自由度 Degree of freedom	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F	$P_x > F$
模型 Model	4	1 137.15	284.29	467.96	0.034 7
A	1	426.42	426.42	701.93	0.024 0
B	1	126.96	126.96	208.99	0.044 0
AB	1	5.52	5.52	9.09	0.203 9
A ²	1	578.24	578.24	951.84	0.020 6

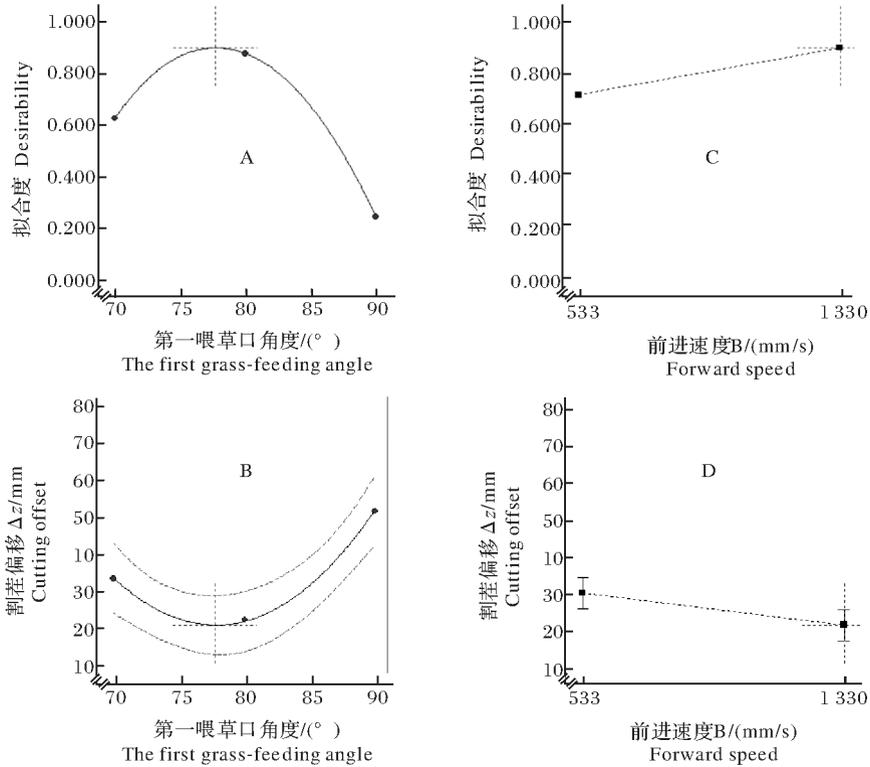


图 8 实际试验响应曲线图以及最优结果

Fig.8 Actual test response curve and optimal results

3 讨论

本研究以割草机喂草导向装置为对象,使用 ADAMS 和 CREO 软件创建的割草机喂草导向装置与杂草的刚柔耦合模型。通过对杂草在喂草导向装置作用下的运动规律进行运动学仿真分析,研究杂草在空间坐标系中与各个坐标轴位移关系,求得偏移夹角、割茬偏移和最大理论割幅 3 个指标的响应面模型方程,并通过实际试验验证模型的正确性。结果表明,最优方案为喂草口角度为 80°,机器前进速度为 1 330 mm/s。此时,割草机喂草导向装置的工作效果良好,割茬平整,最大偏移量为 27.02 mm。

ADAMS 作为一款仿真分析的软件,常用来对机构的动力学进行仿真分析^[15-16]。本研究则以草株

在喂草导向装置作用下的运动学规律为研究重点,通过对运动轨迹分析,探讨影响杂草偏移的各个因素,得出最优的参数结果,可为割草机实际设计提供参考,对割草机参数的优化提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 于威,韩晓梅.现代化果园机械除草装备与技术应用现状及发展趋势[J].现代农村科技,2017(6):97.
 [2] 李黎,胡奎,牛俊凡,等.宜昌市柑橘园杂草种群分布特点[J].长江大学学报(自然科学版),2015,12(33):5-8;28;4.
 [3] 马静,赵润良.果园机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J].农业与技术,2016,36(10):45-46.
 [4] 潘变,李广伟,朱学敏.9G-1.4 型往复型果园割草机的设计[J].农业研究与应用,2013(2):47-49.
 [5] 向凯.锤刀式割草机的设计与分析[D].武汉:湖北工业大学,2017.

- [6] 赵匀.农业机械现代设计方法综述[J].东北农业大学学报, 2012,43(2):1-5.
- [7] 周杰,徐红梅,王君,等.基于ADAMS的轮式拖拉机行驶平顺性研究[J].华中农业大学学报,2017,36(3):93-100.
- [8] 郭艳玲,鲍玉冬,何培庄,等.手推式矮丛蓝莓采摘机设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(4):40-45.
- [9] 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.
- [10] 陈海涛,顿国强.基于虚拟样机动力学的大豆扶禾器参数优化[J].农业工程学报,2012,28(18):23-29.
- [11] 明哲.基于Adams的玉米收割机分禾器仿真分析[J].中国农机化学报,2014,35(3):19-22.
- [12] 郭君娣.玉米茎秆与收获机制台的性能仿真柔性体仿真[D].合肥:安徽农业大学,2015.
- [13] 裴未迟,李耀刚,李运红,等.基于虚拟样机技术:ADAMS的冲击力模型[J].河北理工大学学报,2008,30(4):59-63.
- [14] 张照,廖庆喜,许博,等.油菜钵苗移栽机栽植机构参数匹配与轨迹分析[J].华中农业大学学报,2017,36(2),108-118.
- [15] 邱述金,郭玉明,郑德聪.柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化[J].农业机械学报,2014,45(8):74-79.
- [16] 鲁云松,朱明,陈海军,等.二自由度振动筛运动学分析及仿真试验[J].华中农业大学学报,2017,36(3):107-112.
- [17] 梁莉,郭玉明.作物茎秆生物力学与形态特性相关性研究[J].农业工程学报,2008,24(7):1-6.
- [18] 宋少云,尹芳.ADAMS在机械设计中的应用[M].北京:国防工业出版社,2017.
- [19] 张泽志,韩春亮,李成未.响应面法在试验设计与优化中的应用[J].河南教育学院学报(自然科学版),2011,20(4):34-37.

Parameter optimization of disc lawn mower grass-feeding guide device based on dynamic simulation of virtual prototype

ZHANG Wen ZHANG Yanlin LI Shanjun MENG Liang CHANG Junxiang WANG Fengwu

*College of Engineering, Huazhong Agricultural University/
Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China*

Abstract A special grass-feeding guide device for the disc lawn mower was designed for the coarse and difficult-to-cut weeds that are commonly grown in the orchard. Combined with CREO and ADAMS, the rigid-flexible coupling model of grass-feeding guides and weeds was established, and the movement laws of weeds in the case of grass-feeding guide device with different angles and advance speeds were analyzed. According to the relationship between the displacement of the weed tip point in the X, Y and Z directions of the space coordinate system, three important indicators including the offset angle of the weed, the theoretical maximum cutting width of the mower and the cutting offset were calculated to characterize the working effect of the grass-feeding guide device. Using Design-Expert 10.0 software, a comprehensive test was designed, and the response surface effects of the three indicators were analyzed, and the experiments were verified and compared. The results showed that the optimal angle of the grass-feeding port was 80° , with the machine forward speed of 1 330 mm/s. At this time, the grass-feeding guide device worked well with flat cutting and the maximum offset of 27.02 mm.

Keywords disc lawn mower; grass-feeding guide device; dynamic simulation; parameter optimization

(责任编辑:陆文昌)