

鲍秀兰, 严煜, 毛金城, 等. 果园割草机器人甩刀设计与分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 136-143.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.06.019

# 果园割草机器人甩刀设计与分析

鲍秀兰<sup>1</sup>, 严煜<sup>1</sup>, 毛金城<sup>2</sup>, 田富洋<sup>3</sup>, 孟亮<sup>1</sup>

1. 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;

2. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205; 3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018

**摘要** 果园割草机器人的除草性能与草的物理特性以及甩刀的设计参数紧密相关, 结合柑橘果园杂草种类情况及其物理特性, 基于 Y 型甩刀式割草机构设计一种果园割草机器人。运用 D-H 法建立甩刀切割单个茎秆的运动学模型, 模型分析表明, 在不出现缠草的条件下, 甩刀轴转速 1 500 r/min 时在最优切割位内对单根杂草茎秆的碰撞力为 74.25 N。刀片的切割轨迹分析表明, 设计的 Y 型甩刀刀片切向速度与前进速度的比值  $\lambda > 1$  时, 割草机器人能有效地进行割草作业。割草机器人实地割草试验结果表明, 刀片座间距 43 mm、刀轴转速 1 500 r/min、前进速度 1.0 m/s 时, 重割率最小。

**关键词** 果园机械; 割草机器人; Y 型甩刀; 杂草刈割; 重割率; 机械留茬式除草; 防缠草

**中图分类号** S 224.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)06-0136-08

大力发展小型农用机械是实现丘陵地区果园现代化的关键措施之一。目前我国小型农机的发展与农业发达国家仍存在一定差距<sup>[1-3]</sup>。果园杂草刈割是果园管理的重要环节之一, 丘陵地区由于农机化水平较低, 导致果园管理需要耗费大量劳动力<sup>[4]</sup>。传统的药剂除草容易产生药物残留, 导致果园环境污染, 同时由于药剂除草过于彻底, 容易导致土壤水分流失<sup>[5-6]</sup>。果园的机械留茬式除草一方面减少了对劳动力的过度依赖, 另一方面机械除草所产生的碎草屑在腐烂后形成的肥料有利于果树的生长, 同时所留草茬可有效防止果园土壤水分流失, 对果园土壤的保护具有重要作用<sup>[7-8]</sup>。

现有的除草机械的刀盘结构主要包括圆盘式、滚刀式、往复式、甩刀式等形式<sup>[9]</sup>。其中, 圆盘式刀盘消耗功率大、碎草性差; 滚刀式刀盘易缠草, 碎草性差; 往复式刀盘的震动性大、适应性差。付作立等<sup>[10]</sup>设计了一种双盘式苜蓿旋转切割器, 研究表明该切割器的盘式切割结构更适用于植物收获类机器。曾晨等<sup>[11]</sup>基于滚刀式刀盘结构设计了一种割草机, 该割草机主要适用于垄间较窄的茶园。潘变等<sup>[12]</sup>设计了一种前悬往复式果园割草机, 但不适用

于丘陵地区。由于山地果园地形复杂, 对刀具的适应性要求高; 且杂草种类繁多, 大量存在的攀援草本植物极易缠绕刀具从而产生卡死现象并损坏机器。甩刀式刀盘结构由于运行稳定性强、适应性强且防缠草性能略优于其他几种除草结构, 因此适合作为果园割草机构。本研究基于笔者所在团队设计的前抬架式履带割草机器人, 探讨了甩刀结构在割草时的运动学问题, 针对降低甩刀结构的重割率问题, 分析了割草部分的设计参数, 得出了各项参数对重割率的影响趋势, 旨在为甩刀结构进一步优化提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 甩刀结构及运动分析

1) 甩刀及甩刀轴设计。割草机器人的甩刀刀片为 L 型设计, 刀刃的角度选为 45°, 刀片厚度设置为 4 mm。为了保证割草时甩刀轴的动态稳定性, 同时使刀片运动轨迹覆盖率达到最大, 刀片排布采用螺旋对称排列的方式<sup>[13]</sup>。轴上共布置 3 排刀片座, 共 19 对 L 型刀片, 每排周向间隔 120°。3 排刀片座数分别为 7、6、6 对, 呈轴向中心对称, 对称轴左右两边

收稿日期: 2020-09-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2662109PY063); 国家自然科学基金项目(51605181); 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS26)

鲍秀兰, 博士, 副教授, 研究方向: 智能化农业装备, E-mail: orchidbaoxl@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 毛金城, 博士, 副教授, 研究方向: 机械装备设计加工, E-mail: 14100304@wit.edu.cn

呈螺旋线排布。单组甩刀的三维结构如图 1 所示，刀片成对通过销轴反向连接在刀片座上，各个刀片能够在甩刀轴上自由摆动。

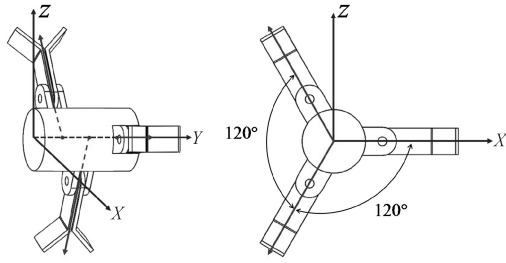


图 1 单组甩刀三维排布结构图  
Fig.1 A set of blade 3-D arrangement of the structure drawing

2) 甩刀运动学建模。该模型以单一茎秆为甩刀的切割对象。图 2 为甩刀轴及甩刀的线条简图。{0} 为固接在甩刀轴中心点处的基坐标系；{1} 为随甩刀轴中心点转动的动坐标系，坐标系 {1} 和 {2} 原点皆为  $O_1$ ；{2} 为固接在甩刀旋转轴心处的动坐标系。

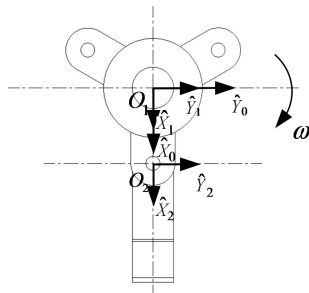
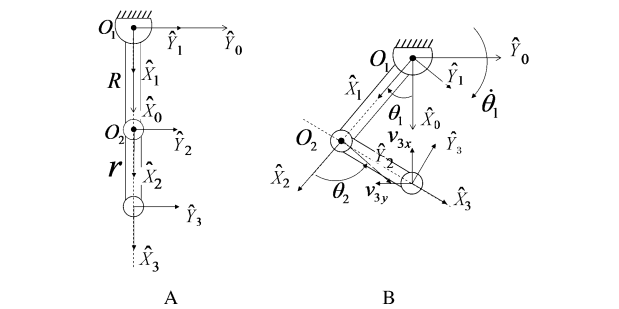


图 2 甩刀运动简图  
Fig.2 Kinematic diagram of blade

利用 D-H 原理建立甩刀运动过程中速度、位移的运动关系<sup>[14]</sup>。为简化割草机器人甩刀部分的运动学过程，本研究将甩刀轴以及刀片视为两根连杆。如图 3A 所示，连杆一两轴心分别为甩刀轴旋转中



A. 刀片刚碰到茎秆时的状态 State of the blade when it first touches the stem; B. 刀片切割茎秆后的状态 State of blade after cutting stem.

图 3 甩刀-连杆运动简图

Fig.3 Swing blade-connecting rod motion diagram

心至刀片销轴中心；连杆二两轴心分别为刀片旋转轴心至刀片与草茎接触点。{3} 为固接在甩刀与草茎接触点处的固接坐标系。刀片在碰到茎秆时，各连杆的位姿会变成如图 3B 所示。 $\theta_1$  为动坐标系 {1} 的转动角度，以顺时针为正方向； $\theta_2$  为动坐标系 {2} 的逆时针转动角度。

图 3 中， $O_1$  为甩刀轴旋转中心； $O_2$  为刀片与销轴铰接中心； $R$  为甩刀轴旋转中心到销轴中心的距离， $m$ ； $r$  为销轴中心距离刀片与草接触点的距离， $m$ ； $\theta_1$  为甩刀轴的转动角度， $rad$ ； $\theta_2$  为刀片的转动角度， $rad$ ； $\dot{\theta}_1$  为甩刀轴旋转的角速度， $rad/s$ ； $\dot{\theta}_2$  为刀片绕销轴的角速度， $rad/s$ 。

如图 3A 所示，甩刀轴高速旋转时，在离心力的作用下，刀片会逐渐相对甩刀轴趋于稳定。假设在刀片趋于稳定转动状态后，刀片切割侧与甩刀轴正下方草茎进行碰撞接触。整个接触过程持续至刀片另一侧与甩刀轴干涉为止。当刀片与甩刀轴发生干涉以后且仍未将草茎切断时，草茎则有几率卷入甩刀机构中继而发生缠草现象。因此，该过程是刀片将草茎切断的“最优切割位”，如图 3B 中  $\theta_1$  角所示。另假设杂草茎秆为刚体，在被刀片切割时不发生形变，根据动量守恒定理，非弹性碰撞产生损失能量，因此碰撞产生的力小于弹性碰撞<sup>[15]</sup>。刀片切割刚体茎秆，在最优切割位用最大的切割力将杂草茎秆割断是甩刀工作时不发生缠草现象的必要条件。

依次建立各连杆固接坐标系相对于转轴的转动矩阵：

$$\begin{aligned}
 {}^0_1\mathbf{T} &= \begin{Bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}; \\
 {}^1_2\mathbf{T} &= \begin{Bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & R \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}; \\
 {}^2_3\mathbf{T} &= \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中， ${}^0_1\mathbf{T}$  为坐标系 {1} 相对于 {0} 的旋转矩阵； ${}^1_2\mathbf{T}$  为坐标系 {2} 相对于 {1} 的旋转矩阵； ${}^2_3\mathbf{T}$  为坐标系 {3} 相对于 {2} 的旋转矩阵。依次可以算出各个连杆间的速度和角速度，因为基坐标 {0} 固定不动，故存在：

$${}^0\omega_0 = 0; {}^0v_0 = 0 \tag{2}$$

其中,  ${}^0\omega_0$  为坐标系  $\{0\}$  的旋转角速度;  ${}^0v_0$  为基  
坐标系相对于旋转中心的线速度。则两连杆的转动  
中心角速度和速度依次可表达如下:

$${}^1\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}; {}^1v_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2\omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}; {}^2v_2 = \begin{bmatrix} Rs_2\dot{\theta}_1 \\ Rc_2\dot{\theta}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3\omega_3 = {}^2\omega_2 \quad (5)$$

$${}^3v_3 = \begin{bmatrix} Rs_2\dot{\theta}_1 \\ Rc_2\dot{\theta}_1 + r(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $s_2, c_2$  分别表示  $\sin\theta_2, \cos\theta_2$ 。则根据以上  
式子可求出坐标系  $\{3\}$  转动中心的雅可比矩阵为:

$${}^3J(q) = \begin{bmatrix} Rs_2 & 0 \\ Rc_2 + r & r \end{bmatrix} \quad (7)$$

求出相对于基坐标的系  $\{0\}$  表示的角速度  ${}^0\omega_3$   
和  ${}^0v_3$ , 计算旋转变化的。

$${}^0R = {}^0R_1R_2R_3R = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^0\omega_3 = {}^0R^3\omega_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$${}^0v_3 = {}^0R^3v_3 = \begin{bmatrix} -Rs_1\dot{\theta}_1 - rs_{12}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ Rs_1\dot{\theta}_1 - rc_{12}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ 0 \end{bmatrix}$$

末端连杆即刀片与草茎的接触点的广义速 公式:

$$F = \frac{m(\sqrt{[(-Rs_1 - rs_{12})\dot{\theta}_1 - rs_{12}\dot{\theta}_2]^2} + \sqrt{[(-Rs_1 - rs_{12})\dot{\theta}_1 - rs_{12}\dot{\theta}_2]^2 - \dot{\theta}_1(R+r)})}{\theta_1/\dot{\theta}_1} \quad (15)$$

3) 甩刀切割茎秆过程仿真。运用 ADAMS 软  
件对甩刀切割茎秆过程进行仿真分析。假设草的茎  
秆为刚性体, 且建立一圆柱替代单根草茎秆; 甩刀  
的旋转中心在圆柱中心轴线的正上方。可得  $\theta_1 =$   
 $77.4^\circ, \theta_2 = 111.76^\circ, R = 0.055 \text{ m}, r = 0.075 \text{ m}$ 。令  
甩刀质量为  $0.1 \text{ kg}$  且设定甩刀轴的转速为  $1500$

$$v_3 = \begin{bmatrix} v_{3x} \\ v_{3y} \\ v_{3z} \\ \omega_{3x} \\ \omega_{3y} \\ \omega_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Rs_1 - rs_{12} & -rs_{12} \\ Rc_1 + rc_{12} & rc_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

即甩刀模型的雅可比矩阵为:

$${}^0J(q) = \begin{bmatrix} -Rs_1 - rs_{12} & -rs_{12} \\ Rc_1 + rc_{12} & rc_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此, 末端切割草茎的速度方程为:

$$\begin{cases} v_{3x} = (-Rs_1 - rs_{12})\dot{\theta}_1 - rs_{12}\dot{\theta}_2 \\ v_{3y} = (Rc_1 + rc_{12})\dot{\theta}_1 + rc_{12}\dot{\theta}_2 \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $s_{12}, c_{12}$  分别表示  $\sin(\theta_1 + \theta_2), \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 。  
根据动量守恒定理有:

$$F = \frac{m(v_2 - v_1)}{\theta_1/\dot{\theta}_1} \quad (13)$$

其中,  $F$  为刀片对草茎的冲击力, N;  $m$  为刀片  
质量, kg;  $v_1, v_2$  为刀片的绝对初始速度、绝对末速  
度, m/s。初始速度和末速度分别为:

$$\begin{cases} v_1 = \dot{\theta}_1(R+r) \\ v_2 = v_{3x} + v_{3y} \\ = (\sqrt{[(-Rs_1 - rs_{12})\dot{\theta}_1 - rs_{12}\dot{\theta}_2]^2} + \\ \sqrt{[(-Rc_1 - rc_{12})\dot{\theta}_1 - rc_{12}\dot{\theta}_2]^2}) \end{cases} \quad (14)$$

将公式(14)代入(13)中即可得到碰撞力计算

r/min。甩刀轴从 0 时刻开始沿顺时针方向旋转。如  
图 4 所示, 可得到刀片随时间相对于销轴中心的旋  
转角速度。

由仿真结果可以得出:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = 9000 \text{ d/s} = 157.08 \text{ rad/s} \\ \dot{\theta}_2 = 12995 \text{ d/s} = 226.79 \text{ rad/s} \end{cases}$$

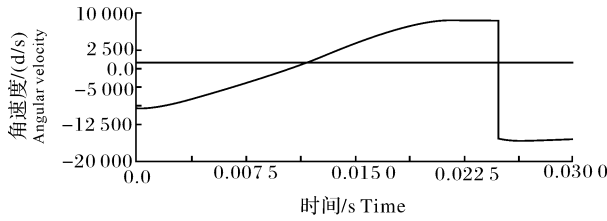


图 4 刀片与销轴的相对角速度变化

Fig.4 Change of relative angular velocity between blade and pin shaft

将以上结果代入公式(15)中可求出  $v_{3,x}$  和  $v_{3,y}$  以及碰撞力  $F$ 。

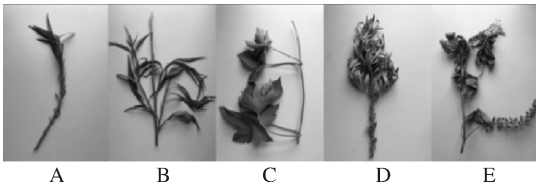
$$\begin{cases} v_{3,x} = -3.854 \text{ m/s} \\ v_{3,y} = -26.528 \text{ m/s} \\ F = 74.25 \text{ N} \end{cases}$$

由结果可知,甩刀轴在转速 1 500 r/min 时能在最优切割位内输出的最大碰撞力为 74.25 N。

### 1.2 果园杂草分类及其力学特性

1) 果园杂草分类。柑橘果园内的杂草大致可分为一年生和多年生杂草 2 种。对柑橘果园杂草实地测量发现,一年生杂草主要有蛇床、狗尾草、钻叶紫苑、小蓬草,大多为茎直立、多分枝,茎长 10~100 cm,茎粗 3~10 cm。多年生杂草主要有白车轴草、菎草、艾草、垂序商陆,大多有茎匍匐蔓生、喜好缠绕、成半灌木状以及茎粗壮多分枝,茎长 10~1 000 cm,茎粗在 10 cm 以内。一般在柑橘果园中,留茬长度 5~10 cm,这有利于对果园土壤的水分进行调控<sup>[16]</sup>。

2) 果园力学试验。如图 5 所示,分别有 5 种杂草样本用于力学试验。样本从距离地面 3 cm 的根管处剪断,只保留直径 4~6 mm 的杂草光茎秆。由于柑橘果园内杂草的种类较多,且保留的样本在经预实验测定后的力学特性并未表现出较大差别,因此后续的试验中不单独标明杂草种类,试样统一用杂草茎秆表示。



A:小蓬草 *Conyza canadensis* (L.) Cronq.; B:钻叶紫苑 *Aster subulatus* Michx.; C:菎草 *Humulus scandens* (Lour.) Merr.; D:艾 *Artemisia argyi* Levl. et Van; E:垂序商陆 *Phytolacca americana* L.

图 5 杂草样本图

Fig.5 Weed sample picture

试验仪器包括微机控制 TMS-PRO 质构仪、游标卡尺、直尺等。设置样长度为 80 mm,弯曲夹具的跨距为 60 mm,两端外延长 10 mm,测量并记录试样的直径,在质构仪上安装专用的三点弯曲试验装置及压头,设置加载速度为 15 mm/min(图 6)。杂草茎秆的载荷-位移关系如图 7 所示。由图 7 可知,弯曲试验加载的初始阶段,茎秆承受的载荷与其位移呈线性增长,载荷不断增加时,杂草茎秆与压头接触的地方出现瞬间断裂的现象,载荷迅速减小,茎秆失去承载能力,此时的载荷最大值约为 16 N,小于 1 500 r/min 转速下的甩刀瞬间作用力,因此割草机器人的甩刀可以使果园中常见杂草茎秆失去承载能力。

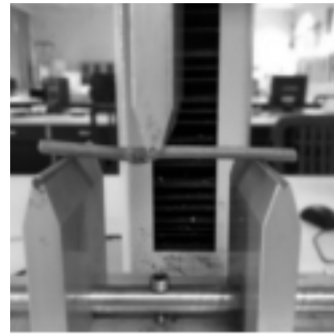


图 6 杂草茎秆弯曲试验

Fig.6 Weed stalk bending test

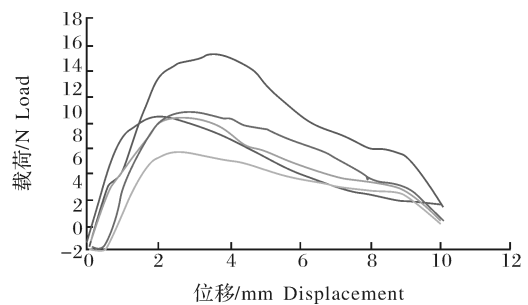


图 7 杂草弯曲载荷-位移关系

Fig.7 Weed stalk bending load-displacement curve

### 1.3 切割参数优化设计

1) 甩刀的轨迹方程。割草机器人作业时,甩刀的运动是由绕甩刀轴旋转的圆周运动和底盘直线前进的合成运动,此时刀片上任意一点的运动曲线为余摆线<sup>[17]</sup>,建立甩刀轴刀尖上一点的轨迹方程如式(16)所示,此时 X 方向为机器人的前进方向。

$$\begin{cases} X = (R+r) \cos \omega t + v_m t \\ Y = (R+r) \sin \omega t \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: $t$ 为时间,s; $\omega$ 为角速度,rad/s; $v_m$ 为割草机器人前进速度,m/s。

2)甩刀的工作条件。甩刀能否进行正常的割草作业,取决于割草机器人的前进速度和甩刀轴的转速之间的比值。甩刀刀尖的摆线运动轨迹会因机器人前进速度和甩刀轴转速间的比值变化而形状不同。在甩刀刀片的运动轨迹上,刀尖速度的切向分量为 $v_\tau$ ,结合切向速度的计算公式 $v_\tau=R\omega$ ,则刀片切向速度与前进速度的比为:

$$\lambda = \frac{v_\tau}{v_m} = \frac{R\omega}{v_m} \quad (17)$$

式(17)中, $v_\tau$ 为刀尖速度的切向分量,m/s。 $\lambda$ 的取值变化,甩刀刀尖的运动所形成的轨迹曲线形状也有所变化。

3)甩刀切割轨迹仿真。果园割草机器人工作时,取前进速度为0.5 m/s、甩刀轴的转速以1 500 r/min为基准,结合刀片运动轨迹方程,带入割草机器人实际工作参数,在Matlab中计算出甩刀切割轨迹,切割区域如图8所示,由上述甩刀的工作条件分析可知,此时的速度比 $\lambda > 1$ ,割草机器人能有效地进行割草作业。

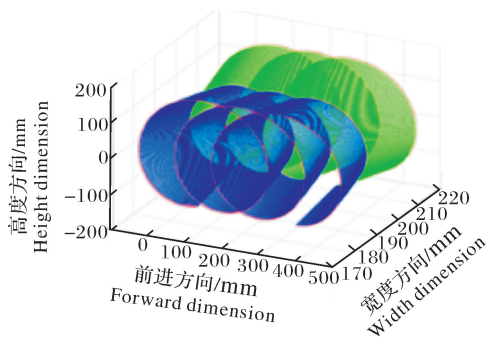


图 8 甩刀切割区域

Fig.8 Cutting area

4)割草效果模型。由于未对果园内自然生长的杂草进行生长状况模拟,较难获得割草作业前后株数,故以重割面积和漏割面积代替重割率和漏割率作为预测模型的准确程度指标。

取距离最近的2个相邻刀片座,将其放置在一个平面内,此时两固定座上刀片出现交汇,交汇情况如图9A所示。两刀片在交点 $M$ 的切割轨迹如图9B,其中区域1为漏割区域,区域2为重复切割区域,区域2与区域3共同组成单个刀片1个周期覆盖的切割区域。

图9中, $M$ 为两刀片交点; $a$ 为刀片重合长度,m; $a=b-c/2$ ; $b$ 为刀片垂直投影长度,m; $c$ 为相邻刀片座间距,m; $A$ 为切割轨迹下交点; $B$ 为两刀片切割周期间距,m; $P$ 为单个旋转周期的步进长度,m。

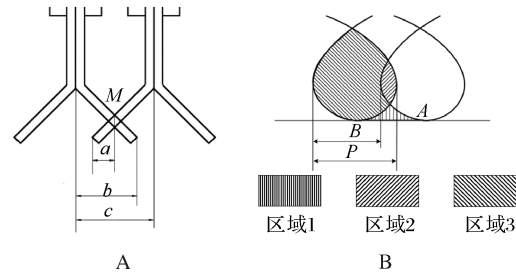


图 9 相邻刀片交汇情况(A)及刀片 $M$ 点切割轨迹(B)

Fig.9 Intersection of adjacent blades(A) and cutting track of  $M$ -point two blades(B)

①不漏割条件。由图9A可知,当 $c \leq 2b$ 时,刀片的切割区域在轴向上始终存在一个交汇的部分,此时甩刀在轴向上不存在漏割情况,再结合图9B可知甩刀在周向上存在的漏割区域为图9B中区域1,漏割的预期留茬高度为50~80 mm。因此,当图9B中 $A$ 点低于80 mm, $M$ 点切割轨迹所形成的切割区域均为有效切割面积,此时的区域1处于正常留茬范围内,漏割率为0%;而当 $A$ 点高于80 mm时,区域1存在部分高于80 mm的面积为漏割区域。

②重割率计算。重割率的计算需综合甩刀在轴向上与周向共同形成的切割空间,故重割率计算公式为:

$$f = \frac{S_2 a}{(S_2 + S_3) b} \times 100\% \quad (18)$$

式(18)中, $f$ 为重割率,%; $S_2$ 为区域2的面积, $m^2$ ; $S_3$ 为区域3的面积, $m^2$ 。根据公式(16)~(18)可知,割草机器人的刀片座间距、刀轴转速、前进速度会对重割率有影响。以刀片座间距、刀轴转速、机器人前进速度为试验因素,以重割率作为评价指标设计单因素试验。其中转速的设置上,以900 r/min和1 200 r/min两个较低转速作为样机1 500 r/min的对比试验(表1)。

## 2 结果与分析

本研究设计了一种橡胶履带底盘,并利用前悬挂式结构将割草机构搭载于履带底盘的前方,由电机驱动底盘和甩刀轴。割草试验如图10所示。

表1 割草效果试验因素水平表

Table 1 Level table of experimental factors of mowing effect

水平 Level	因素 Factor		
	A	B	C
	刀片座间距/mm Blade seat spacing	刀轴转速/ (r/min) Cutter shaft	前进速度/ (m/s) Forward speed
1	23	900	0.25
2	33	1 200	0.50
3	43	1 500	1.00



图10 割草机器人样机(A)及甩刀结构实物(B)

Fig.10 Prototype of mowing robot(A) and physical picture(B) of swinging blade structure

### 2.1 相邻刀片座间距对重割率的影响

试验结果显示,设定机器人前进速度为 0.5 m/s、刀轴转速为 1 200 r/min,当刀片座间距分别为 23、33、43 mm 时,重割率  $f$  分别为 32.46%、30.33%、27.31%。试验结果表明,当刀片座间距从 23 mm 增大到 33 mm 时,重割率小幅度降低,当刀片座间距从 33 mm 增大到 43 mm 时,重割率依然小幅度降低。因此,可以预测整体上重割率随着刀片座间距增大而小幅度降低,但刀片重合长度不能小于零。即图 9A 中  $a \geq 0$ ,因此刀片座间距在设计上选用  $A = 2b$  时重割率最小。

### 2.2 刀轴转速对重割率的影响

试验结果显示,设定机器人前进速度为 0.5 m/s、相邻刀片座间距为 33 mm,当刀轴转速分别为 900、1 200、1 500 r/min 时,重割率  $f$  分别为 25.67%、30.33%、34.81%。试验结果表明,当刀轴转速从 900 r/min 增大到 1 500 r/min,以及从 1 200 r/min 增大到 1 500 r/min 时,重割率均增大。结合公式(15)可知,在不考虑功耗的情况下,为保持刀片在工作时对草茎的大碰撞力而将草割断,应尽可能地增大刀轴转速,但随之增加的重割率应纳入这一速度设计上的考虑范围。

### 2.3 前进速度对重割率的影响

试验结果显示,设定相邻刀片座间距为 33 mm,刀轴转速为 1 200 r/min,当前进速度分别为

0.25、0.50、1.00 m/s 时,重割率  $f$  分别为 34.23%、30.33%、21.56%。试验结果表明,当前进速度从 0.25 m/s 增大到 0.50 m/s 时,重割率有所降低,当前进速度从 0.50 m/s 增大到 1.00 m/s 时,重割率大幅度降低,整体上重割率随着前进速度增大而降低。但由于试验果园中果树间距较小,且垄长较短,因此前进速度不宜过大。

## 3 讨论

本研究针对丘陵山地果园除草问题,设计了一种基于具有一定地形适应性的履带式甩刀结构割草机器人,以此机器人的甩刀结构为基础运用机器人 D-H 矩阵建立了甩刀的运动学模型,计算获得甩刀轴转速为 1 500 r/min 时单个甩刀在“最优切割位”能够产生的碰撞力为 74.25 N。杂草受力试验显示,杂草在弯曲时能够承受的最大断裂载荷为 16 N,远小于单个甩刀所能产生的最大碰撞力,因此该割草机器人的甩刀割草机构能割断果园常见杂草茎秆。割草机器人实地割草试验结果表明,刀片座间距 43 mm、刀轴转速 1 500 r/min、前进速度 1.0 m/s 时,重割率最小。结合不同果园实际复杂地形环境以及设备功率消耗情况,割草机器人甩刀设计参数最优组合仍可进一步探究。

## 参考文献 References

- [1] 罗锡文.对发展丘陵山区农业机械化的思考[J].农机科技推广,2011(2):17-20.LUO X W.Thoughts on the development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas[J].Agriculture machinery technology extension,2011(2):17-20(in Chinese with English abstract).
- [2] 马攀宇,李善军,赵纯清,等.柑橘园仿形割草机切割器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2019,38(6):156-162.MA P Y,LI S J,ZHAO C Q,et al.Design and experiment of the cutter of copying mower in citrus orchard[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2019,38(6):156-162(in Chinese with English abstract).
- [3] 郭备,王德成,王光辉,等.小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J].农业机械学报,2015,46(7):123-129.WU B,WANG D C,WANG G H,et al.Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2015,46(7):123-129(in Chinese with English abstract).
- [4] 张雯,张衍林,李善军,等.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[J].华中农业大学学报,2019,38(4):134-142.ZHANG W,ZHANG Y L,LI S J,et al.Parameter op-

- timization of disc lawn mower grass-feeding guide device based on dynamic simulation of virtual prototype [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(4): 134-142 (in Chinese with English abstract).
- [5] 邢占强. 智能化除草机器人技术发展现状及趋势展望[J]. 农业科技与装备, 2015(5): 37-38. XING Z Q. Research on the technology development of intelligent weeding robot[J]. Agricultural science & technology and equipment, 2015(5): 37-38 (in Chinese with English abstract).
- [6] 宋月鹏, 张韬, 樊桂菊, 等. 国内外果园生草技术及其刈割机械的研究进展[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(5): 111-117. SONG Y P, ZHANG T, FAN G J, et al. Research progress of domestic and foreign growing grass technologies and cutting machines in orchard[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2017, 38(5): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张晋, 陈伟, 朱继平, 等. 果园自动避障中耕除草管理机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 40-49. ZHANG J, CHEN W, ZHU J P, et al. Design and experiment of automatic obstacle avoidance cultivation weeding management machine [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2020, 41(8): 40-49 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王鹏飞, 刘俊峰, 高迎, 等. 随行自走式果园割草机的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 99-103. WANG P F, LIU J F, GAO Y, et al. Design and research of the accompanying self-propelled mower orchard[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(9): 99-103 (in Chinese with English abstract).
- [9] 汪德众, 王敦军, 齐绍文, 等. 9GYS-0.85 型盘式甩刀割草机的设计[J]. 农机化研究, 2003(1): 90-92. WANG D Z, WANG D J, QI S W, et al. A design of 9GYS-0.85 type tray style throw falchion grass cutter[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2003(1): 90-92 (in Chinese with English abstract).
- [10] 付作立, 王德成, 李卫, 等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 214-220. FU Z L, WANG D C, LI W, et al. Design and experiment of two-disc rotary mower of alfalfa [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2018, 49(S1): 214-220 (in Chinese with English abstract).
- [11] 曾晨, 李兵, 李尚庆, 等. 自走式茶园除草机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 101-106. ZENG C, LI B, LI S Q, et al. Design and experiment on small self-propelled tea garden weeder [J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(12): 101-106 (in Chinese with English abstract).
- [12] 潘变, 李广伟, 朱学敏. 9G-1.4 型往复果园割草机的设计[J]. 农业研究与应用, 2013(2): 47-50. PAN B, LI G W, ZHU X M. The design of 9G-1.4 reciprocating mower of orchard[J]. Agricultural research and application, 2013(2): 47-50 (in Chinese with English abstract).
- [13] 向凯. 锤刀式割草机的设计与分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017. XIANG K. Design and analysis of hammer knife mower [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [14] 熊有伦, 唐立新, 丁汉, 等. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996. XIONG Y L, TANG L X, DING H, et al. Fundamentals of robot technology[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1996.
- [15] 任才贵. 小球与均质自由杆的碰撞[J]. 大学物理, 2006(5): 16-17. REN C G. The collision of particle and a homogeneous free bar[J]. College physics, 2006(5): 16-17.
- [16] 曹群虎, 黎旭涛, 蔡宏兰. 渭北旱塬果园生草技术[J]. 西北园艺(果树), 2019(6): 19-22. CAO Q H, LI X T, CAI H L. Technology of growing grass in orchard in Weibei Dry Highland[J]. Northwest horticulture, 2019(6): 19-22 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马晓春. 割草机的设计与动态特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005. MA X C. Dissertation for the degree of master design and dynamic research of mower [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2005 (in Chinese with English abstract).

## Design and analyses of swinging blade for orchard mowing robot

BAO Xiulan<sup>1</sup>, YAN Yu<sup>1</sup>, MAO Jincheng<sup>2</sup>, TIAN Fuyang<sup>3</sup>, MENG Liang<sup>1</sup>

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

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

**Abstract** Fruit output of China ranks first in the world. The fruit industry, as a labor-intensive in-

dustry, has a great demand for labor force. However, the shortage of labor force, high intensity of manual labor and low efficiency in the current market have become one of the important problems hindering the industrialization development of orchards. Therefore, realizing the mechanization of orchard production is a necessary means to liberate labor force and improve production efficiency. At the same time, due to the vigorous implementation of raw grass mowing technology in orchard soil management in China, orchard raw grass can regulate the moisture content in the soil, and weeds covered on the soil surface after mowing can be used as fertilizer for fruit tree. However, irregular mowing will have a lot of adverse effects on fruit trees and affect normal orchard management. Cutting weeds in orchard is an important task of orchard management. The level of agricultural mechanization in underdeveloped hilly areas has caused a lot of labor consumption on orchard management. At the same time, traditional chemical weeding greatly polluted orchard. Therefore, the mechanical stubble weeding in orchard plays an important role in protecting orchard soil. The realization of efficient mechanical weeding has become an urgent goal to be achieved in the process of orchard mechanization. Most orchards in China are located in hilly and mountainous areas with complex planting terrain conditions and imperfect road planning. Currently, weeding machines used in hilly orchards are generally flat orchards and field weeding machines. The artificial knap-type and hand-pushed weeding machines of flat orchards are time-consuming and laborious. Field weeding machines are driven by tractors, with high cost and large overall size, which are difficult to meet the requirements of mechanization of hilly orchards. Therefore, it is of great practical significance to study the mowing machine in hilly orchards to promote the development of fruit industry. Raw grass mowing is a modern orchard management mode widely promoted at home and abroad in recent years. The weeding performance of orchard mowing robot is closely related to the physical properties of weeds and design parameters of swinging blade. A mowing robot for hilly citrus orchards was designed based on a Y-type flapping blade mowing mechanism to solve the complex terrain conditions of citrus orchards in hilly areas and the difficulty of applying the existing weeding machinery. The kinematics model of single stalk cut by flapping knife was established with D-H method. The parameters of swinging blade designed were explored through single factor experiment of recutting rate. Results showed that the impact force of single weed stem was 74.25 N under the condition of no grass entanglement. The cutting path of blade was deduced. The recutting rate decreased with the increase of blade spacing, cutter shaft speed and forward speed of robot.

**Keywords** orchard machinery; mowing robot; Y-type swinging blade; weed cutting; recutting rate; mechanical weeding and stubble; prevent entanglement of weeds

(责任编辑:陆文昌)