

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.05.008

曾俊豪, 高巧明, 赵鹏飞, 等. 丘陵山地遥控履带割草机设计与性能试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(5): 49-55, 194

Zeng Junhao, Gao Qiaoming, Zhao Pengfei, et al. Design and performance test of remote control tracked mower in hilly and mountainous areas [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5): 49-55, 194

丘陵山地遥控履带割草机设计与性能试验*

曾俊豪¹, 高巧明^{1, 2}, 赵鹏飞¹, 糜泽荣¹, 向浩¹, 许鹏¹

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西柳州, 545616;

2. 广西合浦县惠来宝机械制造有限公司, 广西北海, 536100)

摘要:针对广西丘陵山地 15°~25°坡地的经济作物种植园区坡度较大、地块分散、缺少机耕道, 现有机械化割草机具难以进入并进行作业的难题, 结合种植园区生草栽培的农艺技术, 研发一种可遥控的履带割草机。根据园区作业环境的割草机工况要求, 对整机及关键部件如履带行走系统、切割系统、变割草高度调节系统等进行计算分析与设计; 设计并进行整机性能试验, 实验结果表明, 该割草机动力充足, 最大纵向爬坡角度为 36°, 最大斜向爬坡角度为 41°, 在增程系统作用下, 综合工况下作业时间由 1.5 h 延长至 1.8 h; 最小转弯半径为 403.5 mm; 对割草机的遥控操作性能做直线行走试验, 测试路段试验最大偏驶角度不大于 3°; 倾翻试验台架测试纵向倾翻稳定角为 48.9°, 横向倾翻稳定角为 64.4°; 在广西某机械化茶园示范区进行割草试验, 平均割草率为 95%; 可通过遥控实现割草机的行走、制动、转向和割草刀具高度调节, 满足丘陵山地作物园区作业需求。

关键词:履带割草机; 丘陵山地; 生草栽培; 性能试验

中图分类号:S224 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2024) 05-0049-08

Design and performance test of remote control tracked mower in hilly and mountainous areas

Zeng Junhao¹, Gao Qiaoming^{1, 2}, Zhao Pengfei¹, Mi Zerong¹, Xiang Hao¹, Xu Peng¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, 545616, China; 2. Guangxi Hepu Huilaibao Machinery Co., Ltd., Beihai, 536100, China)

Abstract: Aiming at the problems that the 15°~25° slope economic crop planting park in hilly and mountainous areas of Guangxi is characterized by large slope, scattered plots, lack of tractor roads, and the existing mechanized mowing machines are difficult to enter the operation, a remote-control tracked mower is developed in combination with the agronomic technology of cover cropping in the planting park. According to the working condition requirements of the lawn mower in the working environment of the park, the calculation, analysis and design of the whole machine and key components such as tracked walking system, cutting system, variable mowing height adjustment system, etc. are carried out. The performance test of the mower is carried out. The experimental results show that the mower has sufficient power. The maximum longitudinal climbing angle is 36°, and the maximum oblique climbing angle is 41°. Under the action of the range-extender system, the comprehensive working time is extended from 1.5 h to 1.8 h. The minimum turning radius is 500 mm. The remote control performance of the mower is tested through the straight-line walking test and the maximum deviation angle is not more than 3° on the test ground. Through the bench test, the longitudinal tipping stability angle is 48.9°, and the lateral tipping stability angle is 64.4. A mowing experiment was carried out in a mechanized tea garden demonstration area in Guangxi. The average mowing rate was 95%. It can realize the walking, braking, steering and height adjustment of the mower through remote control, so as to meet the working requirements of the hillside plantation.

Keywords: hills and mountains; tracked mower; cover cropping; performance test

收稿日期: 2022 年 7 月 2 日 修回日期: 2022 年 11 月 16 日

*基金项目: 工业和信息化部 2021 年产业基础再造和制造业高质量发展重点项目 (TC210H02V)

第一作者: 曾俊豪, 男, 1997 年生, 广西梧州人, 硕士研究生; 研究方向为丘陵山地智能农机装备。E-mail: 654062850@qq.com

通讯作者: 高巧明, 男, 1975 年生, 广西柳州人, 博士, 教授级高级工程师; 研究方向为农业机械化关键技术与装备、图像模式识别。E-mail: walkergao@163.com

0 引言

广西丘陵山地面积占全区耕地面积的75%，同时也是广西经济作物，如水果、油茶果等主要产区。近年来，具有涵养土壤、改善园区生态优点的生草栽培理念不断发展，生草栽培技术在广西丘陵山地的种植园区得到推广。该技术主张在作物行间和株间自然或人为生草，并采取人工或机械切割的方式控制杂草长势，将切割的杂草覆盖于土壤表面实现绿肥还田，减少化肥使用，同时杂草的生长具有保持山区水土，维持园区生态平衡等优点^[1-3]。但由于丘陵山地土壤禀赋差，地块规模小而分散，田间道路狭窄不平、坡度大、通过性差等，导致机械化水平较低，同时人工操作割草器械极易发生侧滑和倾翻，割草过程有极大的安全隐患。因此，亟需设计一种能够在坡地上通过遥控远距离操作的割草机来提高人员安全性和丘陵山地农业机械化水平。

欧美国家对无人割草机的研究起步较早。Verne^[4]研制一款园艺用自动割草机，主要用于自动进行常规的草坪除草工作，实现割草自动化。Aponte-Roa等^[5]研究一款遥控电动割草机，可以设置为自动覆盖预定义区域，也可以通过无线电控制发射器手动控制，允许用户在任何方向远程控制割草机，用所需速度转动割草机电机，并调整割草高度。国内，河北农业大学的李雪军^[6]依据我国现代矮砧密植苹果园生草栽培的需求，设计苹果园垄面割草机，主要研究切割装置切割果树两侧垄面杂草以及排草问题，并进行作业试验。

综上，目前国内外所研发的割草机对我国广西丘陵地块大坡度坡面割草适应性仍然不足，因此研发具有良好坡地适应性的遥控履带式割草机具有重要意义。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构及技术参数

割草机整机结构如图1所示。

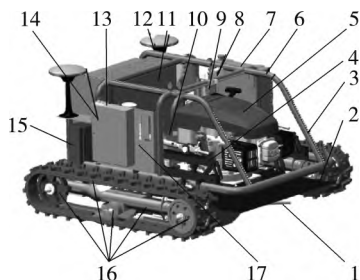


图1 割草机整机结构

Fig. 1 Structure of the mower

1. 切割刀片 2. 割草护罩 3. 轮廓灯 4. 变割草高度机构
5. 汽油发动机 6. 机架 7. 副油箱 8. 双目深度相机
9. 直线推杆 10. 增程装置 11. 电气电路配电箱
12. 北斗导航天线 13. 整机控制开关 14. 整机控制系统箱
15. 直流无刷电机 16. 履带行走机构 17. 留茬高度指示器

遥控履带式割草机主要由履带行走系统、电驱动系统、切割系统、变割草高度调节系统、遥控系统、整机控制系统和增程系统组成^[7-9]。割草机主要技术参数如表1所示。

表1 割草机主要技术参数

Tab. 1 Main technical performance parameters of the mower

参数	数值
整机整備质量/kg	80
作业速度/(km·h ⁻¹)	0~5
驱动轮直径/mm	160
外形尺寸(长×宽×高) /(mm×mm×mm)	950×800×550
履带接地长度/mm	850
履带接地宽度/mm	150
割幅/mm	500
最大遥控距离/m	150

1.2 工作原理

作业前，根据工作区域杂草生长情况，使用遥控器控制变割草高度调节机构的直线电机伸长或收缩，带动平行四杆机构运动，同时观察留茬高度指示器，使切割刀片处于合适位置。在进行割草作业时，小型汽油发动机为切割器提供动力，同时通过功率分配装置带动发电机，补偿割草机行走和电池充电所需部分功率，从而有效增加作业持续时间。

履带式割草机有3挡工作速度，其中慢速挡和中速挡为基本作业挡位，高速挡用于非作业情况下的转场。履带式割草机驱动系统采用电机直驱的布置方式，通过PWM调速的方式设置3个作业挡位，实现作业挡位无机械式平滑切换，满足山地复杂环境割草作业对速度调节的需求。通过遥控器控制履带式割草机进入作物行间进行割草作业，如图2所示，履带式割草机完成一行作业后，可通过遥控器控制两侧驱动电机以相反方向驱动，从而使割草机原地转向，灵活、快速地进行换行作业。

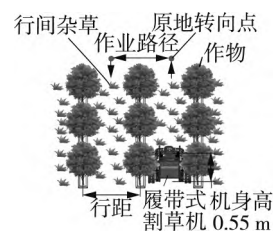


图2 割草机作业模式

Fig. 2 Moving mode of mover

2 关键部件设计

2.1 行走系统计算与分析

履带行走系统的行走能力，是履带式割草机性能

的重要体现,行走系统输出功率必须大于阻力功率。分析履带行走机构的阻力功率主要由外部阻力功率和内部阻力功率构成^[10, 11]。

2.1.1 外部阻力功率

外部阻力功率主要是履带与地面摩擦功率、地面变形阻力功率和爬坡时重力分力功率。

1) 为使履带接地压力能够均匀分布,割草机在设计布置时将重心位置与几何重心接近重合。当割草机做转向动作时,履带与地面的各点摩擦力方向始终垂直于该点到速度瞬心的连线。履带底盘转向受力分析如图 3 所示。

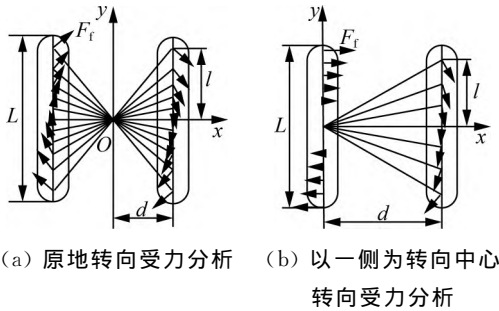


图 3 履带转向受力分析

Fig. 3 Steering force analysis of track

以履带式割草机向左转向时为例分析,左右两侧履带上受到的阻力矩分别由式(1)、式(2)表示。

$$M_1 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu F_f \sqrt{d^2 + l^2} dl$$

$$= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu \frac{G}{2L} \sqrt{d^2 + l^2} dl \quad (1)$$

$$M_2 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu F_f l dl = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \mu \frac{G}{2L} l dl \quad (2)$$

式中: M_1 ——左侧履带阻力矩, $N \cdot m$;
 M_2 ——右侧履带阻力矩, $N \cdot m$;
 F_f ——履带与地面动摩擦力, N ;
 μ ——履带与地面动摩擦系数;
 G ——割草机重力, N ;
 L ——履带接地长度, m ;
 l ——一侧履带上力的点到速度瞬心沿 y 方向距离, m ;
 d ——一侧履带上力的点到速度瞬心沿 x 方向距离, m 。

由图 3 分析可知,履带行走机构无论在何种转向半径转向时,其履带受力均满足式(1)、式(2)。在只有地面摩擦力时,在割草机匀速转弯过程中,驱动力矩等于履带与地面的摩擦力矩,即

$$M_0 = M_1 + M_2 \quad (3)$$

式中: M_0 ——转向时两侧履带所受总摩擦力矩, $N \cdot m$ 。
 转向时地面摩擦阻力功率

$$W_0 = M_0 v_T \quad (4)$$

式中: W_0 ——地面摩擦阻力功率, kW ;

v_T ——履带绕速度瞬心线速度, m/s 。

2) 地面变形阻力由式(5)确定。

$$F_R = \frac{2b}{(n+1) \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)^{\frac{1}{n}}} \left[\frac{G}{2bL} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5)$$

式中: F_R ——地面变形阻力;

K_c ——土壤黏性成分决定的变形模量;

K_ϕ ——土壤摩擦成分决定的变形模量;

b ——履带板宽度, m ;

n ——土壤变形指数。

行驶时地面变形阻力功率由式(6)确定。

$$W_R = F_R v \quad (6)$$

式中: W_R ——地面变形阻力功率, kW ;

v ——割草机的行进速度, m/s 。

3) 丘陵山地陡坡环境复杂,坡面倾斜度大,履带式割草机野外开荒作业时,必须要有足够强的爬坡能力。履带式割草机的爬坡阻力功率主要为爬坡时重力分力做功,如图 4 所示。其中 F_N 是斜坡面对整机的支撑力。

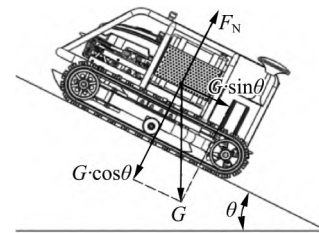


图 4 割草机上坡受力分析

Fig. 4 Force analysis of mower on uphill

则割草机爬坡时所受重力分力

$$F_x = G \sin \theta \quad (7)$$

式中: θ ——坡面夹角, $(^\circ)$ 。

爬坡时重力分力功率

$$W_x = F_x v \quad (8)$$

2.1.2 内部阻力功率

割草机履带行走机构的内部阻力中,由履带张紧所产生的驱动轮齿与履带啮合摩擦阻力最为明显。在履带机构运行时,履带张紧的内部阻力会消耗整机一部分的驱动功率。割草机驱动轮与履带啮合摩擦阻力如图 5 所示。

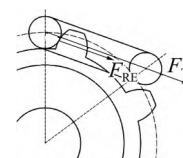


图 5 啮合阻力

Fig. 5 Meshing resistance

驱动轮齿与履带板的啮合摩擦阻力由式(9)确定^[12, 13]。

$$F_{RE} = \lambda \tan \frac{90}{z} F_T \quad (9)$$

式中: F_{RE} ——啮合摩擦阻力, N;

z ——驱动轮齿数;

F_T ——履带压紧力, N;

λ ——驱动轮齿与履带啮合摩擦系数。

由式(9)可知,履带板与驱动轮齿啮合阻力与动摩擦系数和履带预紧力有关,驱动轮与履带啮合阻力功率由式(10)确定。

$$W_{RE} = z F_{RE} v_t \quad (10)$$

式中: W_{RE} ——啮合摩擦阻力功率, kW;

v_t ——驱动轮线速度, m/s。

割草机行走系统输出的驱动功率需要大于阻力功率,阻力功率为外部阻力功率与内部阻力功率之和,如式(11)所示。

$$W > W_f = W_0 + W_R + W_x + W_{RE} \quad (11)$$

式中: W ——输出总功率, kW;

W_f ——总阻力功率, kW。

2.2 切割系统分析

旋刀式割草机的切割器是本割草机设计的核心部件之一,依靠刀片高速旋转从而将草茎切断,切割器的性能决定了割草机的割草作业效果。其结构如图6所示。

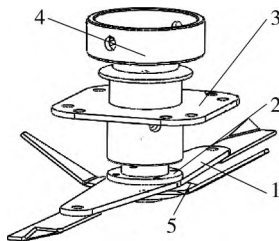


图6 切割器结构

Fig. 6 Structure of cutter

1.主刀片 2.快换刀架 3.安装座 4.功率分配器 5.副刀片

该旋刀式切割器主要由功率分配器、传动轴、安装座和割刀等部件组成,安装座和快换刀架可整体拆卸,方便快速更换割刀。主割刀两端安装甩刀,当遇到障碍或者阻力过大时,甩刀能够立即回摆,并且功率分配器与发动机动力输出端之间产生打滑,避免切割系统损坏。

主割刀直径为500 mm,切割部分甩刀采用锰合金叶片式刀片,刃角为 15° ;副割刀直径为450 mm,采用矩形锰合金刀片,刃角为 15° ,主、副割刀呈十字形安装,切割方向相同。割刀线速度^[17]计算如式(12)所示。

$$v_1 = \frac{n\pi D}{60} \quad (12)$$

式中: v_1 ——割刀线速度, m/s;

n ——割刀转速, r/min;

D ——割刀直径, m。

割刀最理想的工作方式是刀片与地面平行,主割刀以足够大的线速度切割草茎,瞬间使杂草下端茎秆达到应力极限被切断,长度较短的副割刀将沿切割路径对草茎再次切割,主割刀和副割刀都扫过的区域为切割器的重割区。同时甩刀叶片高速旋转会在护罩内形成风场,被切断的草茎随着气流被吹起,重新卷入高速旋转的割刀,直到被切碎沿着出草口吹出,实现碎草还草的效果。

2.3 变割草高度调节系统分析

割草机适应地形差异和满足不同场景对割草高度的要求,需要调整割刀与地面的相对高度,又因为割刀与地面相对平行时的割草作业效果最好,因此设计了一套能够通过遥控控制的升降电动变割草高度调节机构^[13, 14],结构如图7所示。

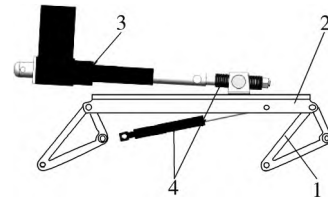


图7 变割草高度机构

Fig. 7 Variable mowing height mechanism

1.摇臂 2.连杆 3.电动推杆 4.阻尼器

变割草高度机构运动规律可采用平行四杆机构运动原理进行计算。建立直角坐标系,以 O 为坐标原点。变割草高度机构运动原理如图8所示。

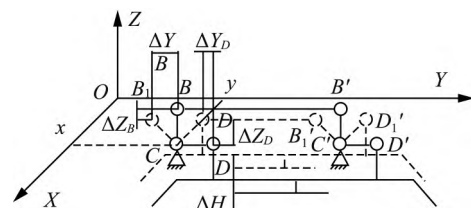


图8 变割草高度机构运动原理图

Fig. 8 Movement principle diagram of variable mowing height mechanism

BB' 为联动杆, CB 、 CD 为直角调节臂的杆长,通过 C 点与机架铰接, B 点与联动杆铰接, D 点与连接架铰接。当直线电机推动联动杆运动时,高度调节臂摆过 θ 角,可由式(13)确定 B 点和 D 点的运动规律。

$$\begin{cases} \Delta Y_B = |CB \sin \theta| \\ \Delta Z_B = |CB - CB \cos \theta| \\ \Delta Y_D = |CD - CD \cos \theta| \\ \Delta Z_D = |CD \sin \theta| \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)推导可知, B 点沿 Y 轴负方向位移 ΔY_B ,沿 Z 轴负方向的位移 ΔZ_B , B 点坐标由 (x_B, y_B, CB) 相应改变为 $B'(x_B, y_B - \Delta Y_B, CB - \Delta Z_B)$,

分析 B 点的运动规律可知直线电机的运动轨迹为一弧形,安装时不能过多约束直线电机自由度; D 点沿 Y 轴正方向位移 ΔY_D , 沿 Z 轴正方向位移 ΔZ_D , D 点坐标由 $(x, y_C + CD, 0)$ 相应改变为 $(x, y_C + CD - \Delta Y_D, \Delta Z_D)$, 分析 D 点运动可知, ΔY_D 对应割草刀在高度调节过程中的水平位移, ΔZ_D 对应割草刀进行高度调节前后的高度差 ΔH , 得到割草刀高度调节过程中的运动规律, 从而自由调节留茬高度。

2.4 整机电气控制系统

割草机的行走、转向、避障、割草作业和整机电子设备的使用都需要通过整机控制系统来实现。整机控制系统主要包括 STM32 主控板、电机控制、避障检测、故障检测与反馈、BMS、无线遥控和软件程序^[15]。控制系统如图 9 所示。

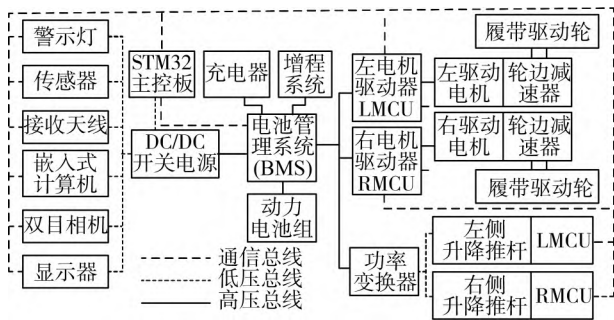


图 9 控制系统框图

Fig. 9 Control system block diagram

割草机电气线路分为高压、低压和通信线路三个部分,在作业过程中,由动力电池组为整机用电器供电。主控芯片内嵌入已经编写好的底盘控制程序,根据不同的操作指令与电机驱动器通信,检测驱动电机的相电压、相电流、转速等参数,收集电机运行情况进行反馈,从而驱动电机按照预期的控制信号进行运转。同时主控芯片也要接收和处理来自上位机和各传感器传输的信号,最终实现割草机的行走、转向、制动和作业姿态调整等功能。

3 整机性能试验

3.1 动力和经济性

割草机设计的纵向极限爬坡角度为 30° , 因此对其在草坡上的极限爬坡能力进行测试, 以此来反映割草机的动力性。试验场地为坡度变化范围 $0^\circ \sim 48^\circ$ 的陡坡, 测试时, 将割草机停放于草坡前的平整草坪上, 使用角度仪测量此时的倾斜角度, 然后控制割草机以工作速度挡位(中速挡)分别以纵坡方向直行爬坡和与坡面方向成 45° 夹角方向以“Z”字形的姿态爬坡。

直到割草机因坡度加大达到驱动力上限无法继续行走, 使用角度仪测量此时的坡度, 即为割草机的极限

爬坡角, 高精度九轴陀螺仪角度记录如图 10 所示。

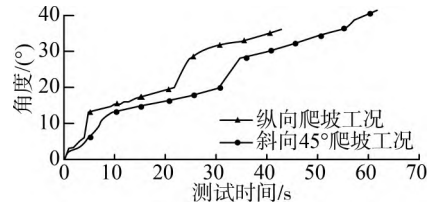


图 10 极限爬坡性能测试数据

Fig. 10 Ultimate climbing performance test data

履带式割草机极限爬坡试验测试可得, 纵向爬坡工况下, 割草机极限爬坡角度为 36° ; 与坡面斜向 45° 姿态爬坡工况下, 极限爬坡角度为 41° , 动力性能测量结果如表 2 所示。

表 2 动力性能测量结果

Tab. 2 Measurement results of dynamic performance ($^\circ$)

爬坡方式	初始角度	极限爬坡角度
纵向爬坡	0	36
斜向爬坡	0	41

割草机的能耗经济性以持续作业里程能量消耗为评价标准。设计割草机在平整草坪以工作速度进行割草作业, 作业效率为 $0.1333 \text{ hm}^2/\text{h}$, 动力电池组持续使用时间为 1 h。实际割草机的作业工况为直行、爬坡和下坡等多种工况同时存在, 以一个作业长度为周期(1 h 作业时间), 分别测量得到割草机在随机工况下以正常作业速度运行时, 电池组的输出功率均值为 837 W、两侧电机消耗功率均值为 811 W。以纯电驱动持续作业时间约为 1.5 h, 启动增程系统介入后作业时间延长至 1.8 h, 动力性与能耗经济性均满足设计预期, 同时也满足实际大部分场景的坡面割草作业需求。

3.2 转弯半径试验

割草机在进行割草作业时常常需要 180° 掉头往复割草, 转弯半径大小代表了割草机在掉头时的转向机动性能, 也决定了割草机在丘陵山地分散的小地块作业的操作性能。割草机以中速挡稳定行驶后, 发出原地转向指令, 使两侧履带以等速反向运转, 行驶一圈后, 取 D_1 、 D_2 、 D_3 三点(在轨迹圆上间隔 120°), 测量轨迹圆上 3 个均布位置处的直径, 如图 11 所示。

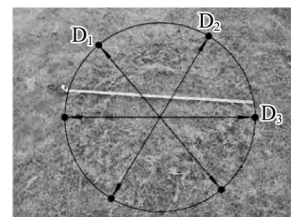


图 11 转弯半径试验

Fig. 11 Turning radius test

分别对左向转向和右向转向进行试验并记录数

据,试验数据结果如表3所示。

表3 转弯半径试验结果
Tab. 3 Turning radius test results mm

指标	向右原地转向	向左原地转向
D_1	820	800
D_2	810	810
D_3	810	810
\bar{D}	813	807
\bar{R}_{\min}	406.5	403.5

由表3可知,平均最小转弯为403.5 mm,转弯半径与轨距大小相近,可认为能够实现原位转向,转向性能优良,在丘陵山地复杂地块具有十分良好的操作性能。

3.3 直线行走偏差试验

割草机行走时不能按照预定直线轨迹行驶,偏离预定轨迹的现象称为跑偏。割草机的直线行驶稳定性对其操作性和割草作业质量至关重要,使用行走偏差来评价,若跑偏严重,则需要操作人员频繁对其行走姿态进行调整,行走机构损耗严重。

在平整地面上对割草机进行直线行走偏差试验,将割草机停放在试验场地,以一侧履带外边缘的延长线作为割草机直线行走的标定直线,以该侧履带前端为起点划定起始线,沿标线25 m处为终点划定终止线^[16]。给割草机发出直线行走指令,至履带前端到达测试终止线后停止,使用九轴高精度陀螺仪记录其行走偏角。试验如图12所示。

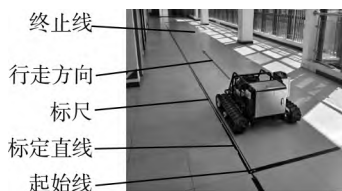


图12 直线行走偏差试验

Fig. 12 Deviation test of straight line walking

重复3次试验并使用高精度九轴陀螺仪记录每次的偏差角度,偏差角度数据如图13所示。

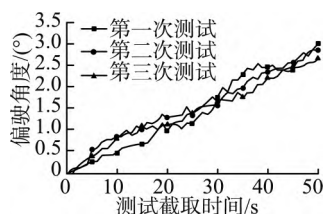


图13 直线行走偏差角度数据

Fig. 13 Angle data of straight line walking deviation

由图13可知,该割草机在测试路段上进行直线行走测试时,最大偏驶角度不大于3°,可认为该偏差水平不会对作业质量产生重要影响。分析该履带式割草机产生跑偏主要原因为:(1)两侧履带接地条件差异导致

两侧履带运行速度不一致;(2)两侧履带在生产加工和装配时的差异导致两侧履带运行工况不同;(3)双电机独立驱动未闭环情况下产生的不同步。

3.4 倾翻试验台测试

割草机在丘陵山地草坡上作业时,不能发生倾翻或者滑移,发生倾翻或滑移均为坡面失稳,不但影响作业质量效果,而且还会有巨大的安全隐患。因此,对割草机进行极限倾翻角和极限滑移角试验十分重要。

将割草机横向整机置于倾翻试验台上^[17],安装防侧滑以及防侧翻安全设施,启动试验台,使整机随试验台以一定速度向左倾斜,实时检测右侧履带支承平面法向反力直至为零时停止,此时试验台的倾斜角度即为割草机横向侧倾时的倾翻稳定角;若右侧履带支承平面法向反力还未减少至零时,割草机先发生了滑移,则此时的试验台倾斜角度即为割草机横向侧倾时的滑移稳定角。分别将割草机横向、纵向向前和纵向向后置于倾翻试验台上进行倾斜试验,分别测量三次,记录测量结果取算术平均值。倾翻试验台试验如图14所示。割草机倾翻试验台测试结果如表4所示。



(a) 纵向倾翻试验台架试验(前)



(b) 纵向倾翻试验台架试验(后)



(c) 横向倾翻试验台架试验

图14 倾翻试验台架试验

Fig. 14 Test of rollover test-bench

表4 倾翻试验台架试验数据

Tab. 4 Test data of rollover test-bench

测试项目	平均角度/(°)
横向极限倾翻角	64.4
横向极限滑移角	38.7
纵向极限倾翻角	前 63.4 后 48.9
纵向极限滑移角	前 38.7 后 38.7

由测试结果可得,当坡度足够大时,本割草机会在发生倾翻之前发生滑移,且滑移稳定角均大于割草机所设计的最大爬坡度。由于试验台表面与履带之间的摩

擦系数和草地与履带之间的摩擦系数略有不同,实际的滑移稳定角会根据实际情况略有不同,但倾翻稳定角不改变,可以认为该割草机的坡面稳定性满足要求。

3.5 割草效果验证试验

割草机的割草质量效果使用割草率来评价,参考 GB 26509—2011 和 LY/T 1202—2010 的试验方法设计割草效果验证试验。由于试验作业的区域中杂草生长密集和高度参差不齐,为准确计量杂草数量,采用 W 型 9 点采样法,取 0.25 m² 的样方面积,逐一统计每个样方中杂草株数,可以认为该地块的杂草密度为样方杂草密度的均值,如图 15 所示。



图 15 采样统计

Fig. 15 Sampling and statistics

通过统计割草机进行一次割草作业后,切割区域的面积来计算割草割净率,割净率即为取样区域内杂草总株数与切割杂草株数的百分比,割净率^[18]。割净率表达式如式(14)所示。

$$\lambda = \frac{k_A - k_O}{k_A} \times 100\% \quad (14)$$

式中: k_A ——采样区域内测定杂草总株数;

k_O ——采样区域内测定漏割杂草总株数。

试验地为广西某机械化示范茶园,土壤类型为黄棕壤,测试如图 16 所示。



图 16 割草作业试验

Fig. 16 Test of mowing operation

统计采样区杂草株数以及一次割草作业后该区域漏割株数,割净率数据统计如表 5 所示。

表 5 割净率数据统计

Tab. 5 Mowing rate data statistics

项目	采样区 1 /株	采样区 2 /株	采样区 3 /株	均值 /株	割净率 /%
总株数	98	135	117	117	95
漏割株数	3	7	6	6	

该试验区域为初次割草,生草类型多,生草密度大,初次割草割净率达 95%。由试验结果分析可得本文研究的割草机,对普通杂草和灌木类型杂草有较好的切割效果,可认为该试验数据真实性高,能够满足丘

陵山地经济作物种植园区的实际割草作业需求。

4 结论

1) 针对丘陵山地通过性差,现有割草机难以在山区作业的困境,本文研发一种能够通过遥控远程控制的履带式混动割草机,该履带式割草机能够在 15°~25°丘陵山区的坡面上具备良好的行走能力和作业能力。

2) 通过一系列的性能试验,得到该履带式割草机的关键性能参数:结合增程装置与本文研究的能量管理系统,将作业时间延长至 1.8 h;作业姿态灵活,能够实现整机的原地转向;直线行走稳定性好,测试结束时测得偏角不大于 3°;经过倾翻试验台试验,该除草机能够在不大于 38.7°的坡面具有优良的稳定性;在茶园进行实地割草作业实验,初次割草作业的平均割草割净率达 95%,割草效果优异。

3) 由试验数据可得出,本文研发的履带式割草机总体性能优良,能够适用于丘陵山地坡度大,地面崎岖不平的作业环境,并满足割草作业的需求。

参 考 文 献

- [1] 樊文霞, 孟炎奇, 陈国栋, 等. 生草覆盖栽培对果园土壤理化性质的影响研究进展[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(6): 116—120.
Fan Wenxia, Meng Yanqi, Chen Guodong, et al. Research progress on grass-growing technology in improving soil characteristics [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(6): 116—120.
- [2] 胡方洁, 翟秀明, 邓敏, 等. 覆盖对山地幼龄茶园杂草多样性及茶苗生长的影响[J]. 南方农业, 2022, 16(7): 100—106.
- [3] 杨梅, 王亚亚, 陆皎云, 等. 典型果园生草模式及果草系统资源调控研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(9): 189—199.
Yang Mei, Wang Yaya, Lu Jiaoyun, et al. Advances in typical patterns to include grass species in orchards and mechanisms to regulate resources within the orchard-grass system in China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(9): 189—199.
- [4] Verne G B. Adapting to a robot: Adapting gardening and the garden to fit a robot lawn mower [C]. Companion of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 2020: 34—42.
- [5] Aponte-Roa D A, Collazo X, Goenaga M, et al. Development and evaluation of a remote controlled electric lawn mower [C]. 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). IEEE, 2019: 1—5.
- [6] 李雪军. 苹果园垄面割草机设计与试验[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.

(下转第 194 页)

53(7): 259—266.

Jia Zhaohong, Zhang Yuanyuan, Wang Haitao, et al. Identification method of tomato disease period based on Res2Net and bilinear attention mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 259—266.

- [15] Mohanty S P, Hughes D P, Salathé M. Using deep learning for image-based plant disease detection [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 215232.
- [16] Zhu R, Hao F, Ma D. Research on polygon pest-infected leaf region detection based on YOLOv8 [J]. Agriculture, 2023, 13(12): 2253.
- [17] Inui A, Mifune Y, Nishimoto H, et al. Detection of

elbow OCD in the ultrasound image by artificial intelligence using YOLOv8 [J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7623.

- [18] Albahli S, Nawaz M. DCNet: DenseNet-77-based CornerNet model for the tomato plant leaf disease detection and classification [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 957961.
- [19] Li Y, Li S, Du H, et al. YOLO-ACN: Focusing on small target and occluded object detection [J]. IEEE Access, 2020, 8: 227288—227303.
- [20] Roy A M, Bhaduri J. A deep learning enabled multi-class plant disease detection model based on computer vision [J]. AI, 2021, 2(3): 413—428.

(上接第 55 页)

- [7] 沈启扬, 雷晓晖, 马拯胞, 等. F.US-UFO 型果园避障割草机试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 65—71, 77.
Shen Qiyang, Lei Xiaohui, Ma Zhengbao, et al. Experimental study on F.US—UFO mower for avoiding obstacles in orchards [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 65—71, 77.
- [8] 代富彬. 山地果园仿形避障割草机设计与试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
Dai Fubin. Design and experimental study on profiling obstacle avoidance mower for mountain orchard [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [9] 张军, 赵艺. 特种履带车辆小半径转向功率匹配机理研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 1—4, 13.
Zhang Jun, Zhao Yi. Research of special tracked vehicle small radius steering power matching mechanism [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 37(5): 1—4, 13.
- [10] 张仕杰, 张国忠, 赵胜华, 等. 水稻联合收获机双电机履带式底盘设计与驱动功率试验[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(6): 1075—1082.
Zhang Shijie, Zhang Guozhong, Zhao Shenghua, et al. Design of dual-electric motors crawler chassis for rice harvester and drive power test [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(6): 1075—1082.
- [11] 潘冠廷, 杨福增, 孙景彬, 等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 374—383.
Pan Guanting, Yang Fuzeng, Sun Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374—383.
- [12] 朱爱斌, 王步康, 田超, 等. 履带行走机构功率损耗分析系统设计与实现[J]. 工程设计学报, 2011, 18(6): 444—448.
Zhu Aibin, Wang Bukang, Tian Chao, et al. Design and implementation of power loss analysis system

for travel mechanism of tracked vehicle [J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(6): 444—448.

- [13] 鲍秀兰, 严煜, 毛金城, 等. 果园割草机器人用刀设计与分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 136—143.
Bao Xiulan, Yan Yu, Mao Jincheng, et al. Design and analyses of swinging blade for orchard mowing robot [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 136—143.
- [14] 邹晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 王草收获机旋转刀盘式平茬切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 112—124.
Huan Xiaolong, You Yong, Wang Decheng, et al. Design and experiment of rotary cutter disc type flat stubble cutting device for king grass harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 112—124.
- [15] 师毓. 纯电动履带式遥控绿篱机电控系统设计与研究[D]. 长安: 长安大学, 2019.
Shi Yu. Design and research on electronic control system of electric crawler type remote control hedge trimmer [D]. Chang'an: Chang'an University, 2019.
- [16] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358—369.
Sun Jingbin, Chu Guoping, Pan Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358—369.
- [17] 张昊, 樊桂菊, 李钊, 等. 果园作业平台倾翻失稳预警系统设计与仿真试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4): 164—168.
Zhang Hao, Fan Guiju, Li Zhao, et al. Design and experiment of early warning system for orchard operation platform tipping instability [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 164—168.
- [18] 马攀宇. 山地果园仿形割草机的设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.