

小型烟草植保机移动平台结构与试验

刘路^{1,2} 杨路¹ 高观光¹ 李志强¹ 郑泉^{1,2} 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要: 针对皖南山区高垄畦沟环境下小型烟草植保机田间作业易侧翻、难调头的问题, 根据植保机在高垄畦沟田间行走的稳定性与转向要求, 通过对传动系统与转向系统进行分析, 设计了小型轮式烟草植保机。利用 RecurDyn/Track 仿真软件, 建立植保机与田垄结构的动力学与运动学模型, 完成植保机移动平台设计和优化, 并对植保机在高垄畦沟田间环境下进行试验。仿真结果表明, 设计的植保机模型能够达到转向半径为 0.8 m 的实际要求, 且沿垄间直线行驶时移动平台侧倾角小于 3°, 移动平台最佳作业速度为 1.0 m/s, 验证了植保机移动平台模型具有良好的转向性和稳定性。植保机样机田间试验结果表明, 移动平台在烟草田头转向性满足南方烟草垄作环境需求, 利用惯导装置测试垄间移动植保机作业速度为 1.0 m/s 时, 最大侧倾角为 14.38°, 没有超过其发生侧翻的临界角, 能够安全通过。

关键词: 烟草植保机; 小型移动平台; 设计; 试验

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0156-07

Structural Design and Test of Wheeled Tobacco Plant Protection Mobile Platform

LIU Lu^{1,2} YANG Lu¹ GAO Guanguang¹ LI Zhiqiang¹ ZHENG Quan^{1,2} CHEN Liqing^{1,2}

(1. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment, Hefei 230036, China)

Abstract: Aiming to effectively overcome the difficulty in plant protection robot operation with rollover and insufficient steering space when driving in furrows located field at the south of Anhui Province. Taking stability and steering sensitivity of the wheeled tobacco plant protection mobile platform into consideration, by analyzing and adjusting the transmission system and steering system of the mobile platform, a wheeled mobile platform for driving and operating in tobacco fields was designed. The simulation software RecurDyn/Track was used to build the dynamics and kinematics models, and the mobile platform was optimally upgraded and designed in terms of mobility and steering performance. The robot was tested in the field with high furrow to verify the simulation results. The results showed that these simulated models can turn around at the radius of 0.8 m; the deviation was less than 3° when it was under straight-walking condition. And the optimum operating speed reached 1.0 m/s through simulation analysis by comparing the motion stability at different moving speeds. All these numbers proved that the modelling robots were high in steering sensitivity and stability. Through the field experiment, the steering sensitivity of these modelling robots can meet the needs of tobacco fields in the south of Anhui Province. Furthermore, the inertial navigation device was used to test the deviation of the robots' walking angle and the walking stability between the ridges. The largest tilting angle was 14.38° when the mobile plant protection machine operation speed was 1.0 m/s. The research developed the design of mobile platforms in managing the high-ridge farmlands both in theory and technology.

Key words: tobacco plant protection machine; small mobile platform; design; test

收稿日期: 2019-01-10 修回日期: 2019-02-13

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1708085ME135)、安徽省自然科学基金重大项目(KJ2018ZD016)和安徽农业大学青年基金项目(2017zd06)

作者简介: 刘路(1988—),男,讲师,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: vliulu@ahau.edu.cn

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备机械研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

0 引言

垄作法因其水土保持特性而被大部分丘陵旱地所应用,然而其高垄畦沟的特性给田间管理机械的使用提出了很高的要求。皖南山区作为全国主要的烟草种植基地之一,烟草种植行距为 1.2 m,垄沟底较窄,约为 0.3 m,田头间距为 0.8 m^[1-2]。近年来,国内外相关学者针对烟草作业机械开展了大量的研究。陈晓红等^[3]研制了烤烟覆膜机压膜装置的,其自动覆膜技术对提高烟苗成活率和降低虫害发生率具有显著效果。燕亚民等^[4]研制了一种导苗管式烟草移栽机,其操作简单,提高了烟苗的移栽工作效率。张秀丽等^[5]为了提高烟草大田中耕培土作业质量和效率,设计了复合切削式烟草中耕培土机。然而,对于烟草种植中后期烟叶遮叠环境下的植保作业要求,上述研究在田间管理上还具有一定局限性。

烟草中后期便于植保作业的移动平台是烟草植保作业的一个空缺^[6-7]。传统的植保机械主要有高地隙植保机械^[8-9]和无人机植保等类型,由于烟草种植多以地处丘陵山区等垄作田块为主,以高地隙植保机械为代表的大型机械难以田间作业,而无人机植保无法满足烟草中后期根部的植保需求,因此目前烟草的植保工作仍然以人工背负式打药机为主。烟草中后期叶片大,密度高,对劳动力需求大;另一方面,人工背负作业时易对烟草叶片造成损伤,同时农药对人体也有一定的伤害。

根据烟草垄作环境,本文设计一款三轮结构轮式移动平台。针对垄作环境田头转向要求,利用车身姿态稳定临界条件分析三轮移动平台系统最大转向角度;根据不同车速下移动平台在烟草垄沟环境下运动平稳性和动力分析,确定移动平台安全行驶速度。通过试验验证移动平台设计可靠性,以确保所设计的烟草植保移动平台的行驶性能满足垄作环境作业要求。

1 整机结构设计

1.1 整机结构

烟草植保移动平台主要由车身、传动系统、转向系统和喷药系统组成,结构如图 1 所示。其中车身由车架、龙门架等组成;传动系统由驱动电机、驱动减速器等组成;转向系统由转向电机、转向减速器、前轮转角传感器等组成。烟草植保机移动平台主要结构参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

烟草植保机在田间作业时,作业人员根据田间

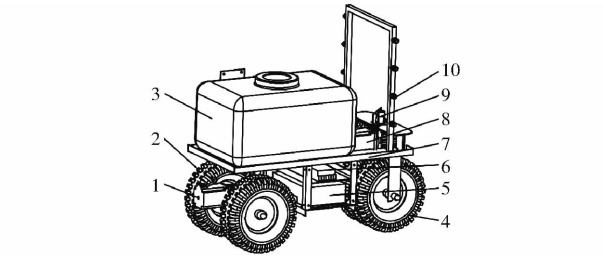


图 1 烟草植保机移动平台整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of tobacco plant protection robot

1. 驱动电机 2. 后轮 3. 药箱 4. 前轮 5. 电池 6. 驱动器 7. 车身 8. 转向电机 9. 编码器 10. 喷头

情况遥控植保机械作业,其工作原理如图 2 所示。控制指令通过 2.4 GHz 频道将指令传输给 SBUS 接收器,根据 SBUS 协议将指令传达给 STM32 单片机,单片机通过解析指令,实现对机器人动力系统及喷雾系统的控制,驱动力和转向力由 ZM-6615 型直流无刷驱动器通过调节 PWM 方式进行控制。通过单片机 IO 接口为机器人提供行驶控制信号,可以实现机器人前进和后退功能的有效切换^[10-13]。遥控功能为后续喷药等管理作业保留扩展接口。

表 1 烟草植保机移动平台主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of tobacco plant protection mobile platform

参数	数值/型式	参数	数值/型式
整机型式	轮式	轴距/m	0.6
整机质量/kg	60	后轮间距/m	0.3
长×宽×高/(m×m×m)	1.0×0.4×0.9	质心高度/m	0.36
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.1~1.5		

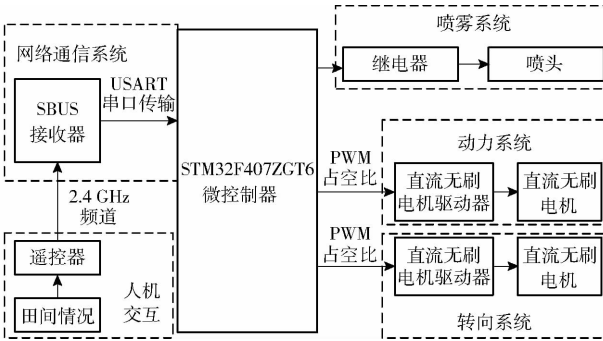


图 2 工作原理示意图

Fig. 2 Working principle diagram

2 关键部件设计

2.1 传动系统设计

如图 3 所示,所设计的烟草植保移动系统采用后轮驱动。传动系统通过控制器驱动电机为后轴提供动力,其中控制器由 STM32 单片机和电机驱动器组成,驱动器接收单片机的 PWM 信号占空比调节电机的速度。

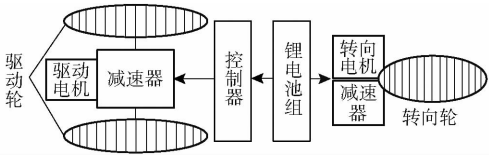


图 3 传动布置示意图

Fig. 3 Schematic of transmission arrangement

移动平台在水平地面运动过程中所受到的行驶阻力主要包括来自地面的滚动阻力 F_f 和空气阻力 F_w 。在坡道上行驶、加速行驶时,除上述两种阻力外,还需要克服平台自身重力带来的阻力 F_i 以及为提供加速度产生的加速阻力 F_j ,因此植保移动平台在行驶过程中所受到的阻力为

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j \tag{1}$$

考虑到烟草植保机在田间工作时速度较低的特点,可将速度设定为定值,忽略加速阻力对整机的影响,滚动阻力和由重力产生的阻力都与车身重力成正比,因此移动平台在行驶过程中所受到的阻力为

$$F_\psi = F_f + F_i = G(f + i) \tag{2}$$

其中 $i = \tan\alpha$ (3)

- 式中 F_ψ ——道路阻力,N
 G ——车身自身重力,N
 f ——滚动摩擦因数,取 0.1^[14]
 i ——道路坡度
 α ——道路坡道角

根据田头 T 型通道结构,烟草植保机移动平台在田头转弯时,车轮靠垄一侧会入侵至垄坡,垄坡底部坡道角 α 约为 30° ,由式(1)~(3)可知,此时移动平台的行驶阻力 F_ψ 为 408 N。

为确保移动平台正常行驶,在运动过程中车轮所需的驱动力 F_t 需大于其行驶阻力 F_ψ ,设计安全系数 1.5,即

$$F_t > 1.5 F_\psi = 612 \text{ N}$$

电机驱动力计算式为

$$F_t = \frac{T_{iq}}{r} = \frac{9\,550 P}{nr} i_0 \tag{4}$$

- 式中 T_{iq} ——驱动轮转矩,N·m
 r ——驱动轮半径,取 150 mm
 P ——电机额定功率,kW
 n ——电机额定转速,r/min
 i_0 ——传动比

驱动系统结构如图 4 所示,经计算其驱动力大于安全行驶阻力 612 N。选取额定功率 750 W、额定转速为 3 000 r/min 的直流无刷电机,并配套 1:40 的减速器。驱动力 F_t 为 637 N,满足田间工作驱动的设计要求。

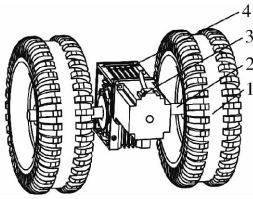


图 4 驱动系统结构图

Fig. 4 Drive system structure diagram

1. 驱动轮 2. 驱动轴 3. 直流无刷电机 4. 减速器

2.2 转向系统设计

烟草植保机移动平台选用三轮模型^[15-17],使整车在田头转向时,减小转向轮侵入田垄的距离,提高转向控制鲁棒性。同时,为了解决三轮车模型系统不稳定的缺点,前轮采用双轮机构,增大系统与地面的接触面积,使移动平台在转向时前轮侧偏角减小,其结构如图 5 所示。

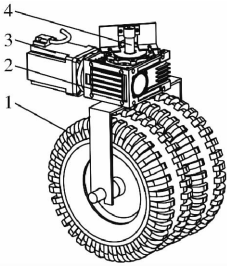


图 5 转向系统结构图

Fig. 5 Steering system structure diagram

1. 转向轮 2. 减速器 3. 步进电机 4. 编码器

选用步进电机作为转向电机,该步进电机为 86 系列两相大力矩混合式步进电机,单轴输出,步距角为 1.8° ,步距角精度为 5%。电机与转向轴之间用 1:40 减速器连接,增大转向驱动扭矩,避免步进电机低转速状态下丢步误差;另一端安装编码器,搭建转向闭环回路,以实现转向精准控制。

根据图 6 可得,植保移动平台转弯半径为

$$R_1 = \frac{l}{\sin\theta} \tag{5}$$

其中 $\theta = \frac{\alpha\gamma}{40}$ (6)

- 式中 l ——轴距长度 θ ——前轮转角
 α ——步距角 γ ——脉冲频率

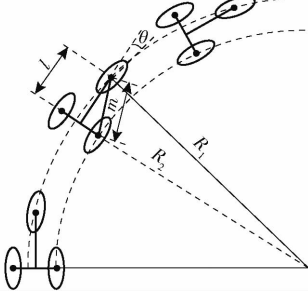


图 6 转弯半径示意图

Fig. 6 Turning radius diagram

根据移动平台结构,最内侧转弯半径 R_2 与转角 θ 之间的关系为

$$\cos\theta = \frac{R_1^2 + R_2^2 - m^2}{2R_1R_2} \tag{7}$$

其中
$$m = \sqrt{l^2 + \left(\frac{n_1}{2}\right)^2} \tag{8}$$

式中 m ——前轮与后内侧轮间距
 n_1 ——后轮间距

当烟草植保机移动平台最内侧转弯半径为 0.8 m 时,根据车身参数所需控制前轮转角 θ 为 50° 。

3 多体动力学性能分析

3.1 移动平台车身建模和仿真分析

利用 RecurDyn/Track 软件基于相对坐标系和相对递推算法的动态仿真建立烟草植保机移动平台车身的多体动力学模型^[18-19],如图 7 所示。烟草植保机移动平台整体机械系统较为复杂,建模仿真仅需对平台行驶系统进行分析,本文将整机简化:①将工作部件简化为刚体,通过加载运动系统对机构进行仿真。②省略了不影响仿真的非工作部件,如螺栓、螺母等。③模型参数主要通过三维测量、计算或试验得到。其中,仿真模型刚体数为 5,运动自由度为 6,运动副数目为 4。在多体动力学仿真软件 RecurDyn 中对烟草植保平台两后轮施加相同的驱动副,对其进行转弯半径的测量仿真试验。

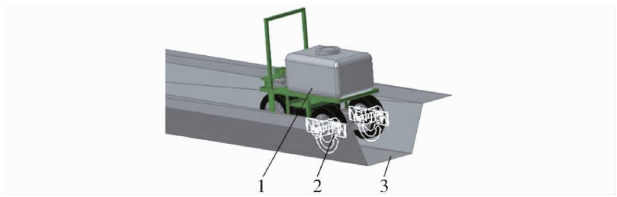


图 7 烟草植保机移动平台仿真模型

Fig. 7 Simulation model of tobacco plant protection vehicle

1. 车身 2. 驱动副 3. 垄沟

仿真结果如图 8 所示,烟草植保机移动平台在前轮转角为 50° 时转弯半径约为 0.8 m,与理论计算结果相符。

3.2 机器人转向半径测试

如图 9 所示,测得烟草植保机移动平台最小转弯半径,保持平台前轮转角,低速自转一圈,获得转向内侧车轮和外侧车轮形成内外侧轨迹,再对轨迹进行实际测量。

经测量,移动平台在前轮转角为 50° 时内轮的转弯半径为 0.78 m,满足 0.8 m 的转向半径要求。

3.3 移动稳定性临界条件分析

移动平台侧向倾斜角是评价移动稳定性的重要指标,倾斜角的增加使移动平台侧翻的几率增大。

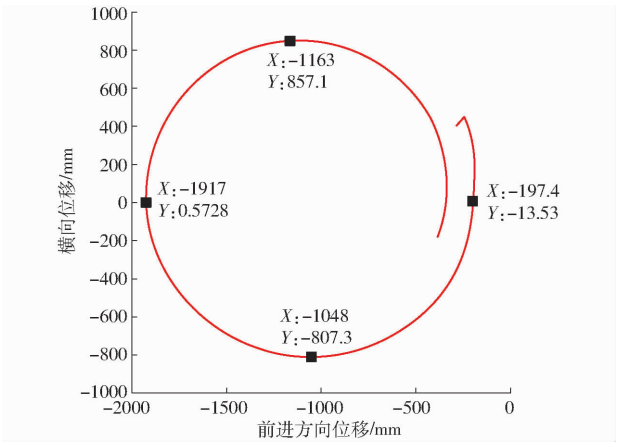


图 8 转弯半径仿真结果

Fig. 8 Simulation result of turning angles of different corners



图 9 烟草植保机移动平台转向试验

Fig. 9 Turning test of tobacco plant protection robot

车身发生侧翻的临界条件为重心落在着地轮上,此时车身倾斜角 $\delta = \arctan \frac{4}{7} \approx 30^\circ$,如图 10 所示。由于移动平台针对对靶施药作业,在作业过程中平台抖动对作业质量影响较大。本研究采用车辆在不同速度下侧倾角度方差作为移动平稳性指标,旨在寻找平稳性较高的移动速度范围。

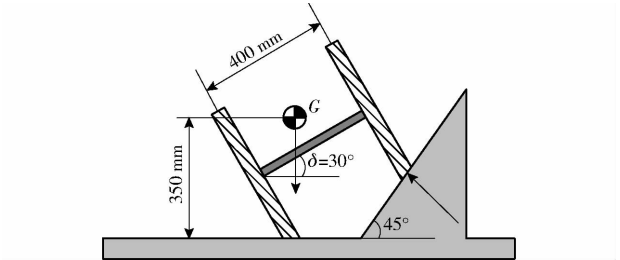


图 10 车身侧翻受力分析

Fig. 10 Force analysis diagram of car body rollover

3.4 垄间行走仿真分析

在田间行驶过程中,移动平台平稳性与路面平整度及车辆运行速度相关,为测试其不同速度驱动下垄间行驶的稳定性的,分别记录以 0.8、1.0、1.3 m/s 在垄沟底部行驶的侧倾角,移动平台垄沟间行走最大侧倾角在 $-2^\circ \sim 3^\circ$ 之间,如图 11 可知,车身振动趋势和路面起伏状态相近,由于垄沟底部较为平坦,最大侧倾角和振幅随着车速变化较小,对车辆平稳

性影响不大。

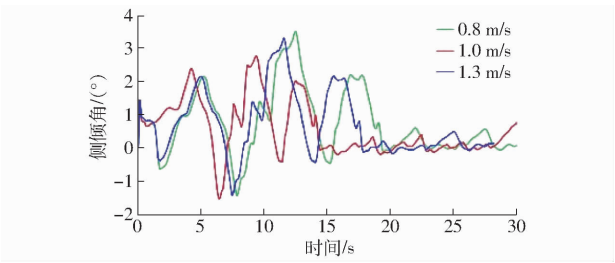


图 11 不同速度下侧倾角曲线

Fig. 11 Rolling angular velocity curves at different speeds

移动平台田间行驶过程中,最大侧倾角多出现于田头转向位置。系统采集3块不同田块地面的参数(均包括田头转向区域),在不同垄作路面参数下,通过0.3~1.5 m/s以0.1 m/s递增的测试方法,完成移动平台垄间的行驶仿真,得到最大侧倾角和移动平台的移动平稳性,如图12所示。由图12可知,移动平台速度大于1.0 m/s后,侧倾角和侧倾角方差明显提升,行驶平稳性明显变差。

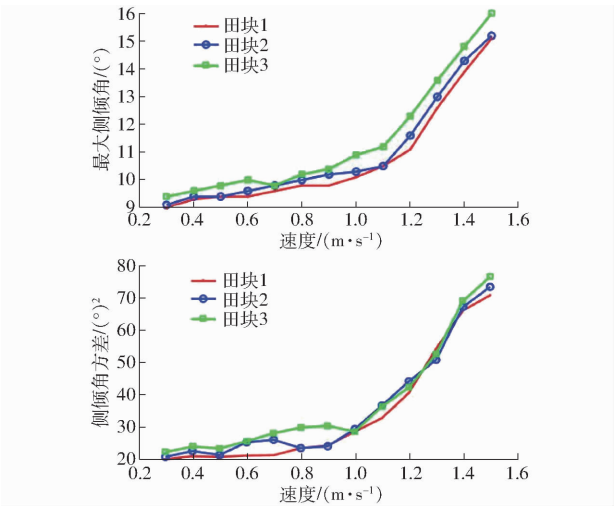


图 12 烟草植保机器人仿真结果分析

Fig. 12 Simulation results analysis of tobacco plant protection robot

4 行驶稳定性试验

4.1 试验方法

试验于烟草种植中后期在安徽宣城烟草实验基地进行,如图13所示。试验主要包括直线行驶和田

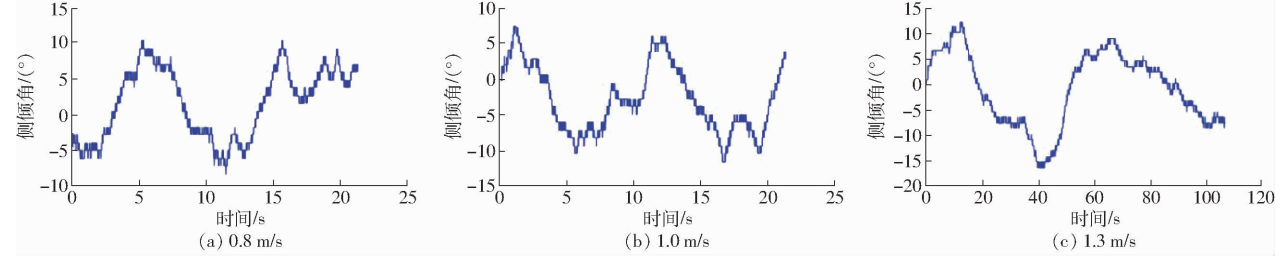


图 14 车身侧倾角变化曲线

Fig. 14 Changing curves of car body roll angle

头转向试验,定速行驶试验通过陀螺仪测量不同速度下车身侧倾角,根据测量数据分析获取烟草植保平台在垄间的最佳工作速度;车身最大侧倾角试验是测量烟草植保机器人在田头转向时的侧倾角,以验证植保机器人在田头转向的稳定性^[20-21]。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field test

4.2 田间试验

4.2.1 田间匀速行驶试验

移动平台匀速(0.8、1.0、1.3 m/s)在烟草田间遥控行驶测试试验,利用陀螺仪记录平台在不同速度下行走的侧倾角,如图14所示。

由图14可知,在3次试验中,侧倾角在很小的范围内进行波动。当速度为0.8 m/s时,其最大侧倾角在10.3°;当车速为1.0 m/s时,试验最大侧倾角为11.7°;当车速为1.3 m/s时,试验最大侧倾角为16.3°,试验结果与仿真结果相似。根据效率优先原则,在稳定性状况相近时,速度快实际作业效率高,烟草植保机器人的最佳作业速度在1.0 m/s左右。

4.2.2 最大侧倾角试验

对移动平台在烟草田头进行转向试验,设定最高移动作业速度1.0 m/s,经多次试验记录移动平台在烟草田头转向入侵垄沟时的侧倾角,测得的数据如表2所示。经过试验测量,植保平台在通过田头转向时车身最大侧倾角为14.38°,最大侧倾角远小于侧翻临界条件30°。在转向试验中车身均没有发生侧翻,因此,设计的烟草植保机移动平台在田头转向正常运动过程中不会发生侧翻,满足高垄畦沟环境下烟草植保移动平台运动需求。

经测试,平台在水平路面能够达到的最小转弯

表2 田头转向最大侧倾角

Tab.2 Maximum inclination angle of cornering

	(°)				
试验序号	1	2	3	4	5
最大侧倾角	12.16	13.49	11.25	14.38	8.62
试验序号	6	7	8	9	10
最大侧倾角	10.28	11.36	12.86	9.77	10.96

半径为0.8 m;当车身速度在1.0 m/s 以内作业时,其最大侧倾角为14.38°,机器人在高垄畦沟实际作业过程中具有良好的转弯性能及运动稳定性。

5 结论

(1)针对烟草垄作环境,对传动和转向系统等

关键部件进行设计,最小转弯半径为0.8 m,满足烟草田间直线行驶、田头转向等需求,能够以1.0 m/s 速度行驶,达到预期的作业效果。

(2)利用RecurDyn/Track 进行仿真分析,在前轮转角为50°时,转弯半径为800 mm,符合设计计算结果;在垄沟行走时其侧倾角在-2°~3°之间波动,变化幅度较小,稳定性较高。

(3)通过试验稳定性测试,分析烟草植保机移动平台田间行驶性能。试验结果表明,植保平台能够在烟草垄底行驶,稳定性良好,左右摆动幅度为3°,没有损坏烟草作物;当作业速度为1.0 m/s 时,最大侧倾角为14.38°,没有超过其发生侧翻的临界角度,能够安全通过。

参 考 文 献

[1] 晋琦琳. 烟草种植技术与实施要点解读[J]. 南方农业,2018,12(5):7-8.
JIN Qilin. Interpretation of tobacco planting technology and implementation points [J]. South China Agriculture, 2018,12(5): 7-8. (in Chinese)

[2] 武忠明. 烟草种植制度及其技术保障措施[J]. 农业与技术,2018,38(14):11-12.
WU Zhongming. Tobacco planting system and its technical safeguards[J]. Agriculture and Technology, 2018,38(14): 11-12. (in Chinese)

[3] 陈晓红,姜肇景,陈秀斋,等. 烤烟覆膜机压膜装置的研制与应用[J]. 农业开发与装备,2017(1):69-73.
CHEN Xiaohong, JIANG Zhaojing, CHEN Xiuzhai, et al. Development and application of film-pressing device for flue-cured tobacco filmcovering machine[J]. Agricultural Development & Equipments, 2017(1): 69-73. (in Chinese)

[4] 燕亚民,王双. 导苗管式烟草移栽机的设计[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版),2017,34(2):147-151.
YAN Yamin, WANG Shuang. Design of seedlingguiding tube tobacco transplanter[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 34(2): 147-151. (in Chinese)

[5] 张秀丽,仝振伟,李连豪,等. 复合切削式烟草中耕培土机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):73-81.
ZHANG Xiuli, TONG Zhenwei, LI Lianhao, et al. Design and test of compound cutting tobacco cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 73-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.008. (in Chinese)

[6] 赵明宇,王英姿,邱立春,等. 我国植保机械的使用现状及发展趋势[J]. 中国农机化,2004(3):37-38.
ZHAO Mingyu, WANG Yingzi, QIU Lichun, et al. The current status and development trend of plant protection machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2004(3): 37-38. (in Chinese)

[7] 卢燕回,邓涛,孙菲,等. 我国烟草植保机械使用现状与发展趋势[J]. 广西植保,2018,31(2):18-21.
LU Yanhui, DENG Tao, SUN Fei, et al. Current situation and development trend of tobacco plant protection machinery in China [J]. Guangxi Plant Protection, 2018, 31(2): 18-21. (in Chinese)

[8] 权龙哲,申静朝,奚德君,等. 狭闭空间内苗盘物流化搬运机器人运动规划与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):51-59.
QUAN Longzhe, SHEN Jingchao, XI Dejun, et al. Motion planning and test of robot for seedling tray handling in narrow space [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):51-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.008. (in Chinese)

[9] 苑进,赵新学,李明,等. 高地隙喷杆式与隧道式一体喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊2):60-68.
YUAN Jin, ZHAO Xinxue, LI Ming, et al. Design and experiment of highland gap sprayer and tunnel type sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(Supp.2):60-68. (in Chinese)

[10] SANCHEZ-HERMOSILLA J, GONZALEZ R, RODRIGUEZ F, et al. Mechatronic description of a laser autoguided vehicle for greenhouse operations[J]. Sensors, 2013, 13(1):769-784.

[11] 张铁民,黄翰,黄鹏焕. 电动轮式移动小车控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(19):11-18.
ZHANG Tiemin, HUANG Han, HUANG Penghuan. Design and test of electric wheeled mobile car control system [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 11-18. (in Chinese)

[12] 耿长兴,张俊雄,曹峥勇,等. 温室黄瓜病害对靶施药机器人设计[J]. 农业机械学报,2011,42(1):177-180.
GENG Changxing, ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, et al. Design of target-to-target pesticide application robot for greenhouse cucumber diseases[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):177-180. (in Chinese)

[13] 刘雪美,李扬,李明,等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of precision spraying system for spraying rod sprayer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3): 37-44. <http://www.j-csam.org/jcsam/ch/>

- reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160306&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.006. (in Chinese)
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2009.
- [15] 袁玲合. 三轮高地隙中耕精量施肥机设计与试验[D]. 郑州:河南农业大学,2017.
YUAN Linghe. Design and experiment of three-wheel high ground gap cultivating precision fertilizer machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [16] 路敌,郭康权. 柔性底盘的转向运动模型[J]. 农机化研究,2011,33(4):219-222.
LU Di, GUO Kangquan. Steering motion model of flexible chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 219-222. (in Chinese)
- [17] 曾锦锋,陈晨,杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械,2013,31(3):13-16,19.
ZENG Jinfeng, CHEN Chen, YANG Mengai. Design of four-wheel steering mechanism based on Ackerman steering principle [J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 13-16,19. (in Chinese)
- [18] 张骞,李年裕,杨怀彬,等. 基于 RecurDyn 和 Matlab/Simulink 的一种小型轮式平台的联合仿真[J]. 计算机测量与控制, 2018,26(3):112-115.
ZHANG Qian, LI Nianyu, YANG Huaibin, et al. Cosimulation of a small wheeled platform based on RecurDyn and Matlab/Simulink[J]. Computer Measurement & Control,2018,26(3):112-115. (in Chinese)
- [19] 李波,张承宁,李军求. 基于 RecurDyn 和 Simulink 的电传车辆转矩控制策略[J]. 农业机械学报,2009,40(7):1-5.
LI Bo, ZHANG Chengning, LI Junqiu. The torque control strategy of electric drive vehicle based on RecurDyn and Simulink [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 1-5. (in Chinese)
- [20] 宋树杰,瞿济伟,李翊宁,等. 农用车底盘偏置转向轴驱动轮运动与动力特性试验[J]. 农业工程学报,2015,31(23): 28-34.
SONG Shujie, QU Jiwei, LI Yining, et al. Test on motion and dynamic characteristics of driving wheel of steering shaft with offset chassis of agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 28-34. (in Chinese)
- [21] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):83-90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):83-90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160112&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)

(上接第 155 页)

- [24] 宋占华,宋华鲁,耿爱军,等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(16):37-45.
SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):37-45. (in Chinese)
- [25] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等. 甘蔗茎秆切割力试验[J]. 农业工程学报,2007,23(7):90-94.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Cutting force test of sugarcane stalk [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 90-94. (in Chinese)
- [26] 侯加林,蒋韬,吴彦强,等. 小麦秸秆往复式切割试验台设计与应用[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):101-106.
HOU Jialin,JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):101-106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2014s117&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.017. (in Chinese)
- [27] 蒋韬,侯加林,李天华,等. 田间玉米秸秆往复切割试验台[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):32-36.
JIANG Tao, HOU Jialin, LI Tianhua,et al. Field reciprocating cutting test bench for corn stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):32-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2013s207&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.007. (in Chinese)
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业机械 切割器 第1部分:总成:GB/T 1209.1—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业机械 切割器 第3部分:动刀片、定刀片和刀杆:GB/T 1209.1—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [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:中国农业科学技术出版社,2007:877-920.
- [31] 胡良龙,王公仆,凌小燕,等. 甘薯收获期藤蔓秸秆的机械特性[J]. 农业工程学报,2015,31(9):45-49.
HU Lianglong, WANG Gongpu, LING Xiaoyan, et al. Mechanical properties of sweet potato vine and stalk during harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 45-49. (in Chinese)
- [32] 田昆鹏,李显旺,沈成,等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):56-61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 56-61. (in Chinese)
- [33] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报,1982,1(2):64-69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982,1(2):64-69. (in Chinese)