

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.12.002

烟兜挖掘装置的运动学分析与试验^①

段廷亿, 谢守勇, 张长春, 左定东

西南大学 工程技术学院/丘陵山区农业装备重庆市重点实验室, 重庆 400715

摘要: 针对丘陵山区烟叶收获后根系去除作业劳动强度大, 机械化效率低的问题, 结合液压回路设计了一种烟兜挖掘装置. 以烟兜挖掘机构为研究对象, 根据其结构特点, 将烟兜挖掘过程分为伸出、保持、收回 3 个阶段, 建立了运动学姿态状态空间, 并对铲刀的运动状态进行了运动学理论分析, 得出了液压缸活塞杆的伸出运动速度对挖掘深度的影响有显著作用. 利用三维建模技术及虚拟样机仿真技术对该机构的运动状态进行了数值分析, 验证了挖掘铲在微耕机前进速度以及伸出姿态时间、保持姿态时间、收回姿态时间一定的条件下, 挖掘深度随活塞杆伸出速度增大而增大的关系, 同时也验证了活塞杆伸出速度与挖掘铲水平位移无明显关系. 为了验证理论、仿真分析的准确性和该装置的性能, 在西南大学烟草种植实践基地进行了田间试验, 将田间试验结果与仿真数据进行对比, 挖掘深度的相对误差在 7%~12% 之间, 表明了理论、仿真分析的正确性以及该装置能基本满足挖掘性能要求.

关键词: 烟兜; 液压缸; 运动学; 仿真; 试验

中图分类号: S225.99

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)12-0008-07

我国是世界第一烟草种植大国, 种植面积在 100 万 hm^2 左右, 占世界产量的 35%. 烟草是我国重要的农业经济作物, 并且是忌连作的农作物^[1-3]. 传统的烟杆根系去除作业(特别是丘陵山区)主要是靠人工手拔、锄头挖根等方式进行, 费时费力, 效率也不高, 工作量大, 人工成本高^[4], 残留的根系腐烂后也会破坏土壤养分平衡, 改变土壤微生物多样性, 导致烟草生长不良, 产量和品质下降^[5-6]. 所以亟需有关烟兜根系去除机械设备来帮助提高效率、降低劳动强度和人工成本.

目前, 国外现有的拔杆机械的作业方式大多属于破坏性拔杆, 即将茎秆直接粉碎还田, 配套动力大多采用中小型拖拉机, 体积结构较大, 大多无法适应小地块烟田的作业环境^[7]; 我国针对烟杆作物的研究起步相对较晚, 国内现有投入生产和使用的烟杆挖掘机械设备还比较少, 且大多数采用中小型拖拉机作为配套动力, 底盘笨重, 大多数在一些平原地区推广, 适应南方山地丘陵地带小地块烟田的机械设备还比较欠缺^[8]. 由于受我国烟草作物种植制度的限制, 拔杆机械设备必须能够将烟杆连同根茎一起拔除并清理出田, 以满足次年的烟草的种植要求. 因此针对南方丘陵山区特点, 烟草拔杆去根机械设备必须朝小型轻便化的方向发展. 基于以上要求, 本文研制了一种小型轻便的烟兜挖掘装置, 针对其挖掘机构进行了运动学分析和整机田间试验, 研究结果可为完善根茎挖掘机的结构设计和作业参数优化提供参考.

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构及主要技术要求

我国烟草种植规模差异较大, 国内所起的烟垄垄体一般呈三角形或抛物线型, 南方烟草种植区的种植

① 收稿日期: 2019-06-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0701101-3).

作者简介: 段廷亿(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业装备研究.

通信作者: 谢守勇, 博士, 教授, 硕士研究生导师.

行距一般 1 200 mm, 垄高为 300 mm, 垄底宽为 900 mm, 株距为 500 mm; 主要根系分布一般在茎基周围 18 cm, 深 25 cm 的土层内^[4], 如图 1 所示。

1.2 工作原理

烟兜挖掘装置以微耕机为动力平台(提供前进的动力), 液压泵站作为动力源(提供机构姿态变化的动力)。如图 2 所示, 具体工作原理为: 将烟兜挖掘机构及液压泵站装配在微耕机上, 整机前进, 当微耕机行驶至合适位置时, 拉下手动阀的伸长换向杆, 液压缸活塞杆伸出, 挖掘铲入土, 达到深度后, 松开伸长换向杆, 此时液压缸活塞杆保持静止。微耕机再前进一段距离后, 拉下手动阀的收回换向杆, 液压缸活塞杆收回, 液压缸回到初始状态, 松开收回换向杆, 完成整个烟兜挖掘作业。

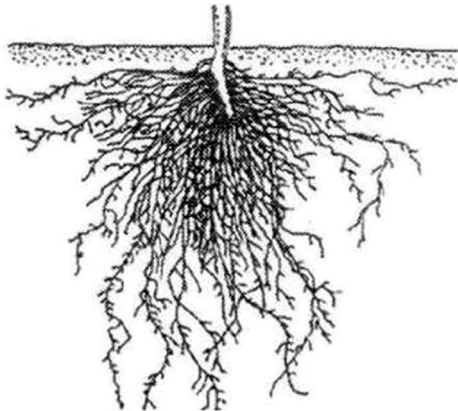
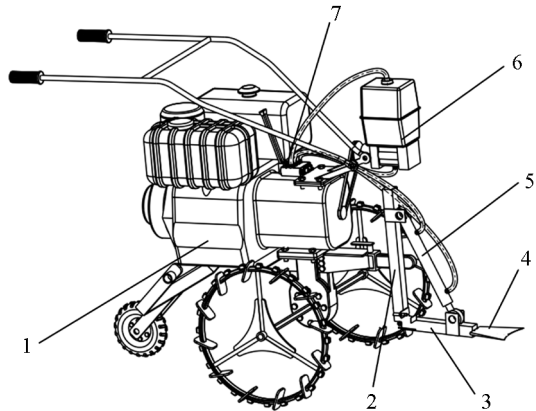


图 1 烟兜根系分布



1. 微耕机; 2. 固定臂; 3. 转动臂; 4. 挖掘铲; 5. 液压缸; 6. 液压泵站; 7. 手动换向阀。

图 2 烟兜挖掘装置结构

2 烟兜挖掘机构运动学模型构建与分析

为了研究挖掘机构的运动学性能, 并为其力学分析、优化设计以及虚拟样机仿真提供理论基础, 需要对该机构建立运动学模型并进行相应的运动学分析。本文主要采用坐标法对该机构运动的每个过程进行运动学建模, 列出液压缸活塞杆的伸出、保持、收回过程并进行相应的运动学分析, 求解工作空间, 对该机构的各个运动状态进行数学描述, 最后求解出各个工作状态空间的速度以及他们之间的关系^[9]。

2.1 烟兜挖掘机构运动空间模型建立

液压缸活塞杆的伸出和收回会引起转动杆关节空间转角的变化, 建立运动空间简图, 如图 3 所示, OA 为固定臂, OB 为转动臂, BC 为挖掘铲, v_2 为微耕机前进速度方向。

由图 3 可得, 根据余弦定理有

$$\theta_{\min} = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_0^2}{2ab}$$

$$\theta_{\min} = \alpha_{\min} + 90^\circ \quad (1)$$

式中: θ 为转动杆 OB 与固定臂 OA 的夹角, $^\circ$; α 为转动臂 OB 与前进速度的夹角, $^\circ$; a 为固定臂 OA 的长度, mm; b 为转动杆 OB 的长度, mm; l_0 为液压缸伸出的长度, mm。由此可得

$$\alpha_{\min} = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_0^2}{2ab} - 90^\circ \quad (2)$$

将液压缸最大伸长长度 l_{\max} 代入式(1), 可得

$$\alpha_{\max} = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_{\max}^2}{2ab} - 90^\circ \quad (3)$$

因此转动杆关节的转角范围为

$$\alpha \in \left[\cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_0^2}{2ab} - 90^\circ, \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_{\max}^2}{2ab} - 90^\circ \right]$$

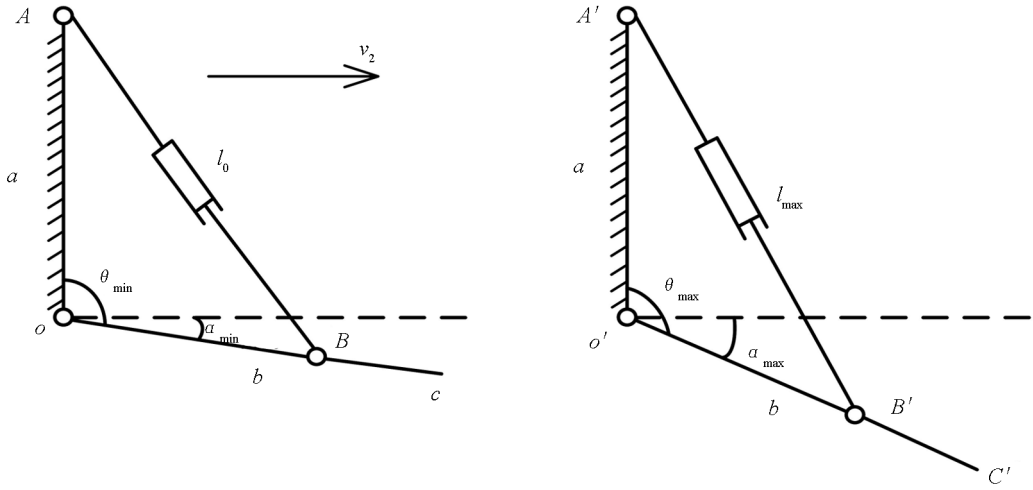


图 3 烟兜挖掘机构简图

2.2 烟兜挖掘机构姿态空间

以挖掘铲为研究对象, 通过挖掘铲中心点的位置坐标 $[x, y]$ 以及挖掘铲的姿态角 α (挖掘铲参考点 C 与转动点 O 的连线与前进方向的夹角) 可以唯一确定挖掘铲的空间状态, 利用矢量 $[x, y, \alpha]^T$ 表示.

1) 液压缸伸出状态

在液压缸伸出的过程中, 为了便于研究, 假设液压缸活塞杆直线往复运动速度和微耕机前进速度是恒定的, 分别为 v_1 和 v_2 . 如图 4 所示, 将大地视为定坐标系 XOY , 将该机构视为动坐标系 (以转动点 O 为坐标原点, 微耕机前进方向为 x 轴, 与前进速度垂直的方向为 y 轴), 因此, 在该空间中挖掘铲参考点的位移矢量为 CC_1 , 参考点位置 C_1 坐标可以表示为

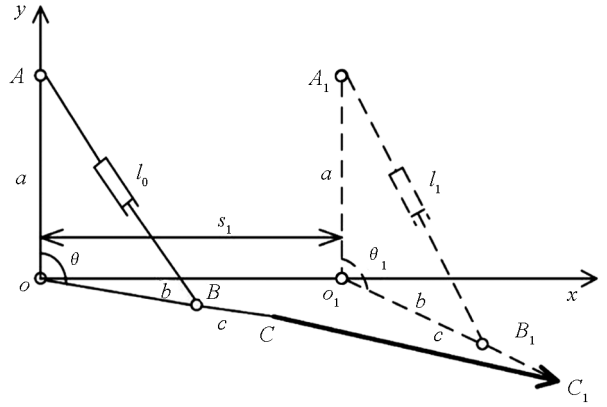


图 4 伸长姿态简图

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \cos(\theta_1 - 90^\circ) \\ c \sin(\theta_1 - 90^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 + c \sin\theta_1 \\ -c \cos\theta_1 \end{bmatrix}$$

式中: s_1 表示在伸出工作空间该机构前进的距离, mm; c 表示挖掘铲参考点到转动点 O 的距离, mm; θ_1 表示该空间任意状态下转动臂 OB 与固定臂 OA 的夹角, $^\circ$, 计算表达式为

$$\theta_1 = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_1^2}{2ab} \tag{4}$$

式中: l_1 表示在该空间任意状态液压缸的总长, mm.

因此, 挖掘铲在伸出阶段的姿态空间状态可以表示为

$$CC_1 [\]^T = [x_1 \ y_1 \ \alpha_1]^T = [s_1 + c \sin\theta_1 \ -c \cos\theta_1 \ \theta_1 - 90^\circ]^T$$

其中, $s_1 = v_2 t_1$, $l_1 = l_0 + v_1 t_1$, $\sin\theta_1 = \sqrt{1 - (\cos\theta_1)^2}$, t_1 表示保持阶段的总时间, s.

2) 液压缸保持状态

同理, 可得挖掘铲参考点在该空间的位移矢量 $C_1 C_2$, 如图 5, 参考点的位置坐标 C_2 可表示为

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1 + c \cos(\theta_2 - 90^\circ) \\ c \sin(\theta_2 - 90^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 + s_2 + c \sin\theta_2 \\ -c \cos\theta_2 \end{bmatrix}$$

式中: s_2 表示在保持工作空间该机构前进的距离, mm; θ_2 表示该空间任意状态下转动臂 OB 与固定臂 OA 的夹角, 计算表达式为

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_2^2}{2ab} \quad (5)$$

式中: l_2 表示在该空间任意状态液压缸的总长, mm.

因此, 挖掘铲在液压缸保持阶段的姿态空间状态可以表示为

$$\begin{aligned} C_1 C_2 [\quad]^T &= [x_2 \quad y_2 \quad \alpha_2]^T = \\ &= [s_1 + s_2 + c \sin \theta_2 \quad -c \cos \theta_2 \quad \theta_2 - 90^\circ]^T \end{aligned}$$

其中, $s_2 = v_2 t_2$, $l_2 = l_0 + v_1 t_2$, $\sin \theta_2 = \sqrt{1 - (\cos \theta_2)^2}$, t_2 表示保持阶段的总时间, s.

3) 液压缸收回状态

同理, 可得挖掘铲参考点在该空间的位移矢量 $C_2 C_3$, 如图 6, 参考点的位置坐标可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} s_3 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_1 + s_2 + c \cos(\theta_3 - 90^\circ) \\ c \sin(\theta_3 - 90^\circ) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} s_1 + s_2 + s_3 + c \sin \theta_3 \\ -c \cos \theta_3 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中: s_3 表示在保持工作空间该机构前进的距离, mm; θ_3 表示该空间任意状态下转动臂 OB 与固定臂 OA 的夹角, $^\circ$, 计算表达式为

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_3^2}{2ab} \quad (6)$$

式中: l_3 表示在该空间任意状态液压缸的总长, mm.

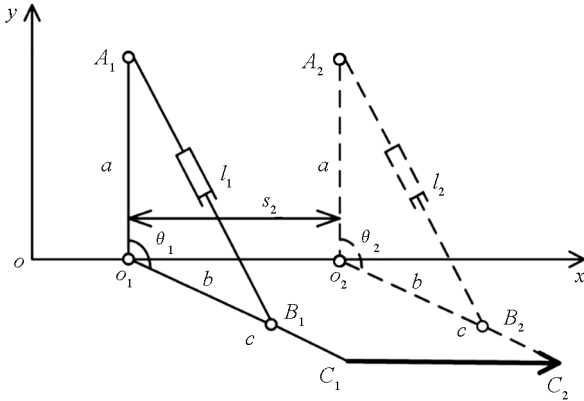


图 5 保持姿态空间简图

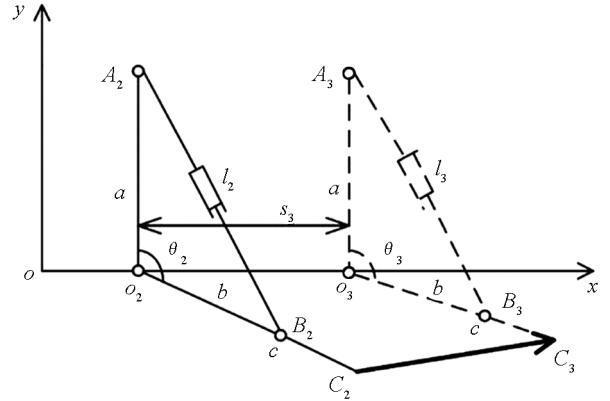


图 6 收回姿态空间简图

因此, 挖掘铲在液压缸收回阶段的姿态空间状态可以表示为

$$\begin{aligned} C_2 C_3 [\quad]^T &= [x_3 \quad y_3 \quad \alpha_3]^T = \\ &= [s_1 + s_2 + s_3 + c \sin \theta_3 \quad -c \cos \theta_3 \quad \theta_3 - 90^\circ]^T \end{aligned}$$

其中 $s_3 = v_2 t_3$, $l_3 = l_2 - v_1 t_3$, $\sin \theta_3 = \sqrt{1 - (\cos \theta_3)^2}$, t_3 表示保持阶段的总时间, s.

3 运动仿真模型

由烟兜挖掘装置姿态空间状态可知, 挖掘铲的挖掘深度 h (即 y 坐标) 主要与 θ 有关, 而 θ 的变化主要由液压缸的伸出量变化引起. 又因为液压缸活塞杆伸长量 $\Delta l = v_1 t$, 因此挖掘深度 h 与活塞杆伸出速度 v_1 的关系为 (忽略液压缸安装点分别距固定臂和转动杆的尺寸)

$$h = c \sin \left[\cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - (l_0 + v_1 t)^2}{2ab} - \cos^{-1} \frac{a^2 + b^2 - l_0^2}{2ab} \right]$$

式中, $a=700\text{ mm}$, $b=260\text{ mm}$, $c=540\text{ mm}$, $l_0=600\text{ mm}$.

Adams 是一款虚拟样机分析软件, 在运动学领域应用极其广泛. 烟兜挖掘装置(简化)通过 Creo3.0 建模后导入 Adams 中, 如图 7 所示.

1) 定义液压缸缸筒在固定臂上的转动副以及活塞杆在转动杆上的转动副^[10], 定义固定臂与地面之间的移动副并创建驱动, 定义速度为 833 mm/s (即整机前进速度为 3 km/h), 同时定义液压缸缸筒与活塞杆之间移动副并创建驱动, 定义其活塞杆往复运动速度为 150 mm/s , 如图 8、图 9 所示.

2) Adams 仿真试验的目的是为了更加直观地观察挖掘铲的水平位移, 挖掘深度(竖直位移)与时间的关系. 在挖掘铲上创建其参考点, 在指定的前进速度下, 设置液压缸活塞杆不同的伸出速度进行运动仿真^[11]. 仿真结束后, 得到的结果如图 10、图 11 所示.



图 7 Adams 仿真模型

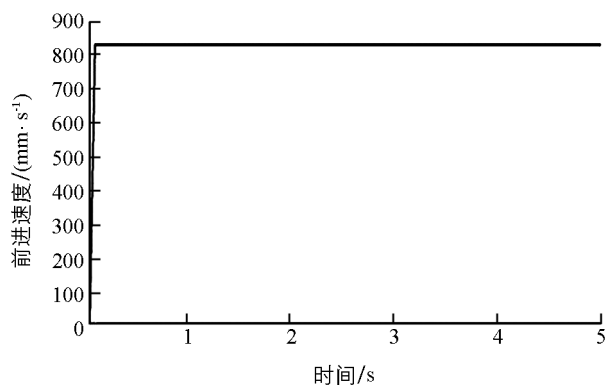


图 8 机构水平移动速度

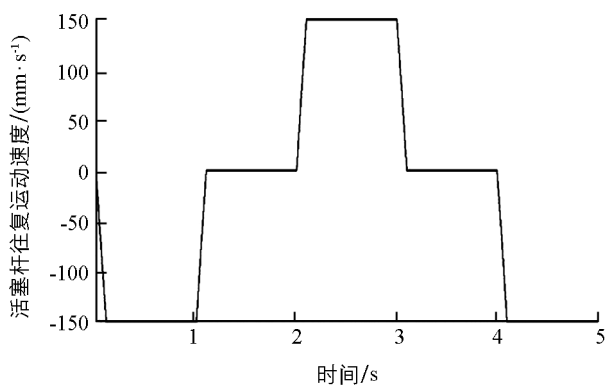


图 9 活塞杆往复运动速度

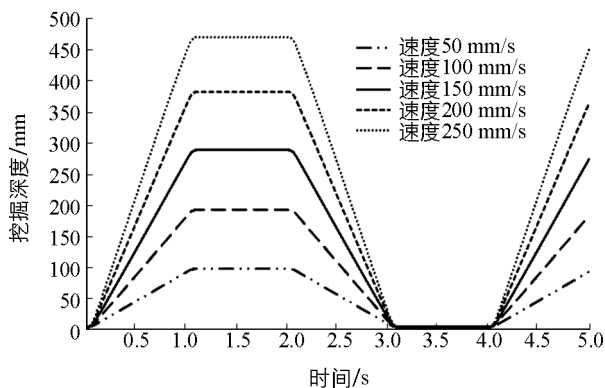


图 10 液压缸活塞杆伸出速度对挖掘深度的影响

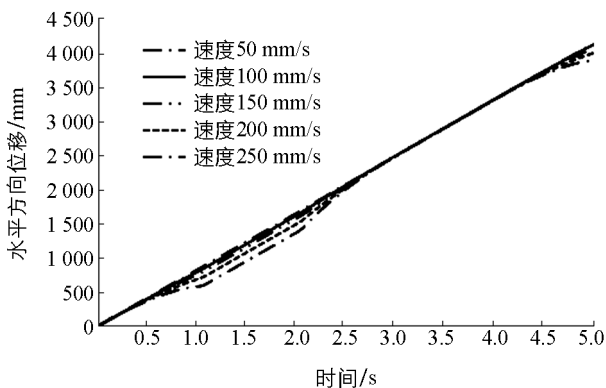


图 11 液压缸往复运动速度对水平位移量的影响

如图 10 所示, 在前进速度一定的条件下, 在同一个周期(挖掘一株烟兜的时间)内, 挖掘深度随液压缸活塞杆伸出速度的增大而增大. 如图 11 所示, 同理, 在 $0.5\sim 2.7\text{ s}$ 内有明显的差异, 主要是由挖掘铲不同转动速度在前进方向上的速度分量的不同造成, 但在一个周期内, 挖掘铲的水平位移量与液压缸活塞杆往复运动速度无明显关系.

4 性能试验

4.1 试验的目的及条件

为了进一步检验烟兜挖掘装置的性能, 按照上述设计的模型图及相关参数, 设计了一种烟兜挖掘装

置^[12],如图 12 所示. 试验地为重庆市北碚区缙云山西南大学烟草种植实践基地, 试验地区土壤质地为黄壤土, 土壤紧实度、土壤容重和土壤含水率分别为 87PSI、 0.99 g/cm^3 和 32%. 试验仪器主要包括微耕机(重庆鼎工 1WG6.3-110FC-Z, 已部分改装)、液压泵站(306 右旋油泵动力机: 额定压力 16 MPa, 工作转速 800~2 000 r/min, 油箱容积 3.5 L)、HSG40 液压缸(行程: 500 mm, 压力: 16 MPa)、ZS-L118E-YT 二联手动换向阀、4 根高压油管、皮尺(量程: 30 m)、卷尺(量程: 5 m)、秒表.



图 12 田间试验

4.2 试验方法

选取烟叶收获后的长 20 m、宽 15 m 的试验地块, 将液压泵站及烟兜挖掘机构安装在微耕机上, 利用秒表记录微耕机(液压泵不工作)前进 10 m 的时间, 2 次试验, 计算得出微耕机前进速度为 0.93 m/s. 同理, 利用卷尺和秒表测量出液压缸活塞杆伸出速度为 86 mm/s.

4.3 试验结果及分析

试验的目的主要是检验该装置能否达到仿真预测的深度. 表 1 为前进速度 0.93 m/s、往复运动速度 86 mm/s 时的 5 次挖掘试验田间结果, 田间试验结果同仿真预测值误差在 7%~12%内. 分析认为误差存在的原因: ① 田间土壤情况比较复杂, 如存在细铁丝、碎石块、碎秸秆等增大了挖掘阻力, 由于土壤一刀具间作用力比较复杂, 仿真中未考虑阻力等因素; ② 同仿真相比, 田间地表平整度对挖掘深度测量也产生了一定的影响. 总体而言, 田间试验实测结果与运动仿真结果基本一致.

表 1 田间试验结果

前进速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	活塞杆伸出速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	仿真值/mm	实测深度/mm	相对误差/%
0.93	86	167	186	11.4
			153	8.4
			180	7.8
			149	10.8
			184	10.2

5 结 论

本文以微耕机为动力平台(提供前进的动力), 结合液压系统设计了一种适用于丘陵山区的烟兜挖掘装置, 根据结构特点依照其运动机理进行了运动学理论分析和仿真分析, 结合液压缸活塞杆伸长量与伸出速度的关系($\Delta l = v_1 t$), 分析得出了在前进速度及伸出时间、保持时间、收回时间一定的情况下, 挖掘铲的挖掘深度(竖直位移)随液压缸活塞杆伸出速度的增大而增大, 挖掘铲的水平位移与活塞杆往复运动速度无明显关系. 为了验证理论、仿真分析的正确性和检验该装置挖掘性能, 进行了田间试验, 实测数据表明在前进速度为 0.93 m/s, 活塞杆往复运动速度为 86 mm/s 时, 挖掘深度范围为 149~186 mm, 与仿真预测结果相比, 误差在 7%~12%之内, 对比结果表明了运动学理论分析和仿真分析的正确性以及该烟兜挖掘装置能够满足烟兜挖掘要求.

参考文献:

- [1] 陈 芳, 田 平. 创新+精益: 工匠精神对烟草业的意义 [J]. 创造, 2015, 51(11): 73-75.
 [2] 赵雪君, 刘世超, 李 斌, 等. 四川烟区 CMV 和 PVY 株系分化研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3):

8-16.

- [3] 王 佳, 王亚峰, 蒲 颀, 等. 烟草感染两种病毒对烟蚜种群增长、寄主选择与传毒的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 23-27.
- [4] 李 华. 山地烤烟烟杆拔杆机的研制及其试验研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [5] 刘 帅, 黄 坤, 陈 乐, 等. 烟草根系分泌物及其化感作用研究进展 [J]. 亚热带农业研究, 2018, 14(1): 61-65.
- [6] 李晓红. 烟草连作危害及防治措施探讨 [J]. 园艺与种苗, 2013, 33(12): 55-58.
- [7] 赵帮泰, 曾祥平, 王 鹏, 等. 烟草拔杆机的研究与开发 [J]. 四川农业与农机, 2014 (3): 41-41.
- [8] 吕泉渠. 拆垄刨掘式拔烟杆机关键部件研究与样机设计 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [9] 李 洪, 张永明, 李 光, 等. 正铲液压挖掘机工作装置机构运动学仿真及优化 [J]. 矿山机械, 2014, 42(4): 34-35, 39.
- [10] 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(S1): 106-111.
- [11] 王申莹, 胡志超, 彭宝良, 等. 基于 ADAMS 的甜菜收获机自动对行探测机构仿真 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 62-67.
- [12] 顾峰玮, 胡志超, 吴惠昌, 等. 4LT-A 型错行作业挖掘甜菜联合收获机研制与试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 1-9.

Kinematic Analysis and Test of Tobacco Root Removal Equipment

DUAN Ting-yi, XIE Shou-yong, ZHANG Chang-chun, ZUO Ding-dong

School of Engineering & Technology, Southwest University/Chongqing Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity and low mechanization efficiency of root removal after tobacco harvest in hilly and mountainous areas, a tobacco root removal equipment was designed, combined with hydraulic circuit, in a study report in this paper. With tobacco root removal mechanism as the research object, the kinematic state space was established based on its structural characteristics. The movement state of the hoe-knife was analyzed theoretically, and it was concluded that the depth of entering into soil and the reciprocating linear velocity of the hydraulic cylinder had significant effects. The movement of the mechanism was analyzed with 3D modeling technology and virtual prototype simulation technology. It was verified that the depth of entering into soil increased with the increase in reciprocating linear velocity, and that there was no obvious relationship between reciprocating linear velocity and horizontal displacement. In order to verify the performance of the equipment, field experiments were carried out on the tobacco planting plot of Southwest University. The experiment data were compared with the simulation data, and the relative error was between 7% and 12%, which indicated that the equipment can basically meet the requirements of excavating performance.

Key words: tobacco root; hydraulic cylinder; kinematics; simulation; experiment

责任编辑 汤振金