

刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机设计与试验

马帅¹,徐丽明¹,许述财²,牛丛¹,闫成功¹,谭好超¹

(1. 中国农业大学工学院,北京 100083;2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室,北京 100084)

摘要:针对我国北方露地葡萄藤防寒土春季清除机械化作业清土不彻底、易伤藤和机具适应差等问题,设计了一种刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机。该机采用双翼式刮土板部件、刚性叶轮部件和柔性刷丝部件分别将葡萄藤的上方防寒土、侧边外围防寒土和根部附近防寒土一次性清除。对关键部件进行设计,搭建基于STM32F103的控制系统,实现双翼式刮土板部件的自动避障和机具的自动调平。调平性能试验表明,当调平机架向左倾斜到最大角度或向右倾斜到最大角度时,均能在1s内完成自动调平过程,且没有明显的超调量;当拖拉机行驶在不平整的葡萄行间时,即使拖拉机车身发生较大的倾斜变化,挂接在后侧机具上的清土部件仍能保持期望的水平状态($\pm 2^\circ$ 以内)进行作业;田间清土试验表明,各清土部件运行稳定,不存在相互作业干涉的情况,清土作业后的清土率约为81.96%,葡萄藤损伤率约为1.67%,满足我国北方露地葡萄藤防寒土清除作业要求。

关键词:农业机械化;葡萄藤防寒土;刮刷组合式;清土机

中图分类号:S224.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)01-0294-19

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20220298

Design and experiment of grapevine cold-proof soil cleaner with combined scraping and brushing

MA Shuai¹, XU Li-ming¹, XU Shu-cai², NIU Cong¹, YAN Cheng-gong¹, TAN Hao-chao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the problems of incomplete soil cleaning, easy damage to the grapevine and poor adaptation by mechanized soil cleaning in the open-field vineyards of northern China, a grapevine cold-proof soil cleaner with combined scraping and brushing is designed. The double-winged scraper components, rigid impeller components and flexible brush wire components are adopted, which can clean the cold-proof soil above the grapevine, the cold-proof soil on the side periphery and the cold-proof soil near the root of the grapevine at one time. The key components were design and a control system based on STM32F103 was built to realize automatic obstacle avoidance of scraper components and automatic leveling of the machine. Leveling performance tests showed that when the leveling frame was tilted to the left to the maximum angle or tilted to the right to the maximum angle, the automatic leveling process can

收稿日期:2022-03-23.

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-29).

作者简介:马帅(1993-),男,博士研究生.研究方向:生物生产自动化.E-mail:13637070719@163.com

通信作者:徐丽明(1969-),女,教授,博士.研究方向:生物生产自动化.E-mail:xlmoffice@126.com

be completed within 1 s, and there is no obvious overshooting. When the tractor was driven on uneven vineyards, the three soil cleaning components maintain the desired leveling angle at all times (within $\pm 2^\circ$), even if the tractor itself undergoes a large change in tilt. The field soil cleaning test showed that all the working components operated stably and there was no interference. After the soil cleaning operation, the soil cleaning rate was about 81.96%, and the grapevine damage rate was about 1.67%, which met the requirements of open-field grapevine cold-proof soil cleaning in northern China.

Key words: agricultural mechanization; grapevine cold-proof soil; combined scraping and brushing; soil cleaner

0 引言

葡萄藤冬季埋土防寒和春季清土是我国北方露地葡萄生产管理中特有的两项作业环节^[1-3],其中葡萄藤冬季埋土已基本实现机械化作业,春季清土目前主要还是依靠人工完成,其作业强度大、效率低、作业成本高^[4-7],机械化清土作业是解决此问题的关键,也是我国葡萄园未来发展的趋势。国外优质葡萄种植主产区主要集中在温带及亚热带地区,冬季气候温暖湿润,加之葡萄抗寒品种的栽培,冬季最低温不会对葡萄藤造成冻伤,葡萄藤可以常年绑在藤架上,不需要进行冬季埋土和春季清土作业,因此就没有相关的研究^[8]。国内关于葡萄藤防寒土清土机的研究,根据作业方式主要分为非接触式和接触式,非接触式清土机以风力气吹式作业为主,曾鉴^[9]和杜光雨^[10]均研制了一种风力吹送式清土机,机器作业时依靠高压风力将葡萄藤上的防寒土吹走,在避免对葡萄藤造成损伤的前提下,将防寒土清除;接触式清土主要通过机械部件的运动,与土壤直接接触,从而对土壤进行扰动清除。曾保宁等^[11]研制了一种双边刮板清土机,该机结构简单、成本低廉、操作方便、作业效率高;陈智等^[12]设计了一种与拖拉机配套使用的犁旋式清土机,通过叶片的旋转,将葡萄藤上的防寒土向行间清除;李法键^[13]研制了一种液压驱动型防寒土清除机,通过两个液压马达分别驱动左右两组橡胶叶片的旋转进行清土作业;刘芳建等^[14]研制了一种以搅龙为主要清土部件的葡萄藤扒土机,该机在作业过程中可自动避开水泥柱;王文斌^[15]研制了一种葡萄清土开沟机,该机采用螺旋旋耕的方式进行碎土与输土,可一次完成葡萄藤防寒土清除和开沟作业。

综合国内外研究成果可知,非接触式清土机作业效率较低,且存在严重的扬尘现象,对环境影

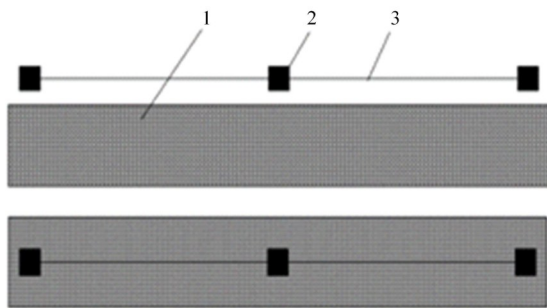
响较大,因此,目前仅处于试验阶段,未能进行推广;接触式清土机多以单一的清土作业部件为主,清土不彻底,需要多次作业才能完成葡萄藤防寒土的清除,并且多数为刚性部件,容易对葡萄藤产生损伤,同时,无法适应于地面不平整的葡萄行间作业。为此,本文设计一种刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机,分别通过其中刮土板部件、叶轮部件和柔性刷丝部件一次性将葡萄藤防寒土清除,并研究设计机具的自动调平系统,以提高机具的适应性、清土率和减少对葡萄藤的损伤率。

1 整机结构和工作原理

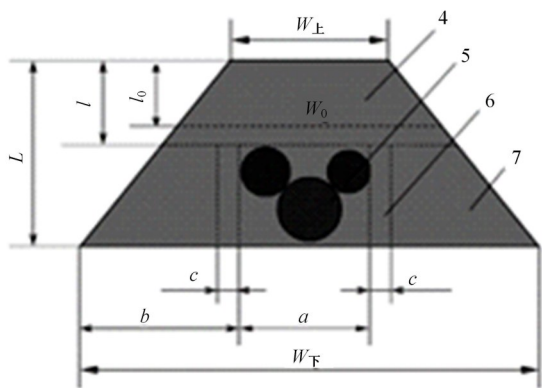
1.1 葡萄藤防寒土清除农艺要求

通过调研可知,我国北方优质葡萄产区的种植模式大部分以单臂篱架式为主,水泥柱和固定在其上的铁丝组成支撑葡萄生长的篱架,冬季埋土后,覆盖在葡萄藤上的土壤形成横截面近似于等腰梯形的土垄,水泥柱位于土垄的一侧或中间(见图1(a))。由于各葡萄园内土壤质地和冬季埋土方式不同,故埋土尺寸存在差异^[16],一般冬季葡萄藤埋土后形成的土垄上底宽约为300~400 mm、下底宽约为800~1100 mm、总高度约为300~350 mm,葡萄藤上方埋土厚度约为120~180 mm。本文以北京市房山区波龙堡酒业有限公司葡萄园内沙壤土质地的葡萄藤防寒土为例,测量确定防寒土土垄横截面上底宽 W_+ 约为300 mm、下底宽 W_- 约为800 mm,埋土总高度 L 约为330 mm,葡萄藤上方埋土厚度 l 约为150 mm,压倒的葡萄藤宽度 a 约为250 mm,高度约为180 mm(见图1(b)),水泥柱位于土垄中间。春季清土作业时,需要在减少甚至避免损伤葡萄藤的前提下,将防寒土清除干净。为此,本文提出一种“分区清除”的作业方法,即一次性采用不同的清土部件依次将葡萄藤的上方防寒土、侧边外围防寒土和根部附近防寒

土分别清除,葡萄藤根部附近防寒土的清除采用柔性清土部件,以避免对葡萄藤产生损伤。提出的“分区清除”作业方法和土垄尺寸,可为后续土垄离散元模型的构建和清土部件的结构设计提供理论依据。



(a)北方露地葡萄种植模式



(b)葡萄藤防寒土土垄横截面

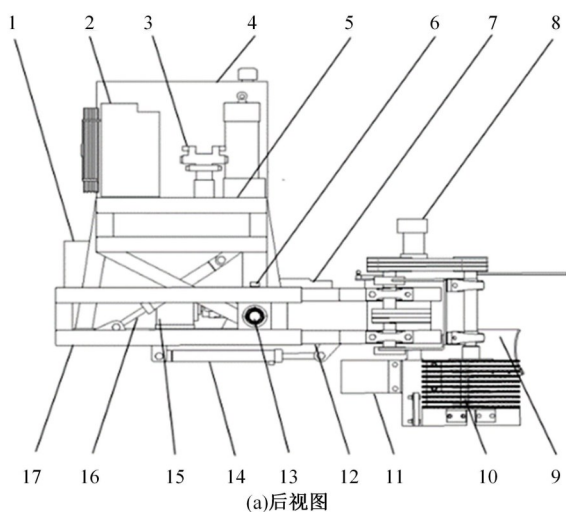
1-防寒土土垄;2-水泥柱;3-铁丝;4-葡萄藤上方防寒土;5-葡萄藤;6-葡萄藤根部附近防寒土;7-葡萄藤侧边外围防寒土

图1 葡萄藤防寒土土垄示意图

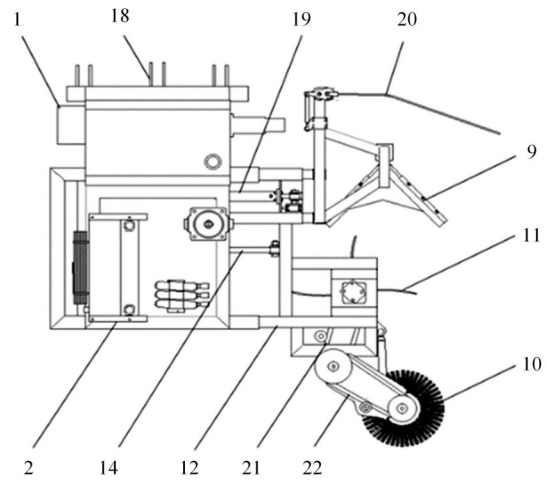
Fig. 1 Diagram of grapevine cold-proof soil ridge

1.2 整机结构

为提高作业效率,结合葡萄藤防寒土的“分区清除”作业方法,设计刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机,整机结构如图2所示,主要由机架、刮土板



(a)后视图



(b)俯视图

1-控制柜;2-风冷却器;3-液压阀组;4-油箱;5-主机架;6-倾角传感器;7-液压泵;8-液压马达;9-刮土板部件;10-刷子部件;11-叶轮部件;12-幅宽伸缩机架;13-旋转轴;14-幅宽调节油缸;15-齿轮箱;16-调平油缸;17-调平机架;18-三点悬挂;19-避障油缸;20-触杆;21-一级皮带传动;22-二级皮带传动

图2 刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机结构简图

Fig. 2 Structure diagram of the grapevine soil cleaner with combined scraping and brushing

部件、叶轮部件、柔性刷子部件、液压系统和控制系统等构成,主要技术参数如表1所示。

表1 葡萄藤防寒土清土机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of grapevine cleaner

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	2000×1830×1680
整机质量/kg	650
配套动力/kW	≥40
适应行距/m	3~4
清土高度/mm	≤350
输入转速/(r·min ⁻¹)	540
作业速度/(km·h ⁻¹)	1.2~1.5

1.3 工作原理

清土作业前,通过拖拉机后置三点悬挂装置挂接刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机,通过十字万向节传动轴将拖拉机后侧PTO与机具上齿轮箱连接,为液压系统提供动力输入;根据葡萄园种植行距,通过幅宽调节油缸调节机具的作业幅宽。清土作业时,随着机具的前进,先由刮土板部件伸入水泥柱间将葡萄藤的上方防寒土清除,再由叶轮部件将葡萄藤的侧边外围防寒土清除,最后由柔性刷子部件将葡萄藤的根部附近防寒土清除。其中,叶轮部件的旋转动力由液压马达提供,通过两级皮带传动,将液压马达的动力传给柔性刷子

部件。在作业过程中碰到水泥柱时,刮土板部件可通过避障装置顺利自动避开;当在行间不平整的葡萄园内清土作业时,自动调平系统可保证即使拖拉机发生左右倾斜,后侧挂接的清土部件依然能保持水平状态正常作业,自动调平系统中以倾角传感器作为检测元件。

2 关键部件设计

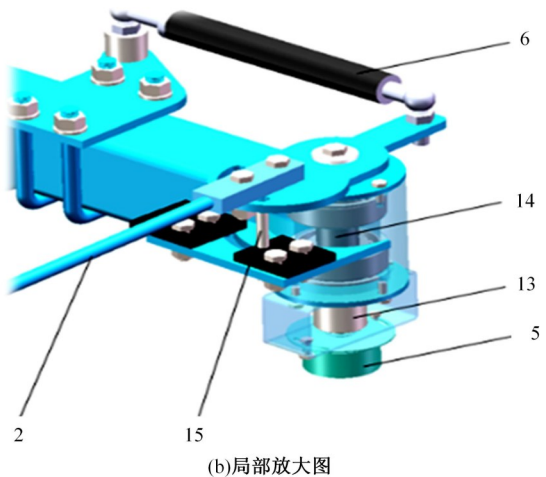
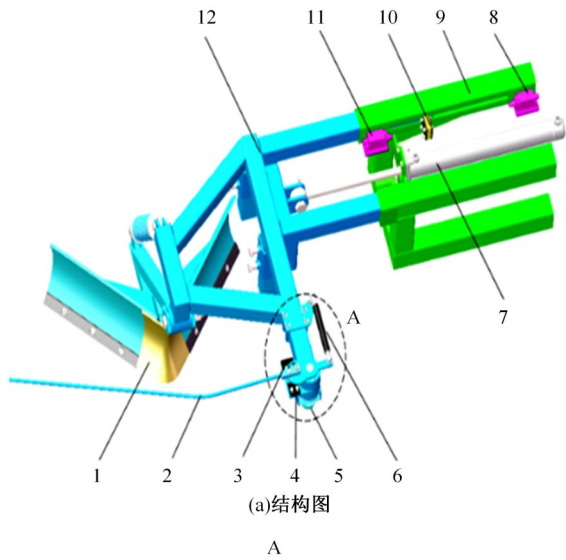
2.1 刮土板部件

刮土板部件主要包括刮土板和自动避障装置两个部分,如图 3 所示,刮土板采用双翼式结构,自动避障装置主要由安装机架、伸缩机架、触杆、

角度传感器、气弹簧、限位装置、避障油缸、行程开关和触碰块等组成。角度传感器作为自动避障感知部件,与触杆同步转动,转动后的触杆通过气弹簧复位。限位装置保证触杆在一定范围内转动,防止转动范围过大而损害气弹簧。前后行程开关用于检测避障油缸完全伸出和完全缩回时的位置。刮土板固定在安装架上,可上下调节其作业高度。

双翼式刮土板用于清除葡萄藤的上方防寒土,如图 4 所示,其结构参数取决于需要清除的土垄尺寸。如图 1(b)所示,葡萄藤的上方防寒土高度 l 为 150 mm,为避免刮土板在清土作业过程中刮伤土壤中的葡萄藤,设定其清除葡萄藤的上方防寒土土垄的高度 l_0 为 120 mm,通过计算,可得对应的土垄宽度 W_0 约为 482 mm,由此双翼式刮土板的总宽度 W 和总高度 H 应满足:

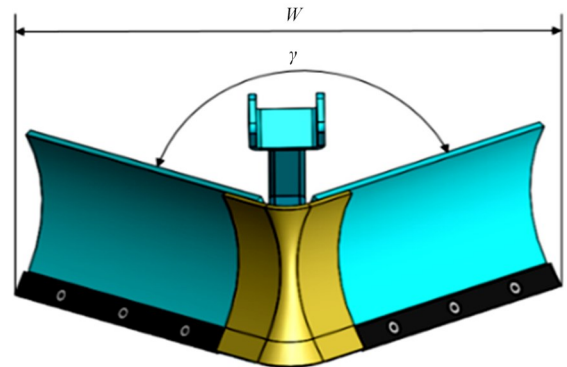
$$W > W_0 \tag{1}$$



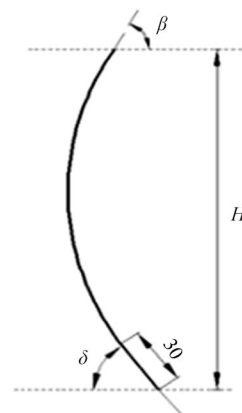
1-双翼式刮土板;2-触杆;3-后限位挡块;4-前限位挡块;5-角度传感器;6-气弹簧;7-避障油缸;8-后侧行程开关;9-固定机架;10-触碰块;11-前侧行程开关;12-连接机架;13-安装机架;14-联轴器;15-旋转轴;16-限位杆

图 3 刮土板部件整体结构简图

Fig. 3 Overall structure diagram of soil scraper components



(a)刮土板结构图



(b)剖面准线示意图

图 4 双翼式刮土板结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of double-winged scraper

$$H > l_0 \quad (2)$$

同时考虑其他地区葡萄园内葡萄藤防寒土土垄的不同清除尺寸,设计双翼式刮土板的总高 W 为 600 mm,总高 H 为 200 mm。双翼式刮土板的前翻角 β 是刮土板顶端曲面准线上沿切线与水平面的夹角,它主要影响在刮土作业过程中土壤在刮土板曲面上向侧面滑动的情况,依据刮土板本身结构,设计 β 为 60° 。入土角 δ 是刮土板底端触土曲面切线与水平面间的夹角,是影响作业阻力大小的重要因素之一;翼张角 γ 是刮土板两翼之间的夹角,是影响作业阻力大小和被清除土壤流动性好坏的重要因素之一,且 γ 的大小与单边刮土板的长度成反比。为减少刮土板的作业阻力,同时增大被清除土壤的流动性,经前期优化设计^[17],双翼式刮土板的曲面轮廓准线选用圆弧, δ 和 γ 分别设计为 60° 和 86° 。

2.2 叶轮部件

参考撒肥装置^[18-20]中常用的叶轮片,设计一种新型分层交错式弧形叶轮清土部件,主要由花键连接轴套、叶轮轴、叶轮片连接板和弧形叶轮片等组成,如图 5 所示,采用分层交错式结构,即分为上下两层,以十字交叉形式排布,两层弧形叶轮片和叶轮片连接板的结构和参数相同。

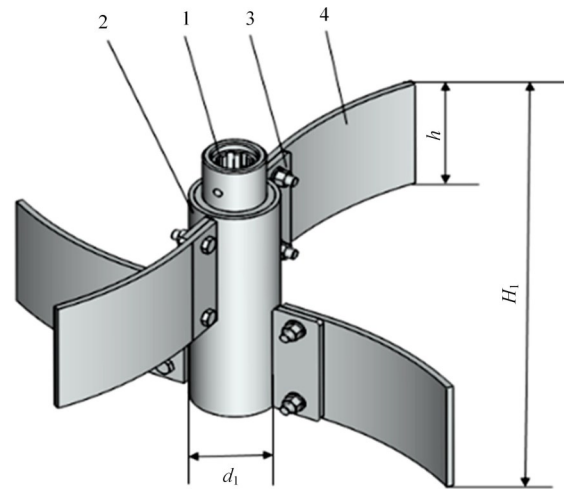
分层交错式弧形叶轮部件用于清除葡萄藤的侧边外围防寒土,其结构参数依据图 1(b)中葡萄藤侧边防寒土土垄的尺寸确定。由于叶轮部件为刚性部件,故为了防止叶轮部件在作业时碰伤葡萄藤,土垄两侧各预留了一定的安全距离 c ,因此,叶轮部件中单个叶轮片的长度 l_2 和部件总高 H_1 应满足:

$$l_2 > b - c \quad (3)$$

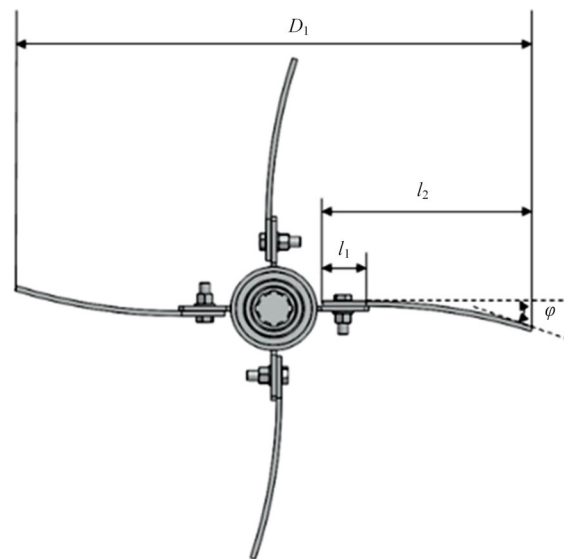
$$H_1 > L - l_0 \quad (4)$$

式中: b 为葡萄藤的侧边防寒土土垄的宽度,mm; c 为叶轮部件清土的位置与葡萄藤间的距离,mm; L 为葡萄藤防寒土土垄的总高度,mm; l_0 为葡萄藤的上方防寒土被双翼式刮土板清除的厚度,mm。

由此设计叶轮部件中单个叶轮片的长度 l_2 为 250 mm,叶轮部件总高度 H_1 为 300 mm。单个叶轮片由直线段和圆弧段组成,其中直线段长度 l_1 设计为 50 mm,用于打孔与叶轮片连接板固定连接。叶轮部件中叶轮轴的直径 d_1 设计为 100 mm,由此可计算,单个叶轮片的高度 h 和叶轮部件回



(a)轴侧图



(b)俯视图

1-花键连接轴套;2-叶轮轴;3-叶轮片连接板;4-弧形叶轮片

图 5 叶轮部件结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of impeller components

转直径 D_1 分别为:

$$h = H_1/2 \quad (5)$$

$$D_1 = d_1 + 2l_2 \quad (6)$$

由式(5)和(6)可知,单个叶轮片的高度 h 为 150 mm,叶轮部件的回转直径 D_1 为 600 mm。此外,为了实现减少功耗的目的,需使清除的土壤颗粒尽早地离开叶轮部件,因此,设计叶轮片圆弧段的弯曲方向与叶轮部件的旋转方向相反,叶轮片的弯曲角 φ 决定土壤颗粒离开叶轮片瞬间的角度和速度^[21,22],由仿真优化设计可知^[23],叶轮片的弯曲角 φ 设计为 18° 。

2.3 柔性刷丝部件

针对葡萄藤根部附近防寒土的清除,设计一种以尼龙丝刷片为主体的柔性刷丝部件。经过田间初步试验可知,由于土垄底部土壤紧实度较大,清土作业时不仅要清除土垄底部的土壤,而且要将大量刷落在地面上的防寒土扫向行间,故柔性刷丝部件底部材料的磨损和变形比上层和中层严重,因此,选用耐磨性相对较好的夹线橡胶作为柔性刷丝部件的底部材料,整体设计的结构如图 6 所示。为了防止夹线橡胶发生变形时,与两侧固定钢板的内部接触位置的棱角处产生应力集中现象,从而损伤或折断夹线橡胶,故对固定钢板下侧内边缘位置进行圆角处理。依据柔性刷丝部件需要清除的葡萄藤防寒土土垄的尺寸,设计其回转直径 D_2 为 400 mm,总高度与叶轮部件的总高度保持一致,其中尼龙丝刷片部分的高度 H_s 设计为 220 mm,夹线橡胶的高度 H_r 设计为 80 mm,厚度 t 为 8 mm。

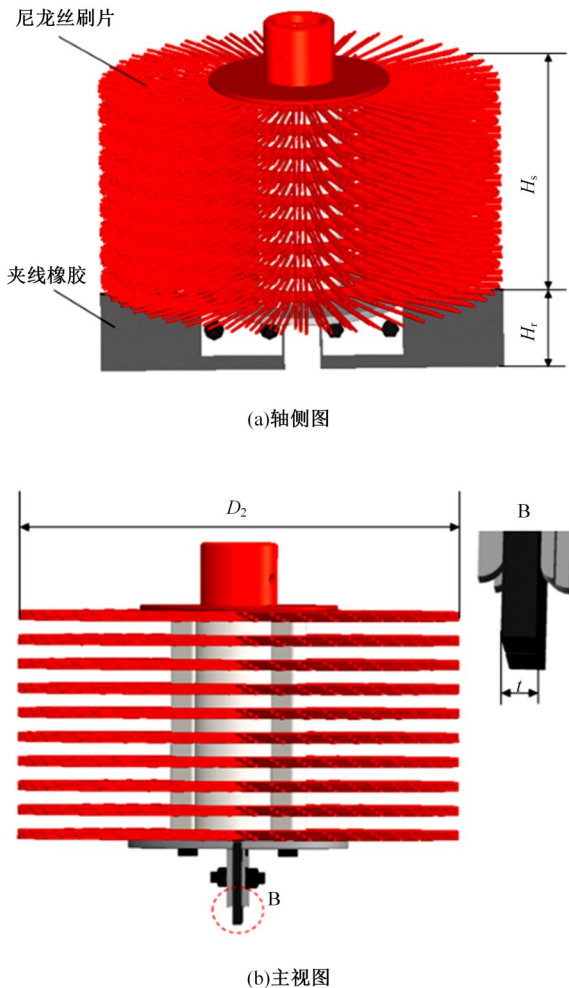


图 6 柔性刷丝部件结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of flexible brush wire components

2.4 自动调平机构

自动调平机构主要是通过主机架与调平机架的铰接,并由调平油缸的伸缩来改变两者之间的夹角,以保证即使当拖拉机发生了倾斜,挂接在后侧的清土部件依然能保持水平状态正常作业。其中,调平油缸是自动调平机构的关键执行部件,其缸径和行程是设计时需要考虑的 2 个关键结构参数,行程由自动调平的极限角决定,缸径根据负载确定^[24],因此需对自动调平机构进行运动学和动力学分析。

2.4.1 运动学分析

图 7 为自动调平机构的运动简图,其中: O_1 为调平油缸上端铰接点; O_2 为调平油缸下端铰接点; O_3 为主机架与调平机架铰接点; O_2O_3 为调平机架处于水平状态; $O_2'O_3$ 为调平机架向右倾斜到最大角度; $O_2''O_3$ 为调平机架向左倾斜到最大角度; l_3 为 O_2 点到 O_3 点的距离,mm; l_4 为 O_1 点到 O_2 点的距离,mm; L_{min} 为调平油缸完全缩回的长度,mm; L_{max} 为调平油缸完全伸出的长度,mm; θ 为调平机架的倾斜角, $^{\circ}$; ρ 为 O_1O_3 和 $O_2'O_3$ 之间的夹角, $^{\circ}$ 。根据结构设计可知,当调平机架处于水平状态时,调平油缸伸出其行程的一半,当调平油缸完全缩回时,调平机架向右倾斜到最大角度,反之,调平机架向左倾斜到最大角度。由调研可知,拖拉机在不平整的葡萄园行间清土作业时,其倾斜角度一般不超过 20° ,故本文设定自动调平机构的调平极限倾角 θ 为 20° 。

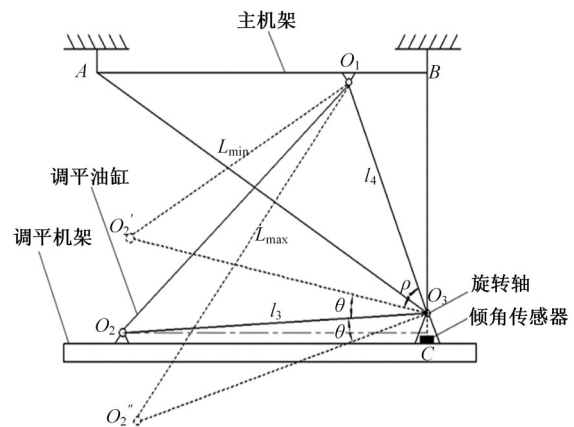


图 7 自动调平机构运动简图

Fig. 7 Motion diagram of automatic leveling mechanism

由图 7 中的结构几何关系,可得:

$$L_{min}^2 = l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos \rho \quad (7)$$

$$L_{max}^2 = l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos(\rho + 2\theta) \quad (8)$$

$$\rho = \pi - \angle O_1O_3B - \theta - \angle O_2O_3C \quad (9)$$

$$\angle O_1O_3B = \sin^{-1} \frac{O_1B}{l_4} \quad (10)$$

$$\angle O_2O_3C = \sin^{-1} \frac{O_2C}{l_3} \quad (11)$$

将式(9)~(11)分别代入式(7)和(8)可得:

$$L_{\min} = \sqrt{l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\pi - \sin^{-1} \frac{O_1B}{l_4} - \theta - \sin^{-1} \frac{O_2C}{l_3}\right)} \quad (12)$$

$$L_{\max} = \sqrt{l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos\left(\pi - \sin^{-1} \frac{O_1B}{l_4} + \theta - \sin^{-1} \frac{O_2C}{l_3}\right)} \quad (13)$$

由式(14)可求得调平油缸的行程 L_s :

$$L_s = L_{\max} - L_{\min} \quad (14)$$

式中: l_3 、 l_4 、 O_1B 、 O_2C 均为结构设计尺寸, 即 $l_3 = 571$ mm, $l_4 = 290$ mm, $O_1B = 136$ mm 和 $O_2C = 568$ mm, 由于自动调平机构具有唯一确定的运动, 故调平极限倾角 θ 是影响调平油缸行程的主要参数, 将 $\theta = 20^\circ$ 代入公式求得 $L_s = 197.16$ mm, 圆整取调平油缸的行程为 200 mm。

2.4.2 动力学分析

研究设计的刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机为偏置式作业, 所有的清土部件及附加的辅助部件将设计安装在调平机架的右侧。为了适应不同的葡萄园行距, 增加了机具的幅宽调节功能, 故所有的清土部件及附加的辅助部件在调平机架的承载下, 不仅可以与主机架间相互转动, 而且也可以在水平方向上进行左右伸缩。当所有能移动的部件位于调平机架的最右侧, 且处于水平状态时, 机具的整体重心位于最右侧此时调平液压油缸受力最大, 对应的自动调平机构受力简图如图 8 所示。以调平机架和所有的清土部件以及附加的辅助部

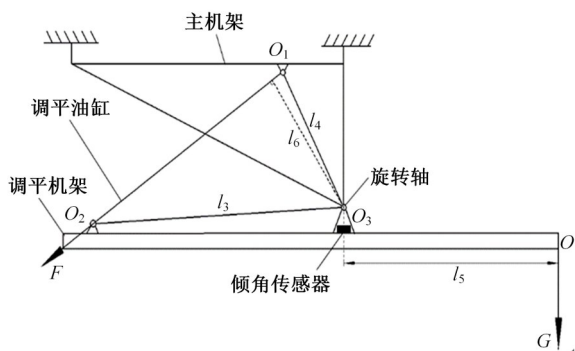


图 8 自动调平机构受力示意图

Fig. 8 Force diagram of automatic leveling mechanism

件整体为研究目标, 根据受力分析, 可求得调平液压油缸受到的最大作用力 F 为:

$$F = G l_5 / l_6 \quad (15)$$

式中: G 为作业部件的总重量, N; l_5 为作业部件重心所在位置 O 到旋转轴所在位置 O_3 的水平距离, mm; l_6 为旋转轴所在位置 O_3 到调平油缸的垂直距离, mm。

在 SolidWorks 中对设计的刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机进行建模, 通过质量属性模块获取调平机架、所有清土部件和附加辅助部件的总重量 G , 约为 3150 N, 部件中心 O 距旋转轴所在位置 O_3 的水平距离 l_5 约为 487 mm。在 $\triangle O_1O_2O_3$ 中, 通过面积公式计算旋转轴所在位置 O_3 到调平油缸的垂直距离 l_6 为 291 mm。将已知数据代入式(15), 得到调平液压油缸所受的最大作用力 F 约为 5272 N。根据液压手册^[25], 选取缸径为 40 mm, 活塞杆直径为 25 mm, 活塞杆仅受拉压作用, 推力为 20 100 N、拉力为 12 270 N 的 HSG 型工程液压缸足够满足负载使用要求。

3 控制系统设计

控制系统包括双翼式刮土板的自动避障系统和机具的自动调平系统, 其中自动调平系统应用于清土机在行间不平整的葡萄园内作业, 当清土作业时, 自动调平系统一直处于响应工作状态, 而自动避障系统仅仅当刮土板遇到水泥柱时, 才发生响应。为保证机具自动调平的作业效率, 本文采用一种“确定调平角度”的方法^[26], 即首先在单片机中提前设定期望的调平角度, 然后将倾角传感器获得的数据实时传回单片机中与期望值比较, 单片机将根据比较差值的大小发送相应的控制信号给比例换向阀, 从而控制自动调平液压油缸的伸缩, 使调平机架调整到期望的调平角度, 从而形成了一个闭环反馈控制, 在此选用算法简单、鲁棒性好和适用性广的 PID 控制算法, 控制器的输入量为期望调平角度与倾角传感器测得的倾角间的偏差信号, 输出量为控制比例换向阀开口方向和开口大小的电流信号, 控制原理如图 9 所示。

3.1 控制系统硬件设计

控制系统主要包括电源模块、避障模块和自动调平模块, 其硬件组成如图 10(a) 所示, 整体采用 STM32F103 系列单片机为核心元件, 由拖拉机上 12 V 蓄电池经降压模块(12 V 转 5 V)为其

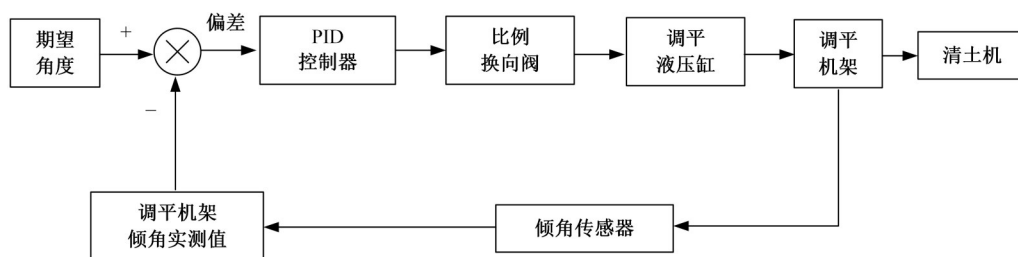
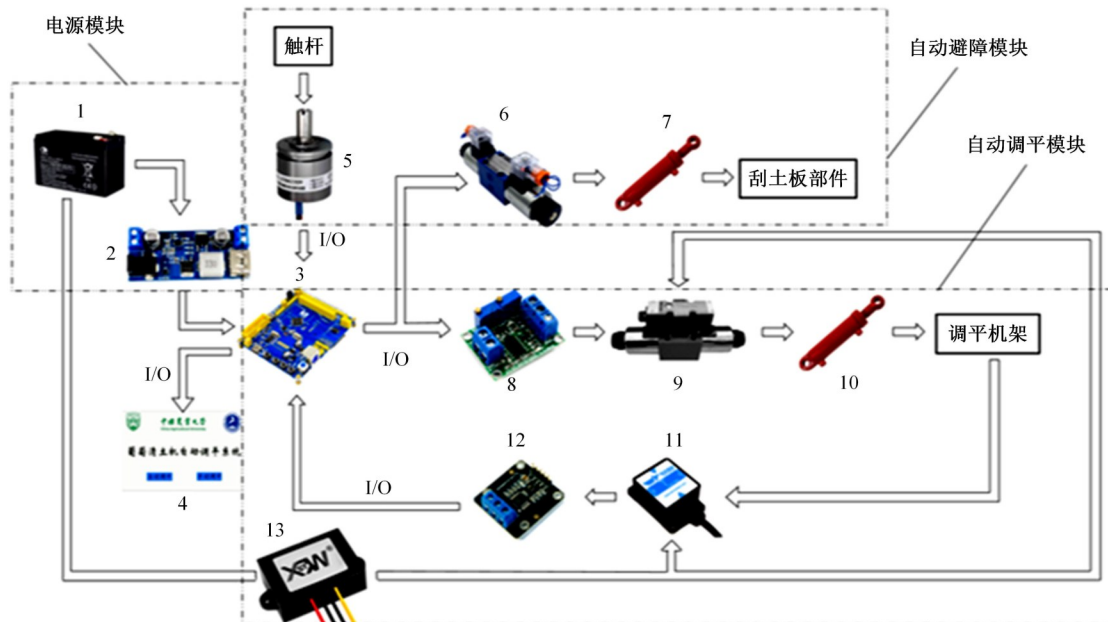
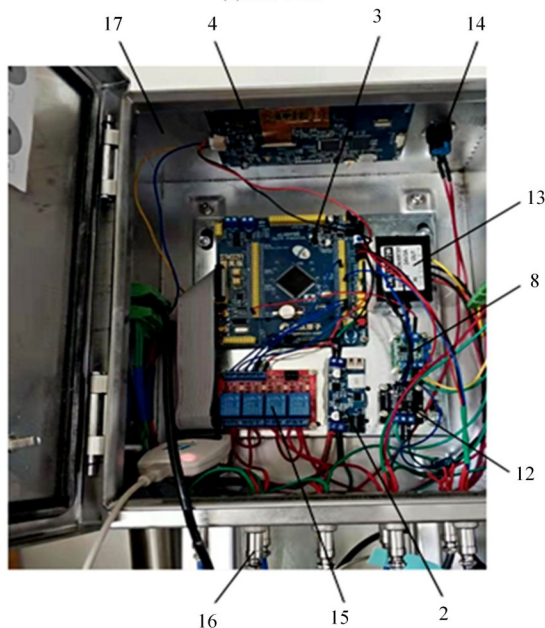


图 9 自动调平控制系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of automatic leveling control system



(a) 硬件组成



(b) 实物图

1-蓄电池(12 V);2-降压模块(12 V 转 5 V);3-STM32F103 单片机;4-显示屏;5-转角传感器;6-电磁换向阀;7-避障油缸;8-电压转电流模块;9-比例换向阀;10-调平油缸;11-倾角传感器;12-RS232 转 TTL 串口;13-升压模块(12 V 转 24 V);14-电源开关;15-继电器模块;16-航空插头;17-控制柜

图 10 控制系统硬件组成

Fig. 10 Control system hardware composition

供电。单片机通过 I/O 口采集触杆转动时所带动的 GT 角度传感器(供电电压:5 V,量程:0°~90°,输出:0~5 V,精密度:0.15%)转动的角度值,根据采集数据结果判断是否给电磁换向阀发出控制信号,从而控制避障油缸的伸缩。由增压模块(12 V 转 24 V)为比例换向阀和倾角传感器供电,由于比例换向阀采用 4~20 mA 电流输入控制模式,故通过电压转电流模块将单片机控制信号发送给比例换向阀,以控制其阀芯的移动方向和开口大小,从而对自动调平油缸进行控制;倾角传感器选用深圳维特智能科技有限公司的 SINVT-232 型高精度电压型,该倾角传感器采用 MEMS 高精度模块,集成卡尔曼滤波算法,可实现高动态下双轴稳定倾角输出。同时,支持 RS-232 串口输出和 0~5 V 模拟量输出,角度测量范围为 -90°~90°,供电电压为 9~36 V DC,测量分辨率为 0.01°,响应时间为 0.01 s,防水等级为 IP67,工作温度为 -40~85 °C,满足机具田间作业需求。依据倾角传感器的串口输出模式,使用 RS232 转 TTL 串口模块将其与单片机进行通信。此外,单

片机通过 TTL 串口外接一个显示屏,实时显示倾角传感器获得的数据,并且可以通过显示屏上的按钮实现自动调平和手动调平模式的切换,在田间转向或者停止作业时切换到手动调平模式。将所有的硬件整合安装在一个控制柜中,如图 10(b)所示,控制柜内的电源线和所有信号线均通过航空插座外接,在保证安全的同时,方便拆卸。

3.2 控制系统软件设计

控制系统程序采用 C 语言在 Keil uVision5 开发环境中编写,自动避障程序中,提前设定角度传感器触发控制信号的转动角度阈值,当角度传感器转动的角度超过该阈值时,单片机发出控制信号进行避障油缸伸缩的控制。同理,设定期望的调平角度,由于田间作业环境较为复杂,若将调平角度设置为 0°,将会导致调平油缸的频繁调节,由此会减低液压系统的使用寿命,因此,本文设置期望的调平角度为 ±2° 以内。以拖拉机的前进方向为基准,当调平机架向左倾斜时,倾角传感器获得的数据为负值;反之,倾角传感器获得的数据为正值。控制系统的整体工作流程图如图 11 所示。

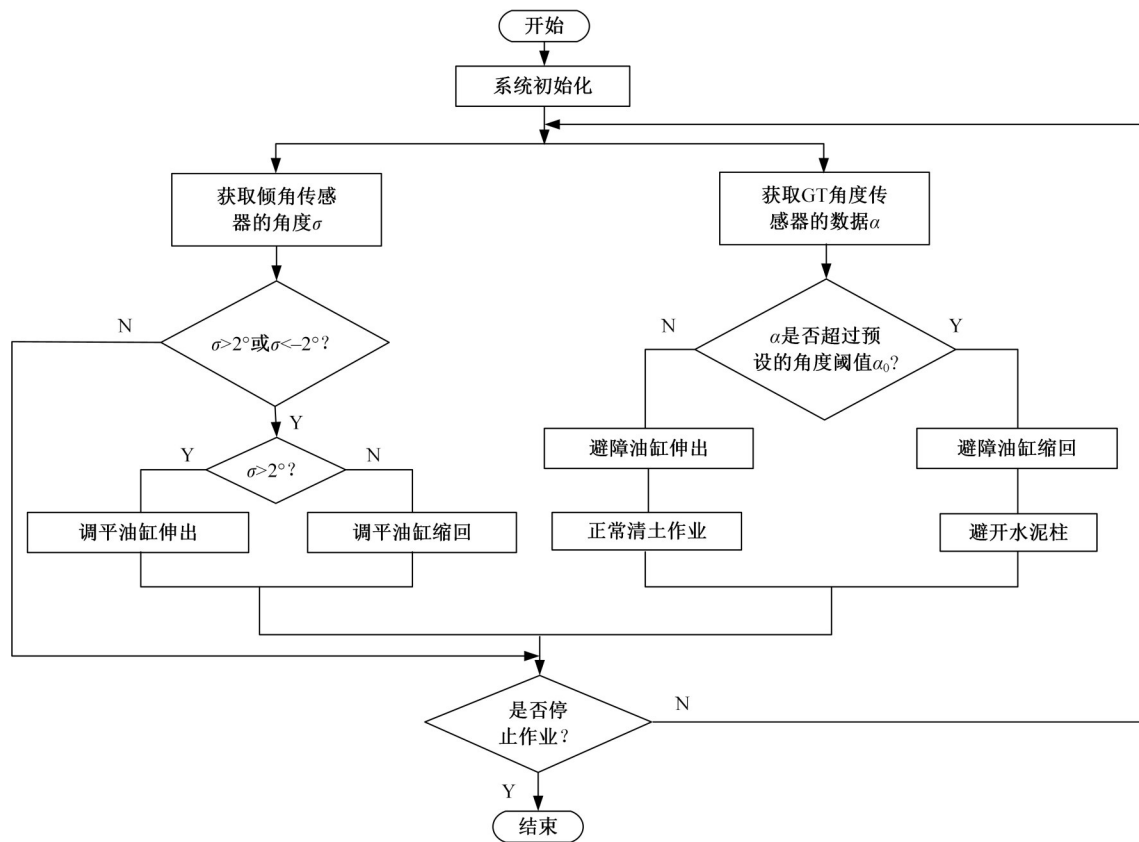


图 11 系统控制流程图

Fig. 11 System control flow chart

4 仿真实验

4.1 自动避障仿真实验

4.1.1 实验目的

双翼式刮土板是否能够顺利完成自动避障与其前进速度、避障油缸作业速度和触杆转动角度阈值等因素有关,本研究利用多体动力学软件 Recurdyn 对双翼式刮土板的自动避障过程进行仿真实验,分析各因素对自动避障效果的影响,进而优化最优的作业参数组合。

4.1.2 仿真建模与分析

首先,在 SolidWorks 中对双翼式刮土板自动避障装置进行简化,然后,将其保存为 .x_t 格式导入 Recurdyn 中,根据机构的实际运动情况,为各个部件间添加固定副、移动副、转动副和接触等约束条件^[27,28]。建立横截面为 100 mm × 100 mm 的正方形的长方体模拟水泥柱,两根水泥柱间距 L_w 为 3 m。为使触杆避开水泥柱后自动复位,在触杆旋转中心位置处添加复位弹簧;在固定机架与地面间的移动副上添加驱动,以模拟前进速度。采用 Recurdyn 中自带的 IF 函数设定避障油缸的作业速度 v_2 和触杆转动角度阈值^[29]。最终建立的仿真作业模型如图 12(a) 所示。

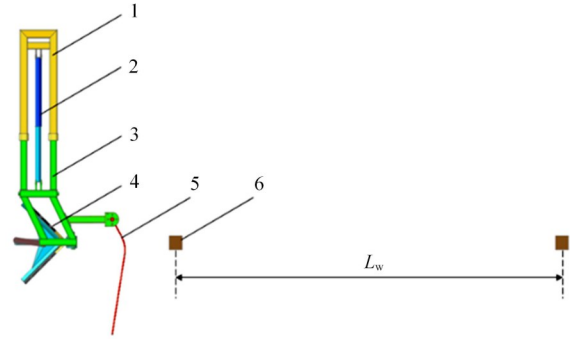
$$v_2 = \text{IF}(\alpha - \alpha_0: v_2, v_2, -v_2) + \text{IF}(L_d - 940: 0, 0, -v_2) + \text{IF}(L_d - 590: v_2, v_2, 0) \quad (16)$$

式中: v_2 为避障油缸的作业速度, mm/s; α 为角度传感器的实时获取值, ($^\circ$); α_0 为触杆转动的角度阈值, ($^\circ$); L_d 为避障油缸前后连接点的间距, mm。

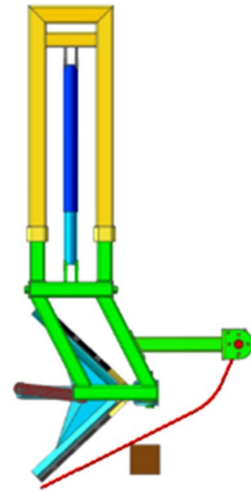
作业时,双翼式刮土板部件靠近水泥柱的一侧前进,以某一常规工况进行仿真实验,即在 Recurdyn 中设置前进速度为 0.35 m/s,避障油缸作业速度为 180 mm/s,触杆转动角度阈值为 7.5° ,双翼式刮土板在前进过程中,避开水泥柱时的状态如图 12(b) 所示。

4.1.3 仿真评价指标

为评价自动避障作业效果,在刮土板末尾的两侧端点各建立一个 Marker 点,通过观察外侧 Marker 点的运动轨迹可以判断出刮土板能否顺利完成避障,观察内侧 Marker 点的运动轨迹并配合外侧的 Marker 点可以看出刮土板的整体作业路径,自动避障仿真作业结束后,刮土板的运动轨迹如图 13 所示。定义刮土板完全伸入任意相邻的两个水泥柱间正常作业时的长度,与水泥柱间距的比值为有效作业率 E ,并以有效作业率 E 作为避障评



(a) 仿真模型



(b) 自动避障过程

1-固定机架;2-避障油缸;3-伸缩机架;4-双翼式刮土板;5-触杆;6-水泥柱

图 12 双翼式刮土板自动避障仿真作业

Fig. 12 Automatic obstacle avoidance simulation operation of double-winged scraper components

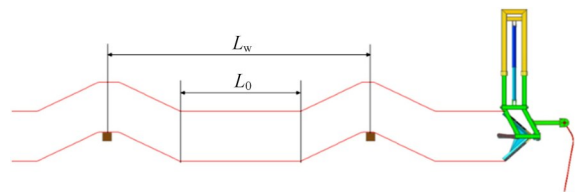


图 13 刮土板部件自动避障运动轨迹

Fig. 13 Automatic obstacle avoidance motion trajectory of scraper components

价指标,在顺利完成避障的情况下, E 值越大,表明避障效果越好。有效作业率 E 的计算公式为:

$$E = \frac{L_0}{L_w} \times 100\% \quad (17)$$

式中: L_0 为刮土板完全伸入相邻两根水泥柱间的作业长度, m; L_w 为相邻两根水泥柱间的距离, $L_w = 3$ m。

4.1.4 仿真优化实验

经仿真预实验可知,当前进速度大于 0.4 m/s、

避障油缸作业速度小于 160 mm/s 时,双翼式刮土板在前进作业过程中会碰到水泥柱,无法顺利完成避障,但为了保证作业效率,设置前进速度不低于 0.3 m/s。对于避障油缸的作业速度,若速度过快,不仅需要较大的液压输出流量,同时也不能保证油缸工作的安全性,故避障油缸的作业速度不宜高于 200 mm/s。此外,设定触杆转动角度阈值范围为 5°~10°。综上,以前进速度 v_1 、油缸作业速度 v_2 和触杆转动角度阈值 α_0 为试验因素,以双翼式刮土板有效作业率 E 为试验指标,结合仿真预实验确定的各试验因素参数范围的基础上,采用 3 因素二次回归正交旋转中心组合模拟实验,依据实验设计原则,确定编码系数 γ 为 1.682,实验因素编码结果如表 2 所示。共进行 20 组实验,零水平实验重复 6 次,实验方案与结果如表 3 所示。

表 2 试验因素编码
Table 2 Test factor codes

编码	前进速度 v_2 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	油缸作业速度 v_3 / ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	角度阈值 α_0 / ($^\circ$)
-1.682	0.30	160	5
-1	0.32	168	6
0	0.35	180	7.5
1	0.38	192	9
1.682	0.40	200	10

采用 Design-expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析,回归模型的显著性检验结果如表 4 所示,从中可知,回归模型的 P 值小于 0.001,而失拟项的 P 值大于 0.05,说明回归模型极其显著且失拟不显著,回归有效。在 3 个实验因素中, X_1 、 X_2 、 X_3 项的系数均达到显著性水平, X_1 和 X_2 项对实验指标影响极显著, X_3 项影响显著;交互项因素和二次方项因素对实验指标影响均不显著。将不显著项删除后得到双翼式刮土板有效作业率 E 的回归方程如下:

$$E = 45.94 - 70.61X_1 + 0.14X_2 + 0.21X_3 \quad (18)$$

为得到双翼式刮土板的理想作业参数组合,对实验因素进行优化设计,利用 Design-expert 8.0.6 软件中的 Optimization-Numerical 模块对回归模型进行寻优,以刮土板有效作业率最大为寻优目标,得到 3 个实验因素参数的优化结果为: $v_1=0.30 \text{ m/s}$ 、 $v_2=193 \text{ mm/s}$ 和 $\alpha_0=10^\circ$,对应的最佳有效作业率理论值为 52.95%。根据所优化的作业参数组合再次进行仿真验证实验,其有效作

表 3 仿真实验方案与结果

Table 3 Simulation test scheme and results

序号	前进速度编 码值 X_1	油缸作业速度 编码值 X_2	角度阈值编 码值 X_3	有效作业率 $E/\%$
1	1	1	1	47.33
2	1	1	-1	46.67
3	1	-1	1	43.33
4	1	-1	-1	42.93
5	-1	1	1	51.07
6	-1	1	-1	50.67
7	-1	-1	1	48.50
8	-1	-1	-1	47.73
9	1.682	0	0	44.00
10	-1.682	0	0	50.67
11	0	1.682	0	49.47
12	0	-1.682	0	44.13
13	0	0	1.682	48.00
14	0	0	-1.682	46.80
15	0	0	0	46.67
16	0	0	0	46.83
17	0	0	0	47.17
18	0	0	0	47.07
19	0	0	0	46.93
20	0	0	0	48.00

注: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 v_1 、 v_2 和 α_0 的编码值。

表 4 回归模型显著性分析

Table 4 Regression model significance analysis

方差来源	平方和	自由度	F 值	P 值
模型	99.91	9	79.68	<0.0001**
X_1	61.27	1	439.81	<0.0001**
X_2	36.19	1	259.75	<0.0001**
X_3	1.32	1	9.49	0.0116*
X_1X_2	0.62	1	4.46	0.0608
X_1X_3	1.513E-003	1	0.011	0.9191
X_2X_3	1.513E-003	1	0.011	0.9191
X_1^2	0.14	1	1.02	0.3363
X_2^2	0.12	1	0.84	0.3823
X_3^2	0.22	1	1.55	0.2420
残差	1.39	10		
失拟项	0.29	5	0.26	0.9146
纯误差	1.10	5		
总值	101.30	19		

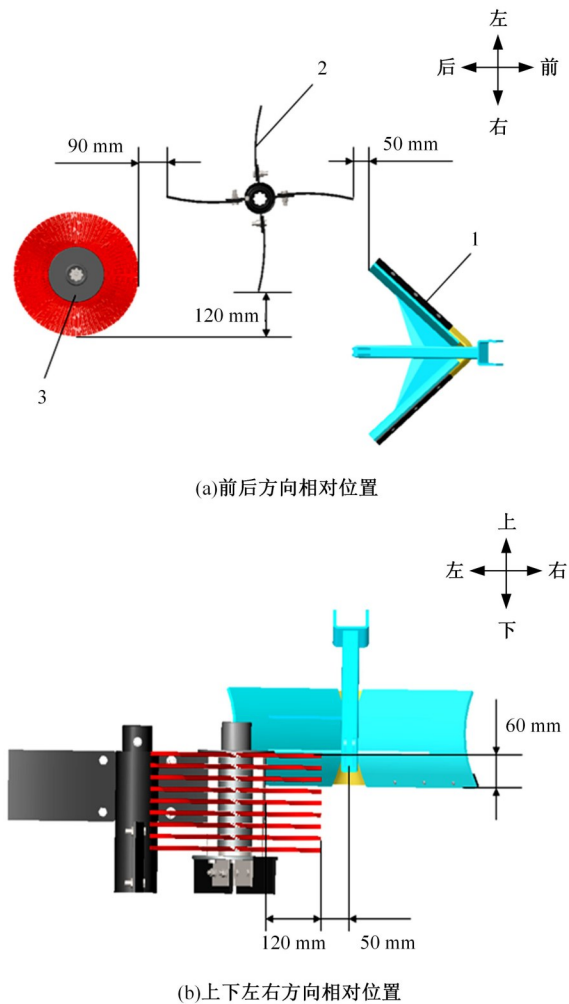
业率为 52.53%,与理论结果值基本一致。

4.2 清土部件空间布局仿真分析

4.2.1 清土部件空间布局设计

依据葡萄藤防寒土“分区清除”方法,将双翼式刮土板部件、分层交错式弧形叶轮部件和柔性

刷丝清土部件在不相互干涉作业的前提下,尽可能使各部件之间排布紧凑,以缩小整机结构尺寸。在SolidWorks软件中,隐藏其他部件,仅展示3个清土部件正常清土作业时的空间布局,如图14所示,从前到后、从上到下、从右到左依次排布刮土板部件、叶轮部件和柔性刷丝部件,刮土板部件的尾部距离叶轮部件的前端50 mm,底部与叶轮部件刷片的顶部重叠60 mm。叶轮部件的尾部距离柔性刷丝部件的前端90 mm,右侧边缘距离柔性刷丝右侧边缘120 mm,叶轮部件与柔性刷丝部件等高放置,且柔性刷丝部件位于叶轮部件的右侧。柔性刷丝部件的右侧边缘距离刮土板部件的中心50 mm,且刮土板部件位于柔性刷丝部件的右侧。



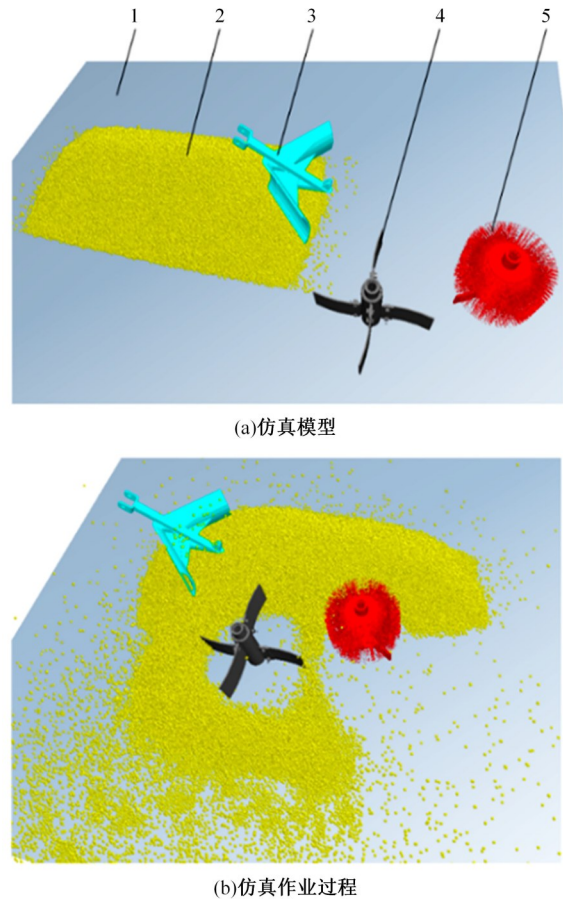
1-双翼式刮土板;2-分层交错式弧形叶轮;3-柔性刷丝-橡胶清土部件

图 14 刮刷组合式清土部件的空间布局

Fig. 14 Spatial layout of combined scraping and brushing soil cleaning components

4.2.2 清土部件仿真实验

在离散元软件EDEM中建立葡萄藤防寒土土垄仿真模型,建模参数和建模过程参考文献[30],最终,生成土垄模型总长约为2200 mm,土垄横截面近似于等腰梯形,尺寸与本研究中的实际葡萄藤防寒土土垄尺寸一致。将简化的3个清土部件按照图14中的空间布局,导入EDEM软件中。根据实际清土作业状况,调整清土部件与土垄之间的相对位置关系,使双翼式刮土板部件的铲尖对准土垄的中心线,设置刮土板刮土厚度为120 mm,最终建立的离散元仿真模型如图15(a)所示。



1-地面;2-土垄;3-双翼式刮土板;4-分层交错式弧形叶轮;5-柔性刷丝-橡胶清土部件

图 15 刮刷组合式清土部件离散元仿真实验

Fig. 15 Discrete element simulation test of combined scraping and brushing soil cleaning components

仿真实验时,在EDEM求解器模块对仿真时间步长、仿真时间、数据保存间隔及网格大小进行设置,为保证仿真的连续性,设置其仿真时间步长为 1.92×10^{-6} s(即Rayleigh时间步长的30%),仿真总时长为8 s,数据保存间隔时间为0.05 s,

网格大小为颗粒平均半径的4倍。依据双翼式刮土板自动避障作业参数优化结果,设置刮刷组合式清土部件的前进速度为1.08 km/h,同时,设置分层交错式弧形叶轮的转速为450 r/min,柔性刷丝清土部件的转速为550 r/min。刮刷组合式清土部件的仿真作业过程如图15(b)所示,从中可以看到,随着清土部件的前进,双翼式刮土板将土垄上方土壤向两侧清除,分层交错式弧形叶轮将土垄侧边土壤向外侧旋转清除,柔性刷丝清土部件将更靠近土垄中心的土壤进一步向外侧旋转清除,3个清土部件清除的土壤不存在相互作业干涉的现象,都能够顺利地把土壤清除到外侧,由此说明,设计的刮刷组合式3个清土部件在空间位置上布局合理。

5 自动调平性能实验

自动调平性能试验在山东省高密市益丰机械制造有限公司园区进行,试验拖拉机型号为金盛武904。试验前,检查倾角传感器的固定安装,保证传感器在机架向左倾斜时输出角度为负,向右倾斜时输出角度为正。同时,在实际使用之前,需要对其进行试验标定。首先,使调平机架向左倾斜,采用数字倾角仪(测量范围:4×90°,分辨率:0.05°,精度:±0.2°)手动测量不同位置时调平机架的倾斜角度,同时记录下传感器信号输出值,然后,使调平机架向右倾斜,再次手动测量调平机架在不同位置处的倾斜角度,记录传感器信号输出值,结果如表5所示。最终建立实际调平机架倾角与输出信号之间关系模型如下:

$$\sigma = 50.17U - 83.80 \quad (19)$$

式中:σ为调平机架的倾斜角,(°);U为倾角传感器输出信号值,V。

表5 倾角传感器标定结果

Table 5 Inclination sensor calibration results

测量参数	测量值					
传感器信号值U/V	1.27	1.39	1.56	1.75	1.90	2.03
调平机架倾角σ/(°)	-20.0	-14.2	-5.6	3.8	12.4	17.5

5.1 静态试验

5.1.1 试验设计

试验前,将试制的刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机挂载在拖拉机后侧三点悬挂上,利用十字万向节传动轴连接拖拉机后侧PTO和机具的变速箱。试验时,首先,由电脑通过STM32F103单片机为比例换向阀输入一个固定电流值(<12 mA),

使调平油缸完全伸出,直至调平机架向左倾斜到最大倾斜角度,如图16(a)所示;然后,打开自动调平控制程序进行试验,同时,利用USB串口线将调平机架上倾角传感器的数据实时传回电脑并保存,直到调平机架变为水平状态,结束试验,如图16(b)所示。向左倾斜到最大角度的自动调平试验完成后,再次为比例换向阀输入一个额定电流值(>12 mA),使调平油缸完全缩回,直至调平机架向右倾斜到最大倾斜角度,此时,再次进行自动调平试验,记录保存倾角传感器的实时数据,完成右倾自动调平试验。左倾自动调平试验和右倾自动调平试验各重复3次。



(a)向左倾斜最大角度



(b)水平状态

1-调平机架;2-电脑;3-调平油缸;4-主机架;5-倾角传感器;6-控制柜

图16 自动调平系统静态试验

Fig. 16 Static tests of automatic leveling system

5.1.2 试验结果分析

当调平机架向左倾斜到最大角度进行自动调平时,自动调平系统的响应时间如图17(a)所示,从中可以看出,系统仅需0.6 s即可达到稳定状态,此时,调平机架的倾角约为0.8°,满足期望的调平角度,且最大超调量为0.7°左右;当调平机架向右倾斜到最大角度进行自动调平时,系统响应时间如图17(b)所示,由于机械零部件的加工和

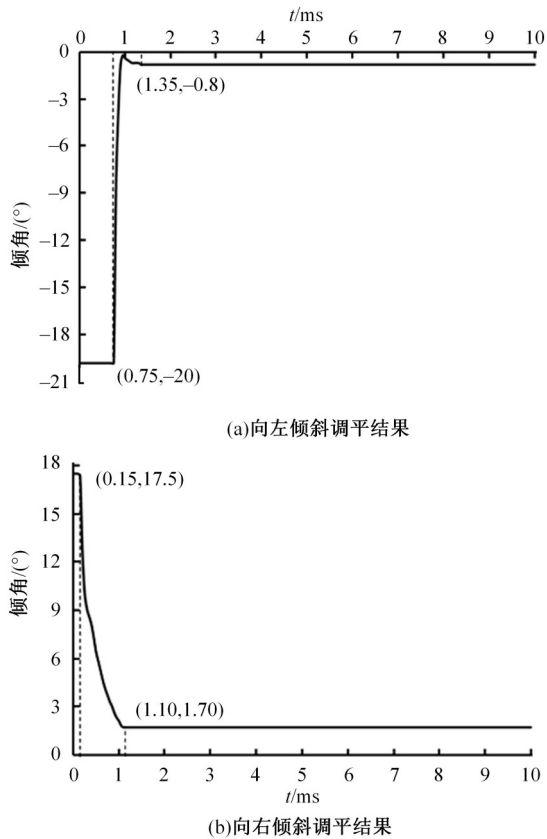


图 17 静态调平试验结果
Fig. 17 Results of static leveling tests

组装误差,当调平机架向右倾斜到最大角度时,未达到理论最大值 20°,实际仅为 17.5°,故图 17(b)中的倾角变化从 17.5°开始变化。从图 17(b)中可以看出,系统需要 0.95 s 达到稳定状态,此时,调平机架的倾角约为 1.7°,同样满足期望的调平角度,且几乎没有超调量。此外,调平机架向左侧倾斜时需要的调平时间小于向右侧倾斜时需要的调平时间,主要是由于左倾调平试验时,调平油缸需要缩短,液压油从有杆腔的一端进入,右倾调平试验时,调平油缸需要伸长,液压油从无杆腔的一端进入,由于杆径的存在,有杆腔和无杆腔内活塞横截面积的不同,从而造成伸缩速度的不同,与实际情况一致。

5.2 动态试验

5.2.1 试验设计

试验前,对试验地内的土壤进行旋耕、平整和压实等处理,使用直径为 40 cm 的铁管代替水泥柱,按前后间距 6 m 插在地上以模拟葡萄园内的水泥柱行。利用双铲式葡萄藤埋土机从两侧行间取土,向铁管所在位置进行覆盖,形成以铁管行为中心的葡萄藤防寒土土垄,并留下不平整的行间

地面,如图 18(a)所示。试验过程中,利用 USB 串口线将便携式计算机与单片机连接,用于采集拖拉机在田间行驶过程中调平机架的倾斜角度。在拖拉机座位后侧中心安装 WIFI 版倾角传感器(型号:WT901WIFI;角度范围: X、Z: ±180°, Y: ±90°;精度:静态 0.05°,动态 0.1°),与计算机建立无线通信,用于采集拖拉机车身的倾斜角度,如图 18(b)所示。由于铁管位于土垄中间,故需要采用刮土板的自动避障功能,依据前文对双翼式刮土板自动避障机构作业参数的优化结果,设定拖拉机全程以 1.08 km/h 的速度匀速行驶,试验重复 3 次,最终获取拖拉机在行驶过程中的调平机架的倾斜角度与拖拉机车身的倾斜角度,将两者进行对比分析。



(a) 试验环境
WIFI版倾角传感器



(b) 试验装备

图 18 自动调平系统田间动态试验

Fig. 18 Field dynamic tests of automatic leveling system

5.2.2 试验结果分析

当拖拉机挂接葡萄藤防寒土清土机行驶在不

平整的地面时,获取中间稳定行驶阶段对应的拖拉机车身倾斜角度的变化和自动调平机架倾斜角度的变化,如图 19 所示,从中可以看出,即使拖拉机倾斜角度的波动范围变化较大,即向右倾斜角度的最大值为 8.03° ,向左倾斜角度的最大值为 4.68° ,但调平机架的倾斜角度始终保持在期望调平角度($\pm 2^\circ$)范围。由此证明,基于 PID 算法的自动调平控制系统对于葡萄藤防寒土清土机在田间作业时,具有较好的调平性能,满足作业要求。

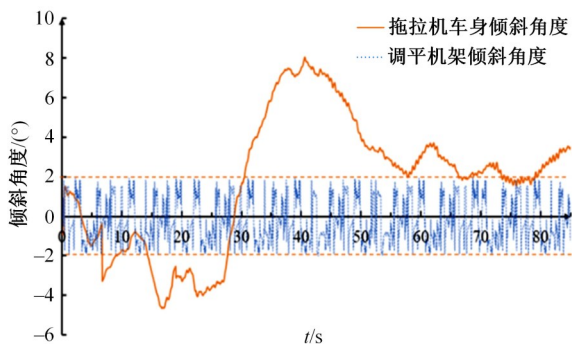


图 19 田间动态试验结果

Fig. 19 Results of field dynamic tests

6 田间试验

6.1 试验条件与设备

试验于 2022 年 3 月中旬在北京市房山区波龙堡葡萄酒业有限公司的葡萄园区进行,该园区内每年葡萄藤防寒土春季清除作业从 3 月中上旬开始,到 3 月底结束。试验选择园区内一块长 200 m,宽 150 m 的试验地作业,试验地内土壤质地类型为沙壤土,葡萄种植行距为 3 m,每行相邻两根水泥柱间距为 6 m,葡萄种植品种为美乐,葡萄树龄为 20 年,每一行共种植约 150 株葡萄。葡萄藤防寒土土垄的横截面近似于等腰梯形,测量葡萄藤防寒土土垄的平均含水率和紧实度(见图 20),分别为 9.2% 和 245 kPa。

试验前,对机具进行接线与调试,如图 21(a)所示,使用拖拉机上 12 V 蓄电池作为电源,保证控制系统的正常供电。试验用拖拉机型号为东方红 604,通过三点悬挂装置与机具进行挂接,采万向节传动轴将拖拉机后侧 PTO 与机具上齿轮箱相连。试验设备与仪器包括刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机、东方红 604 拖拉机、TDR 150 土壤含水率测定仪(精度 $\pm 3\%$,分辨率 0.1%)、SC-900 土壤紧实度仪(测量压力范围为 $0\sim 7\ 000$ kPa,测量深度为 $0\sim 450$ mm)、电脑、卷尺(浙江奥奔工具



(a)含水率测量

(b)紧实度测量

图 20 葡萄藤防寒土含水率和紧实度测量

Fig. 20 Measurement of moisture content and compactness of grapevine cold-proof soil



(a)机具接线与调试

(b)试样样机

图 21 试验设备

Fig. 21 Test equipment

有限公司, $0\sim 5$ m,精度为 1 mm)、钢尺(量程 50 cm,精度 1 mm)、手机(用作计时秒表)等,试验样机如图 21(b)所示。

6.2 试验指标与方法

目前,由于葡萄藤防寒土清除作业尚无国家标准,也无行业标准,故本研究参照已发布的《葡萄刷式清土机》(T/CAMDA 10—2020)团体标准进行田间清土试验,试验选取清土率和葡萄藤损伤率作为机器作业的主要性能指标。作业前,依据葡萄种植行距和土垄与拖拉机之间的相对位置,调节作业幅宽油缸,保证刮土板部件中心位于土垄中心线上。然后,调整刮土板部件清土作业厚度约为 120 mm,试验测试结果选取每行中间机具稳定作业阶段。拖拉机以 1.08 km/h 的速度匀速前进,一侧土垄清除作业完成后,再以同样的方式进行另一侧土垄的清除,共进行 2 行葡萄藤防寒土清除试验。试验前,记录即将清土作业的 2 行共种植的葡萄藤总数量,沿着水泥柱行方向,在每行中间拖拉机稳定行驶区域随机选择 5 个测量点,在每个测量点测量记录原始土垄横截面的尺寸,并在每个测量点处做上位置标记。每行清土

作业完成后,首先查看记录损伤的葡萄藤数量,然后,在 5 个标记的测量点处再次测量剩下土垄的横截面尺寸,通过式(20)和(21)分别计算每次清土作业后葡萄藤损伤率 D 和清土率 C 。最后,将每次试验结果的平均值作为最终的田间试验结果。

$$D = \frac{n_1}{n} \times 100\% \quad (20)$$

式中: n 为土垄下葡萄藤的总个数,个; n_1 为由作业部件清土造成损伤的葡萄藤数量,个。

$$C = 1 - \frac{(a' + b') \times h'}{(a + b) \times h} \times 100\% \quad (21)$$

式中: a 为清土作业前土垄横截面上底宽平均值, cm; b 为清土作业前土垄横截面下底宽平均值, cm; h 为清土作业前土垄总高度平均值, cm; a' 为清土作业后土垄横截面上底宽平均值, cm; b' 为清土作业后土垄横截面下底宽平均值, cm; h' 为清土作业后土垄总高度平均值, cm。

6.3 试验结果分析

刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机在田间的清土作业效果如图 22(a)所示,通过观测,可看到其双翼式刮土板部件在作业过程中,能够顺利自动避开水泥柱,并且先由双翼式刮土板将葡萄藤的上方防寒土向两侧清除,再由分层交错式弧形叶轮清土部件的旋转,将葡萄藤侧边外围的防寒土向外侧清除,最后由柔性刷丝清土部件的旋转,将葡萄藤根部附近的防寒土向外侧清除,3 个清土部件清除的土壤不存在干涉现象,与刮刷组合式清土部件离散元仿真结果一致,最终通过 3 个清土部件的组合作业将葡萄藤防寒土向葡萄种植行间清除。葡萄藤防寒土清除作业完成后,可明显看到从防寒土中露出的葡萄藤,如图 22(b)所示。此外,拖拉机挂载清土机在田间清土作业时,也可以明显的观察到,当拖拉机发生倾斜时,后侧调平机架依然可以保持水平状态,从而保证了各清土部件正常进行清土作业,如图 22(c)所示。综上所述,研制的基于自动调平系统的刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机能够较好地完成葡萄藤防寒土的清土作业。

根据上 6.2 节试验方法和指标,测量计算葡萄藤损伤率和残留覆土率,具体试验数据如表 6 和表 7 所示,最终获得葡萄藤损伤率的平均值约为 1.67%,清土率的平均值约为 81.96%。通过



(a)防寒土清除



(b)葡萄藤露出



(c)机具田间调平

图 22 田间清土作业效果

Fig. 22 Effect of field soil cleaning operation

试验发现,柔性刷丝清土部件在作业过程中,与葡萄藤发生直接接触,并不会刷伤葡萄藤。然而,在试验中产生葡萄藤损伤的主要原因是与拖拉机手

表6 葡萄藤损伤率

Table 6 Damage rate of grapevine

葡萄行	葡萄总株数	损伤葡萄藤株数	损伤率/%
1	150	2	1.33
2	150	3	2.00
平均值		1.67%	

表7 清土率

Table 7 Rate of soil cleaning

葡萄行	清土前土垄尺寸			清土后土垄尺寸			清土率/%
	平均值/cm			平均值/cm			
	上底宽	下底宽	总高	上底宽	下底宽	总高	
1	30	85	32	15	21	19	81.41
2	32	88	35	13	22	21	82.50
均值	31	86.5	33.5	14	21.5	20	81.96

的驾驶水平和埋在土垄下面不规则的葡萄藤本身有关,由于拖拉机在清土作业时,拖拉机手不能保证绝对的直线行走,且土垄中不规则的葡萄藤没有沿着土垄中心线放置,故在机具前进过程中,当柔性刷丝清土部件非常靠近土垄中心时,由于部件的高速旋转作业,有时会将不规则放置的葡萄藤卷入旋转的清土部件中,从而对葡萄藤造成折断损伤。总体上,试验结果满足《葡萄刷式清土机》(T/CAMDA 10—2020)团体作业标准中对葡萄藤防寒土清土机主要性能指标的规定。

7 结 论

(1) 基于葡萄藤防寒土清除农艺要求,设计了一种刮刷组合式葡萄藤清土机,通过其中的刮土板部件、叶轮部件和柔性刷丝部件,可一次性将葡萄藤的上方防寒土、侧边外围防寒土和根部附近防寒土依次分别清除。通过理论分析对刮土板部件、叶轮部件、柔性刷丝部件和自动调平机构等关键部件进行设计,搭建基于STM32F103的控制系统,实现了刮式板部件的自动避障和机具的自动调平,提高了机具的适应性。

(2) 对刮刷组合式葡萄藤防寒土清土机进行了自动调平性能试验和田间试验,自动调平性能试验结果表明,当调平机架向左倾斜到最大角度或向右倾斜到最大角度时,均能在1s内完成自动调平过程,且没有明显的超调量;拖拉机挂接机具在不平整的地面行驶时,调平机架倾斜角度误差始终能保持在期望的调平角度范围内($\pm 2^\circ$)。田间试验结果表明,刮土板部件能够顺利实现自动避障,3个清土部件也可以顺利地完葡萄藤防

寒土的分区清除作业,并且机具具有较好的自动调平效果,清土作业完成后,葡萄藤防寒土的清土率约为81.96%,葡萄藤损伤率约为1.67%,满足我国北方露地葡萄藤防寒土清除作业要求。

参考文献:

- [1] Wang J, Zhang X Y, Su L, et al. Global warming effects on climate zones for wine grape in Ningxia region, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(4): 1527-1536.
- [2] 马帅,徐丽明,袁全春,等. 葡萄机械化清土的发展现状与解决对策[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 1-8. Ma Shuai, Xu Li-ming, Yuan Quan-chun, et al. Development status and countermeasures of grape mechanized soil clearing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 1-8.
- [3] 刘松. 圆锥螺旋式入春葡萄挖藤机设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2014. Liu Song. Design and experiment study of conical spiral manner of grape vines in the spring digging machine[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [4] 亓桂梅,李旋,赵艳侠,等. 2017年世界葡萄及葡萄酒生产及流通概况[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2018(1): 68-74. Qi Gui-mei, Li Xuan, Zhao Yan-xia, et al. Production and circulation of grape and its products in the world in 2017[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2018(1): 68-74.
- [5] 袁全春,徐丽明,马帅,等. 我国北方葡萄冬季埋土和春季清土作业的机械化现状与思考[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2017(6): 66-67. Yuan Quan-chun, Xu Li-ming, Ma Shuai, et al. Current status and considerations on mechanization of winter burying and spring cleaning operations for grapes in northern China[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2017(6): 66-67.
- [6] 徐丽明,邢洁洁,李世军,等. 国外葡萄生产机械化发展和对我国现状的思考[J]. 河北林业科技, 2014(5): 124-128. Xu Li-ming, Xing Jie-jie, Li Shi-jun, et al. Development of mechanization of grape production abroad and reflections on China's current situation[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2014(5): 124-128.
- [7] 周伟斌. 葡萄起藤机的设计[D]. 银川:宁夏大学机械工程学院, 2017.

- Zhou Wei-bin. Design of grape vine digging machine [D]. Yinchuan: School of Mechanical Engineering, Ningxia University, 2017.
- [8] Bisaglia C, Romano E. Utilization of vineyard prunings: A new mechanization system from residues harvest to CHIPS production[J]. Biomass & Bioenergy, 2018, 115: 136-142.
- [9] 曾鉴. 气吹梳刷组合式葡萄防寒土清除机的设计与试验[D]. 北京: 中国农业大学工学院, 2020.
- Zeng Jian. Design and experiment of combined air-blown and brush grape cold-proof soil remover[D]. Beijing: College of Engineering, China Agricultural University, 2020.
- [10] 杜光雨. 风力吹送式酿酒葡萄清土机设计及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学农业工程学院, 2020.
- Du Guang-yu. Design and experimental study of wine grape covering soil clearing machine with wind blowing [D]. Zhenjiang: College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, 2020.
- [11] 曾保宁, 田志道, 赵润良. 葡萄起藤机的设计与研制[J]. 中国农机化学报, 2013(6): 230-232.
- Zeng Bao-ning, Tian Zhi-dao, Zhao Run-liang. Design and development of grape vine machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013(6): 230-232.
- [12] 陈智, 万平, 杨术明, 等. 葡萄藤起藤自动除土机[P]. 中国: CN205755312U. 2016-12-07.
- [13] 李法键. 葡萄园防寒土清除机关键部件设计与分析[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院机电工程学院, 2019.
- Li Fa-jian. Design and analysis on key components of vineyard cold soil removal machine [D]. Qinhuangdao: College of Agricultural Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, 2019.
- [14] 刘芳建, 刘忠军, 王锦江, 等. 自动避障葡萄藤扒土机的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2018(4): 87-90.
- Liu Fang-jian, Liu Zhong-jun, Wang Jin-jiang, et al. Design and experimental study of automatic obstacle-avoid digging machine for grape wine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018(4): 87-90.
- [15] 王文斌. 葡萄清土开沟机设计研究[D]. 北京: 中国农业大学工学院, 2015.
- Wang Wen-bin. Research & design of grape vines digger[D]. Beijing: College of Engineering, China Agricultural University, 2015.
- [16] 马帅, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 叶轮旋转式葡萄藤埋土单边清除机研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 1-10.
- Ma Shuai, Xu Li-ming, Xing Jie-jie, et al. Development of unilateral cleaning machine for grapevine buried by soil with rotary Impeller[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(23): 1-10.
- [17] Ma Shuai, Niu Cong, Yan Cheng-gong, et al. Soil cleaning effect and parameters optimization of the scraper for grapevine cold-proof soil investigated by DEM simulation [J]. Biosystems Engineering, 2021, 210: 156-170.
- [18] Coetzee C J, Lombard S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 308-325.
- [19] Ding S, Bai L, Yao Y, et al. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 32-39.
- [20] 胡永光, 杨叶成, 肖宏儒, 等. 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 77-82.
- Hu Yong-guang, Yang Ye-cheng, Xiao Hong-ru, et al. Simulation and parameter optimization of centrifugal fertilizer spreader for tea plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 77-82.
- [21] Van L P, Tijskens E, Dintwa E, et al. A discrete element model for simulation of a spinning disc fertilizer spreader I. Single particle simulations[J]. Powder Technology, 2006, 170(2): 71-85.
- [22] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 锥形撒肥圆盘中肥料颗粒运动模型优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 85-91.
- Lv Jin-qing, Sun He, Dui Han, et al. Optimization and experiment of fertilizer particle motion model in conical spreading disk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 85-91.
- [23] 马帅, 徐丽明, 牛丛, 等. 分层交错式葡萄防寒土弧形清土叶轮的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 1-9.
- Ma Shuai, Xu Li-ming, Niu Cong, et al. A facile arc impeller with layered-staggered structure to clean cold-proof soil on grapes[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 1-9.
- [24] 孙永佳, 周军, 李学强, 等. 马铃薯联合收获机车身调平系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊): 298-306.
- Sun Yong-jia, Zhou Jun, Li Xue-qiang, et al. Design and experiment of body leveling system for potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup.):

- 298-306.
- [25] 董伟亮. 液压设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [26] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 117-123.
Zhou Hao, Hu Lian, Luo Xi-wen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Sup.): 117-123.
- [27] 潘杰, 陈凡, 胡建平, 等. 基于EDEM-RecurDyn的指夹式取苗爪仿真优化设计[J]. 农业机械学报, 2023, 53(5):75-85, 301.
Pan Jie, Chen Fan, Hu Jian-ping, et al. Simulation and optimization design of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 53(5):75-85, 301.
- [28] 王少杰, 殷月, 余圣锋, 等. 基于RecurDyn-EDEM的装载机耦合动力学仿真分析[J]. 机械设计, 2021, 38(11):1-6.
Wang Shao-jie, Yin Yue, Yu Sheng-feng, et al. Dynamic analysis on loader coupling based on RecurDyn-EDEM[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(11): 1-6.
- [29] 于畅畅, 徐丽明, 王庆杰, 等. 篱架式栽培葡萄双边作业株间自动避障除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 1-9.
Yu Chang-chang, Xu Li-ming, Wang Qing-jie, et al. Design and experiment of bilateral operation intra-row auto obstacle avoidance weeder for trellis cultivated grape[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(5): 1-9.
- [30] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 40-49.
Ma Shuai, Xu Li-ming, Yuan Quan-chun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 40-49.