

酿酒葡萄双边埋藤机锥形旋抛装置设计与试验

李翔^{1,2} 杨发展¹ 吴传云³ 杨术明⁴ 李玉环¹ 李宝刚¹

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 青岛 266520; 2. 宁夏农业机械化技术推广站, 银川 750004;
3. 农业农村部农业机械化总站, 北京 100020; 4. 宁夏大学机械工程学院, 银川 750021)

摘要: 针对现有单侧往返作业埋藤机作业效率低、埋土深度不足等问题,本研究提出了一种双边同步作业及锥形旋抛式埋土复合技术,设计了一种锥形旋抛装置,实现通过单次完成葡萄藤两侧埋土。该装置核心部件包括螺旋刀盘、挡土罩、抛土旋刀,通过建立螺旋曲线数学模型,优化螺旋刀盘和挡土罩关键参数,确定影响埋土效果主要参数的合理取值区间。基于 EDEM 离散元平台及 Design-Expert 软件进行三因素三水平正交仿真试验,运用 Box - Behnken 响应面分析法验证参数组合合理性。通过 Numerical 优化模块分析得最优参数组合,当刀盘螺距为 23 cm、挡土罩开口角度为 100°、螺旋长度为 125 cm 时,埋土深度为 36.39 cm,水平前进阻力为 1 059.99 N。田间试验结果表明,实测平均埋土深度及水平前进阻力分别为 39 cm 和 1 149 N,与仿真值相对误差分别为 6.7% 和 7.7%,埋土深度稳定性变异系数为 1.86%。研究结果为酿酒葡萄双边埋土装备深入研发提供了理论依据和设计参考。

关键词: 酿酒葡萄埋藤机; 双边埋土; 旋抛式; 锥形; 离散元仿真

中图分类号: S224

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0079-10

OSID:



Design and Experiment of Conical Rotary Throwing Device for Grapevine Bilateral Burying Machine

LI Xiang^{1,2} YANG Fazhan¹ WU Chuanyun³ YANG Shuming⁴ LI Yuhuan¹ LI Baogang¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China
2. Ningxia Agricultural Mechanization Technology Promotion Station, Yinchuan 750004, China
3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Agricultural Mechanization Station, Beijing 100020, China
4. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming at the problems of low working efficiency and insufficient depth of buried soil in the existing vine burying machine with one-side round-trip operation, a composite technology of bilateral synchronous operation and conical rotary throwing buried soil was proposed, and accordingly a conical rotary throwing device was designed to realize single-pass completion of buried soil on both sides of vines. The core components of the device included a spiral cutterhead, a retaining cover, and a throwing soil rotary knife. By establishing a mathematical model of the spiral curve, the key parameters of the spiral cutterhead and the retaining cover were optimized to determine the reasonable value range of main parameters affecting the buried soil effect. Based on EDEM discrete element platform and Design-Expert software, three-factor three-level orthogonal simulation test was carried out, and Box - Behnken response surface analysis method was used to verify the rationality of parameter combination. The optimal parameter combination was obtained by numerical optimization module analysis. When the cutter pitch was 23 cm, the opening angle of the retaining cover was 100°, and the spiral length was 125 cm, the corresponding buried depth was 36.39 cm, and the horizontal forward resistance was 1 059.99 N. The field test showed that the measured average buried depth and horizontal forward resistance were 39 cm and 1 149 N, respectively, and the relative errors with the simulation results were 6.7% and 7.7%, respectively. The coefficient of variation of buried depth stability was 1.86%. The research result can

收稿日期: 2025-10-21 修回日期: 2025-11-22

基金项目: 青岛市科技惠民示范引导专项(24-1-8-xdny14-nsh)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BBF02028)和宁夏第七批
青年科技人才托举工程项目(宁科协发组字[2023]6号)

作者简介: 李翔(1988—),男,博士生,主要从事智能农机装备和全程机械化装备研究,E-mail: 314935135@qq.com

通信作者: 杨发展(1981—),男,教授,博士,主要从事智能农机装备和全程机械化装备研究,E-mail: fazhany@163.com

provide a theoretical basis and design reference for the in-depth research and development of wine grape bilateral buried equipment.

Key words: grapevine burying machine; bilateral buried soil; rotary throwing; conical; discrete element simulation

0 引言

作为落叶果树,酿酒葡萄冬季需进行防寒作业。在我国北方,冬季气温常低于 -15°C ,为确保翌年葡萄植株的正常萌发与生长,须进行埋土防寒,埋土深度须达到 $30\sim 40\text{ cm}$ ^[1]。当前葡萄埋土防寒机械主要采用拖拉机悬挂单侧作业,需往返1次才能完成双侧埋土,作业效率低;而单侧作业模式易引发埋土深度不足、覆土均匀性差等问题。因此,研制高效、均匀的双边同步埋土装备,对于提升作业效率与埋土质量具有重要实际意义。

国外酿酒葡萄主产区冬季气温多在 0°C 以上,葡萄藤受冻害风险较低,无需埋土防寒作业,相关技术装备研究及文献报道较少^[2]。近年来,国内学者在葡萄埋藤机研发方面取得了一定进展^[3-6]。李环芳等^[7]研制的1MP-100型悬挂式葡萄埋藤机,最大埋土厚度可达 40 cm ,利用2组旋转挖土圆盘实现取土与覆土,通过地轮调节旋刀深度控制取土量。庞俊杰等^[8]研制的MT200-2型双侧抛土葡萄埋藤机,有效埋土深度可达 30 cm ,采用双旋耕结构,两侧刀轴同时向双侧葡萄藤进行埋土作业。刘仁广等^[9]设计的3MT-5型埋藤机采用犁耕式结构,最大埋土深度 25 cm ,其轴辊上的旋切刀片逆旋转切削并破碎土壤后,依靠螺旋力将土壤颗粒单向抛送。田荣昌^[10]设计的单边圆锥埋藤机,最大埋土深度 35 cm ,采用旋抛埋土,但无挡土罩装置,土壤聚拢与抛送效果不佳,存在两侧埋土高度不均问题。综合而言,当前葡萄埋藤机仍主要依赖单行单边作业模式,普遍存在作业效率低、埋土高度不足、埋土深度稳定性不佳等问题;而对双边锥形旋抛埋藤技术及其核心装置的系统性研究不足。

依托已研制的葡萄龙门式多功能作业平台^[11],针对现有单边埋藤机作业效率低与覆土高度不足问题,本文设计一种酿酒葡萄双边锥形旋抛埋藤装置。聚焦对旋抛埋土有影响的螺旋刀盘与挡土罩装置,开展设计与分析,确定关键结构参数合理取值范围;结合离散元仿真(EDM)试验方法^[12],优化确定旋抛装置最优结构参数组合;并通过田间试验对仿真结果进行验证。

1 双边旋抛式埋藤机结构与工作原理

1.1 埋土农艺要求

埋土是针对冬季需防寒的葡萄藤蔓进行作业,埋土后田间地表呈条状隆起状态^[13]。埋土深度约为藤蔓伏地高度的2倍。以宁夏产区为例,藤蔓上方覆土厚度 h 大于等于 0.3 m ,埋后形成的土垄为规则梯形,垄顶宽 a 为 $0.4\sim 0.5\text{ m}$,垄底宽 b 为 $0.9\sim 1.0\text{ m}$,基于研发的龙门履带自走式葡萄作业平台^[14],作业模式及土垄横截面如图1所示。平台横跨于架杆两侧,通过双向对称旋抛土壤实现对冲式覆土作业,旋抛式土壤颗粒抛送距离受旋抛刀转速及挡土罩结构影响而存在波动^[15]。

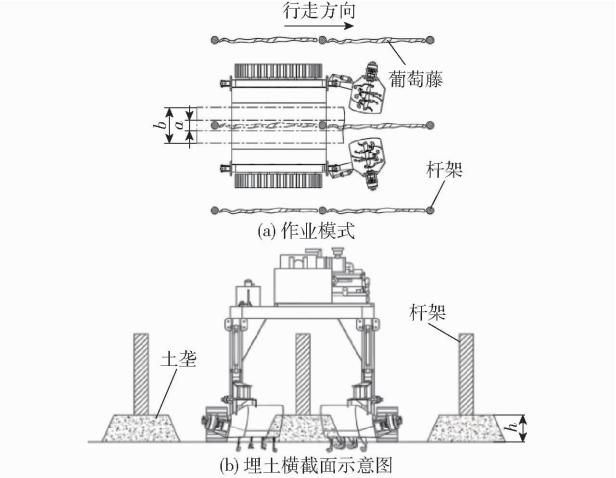


图1 作业模式及埋土横截面示意图

Fig.1 Operation mode and buried soil cross section diagrams

1.2 整机结构与工作原理

酿酒葡萄双边旋抛式埋藤机主要由提升套筒、机架、液压油箱、发动机、操作台、提升控制液压缸、履带行走装置等部件组成,如图2所示。整机采用龙门式架构,内部净高 2.1 m ,净宽 2 m ,采用自走式作业。机架材料选用Q235结构钢,埋土装置由2个锥形旋抛机构组成,零件包括旋抛刀、挡土罩、旋刀刀轴、液压马达等;作业时整机横跨于葡萄杆架上方,采用双边对冲式抛土完成藤蔓埋土作业,提升控制液压缸将埋土装置下降至葡萄行间取土层进行旋抛取土,由角度控制液压缸控制埋土装置的开合角度,分别完成对埋土高度和埋土宽度的控制。

1.3 锥形旋抛装置结构设计与工作原理

锥形旋抛装置是实现土壤旋切与定向抛送的核心埋土组件,其结构如图3所示。主要结构由液压

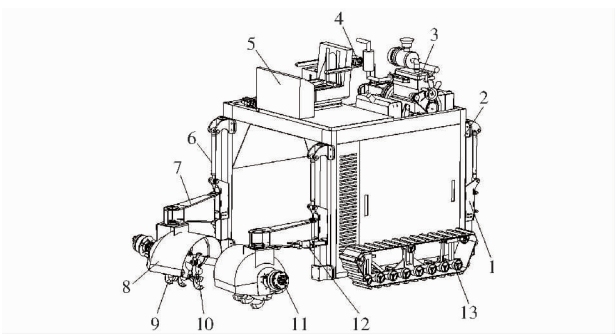


图 2 酿酒葡萄双边旋抛式埋藤机结构图
Fig.2 Structure diagram of wine grape bilateral rotary throwing vine burying machine

1. 提升套筒 2. 机架 3. 液压油箱 4. 发动机 5. 操作台 6. 提升控制液压缸 7. 作业臂 8. 挡土罩 9. 旋抛刀 10. 旋刀刀轴 11. 液压马达 12. 角度控制液压缸 13. 履带行走装置

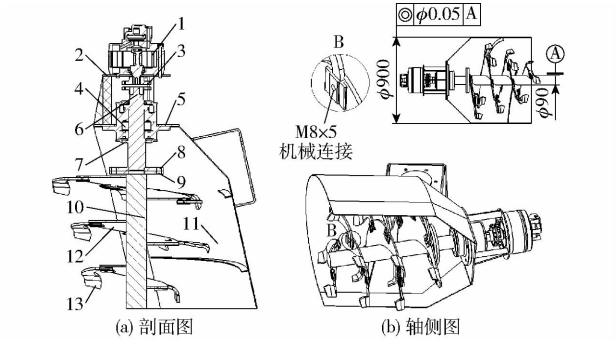


图 3 锥形旋抛装置总体结构图
Fig.3 Conical rotary polishing device structure diagrams

1. 液压马达 2. 支撑板 3. 联轴器 4. 轴承 5. 底座 6. 轴座板 7. 密封端盖 8. 上法兰 9. 下法兰 10. 旋刀刀轴 11. 挡土罩 12. 螺旋刀盘 13. 旋刀

马达、联轴器、上法兰、下法兰、旋刀刀轴、挡土罩、螺旋刀盘、旋刀等组成。作业时，液压马达输出动力，经联轴器驱动旋刀刀轴旋转。刀轴带动螺旋刀盘及固联的抛土旋刀高速转动，土壤颗粒在旋刀作用下受离心力作用形成旋转流场；颗粒流撞击挡土罩内壁，运动方向改变后被反向抛出，完成对藤蔓上方的覆土作业。该装置核心在于其锥形螺旋结构设计，相关研究表明，螺旋曲线长度对土壤旋切效率、土壤搬运能力及最终埋土效果具有显著影响^[16]。

2 锥形旋抛装置关键参数设计

2.1 螺旋曲线数学模型建立

锥形旋抛装置采用圆锥体设计，通过多组旋刀的规则螺旋排列，借助圆锥面的渐扩特性完成取土排土，同时结合螺旋轨迹的推进力与离心力将土壤精准抛送至藤蔓区域。该结构几何参数决定土壤埋土效率、抛送轨迹及速度特性，通过建立螺旋曲线数学模型，明确旋抛刀空间排布方式和螺旋刀盘各项关键参数，对埋土效果提供理论基础，二维平面投影

形成的直径即为圆锥最大直径，如图 4 所示。

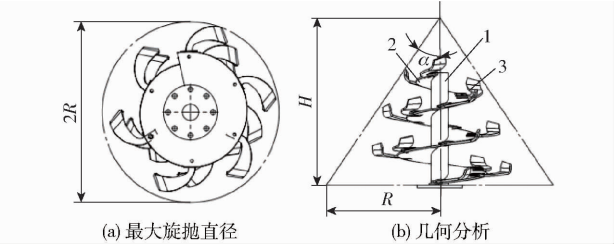


图 4 锥形旋抛装置几何投影
Fig.4 Geometric projection of conical rotary-throwing device

1. 旋刀刀轴 2. 螺旋刀盘 3. 抛土旋刀

根据锥形几何特性，其关系应符合

$$R = H \tan \alpha \tag{1}$$

式中 α ——锥形半顶角，($^{\circ}$)
 R ——锥形底部最大半径，cm
 H ——锥形高度，cm

由于抛土旋刀按照螺旋关系等距排列在螺旋刀盘上，可基于圆锥体的几何特性和螺旋线的运动规律，建立锥形螺旋曲线在轴向高度变化时径向坐标分布。基于高度的螺旋线参数方程为

$$\begin{cases} x(z) = \left(R_0 + \frac{R - R_0}{H} z \right) \cos \theta \\ y(z) = \left(R_0 + \frac{R - R_0}{H} z \right) \sin \theta \\ z(z) = z \\ \theta = \frac{2 \pi n}{H} z \end{cases} \tag{2}$$

式中 n ——螺旋线总圈数
 z ——螺旋线高度，cm
 R_0 ——锥形顶部起始半径，cm
 θ ——螺旋线在高度 z 处旋转角度，($^{\circ}$)

为体现螺旋线在旋转角度变化时空间轨迹，便于计算旋抛刀的周向排列角度，以 θ 为自变量， $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ 为横纵坐标，结合基于高度 $z(\theta)$ 的方程，则关于角度 θ 的螺旋线极坐标方程为

$$\begin{cases} x(\theta) = \left(R_0 + \frac{R - R_0}{2 \pi n} \theta \right) \cos \theta \\ y(\theta) = \left(R_0 + \frac{R - R_0}{2 \pi n} \theta \right) \sin \theta \\ z(\theta) = \frac{H}{2 \pi n} \theta \end{cases} \tag{3}$$

由式(3)可知， θ 通常在 $0 \sim 2 \pi n$ 变化， $z(\theta)$ 表示螺旋线在角度 θ 时高度。考虑到旋抛刀使用寿命的持久性，旋抛时要求刀体必须在单位时间内取土和切土量恒定，并且等间距排列在螺旋刀盘上，假设螺旋线起始半径 R_0 为 0 cm，则其排列均布可由极坐标方程推导出 $R(\theta)$ 为

$$R(\theta) = R_0 + \frac{R - R_0}{2\pi n} \theta = \frac{R}{2\pi n} \theta \quad (4)$$

式(4)中, $R(\theta)$ 为螺旋线在角度 θ 时半径, 则抛土旋刀按照角度 θ 等距排列在螺旋刀盘上。优化后的三维螺旋线极坐标-高度方程可联合表示, 即以极坐标 (R, θ) 结合高度 z 以及锥形高度 H 的方程可表示为

$$\begin{cases} R(\theta) = \frac{R}{2\pi n} \theta \\ z(\theta) = \frac{H}{2\pi n} \theta \\ x(\theta) = R(\theta) \cos \theta \\ y(\theta) = R(\theta) \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, 螺旋线半径 $R(\theta)$ 与高度 $z(\theta)$ 随角度 θ 线性增加, 保证锥形轮廓的形成和抛土旋刀沿轴向等距分布, 通过笛卡尔坐标系转换 $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$, 实现螺旋线空间轨迹表征, 结合式(1)三角函数几何关系, 形成“锥形几何-螺旋排列”的参数化数据模型方程组(式(5))。

2.2 螺旋刀盘参数设计

螺旋刀盘作为锥形旋抛装置核心部件, 可实现土壤旋切、输送与抛送功能, 其螺旋长度决定取土量与土壤沿螺旋轨迹的输送距离, 螺距决定单位轴向长度内土壤推进量, 螺旋高度则关联锥形结构纵向尺寸, 对提升埋土均匀性有重要作用^[17-18]。

2.2.1 螺旋长度

螺旋长度是螺旋刀盘外廓线长度, 如图 5a 所示, 螺旋刀盘呈螺旋状, 端部设有安装孔, 用于旋抛刀安装, 螺旋长度为螺旋线从锥顶至锥底的空间曲线总长度, 其长短决定螺旋刀盘长度取值^[19], 如图 5b 所示, 螺旋刀盘投影面为锥形集合体。

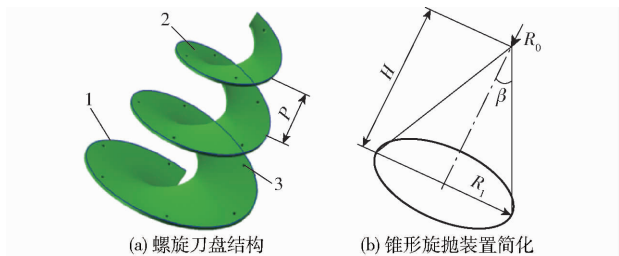


图 5 锥形旋抛装置结构图

Fig. 5 Conical spinning structure diagrams

1. 螺旋曲线 2. 螺旋刀盘 3. 安装孔

图 5 中, R_1 为螺旋刀盘底部最大半径, β 为螺旋刀盘夹角, 根据式(5)推导, 锥形旋抛三维螺旋线极坐标-高度的关系可由公式

$$\begin{cases} x(\beta) = R(\beta) \cos \beta = \frac{R}{2\pi n} \beta \cos \beta \\ y(\beta) = R(\beta) \sin \beta = \frac{R}{2\pi n} \beta \sin \beta \\ z(\beta) = \frac{H}{2\pi n} \beta \end{cases} \quad (6)$$

推导出, 对式(6)中 $x(\beta)$ 、 $y(\beta)$ 、 $z(\beta)$ 对 β 分别求导得

$$\begin{cases} x'(\beta) = \frac{R}{2\pi n} (\cos \beta - \beta \sin \beta) \\ y'(\beta) = \frac{R}{2\pi n} (\sin \beta + \beta \cos \beta) \\ z'(\beta) = \frac{H}{2\pi n} \end{cases} \quad (7)$$

将其代入微元弧长 ds 公式可得

$$ds = \sqrt{\left[\frac{R}{2\pi n} (\cos \beta - \sin \beta) \right]^2 + \left[\frac{R}{2\pi n} (\sin \beta + \beta \cos \beta) \right]^2 + \left(\frac{H}{2\pi n} \right)^2} d\beta \quad (8)$$

化简得

$$ds = \frac{1}{2\pi n} \sqrt{R^2 (1 + \beta^2) + H^2} d\beta \quad (9)$$

采用辛普森数值积分法对式(9)在 $\beta \in [0, 2\pi n]$ 区间积分, 积分步长取 0.01 rad, 可得螺旋长度计算式为

$$L = \int_0^{2\pi n} \frac{1}{2\pi n} \sqrt{R^2 (1 + \beta^2) + H^2} d\beta \quad (10)$$

式中 L ——螺旋长度, cm

综上, 通过数值积分方法计算, 可得 L 为 120 ~ 130 cm。为补偿旋刀在安装时的空间误差, 需有一定重叠量, 一般取 5 cm, 最终确定螺旋刀盘有效长度 L 为 125 ~ 135 cm, 在此范围内, 螺旋刀盘可有效地进行切土和推土。

2.2.2 螺距与螺旋高度

根据螺旋曲线的数学模型, 对螺旋刀盘进行设计与分析, 由图 5a 可知, 螺距 P 决定带土量^[20], 由式(1)、(5)可知, 在完整 n 圈螺旋线中, 角度变化范围为 $0 \leq \beta \leq 2\pi n$, 则螺旋线高度变化量、锥形底部最大半径在螺旋线角度变化下关系为

$$H = \frac{R_1}{\tan \beta} \quad (11)$$

由图 5 分析可知, 螺距 P 为螺旋总高度除以圈数, 代入式(11), 可得

$$P = \frac{H}{n} = \frac{R_1}{n \tan \beta} \quad (12)$$

综上所述, 根据农艺要求, 当埋土高度取 40 cm, 由式(5)可知, 锥形底部半径 R_1 应不低于 40 cm, 假设半顶角 β 取 30° , 由式(11)计算得螺旋高度 H 约为 69 cm。根据上文分析螺旋刀盘有效最大长度为 135 cm, 当螺旋圈数 n 取 3 ~ 5 圈时, 根据式(12)计算得理论螺距 P 为 14 ~ 23 cm。

2.3 挡土罩参数设计

挡土罩主要作用是反射土壤颗粒, 约束旋抛式

土壤的抛射方向,其上方开口角度取值影响土壤抛送角度和埋土效果。本文挡土罩功能包括约束土壤颗粒的运动轨迹、避免飞溅、优化土壤落点分布,确保埋土均匀性,各尺寸参数间关系如图 6 所示。

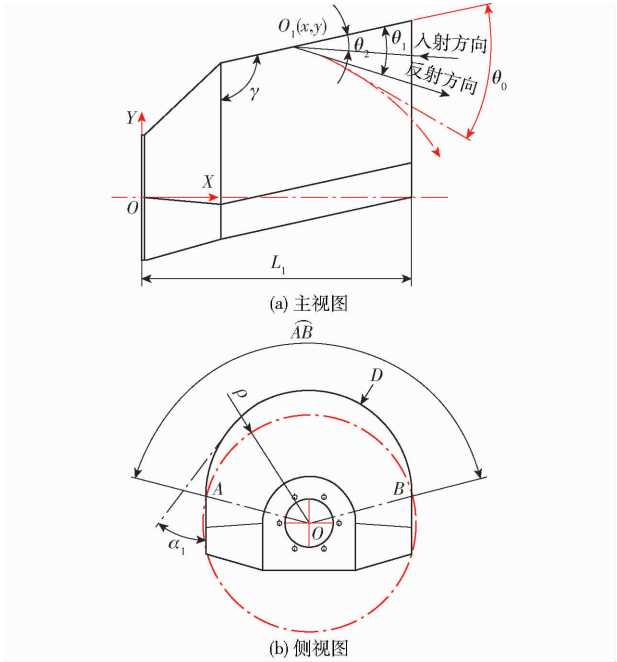


图 6 挡土罩结构参数

Fig. 6 Retaining cover structure parameter diagram

图 6 中, ρ 为挡土罩弧度半径 ($\widehat{AB}$ 为弧长)、 γ 为开口角度、 D 为挡土罩内径、 L_1 为挡土罩长度,设旋抛刀盘最大半径为 R_1 ,如图 6 所示,以刀盘中心为坐标原点,建立笛卡尔坐标系。土壤颗粒以抛射速度 v 撞击挡土罩表面,入射点 O_1 坐标为 (x, y) ,则反射角满足

$$\theta_1 = \theta_2 + 2\alpha_1 \quad (13)$$

式中 θ_1 ——反射角, ($^\circ$) θ_2 ——入射角, ($^\circ$)
 α_1 ——切线倾角, ($^\circ$)

为使反射后土壤颗粒能够朝向葡萄藤(落土目标区域位于刀盘中心正上方),挡土罩弧度方程和切线斜率方程可表示为

$$\begin{cases} x^2 + (y - \rho)^2 = \rho^2 \\ k = \frac{dy}{dx} = -\frac{x}{y - \rho} \end{cases} \quad (14)$$

式中 k ——切线斜率

切线倾角 α_1 可表示为

$$\alpha_1 = \arctan k \quad (15)$$

结合土壤颗粒的抛射初速度方向,推导出挡土罩弧度半径与刀盘最大半径的关系为

$$\rho = \frac{R_1}{1 + \sin \theta_0} \quad (16)$$

式中 θ_0 ——土壤颗粒抛射角度, ($^\circ$)

根据式 (16), 当 θ_0 为 30° 时, 计算得 ρ 为

$0.67R_1$ 。考虑土壤颗粒抛射角度 θ_0 波动范围为 $20^\circ \leq \theta_0 \leq 40^\circ$, 得到弧度半径取值范围为 $0.6R_1 \leq \rho \leq 0.8R_1$, 在此范围能确保土壤颗粒在反射后均匀地覆盖葡萄藤, 同时避免土壤飞溅, 满足埋土作业农艺要求。而挡土罩开口角度对土壤流出截面积也有影响, 间接影响土壤流量和流速, 土壤流量与流出面积应满足

$$\begin{cases} q = vA \\ A = \frac{1}{2}\gamma R_1^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中 A ——土壤流出截面积, cm^2

q ——土壤流量, kg/s

根据旋抛结构特性, 土壤流量由旋抛刀取土量决定, 而抛出的土壤必须能覆盖土垄底部宽度, 土壤流量 q 和土壤颗粒抛射速度 v 满足

$$\begin{cases} q = \frac{\pi R_1^2 b_1 n_1 h_1 k_s}{60} \\ v \geq \sqrt{\frac{gs}{2\sin \theta_3 \cos \theta_3}} \end{cases} \quad (18)$$

式中 n_1 ——旋抛刀转速, r/min

b_1 ——旋刀最大切土宽度, cm

h_1 ——旋刀切土深度, cm

k_s ——土壤松散系数, 依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》取 1.3

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2

θ_3 ——最佳抛射角, 取 45°

s ——抛土距离, cm

为确保覆土宽度满足实际需求, 抛土距离 s 需大于 90 cm , 计算得土壤颗粒抛射速度 $v \geq 3 \text{ m/s}$ 。联立方程 (17)、(18), 得挡土罩开口角度表达式为

$$\gamma = \frac{\pi b_1 n_1 h_1 k_s}{30v} \quad (19)$$

综上所述, 当锥形底部最大半径 R 取 20 cm , 旋刀最大切土宽度 b_1 取 9 cm , 刀轴转速 n_1 取 550 r/min , 旋刀切土深度 h_1 取 40 cm , 假设土壤颗粒抛射速度 v 取 $3 \sim 5 \text{ m/s}$, 可计算得开口角度 γ 为 $100^\circ \sim 130^\circ$; 这一参数范围能确保土壤流出截面积和流速的合理匹配, 从而实现土壤均匀抛送和覆盖。

3 旋抛埋土仿真分析

3.1 模型建立与参数确定

根据埋土特性, 建立土槽模型, 在 Solidworks 中建立长、宽、高分别为 $2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 土槽作为仿真计算域, 其中钢丝、水泥杆、土槽围挡都采用 65Mn 钢, 模型以 IGS 格式导入 EDEM 中, 将土垄自身设置为颗粒工厂, 选择系统自带的单圆球形颗粒

作为土壤颗粒模型,半径为 5 mm,由于种植田地土壤以砂壤土为主,粘连性较低,采用 Hertz - Mindlin 无滑移模型作为接触模型^[21],在重力加速度下以速率 100 000 个/s,时间为 5.8 s,生成总量为 580 000 个颗粒的土槽。为提高仿真效率,减少不必要计算,在 Solidworks 中隐藏除埋土装置以外的结构,将模型缩小为 0.25 倍,只保留具有旋抛埋土功能的作业组件模型,将作业组件坐标系与系统坐标系保持一致,另存为 IGS 格式文件,导入 EDEM 软件,从第 5.8 秒开始仿真,如图 7a 所示。

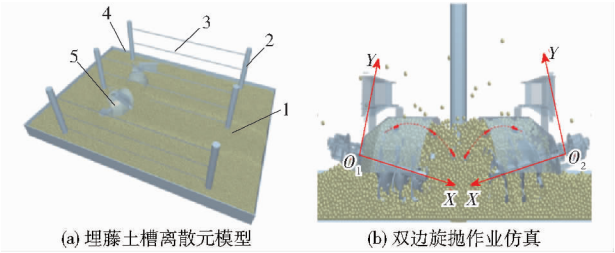


图 7 葡萄埋藤土槽离散元模型与仿真
Fig. 7 Discrete element model and simulation of grape vine buried soil trough

1. 土垄 2. 水泥杆 3. 钢丝 4. 土槽围挡 5. 简化模型

根据坐标系相对位置,调整埋土装置与土槽模型间相对位置参数,其中双边埋土组件以杆架为中心,分布于两侧,旋抛方向对准藤蔓,对组件添加旋转运动、直线运动,其中直线运动速度为 1 m/s,旋转运动转速为 550 r/min,作业仿真原理如 7b 所示。对土壤及模型材料力学特征和接触参数进行定义,如表 1 所示^[22-23]。

表 1 仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

材料	参数	数值
土壤	泊松比	0.4
	剪切模量/Pa	1×10^6
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 250
65Mn 钢	泊松比	0.3
	剪切模量/Pa	7.9×10^{10}
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 865
土壤-土壤	恢复系数	0.2
	静摩擦因数	0.4
	滚动摩擦因数	0.3
土壤-65Mn 钢	恢复系数	0.5
	静摩擦因数	0.3
	滚动摩擦因数	0.1

3.2 试验因素

基于 EDEM 2020 开展旋抛装置不同结构参数仿真试验,以埋土深度及埋土装置水平前进阻力作为评判指标进行仿真分析^[24]。对土壤埋土深度进行分析,应用其后处理分析模块中的 Clipping 功能

切取土垄横截面,并由 Analyst 模块下的 Ruler 功能截取土垄中间横截面最高颗粒至土层底端高度得到埋土深度,如图 8a 所示;水平前进阻力分析土壤对两侧旋刀的最大阻力,由 Analyst 模块下的 Line 模块得出,取两侧旋刀 Total Pressure 峰值相加得到^[25-26],如图 8b 所示。

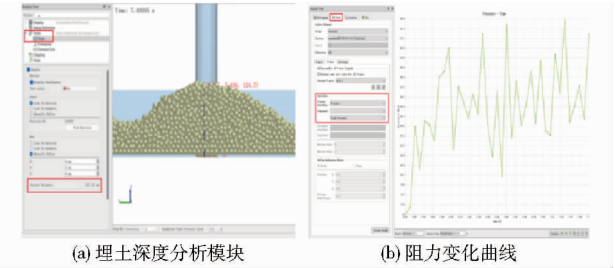


图 8 EDEM 埋土深度与水平前进阻力曲线界面
Fig. 8 EDEM buried depth and horizontal forward resistance curve interface

锥形旋抛装置关键结构为旋抛刀盘和挡土罩,通过分析计算可知,变化幅度较大的参数有刀盘螺距、螺旋长度、挡土罩开口角度 3 个因素,其离散元仿真分析时间步长共 7.5 s,前 0 ~ 5.8 s 为土槽成型,后 5.8 ~ 7.5 s 为锥形旋抛装置稳态工作阶段,埋土深度和水平前进阻力试验数据从第 5.8 秒开始分析,刀盘螺距 P 为 14 ~ 23 cm,螺旋长度 L 为 125 ~ 135 cm,挡土罩开口角度 γ 为 $100^\circ \sim 130^\circ$ 。

3.3 正交试验

3.3.1 试验设计与结果

为探究葡萄双边埋土的作业效果,确定最优设计参数组合。在前期 EDEM 软件离散元分析基础上,进行多因素、多水平虚拟仿真正交试验研究。结合旋抛装置设计与分析,以刀盘螺距 P 、螺旋长度 L 、挡土罩开口角度 γ 为试验因素,采用三因素三水平试验,利用 Box - Behnken 响应面分析法验证参数合理性。试验因素编码如表 2 所示。

表 2 正交试验因素编码
Tab. 2 Orthogonal test factors and coding

编码	因素		
	刀盘螺距/ cm	挡土罩开口角度/ ($^\circ$)	螺旋长度/ cm
-1	14.0	100	125
0	18.5	115	130
1	23.0	130	135

应用 Quadratic 二次多项式模型建立埋土深度、水平前进阻力回归模型,共进行 17 组试验,试验方案与结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 为因素编码值。

3.3.2 试验结果分析

对埋土深度结果进行二次回归模型方差分析,

表3 埋土作业仿真试验结果

Tab.3 Simulation test results of buried soil operation

试验号	因素			埋土深度/ cm	水平前进 阻力/N
	A	B	C		
1	0	0	0	35.89	1 387.48
2	-1	0	-1	34.78	1 136.56
3	0	1	-1	34.55	1 231.63
4	-1	0	1	32.18	1 176.85
5	1	0	1	36.73	1 496.68
6	0	1	1	33.97	1 267.91
7	0	0	0	33.81	1 491.41
8	1	1	0	34.85	1 168.91
9	-1	1	0	34.15	1 467.33
10	1	-1	0	35.28	1 210.77
11	0	0	0	34.91	1 478.21
12	1	0	-1	34.21	1 301.96
13	0	-1	1	33.85	1 291.54
14	0	0	0	33.65	1 376.88
15	0	0	0	33.73	1 295.87
16	-1	-1	0	36.23	1 085.95
17	0	-1	-1	34.58	1 395.21

如表4所示。

由表4可知,模型 P 值为 0.010 3,表示该模型显著。 A 影响极显著,其余因素影响均不显著,失拟项 P 值为 0.079 3,不显著。对埋土深度影响从大到小依次为刀盘螺距、螺旋长度、挡土罩开口角度。埋土深度二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 34.20 + 1.24A + 0.0642B + 0.3922C - 0.4638AB + 0.1525AC + 0.2075BC + 0.2925A^2 + 0.039B^2 + 0.5715C^2$$

(20)

表4 埋土深度回归模型方差分析

Tab.4 Analysis of variance of buried depth

regression model					
来源	平方和	自由度	均方和	F	P
模型	16.94	9	1.88	6.65	0.010 3 *
A	12.28	1	12.28	43.36	0.000 3 **
B	0.032 8	1	0.032 8	0.115 9	0.743 5
C	1.22	1	1.22	4.32	0.076 2
AB	0.865 8	1	0.865 8	3.06	0.123 8
AC	0.093 6	1	0.093 6	0.330 7	0.583 2
BC	0.172 2	1	0.172 2	0.608 3	0.461 0
A^2	0.349 1	1	0.349 1	1.23	0.303 5
B^2	0.006 4	1	0.006 4	0.022 6	0.884 7
C^2	1.38	1	1.38	4.86	0.063 4
残差	1.98	7	0.283 1		
失拟项	1.56	3	0.519 4	4.90	0.079 3
误差	0.423 7	4	0.105 9		
总计	18.93	16			

注: * 表示影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$); ** 表示影响极显著 ($P < 0.01$)。下同。

根据回归模型分析结果,利用 Design-Expert 13.0 软件图形分析模块得到响应曲面,如图 9a~9c 所示。从图中可以看出,随着刀盘螺距增加,埋土深度增加;而随着螺旋长度增加,埋土深度先减少后增加;挡土罩开口角度对埋土深度的影响不大,响应曲面分析结果与回归模型方差分析一致。

同理,对水平前进阻力结果进行二次回归模型方差分析,如表5所示。

由表5可知,模型 P 值为 0.001 6,表示该模型极显著。 B 影响极显著, AC 、 C^2 影响显著,其余因素

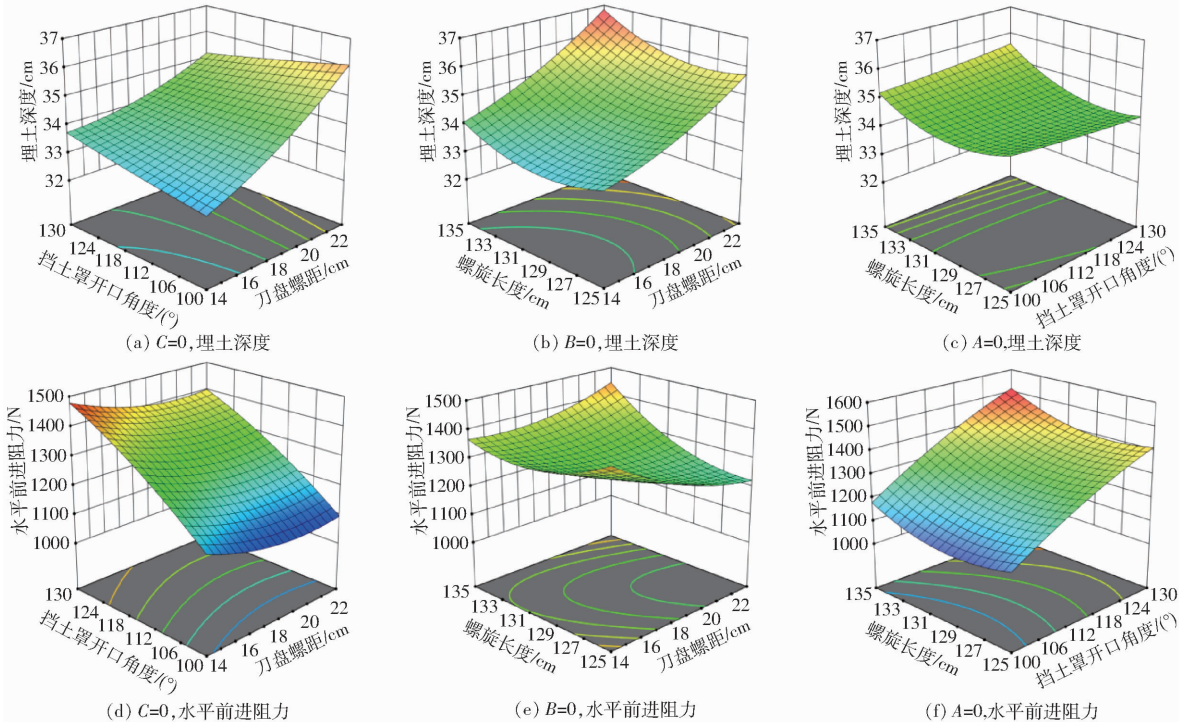


图9 试验因素交互作用对埋土深度与水平前进阻力的响应曲面

Fig.9 Response surfaces of interaction of test factors on buried depth and horizontal forward resistance

表 5 水平前进阻力回归模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance of horizontal forward resistance regression model

来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	2.584 × 10 ⁵	9	28 713.92	12.26	0.001 6 **
<i>A</i>	8 415.59	1	8 415.59	3.59	0.099 8
<i>B</i>	1.955 × 10 ⁵	1	1.955 × 10 ⁵	83.50	<0.000 1 **
<i>C</i>	12 274.09	1	12 274.09	5.24	0.055 9
<i>AB</i>	51.25	1	51.25	0.021 9	0.886 6
<i>AC</i>	20 277.38	1	20 277.38	8.66	0.021 6 *
<i>BC</i>	467.21	1	467.21	0.199 5	0.668 6
<i>A</i> ²	5 418.68	1	5 418.68	2.31	0.172 0
<i>B</i> ²	2 578.38	1	2 578.38	1.10	0.328 9
<i>C</i> ²	15 014.99	1	15 014.99	6.41	0.039 1 *
残差	16 393.51	7	2 341.93		
失拟项	13 065.01	3	4 355.00	5.23	0.071 8
误差	3 328.50	4	832.12		
总计	2.748 × 10 ⁵	16			

影响均不显著,失拟项 *P* 值为 0.071 8,不显著。对水平前进阻力影响从大到小依次为挡土罩开口角度、螺旋长度、刀盘螺距。水平前进阻力二次多项式回归模型为

$$Y_2 = 1\,273.73 - 32.43A + 156.82B + 39.29C - 3.57AB + 70.98AC + 10.81BC + 36.44A^2 - 24.75B^2 + 59.72C^2 \quad (21)$$

根据回归模型分析结果,利用 Design-Expert 13.0 软件图形分析模块得到响应曲面,如图 9d ~ 9f 所示。从图中可看出,随着挡土罩开口角度增加,水平前进阻力增加;而随着螺旋长度增加,水平前进阻力先减少后增加;刀盘螺距对水平前进阻力的影响不大,响应曲面分析结果与回归模型方差分析一致。

为得到较优作业参数组合,应用 Design-Expert 13.0 中 Optimization 模块的 Numerical 分析工具对回归模型进行优化,取埋土深度最大、水平前进阻力最小为优化目标,得到 3 个试验因素优化结果:刀盘螺距为 23 cm,挡土罩开口角度为 100°、螺旋长度为 125 cm,此时埋土深度为 36.39 cm,水平前进阻力为 1 059.99 N,各项参数协同性最优。

4 田间试验

4.1 试验条件与材料

2024 年 11 月,在宁夏回族自治区青铜峡市邵岗镇大沟村葡萄种植园区进行田间埋土试验,试验距离 200 m,随机取 5 点测量埋土土垄数据,并取平均值。试验仪器设备包括土壤水分测试仪、土壤坚实度仪、钢卷尺等。作业面积为 0.333 hm²,土壤含水率依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》

测定,为 23.45%,土壤坚实度依据 NY/T 1121.18—2006《土壤坚实度的测定》测定,为 10.3 kg/cm³。

应用仿真分析得到的试验参数,即刀盘螺距 23 cm、挡土罩开口角度 100°、螺旋长度 125 cm,进行物理样机制造。作业前将机具横跨于葡萄杆架之间,对准葡萄藤两侧,调整双边旋抛刀距离葡萄藤蔓各 60 cm。作业时设定锥形旋抛装置转速为 550 r/min,以前进速度 1 m/s 进入埋土区域,埋土高度测定与作业油耗统计设备如图 10 所示。

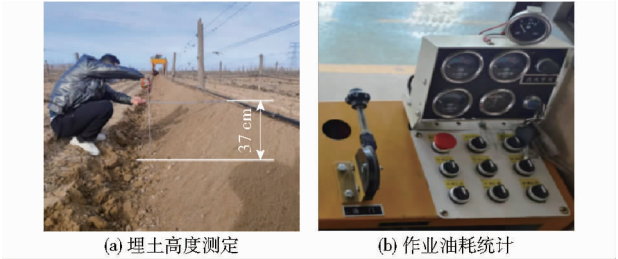


图 10 试验测量与统计设备

Fig.10 Test measurement and statistics

4.2 试验方法

本试验主要对埋土深度和水平前进阻力进行统计和测算,试验过程及方法参照 DB64/T 915—2013《葡萄埋藤机》对葡萄埋藤机的埋土性能进行测试,在试验距离内,随机取 5 点作为测点,统计所有测点埋土深度,并取平均值;水平前进阻力采用间接法计算得出,由于本机采用油门直驱作业,单位时间内油耗可从与发动机直连的油量表读取,水平前进阻力增大时,发动机负荷增加,通过油耗变化间接计算水平前进阻力,样机动力采用玉柴 YCS06200-62 型直列六缸水冷 147 kW 柴油发动机,额定转速 2 300 r/min,埋土深度和水平前进阻力计算式为

$$\begin{cases} B_1 = \frac{\sum B_i}{n_x} \\ F_1 = \frac{n_k Q \rho_c \eta_e \eta_t}{u g \eta_m} \end{cases} \quad (22)$$

- 式中 n_x ——测量次数
 B_1 ——平均埋土深度,cm
 B_i ——每个测点埋土深度,cm
 F_1 ——水平前进阻力,N
 Q ——油耗,L/h
 n_k ——发动机转速,取 2 300 r/min
 ρ_c ——柴油密度,取 830 kg/m³
 η_e ——发动机效率,取 0.3
 η_t ——传动效率,取 0.8
 η_m ——行走装置效率,取 0.7
 u ——作业速度,取 1 m/s

从式(22)可看出,水平前进阻力与耗油量呈正

比,对耗油量进行测定,可计算出水平前进阻力。基于式(22),对耗油量进行 5 次随机测量,取平均值,计算水平前进阻力。

埋土深度稳定性变异系数衡量埋土作业组件埋土深度稳定性,按式(22)计算得到平均埋土深度,埋土深度标准差和埋土深度稳定性变异系数计算式为

$$\begin{cases} S_i = \sqrt{\frac{\sum (B_i - B_1)^2}{n_x - 1}} \\ \delta_i = \frac{S_i}{B_1} \times 100\% \end{cases} \quad (23)$$

式中 S_i ——埋土深度标准差,cm
 δ_i ——埋土深度稳定性变异系数,%

根据式(23),对埋土深度标准差及埋土深度稳定性变异系数重复计算 5 次,取平均值。

4.3 试验结果与分析

埋土作业试验如表 6 所示,对每个检测点进行测量,实测埋土深度平均值为 39 cm,与 Design-Expert 13.0 分析得出的埋土深度(36.39 cm)相对误差为 6.7%,实际埋土深度大于仿真模拟结果,埋土深度标准差平均值为 0.74 cm,埋土深度稳定性变异系数平均值为 1.86%,远小于 15%的农艺最低要求,证明埋土深度稳定性好;测量 5 次得到的平均油耗为 17.2 L/h,根据式(22)计算,水平前进阻力平均值为 1 149 N,与 Design-Expert 13.0 分析得出的水平前进阻力 1 059.9 N 相对误差为 7.7%。田间工况较为复杂,实际埋土效果和水平前进阻力与模拟仿真结果有一定差距,总体结果符合当地农艺需求。

表 6 埋土作业试验结果

Tab.6 Buried soil operation test results

参数	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	平均值
油耗/(L·h ⁻¹)	17.2	17.4	18.1	16.8	16.5	17.2
埋土深度/cm	39.1	38.5	40.4	37.7	39.3	39.0
水平前进阻力/N	1 149	1 162	1 209	1 122	1 102	1 149
埋土深度标准差/cm	0	0.50	1.05	1.14	1.00	0.74
埋土深度稳定性变异系数/%	0	1.20	2.60	2.90	2.60	1.86

埋土作业最终效果如图 11 所示。由图 11 可看出,藤蔓上方覆盖了较为规整梯形土垄,结合测量统

计数据,双边旋抛式埋土的作业效果符合当地农艺需求。总体上,该机提高了机械作业埋土效率,减少了埋土高度不均匀问题,埋土深度仿真与田间试验参数基本吻合,符合实际生产需求。



图 11 埋土作业田间效果

Fig. 11 Field effect of buried soil operation

5 结论

(1)为解决葡萄藤冬季埋土效率低、埋土深度不足的问题,采用锥形旋抛技术,研制一种基于锥形螺旋结构的葡萄双边旋抛埋土装置。该装置具备高效的土壤旋切与旋抛式定向抛送功能,可同步完成机具行进方向两侧葡萄藤蔓的覆土作业。对螺旋刀盘、挡土罩等核心部件进行了结构设计与选型分析;建立了螺旋曲线数学模型并完成验证;通过对变化敏感的关键参数(挡土罩开口角度、刀盘螺距、螺旋长度)进行设计计算,确定了其合理取值范围。

(2)进行了仿真优化与参数确定,构建了锥形旋抛装置离散元分析模型,采用 Design-Expert 软件进行三因素三水平仿真试验,结合响应面分析法验证了参数合理性,并通过数值优化算法得最优参数组合,即刀盘螺距 23 cm、挡土罩开口角度 100°、螺旋长度 125 cm,此时模型预测埋土深度为 36.39 cm,水平前进阻力为 1 059.99 N,装置综合性能最优。

(3)开展了样机试验与性能验证,完成了装置样机加工制造,田间试验结果证实了仿真模型的可靠性。实际测得平均埋土深度为 39 cm,平均水平前进阻力为 1 149 N,与仿真值相对误差分别为 6.7%和 7.7%,其平均埋土深度稳定性变异系数为 1.86%。作业后藤蔓被完整覆盖于规则梯形土垄中,无需二次覆土,埋土深度与稳定性均符合宁夏产区农艺要求,满足规模化生产需求。

参 考 文 献

[1] 王彤心,杨继红,苏媛,等.我国葡萄埋藤和清土作业机械的应用现状[J].中外葡萄与葡萄酒,2023(6):117-123.
WANG Tongxin,YANG Jihong,SU Yuan,et al. Application status of grapevine burying and soil clearing machinery in China[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine,2023(6):117-123. (in Chinese)

[2] LI Xiang,YANG Fazhan,LI Baogang,et al. Research progress and prospects of mechanized planting technology and equipment for wine grapes[J]. Agronomy,2025,15:1207.

- [3] 卡地尔艳木·塔依尔.戈壁地葡萄埋藤机关键零部件动力学分析及结构优化设计[D].乌鲁木齐:新疆大学,2023.
KA Dieryanmu·Tayier. Dynamic analysis and structural optimization design of key parts of grape vine burying machine in Gobiland[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2023. (in Chinese)
- [4] 孙鹏飞. 铲抛式葡萄埋藤机的设计与性能研究[D]. 保定:河北农业大学,2014.
SUN Pengfei. Design and performance research of dig-throwing machine for burying grape vine[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2014. (in Chinese)
- [5] 郭辉,孙滨洪,毕志波,等.悬挂式葡萄埋藤机的设计与试验[J].农机化研究,2018,40(12):86-90.
GUO Hui, SUN Binhong, BI Zhibo, et al. Design and experiment of the suspended grape vine burying machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(12): 86-90. (in Chinese)
- [6] YANG S, CUI Z, WANG Q, et al. Parameter optimization for a scraping-rotating-brushing dehilling machine using EDEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(6): 152-165.
- [7] 李芳环,何义川,刘洋,等.1PM-100型葡萄埋藤机的设计与试验[J].中国农机化学报,2019,40(3):13-18.
LI Fanghuan, HE Yichuan, LIU Yang, et al. Design and experiment of 1PM-100 grape vine burying machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 13-18. (in Chinese)
- [8] 庞俊杰,宁书臣,李忆莹. MT200-2 葡萄埋藤机及其作业技术要点[J]. 现代农业装备, 2006(2): 70-71.
- [9] 刘仁广,高希君. 3MT-5 型葡萄埋藤机的设计[J]. 农业科技与装备, 2015(10): 23-24, 28.
- [10] 田荣昌. 圆锥式葡萄埋藤机的研制与试验[D]. 银川:宁夏大学,2020.
TIAN Rongchang. Development and experiment research of conical grape vine burying machine[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020. (in Chinese)
- [11] LI Xiang, YANG Fazhan, SUN Ruijun, et al. Design of a gantry crawler multifunctional operation platform for wine grape cultivation[J]. Agriculture, 2024, 14: 1587.
- [12] 赵宏波,王学振,郑智旗,等. 农业装备领域离散元法应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 1-19.
ZHAO Hongbo, WANG Xuezheng, ZHENG Zhiqi, et al. Research status and progress of discrete element method applications in agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 1-19. (in Chinese)
- [13] 李金明,张佳喜,王茂博,等. 柔性刷辊式葡萄藤清土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 138-148.
LI Jinming, ZHANG Jiayi, WANG Maobo, et al. Design and experiment of brush roll grapevine soil clearing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 138-148. (in Chinese)
- [14] LI Xiang, YANG Fazhan, LI Baogang, et al. Development of a dual-sided soil-clearing machine with scraping, rotating, and vibrating components for winemaking grapes[J]. Agriculture, 2024, 15: 55.
- [15] 何恩光,高猛. 双螺旋推进式行走机构设计与仿真[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(1): 72-76, 82.
HE Enguang, GAO Meng. Design and simulation of double screw-propelled walking mechanism[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2025, 23(1): 72-76, 82. (in Chinese)
- [16] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105349.
- [17] 顿国强,刘文辉,杜佳兴,等. 弧槽双螺旋式排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 118-125, 174.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, DU Jiaxing, et al. Optimal design and experiment of arc groove double-spiral fertilizer discharge device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 118-125, 174. (in Chinese)
- [18] 许静,刘宝伟,陈平录,等. 油茶林立式螺旋松土除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 79-87.
XU Jing, LIU Baowei, CHEN Pinglu, et al. Development and experiment of vertical spiral cutter for soil loosening and weeding in *Camellia oleifera* forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 79-87. (in Chinese)
- [19] 朱惠斌,吴亮,白丽珍,等. 免耕播种机无轴螺旋排肥输肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 125-134.
ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Design and experiment of shaftless spirals fertilizer discharging and fertilizer delivery device of no tillage planters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 125-134. (in Chinese)
- [20] 刘晓东,丁幼春,舒彩霞,等. 螺旋扰动锥体离心式排肥器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 40-49.
LIU Xiaodong, DING Youchun, SHU Caixia, et al. Design and experiment of spiral disturbance cone centrifugal fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(2): 40-49. (in Chinese)
- [21] WEI L, HUANG W, LIU J, et al. DEM simulation of subsoiling in tropical sugarcane fields: effects of opposing subsoiler design and model parameters[J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 9: 100593.
- [22] 孙景彬,刘琪,杨福增,等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 63-73.
SUN Jingbin, LU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63-73. (in Chinese)

- Spinning Technology, 2025(2):59–64. (in Chinese)
- [13] 蒋波, 韩庆锋, 劳天天, 等. 倍捻筒子首尾纱捻度分布的研究[J]. 毛纺科技, 2024, 52(12):26–30.
JIANG Bo, HAN Qingfeng, LAO Tiantian, et al. Study on the twist distribution of tube head and tail yarn in double twister[J]. Wool Textile Journal, 2024, 52(12):26–30. (in Chinese)
- [14] 洪焱, 沈小林, 田野, 等. 基于自由转子的纱线扭矩的检测方法[J]. 纺织学报, 2021, 42(10):61–66.
HONG Yan, SHEN Xiaolin, TIAN Ye, et al. Measurement method of yarn torque using a free rotor[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(10):61–66. (in Chinese)
- [15] 樊桂琪, 邵伟光, 蔡利海, 等. 加捻对线密度较大涤纶单纱拉伸力学性能的影响[J]. 毛纺科技, 2023, 51(5):1–6.
FAN Guiqi, SHAO Weiguang, CAI Lihai, et al. Influence of twisting on tensile properties of polyester coarse count single yarn [J]. Wool Textile Journal, 2023, 51(5):1–6. (in Chinese)
- [16] 中国农业大学. 一种机电两用的青草成辫成型装置: 201410670106.2[P]. 2016–04–27.
- [17] 北京印刷学院. 一种单筒青草成辫成型装置: 201910896916.2[P]. 2020–11–03.
- [18] 余永, 贺刚, 王光辉, 等. 苜蓿同向异形制备与堆存试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3):99–105.
YU Yong, HE Gang, WANG Guanghui, et al. Preparation and storage experiment of cocurrent special-shaped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):99–105. (in Chinese)
- [19] 叶大鹏, 赵熠威, 黄德耀, 等. 卧旋式生物有机肥发酵罐翻堆工艺设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7):662–670.
YE Dapeng, ZHAO Yiwei, HUANG Deyao, et al. Design and experiment of horizontal rotating bioorganic fertilizer fermentation tank flipping process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7):662–670. (in Chinese)
- [20] 中国农业大学. 一种用于柔性材料的旋转牵引输出成型装置: 201610371230.8[P]. 2018–01–02.
- [21] 熊师, 方宪法, 牛康, 等. 对虾定向输送装置设计与参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5):324–331.
XIONG Shi, FANG Xianfa, NIU Kang, et al. Design and parameter optimization of directional conveying device for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5):324–331. (in Chinese)
- [22] 熊师, 赵博, 胡小鹿, 等. 对虾逐只分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):357–365.
XIONG Shi, ZHAO Bo, HU Xiaolu, et al. Design and experiment on prawn single separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):357–365. (in Chinese)
- [23] 李帅, 王光辉, 王德成, 等. 青草制辫成型装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7):112–120.
LI Shuai, WANG Guanghui, WANG Decheng, et al. Design and experiment of green grass braid forming device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):112–120. (in Chinese)
- [24] 耿端阳, 张道林, 王相友, 等. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [25] 李尚平, 李鑫志, 文春明, 等. 双芽蔗段横向种植机沟深控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12):22–32.
LI Shangping, LI Xinzhi, WEN Chunming, et al. Tillage depth control system for double-bud cane section transverse planters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):22–32. (in Chinese)
- [26] 施印炎, 汪小昆, 章永年, 等. 芦苇有序收获机往复切割力影响因素试验与分析[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12):46–53.
SHI Yinyan, WANG Xiaochan, ZHANG Yongnian, et al. Test and analysis on the influence factors of reciprocating cutting force of *Artemisia selengensis* harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12):46–53. (in Chinese)

(上接第 88 页)

- [23] 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 Liming, YUAN Quanchun, 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. (in Chinese)
- [24] 苏媛, 刘文政, 房玉林, 等. 同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7):105–115.
SU Yuan, LIU Wenzheng, FANG Yulin, et al. Design and experiment of coaxial differential speed centrifugal crushing device for grape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7):105–115. (in Chinese)
- [25] KAN Z, ALLEN M D, HONG W, et al. Design and experiment of anti-vibrating and anti-wrapping rotary components for subsoiler cum rotary tiller[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(4):47–55.
- [26] ZHAO H, LI H, MA S, et al. The effect of various edge-curve types of plain-straight blades for strip tillage seeding on torque and soil disturbance using DEM[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 202(38):104674.