doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.028

基于阿基米德曲线的螺旋拨齿式捡石机设计与试验

张　佳[1,2]　杜亚坤[2]　马小雯[1]　马少腾[1,2]　肖　萍[1]　张佳喜[2]
(1. 新疆工程学院机电工程学院, 乌鲁木齐 830023; 2. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对现有捡石机存在捡净率低、工作阻力大等问题,设计了一种基于阿基米德曲线的螺旋拨齿式捡石机。通过对挖掘齿在挑石及抛石作业过程进行运动学分析,确定了主要零部件的结构参数与工作参数。为了验证捡石机工作的可靠性与作业效果,以挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度、刀轴转速为试验因素,石块捡净率、作业扭矩为评价指标,选择 Box－Behnken 试验设计方法进行三因素三水平正交试验,通过 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析和响应面分析,明晰了试验因素及交互作用对捡石机作业性能的影响规律,对构建的线性回归模型进行多目标求解优化,结果表明:当挖掘齿刀刃起始滑切角为 14.73°、机具前进速度为 0.34 m/s、刀轴转速为 171.89 r/min 时捡石效果最佳。以优化后的参数进行田间验证试验,结果表明,平均石块捡净率为 90.04%,满足农田捡石作业要求。

关键词: 捡石机; 挖掘齿; 阿基米德曲线; 运动学分析
中图分类号: S226.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0290-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Spiral Toothed Stone Picking Machine Based on Archimedes Curve

ZHANG Jia[1,2]　DU Yakun[2]　MA Xiaowen[1]　MA Shaoteng[1,2]　XIAO Ping[1]　ZHANG Jiaxi[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Institute of Engineering*, *Urumqi* 830023, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: To enhance the efficiency and reduce the working resistance of stone picking operations, a novel Archimedes spiral-shaped rake stone picker was designed and evaluated, aiming to address the limitations of conventional stone pickers. A kinematic analysis of the digging teeth during stone picking and throwing operations was conducted to determine the optimal structural and operational parameters for key components, thereby ensuring efficient stone removal and minimizing energy consumption, which are crucial factors for optimizing the stone picker's overall performance. To validate the reliability and performance of the stone picker, a three-factor, three-level response surface experiment based on Box－Behnken design was employed to identify the optimal operating parameters that maximize stone picking efficiency and minimize operating torque. The digging teeth blade initial sliding angle, machine forward speed, and shaft rotation speed were selected as experimental factors, while stone cleaning efficiency and operating torque served as evaluation indicators. Analysis of variance (ANOVA) and response surface analysis were performed by using Design-Expert software to assess the influence of experimental factors and their interactions on the stone picker's performance. Multi-objective optimization of the established linear regression model revealed that the optimal stone picking efficiency was achieved with a digging teeth blade initial sliding angle of 14.73°, a machine forward speed of 0.34 m/s, and a shaft rotation speed of 171.89 r/min. Field validation tests conducted with the optimized parameters demonstrated an average stone cleaning efficiency of 90.04%, meeting the requirements for efficient stone picking in agricultural fields.

Key words: stone picking machine; digging teeth; Archimedes curve; kinematic analysis

收稿日期: 2024－08－26　修回日期: 2024－09－20
基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A245)和新疆维吾尔自治区重大专项(2022A02007－2－2)
作者简介: 张佳(1987—),男,副教授,博士,主要从事农业机械创新设计研究,E-mail: 304165686@qq.com

0　引言

耕地资源是农业经济发展过程中重要的基础资源，农用土地质量的提升关系到农业的生态安全，也是实现农业高质量发展的必要条件[1-3]。2022 年新疆已建成高标准农田 3.34×10^6 hm^2，占耕地面积 47.39%。而现有农业耕地中，几乎都会存在不同数量、大小的石块，在新开发的戈壁农田中石块的数量更多。农田中的石块对农作物的种植影响较大，直接影响农田土壤的养分、水分和作物的生长，降低了农作物播种率以及出芽率[4-5]，减少了经济效益，给农田的生产和管理等带来很大困难，同时也增大了农机具的作业阻力，增加了农业生产的成本，严重制约农业机械化和农业经济的发展。早期，我国主要采用人工捡拾的方法将覆盖于地表的石块捡出农田，但人工捡拾石块劳动强度大，且有许多石块往往埋藏在耕层内，很难大面积推广应用。因此，我国农业耕地迫切需要研制一种捡拾效率高的捡石装备。

目前，国内外科研工作者根据石块清理的机理不同，研发了链齿式、铲式、轮齿式、齿耙式、螺旋输送式、铲刀转笼式、铲链式等捡石机[6-8]。美国 Rockland 公司设计了一种采用液压油缸机构挖掘的“Rotoveyer”土壤捡石机[9]，该机可将 30 cm 土层以内的土壤和石块全部挖掘出来并进行筛分，但作业功耗大、造价高。加拿大 HIGHLINE 公司设计了一种具有导向和缓冲集石作用的 XL 系列捡石机[10]，有效降低了捡石机功率消耗。西班牙特格纳公司设计了一种筛分式土壤捡石机[11]，该机的筛分部件采用独创的筛分工作原理，分离土壤的效果较好。于玉真等[12]利用动力学方法，研究了链齿式捡石机栅条齿与土壤间的作用关系，并建立了栅条齿切土时阻力的数学模型。牛丛等[13]利用 EDEM 离散元仿真软件研究了输送分离筛线速度、振幅及振频对石土筛分、输送过程的影响。李生泉等[14]设计了一种前挖后铲式捡石机，通过动力学仿真分析验证了捡石机系统动力学模型的合理性。卜明杰等[15]设计了一种具有松土碎石和防卡功能的复垦农田链式捡石机，并进行了性能试验。综上所述，国内外针对不同耕地条件下的捡石装备进行了研究，但多存在捡石率低、通用性差、生产成本高等问题。

针对现有捡石机存在的捡净率低、工作阻力大等问题，本文提出基于阿基米德曲线设计挖掘齿的技术方案，设计一种螺旋拨齿式捡石机，将石块等物料从土壤中挑起并形成集条。基于挖掘齿在挑石及抛石作业过程进行运动学分析，对挖掘装置等关键零部件进行设计，分析捡石机的结构参数和工作参数及其交互作用对石块捡净率和作业扭矩的影响，确定捡石机较优参数并进行试验验证，为农田土壤捡石机的发展提供参考。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

螺旋拨齿式捡石机前端至后端工作部件依次为牵引架、减速箱、传动轴、主机架、链传动系统、外侧架和挖掘装置，其中挖掘装置为主要工作部件，对称安装在主机架的两侧。螺旋拨齿式捡石机总体结构如图 1 所示，机具主要参数如表 1 所示。

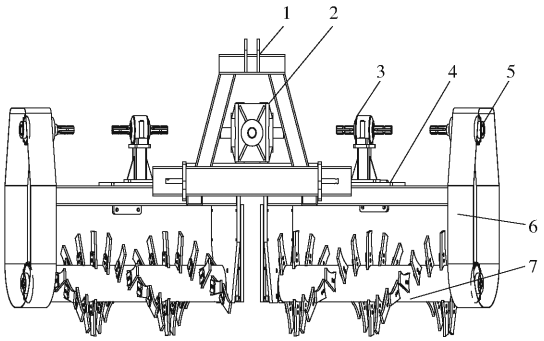


图 1　螺旋拨齿式捡石机总体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of spiral toothed stone picking machine

1. 牵引架　2. 减速箱　3. 传动轴　4. 主机架　5. 链传动系统　6. 外侧架　7. 挖掘装置

表 1　机具主要参数

Tab. 1　Main parameters of device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	2.5×1.0×1.1
配套动力/kW	85
工作幅宽/m	2.5
前进速度/(m·s^{-1})	0.3～0.5
挖掘装置转速/(r·min^{-1})	156～260
最大捡石深度/mm	50

1.2　工作原理

螺旋拨齿式捡石机在田间作业时，牵引架采用三点悬挂机构与拖拉机相连，由拖拉机牵引前进并提供动力。拖拉机输出的动力经万向节传动轴传递给减速箱，经减速箱减速后将动力分别传递给左右传动轴，左右传动轴再利用链传动系统将动力传递给挖掘装置，挖掘装置带动挖掘齿旋转(旋转方向与捡石机前进方向一致)。同时，滚筒中心轴上固装的挖掘齿采用双头螺旋线排列，两侧挖掘装置呈 V 形开口设计与机具的前进方向呈一定夹角偏置安装，可以将土壤表面和一定深度耕层的石块向前挑起并汇聚到中部，完成捡石机的挑石和集石作业。

2 关键部件设计

2.1 挖掘装置设计

挖掘装置主要由滚筒中心轴、动刀架、挖掘齿等组成,其中滚筒中心轴与外侧架之间通过轴承连接相对转动,动刀架焊接在滚筒中心轴上,挖掘齿通过螺栓安装在动刀架上,其结构示意图如图 2 所示。

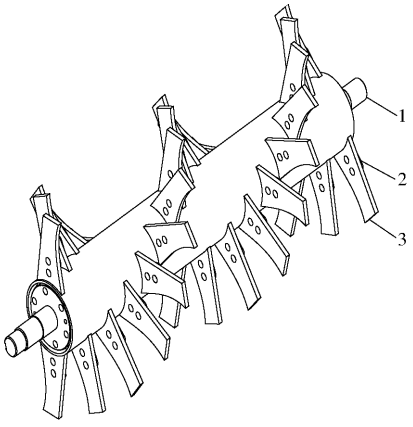


图 2 挖掘装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of excavation component structure

1. 滚筒中心轴 2. 动刀架 3. 挖掘齿

2.1.1 挖掘齿刃口曲线设计

挖掘齿作为捡石机的重要工作部件,其结构参数对捡石机的作业效果和切土功耗具有较大影响。挖掘齿刀刃前半部刃口曲线采用阿基米德螺线设计,有利于减少捡石机的工作滑切阻力并增加耕深[16-17]。刀刃每转过单位弧度,挖掘齿的径向切土长度相同。

阿基米德曲线方程为

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho\theta' \tag{1}$$

$$\theta_n = \frac{\rho_n - \rho_0}{\rho_n}\tan\tau_n \tag{2}$$

$$\Delta\rho = (\rho_n - \rho_0)/\theta_n \tag{3}$$

式中 ρ——阿基米德曲线任意一点极径,mm

θ'——阿基米德曲线任意一点极角,rad

ρ_0——阿基米德曲线起点极径,mm

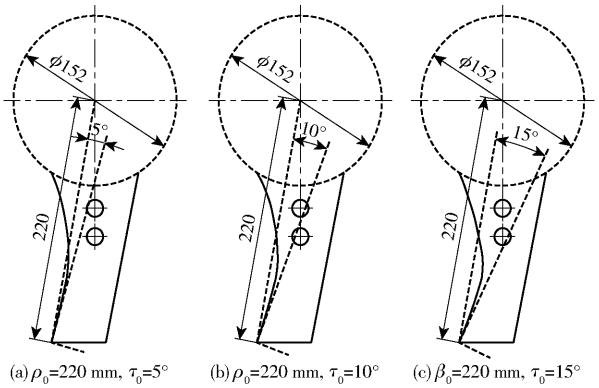
ρ_n——阿基米德曲线终点极径,mm

$\Delta\rho$——螺线极角增加单位弧度时极径增量,mm/rad

θ_n——阿基米德曲线终点极角,rad

τ_n——阿基米德曲线终点处滑切角,(°)

由式(1)可知,选用不同的 ρ_0 和 $\Delta\rho$ 参数组合会得到不同的挖掘齿滑切曲线方程,为保证石块能够沿着挖掘齿的滑切面向外运动,需保证该滑切曲线上任意一点处的滑切角 τ 大于石块和挖掘齿的摩擦角[18]。依据《农业机械设计手册》[19]的设计要求,确定 $\Delta\rho = 0.5$ mm/rad、$\rho_0 = 220$ mm。为探究不同挖掘齿刀刃起始滑切角 τ_0 的滑切作业效果,本文设计$\tau_0 = 5°$、$\tau_0 = 10°$、$\tau_0 = 15°$共 3 种不同挖掘齿刀刃起始滑切角并进行捡石性能试验,如图 3 所示。



(a) ρ_0=220 mm, τ_0=5° (b) ρ_0=220 mm, τ_0=10° (c) β_0=220 mm, τ_0=15°

图 3 试验挖掘齿结构示意图

Fig. 3 Schematics of experimental digging tooth structure

2.1.2 挖掘齿刀刃轨迹分析

挖掘装置工作时与地表发生相对运动,挖掘齿的运动为机具水平匀速运动与绕滚筒中心轴旋转运动的合成,挖掘齿弧段上任意一点的运动轨迹为余摆线,挖掘齿刀刃运动轨迹如图 4 所示。

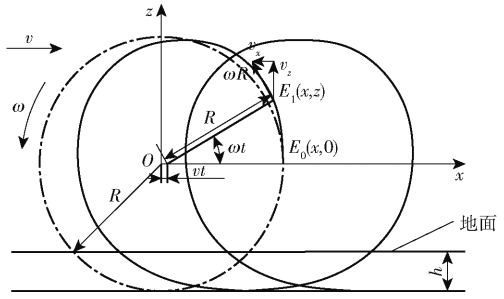


图 4 挖掘齿刀刃运动轨迹

Fig. 4 Digging tooth blade motion trajectory

以挖掘装置滚筒中心轴在地面上的投影点 O 为坐标原点,机具前进方向为 x 轴,竖直向上方向为 z 轴,建立直角坐标系 Oxz。对挖掘齿的端点 E 进行运动分析,则挖掘齿在点 E 处的水平位移方程和竖直位移方程为

$$\begin{cases} x_E = vt + R\cos(\omega t) \\ z_E = -R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{4}$$

式中 x_E、z_E——点 E 在 x 轴和 z 轴方向上位移,mm

v——机具前进速度,m/s

R——挖掘齿转动半径,mm

ω——挖掘齿转动角速度,rad/s

t——机具作业时间,s

$t = 0$ 时,端点 E 位于 x 轴上的 E_0 处。

由式(4)可得挖掘齿在点 E 接触石块时的水平速度方程和竖直速度方程为

$$\begin{cases} v_{Ex} = v - R\omega\sin(\omega t) \\ v_{Ez} = -R\omega\cos(\omega t) \end{cases} \tag{5}$$

则挖掘齿在点 E 的绝对速度 v_E 为

$$v_E = \sqrt{v^2 - 2vR\omega\sin(\omega t) + (R\omega)^2} \tag{6}$$

由挖掘齿的结构及作业过程可知

$$\sin(\omega t) = 1 - \frac{h}{1\,000R} \tag{7}$$

式中　h——挖掘齿入土深度，mm

设挖掘齿线速度 v_1 与机具前进速度 v 之比为 k，则

$$k = \frac{v_1}{v} = \frac{\pi nR}{30v} \tag{8}$$

由式(8)可得挖掘齿转速 n 为

$$n = \frac{30kv}{\pi R} \tag{9}$$

结合式(4)～(7)可知，影响挖掘齿端点绝对速度的主要结构参数有机具前进速度 v、挖掘齿转速 n、挖掘齿转动半径 R 和挖掘齿入土深度 h。在满足设计要求的前提下，挖掘齿旋转半径不能过大，随着挖掘齿旋转半径的增大，挖掘装置所受的扭矩和整机的作业扭矩均增加。根据石块覆盖高度及石块覆盖量，综合机具的结构要求和田间通过性能设计挖掘齿半径 R = 220 mm、机组前进速度 v 为 0.3～0.5 m/s，查阅《农业机械设计手册》[19] 选取挖掘齿速比 k = 12。将上述参数代入式(9)可得挖掘齿转速为 156～260 r/min。

2.1.3　挖掘齿数量及排列分析

挖掘齿的数量和排列方式会影响捡石机的作业质量、功率消耗及平衡性能，它是决定捡石机性能的重要因素之一。为避免同一挑石区域内相邻挖掘齿之间夹石，设计挖掘装置的每个刀盘挖掘齿数 N_1 = 2，刀盘数 N_2 = 17，同一挑石区域内两把挖掘齿夹角取 180°。

挖掘齿数量理论计算公式为[20]

$$N_c = \frac{1\,000\lambda N_1}{P} \tag{10}$$

式中　N_c——挖掘齿总数

P——理论挖掘齿安装间距，mm

λ——盘距系数，取 λ = 1

为降低焊接刀轴作业过程中，附加载荷的波动，提升单体的作业性能，要求挖掘齿的理论挑石节距相等，而理论挑石节距除与机具前进速度及挖掘部件转速相关外，还与刀盘齿数、刀盘数、挖掘齿间距、挖掘齿排布方式相关，所述挖掘齿采用轴向等距、周向均布焊接于滚筒中心轴上。

挖掘装置的打击规律分析如下：周向相邻挖掘齿连续打击时段内，机具前进方向上的进距 S_1 为

$$S_1 = \frac{60v}{nN_1N_2} \tag{11}$$

单刀盘相邻挖掘齿连续打击时段内，机具前进方向上的进距 S_2 为

$$S_2 = \frac{60v}{nN_1} \tag{12}$$

欲使挑石节距相等，需满足[21]

$$P - S_1 = \lambda S_2 \pm S_1 \tag{13}$$

整理得出理论挖掘齿间距 P 为

$$\begin{cases} P = \dfrac{60\lambda v}{nN_1} \\ P = \dfrac{60v(\lambda N_2 + 2)}{nN_1N_2} \end{cases} \tag{14}$$

将上述参数代入式(14)计算可得，刀齿切土节距相等下的理论挖掘齿安装间距 P 分别为 58、65 mm，为减小机具纵向尺寸，设定挖掘齿轴向间距为 58 mm。将 P = 58 mm、N_1 = 2、λ = 1 代入式(10)计算可得 N_c = 34 把，即左右挖掘装置各安装有 34 把挖掘齿，且挖掘齿的滚筒中心轴与机具前进方向呈一定角度偏置安装。

进一步对挖掘齿的排列方式进行设计，挖掘齿选用合理的排列方式可以提高螺旋拨齿式捡石机的捡净率，并大幅度减小工作阻力。在实际工作过程中捡石机的工作量较大，考虑到机具工作的稳定性及作业效果，并使挖掘装置滚筒中心轴受力均匀，挖掘齿的排布方式选用双头螺旋线排列方式。左右两侧挖掘装置螺旋线旋向相反，升角相同，且呈对称结构布置，相邻刀盘定位孔转角为 25°，螺距为 800 mm，挖掘齿排列展开图如图 5 所示。

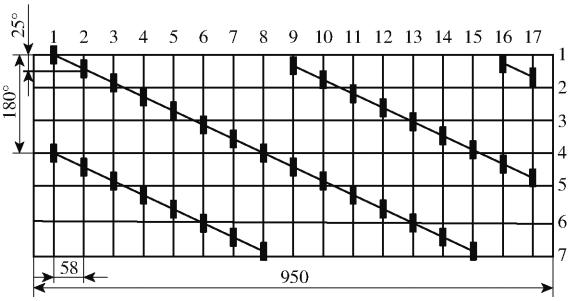


图 5　挖掘齿排列展开图

Fig. 5　Unfolded diagram of digging tooth arrangement

2.2　挖掘齿挑石过程运动学分析

将覆盖在地表和一定深度耕层的石块视为散粒体，进行受力分析。假设在整个作业过程中挖掘装置为匀速运动且入土深度保持稳定[22]，挖掘齿与石块接触点位于挖掘齿刀刃，机具前进方向与挖掘齿回转面方向的夹角为 θ。以滚筒中心轴中心 O 为坐标原点，机具前进方向为 X 轴，水平面内与 X 轴垂

直方向为 Y 轴,竖直向上方向为 Z 轴,建立坐标系 $OXYZ$,如图 6 所示。

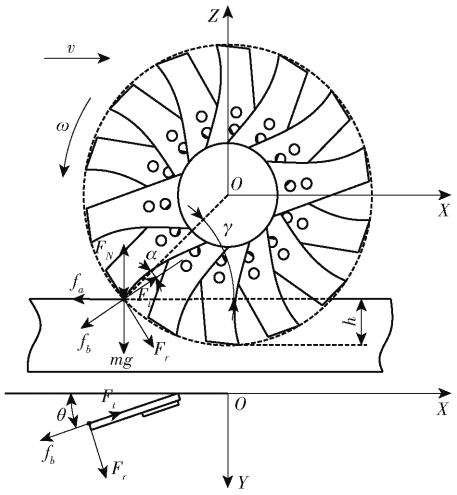


图 6 挖掘齿挑石过程对石块受力分析

Fig. 6 Analysis of force on gravel during process of digging and picking stones with teeth

利用空间力系的二次投影法,将挖掘齿开始接触石块时所受的力沿 X、Y、Z 方向进行分解,可知石块沿坐标轴方向的运动微分方程为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}^2X}{\mathrm{d}t^2} = F_t\cos(\gamma-\alpha)\cos\theta + F_r\sin(\gamma-\alpha)\sin\theta - \\ \qquad f_a - f_b\cos(\gamma-\alpha)\cos\theta \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2Y}{\mathrm{d}t^2} = F_r\sin(\gamma-\alpha)\cos\theta + f_b\cos(\gamma-\alpha)\sin\theta - \\ \qquad F_t\cos(\gamma-\alpha)\sin\theta \\ m\dfrac{\mathrm{d}^2Z}{\mathrm{d}t^2} = F_N + F_t\sin(\gamma-\alpha) - f_b\sin(\gamma-\alpha) - \\ \qquad F_r\cos(\gamma-\alpha) - mg \end{cases} \tag{15}$$

其中

$$\begin{cases} f_a = \mu_1 F_N \\ f_b = \mu_2 F_N\cos\gamma \\ F_t = \mu_2 F_r \end{cases} \tag{16}$$

式中 F_N——地表对石块的支持力,N

F_r——挖掘齿对石块的砍切力,N

F_t——挖掘齿对石块的滑切力,N

f_a、f_b——石块相对地表和挖掘齿的摩擦力,N

μ_1、μ_2——石块相对地表和挖掘齿的摩擦因数

γ——挖掘齿回转中心和石块起始接触点连线与机具前进方向的夹角,(°)

α——挖掘齿回转中心和石块起始接触点连线与滑切力夹角,(°)

m——石块质点质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

联立式(15)、(16)求解微分方程可得挖掘齿与石块起始接触点处石块质点在 X、Y、Z 方向的分速度为

$$\begin{cases} v_X = \dfrac{t}{m}[F_r(\mu_2\cos(\gamma-\alpha)\cos\theta + \sin(\gamma-\alpha)\sin\theta) - \\ \qquad \mu_1 F_N - \mu_2 F_N\cos(\gamma-\alpha)\cos\gamma\cos\theta] \\ v_Y = \dfrac{t}{m}[F_r(\sin(\gamma-\alpha)\cos\theta - \mu_2\cos(\gamma-\alpha)\sin\theta) - \\ \qquad \mu_2 F_N\cos\gamma\cos(\gamma-\alpha)\sin\theta] \\ v_Z = \dfrac{t}{m}[F_r(\mu_2\sin(\gamma-\alpha) - \cos(\gamma-\alpha)) + \\ \qquad F_N(1-\mu_2\cos\gamma\sin(\gamma-\alpha)) - mg] \end{cases} \tag{17}$$

结合挖掘装置结构可知

$$\gamma = \arcsin\frac{R-h-d}{R} \tag{18}$$

式中 d——石块直径,mm

由式(17)、(18)可知,影响切削石块速度的挖掘齿结构参数还有 θ、γ 和 α,而挖掘齿回转中心和石块起始接触点连线与机具前进方向的夹角 γ 取决于挖掘齿转动半径 R、挖掘齿入土深度 h、石块直径 d。挖掘装置的挖掘齿以分捡裸露地表及耕层浅部的石块为主,同时具有带状浅耕、浅耙松土效果,如入土过深,捡石机的动力消耗过大,难以实现捡石作业要求。因此,综合机具的结构要求,设计机具前进方向与挖掘齿回转面方向的夹角 $\theta=20°$、挖掘齿入土深度 $h=50$ mm。

2.3 挖掘齿抛石过程运动学分析

挖掘齿对覆盖于地表的石块进行挖掘的同时将其拨抛至捡石机的中部,挖掘齿旋转过程中与石块和土壤交变接触,为了研究石块的抛撒规律,对挖掘齿抛撒石块的瞬时运动状态进行了分析,并作如下假设:将石块简化为一个质点,挖掘齿在匀速条件下运动,忽略空气阻力的影响,忽略石块间的相互碰撞。石块在脱离挖掘齿的瞬时做斜上抛运动[23],其抛撒过程受力分析如图 7 所示。

选取 XOY 坐标系为定坐标系,其原点位于挖掘装置滚筒中心轴中心,不随滚筒中心轴旋转,xOy 动坐标系设置于挖掘齿侧面,坐标原点与滚筒中心轴中心重合,随滚筒中心轴一起运动。石块相对挖掘齿滑切面运动为相对运动,滚筒中心轴旋转为牵连运动,通过石块受力分析可知,其被抛出的条件为在挖掘齿曲面切线方向的分力大于石块与挖掘齿面之间的摩擦力。石块抛出条件为

$$\begin{cases} mg\sin(\beta-\delta) - F_n\sin\delta - N = 0 \\ F_n\cos\delta + mg\cos(\beta-\delta) - f_b \geqslant 0 \\ F_n = m\omega^2 R \\ f_b = \mu_2 N \end{cases} \tag{19}$$

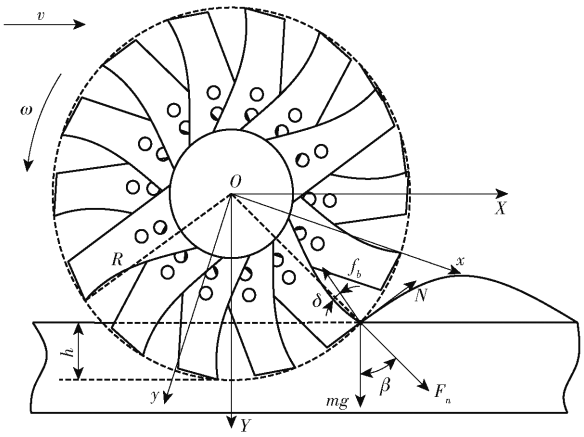


图 7　挖掘齿抛石过程石块受力分析

Fig. 7　Analysis of force on gravel during process of digging teeth and throwing stones

式中　F_n——离心力，N

N——正压力，N

β——离心力与垂直方向的夹角，(°)

δ——离心力与挖掘齿曲面切线夹角，(°)

其中，石块离心力随着回转半径和挖掘齿脱离土壤后角速度增加而增大，离心力与滑切面切线夹角随着回转半径的增大而减小，回转半径与 x 轴夹角、滑切面工作曲线形式、材料属性有关，由式(19)可得石块被抛出的极限条件为[24]

$$\frac{\mu_2 g\sin(\beta-\delta)-g\cos(\beta-\delta)}{\omega^2(\mu_2\sin\delta+\cos\delta)}\leqslant R \tag{20}$$

由图 7 可知，石块被抛出后处于均匀重力场中运动，在不考虑风阻的条件下可得其抛扔运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = x_0 + \omega R t\cos\beta \\ y = y_0 + \omega R t\sin\beta - \dfrac{gt^2}{2} \end{cases} \tag{21}$$

式中　x_0——石块被抛出时水平初始距离，mm

y_0——石块被抛出时垂直初始距离，mm

由运动轨迹方程可得石块水平抛撒距离 L 为

$$L = \frac{\omega^2 R^2\sin(2\beta)}{g} \tag{22}$$

由式(20)、(22)可知，石块抛出条件和抛撒距离 L 与挖掘装置滚筒中心轴转速 n、挖掘齿旋转半径 R、夹角 β 等因素有关。

2.4　传动机构设计

捡石机田间作业时，东方红系列拖拉机动力输出轴转速 n_1 约为 500 r/min，已知挖掘装置转速 n 为 200 r/min，则捡石机传动系统总体传动比 i 为

$$i = \frac{n_1}{n} \tag{23}$$

由式(23)可得传动系统总传动比 i 为 2.5，确定减速箱传动比 i_1 为 1.75，则链传动传动比 i_2 为 1.43，查阅《农业机械设计手册》[19]，选取主动链轮Ⅰ齿数 $z_1=14$、从动链轮Ⅱ齿数 $z_2=20$，如图 8 所示。则传动比表达式为

$$i = i_1 i_2 = i_1\frac{z_2}{z_1} \tag{24}$$

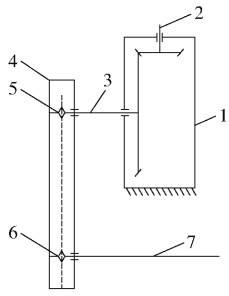


图 8　挖掘装置传动示意图

Fig. 8　Schematic of digging device transmission

1. 减速箱　2. 减速箱动力输入轴　3. 传动轴　4. 外侧架　5. 主动链轮Ⅰ　6. 从动链轮Ⅱ　7. 挖掘装置

2.5　挖掘齿瞬态动力学分析

挖掘装置是捡石机的关键部件，在作业过程中挖掘齿高速回转并多次切削石块。在挖掘齿与石块接触的瞬间，挖掘齿受到石块抗剪强度和抗压强度所产生的瞬间冲击力较大。为了使挖掘齿在各种工作条件下所受冲击载荷满足装置的性能要求，保证其安全旋转，需要利用 ANSYS 软件对挖掘齿进行瞬态动力学分析。

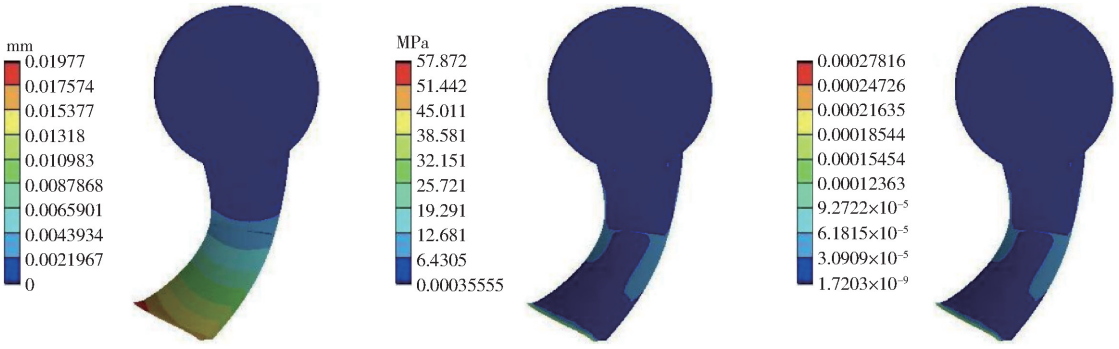
挖掘齿材料选用 45 号钢，其弹性模量为 209 GPa，密度为 7.85 g/cm^3，泊松比为 0.269。挖掘齿砍切石块时受力相对繁杂，通过动态扭矩传感器测得挖掘齿工作时最大扭矩 $M=117.23$ N·m，故对挖掘齿砍切石块施加最大力为 533 N、挖掘齿转速为 200 r/min。求解运算后得到挖掘齿总变形分析云图、等效应力分析云图和等效应变分析云图如图 9 所示。

由图 9a 可知，挖掘齿的总变形量最大值为 0.019 77 mm，最大变形位置处在刀尖位置，主要是因为刀尖部分为无支撑切割，线速度最大。由图 9b 可知，挖掘齿等效应力最大值为 57.872 MPa，远小于材料的许用应力。由图 9c 可知，挖掘齿的等效应变最大值为 0.000 278 16。其变形量相较于挖掘齿的总体尺寸参数来说，变形量较小，满足机具工作要求。

3　土槽试验

3.1　试验条件

螺旋拨齿式捡石机土槽试验场地为新疆农业大学新疆智能农业装备重点实验室，试验土槽长20 m，宽 3 m，土质类型为壤土。试验前先将土壤旋耕，按



(a) 总变形量 (b) 等效应力 (c) 等效应变

图 9 挖掘齿有限元分析云图

Fig. 9 Digging teeth finite element analysis results

照农田石块覆盖量将石块均匀铺盖在土壤表层 0 ~ 50 mm 深度范围内,以保证土槽试验的环境基本符合田间试验。试验台架包括土槽、TCC - Ⅲ型计算机监控及辅助测试土槽试验车、石块、螺旋拨齿式捡石机以及数据测试系统、MTC008 - C 型高精度电子分析天平、卷尺、记号笔及自封袋。

3.2 试验指标

参照 DG/T 229—2019《农田捡石机》、Q/HCJ 001—2013《农田捡石机 企业标准》和 NY/T 3884—2021《农田捡石机 质量评价技术规范》,试验以石块捡净率 Y_1、作业扭矩 Y_2作为评价指标。捡石机作业时,通过调节土槽试验车变频器来控制机具前进速度和挖掘装置转速,采用五点取样法对作业前后的石块进行取样,每组试验需进行 3 次取样,取平均值,石块捡净率 Y_1计算公式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \times 100\% \tag{25}$$

式中 M_1——已捡出石块质量,kg

M_2——未捡出石块质量,kg

作业扭矩 Y_2是指捡石机在作业时土槽试验车动力输出轴的实际扭矩,可通过安装在土槽试验车上的动态扭矩传感器测定,并利用数据测试系统直接读取。每组试验重复 3 次,取 3 次试验的平均值作为各组的试验结果。

3.3 正交试验方案与结果

为探究各试验因素与试验指标之间的交互作用,得到捡石机的较优工作参数组合,以挖掘齿刀刃起始滑切角 X_1、机具前进速度 X_2、刀轴转速 X_3为试验因素,石块捡净率 Y_1、作业扭矩 Y_2为试验指标,选择 Box - Behnken 试验设计方法进行三因素三水平响应面试验。试验因素编码如表 2 所示,试验方案与结果如表 3 所示,土槽试验作业效果如图 10 所示。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元线性回归拟合分析处理,并建立石块捡净率 Y_1、作

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Test factors code

编码	因素		
	挖掘齿刀刃起始滑切角 X_1/(°)	机具前进速度 X_2/(m·s^{-1})	刀轴转速 X_3/(r·min^{-1})
-1	5	0.3	140
0	10	0.4	200
1	15	0.5	260

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Program and results of experiment

序号	因素			石块捡净率 Y_1/%	作业扭矩 Y_2/(N·m)
	X_1/(°)	X_2/(m·s^{-1})	X_3/(r·min^{-1})		
1	5	0.4	140	88.64	76.35
2	10	0.4	200	91.37	88.69
3	10	0.4	200	91.12	85.44
4	15	0.4	140	89.89	72.56
5	10	0.5	140	84.58	74.85
6	15	0.3	200	91.32	73.27
7	5	0.3	200	90.92	90.73
8	10	0.4	200	91.25	86.52
9	10	0.4	200	90.44	87.18
10	10	0.5	260	87.91	117.23
11	5	0.5	200	86.45	89.57
12	10	0.3	140	89.63	75.98
13	10	0.3	260	90.73	108.43
14	15	0.5	200	89.15	87.87
15	15	0.4	260	90.69	110.51
16	10	0.4	200	91.18	86.13
17	5	0.4	260	91.07	113.38



(a) 作业前 (b) 作业后

图 10 作业前后效果对比

Fig. 10 Comparison of effects before and after the operation

业扭矩 Y_2 对挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度、刀轴转速的响应面回归模型，对其进行方差分析，结果如表 4 所示。

表 4　模型方差分析

Tab. 4　Model variance analysis

指标	方差来源	离差平方和	自由度	均方	F	P
石块捡净率 Y_1	模型	57.78	9	6.42	29.48	<0.000 1 **
	X_1	1.97	1	1.97	9.05	0.019 7 *
	X_2	26.32	1	26.32	120.83	<0.000 1 **
	X_3	7.33	1	7.33	33.68	0.000 7 **
	X_1X_2	1.32	1	1.32	6.07	0.043 2 *
	X_1X_3	0.66	1	0.66	3.05	0.124 3
	X_2X_3	1.24	1	1.24	5.71	0.048 2 *
	X_1^2	0.06	1	0.06	0.30	0.602 5
	X_2^2	12.69	1	12.69	58.26	0.000 1 **
	X_3^2	5.31	1	5.31	24.40	0.001 7 **
	残差	1.52	7	0.22		
	失拟	0.99	3	0.33	2.47	0.201 0
	误差	0.53	4	0.13		
	总和	59.30	16			
作业扭矩 Y_2	模型	3276.23	9	364.03	85.54	<0.000 1 **
	X_1	83.33	1	83.33	19.58	0.003 1 **
	X_2	55.70	1	55.70	13.09	0.008 5 **
	X_3	2 805.38	1	2 805.38	659.23	<0.000 1 **
	X_1X_2	62.09	1	62.09	14.59	0.006 5 **
	X_1X_3	0.21	1	0.21	0.05	0.829 9
	X_2X_3	24.65	1	24.65	5.79	0.047 0 *
	X_1^2	5.84	1	5.84	1.37	0.279 9
	X_2^2	0.27	1	0.27	0.06	0.807 2
	X_3^2	242.26	1	242.26	56.93	0.000 1 **
	残差	29.79	7	4.26		
	失拟	23.70	3	7.90	5.19	0.072 9
	误差	6.09	4	1.52		
	总和	3 306.02	16			

注：* 表示显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；** 表示极显著（$P < 0.01$）。

由表 4 可知，石块捡净率和作业扭矩模型 P 值都小于 0.000 1，影响极显著，表明回归模型方程拟合较好，可信度高；失拟项 P 值均不显著，表明回归模型具有很高的拟合度；决定系数 R^2 均大于 0.97，说明建立的模型预测值与试验值吻合程度高，故可用此模型对石块捡净率和作业扭矩进行分析和优化。通过对试验结果进行回归分析，剔除不显著交互项和平方项后，得到挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度和刀轴转速对石块捡净率 Y_1 和作业扭矩 Y_2 的回归方程分别为

$$Y_1 = 63.70 - 0.19X_1 + 90.66X_2 + 0.12X_3 + 1.15X_1X_2 + 0.09X_2X_3 - 173.60X_2^2 - 0.000\,3X_3^2 \quad (26)$$

$$Y_2 = 161.92 - 3.01X_1 - 114.78X_2 - 0.70X_3 + 7.88X_1X_2 + 0.41X_2X_3 + 0.002X_3^2 \quad (27)$$

根据方差分析及式（26）、（27）可得，各因素对石块捡净率影响显著性主次顺序为机具前进速度、刀轴转速、挖掘齿刀刃起始滑切角；对作业扭矩影响显著性主次顺序为刀轴转速、挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度；为了直观了解各因素交互作用对试验指标的影响，运用 Design-Expert 软件做出各交互因素对石块捡净率和作业扭矩的响应面，如图 11 所示。

图 11a、11c 为刀轴转速取 200 r/min 时，机具前进速度和挖掘齿刀刃起始滑切角交互作用对石块捡净率和作业扭矩影响的响应面。挖掘齿刀刃起始滑切角固定在低水平（5°）时，随着机具前进速度的增大，石块捡净率呈下降趋势，作业扭矩呈上升趋势，这是因为当机具前进速度提高时，挖掘齿容易出现漏挑现象，石块捡净率降低，且挖掘齿与土壤在作业方向的接触距离增加，装置的纵向阻力升高，作业扭矩增高；机具前进速度固定在低水平（0.30 m/s）时，随着挖掘齿刀刃起始滑切角的增大，石块捡净率呈上升趋势，作业扭矩呈下降趋势，这是因为当挖掘齿刀刃起始滑切角增大时，挖掘齿对土壤的滑切效果增加，冲击载荷降低，作业扭矩降低，石块捡净率提高。

图 11b、11d 为挖掘齿刀刃起始滑切角取 10° 时，机具前进速度和刀轴转速交互作用对石块捡净率和作业扭矩影响的响应面。机具前进速度固定在低水平（0.30 m/s）时，随着刀轴转速的增大，石块捡净率和作业扭矩均呈上升趋势，这是因为当机具前进速度一定时，刀轴转速越大石块在单位时间内被挑起次数越多，导致石块捡净率和作业扭矩上升。从图中可以得出，刀轴转速对作业扭矩有更显著的作用。

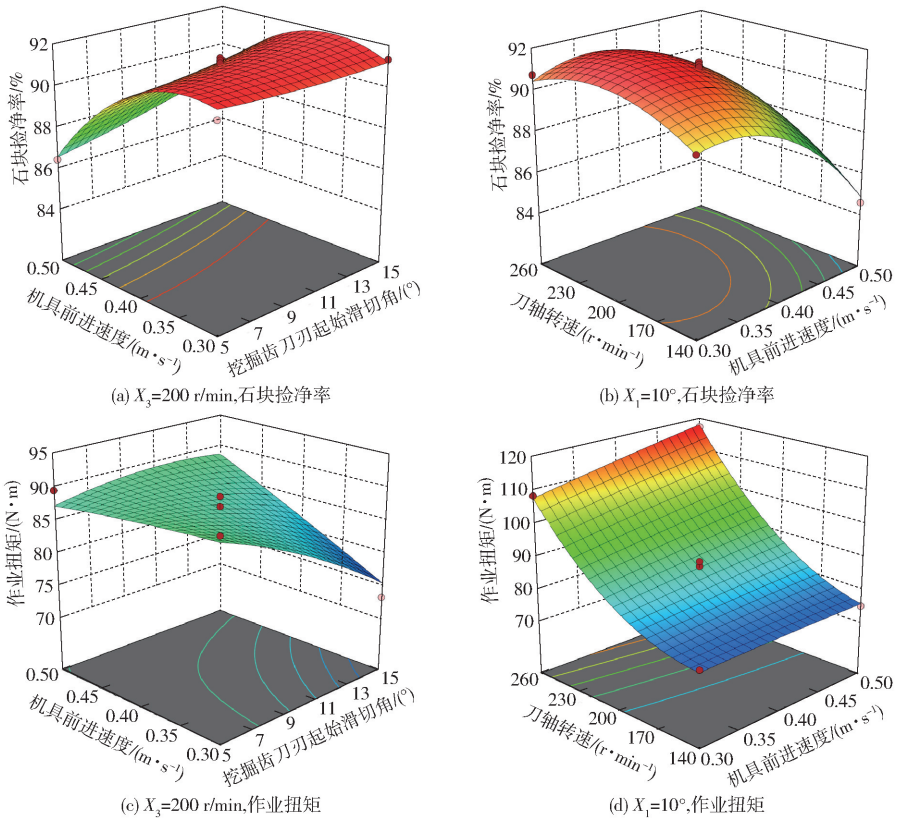
以石块捡净率最大值和作业扭矩最小值为优化目标，以挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度、刀轴转速为优化对象，应用 Design-Expert 软件对建立的线性回归模型进行优化，优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 5° \leqslant X_1 \leqslant 15° \\ 0.3\ \text{m/s} \leqslant X_2 \leqslant 0.5\ \text{m/s} \\ 140\ \text{r/min} \leqslant X_3 \leqslant 260\ \text{r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (28)$$

得到捡石机较优工作参数组合为：挖掘齿刀刃起始滑切角 14.73°、机具前进速度 0.34 m/s、刀轴转速 171.89 r/min，此时石块捡净率为 91.43%、作业扭矩为 72.30 N·m。

3.4　试验验证

为提升捡石机工作效率并验证优化后试验效果，在保证机具其他参数不变条件下将捡石机作业幅宽增至 3.5 m，于新疆维吾尔自治区博尔塔拉蒙



(a) X_3=200 r/min,石块捡净率　(b) X_1=10°,石块捡净率

(c) X_3=200 r/min,作业扭矩　(d) X_1=10°,作业扭矩

图 11　各因素交互作用对石块捡净率、作业扭矩的影响

Fig. 11　Influence of interaction of various factors on stone cleaning rate and operating torque

古自治州温泉县进行田间验证试验,考虑到试验的可行性,将以上数据进行规整,挖掘齿刀刃起始滑切角为 15°、机具前进速度为 0.35 m/s、刀轴转速为 170 r/min,在此参数作用下进行 3 次重复验证试验,并取其平均值作为试验的验证值,田间验证试验如图 12 所示,试验验证石块检净率为 89.68%、90.11%、90.33%。

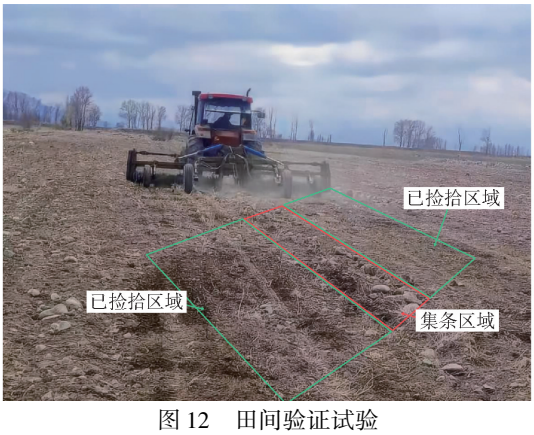


图 12　田间验证试验

Fig. 12　Field validation experiment

当捡石机以最优参数组合作业时,平均石块捡净率为 90.04%,与理论优化值相差 1.39 个百分点,在满足高捡净率的同时,与传统的捡石机相比作业扭矩较低,捡石机作业效果可达到设计预期,能够满足农田捡石作业要求。

4　结论

(1)针对现有捡石机存在捡净率低、工作阻力大等问题,设计了一种基于阿基米德曲线的螺旋拨齿式捡石机。对挖掘齿在挑石及抛石作业过程进行运动学分析,确定了主要零部件结构参数与工作参数。

(2)运用 Design-Expert 软件,以挖掘齿刀刃起始滑切角、机具前进速度、刀轴转速为试验因素,石块捡净率、作业扭矩为试验指标进行三因素三水平响应面试验,对试验数据进行采集与分析,采用多元拟合得到了各因素对石块捡净率、作业扭矩的回归方程,对试验结果进行分析,确定了各因素交互作用对试验指标的影响规律。

(3)对捡石机的工作参数进行了优化,当挖掘齿刀刃起始滑切角为 14.73°、机具前进速度为 0.34 m/s、刀轴转速为 171.89 r/min 时捡石效果最佳,以优化后参数进行验证试验,结果表明,平均石块捡净率为 90.04%,与模型预测值差值均小于 3%,表明试验验证结果与模型预测结果基本一致。

参 考 文 献

[1] 胡动刚, 蒙萌, 胡思颖, 等. 2010 年以来从土地整治到全域整治的热点研究和阶段分析——基于耕地保护视角[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(6): 103 - 111.
HU Donggang, MENG Meng, HU Siying, et al. Hotspot and stage analysis from land consolidation to comprehensive land consolidation in whole region since 2010: based on perspective of arable land protection[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(6): 103 - 111. (in Chinese)

[2] 夏方舟, 杨雨濛, 严金明, 等. 中国国土综合整治近 40 年内涵研究综述:阶段演进与发展变化[J]. 中国土地科学, 2018, 32(5): 78 - 85.
XIA Fangzhou, YANG Yumeng, YAN Jinming, et al. The connotation research review on integrated territory consolidation of China in recent four decades: staged evolution and developmental transformation[J]. China Land Science, 2018, 32(5): 78 - 85. (in Chinese)

[3] 孙春蕾, 杨红, 韩栋,等. 全国高标准农田建设情况与发展策略[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(7): 15 - 22.
SUN Chunlei, YANG Hong, HAN Dong, et al. Situation and countermeasures of well-facilitated farmland in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(7): 15 - 22. (in Chinese)

[4] 马方, 陈中玉. 关于土壤捡石机推广的必要性探究[J]. 湖南农机, 2010, 37(11): 121 - 122,131.
MA Fang, CHEN Zhongyu. Picking up on the soil to promote the necessity of machine[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(11): 121 - 122,131. (in Chinese)

[5] ARIAS N, ORCARAY L, BESCANSA P, et al. Implications of rock fragments for soil quality evaliation: assessing changes in a gravelly irrigated soil following no till adoption[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(22): 2663 - 2677.

[6] RUDANI M R, JAKASANIA R G, GUPTA R A, et al. Design and development of stone collector[J]. App. Sci., 2018, 7(4): 1424 - 1431.

[7] 湛小梅, 李亚丽, 曹中华, 等. 1JS - 100 土壤捡石机的设计[J]. 农机化研究, 2023, 45(8):69 - 73.
ZHAN Xiaomei, LI Yali, CAO Zhonghua, et al. Design of 1JS - 100 soil stone picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8):69 - 73. (in Chinese)

[8] 马方, 陈中玉. 多种土壤捡石机工作原理分析[J]. 湖南农机, 2010, 37(9): 137 - 138,146.
MA Fang, CHEN Zhongyu. Picking up a variety of soil analysis work principle[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2010, 37(9): 137 - 138,146. (in Chinese)

[9] 于玉真, 高连兴, 马秀丽, 等. 土壤捡石机的研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 274 - 279.
YU Yuzhen, GAO Lianxing, MA Xiuli, et al. Research advance in the development of soil rock picker[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 274 - 279. (in Chinese)

[10] 马方, 陈中玉. 国外土壤捡石机工作原理及特点分析[J]. 农业技术与装备, 2010(12): 9 - 10.

[11] 张佳, 王宏, 李川江, 等. 基于专利计量的农田土壤捡石机械化技术发展态势分析[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(6):250 - 256.
ZHANG Jia, WANG Hong, LI Chuanjiang, et al. Analysis on the development trend of farmland soil stone-picking mechanzation technology based on patent bibliometrics[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 250 - 256. (in Chinese)

[12] 于玉真, 高连兴, 李心平, 等. 链齿式农田土壤捡石机栅条齿动力学分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(5):49 - 51.
YU Yuzhen, GAO Lianxing, LI Xinping, et al. Kinematics analysis on chain tooth rock picker in the farmland soil[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(5):49 - 51. (in Chinese)

[13] 牛丛, 邢钰婷, 闫成功, 等. 铲筛式农田石块捡拾收集机仿真与试验[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12):221 - 233.
NIU Cong, XING Yuting, YAN Chenggong, et al. Simulation and experiment of shovel-screen type farmland stone picking and collecting machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2022,27(12):221 - 233. (in Chinese)

[14] 李生泉, 刘小刚, 李栋梁, 等. 基于动力学分析的农田捡石机应力动态建模与仿真[J]. 南方论坛, 2024, 55(10): 24 - 27.

[15] 卜明杰, 刘洋礼, 徐渊, 等. 复垦农田链式捡石机的设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(10):31 - 35,41.
BU Mingjie, LIU Yangli, XU Yuan, et al. Design and test of China stone picker for reclaiming farmland[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(10):31 - 35,41. (in Chinese)

[16] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 28 - 39.
WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28 - 39. (in Chinese)

[17] 林静, 钱巍, 牛金亮, 等. 玉米垄作免耕播种机新型切拨防堵装置的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(6): 691 - 698.
LIN Jing, QIAN Wei, NIU Jinliang, et al. Design and experiment of stubble-cutting and anti-blocking mechanism for ridge-till and no-till planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(6): 691 - 698. (in Chinese)

[18] 丁为民, 彭嵩植. 旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 67 - 72.
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on grass-removing angles and equations of rotary blades[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 67 - 72. (in Chinese)

[19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.

[20] 廖庆喜, 谢昊明, 张青松, 等. 驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 99 - 110,195.
LIAO Qingxi, XIE Haoming, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of driven disc plow and double-edged rotary tillage combined tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 99 - 110,195. (in Chinese)

[21] 顿国强, 陈海涛, 李昂, 等. 刀齿排布旋向对免耕覆秸精播机清秸单体性能的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 48 - 56.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, LI Ang, et al. Effect of rotation direction of knife teeth configuration on clearing strawunit performance for no-tillage and straw mulching precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 48 - 56. (in Chinese)

[22] 王奇, 贾洪雷, 朱龙图, 等. 免耕播种机星齿凹面盘式清秸防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 68 - 77.
WANG Qi, JIA Honglei, ZHU Longtu, et al. Design and experiment of star-toothed concave disk row cleaners for notill planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 68 - 77. (in Chinese)

[23] 王汉羊. 2BMFJ - 3 型麦茬地免耕覆秸大豆精密播种机的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.
WANG Hanyang. Study on 2BMFJ - 3 type no-till soybean precision planter with straw-covering in wheat stubble fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[24] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切青秸刀齿设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(6): 41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6): 41 - 51,217. (in Chinese)