

大挖深菊芋收获机设计与试验

戴立勋¹,黄晓鹏¹,魏宏安¹,杨 勇²,李 荣²

(1.甘肃农业大学机电学院,甘肃 兰州 730070;2.驼峰山生态农场,甘肃 榆中 730100)

摘 要:针对菊芋收获作业要求,研制了大挖深菊芋收获机。该机由外倾整体式条形挖掘铲、两级抖动链式输送分离器及机架、地轮构成,可一次性完成菊芋挖掘、芋土分离、输送、铺放。田间试验表明:该机能在 250~500 mm 挖掘深度,初霜冻、菊芋团块根系发达地块,克服冻土块、砾石卡塞导致的土壤拥堵,实现持续稳定作业;对菊芋收获质量好,芋土分离效果良好,损失率、伤薯率、含杂率分别小于 1.75%、4.8%、4.5%,满足菊芋收获作业要求。

关键词:大挖深菊芋收获机;设计;挖掘阻力;田间试验

中图分类号:S225.7 **文献标志码:**A

Design and test of Jerusalem artichoke harvester characterized by large dredging depth

DAI Li-xun¹,HUANG Xiao-peng¹,WEI Hong-an²,YANG Yong²,LI Rong²

(1.College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2.Tuofengshan Ecological Farm,Yuzhong, Gansu 730100, China)

Abstract: According to harvesting need of Jerusalem artichoke, a harvester of Jerusalem artichoke with large dredging depth was developed. The harvester consisted of extraversion integral strip-type digger blade, two-grade jitter-chain-transport separator, and rack and land wheels. The harvester can simultaneously complete digging of Jerusalem artichoke, removing soil, transporting and laying of Jerusalem artichoke. The field test showed that the harvester could realize sustainable and stable operation and dig 250~500 mm deep to overcome soil jam caused by blocking of frozen soil and/or gravels during the first frost in the field and developed dense roots of Jerusalem artichoke. It had good harvesting quality and good separating effect of Jerusalem artichoke from soil. The loss rate, damage rate, and the impurity rate of Jerusalem artichoke were less than 1.75%, 4.8%, and 4.5%, respectively, which meet the need of Jerusalem artichoke harvesting.

Keywords: Jerusalem artichoke harvester with large dredging depth; design; digging resistance; field experiment

菊芋俗称洋姜,属菊科,为一年生草本植物,可药用或食用^[1]。菊芋根系特别发达,繁殖力强,抗旱,耐寒耐盐碱,块茎产量大 1 000~6 000 kg·667m⁻²,是保持水土、防风固沙改良土壤的优良作物,具有较高经济及生态效益^[2]。我国目前菊芋规模化种植面积已达 6.67×10⁴ hm²^[3]。

菊芋收获属深根茎类作物收获作业,对于根茎类作物收获,目前国外已实现对马铃薯、大蒜、洋葱和花生等浅根茎作物的机械化收获^[4]。国内根茎

类作物收获机研发主要集中在马铃薯收获方面,目前相关理论研究关注在如何降低机具工作阻力,提高根茎、土壤分离效果,如采用振动式、仿生式挖掘铲减阻,利用抖土、击打等原理提高分离效果等方面^[5]。

以现有挖掘式马铃薯收获机为代表的根茎类作物收获机应用在菊芋收获作业上,因菊芋挖掘深度为 250~500 mm,超出收获机设计挖掘深度,导致工作阻力大于机具荷载,而使机具损坏。加之北方

菊芋收获多在深秋至初冬进行,此时地表土壤已初霜冻,形成一定厚度冻结层,不易破碎。土壤中的菊芋团块、根系、表面冻土块、深层土壤中的砾石,与分体式挖掘铲柄、机具侧板卡塞,导致土壤拥堵,使机具无法持续有效作业。

现有根茎类作物收获机因升运链杆条间距较大,升运过程中较小菊芋块茎由链杆条间隙落地,被落下的土壤掩埋,来年萌发影响下茬作物。同时输送分离行程短,抖动频率及幅度较小,菊芋块茎由菊芋团块及根系脱落不彻底,土壤、块茎分离效果差,使后续人工捡拾难度增大。

针对以上问题,课题组研制了大挖深菊芋收获机,针对现有挖掘式马铃薯收获机采用的整体式挖掘铲,将与机组前进方向平行的挖掘铲固定扳,设计为外倾式挖掘铲固定刀臂,并依据菊芋块茎大小重新设计挖掘铲面的宽度及升运链杆条间距。可一次性完成菊芋挖掘、芋土分离、输送、铺放,并起到一定的土壤深松作用。能在 250~500 mm 挖掘深度,初霜冻、菊芋团块根系发达地块,克服冻土块、砾石卡塞导致的土壤拥堵,实现持续稳定作业。满足我国现阶段菊芋规模化种植情况下收获作业的需求。并为解决大挖深、高产量、地下多杂余、砾石、易拥堵根茎类作物收获机的研制提供一定的借鉴。

1 整体结构、工作过程及技术参数

1.1 整体结构

菊芋收获机主要由机架、挖掘部件、输送分离部件、传动部件、支撑行走轮及悬挂架等机构构成,如图 1 所示。主要技术参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

作业时,该机通过拖拉机的牵引驱动进行挖掘作业,挖掘深度通过地轮与机架的相对高度确定,挖掘入土角度通过调整拖拉机中央拉杆的工作长度实现。作业时菊芋根系、块茎、土壤被挖掘铲掘取后,进入土芋分离输送装置,经输送带抖动,使土

块破碎散裂,菊芋块团根系上未脱离的菊芋块茎抖动分离,小于链杆间隙的土壤和杂物由链杆间隙筛下。菊芋块茎经二级分离输送装置的末端,抛落在机具后部的土层上。土壤与菊芋块茎分离能力调整,通过改变拖拉机动力输出轴转速,进而改变抖动轮转速,抖动频率、振幅实现^[6]。

2 主要零部件的选择及设计

2.1 挖掘机构

因菊芋块茎结芋深度为 250~550 mm,已达耕地心土层^[7],收获时需破开冻土层,加之菊芋根系发达,要求挖掘机构结构坚固,可以承受较大的工作阻力,表面冻土块、砾石、团块残根等不易卡塞挖掘机导致土壤拥堵。同时菊芋微小根茎块需全部挖掘出来,防止来年萌发影响下茬作物。本机采用整体式条形铲面、防石栅、外倾式挖掘铲固定刀臂构成外倾整体式条形挖掘铲,结构如图 2 所示。

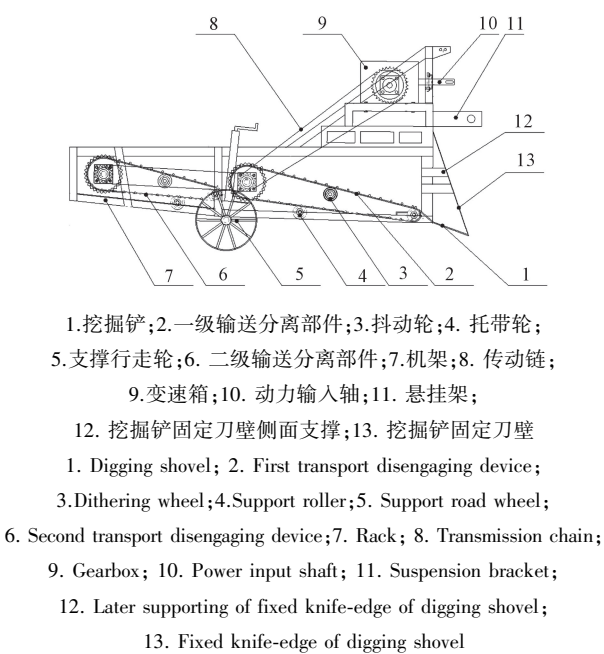


图 1 菊芋收获机结构图

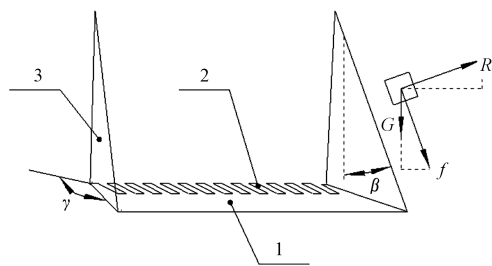
Fig.1 Structure diagram of Jerusalem artichoke harvester

表 1 菊芋收获机的主要技术参数

Table 1 Technical parameters of Jerusalem artichoke harvester

外形尺寸(长×宽×高) Overall dimension ($L\times W\times H$)/mm	结构质量 Structure quality/kg	配套动力 Power/kW	生产率 Productivity /($\text{hm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)	运输间隙 Transportation interval/mm	工作幅宽 Working width/mm
2148×1147×1396	112	44~58.8	0.3~0.5	≤300	1000

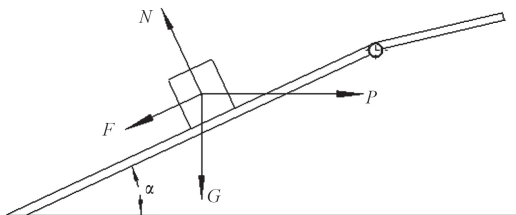
铲面倾角 α 的大小影响到挖掘铲的入土性能、碎土性能、挖掘阻力及掘起物提升的高度^[8]。掘起物受力图如图 3 所示。



1. 整体式条形铲面; 2. 防石栅; 3. 外倾式挖掘铲固定刀臂
1. Unitary strip shovel surface; 2. Stone palisade;
3. Inclined fixed blade of digging shovel

图 2 挖掘铲机构结构简图

Fig.2 Structure diagram of digging shovel



P : 沿挖掘铲移动掘起物所需要的力; G : 重力;

F : 铲面与土壤的摩擦力; α : 铲面倾角

P : Power to move the dug object along the digging shovel;

G : Gravity; F : Friction between shovel surface and soil;

α : Shovel inclined angle

图 3 掘起物受力图

Fig.3 Force diagram on the dug object

平衡方程组为:

$$\begin{cases} P \cos \alpha - F - G \sin \alpha \geq 0 \\ N - G \cos \alpha - P \sin \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 为沿挖掘铲移动掘起物所需要的力 (N); G 为铲面上掘起物的重力 (N); N 为挖掘铲对土壤的反作用力 (N); F 为铲面与土壤的摩擦力 (N); $F = fN$, f 为土壤与挖掘铲的摩擦系数。

由 (1) 式得出:

$$\alpha \leq \arctan \frac{P - fG}{fP + G} \quad (2)$$

铲面倾角 α 减少, 机具入土性能好, 机具工作挖掘阻力减少, 碎土性能较差, 容易壅土, 反之, 倾角增大, 机具入土性能差, 机具工作挖掘阻力增加, 碎土性能较好^[9], 最终计算确定铲面倾角为 16° 。

挖掘铲工作幅宽 B 需考虑拖拉机牵引力、挖掘深度、土壤耕作比阻、作业机组的作业速度, 参考深耕犁, 可由式 (3)^[10]、(4)^[11] 得出 (5)。

$$B = \frac{P_T \eta_T}{K\alpha} \quad (3)$$

$$N = \frac{P_T V}{3600 \eta_T} \quad (4)$$

$$B = \frac{3600 N \eta_T^2}{VK\alpha} \quad (5)$$

式中, N 为拖拉机标定功率 (kW); P_T 为拖拉机牵引力 (N); η_T 为牵引力利用系数取 $\eta_T = 0.6$; K 为土壤耕作比阻; α 为挖掘深度, 取 $\alpha = 250 \sim 500$ mm; V 为拖拉机作业速度, 取 $3 \sim 5$ km · h⁻¹, 根据选用拖拉机功率为 $44 \sim 58.8$ kW, 最终计算确定 B 为 1 000 mm。

挖掘铲的宽度 S_1 须保证不能出现漏挖和损伤块茎的现象, 宽度方向上至少容纳单一块茎^[12]。但增加挖掘铲宽度, 作业阻力也随之增加, 考虑菊芋块茎平均大小 S_{sr} 、菊芋块茎大小标准偏差 σ 、拖拉机误差校正正值 C_1 、菊芋块茎离垄中心线偏距 C_0 : $S_1 \geq S_{sr} + 3\sigma + C_1 + C_0 = 59.2 + 29.8 + 30 + 30 = 149$ mm; 结合材料规格挖掘铲的宽度 S_1 取 150 mm。

挖掘铲固定刀臂的设计主要是为了连接挖掘铲及在工作过程中切开土壤、冻结层、残根, 固定刀臂前臂面与竖直方向呈夹角 β (如图 2 所示) 应能满足土壤、残根沿刃口向上滑移, 需满足下式:

$$R \sin \beta \geq R \tan \varphi \cos \beta + G \quad (6)$$

式中, R 为刀臂刃口阻力 (N); φ 为土壤对钢的摩擦角, 度 (°); G 为重力 (N), 经计算 β 取 15° 。

为使挖掘过程中土壤表面冻土层不易破裂, 防止表面冻土块、砾石、团块残根卡塞挖掘机导致土壤拥堵的情况发生, 将挖掘铲固定刀臂相对与挖掘机侧板呈外倾夹角 γ 布置, 将表面冻土层挤入固定刀臂, 进而横向尺寸逐渐缩小, 使其破裂。同时土壤阻力产生沿挖掘铲固定刀臂面指向牵引中心线分力对表面冻土块、砾石、团块残根产生偏转力矩作用, 使其翻滚, 进而随土堡向后运动, 解决卡阻问题。但过大的角度, 使机具阻力过大, 会导致壅土现象的发生。参考深耕犁 γ 取 15° 。

2.2 挖掘铲有限元分析

因挖掘机构需承受较大的工作阻力, 在阻力的作用下, 挖掘铲将产生应力与变形, 可对挖掘铲进行有限元分析, 从分析结果判断挖掘铲在各个方向受到的应力、变形位移变化分布及大小是否满足设计要求, 是否符合挖掘作业的性能要求。

挖掘铲受力有土壤法向力 N 和摩擦力 f , 摩擦力与法向力相比, 摩擦力很小, 故只需研究法向力 N 对挖掘铲的影响^[13]。载荷为垂直于铲面的法向力, 把载荷施加在挖掘铲面, 根据挖掘铲牵引阻力模型 (式 7) 计算出具体数值, 根据作用力、反作用力原理, 利用相应的几何关系解出垂直到铲面的法向力。

拖拉机标定功率为 58.8 kW,拖拉机作业速度取 5 km · h⁻¹,挖掘铲在土壤中移动的牵引阻力根据式(7)^[14] 计算出具体数值。

$$W = \frac{G}{Z} + \frac{T + B}{Z(\sin\beta + \mu\cos\beta)} + \frac{CaA_0}{Z(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}$$

(7)

式中, W 为挖掘阻力(N); G 为作用于挖掘铲上的土壤重力(N); Z 为常数; T 为土壤抗剪切力, $T = CF_1$ (C 为土壤内聚力因数(N · cm⁻²), F_1 为土壤剪切面积(cm²)); B 为土壤沿铲面运动的加速力(N); μ 为土壤内的摩擦因数; Ca 为土壤与铲面的附着因数(N · cm⁻²); A_0 为挖掘部分面积(m²); α 为铲面倾角度(°); β 为土壤失效倾角(°); ε 为土壤与金属的摩擦系数。

铲面压强为法向力与作用面积之比,计算值为 10.714 MPa,法向载荷 N 为 2 550 N。挖掘铲壁厚 12 mm,挖掘铲固定刀臂厚 10 mm,材料为 65Mn,弹性模量 $E = 2.11 \times 10^{11}$ N · Mm⁻²;密度 $\rho = 7.82 \times 10^3$ kg · m⁻³;泊松比为 0.288;许用应力 $\sigma_x = 784$ MPa。使用 Ansys 软件得到挖掘铲位移变化云图(图 4)可知,铲面中间部分变形较明显,最大位移变形量为 0.01 mm,但就挖掘铲整体而言变形量较小,可以忽略。由挖掘铲应力变化云图(图 5)可知,挖掘铲应力在铲端两侧应力较大,最大应力为 165.8 MPa。小于挖掘铲材料的屈服极限强度(许用应力)784 MPa。以上分析结果表明,挖掘铲应力、应变均符合设计要求。

2.3 挖掘铲固定刀臂离散元仿真

离散元仿真分析方法被广泛应用于耕作过程研究^[15],适合仿真土壤和刚性体间的相互作用^[16],能够有效模拟颗粒材料和研究材料之间的微观宏观变形^[17]。因挖掘铲固定刀臂顶端与铲面垂直高度可变,使挖掘铲固定刀臂形状发生改变,导致挖掘铲挖掘阻力、土壤破碎及运动情况随之改变,这些变化又与多个因素相关,难以用公式进行表述和求解,但可通过离散元仿真分析确定适合的尺寸。

综合材料及机具结构,提出 3 个固定刀臂顶端与铲面垂直尺寸备选值,分别为:490、550、600 mm。按照 1 : 1 比例,SolidWorks 建立挖掘铲(含固定刀臂)三维模型,导入 EDEM 软件,选定土壤颗粒半径为 5 mm;土槽尺寸为 1.8 m × 1.4 m × 1 m(长 × 宽 × 高)。本文选用 Hertz-Mindlin 模型作为离散元法仿真挖掘铲在土壤颗粒中运动的接触力学模型,挖掘铲速度为 1.39 m · s⁻¹,挖掘深度 0.4 m;材料为 65Mn,泊松比为 0.3,剪切模量为 1.92 × 10⁶ (Pa),相关参数见表 2。

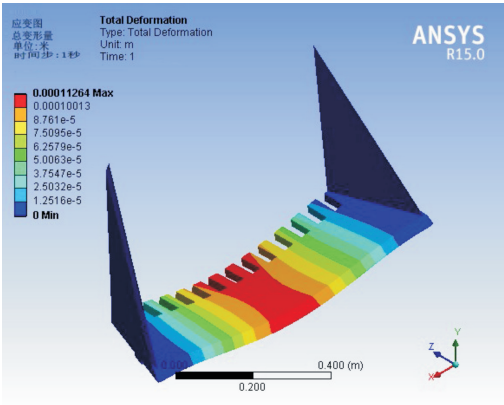


图 4 挖掘铲位移变化云图

Fig.4 Cloud image for the displacement change of digging shovel

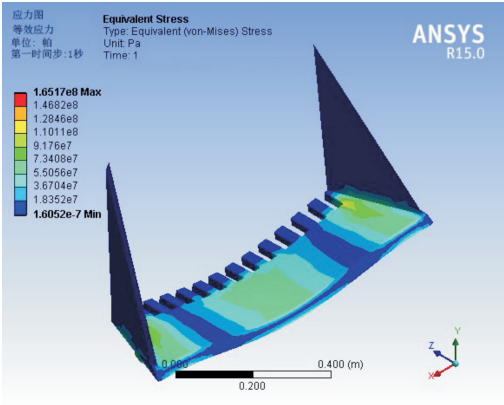


图 5 挖掘铲应力变化云图

Fig.5 Cloud image for the stress change of digging shovel

表 2 离散元仿真模型的基本参数

Table 2 Basic parameters of discrete simulation element model

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
土壤颗粒密度 Soil particle density /(kg · m ⁻³)	1.350	颗粒与挖掘铲间恢复系数 Recovery coefficient between particles and digging shovel	0.3
土壤颗粒泊松比 Poisson ratio of soil particle	0.4	颗粒与挖掘铲间滚动 摩擦系数 Rolling friction coefficient between particles and shovel	0.4
土壤颗粒剪切模量 Shear modulus of soil particle/Pa	1.09 × 10 ⁶	颗粒与挖掘铲间的 静摩擦系数 Static friction coefficient between particles and digging shovel	0.5
颗粒-颗粒间恢复系数 Recovery coefficient among particles	0.2	颗粒半径 Particle radius/m	0.005
颗粒之间的滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient among particles	0.3	颗粒数目/个 Particle number	1 × 10 ⁷
颗粒之间的静摩擦系数 Static friction coefficient among particles	0.4	仿真时步/s Stimulation step-length	1 × 10 ⁻⁵

注:仿真中涉及的相关参数参考黄玉祥等^[17],Mustafa Ucgul 等^[18] 相关文献。

Note: Related parameters in simulation come from the references of Huang Yu-xiang^[17], Mustafa Ucgul^[18].

仿真开始生成土壤颗粒,待颗粒沉降稳定后,挖掘铲开始运动,直至仿真结束。仿真模拟结果获得的图像与数据如图 6、表 3 所示。

图 6 土壤颗粒颜色由蓝色至绿色至红色,表明土壤颗粒所受到的力依次增加,在图 6 中,C 图挖掘铲固定刀臂前端土壤颗粒所受的力最大,这将有 利于表面冻土层破裂,且 C 图中挖掘铲土壤堆积前端较平,表明其在 3 种挖掘铲规格中最为理想。结合

表 3 挖掘铲阻力仿真数据表明,3 种不同规格的挖掘铲中,固定刀臂顶端与铲面垂直尺寸为 600 mm 挖掘铲,其破土、土壤移动情况和所受阻力均优于其余两种规格,可确定为具体尺寸。

2.4 输送分离机构

菊芋收获机的输送分离部件为两级抖动链式输送分离器构成,主要由抖动轮、主、从动链轮,升运链组成,如图 7 所示。

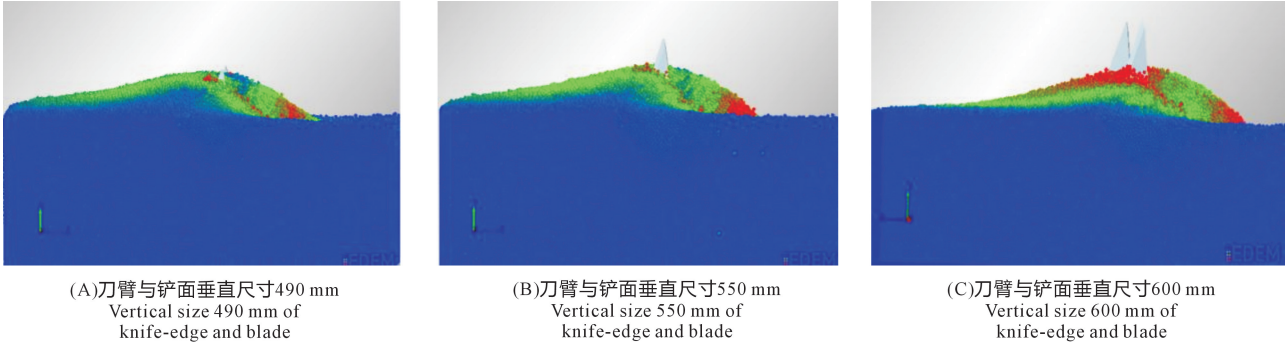


图 6 土壤颗粒受力及变形堆积情况

Fig.6 Situation of soil particle force, deformation and stacking

表 3 离散元仿真分析挖掘铲工作阻力最大值

Table 3 The maximum working resistance of digging shovel by discrete element simulation analysis

固定刀臂与铲面垂直高度 Vertical height of fixed knife-edge and blade/mm	水平阻力最大值 Max horizontal resistance/N	垂直阻力最大值 Max vertical resistance/N	运动方向阻力最大值 Max resistance at moving direction/N	阻力合力最大值 Max resistance resultant/N
490	1.364	1010	16025.9	22917.6
550	2.317	816	13815.1	19371.1
600	1.188	756	12134.7	17580.6

据资料与实际测量,菊芋块茎长度大于厚度,厚度(C)尺寸介于 20~55 mm 之间,分离输送器的相邻两杆条内侧间距(L_1)应满足以下关系:

$$L_1 < C \tag{8}$$

杆条材料为锰钢,尺寸 D (杆直径)为 10 mm,相邻两杆条圆心间距 L 取 40 mm。

分离输送器抖动轮等转速由升运链线速度及抖动轮周长确定,进而改变抖动频率与振幅^[19],升运链线速度通过改变油门大小进行调整。抖动频率分别按(9)式和(10)式^[20]计算。

$$n = \frac{60v}{C} \tag{9}$$

$$f = \frac{Zn}{60} \tag{10}$$

式中, v 为升运链线速度($\text{m} \cdot \text{S}^{-1}$); C 为抖动轮周长(m); n 为抖动轮转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); Z 为抖动轮头数。

作业时,拖拉机低档 2/3 油门,动力输出轴 720r,根

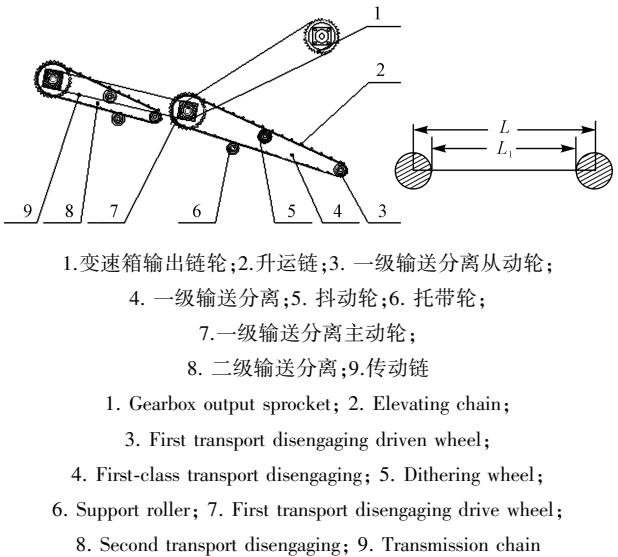


图 7 输送分离机构结构简图

Fig.7 Structure diagram of the conveyor and separator

据传动比可得升运链线速度 $v = 1.6 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1}$ 。抖动轮周长 $C = 0.339 \text{ m}$,计算得抖动轮转速 $n = 283 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。机具采用双头抖动轮,计算得抖动频率 $f = 9.44 \text{ Hz}$ 。

3 田间试验

3.1 试验条件

2016 年 10 月底至 11 月中旬,在陇中黄土高原半干旱区的榆中县清水驿乡进行了样机田间收获作业,累计完成作业 27 hm^2 。试验地为:平播水浇地、垄播套种旱地、平播旱地。水浇地土壤含水率 18%,旱地含水率 13%,菊芋品种为青芋一号,垄播试验地,播垄高 200 mm、垄宽 400 mm、沟宽 300 mm、株距 400 mm、行距 700 mm,平播株距 400 mm、行距 600 mm。结芋深度为 250~500 mm,植株 85% 茎叶干枯,杀秧机灭茎,配套动力为东方红 804 拖拉机,功率为 58.8 kW。

3.2 试验方法

因无菊芋收获的国家标准,故参考马铃薯收获国家标准《NY/Y648-2002 马铃薯收获机质量评价技术规范》规定的试验方法,对 3 种试验地进行收

获试验,测定了菊芋收获机纯工作小时生产率、损失率、伤薯率、含杂率 4 个指标。

3.3 试验结果与分析

菊芋收获机不同地块条件下主要性能指标如表 4 所示,具体项目技术要求值因无相应国标,本着相近原则,参照马铃薯收获国家标准《NY/Y648-2002 马铃薯收获机质量评价技术规范》。

试验结果表明(参见图 8):该机对土质松软,无板结旱地及平播水浇地适应性较好,各项指标均能达到相关技术要求。旱地伤薯率较高的原因是,机手在作业时为了提高分离效果,加大拖拉机转速,提高抖动轮抖动频率,使得薯块翻转次数明显增多,薯块与板结、冻结土块碰撞加剧,导致伤薯率增大;平播水浇旱地,收获作业时霜冻明显,为了提高分离效果,也存在同样现象。故为提高作业质量,应控制拖拉机动力输出轴转速使抖动频率保持在一个合理的范围。垄播旱地收获含杂率超标,主要是垄作旱地垄上土壤失水板结严重,不易破损分离,杀秧机杀秧破碎茎秆多堆积在垄沟中,加之套种作物油菜残根,使含杂率超标。



图 8 样机田间试验
Fig.8 Field experiment of the prototype

表 4 菊芋收获机不同试验条件下主要性能指标
Table 4 Main performance index of Jerusalem artichoke harvester under different test conditions

试验地 Experimental field	生产率 Productivity /($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	损失率/% Loss rate	伤薯率/% Damage rate	含杂率/% Impurity rate
平播水浇地 Flat-planting and irrigated land	0.31	1.6	4.0	3.2
垄播套种旱地 Ridge-sowing interplanting dry land	0.38	1.48	4.7	6.75
平播旱地 Flat-planting dry land	0.42	1.75	4.8	4.5
技术要求 ^[21] Technical requirement	0.3~0.5	≤5.00	≤5.00	≤5.00

4 结 论

- 1) 课题组所研制的大挖深菊芋收获机可以实现对菊芋大挖深挖掘、芋土分离、输送、铺放等作业过程,挖净率高,且有一定的深松作用,并可以在菊芋北方深秋至初冬收获季节,克服卡塞及土壤拥堵,实现持续有效的作业,降低了劳动强度,提高了工作效率,降低了收获作业成本,且收获质量好。
- 2) 通过挖掘铲的功能和形状分析结合菊芋收获具体作业条件,设计了一种外倾整体式条形挖掘铲,结构坚固,能承受较大的挖掘阻力,并能顺利地破开初霜冻形成的冻结层,且具有较强的抗表面冻土块、砾石、团块残根卡阻能力。
- 3) 菊芋团块根系发达,菊芋块茎不易脱落,升运链的抖动频率增加有助于菊芋块茎由根系脱落

及土壤与芋块分离,但过高的抖动频率,又会损伤菊芋。如何找到一个合适的抖动频率,有待做进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 胥九兵,王乃强,刘宗利,等.菊芋资源开发利用研究进展[J].精细与专用化学品, 2012, 20(11):18-19.

[2] 乌日娜,朱铁霞,于永奇,等.菊芋的研究现状及开发潜力[J].草业科学, 2013, 30(8):1295-1298.

[3] 李莉,孙雪梅.青海高原菊芋产业发展探析[J].中国种业, 2011, (9):22-24.

[4] 陈学深,马旭,陈国锐,等.深根茎类中药材根土分离装置的研究[J].机械设计,2015,32(7):65-70.

[5] 史明明,魏宏安,刘星,等.国内外马铃薯收获机械发展现状[J].农机化研究, 2013, 35(10):213-217.

[6] 康璟,李涛,孙伟,等.马铃薯挖掘机输送分离部件参数优化与实验分析[J].干旱地区农业研究, 2013, 31(6):257-258.

[7] 曹力强.起垄方式对旱地菊芋产量的影响试验[J].甘肃农业科技, 2009,(3):13-14.

[8] 魏宏安,王蒂,连文香,等.4UFD-1400 型马铃薯联合收获机的研制[J].农业工程学报,2013,29(1):11-13.

[9] 贾晶霞.马铃薯收获机关键部件设计与实验研究[D].北京:中国农业大学, 2006.

[10] 郑炫,贾首星,秦朝民,等.翻转双向超深耕犁的研究与设计[J].农机化研究, 2010, 32(3):108-110.

[11] 陈济勤.农业机械运用管理学[M].北京:中国农业出版社, 1997:19-22.

[12] 牛海华.强适应性小型振动式马铃薯挖掘机的设计[D].兰州:甘肃农业大学, 2011.

[13] 贾晶霞,刘汉武,郝新明,等.马铃薯收获机挖掘铲有限元静力学分析[J].农业机械学报,2006,37(9):86-88.

[14] 张华,吴建民,孙伟,等.4UM-640 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J].干旱地区农业研究, 2014, 32(4):265-266.

[15] Chen Y,Munkhol M L J, Nyord T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013,126(1):34-41.

[16] 方会敏,姬长英,Farman Ali Chandio,等.基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J].农业机械学报,2016,47(3):22-23.

[17] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等.深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J].农业机械学报,2016,47(7):80-81.

[18] Ucgul M, Fielke J M, Saunders C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014,121:106-110.

[19] 张建,魏宏安.4M-2 型马铃薯联合收获机土薯分离运动仿真[J].甘肃农业大学学报, 2009, 44(3):153-157.

[20] 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,2007:1072.

[21] 中华人民共和国农业部. NY/Y648-2002 马铃薯收获机质量评价技术规范[M].北京:中国标准出版社, 2003:3-4.