doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.010

纵横刀组协同式马铃薯种薯切块装置设计与试验

吕金庆　杨晓涵　李紫辉　李季成　刘中原
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对马铃薯种薯切块机械化程度低的问题,设计了一种纵横刀组协同式马铃薯种薯切块装置,对其关键部件进行设计,通过对马铃薯种薯切割过程的力学分析、运动学分析和能量学分析,建立了切种能量的数学模型,确定了影响马铃薯切种效果的主要因素。以切种效率、切种合格率为评价指标,以圆盘刀半径、输送辊与圆盘刀垂直中心距、圆盘刀轴转速和夹持辊轴转速为试验因素,进行了四因素四水平正交试验。对正交试验结果进行方差和极差分析,结果表明:当圆盘刀半径为 180 mm、输送辊与圆盘刀垂直中心距为 190 mm、圆盘刀轴转速为 115 r/min、夹持辊轴转速为 56 r/min 时,切种效率为 74.5 kg/min,切种合格率为 98.8%,满足马铃薯切种作业要求。

关键词: 马铃薯切种机; 切块装置; 纵横刀组协同式
中图分类号: S223.1+9　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0089-09　　**OSID**:

Design and Test of Seed Potato Cutting Device with Vertical and Horizontal Knife Group

LÜ Jinqing　YANG Xiaohan　LI Zihui　LI Jicheng　LIU Zhongyuan
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the low degree of mechanization of seed potato cutting, and the existing potato cutting machines have problems such as poor seed cutting uniformity, low seed cutting efficiency and low integration of machinery, a seed potato cutting device was designed, and its key components were analyzed and designed. Through the mechanical analysis, kinematic analysis and energy analysis methods of seed potato cutting process, a mathematical model of seed energy was established, and the impact was determined. The main factors of potato cutting effect were the radius of disc knife, vertical center distance between conveying roller and disc knife, rotation speed of disc knife and rotation speed of clamping roller. Using the cutting efficiency as the evaluation index, the four-factor four-horizontal orthogonal test was carried out with the radius of disc knife, vertical center distance between conveying roller and disc knife, rotating speed of disc cutter shaft, and rotating speed of clamping roller shaft as test factors. Analysis of variance and range difference showed that when the radius of the disc knife was 180 mm, the vertical center distance between conveying roller and disc knife was 190 mm, the rotating speed of disc cutter shaft was 115 r/min, and the rotating speed of clamping roller shaft was 56 r/min, the seed was cut. The efficiency was 74.5 kg/min, the qualified rate of seed cutting was 98.8%, and the results of comparison verification test and optimization test were basically the same, which met the seed potato cutting operation requirements.

Key words: potato seed cutting machine; cutting device; vertical and horizontal knife group

0　引言

我国马铃薯种植绝大多数采用种薯切块的垄作种植模式[1-2],且大多采用机械化播种[3-5],马铃薯切块质量及均匀度是影响马铃薯产量的关键因素。目前,我国马铃薯切块仍以人工为主,存在作业效率低、切块不均匀、劳动强度大、生产成本高等问题[6],严重制约了马铃薯产业的发展。因此,研究

收稿日期: 2019-12-06　修回日期: 2020-01-06
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700705、2016YFD0701600)、现代农业产业技术体系建设专项(CARS-09-P23)和黑龙江省马铃薯产业技术协同创新推广体系项目
作者简介: 吕金庆(1970—),男,研究员,主要从事马铃薯机械化技术与装备研究,E-mail: ljq8888866666@163.com

马铃薯机械化切种装备成为马铃薯机械化生产的首要问题。

早在 20 世纪 60 年代,国外已开始对马铃薯切种机械的研究[7-11]。这些机具属大型集成化装备,性能良好,可一次性完成上料、分级、切种、喷药等处理,但价格昂贵,且国内一些地区的马铃薯属小地块种植,故国外马铃薯切块机不适于我国国情。国内学者郭志东[12]发明了一种马铃薯自动切块机,该机可以小范围控制所切薯块的质量,通用性较好;张国强[13]设计了一种智能控制切块机,该切块机智能化程度高、操作较为方便;周树林[14]发明了舀勺定刀式马铃薯切块机,该机通过更换舀勺对不同大小种薯切种后的薯块质量进行控制。目前,我国马铃薯种薯自动切块研究尚处于起步阶段,现有马铃薯切块机存在切种合格率差、切种效率不高、机具集成化水平低等问题,亟需加大对马铃薯切种机械的研究力度。

针对以上问题,本文设计一种纵横刀组协同式马铃薯种薯切块装置,通过对种薯切割过程的力学分析、运动学分析和能量学分析,明确影响马铃薯切种效果的主要因素,搭建试验台进行相关试验,以期获得马铃薯切种装置最优的工作参数组合。

1 马铃薯切种农艺要求

马铃薯是块茎繁殖作物,种薯切块能促进块茎内外氧气交换,破除休眠,提早发芽出苗,节约薯种。一般选用的种薯质量在 300 g 以下,质量在 70 g 以下的种薯可整薯播种,质量在 70 ~ 140 g 的种薯,纵向一切两瓣,如图 1a 所示;质量在 140 ~ 210 g 的种薯可切分为 3 块,如图 1b 所示;质量在 210 g 以上的种薯切分为 3 段后,仍然会有部分薯块体积过大,此时可采用横纵切法,把种薯切成 4 瓣,如图 1c。一般单块质量在 35 ~ 70 g 播种效果较好[15-17],每个薯块须有 2 个以上芽眼[18-20],其农艺要求如图 1 所示。马铃薯切块机属流水线作业方式,包括清选分级、整列定位、薯块切割、喷药处理等,自动切种预处理流程图如图 2 所示,其中芽眼识别装置位于整列定位工序中,本文主要对切割工序中的切割装置进行设计,着重研究薯块切割过程中受力分析、运动学分析、能量学分析,建立数学模型,通过试验确定切割装置的工作参数,验证切种性能。

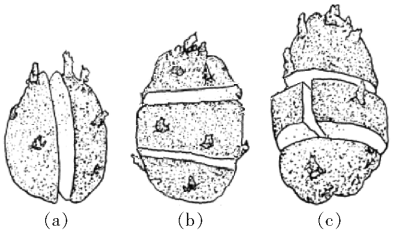

图 1 马铃薯切种农艺要求

Fig. 1 Potato cutting agronomic requirements

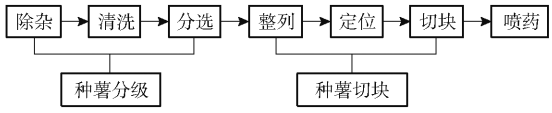

图 2 马铃薯自动切种流程图

Fig. 2 Flow chart of potato automatic cutting

2 整体结构与工作原理

马铃薯切种装置试验台主要由夹持辊组、横刀、剥离板组、圆盘刀组、机架、护板、输送辊组、切种装置传动电机、输送装置传动电机等组成,装置两侧均安装护板,为了更加清晰地展示结构,将一侧护板拆除。整体结构如图 3 所示。

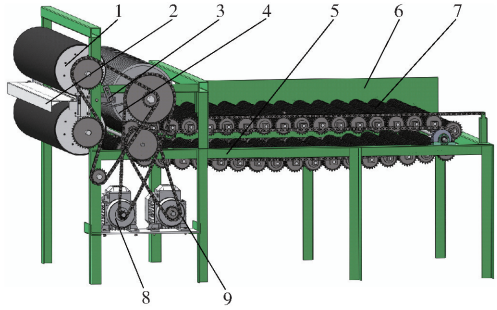

图 3 整体结构图

Fig. 3 Overall structure diagram

1. 夹持辊组 2. 横刀 3. 剥离板组 4. 圆盘刀组 5. 机架 6. 护板 7. 输送辊组 8. 切种装置传动电机 9. 输送装置传动电机

该切种装置的切割部件为纵向安装在输送辊组后方的圆盘刀组和横向安装在夹持辊组后方的横刀,其中圆盘刀组作为第 1 次切割部件,可完成对种薯的纵向切割,横刀作为第 2 次切割部件,可对部分已进行第一次切割但不满足切种农艺要求的薯块进行第 2 次横向切割,两切割部件组成纵横刀组,在二者协同作用下,可得到满足马铃薯切种农艺要求的薯块,具体工作原理如下:切种装置主要配合分级装置和输送装置使用,种薯经分级装置完成清选分级后进入输送辊组,可能会产生堆积,输送辊自转可调整种薯重心,完成整列定位,同时输送辊组向圆盘刀组方向匀速前进,圆盘刀对应输送辊组缝隙,固定安装在机架上,绕圆盘刀轴匀速转动。种薯经过圆盘刀时,被切割成宽度与圆盘刀间隙相同的薯块,此时由于种薯与圆盘刀间摩擦因数较大,种薯块会附着在圆盘刀上随圆盘刀转动,一段时间后会被固定在圆盘刀组后方的圆盘刀两侧的剥离板剥离;由于种薯形状的不规则以及种薯大小不均,切割完成的薯块大小不一,质量合格的薯块在被剥离后会掉落至

切割装置下方，进行下一步处理；质量过大的薯块则会被剥离板引导至夹持辊组，夹持辊组中两个夹持辊旋转方向相反，将薯块夹持住，同时产生推动力，横刀固定安装在两夹持辊中间，在推动力的作用下，横刀将薯块一分为二，切割完成后的薯块由种薯流推动从横刀上掉落至切种装置下方，进行下一步处理。

3　关键部件设计

3.1　圆盘刀组

切割器是种薯切割装置关键部件，目前切割器大多用于玉米、甘蔗等茎秆类作物收获机械上，常用的切割器形式有圆盘式、往复式、甩刀式。其中圆盘式切割器具有切割精度高、切缝整齐、基体不变形、切割使用寿命长等特点，符合种薯切块的基本要求，故本文选用圆盘式切割器，圆盘刀组结构如图 4 所示，圆盘刀组采用 2Cr13 不锈钢材料，该材料在淬火状态下硬度高，具有良好的耐蚀性和耐磨性；为了提高切割效率，提高能量利用率，设计圆盘刀组数为 36 组；种薯经输送装置整列定位后种薯长轴与圆盘刀轴平行，根据需要切种的种薯平均长轴尺寸，质量在 70 ~ 140 g 的种薯长轴长度一般为 50 ~ 80 mm，质量在 140 ~ 300 g 的种薯长轴长度一般为 80 ~ 120 mm，为了保证切种后薯块均匀度，相邻两圆盘刀间距设计为 41 mm。理论上圆盘刀片越薄越好，但厚度过小圆盘刀片切割时容易发生振动，影响切割效果，本文设计圆盘刀片厚度为 3 mm。

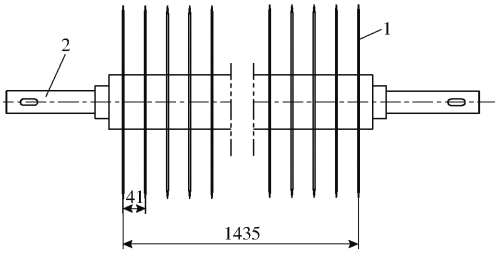

图 4　圆盘刀组结构图

Fig. 4　Structure drawing of disc cutter set

1. 圆盘刀　2. 圆盘刀轴

3.2　剥离板组和夹持辊组

3.2.1　剥离板组

当薯块完成第一次切割时，由于薯块与圆盘刀间摩擦力较大，薯块将随圆盘刀转动，若随着圆盘刀转动一周，会发生堵塞现象，影响切种，所以设计了剥离板组，其结构如图 5 所示。剥离板安装在两个圆盘刀中间，为了防止干涉，需要在剥离板与圆盘刀间留有一定间隙，考虑到安装精度及剥离板强度，设计间隙为 10 mm，剥离板宽度为 21 mm；剥离板焊接在连接条上，在连接板上开有长孔，连接板与连接条、连接条与机架、连接板与机架均以铰接方式连接，可调节剥离板组的安装角度；同时，设计剥离板存在一定弧度，在起到剥离作用的同时将薯块导入到两夹持辊中间，进行二次切割工作。

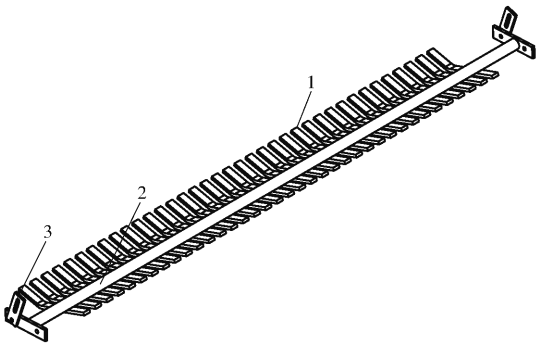

图 5　剥离板组结构图

Fig. 5　Structure diagram of peeling board group

1. 剥离板　2. 连接条　3. 连接板

3.2.2　夹持辊组

对于三轴尺寸较大的种薯，经圆盘刀组切割后，仍有部分薯块体积过大，需要进行二次切割，本文设计了夹持辊组配合二次切割工作，其结构如图 6 所示，该夹持辊组由左挡板、右挡板、夹持辊轴、橡胶和海绵等组成；整个夹持辊组通过轴承座连接在机架上，机架上开有长孔，因不同种薯品种间平均高度有一定差异，可根据切种作业时所切种薯的平均高度调节夹持辊组间距，更好地进行夹持作业，保证薯块均匀度。同时，为了保证夹持辊组作业时薯块不发生滑移，夹持辊表面采用天然橡胶，并在外皮表面均布相距 25 mm、宽度 2 mm 的防滑条；为了减少作业过程薯块的损伤，本文设计夹持辊组内部为中密度海绵，具有一定的弹性和保护性。夹持辊组长度应与圆盘刀组相匹配，设计夹持辊长度为 1 480 mm。

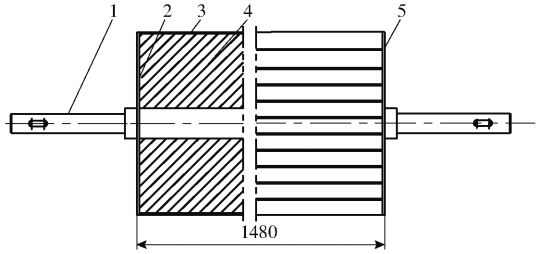

图 6　夹持辊结构图

Fig. 6　Structure drawing of pinch roller

1. 夹持辊轴　2. 左端片　3. 天然橡胶　4. 中密度海绵　5. 右端片

薯块在夹持辊上受力分析如图 7 所示。薯块在二次切割时受力包括重力、夹持辊组的支持力、与夹持辊之间的摩擦力、横刀对薯块的阻力。

薯块在水平方向上所受合力为

$$F_x = F_{f1} + F_{f2} - F_f \tag{1}$$

式中　F_{f1}——薯块与上夹持辊间的摩擦力，N

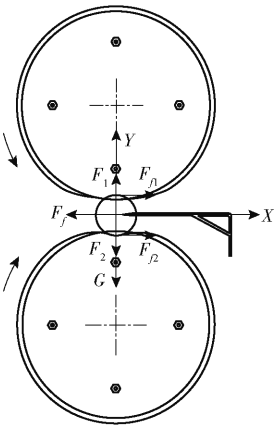

图 7 薯块二次切割时受力分析图

Fig. 7 Mechanical analysis diagram of potato block during secondary cutting

F_{f2}——薯块与下夹持辊间的摩擦力,N

F_f——薯块与横刀的摩擦力,N

薯块在被夹持辊组夹持时,夹持辊表面会产生下凹,表面橡胶被拉伸,产生形变,内部海绵被压缩,产生形变;下夹持辊对薯块产生的支持力为

$$F_1 = A(\varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_2 E_2) \tag{2}$$

式中 A——薯块与上夹持辊的接触面积,mm^2

ε_1——橡胶表皮拉伸应变,mm

ε_2——海绵压缩应变,mm

E_1——橡胶表皮弹性模量,取 7.84 MPa

E_2——海绵弹性模量,取 6.39 MPa[21]

因一次切割薯块后被夹持薯块质量为 70 ~ 100 g,薯块所受重力较小,可忽略不计,则上夹持辊对薯块产生的支持力为

$$F_2 = F_1 \tag{3}$$

夹持辊组夹持薯块完成二次切割条件为

$$F_f \leqslant 2kA(\varepsilon_1 E_1 + \varepsilon_2 E_2) \tag{4}$$

式中 k——薯块与橡胶表皮摩擦因数,取 0.19[22]

由式(4)可知,影响马铃薯二次切割力的因素为薯块与夹持辊组的接触面积,即夹持辊组的间距。根据需二次切种的薯块平均高度 70 ~ 90 mm,设计夹持辊组中心距可调范围为 340 ~ 360 mm;为避免发生拥堵,影响后续薯块切割,应提高薯块二次切种效率,二次切种效率与薯块被夹持推动速度即薯块与夹持辊接触点速度有关,夹持辊半径越大,薯块与夹持辊接触点速度越大,综合考虑夹持辊组安装位置,设计夹持辊半径为 158 mm。同时,夹持辊轴转速 n_1 也是影响二次切种效率的关键参数。

3.3 横刀装置

一次切种后体积仍较大薯块经两夹持辊夹持后,需要进行二次切种,设计了横刀装置来配合夹持装置完成二次切种工作,其结构如图 8 所示。横刀装置由横刀片机构、横刀连接片机构、横刀连接板机构通过螺栓连接在一起,再由螺栓连接在机架上,在横刀连接板机构和横刀连接片机构上开有长孔,可根据安装需要调整安装位置。在横刀片机构下方焊接有导板,将已二次切种薯块导入到下级输送装置进行下一步工作,可防止已二次切种薯块粘附在横刀上发生堵塞,刀片材质选用 2Cr13 不锈钢材料,设计刀片厚度为 3 mm,刃角为 10°,横刀长度应与夹持辊组长度相匹配,考虑到横刀安装情况,设计横刀长度为 1 500 mm。

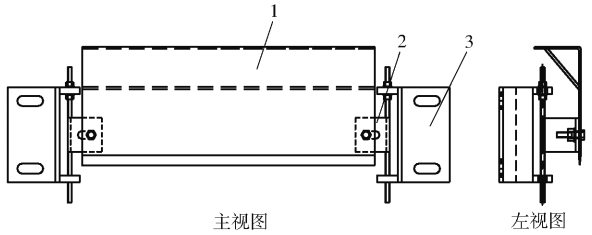

图 8 横刀结构图

Fig. 8 Fixed knife structure diagram

1. 横刀片机构 2. 横刀连接片机构 3. 横刀连接板机构

4 马铃薯种薯切割过程分析

4.1 种薯切割过程的力学分析

在机器工作时,圆盘刀高速旋转。为了便于研究种薯被切割时受力情况,假设被切割部位的横截面为规则的圆,取种薯前进方向为 X 轴正方向,竖直向上方向为 Y 轴正方向,以圆盘刀中心 O 为原点建立 OXY 定坐标系,其受力分析图如图 9 所示。

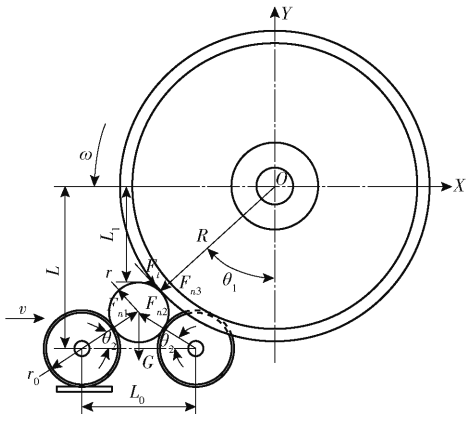

图 9 切割时种薯受力分析图

Fig. 9 Analysis of seed potato stress during cutting

根据种薯受力列出力学平衡方程

$$\begin{cases} F_{n3}\cos\theta_1 + F_t\sin\theta_1 + G - F_{n1}\sin\theta_2 - F_{n2}\sin\theta_2 = 0 \\ F_{n1}\cos\theta_2 + F_t\cos\theta_1 - F_{n2}\cos\theta_2 - F_{n3}\sin\theta_1 = 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$F_{n1} = F_{n2} \tag{6}$$

式中 F_{n3}——圆盘刀作用于切割部位的正压力,N

F_t——圆盘刀作用于切割部位的切向力,N

G——种薯重力，N

F_{n1}——输送辊 1 的支持力，N

F_{n2}——输送辊 2 的支持力，N

θ_1——圆盘刀对种薯的切割角，(°)

θ_2——输送辊对种薯的支持角，(°)

由式(5)、(6)可得

$$F_t = 2F_{n1}\sin\theta_1\sin\theta_2 - G\sin\theta_1 \tag{7}$$

又根据其几何关系得出

$$\sin\theta_1 = \frac{\sqrt{(R-L_1)(R+L_1+2r)}}{2(R+r)} \tag{8}$$

式中　R——圆盘刀半径，mm

L_1——种薯上方最高点与圆盘刀中心的距离，mm

r——种薯半径，mm

$$\sin\theta_2 = \frac{\sqrt{4(r_0+r)^2 - L_0^2}}{2(r_0+r)} \tag{9}$$

式中　L_0——两输送辊中心距，取 132 mm

r_0——输送辊半径，取 44 mm

将式(8)、(9)代入式(7)可得

$$F_t = \left(\frac{\sqrt{4(r_0+r)^2 - L_0^2}}{r_0+r}F_{n1} - G\right)\frac{\sqrt{(R-L_1)(R+L_1+2r)}}{2(R+r)} \tag{10}$$

其中输送辊与圆盘刀垂直中心距 L 为

$$L = \frac{1}{2}\sqrt{4(r_0+r)^2 - L_0^2} + r + L_1 \tag{11}$$

由 $F_t = \lambda F_{n3}$可知，种薯受到切削力合力为

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_{n3}^2} = \sqrt{1+\lambda^2}F_t \tag{12}$$

式中　λ——种薯与圆盘刀间摩擦因数，取 0.63[23]

由式(10)～(12)可知，当输送辊半径 r_0、种薯半径 r、种薯质量 m、输送辊中心距 L_0一定时，影响圆盘刀切割种薯切削力的主要因素为输送辊与圆盘刀垂直中心距 L 和圆盘刀半径 R。

4.2　种薯切割过程的运动学分析

因运动是相对的，可将前进中的种薯看作定坐标系，因此圆盘刀的速度可看作是由水平前进速度 v(1.0～1.5 m/s)和圆盘的自身角速度 ω 合成的。将圆盘刀的旋转中心设为坐标系的原点，X 轴正方向与圆盘刀相对种薯运动方向一致，即与种薯输送的方向相反，Y 轴正方向竖直向上，建立直角坐标系。在即将开始切割时，圆盘刀位于位置 1，开始切割临界点为 A，位置 2 为切割中途位置，位置 3 为完成切割位置，切割终止点为 B，经过一段时间 t'，切割点从 A 处运动到 B 处，切割弧段为 l_{A_1B}，圆盘刀切割时运动学分析如图 10 所示。

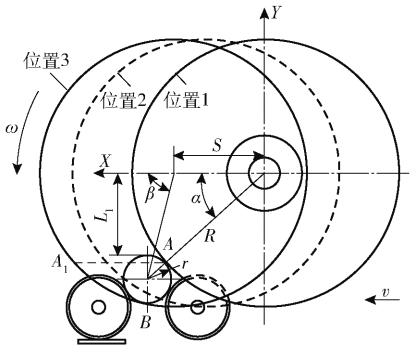

图 10　切割时圆盘刀运动学分析图

Fig. 10　Kinematic analysis of disc cutter during cutting

根据切割点运动轨迹求出运动轨迹方程

$$\begin{cases} x = vt + R\cos(\alpha+\omega t) - R\cos\alpha \\ y = R\sin(\alpha+\omega t) - R\sin\alpha \end{cases} \tag{13}$$

式中　t——圆盘刀相对种薯运动时间，s

α——入切角，(°)

该轨迹是一个以时间 t 为参数的余摆线方程。将式(13)对时间求导，便可求得圆盘刀端点在 X 轴和 Y 轴方向的分速度

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = v - \omega R\sin(\alpha+\omega t) \\ \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \omega R\cos(\alpha+\omega t) \end{cases} \tag{14}$$

因此圆盘刀端点的绝对速度为

$$v_a = \sqrt{v^2 - 2v\omega R\sin(\alpha+\omega t) + \omega^2 R^2} \tag{15}$$

设切出角为 β，则 $\beta = \alpha + \omega t$，根据几何关系得

$$\sin\beta = \frac{\sqrt{(R-L_1)(R+L_1+2r)}}{2(R-r)} \tag{16}$$

圆盘刀角速度 ω 与圆盘刀轴转速 n 的关系为

$$\omega = 2\pi n \tag{17}$$

设切割临界点 A 时刻为 t_0，切割中途任意时刻为 t_1，则切割弧段的弧长为

$$l = \int_{t_0}^{t_1}\sqrt{v^2 - \frac{2\pi nvR\sqrt{(R-L_1)(R+L_1+2r)}}{R-r} + 4\pi^2 n^2 R^2}\,\mathrm{d}t \tag{18}$$

其切割一个种薯所需时间 t'为

$$t' = \frac{180\int_{t_0}^{t_1}\sqrt{v^2 - \dfrac{2\pi nvR\sqrt{(R-L_1)(R+L_1+2r)}}{R-r} + 4\pi^2 n^2 R^2}\,\mathrm{d}t}{2\pi^2 nR} \tag{19}$$

由式(19)可知，在种薯半径 r、输送速度 v 一定时，影响圆盘刀切种时间的主要因素为输送辊与圆盘刀垂直中心距 L、圆盘刀半径 R 和圆盘刀轴转速 n。

4.3 种薯切割过程的能量学分析

圆盘刀位于位置 1 时,刚与种薯接触,因种薯具有一定的弹性,在接触位置会产生一定的弹性形变[24-26],且种薯会对圆盘刀在接触弧区产生一定的正应力 σ_x,相应的会产生线应变 ε_x,以种薯与圆盘刀接触发生变形弧区上一点为原点,以正应力方向为 X 轴正向,垂直于正应力且向上的方向为 Y 轴正向,建立直角坐标系如图 11 所示。当圆盘刀切开种薯进入种薯内部即圆盘刀处于位置 2 时,受到种薯作用于圆盘刀刀刃上的切割阻应力 q 以及作用于圆盘刀面的滑动阻应力 τ,假设种薯在发生弹性变形过程中始终保持平衡,滑动阻应力 τ 在圆盘平面上均匀分布,其方向与圆盘上各点的速度矢量方向相反;切割阻应力 q 在圆盘刀刃口曲线上均匀分布,其方向与刃口曲线上各点的速度矢量方向相反。由以上分析可知圆盘刀完成一次完整的种薯切割过程需要克服滑动阻力作功、克服切割阻力作功和克服种薯弹性势能。

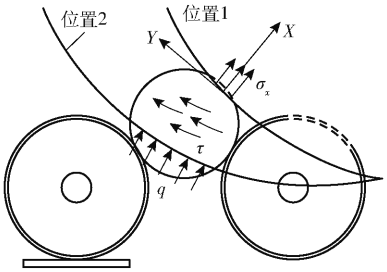

图 11 切割种薯过程圆盘刀所受阻应力示意图

Fig. 11 Resistance stress of disc cutter for cutting seed potato process

种薯单位体积内具有的应变能密度[27]为

$$v_\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_x} \sigma_x \mathrm{d}\varepsilon_x = \frac{1}{2}\sigma_x\varepsilon_x \tag{20}$$

其中正应力 σ_x 与线应变 ε_x 的关系为

$$\sigma_x = \frac{E}{1+\mu}\frac{1-\mu}{1-2\mu}\varepsilon_x \tag{21}$$

式中 E——马铃薯弹性模量,取 4.15×10^6 Pa[28]

μ——马铃薯泊松比,取 0.57

联立式(20)、(21)得种薯形变势能为

$$W_\varepsilon = \iiint \frac{2E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}\varepsilon_x^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{22}$$

圆盘刀进入种薯内部切割过程中克服切割阻应力作功为

$$W_q = 2qlr \tag{23}$$

圆盘刀克服滑动阻应力作功为

$$W_\tau = l\int \tau \mathrm{d}A_1 \tag{24}$$

式中 A_1——马铃薯与圆盘刀接触面积,mm^2

联立式(22)~(24)得圆盘刀所需作总功为

$$W = W_\varepsilon + W_q + W_\tau = \iiint \frac{2E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}\varepsilon_x^2 \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z + 2qlr + l\int \tau \mathrm{d}A_1 \tag{25}$$

由式(25)可知,为了提高装置性能,应尽量降低圆盘刀所需作总功。同时保证

$$F_t l + 2rF_{n3} \geqslant W \tag{26}$$

由式(26)可知,在种薯弹性模量 E、泊松比 μ、种薯半径 r 一定时,种薯切割效果和切割效率受圆盘刀切割种薯过程中的弧长 l、圆盘刀作用于切割部位的切向力 F_t、圆盘刀对种薯的正压力 F_{n3} 的影响。结合式(12)、(17),综合确定影响种薯切割效果和切割效率的主要因素为圆盘刀半径 R、输送辊与圆盘刀的垂直中心距 L、圆盘刀轴转速 n、夹持辊轴转速 n_1。

5 台架试验

5.1 试验材料与装置

试验于 2019 年 5 月进行,试验地点为东北农业大学北方马铃薯全程机械化试验基地。选择东农 303 为试验品种,平均含水率为 78.5%,净度大于 99%,马铃薯质量范围为 70~300 g。利用马铃薯切种试验台进行试验,试验过程如图 12 所示。





图 12 试验过程

Fig. 12 Test process

5.2 评价指标

目前我国对马铃薯切块机的研究处于起步阶段,没有相关评价标准,本课题针对人工切种存在的切种效率低、劳动强度大、工时长、切种合格率低等关键问题,根据马铃薯种薯农艺要求、机械化播种需求及芽眼螺旋生长分布特性,选定马铃薯种薯切种效率和切种合格率为试验指标。

切种效率计算公式为

$$N=\frac{T}{t_N} \tag{27}$$

式中　N——切种效率，kg/min

T——完成切种的薯块总质量，kg

t_N——完成切种的总时间，min

切种合格率计算公式为

$$M=\frac{Q}{P}\times 100\% \tag{28}$$

式中　M——切种合格率，%

Q——含有 2 个及以上芽眼且质量合格薯块的个数

P——切割薯块总数

5.3　试验方案与结果分析

5.3.1　试验方案与结果

采用正交试验设计方法安排试验方案，选取 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排试验，圆盘刀组一次切种完成后，薯块附着在圆盘刀随圆盘刀一起旋转，因部分薯块需要进行二次切种，需要剥离板组将这部分薯块导入夹持辊组中，圆盘刀半径过小会导致薯块导入行程过短，造成漏切，圆盘刀半径过大则会导致装置体积过大，薯块附着在圆盘刀上时间过长，加大圆盘刀负载，因此选定圆盘刀半径为 150 ~ 180 mm；输送辊与圆盘刀垂直中心距主要影响圆盘刀对种薯的入切角，为了保证正常的切割效果，入切角应在 0° ~ 90°之间，配合圆盘刀半径，选定输送辊与圆盘刀垂直中心距为 180 ~ 210 mm；因圆盘刀组需与输送装置进行速度匹配，输送装置速度为 1 ~ 1.5 m/s，若圆盘刀轴转速过小会产生拥堵，圆盘刀轴转速过大会造成空转，加大能量浪费，也会导致装置振动加大，选定圆盘刀轴转速为 85 ~ 130 r/min；同理，夹持辊轴转速也需与圆盘刀组进行速度匹配，由于夹持辊只夹持一次切种后体积仍然过大的薯块，相较于圆盘刀组，工作量减少，可适当降低夹持辊轴转速，若夹持辊轴转速过低会产生拥堵现象，若夹持辊轴转速过高，在二次切割完成后会造成薯块抛飞，造成种薯损伤，选定夹持辊轴转速为 36 ~ 66 r/min。各试验因素水平如表 1 所示，试验方案及结果如表 2 所示，A、B、C、D 为因素水平值。

表 1　试验因素水平

Tab. 1　Experimental factors and levels

水平	试验因素			
	圆盘刀半径/mm	输送辊与圆盘刀垂直中心距/mm	圆盘刀轴转速/(r·min^{-1})	夹持辊轴转速/(r·min^{-1})
1	150	180	85	36
2	160	190	100	46
3	170	200	115	56
4	180	210	130	66

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Test plan and results

序号	因素					N/(kg·min^{-1})
	A	B	C	误差	D	
1	1	4	1	1	1	69.6
2	1	3	2	2	2	70.3
3	1	2	3	3	3	71.5
4	1	1	4	4	4	70.7
5	2	4	2	3	4	71.0
6	2	3	1	4	3	72.0
7	2	2	4	1	2	72.5
8	2	1	3	2	1	72.4
9	3	4	3	4	2	73.0
10	3	3	4	3	1	72.9
11	3	2	1	2	4	73.5
12	3	1	2	1	3	73.7
13	4	4	4	2	3	73.2
14	4	3	3	1	4	73.6
15	4	2	2	3	1	73.3
16	4	1	1	4	2	73.7

5.3.2　试验结果极差分析

根据正交试验结果，极差分析结果如表 3 所示。

表 3　切种效率极差分析

Tab. 3　Range analysis of seed cutting efficiency

项目	A	B	C	误差	D
K_1	282.1	290.5	288.8	289.4	288.2
K_2	287.9	290.8	288.3	289.4	289.5
K_3	293.1	288.8	290.5	288.7	290.4
K_4	293.8	286.8	289.3	289.4	288.8
k_1	70.5	72.6	72.2	72.4	72.1
k_2	72.0	72.7	72.1	72.4	72.4
k_3	73.3	72.2	72.6	72.2	72.6
k_4	73.5	71.7	72.3	72.4	72.2
R	3	1	0.5	0.2	0.5
最优参数	A_4	B_2	C_3		D_3

由表 3 可以看出，影响切种效率的因素主次顺序为 A、B、C(D)，即影响切种效率的首要因素是圆盘刀半径，其次是输送辊与圆盘刀垂直中心距，再次是圆盘刀轴转速和夹持辊轴转速，由极差分析可得，保证马铃薯切种效率的最优参数组合为 $A_4B_2C_3D_3$，即圆盘刀半径为 180 mm、输送辊与圆盘刀垂直中心距为 190 mm、圆盘刀轴转速为 115 r/min、夹持辊轴转速为 56 r/min 时切种效率最高。

5.3.3　试验结果方差分析

根据正交试验结果，利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行方差分析[29-30]，并进行显著性检验。方差分析结果如表 4 所示。

对于切种效率，圆盘刀半径和输送辊与圆盘刀垂直中心距均有极显著影响($P<0.01$)，圆盘刀轴

转速和夹持辊轴转速有显著影响($0.01 < P < 0.05$),各因素影响由大到小依次为 A、B、D、C,与上文中极差分析结果一致。

表 4 切种效率方差分析

Tab. 4 Variance analysis of seed cutting efficiency

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	26.00	12	2.17	203.90	0.000 5 ***
A	22.12	3	7.37	693.86	<0.000 1 ***
B	2.54	3	0.85	79.75	0.002 3 ***
C	0.67	3	0.22	20.92	0.016 3 **
D	0.67	3	0.22	21.08	0.016 1 **
残差	0.032	3	0.011		
总和	26.03	15			

注:***表示差异极显著($P<0.01$);**表示差异显著($0.01<P<0.05$)。

6 田间试验

验证试验条件与正交试验条件完全相同,于 2019 年 5 月在东北农业大学北方马铃薯全程机械化试验基地进行。将通过极差分析法得出的最优参数组合 $A_4B_2C_3D_3$ 与正交试验中切块效率最高的第 12 号试验($A_3B_1C_2D_3$)和第 16 号试验($A_4B_1C_1D_2$)进行对比试验,通过极差分析法得出的最优参数组合 $A_4B_2C_3D_3$ 的切种效率试验结果为 74.5 kg/min,优于正交试验中最优结果 73.7 kg/min,可确定当圆盘刀半径为 180 mm、输送辊与圆盘刀垂直中心距为 190 mm、圆盘刀轴转速为 115 r/min、夹持辊轴转速为 56 r/min 时切种效率最高,为 74.5 kg/min。

将装置以最优工作参数运行 10 min,切割薯块总质量为 744.83 kg,将所有薯块总质量等分为 5 份,随机选取其中 3 份,统计芽眼分布情况和薯块质量合格情况,处理过程如图 13 所示。将 3 次统计结果取平均值,得到马铃薯切种装置切割薯块合格率为 98.8%,满足马铃薯切种作业要求。

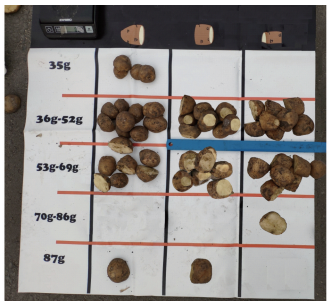

图 13 统计过程

Fig. 13 Statistical process

7 结论

(1)设计了马铃薯种薯切块装置,该装置结构简单,可配合分级装置和输送装置对马铃薯种薯进行均匀切块,一次切种后,对体积仍然过大的薯块可进行筛选,并二次切种,提高了马铃薯切种效率和切种合格率。

(2)采用正交试验方法进行台架试验,并进行验证试验,对试验结果进行极差和方差分析,通过分析得出影响马铃薯切种效率的因素主次顺序为圆盘刀半径、输送辊与圆盘刀垂直中心距、圆盘刀轴转速、夹持辊轴转速。较优的参数组合为圆盘刀半径为 180 mm、输送辊与圆盘刀垂直中心距为 190 mm、圆盘刀轴转速为 115 r/min、夹持辊轴转速为 56 r/min,此时切种效率为 74.5 kg/min、切种合格率为 98.8%。田间试验结果验证了理论分析及结构设计的合理性,该装置满足马铃薯切种作业要求。

参 考 文 献

[1] 杨然兵,杨红光,连政国,等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):104-113.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 104-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.012. (in Chinese)

[2] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究,2015,37(12):258-263.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(12): 258-263. (in Chinese)

[3] 戴飞,辛尚龙,赵武云,等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):76-83,56.
DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 76-83,56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009. (in Chinese)

[4] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):51-60.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, YANG Xiaohan, et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type patato seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 51-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005. (in Chinese)

[5] 侯加林,刘威,张万枝,等. 气力托勺式马铃薯精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(24):18-28.
HOU Jialin, LIU Wei, ZHANG Wanzhi, et al. Design of precision pneumatic cup seed-metering device for potato [J].

Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 18 - 28. (in Chinese)
[6] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):1 - 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)
[7] SEKHON H S, SINGH M. Effect of mechanical and chemical seed treatments on the number and size of seed tubers and yield of potatoes [J]. The Journal of Agricultural Science, 1984, 103(3): 487 - 495.
[8] AHMAD S, MUHAMMAD S S, HASSAN F K, et al. Design and development of a potato seed cutter machine [J]. Pakistan Journal of Engineering and Technology, 2018, 1(1): 29 - 34.
[9] MUMYAZ A, MUHAMMAD Y, IMTIAZ S, et al. Performance evaluation of a mechanical potato seed cutting machine [J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 1999, 2(4): 1527 - 1532.
[10] 比利时 DEWULF 官网. https://www.dewulfgroup.com.
[11] TALBURT W F, SMITH O. Potato processing [M]. Connecticut: The AVI. Publishing Company, Inc., 2013.
[12] 郭志东. 马铃薯种薯自动切块机:201310216006.8 [P]. 2013 - 09 - 11.
[13] 张国强. 马铃薯种薯自动切块机的研究与设计[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2018.
ZHANG Guoqiang. The study and design of the potato seed auto-cutting machine [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2018. (in Chinese)
[14] 周树林. 舀勺定刀式马铃薯种薯切块机: 201510180121.3 [P]. 2015 - 07 - 22.
[15] 雷雪萍. 种薯切块大小和种植密度对费乌瑞它植株性状和产量性状的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
LEI Xueping. Effects of seed piece size and in-row spacing on plant and yield traits of favorita [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[16] 尚文艳,许志兴,赵鹏飞,等. 不同芽位种薯芽块播种对马铃薯产量的影响[J]. 现代农业科技,2018(11):74 - 75.
[17] 赵怀勇,张红菊,张恩和,等. 种薯大小对整薯播种马铃薯生长发育与产量的影响[J]. 农业科技通讯,2008(6):75 - 79.
ZHAO Huaiyong, ZHANG Hongju, ZHANG Enhe, et al. Effect of seed tubers size on growth and yield of entire potato sowing seeds potato[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2008(6): 75 - 79. (in Chinese)
[18] 陈智君,桂林国,吴利晓,等. 马铃薯种块芽眼数对出苗影响试验研究[J]. 宁夏农林科技,2015,56(12):11 - 12.
CHEN Zhijun, GUI Linguo, WU Lixiao, et al. Comparative test on effects of different bud number of potato seed pieces on potato emergence[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2015, 56(12): 11 - 12. (in Chinese)
[19] 席芮,侯加林,李立成. 基于混沌优化 K 均值算法的马铃薯芽眼的快速分割[J]. 农业工程学报,2019,35(5):190 - 196.
XI Rui, HOU Jialin, LI Licheng. Fast segmentation on potato buds with chaos optimization-based K-means algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(5): 190 - 196. (in Chinese)
[20] 田海韬. 基于机器视觉的马铃薯自动化切种方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2017.
TIAN Haitao. Research on the method of potato automatic seed cutting based on machine vision [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
[21] 黄立. 沙发座面弹性材料的压陷硬度及其支撑性能研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2018.
HUANG Li. Study on the indentation force deflection and support performance of elastic materials of sofa cushion [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018. (in Chinese)
[22] 冯斌. 收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2018.
FENG Bin. Study on physical characteristics and damage of potato tubersat harvesting stage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[23] 杨锴. 半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2018.
YANG Kai. Design and experiment of half-cup type potato seed-metering device [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[24] 郭世鲁,王卫兵,李猛,等. 马铃薯机械碰撞有限元分析与试验研究[J]. 机械设计与制造工程,2016,45(1):56 - 59.
GUO Shilu, WANG Weibing, LI Meng, et al. Research on the test of potato mechanism and finite element analysis for crash [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(1): 56 - 59. (in Chinese)
[25] 马晓丽,陈晓英,闫语丝,等. 杨梅果的机械损伤试验和生物力学特性[J]. 农业工程学报,2012,28(16):282 - 287.
MA Xiaoli, CHEN Xiaoying, YAN Yusi, et al. Mechanical damage test and biomechanical characteristics of redbayberry fruit [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 282 - 287. (in Chinese)
[26] 鲍玉冬,杨闯,赵彦玲,等. 基于碰撞变形能的机械采收蓝莓果实碰撞损伤评估[J]. 农业工程学报,2017,33(16):283 - 292.
BAO Yudong, YANG Chuang, ZHAO Yanling, et al. Collision injury assessment of mechanical harvesting blueberry fruit based on collision deformation energy[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 283 - 292. (in Chinese)
[27] 徐芝纶. 弹性力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
[28] 石林榕,孙伟,赵武云,等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证 [J]. 农业工程学报,2018,34(6):35 - 42.
SHI Linrong, SUN Wei, ZHAO Wuyun, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(6): 35 - 42. (in Chinese)
[29] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
[30] 葛宜元,梁秋艳,王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.