

双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验

王希英^{1,2} 唐 汉¹ 王金武¹ 吕金庆¹ 李紫辉¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江农业工程职业学院, 哈尔滨 150088)

摘要: 为提高马铃薯机械式排种器作业质量,满足精密播种要求,改进设计了双列交错勺带式马铃薯精量排种器,阐述分析了排种器总体结构及工作原理,优化了双勺交错排种总成、主动驱动总成和振动清种装置结构参数。为研究排种器最佳工作参数,以工作转速和振动幅度为试验因素,株间合格指数、重播指数和漏播指数为试验指标,进行了多因素二次正交旋转组合设计试验,建立了排种性能指标与试验参数间数学模型,运用 Design - Expert 6.0.10 软件对试验结果进行处理分析,对回归模型进行优化验证。试验结果表明,当排种器工作转速为 31.5 r/min,振动幅度为 11.7 mm 时,排种作业性能最优,其合格指数为 89.92%,提高了 19.9%,重播指数为 5.12%,漏播指数为 4.96%。田间适应性播种试验表明,排种器对不同尺寸类型马铃薯品种均具有良好的适应性。

关键词: 马铃薯; 勺带式; 精量排种器; 优化; 试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0082-09

Optimized Design and Experiment on Double-row Cross Spoon-belt Potato Precision Seed Metering Device

Wang Xiying^{1,2} Tang Han¹ Wang Jinwu¹ Lü Jinqing¹ Li Zihui¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Heilongjiang Vocation Institute of Agricultural Engineering, Harbin 150088, China)

Abstract: In order to meet the requirements of precision planting and improve the seeding quality of potato seed metering device, a kind of double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device was designed. The overall structure and working principle of the seed metering device were illustrated and analyzed. The optimal design of structural parameters of key components was conducted, such as the double-row cross seeding assembly, the driving assembly and the vibration cleaning-seed assembly. To improve the working performance of the metering device, obtain the best operation parameters, the quadratic general rotary unitized design was carried out with the rotational speed and the amplitude of seed metering device as the experiment factors and the seeding qualified index, the relaying seed qualified index and the missing seed qualified index as the experimental indexes. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design - Expert 6.0.10 software, and the experimental factors were optimized, the best combination was achieved. Test results showed that as the rotational speed was 31.5 r/min, the amplitude was 11.7 mm, and the seeding qualified index was 89.92%, the improved metering device exceeded the original one by 19.9%, the relaying seed qualified index was 5.12%, and the missing seed qualified index was 4.96%. On the basis, the metering adaptability filed test was carried out, and then test results showed that the seeding performance of seed metering device to all size grades of potato seeds could meet the requirements of precision planting. The results can provide the guidance and direction for the research of potato precision seeder and its key parts.

Key words: potato; spoon-belt; precision seed metering device; optimization; experiment

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-07-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04)和黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA15B401)

作者简介: 王希英(1982—),女,博士生,黑龙江农业工程职业学院副教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail: wxy_820221@163.com

通信作者: 王金武(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

引言

目前马铃薯已成为我国主要粮食作物之一,其种植生产模式对我国农业结构调整及粮食生产安全发展具有重要意义^[1-3]。播种机械化是马铃薯全程机械化生产重要环节,对马铃薯产量具有直接影响。精密播种技术因具有增加产量、作业效率高、节约成本等优点已成为播种技术主体发展方向^[4-5]。马铃薯精量排种器是保证实现精密播种的核心工作部件,其排种性能直接影响到种植质量与效率。按工作原理可分为气力式和机械式两种^[6]。勺带(链)式排种器属于机械式排种器的一种,具有结构简单、维修方便、造价低廉等特点,是我国马铃薯播种产业应用最广泛的排种装置之一^[7-10]。其中勺链形式作业传动比稳定可靠,但链传动取种作业存在不规则振动,且勺链结构易对马铃薯种芽造成损伤,影响作物产量;相对而言,勺带形式在保证作业质量的同时可解决振动及伤种等问题,但高速运行过程中易产生勺带打滑现象。

从 20 世纪 70 年代开始,国内外学者开始对勺带(链)式排种器进行研究^[11-14],主要以排种器结构形式创新研究居多,对关键部件理论分析和可控影响因素研究较少。在高速作业过程中因播种种薯(切块薯或整薯)尺寸差异及机具振动等原因^[15],重播、漏播现象较明显,排种作业质量及效率较低,适应性差,尚需人工补种作业,无法满足实际生产需

求。

针对上述问题,根据马铃薯精密播种要求,以勺带式排种器为研究载体,对双列交错勺带式马铃薯精量排种器加以改进设计,对其工作原理进行分析,优化关键部件双勺交错排种总成、主动驱动总成和振动清种装置结构参数,通过台架试验得到排种器最佳工作组合参数,并进行田间试验检验排种器工作性能,以期为马铃薯精密播种机具及其关键部件的优化设计提供参考,促进马铃薯播种产业规模化、标准化发展。

1 排种器结构与工作原理

1.1 主要结构

排种器结构如图 1 所示,主要由主动驱动总成(张紧装置和主动带轮)、双勺交错排种总成(柔性排种带和取种凹勺)、防架空充种箱体、防夹带分流顶杆、从动带轮、振动清种装置和护种罩壳等部件组成。其中取种凹勺双列交错布置固装于柔性排种带上,其设计与布置合理性直接影响机具作业质量。取种凹勺选用镀锌钢板冲压成型,边缘外翻下折为圆弧状,以减少取种时种薯滑落及伤种现象,其底部开设直径 20 mm 圆孔,以减轻种勺质量,漏除充种过程中的杂质。排种带采用橡胶基带铆接制成,防止作业过程中夹带、断裂及打滑现象。清种装置振源由直流电动机驱动可调式振动凸轮系统进行旋转间歇运动,保证规则振动频率及振幅稳定性。

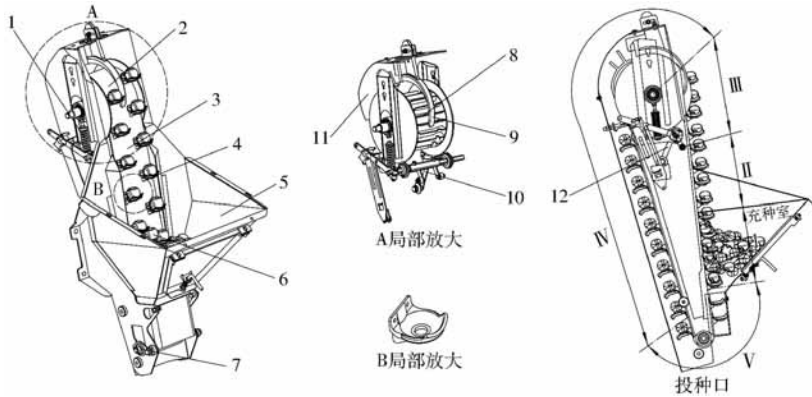


图 1 双列交错勺带式马铃薯精量排种器结构简图

Fig. 1 Structure diagram of double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device

1. 张紧装置 2. 主动驱动总成 3. 柔性排种带 4. 取种凹勺 5. 防架空充种箱体 6. 马铃薯种薯 7. 从动带轮 8. 防夹带分流顶杆
9. 主动带轮 10、12. 振动清种装置 11. 护种罩壳 I. 充种区 II. 运移区 III. 清种区 IV. 导种区 V. 投种区

1.2 工作原理

排种器工作过程主要分为充种、运移、清种、导种和投种 5 个串联阶段。正常作业时,马铃薯种薯在重力作用下填充至种箱充种区内,通过充种箱体自身物料防架空限位结构控制种薯流动状态,避免种薯拱积现象,通过充种箱体顶部橡胶翻盖控制种

薯数量,保证充种区内种薯动态平衡。动力由机具行走轮通过链传动传至主动带轮,驱动柔性排种带与取种凹勺整体自下而上平稳运移。马铃薯种薯在取种凹勺旋转搅动作用下进行分种,形成速度不等的种薯层,在种薯自身重力、种薯间碰撞摩擦作用力及种勺作用力共同作用下进行取种作业,完成充种

环节。当取种凹勺携带种薯运移至清种区时,通过行走机具配套的直流电动机驱动可调式振动凸轮系统进行规则旋转间歇振动,配合防夹带分流顶杆清除勺内及勺间夹带种薯,保证单粒取种,完成清种环节。当取种凹勺舀取单粒种薯越过主动轮最高点时,在种勺作用力及自身重力作用下落入前一取种凹勺背部,且相邻种勺与导种护罩间形成封闭空间,进行平稳导种环节。种薯被运移至投种点抛送瞬间由于离心力突变进行零速投种,完成投种环节。本研究对排种器各关键部件结构参数进行优化,通过最速降线截曲线设计取种凹勺,提高充种稳定性及适应范围。通过柔性双列交错排种带提高种勺舀取充种时间,充分利用排种带空间结构。通过主动驱动总成平稳驱动排种作业,避免种薯抛甩现象,同时减少机具不规则振动。通过可调式振动清种装置和防夹带分流顶杆提高清种作业性能,防止勺带打滑现象。各部件共同作用提高播种质量与效率,实现精密播种作业。

2 关键部件结构优化

2.1 双勺交错排种总成

双勺交错排种总成是排种器的关键部件之一,主要由柔性排种带与取种凹勺组成,其中取种凹勺结构形状、尺寸参数及布置方式直接影响机具充种性能。由于不同马铃薯种薯品种类型尺寸间差异性较大,为提高排种器充种性能及播种适应范围,本文以3种类型马铃薯种薯尺寸参数为设计依据,结合最速降线理论对取种凹勺截曲线进行优化改进。在此基础上,采用双列种勺交错排列方式,提高种勺充种时间,改善排种器充种质量,满足播种农艺要求。

2.1.1 取种凹勺

在取种凹勺优化设计过程中,应简化其种勺内部结构,保证其各朝向种薯受力均匀平稳,且可顺利快速舀取至种勺内,提高充种时间及稳定性。因此本文重点对取种凹勺最速降线截曲线进行研究分析,通过截曲线旋转扫描优化种勺实体为半球碗状,如图2a所示。其中取种凹勺主要结构参数为种勺开口直径 D 、种勺深度 H 及种勺扫描截曲线参数。

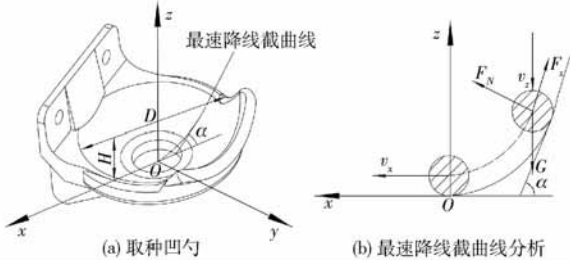


图2 取种凹勺结构图

Fig.2 Structure diagram of seed metering spoon

取种凹勺基本结构参数(种勺开口直径 D 和深度 H)主要与种薯整体尺寸有关,其设计应遵循 $D > \bar{L} > \bar{W} > 2H$ 原则^[15],其中 $\bar{L}$ 为马铃薯种薯平均长度, $\bar{W}$ 为马铃薯种薯平均厚度。

为提高取种凹勺适应范围,选取黑龙江省种植范围较广且尺寸等级不同的3类供试马铃薯品种(东农312、尤金885、费乌瑞它)作为设计依据,通过人工清选分级处理,对每个品种随机抽取500颗种薯,测量其外形尺寸,统计数据平均值结果如表1所示。

表1 马铃薯种薯尺寸统计结果
Tab.1 Overall dimension of potato seeds

品种	长/mm	宽/mm	厚/mm
东农 312	55.38	42.75	36.76
尤金 885	51.67	46.21	41.09
费乌瑞它	46.86	40.12	34.44

根据表1中各类型马铃薯种薯尺寸参数,设计取种凹勺开口直径为56 mm,种勺深度为16.5 mm。

为分析取种凹勺充种性能,对种勺最速降线截曲线进行研究,图2b所示为根据种勺舀取种薯实际运动情况抽象的模型示意图。当种薯由凹勺开口处滑移到底部,其滑移所经历最短路径,即为最速降线曲线^[16]。以取种凹勺底部中心为坐标原点 O ,建立空间直角坐标系 $Oxyz$ 。简化取种凹勺截曲线方程为抛物线,即 $z = ax^2$,研究种薯在 xOz 平面内运动状态,则

$$\begin{cases} mg\cos\alpha = F_N \\ F_s = F_N\tan\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中 m ——马铃薯种薯质量, g
 g ——重力加速度, m/s^2
 α ——截曲线在滑落点切线夹角, $(^\circ)$
 φ ——马铃薯种薯与种勺间摩擦角, $(^\circ)$
 F_N ——种勺支持力, N
 F_s ——种勺摩擦力, N

假设在舀取过程中种勺摩擦力 F_s 所做功为 A ,当种薯滑移高度为 h 时(滑移高度 h 最大值为种勺深度 H),其横向位移为 $-\sqrt{h/a}$,即种薯滑落至种勺底部,此时截曲线为最速降线,摩擦做功 A 可表示为

$$A = - \int_{-\sqrt{h/a}}^0 mg\tan\varphi dx = -mg\tan\varphi\sqrt{h/a} \quad (2)$$

在此过程中应满足能量守恒定律,即

$$\frac{1}{2}mv_z^2 + mgh = -mg\tan\varphi\sqrt{h/a} + \frac{1}{2}mv_x^2 \quad (3)$$

式中 v_z ——马铃薯种薯初始下滑速度, m/s
 v_x ——马铃薯种薯终止水平速度, m/s

将式(2)、(3)合并简化代入种勺截曲抛物线方程 $z = ax^2$ 中,可得

$$z = h \left(\frac{2g \tan \varphi}{v_z^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2 x^2 \tag{4}$$

其中切线倾角 α 为

$$\alpha = \arctan \left(2h \left(\frac{2g \tan \varphi}{v_z^2 - v_x^2 + 2gH} \right)^2 x \right) \tag{5}$$

在理想状态下马铃薯种薯滑落至种勺底部速度 $v_x = 0 \text{ m/s}$,种薯滑落高度 h 为种勺深度 $H = 16.5 \text{ mm}$,马铃薯种薯与种勺间摩擦角 φ 为 $31^\circ \sim 42^\circ$,实际作业过程中排种器主动轮转速 $20 \sim 50 \text{ r/min}$,种薯滑移轨迹横坐标 $x = 28 \text{ mm}$,代入式(5)中可得最速降线曲线切线倾角 α 为 $36.78^\circ \sim 66.32^\circ$ 。

2.1.2 双勺交错排种带

柔性排种带是连接各取种凹勺进行投种作业的枢纽部件,本文所设计柔性排种带选取 4 层橡胶帆布基带(厚 5 mm)通过铆接搭扣交错连接制成,具有良好的回转挠性,可抵消周期性弯曲变形。在排种带上合理布置取种凹勺位置是提高播种作业性能关键,有利于改善播种作业均匀性和直线度,缓解种薯落入种沟时瞬时速度,实现零速投种作业。因此,为提高种勺舀取充种时间,合理利用排种带空间结构,减少播种过程中重播及漏播问题,提出一种双列交错排列方式,如图 3 所示。

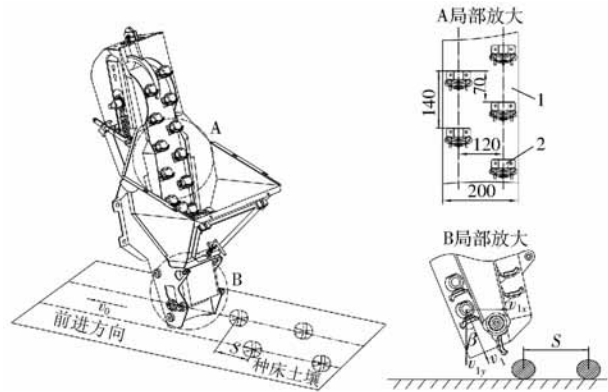


图 3 双列交错排种带布置结构与运动分析图
Fig.3 Diagram of structure and kinematics analysis of double-row cross seed metering spoon
1. 柔性排种带 2. 取种凹勺

为优化双列种勺排列方式,满足马铃薯播种株距农艺要求,对投种过程的种薯进行运动学分析。在理想状态下,单位时间内排种带转过取种凹勺数量应等于所投种薯数量,即

$$\frac{v_0 t}{S} = \frac{v_1 t}{L} \tag{6}$$

$$v_1 = 2\pi n R_1 \tag{7}$$

将式(6)和式(7)合并可得

$$L = \frac{2\pi n R_1 S}{v_0} \tag{8}$$

式中 v_0 ——机具前进速度, m/s
 S ——马铃薯种植株距, mm
 L ——取种凹勺间距离, mm
 n ——主动带轮转速, r/min
 R_1 ——主动带轮半径, mm
 t ——时间, s

根据排种器整体结构及尺寸参数,主动驱动系统不宜过大,同时不可将种薯抛甩离种勺,设定主动带轮半径 R_1 为 80 mm ,参考东北地区马铃薯农艺播种株距 $200 \sim 300 \text{ mm}$,设定播种机具前进速度 $3 \sim 6 \text{ km/h}$,将上述参数代入式(8)可得取种凹勺间距离 $L = 70 \text{ mm}$,排种带单列种勺数量为 18 个,总计 36 个,排种带总长度为 2520 mm 。

考虑种薯落地前对相邻种勺的干扰作用,在种薯运动至投种点位置时,种薯在重力及离心力突变共同作用下应离开种勺。为满足零速投种要求,选取种薯相对排种器排种带投送方向为水平方向^[17],设定排种带运动两个相邻种勺距所需要时间为 t_0 ,则

$$t_0 = \frac{L}{v_0} \tag{9}$$

在时间 t_0 内种薯相对排种器下落位移为

$$l = v_0 t_1 \sin \beta + \frac{1}{2} g t_0^2 \tag{10}$$

将式(8)~(10)合并整理可得

$$l = L \sin \beta + \frac{L^2 g}{8\pi^2 n^2 R_1^2} \tag{11}$$

式中 l ——种薯下落位移, mm
 β ——种薯投送速度与水平间夹角, $(^\circ)$
 t_0 ——排种带走过相邻两种勺间距所需时间, s

由于种薯相对排种器排种带速度为零,故 $\beta = 0^\circ$,将各参数代入式(11)可得 $l = 95.1 \text{ mm}$ 。即在时间 t_0 内下一个种勺运动到投种点位置时,种薯相对排种器垂直方向已运动 95.1 mm ,未对种薯正常投落造成干扰。

2.2 主动驱动总成

主动驱动总成是排种器作业动力源,其设计应保证各工况转速下排种带均未出现打滑现象,减小机具振动,种薯翻越时未甩离出取种凹勺。如图 4 所示,主动驱动总成主要由主动轮轴、主动带轮、张紧装置及相关配件组成。其中主动带轮采用钢板冲压焊接成型,带轮凹槽与排种带紧固螺栓定位匹配。张紧装置与机架固定连接,通过调节其控制手柄改变张紧弹簧压缩程度,选取弹簧材料为碳素弹簧钢

丝,簧丝直径 4.5 mm,弹簧中径 25 mm,总圈数 11,工作极限载荷 853.3 N。

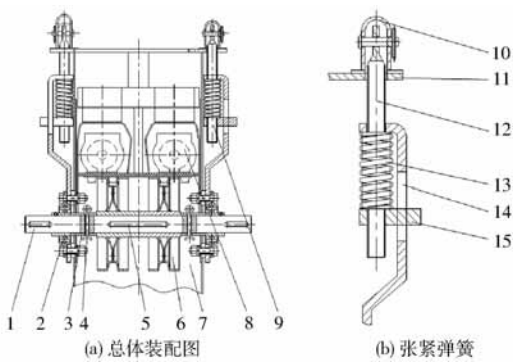


图 4 主动驱动总成结构图

Fig. 4 Structure diagrams of driving assembly

1. 主动轮轴 2. 球面轴承 3. 轴套 4. 开口销 5. 止动键
6. 主动带轮 7. 机架 8. 柔性排种带 9. 驱动张紧装置 10. 调控手柄 11. 顶杆 12. 调整螺杆 13. 张紧弹簧 14. 吊挂上座 15. 调整滑块

为研究取种凹勺运移上升阶段平稳性,分析种薯翻越主动带轮时与种勺间保持相对平衡且不被甩离的临界条件,对此阶段种薯的运动状态进行力学分析。如图 5 所示,当单粒种薯随取种凹勺运动至主动带轮临界处时,种薯受主动带轮离心力 F_c 、种勺摩擦力 F_s 、种勺支持力 F_N 及自身重力 G 共同作用。若保证种薯与取种凹勺间相对平衡,避免种薯被甩离种勺影响后续导种作业,则各力间应满足

$$\begin{cases} F_s + G\sin\theta \geq F_c \\ F_N = G\cos\theta \\ F_s = F_N\mu \\ F_c = 4(\pi n)^2 m R_1 \end{cases} \quad (12)$$

式中 μ ——种勺与种薯间摩擦因数
 θ ——种勺相对旋转角, ($^\circ$)

为求解临界甩离状态下工作转速极限值,将式(12)进行整理可得

$$n \leq \sqrt{\frac{g(\sin\theta + \cos\theta)}{4\pi^2 R}} \quad (13)$$

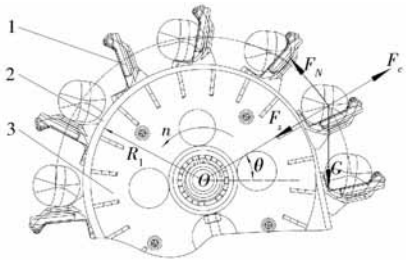


图 5 种薯抛送临界力学分析图

Fig. 5 Diagram of mechanical analysis in throwing critical state

1. 取种凹勺 2. 柔性排种带 3. 主动带轮

由于排种器整体结构一定,其主动带轮半径

$R_1 = 80\text{ mm}$,种勺旋转角 θ 为 $40^\circ \sim 100^\circ$,将上述参数代入式(13)中,可得工况条件下排种器工作转速小于 54.2 r/min 时,种薯与种勺间保持相对平衡状态,不发生相对滑移。因此在后续多因素试验中所设定工作转速因素水平值应小于此临界值,以寻求最佳因素组合条件。

2.3 振动清种装置

为降低播种重播率,提高作业质量,在清种区改进设计可调式振动清种装置,与防夹带分流顶杆相配合清除勺内及勺间夹带种薯,提高排种器清种性能。如图 6 所示,可调式振动清种装置主要由微调螺杆、连接杆、调节手轮、调节架、调节滚轮及振动凸轮等部件组成。其中清种振源由行走机具配套直流电动机驱动凸轮系统提供,振动凸轮与排种带内侧增添的断续梯形凸台相配合,调节滚轮与排种带内侧平面部分相接触。在清种过程中,通过调节手轮及微调螺杆调整滚轮与排种带顶起接合程度,改变清种振动振幅,排种带内侧梯形凸台与 2 个振动凸轮产生均匀振动,将多余种薯清除。

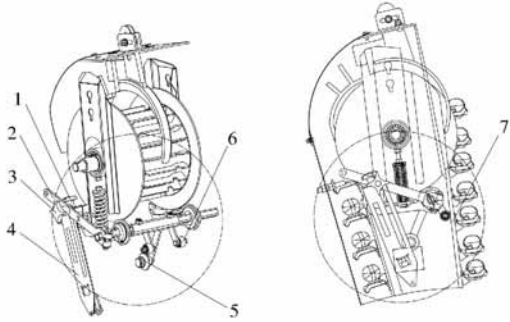


图 6 可调式振动清种装置结构图

Fig. 6 Structure diagram of adjustable vibration cleaning-seed assembly

1. 微调螺杆 2. 连接杆 3. 调节手轮 4. 调节架 5. 调节滚轮
6. 振动凸轮 7. 柔性排种带

清种装置振动频率及振幅是影响排种器清种性能的主要因素,本文对振动清种原理及影响因素进行研究,分析其有效振动清种的临界条件。图 7 所示为根据振动清种过程中种薯实际运动状态抽象的模型简化示意图,分析种勺内舀取 2 个种薯状况,此时重播种薯受到底部种薯双向支持力 F_{N1} 和 F_{N2} 、种薯间摩擦力 F_s 及自身重力 G 共同作用。假设垂直于排种带运移方向为 x 轴,种薯在电动机振源激励下沿 x 轴进行简谐振动,其位移简化为

$$P = \lambda \sin\vartheta = \lambda \sin(\omega t_1) \quad (14)$$

式中 P ——振动装置振动位移,mm
 ϑ ——振动装置振动相位角, ($^\circ$)
 λ ——振动装置沿振动方向振幅,mm
 ω ——振动装置振动角速度,rad/s
 t_1 ——振动装置运动时间,s

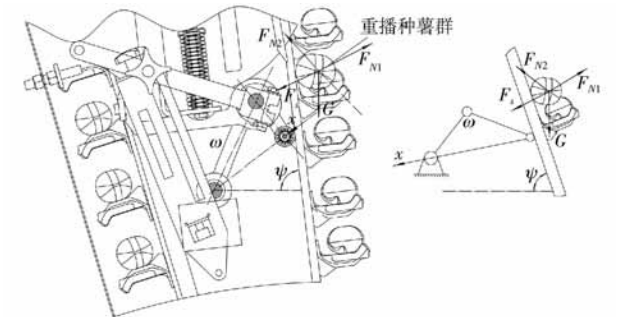


图 7 振动清种原理图

Fig. 7 Schematic diagram of vibration principle

由力学分析可知,当上部重播种薯所受正压力总和 $F'_N \leq 0$ 时,种薯将相对于种勺发生位移跳动,即

$$F'_N = -m\omega^2\lambda\sin\vartheta_{\min} + mg\cos\psi + F_s \leq 0 \quad (15)$$

其中 $F_s = \mu'G\sin\psi$

式中 μ' ——种薯间摩擦因数

$\vartheta_{\min}$ ——种勺临界跳动最小相位角, (°)

ψ ——排种带倾斜角, (°)

分析其重播种薯跳落抛掷临界状态,即 $F'_N = 0$ 时,将式(15)整理可得

$$\sin\vartheta_{\min} = \frac{g(\cos\psi + \mu'\sin\vartheta_{\min})}{\omega^2\lambda} \quad (16)$$

在此引入振动强度 K 和清种抛掷指数 Q ,其表达式为

$$\begin{cases} K = \frac{\omega^2\lambda}{g} \\ Q = \frac{1}{\sin\vartheta_{\min}} \end{cases} \quad (17)$$

将式(15)~(17)合并整理,可得清种抛掷指数为

$$Q = \frac{K}{\cos\psi + \mu'\sin\psi} \quad (18)$$

分析可知,当清种抛掷指数等于 1 时,即发生种薯振动清种,重播种薯仅受到自身重力及底部种薯支持力,由于受种薯形状及振动等影响,两力不共线将产生转矩使得重播种薯翻转清种。在实际作业过程中,由于排种器配置电动机频率及安装角度等参数固定,常通过调节清种系统振幅提高播种作业质量。由前期理论分析可知,排种器工作转速及振动强度是影响排种器播种性能重要因素,在后续台架试验及田间试验中将重点研究此因素对作业质量的影响。

3 台架试验

3.1 试验材料与条件

试验材料为黑龙江省广泛种植的“尤金 885”马铃薯品种(整薯),经人工分级清选处理,保证供试种薯形状均匀及无损伤,测定其平均质量为 49.3 g,

平均几何尺寸参照表 1。

试验地点为东北农业大学排种性能实验室,试验装置主要由双列交错匀带式马铃薯排种器、驱动电动机、安装台架、移动土槽、排种变频控制器及土槽变频控制器等组成,如图 8 所示。试验过程中,排种器固定安装在台架上,在移动土槽中进行人工开沟,在电动机驱动下土槽相对于排种器反向运动,模拟播种机具实际运动状态,马铃薯种薯从投种口排出落在土槽中,通过人工测试完成各项排种性能的指标测定^[18-19]。

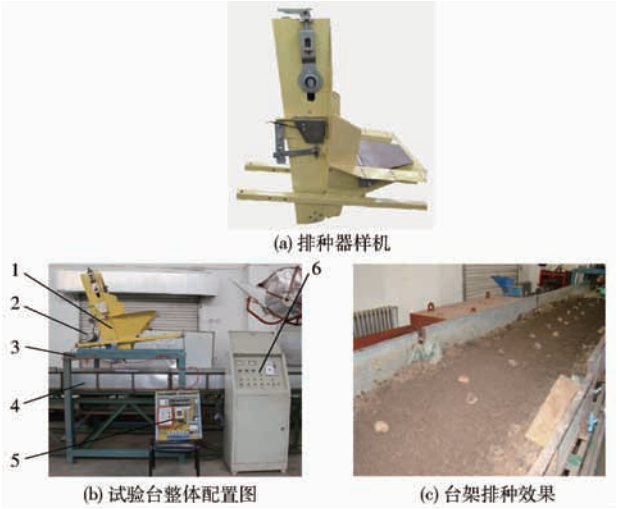


图 8 马铃薯排种性能试验台

Fig. 8 Test bench of potato seeding performance experiments

1. 双列交错匀带式马铃薯排种器 2. 驱动电动机 3. 安装台架
4. 移动土槽 5. 排种变频控制器 6. 土槽变频控制器

3.2 试验因素与指标

由前期理论分析及实际作业状态可知,匀带式马铃薯排种器播种性能与排种器工作转速、振动强度(振幅及频率)、种薯形态尺寸及数量等因素有关。由于田间作业时所播单种类型马铃薯种薯尺寸差异较小,且由充种箱体顶部橡胶翻盖控制其种箱内种薯数量一定,因此台架试验过程中忽略此两因素影响(在后续将针对各类型种薯进行播种适应性田间试验)。同时为提高台架试验可操作性及准确性,进行单因素排种预试验,试验结果可知,排种器工作转速和振动幅度是影响排种器作业质量的主要因素,因此选取工作转速和振动幅度为试验因素。试验过程中通过调节变频控制器控制排种器工作转速,通过调节清种装置振动凸轮与排种带的接触状态控制清种振幅大小(单种类型直流电动机控制频率固定)。

根据马铃薯播种作业农艺要求,参考 GB/T 6242—2006《种植机械马铃薯种植机试验方法》和 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选取马铃薯种薯株间合格指数、重播指数和漏播指

数为试验指标^[20],其计算公式分别为

$$y_1=\frac{n_1}{N}\times 100\%$$

(19)

$$y_2=\frac{n_2}{N}\times 100\%$$

(20)

$$y_3=\frac{n_0}{N}\times 100\%$$

(21)

式中 N ——理论排种数,个
 n_0 ——空漏排种数,个
 n_1 ——单粒排种数,个
 n_2 ——重复排种数,个

3.3 试验内容与方法

根据前期理论分析、单因素预试验及田间播种作业要求,配合各因素可控有效范围,设定试验因素水平如表 2 所示。在此基础上,采用二因素五水平二次旋转组合设计试验研究排种器最佳作业性能参数^[21]。试验过程中,每组试验重复 10 次,对 100 颗马铃薯薯株间尺寸进行统计,数据处理取平均值作为试验结果。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Level of experimental factors

编码	工作转速 $x_1/(r\cdot\min^{-1})$	振动幅度 x_2/mm
1.414	50.0	20.0
1	45.6	17.7
0	35.0	12.0
-1	24.4	6.3
-1.414	20.0	4.0

3.4 试验结果与分析

试验方案与结果如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 为因素编码值。试验参数设计值与实际值误差小于 2.1%,可近似以排种器工作转速和振动幅度设计值对试验结果进行分析。

通过 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据回归分析,进行因素方差分析,筛选出较为显著影响因素,得到性能指标与因素编码值间回归方程

$$y_1=90.09-2.71X_1-1.21X_2-3.91X_1^2-7.47X_2^2+2.02X_1X_2$$

(22)

$$y_2=5.21+0.61X_1-1.03X_2-1.19X_1^2-2.01X_2^2-0.45X_1X_2$$

(23)

$$y_3=3.96+2.11X_1-2.24X_2-3.08X_1^2-5.83X_2^2-1.57X_1X_2$$

(24)

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Results and scheme of tests

序号	试验因素		性能指标		
	工作转速 X_1	振动幅度 X_2	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$
1	-1	-1	87.56	7.50	4.94
2	1	-1	73.92	10.57	15.51
3	-1	1	80.96	7.50	11.54
4	1	1	75.41	8.76	15.83
5	-1.414	0	82.39	7.22	10.39
6	1.414	0	80.63	7.63	11.74
7	0	-1.414	76.01	11.33	12.66
8	0	1.414	72.79	6.76	20.45
9	0	0	91.03	5.00	3.97
10	0	0	92.68	5.59	1.73
11	0	0	87.75	6.72	5.53
12	0	0	88.94	6.26	4.80
13	0	0	90.94	5.69	3.37
14	0	0	86.98	6.22	6.80
15	0	0	94.74	5.1	0.16
16	0	0	87.62	7.06	5.32

为直观地分析试验指标与因素间关系,运用 Design-Expert 6.0.10 软件得到响应曲面,如图 9 所示。

根据上述回归方程和响应曲面图可知,排种器工作转速与振动幅度间存在交互作用。由图 9a 可知,当振动幅度一定时,合格指数随工作转速增加而先增加后降低;当工作转速一定时,合格指数随振动幅度增加也先增加后降低;当振动幅度变化时,合格指数的变化区间较大,因此振动幅度是影响合格指数主要因素。由图 9b 可知,当振动幅度一定时,重播指数随工作转速增加先降低后增加;当工作转速一定时,重播指数随振动幅度增加也先降低后增加;

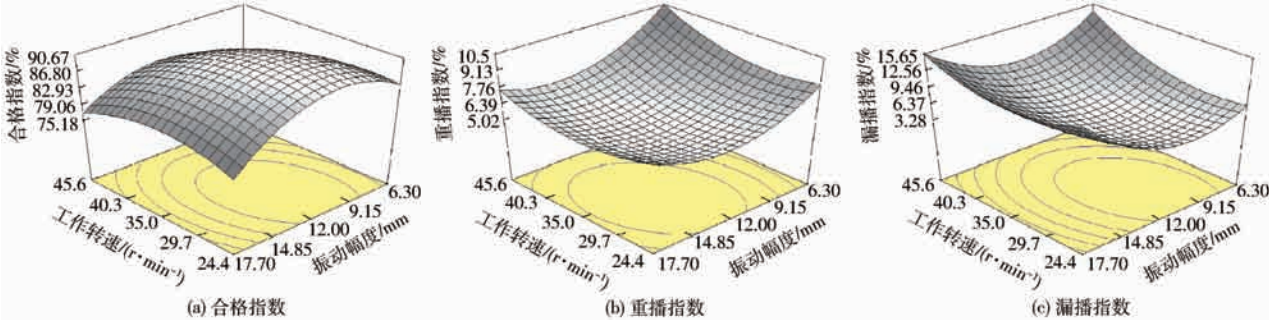


图 9 各因素对试验性能的响应曲面

Fig.9 Response surfaces of all factors on seeding qualified index

当工作转速变化时,重播指数的变化区间较大,因此工作转速是影响重播指数主要因素。由图 9c 可知,当振动幅度一定时,漏播指数随工作转速增加而降低;当工作转速一定时,重播指数随振动幅度增加也降低;当工作转速变化时,漏播指数的变化区间较大,因此工作转速是影响漏播指数主要因素。

3.5 试验优化与验证

在此基础上,对试验因素最佳水平组合进行优化设计,建立参数化数学模型,结合试验因素边界条件,对合格指数、重播指数和漏播指数回归方程进行分析,得到其非线性规划的数学模型为

max y_1

min y_2

min y_3

s. t. 20.0 r/min $\leq x_1 \leq$ 50.0 r/min

4.0 mm $\leq x_2 \leq$ 20.0 mm

0 $\leq y_1(x_1, x_2) \leq$ 1

0 $\leq y_2(x_1, x_2) \leq$ 1

0 $\leq y_3(x_1, x_2) \leq$ 1

(25)

当工作转速为 31.5 r/min,振动幅度为 11.7 mm 时,排种作业性能最优,其合格指数为 90.64%,重播指数为 5.19%,漏播指数为 4.17%。根据优化结果进行试验验证,合格指数为 89.92%,重播指数为 5.12%,漏播指数 4.96%,与优化结果基本一致,误差在可接受范围内。将此工况下试验结果与文献[22]中常规勺带式排种器进行性能对比,其排种合格指数提高了 19.9%,优于 GB/T 6242—2006《种植机械马铃薯种植机试验方法》规定的指标。

4 田间试验

为进一步检验排种器田间作业性能,研究其对不同尺寸类型马铃薯品种适应性能,于 2016 年 5 月 10 日在哈尔滨市香坊区向阳农场进行田间播种试验(图 10),试验前进行旋耕整地作业,土壤疏松规整,满足农艺播种要求。马铃薯品种选取东农 312、尤金 885、费乌瑞它。配套驱动机具为约翰迪尔 904 型拖拉机(功率 66.6 kW),试验样机为安装有双列交错勺带式马铃薯排种器的 2CMF-2 型马铃薯精量播种机具。

为减小试验误差,将作业区域划分为启动区、测试区及停止区,测试总距离 150 m,前后启动区和停止



图 10 田间播种试验

Fig. 10 Field experiment

区为 15 m。作业过程中,各品种马铃薯播种 2 行,机具前进速度为 6 km/h,调节排种器工作转速为 31.5 r/min,振动幅度为 11.7 mm。在此工况下进行 5 次田间播种试验,数据取平均值,结果如表 4 所示。

表 4 田间试验结果

Tab.4 Results of suitability tests

品种	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
东农 312	90.12	7.98	1.9
尤金 885	88.65	5.93	5.42
费乌瑞它	84.34	9.01	6.65

由表 4 可知,在排种器工作转速 31.5 r/min、前进速度 6 km/h 工况下双列交错勺带式马铃薯精量排种器对 3 种不同类型马铃薯播种合格指数均大于 84%,满足马铃薯播种农艺要求。

5 结论

(1)改进优化了双列交错勺带式马铃薯精量排种器,阐述分析了排种器总体结构及工作原理,对其关键部件——双勺交错排种总成、主动驱动总成和振动清种装置结构参数进行了优化,提高了排种作业性能。

(2)采用多因素二次正交旋转组合设计试验研究排种器最佳工作参数组合,建立排种性能指标与试验参数间数学模型,运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验结果进行分析,对回归数学模型进行优化验证。试验结果表明,当排种器工作转速为 31.5 r/min,振动幅度为 11.7 mm 时,排种作业性能最优,其合格指数为 89.92%,重播指数为 5.12%,漏播指数为 4.96%。

(3)田间适应性播种试验表明,工况条件下排种器对不同尺寸类型马铃薯品种均具有良好适应性,满足马铃薯精密播种农艺要求。

参 考 文 献

1 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 马铃薯杀秧机设计与优化[J]. 农业机械学报,2016,47(5):106-114.
LV Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design and experimental on potato haulm cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47 (5): 106-114. (in Chinese)

- 2 史增录,赵武云,吴建民,等. 4UX-550型马铃薯收获机悬挂机组液耦耦合仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(6):98-102.
SHI Zenglu, ZHAO Wuyun, WU Jianmin, et al. Suspension unit hydraulic-mechanical coupling simulation of 4UX-550 potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):98-102. (in Chinese)
- 3 吴建民,李辉,孙伟,等. 拨指轮式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):76-79.
WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Design of potato digger in poke finger's wheel type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):76-79. (in Chinese)
- 4 王金武,唐汉,周文琪,等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9):68-76.
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):68-76. (in Chinese)
- 5 翟建波,夏俊芳,周勇. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(1):75-82.
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):75-82. (in Chinese)
- 6 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(9):77-84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):77-84. (in Chinese)
- 7 吕金庆,许剑平,杨金砖,等. 黑龙江马铃薯生产机械化现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2009,31(8):239-241.
LV Jinqing, XU Jianping, YANG Jinzhuang, et al. The status quo and development trend of potato production mechanization in Heilongjiang province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(8):239-241. (in Chinese)
- 8 刘全威,吴建民,王蒂,等. 马铃薯播种机的研究现状及进展[J]. 农机化研究,2013,35(6):238-241.
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Current status and progress of the potato seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6):238-241. (in Chinese)
- 9 刘全威,吴建民,王蒂,等. 2CM-2型马铃薯播种机漏播补偿系统的设计与研究[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(3):260-266.
LIU Quanwei, WU Jianmin, WANG Di, et al. Design and test of a microcomputer-controlled loss sowing compensation system for 2CM-2 potato seeder[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3):260-266. (in Chinese)
- 10 高明全,张晓东,刘维佳,等. 2CM-2型马铃薯播种机关键部件的设计[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(2):237-240.
GAO Mingquan, ZHANG Xiaodong, LIU Weijia, et al. Design on the critical parts of 2CMF-2 type potato planter[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(2):237-240. (in Chinese)
- 11 杨金砖,吕金庆,李晓明,等. 2CMF-4型悬挂式马铃薯种植机的研究[J]. 农机化研究,2010,32(1):127-130.
YANG Jinzhuang, LV Jinqing, LI Xiaoming, et al. Research of 2CMF-4 potato-planting machine with hanging configuration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1):127-130. (in Chinese)
- 12 杜宏伟,尚书旗,杨然兵,等. 我国马铃薯机械化播种排种技术研究与分析[J]. 农机化研究,2011,33(2):214-217.
DU Hongwei, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Research and analysis on mechanized potato seed sowing techniques[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(2):214-217. (in Chinese)
- 13 曹东. 马铃薯精密播种机漏播监测预警系统的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
CAO Dong. Study on loss monitoring and early warning system of potato precision seeder[D]. Yangling: North West Agricultural and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- 14 孙伟,王关平,吴建民. 勺链式马铃薯排种器漏播检测与补种系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(11):8-15.
SUN Wei, WANG Guanping, WU Jianmin. Design and experiment on loss sowing testing and compensation system of spoon-chain potato metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):8-15. (in Chinese)
- 15 GULATI S, SINGI M. Design and development of a manually drawn cup type potato planter[J]. Indian Potato Assoc, 2003, 30(1):61-62.
- 16 曹成茂,秦宽,王安民,等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(1):66-72.
CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):66-72. (in Chinese)
- 17 陈学庚,钟陆明. 气吸式排种器带式种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):8-15.
CHEN Xuegang, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22):8-15. (in Chinese)
- 18 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015, 31(21):43-50.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Qi, et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):43-50. (in Chinese)
- 19 耿端阳,李玉环,孟鹏祥,等. 玉米伸缩指夹式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(5):38-45.
GENG Duanyang, LI Yuhuan, MENG Pengxiang, et al. Design and test on telescopic clip finger type of metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):38-45. (in Chinese)
- 20 刘佳,崔涛,张东兴,等. 机械气力式组合式玉米精密排种器[J]. 农业机械学报,2012,43(2):43-47.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):43-47. (in Chinese)
- 21 王延耀,李建东,王东伟,等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):54-58.
WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Suppl.):54-58. (in Chinese)
- 22 王泽明. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
WANG Zeming. Design and experimental of metering device of cup-belt type potato planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)