4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验

张　华[1],吴建民[1],孙　伟[1],罗彤娥[1],王　蒂[2],张俊莲[2]
(1.甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘　要: 为适应甘肃省马铃薯种植地块小、坡地多的现状,提高马铃薯机械化收获水平,通过对各关键作业部件进行理论分析与设计选型,研制出了一种携有偏心摇臂结构振动挖掘装置,挖掘深度可调节且与手扶拖拉机相配套的 4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机。田间试验表明:该挖掘机收获作业时掘薯、输运顺畅,减阻碎土、土薯分离效果明显,伤薯率为 3.6%,损失率为 4.1%,明薯率为 97.1%,达到了马铃薯机械化收获的相关技术要求。

关键词: 农业机械;马铃薯;收获;振动;有限元
中图分类号: S225　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-7601(2014)02-0264-05

The design and experiment of 4UM－640 vibration potato digger

ZHANG Hua[1], WU Jian-min[1], SUN Wei[1], LUO Tong-e[1], WANG Di[2], ZHANG Jun-lian[2]
(1. *College of Engineering*, *Gansu Agriculture University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *College of Agriculture*, *Gansu Agriculture University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to suit the status quo of small potato planting plots and more slope land in Gansu Province, improve the machinery harvesting level of potato, through the theoretical analysis, design and selection for each key machine component, have designed out a 4UM－640 vibrating potato digger which held a eccentric swing arm structure and vibration digging installation, the excavating depth can be adjusted and matched with the walking tractor. The field experiment has showed that: When this potato digger was operated, digging potato, smoothly transport, drag reduction and broken soil with evident effect to separate the soil and potato, the potato damage rate was 3.6%, the loss rate was 4.1%, the distinct rate was 97.1%, has reached the relative technical requirements for the potato machinery harvest.

Keywords: agricultural machinery; potatoes; harvesting; vibration; finite element analysis

甘肃省马铃薯种植面积呈逐年上升趋势,每年大约种植 70 万 hm^2,且种植面积不断扩大[1]。随着马铃薯产业的发展,人们越来越重视马铃薯挖掘机具[2]。但由于地理条件限制,有相当一部分的马铃薯种植在山坡地和水平梯田地上,比较平整的大块水浇地种植面积比较小[3]。我国现有的马铃薯联合收获机体积大、功耗高,适用于种植面积较大的作业区域,且由于地理条件和马铃薯种植模式的差异,在山地、坡地收获马铃薯,操作难度大,不适应小地块作业,使得马铃薯机械化收获还面临着较大的困难[4－7]。因此,针对上述缺陷,本试验设计一种适合西北旱作农业区山、坡地垄作种植,作业性能良好的小型振动式马铃薯挖掘机。

1　整机结构及工作原理

1.1　总体结构

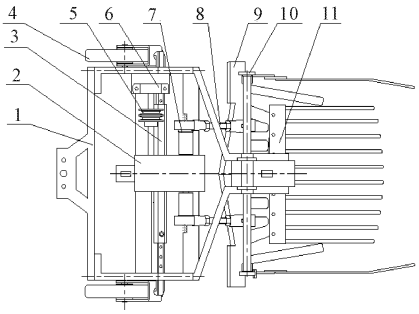
4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机主要由传动装置、机架、栅格式挖掘铲及偏心摇臂式振动挖掘装置、摆动式分离筛,分离筛侧面护栏等部件构成,如图 1a、图 1b)所示。样机能够一次性完成马铃薯的挖掘、分离和集条铺放等作业。

1.2　工作原理

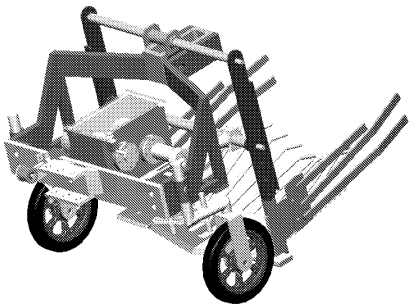
该马铃薯挖掘机和拖拉机通过挂接装置呈刚性联结,采用带传动与齿轮啮合传动相结合的方式进行动力传递。拖拉机将动力通过皮带轮传输至马铃薯挖掘机皮带轮上并带动齿轮轴;随后在齿轮啮合传动的作用下将动力传输至偏心轮轴上,使得偏心

收稿日期: 2013-10-22
基金项目: 甘肃省科技重大专项(1102NKDM025),西北区马铃薯节水高效关键技术研究与示范(2012BAD06B03)
作者简介: 张　华(1985—),男,甘肃兰州人,助理实验师,研究方向为机械化保护性耕作技术及机具。E-mail: 342119021@qq.com。
通信作者: 吴建民(1958—),男,甘肃兰州人,教授,博士生导师,主要从事机械化保护性耕作技术及机具研究。E-mail: wujm@gsau.edu.cn。

轮转动,在偏心装置及摇臂的作用下,通过机架轴两端面与挖掘铲及分离装置挂接板的销钉联接,挖掘铲及分离装置在水平方向做前后往复式振动,从而达到完成马铃薯的挖掘及分离作业的目的。



(a) 结构图 Structure diagram



(b) 三维图 Three dimensional graph

1.机架;2.减速器;3.导向轮支撑杆;4.导向轮;5.皮带轮;6.固定座;7.偏心装置;8.摇臂;9.挖掘铲;10.挖掘铲支撑板;11.分离装置

图 1　4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机结构简图

Fig.1　Structure diagram of 4UM－640 vibration potato digger

该机作业时,通过挖掘铲调节机构,可以调节马铃薯挖掘机的挖掘深度;通过偏心摇臂挖掘机构振动,使得栅格式挖掘铲做前后往复式运动,将薯垄崛起,薯土混合物沿挖掘铲面向上、向后滑移并被送到挖掘铲尾部的往复式土薯分离装置上,在分离齿条的作用下,掘起的土块被剪切破碎,此时,直径小于齿条间隙的土壤颗粒从分离齿条间隙漏下,完成了第一次土薯分离;挖掘薯块和剩余土块沿分离齿尾部折弯部分向后滑动,实现进一步分离,并将掘出的薯块铺放在垄面上。样机作业技术参数如表 1 所示。

表 1　4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机主要技术参数

Table 1　The main technical parameters of the 4UM－640 vibration potato digger

参数 Parameters	数值 Numerical value
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm Overall dimensions (Long×wide×high)	1030×735×675
挂接形式 Linkage	刚性连接 Rigid connection
结构质量 Structural quality/kg	55
配套动力(拖拉机)/kW Mating power(tractor)	8.82～11.03
作业速度 Operating speed/($m \cdot s^{-1}$)	1.1～1.3
工作宽度 Working width/mm	600～640
作业行数 Operating rows	1 行 row
作业深度 Operating depth/mm	150～200
挖掘铲铲面倾角 Obliquity of shovel	15°～25°
集薯类型 Collection types	铺条 Swath rake

2　关键作业部件设计分析

2.1　栅格式挖掘铲

2.1.1　作业性能设计依据　如图 2 所示,栅格式挖掘铲是 4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机的关键作业部件,在设计时应尽可能掘出所有薯块,保证铲能够顺利将崛起物输送到分离装置上,挖掘铲栅格间距不能太大,但在保证不漏薯的前提下,尽量加大间距,使一部分破碎的土壤颗粒提前漏下,无壅土现象的发生;在马铃薯挖掘机的带动下,通过偏心摇臂机构,栅格式挖掘铲做往复式运动,将薯垄崛起,薯土混和物沿铲面上升经过铲尾部栅格输送到分离装置上;挖掘铲上的栅格对土垡与薯块有很好的分离效果。

图 2　栅格式挖掘铲

Fig.2　The grid-type digger shovel

2.1.2　挖掘铲有限元分析　马铃薯挖掘机工作时,由于挖掘铲受到土壤的阻力作用将会产生一定的应力和变形,因此对栅格式挖掘铲进行有限元静力学分析,从分析结果图中明确栅格式挖掘铲在各个方向受到的应力、位移变化分布及大小是否满足设计要求,符合马铃薯挖掘作业的性能要求。

选择挖掘铲的有限元模型,进行网格划分,选用 Q235 碳素结构钢;弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ N·mm^{-2};密度 $\rho = 7.8 \times 10^5$ kg·mm^{-3};泊松比为 0.3;许

用应力 $\sigma_x = 235$ MPa;马铃薯挖掘铲厚度 14 mm。根据模型的形状及受力情况,挖掘铲有限元模型分为 397 个单元,400 个节点。

依资料可知,挖掘铲在土壤中移动的牵引阻力为[8-9]:

$$W_1 = \frac{G}{z} + \frac{CF_1 + B}{z(\sin\beta + \mu\cos\beta)} + \frac{C_a F_0}{z(\sin\delta + \mu_1\cos\delta)} \tag{1}$$

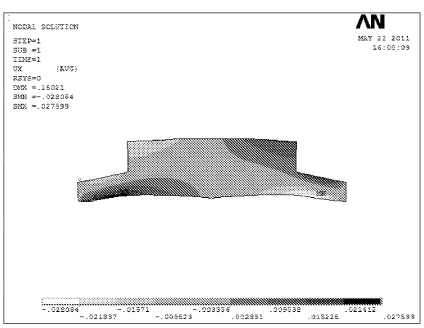
式中,W_1 为挖掘阻力(N);G 为作用于挖掘铲上的土壤重力(N);C 为土壤内聚力因数(N · cm^{-2});F_1 为土壤剪切面积(cm^2);B 为土壤沿铲面运动的加速力(N);C_a 为土壤附着力因数(N · cm^{-2});β 为前失效面倾角(°);δ 为铲面倾角(°);μ 为土壤内摩擦因数;μ_1 为土壤与金属摩擦因数;z 为常数;F_0 为挖掘部分面积(m^2)。

挖掘铲受力有土壤法向力 N 和摩擦力 f,摩擦力与垂直于铲面的法向力相比,摩擦力很小,所以这里只研究法向力 N 对挖掘铲的影响。载荷为垂直于铲面的法向力,把载荷施加在挖掘铲无固定板支撑的部分,根据挖掘铲牵引阻力模型(式 1) 计算出具体数值,然后根据作用力和反作用力相等原理,利用相应的几何关系分解出垂直到铲面的法向力,法向力与作用面积之比为压强,具体数值见表 2,每个单元所受的载荷均按静力等效原则转移到网格单元上。计算得到法向载荷 N 为 2 010 N,将法向载荷 N 以节点载荷的形式均匀分布在挖掘铲刀面上。

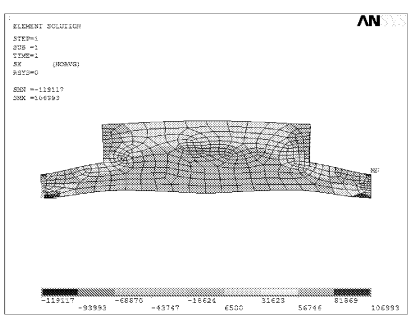
表 2 不同入土角时土壤对两种挖掘铲的压强

Table 2 Unit area pressure of two kinds of digging shovel at the different penetrating soil angle

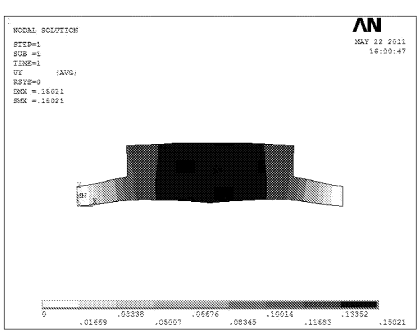
压强 Unit area pressure	入土角 Penetrating soil angle					
	0°	5°	10°	15°	20°	25°
平面铲压强/MPa The unit area pressure of flat shovel	0	19.4	38.6	57.5	76.0	93.9
凹面铲压强/MPa The unit area pressure of concave shovel	0	3.4	6.7	10.0	13.2	16.3



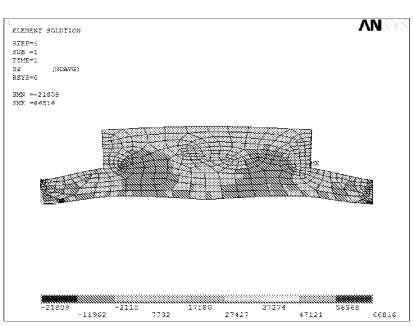
(a) 挖掘铲x轴方向位移变化云图
Displacement variation of digging shovel in x axis



(b) 挖掘铲x轴方向应力云图
Stress variation of digging shovel in x axis



(c) 挖掘铲y轴方向位移变化云图
Displacement variation of digging shovel in y axis



(d) 挖掘铲y轴方向应力云图
Stress variation of digging shovel in y axis

图 3 挖掘铲 x、y 轴方向位移、应力变化云图

Fig.3 Displacement and stress variation of digging shovel in x, y axis

通过分析挖掘铲位移变形云图可知,在铲尖和两边铲面上发生弯曲变形比较明显,挖掘铲在 x 轴

方向位移量为0.027599 mm,挖掘铲在 y 轴方向位移量为 0.15021 mm,对于整个挖掘铲来说,此变形量很小,可忽略不计。

通过挖掘铲的应力变形云图分析可知,挖掘铲 x 轴方向应力主要分布在挖掘铲铲尖部分,且最大应力出现在前端铲面左右两端点处,大小为 106.993 MPa;y 轴方向应力主要分布在挖掘铲尖及后端部分,最大应力出现在挖掘铲尾部栅格联接面左右两端点处,最大应力为 66.816 MPa;均小于此挖掘铲的屈服极限强度(许用应力)235 MPa,铲体满足挖掘作业强度要求。

2.1.3　挖掘铲减阻机理分析　4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机工作时的挖掘阻力一方面取决于挖掘铲的形状,另一方面取决于挖掘铲与土壤之间的摩擦力。本设计中挖掘铲前端铲刃呈两边对称的长条状,后端设计为栅格状,前者能够保证较好的滑切性能,栅格部分则减小了挖掘铲入土时与实际挖掘土壤部分的接触面积,使得土壤剪切面积减小,使挖掘铲易于入土,即减小了挖掘铲入土时的工作阻力。挖掘铲入土后,经偏心装置的作用,挖掘铲在水平方向做前后往复式振动,使后端栅格部分对土垡起到拱碎的作用,土垡被纵向剪切破碎。经过初步破碎后,小于栅格间隙的土壤颗粒提前漏下,其余部分沿着与挖掘铲尾部联接的分离齿条向上向后滑动,小于栅格间隙的土壤颗粒再一次被分离,由式(1)可知,当铲面上原有的土薯混和物的重量降低时,挖掘铲在土壤中移动的牵引阻力降低,从而达到了马铃薯挖掘机减阻降耗的作业需求。

2.2　挖掘铲入土角度调节机构

该马铃薯挖掘机挖掘铲入土角调节机构如图 4 所示。前端部分直接与偏心轮轴联接 ,后端与挖掘铲侧板挂接板连接轴联接,前后部分通过螺杆联接,挖掘铲的入土角度(15°～25°)正是通过螺杆螺距的调节来实现的。

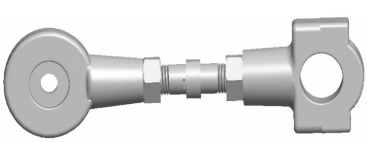


图 4　挖掘铲入土角度调节机构

Fig.4　The penetrating soil angle regulator for digging shovel

2.3　偏心轮轴机构

如图 5 所示,在偏心轮轴上设有偏心轮,二者通过焊接方式联接,偏心轴的转动依靠在其中间部位安装齿轮进行动力传输。

图 5　偏心轮轴机构示意图

Fig.5　Structure diagram of the eccentric wheel

轮轴偏心轮运动轨迹的形状取决于偏心轮的振幅及频率、偏心距的大小,偏心轮轴的转速 V_b 与机器前进速度 V_m 的比值。为了使偏心轮在水平位置向上旋转的过程中对分离装置中的薯土有向后输送的作用,偏心轮的运动轨迹应为余摆线[10]。

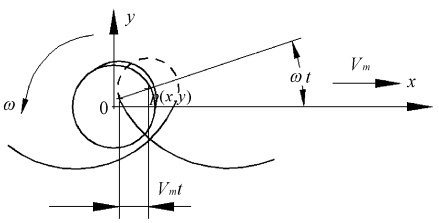


图 6　轮轴偏心轮的运动轨迹

Fig.6　Motion trajectory of the eccentric wheel

如图 6 所示,设分离轮新轮轴中心为坐标原点 O,机组前进方向为 x 轴,向上为 y 轴建立坐标系。从 x 轴正向逆时针方向旋转,偏心轮的中心点 $P(x, y)$ 经过时间间隔 t 的坐标方程为:

$$\begin{cases} x = r\cos\omega t + V_m t \\ y = r\sin\omega t \end{cases} \tag{2}$$

式中,r 为偏心轮的半径(m);ω 为轮轴偏心轮角速度($\mathrm{r \cdot min^{-1}}$);$V_m$ 为机器前进速度;t 为偏心距 $P(x, y)$ 点由 x 轴正方向逆时针转过一个角度经过的时间(h)。

偏心轮中心点的速度为:

$$\begin{cases} V_x = r\omega\sin\omega t + V_m \\ V_y = r\omega\cos\omega t \end{cases} \tag{3}$$

为了减小对薯块的碰撞损伤且保证偏心轮对分离装置有向后摆动的运动,偏心轮在开始摆动时其水平分速度应为零($V_x = 0$),即

$$V_x = V_m - r\omega\sin\omega t = 0 \tag{4}$$

即:$V_m = r\omega\sin\omega t$

3　田间试验及分析

田间试验在甘肃省定西市李家堡镇马铃薯种植基地进行,试验地面积 0.24 $\mathrm{hm^2}$、垄高 20 cm、垄宽 50 cm、株距 18 cm、结薯深度 10～20 cm,其地势均平坦,土壤为黄绵土,土壤含水率为 11.9%～12.1%。马铃薯种植品种为陇薯 3 号,收获前一周植株经割

秧、揭膜处理[1,3,11]。试验动力为 AMEC－15 型手扶拖拉机，功率 12.1 kW。性能试验方法依据文献[12]，试验中机具的工作参数为：行进速度 0.86 $m \cdot s^{-1}$、挖掘铲铲面入土角调节为 20°，机具作业后，试验地长度方向每隔 10 m 取 9 组面积（宽×长）为 0.6 m×20 m 的长方形地块，测量并计算每组地块的挖掘深度、明薯率、伤薯率、损失率的数据，再对 9 组数据取平均值，马铃薯挖掘机性能试验结果如表 3 所示。

表 3 马铃薯挖掘试验结果

Table 3 Experimental results of potato digger

参数 Parameters	试验值 Experimental values	技术要求 Technical requirements
明薯率 Obvious rate/%	97.1	≥95.0
伤薯率 Damage rate/%	3.6	≤5.0
损失率 Loss rate/%	4.1	≤5.0
挖掘深度 Operating depth/mm	212	100～300
牵引力 Traction force/N	2200	

其中挖掘机作业后，明薯是指明放和漏出地面的薯块；伤薯为破皮后，伤及薯肉的薯块；损失为漏挖薯和埋薯之和。明薯率、伤薯率、损失率分别由式(5)～(8)计算得出：

$$T_1 = \frac{W_1}{W} \times 100\% \tag{5}$$

$$T_2 = \frac{W_4}{W} \times 100\% \tag{6}$$

$$T_3 = \frac{W_2 + W_3}{W} \times 100\% \tag{7}$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \tag{8}$$

式中，W 为总薯率(kg)；W_1 为明薯量(kg)；W_2 为埋薯量(kg)；W_3 为漏挖薯量(kg)；W_4 为伤薯量(kg)；T_1 为明薯率(%)；T_2 为伤薯率(%)；T_3 为损失率(%)。

试验期间牵引拖拉机行走流畅，偏心摇臂式振动挖掘机构运行稳定，挖掘铲减阻碎土性能好、明薯效果明显，伤薯率低，挖掘铲入土角度调节灵活，没有发生壅土现象；采用栅格式挖掘装置和往复式振动分离装置，土薯分离效果显著。由表 2 试验结果中的牵引力可以看出，与已有小型挖掘机相比，该机在一定程度上减轻了其掘薯功率的消耗。田间试验结果表明：该机伤薯率 3.6%、损失率 4.1%、明薯率 97.1%等指标均达到了相关马铃薯收获机作业质量评价技术规范要求。

4 结 论

1）设计的 4UM－640 型振动式马铃薯挖掘机，采用栅格式挖掘装置和偏心摇臂式振动挖掘机构，减阻碎土性能好，提高了作业机土薯分离能力；通过螺杆式挖掘铲挖掘深度调节机构实现马铃薯不同深度调整的挖掘收获。

2）从位移、应力变化云图分析，变形最大处在铲的两边，挖掘铲在 x 轴方向位移量为 0.027599 mm，挖掘铲在 y 轴方向位移量为 0.15021 mm，对于整个挖掘铲来说，此变形量很小，可忽略不计，满足设计要求。

3）田间试验表明，该机伤薯率为 3.6%、损失率为 4.1%、明薯率为 97.1%，作业指标均达到了 NY/T 648－2002 马铃薯收获机作业质量评价技术规范要求。

参 考 文 献：

[1] 石林榕，吴建民，赵武云，等．圆盘栅式马铃薯挖掘机的研制与试验[J]．农业工程学报，2012，28(24)：15-21．

[2] 刘 宝，张东兴，李 晶．MZPH 820 型单行马铃薯收获机设计[J]．农业机械学报，2009，40(5)：81-86．

[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．

[4] 刘 宝，张东兴，李 晶．MZPH－820 型单行马铃薯收获机设计[J]．农业机械学报，2009，40(5)：81-86．

[5] 文学洙，廉哲满．振动式挖掘机的设计与试验[J]．农业机械学报，2006，37(10)：77-82．

[6] 刘俊峰，杨 欣，马跃进．4U－1A 型马铃薯收获机的设计[J]．农业机械学报，2004，35(2)：181-183．

[7] 赵满全，赵士杰，佘大庆，等．组合分离式马铃薯挖掘机设计与研究[J]．农机化研究，2007，(4)：69-72．

[8] 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．

[9] 贾晶霞，杨德秋，王昕伟，等．基于 Solidworks 的各型马铃薯挖掘铲应力研究[J]．农业工程，2011，1(1)：102-104．

[10] 北京农业工程大学．农业机械学(下册，第二版)[M]．北京：中国农业出版社，1993．

[11] 吴建民，李 辉，孙 伟，等．拨指轮式马铃薯挖掘机试[J]．农业工程学报，2011，27(7)：173-175．

[12] 中华人民共和国农业部．NY/T 648－2002．马铃薯收获机作业质量评价技术规范[S]．2002．