4U－1400 型马铃薯联合收获机的设计

史明明,魏宏安,胡忠强,刘 星,杨小平
(甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 针对国内马铃薯收获依靠人工或小型挖掘机效率低、劳动强度大等问题,设计了 4U－1400 型马铃薯联合收获机。收获机主要由挖掘装置、土薯分离装置、茎秆分离装置、垂直提升装置、装袋装置、传动系统、机架以及行走装置等部分组成,结构紧凑。通过运动学分析和试验,确定了各装置的关键参数。运用 Solidworks 软件绘制虚拟样机,进行模型验证,各零部件之间不存在干涉现象。该机可一次性完成 2 行马铃薯的挖掘、土薯分离、薯秧、杂草和残膜分离、垂直提升以及装袋等工序,克服了马铃薯收获机装袋技术难题,提高了生产效率。

关键词: 马铃薯;联合收获机;运动学分析;模型验证;设计
中图分类号: S225.7+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0263-05

Design on the 4U－1400 potato combine harvester

SHI Ming-ming, WEI Hong-an, HU Zhong-qiang, LIU Xing, YANG Xiao-ping
(*College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: Point at big problems of low efficient and high fatigue strength on domestic potato harvest depending on manual or small excavator, the 4U－1400 potato combine harvester was designed. This harvester is mainly composed by digging device, soil－potato separating device, stalks separation device, vertical lifting device, bagging device, transmission system, frame, running gear and so on. Therefore, the structure of this harvester is very compact. The key parameters of each device were determined though the kinematic analysis and experiments. The Solidworks software was used for drawing out the virtual sample machine and carried out the model validation. There was no interference between each component. This harvester could finish two rows potato digging, cleaning soil, stalks, weed and residual membrane, vertical lifting and bagging etc procedures at once. As a consequence, the technology problem of potatoes bagging is overcome, meanwhile, the productivity is increased.

Keywords: potato; combine harvester; kinematic analysis; model validation; design

马铃薯对于解决世界粮食短缺问题、保障能源安全、改善食物营养和实现千年发展目标等方面均具有重要意义。中国是马铃薯生产大国却不是强国,马铃薯生产机械化水平低,严重制约着马铃薯产业的发展。2011 年国内马铃薯耕整地、播种和收获的机械化水平分别是 48%、19.6% 和 17.7%[1-3]。当前马铃薯机械化收获主要以应用马铃薯挖掘机为主,而马铃薯挖掘机功能单一,生产效率低,技术水平差,劳动强度大[4-5]。为此,针对国内马铃薯种植以中、小型田块为主的情况,设计了适合于中型旱地的 4U－1400 型马铃薯联合收获机。

1 总体方案与技术参数

1.1 总体结构

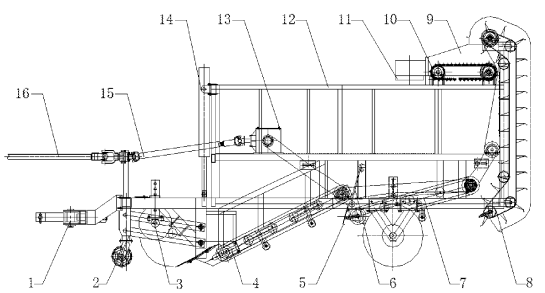
4U－1400 型马铃薯联合收获机主要由挖掘装置、土薯分离装置(一级和二级)、茎秆分离装置、薯块纵向输送装置、薯块垂直提升装置、薯块装袋装置、传动系统、行走装置、动力输入装置以及机架等部件组成(图 1)。

1.2 工作原理

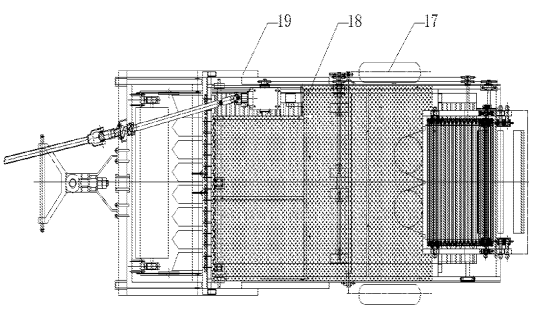
4U－1400 型马铃薯联合收获机为牵引式,工作过程中动力全部由拖拉机提供,可完成 2 行(平作或

收稿日期: 2013-04-09
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAD06B03)
作者简介: 史明明(1988—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事农业工程技术与装备方面的研究。E-mail:shimgmg@163.com。
通信作者: 魏宏安(1960—),男,甘肃定西人,教授,硕士生导师,主要从事农业工程技术与装备方向研究。E-mail:weiha@gsau.edu.cn。

垄作)马铃薯的联合收获。其具体工作过程和功能概况如下:机具作业过程中,挖掘装置(包括仿形碎土辊、圆盘刀和挖掘铲体)及一级土薯分离装置与机架通过液压悬挂装置相连,通过拖拉机液压输出经油缸操纵,确保机架处于水平状态。铲架与机架通过四杆机构铰接,确保挖掘铲不同入土深度时入土角不变。仿形碎土辊在实现仿形功能的同时将地表土块压碎,并限定挖掘铲的挖掘深度在 150 ~ 300 mm 之间,两侧圆盘刀切开土壤,挖掘铲将薯块及土垡等一起掘起并疏松输送至一级土薯分离装置完成对部分土壤和杂物的分离,薯块和剩余杂物被输送至茎秆分离装置,使部分杂物如茎秆、杂草、地膜在分离弹性梳杆的作用下被阻挡抛撒在地上。经二级土薯分离输送装置抖动后再由垂直提升装置升运到纵向输送装置上,并由其将薯块输送至接料装袋装置从而完成装袋工作。



a.主视图 Front view



b.俯视图 Top view

图 1 4U – 1400 型马铃薯联合收获机结构图

Fig.1 Structural drawings of 4U – 1400 potato combine harvester

1.牵引装置; 2.支撑轮组合; 3.挖掘装置; 4.一级土薯分离装置; 5.导草装置; 6.茎秆分离装置; 7.二级土薯分离装置; 8.垂直提升装置; 9.护罩; 10.水平输送装置; 11.装袋装置; 12.护栏; 13.传动系统; 14.液压提升装置; 15.动力输入轴; 16.动力输入装置; 17.行走装置; 18.站台; 19.机架

1. Draught attachment; 2. Supporting wheel assembly; 3. Digging device; 4. Primary soil separator; 5. Straw oriented device; 6. Haulm separator; 7. Secondary soil separator; 8. Vertial lifting device; 9. Shield; 10. Horizontal transmission set; 11. Bagging device; 12. Rail; 13. Transmissiom system; 14. Hydraulic lifting device; 15. Power input shaft; 16. Power-input device; 17. Traveling device; 18. Standing device; 19. Frame

1.3 技术参数

根据马铃薯的种植模式及同类机型相关技术参数[7-8],整机主要技术参数如表 1。

表 1 4U – 1400 型马铃薯联合收获机整机主要参数

Table 1 Major parameters of 4U – 1400 potato combine harvester

参数 Parameters	数值 Value
外形尺寸 Dimension (长 length × 宽 width × 高 height) /mm × mm × mm	4810 × 1700 × 1500
输出功率 Output power/kW	30 ~ 50
适应行距 Adjustable row spacing/mm	350 ~ 500
挖掘深度 Digging depth/mm	0 ~ 350
行走速度 Traveling speed/($m \cdot s^{-1}$)	0.83 ~ 1.34
生产率 Productivity/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	0.4 ~ 0.6

2 关键工作部件结构及工作原理

2.1 挖掘装置

挖掘是马铃薯收获过程中首要工序,直接影响到马铃薯联合收获机的挖净率和伤薯率等性能指标以及土壤的耕作效果,同时挖掘阻力也是造成机器能耗的重要原因。综合以上因素,本机挖掘铲设计为分体式三阶平面组合铲(图 2)。挖掘铲组合分左铲、中铲和右铲三种,其中左、右铲各一块,中铲为 6 块,均匀地焊接在安装架上。其纵向剖面呈“ ~ ”形,提高了入土和碎土的能力。铲面倾角为 20°,铲体长度均为 470 mm,铲宽均为 140 mm,各铲之间间隙为 30 mm,挖掘铲组合有效挖掘宽度为 1 330 mm[9]。

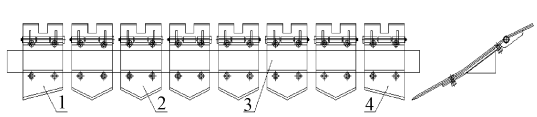


图 2 挖掘铲结构图

Fig.2 Structure drawing of digging device

1.左铲; 2.中铲; 3.焊接架; 4.右铲

1. Left blade; 2. Middle blade; 3. Weld frame; 4. Right blade

2.2 土薯分离装置

土薯分离装置(见图 3)的主要功能是输送、漏土以及抖碎土块,其结构参数和运动参数将直接影响袋装马铃薯的含杂率以及伤薯率。单个薯块的外形尺寸约为:长度 52 ~ 130 mm,宽度 40 ~ 72 mm,厚度 32 ~ 61 mm。基于以上尺寸在保证薯块不下漏的条件下达到充分漏土的效果,可取栅杆的直径为 14

mm,栅格宽 28 mm。另外,土薯分离装置输送带线速度大,分离效果好,可以有效避免壅土,但过大会造成薯块蹭皮损伤,故输送带线速度 v_s 应略大于机组行驶速度 v_0,取 $v_s = 1.35\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$。薯块依靠振动栅杆的推力而产生向上输送的效果。

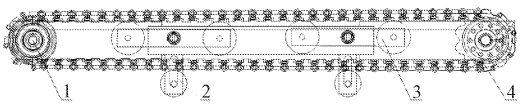


图 3　土薯分离装置结构图

Fig.3　Structural drawing of soil and potato separation device

1.从动部件组合; 2.托带轮组合; 3.抖动装置组合; 4.主动部件组合

1. Slave unit; 2. Return roller unit; 3. Dithering device; 4. Driving part

对于土薯分离装置,抖动装置的设计十分重要。本文所采用的抖动装置为全浮动摆臂式振动机构(见图 4),振动自由,对薯块损伤小,同时确保栅杆输送带产生振动,达到抖碎土块和漏土的效果。建立抖动装置运动学模型(见图 5),假设在抖动过程中抖动轮左轮中心所受作用力与其运动方向相反,同时视抖动装置为刚体,分析其抖动幅度,相关参数确定如下:

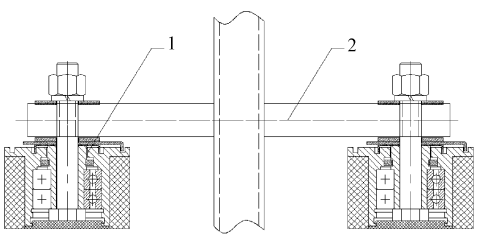


图 4　抖动装置结构图

Fig.4　Structural drawing of dithering device

1.抖动轮; 2.抖动轴焊合

1. Dithering wheel; 2. Weld dithering shaft

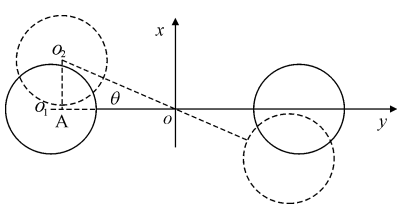


图 5　抖动装置运动学模型

Fig.5　Kinematic model of dithering device

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} = Fl_{OO_1} \tag{1}$$

式中:J 为抖动装置相对 O 点的转动惯量($\mathrm{kg \cdot m^{-2}}$);θ 为转动角度(°);t 为运动到虚线位置所用时间(s);F 为运动过程中抖动轮受力(N);l_{OO_1} 为 O 点到 O_1 点的距离(m)。

模型中两抖动轮完全一样,质量为 m,并设其质量均集中在圆心处,则有:

$$J = 2ml_{OO_1}^2 \tag{2}$$

$$l_{O_2A} = l_{OO_1}\sin\theta \tag{3}$$

式中,O_2 点到 A 点距离 l_{O_2A} 为抖动装置栅杆的振幅,振幅过大,会造成薯块损伤,过小则分离土壤效果不好。根据相关资料查得 l_{O_2A} 在 200 ~ 300 mm 时,马铃薯损伤率小于 4%[10]。

2.3　茎秆分离装置

茎秆分离装置主要功能是分离杂草、薯秧以及残膜,其结构如图 6。弹性梳杆采用螺旋弹簧扭转施压,且弹簧扭转程度可通过转动梳杆轴进行调节。薯秧和薯块在输送至茎秆分离装置处时,由于薯块大小小于相邻梳杆间距,可顺利通过,薯秧则被拦住,而摘薯辊的转动方向与一级土薯分离装置方向相反,茎秆等杂物将缠绕于摘薯辊之上,使得茎秆和薯块分离,并经导草板抛撒地上。摘薯辊转速为 ω_1,一级土薯分离装置主动轴转速为 ω_2,ω_1 过高会导致杂物在其上缠绕不脱落,过低分离效率低,易在此处壅堵。为此,设计五组试验:$\omega_1 = 2\omega_2$;$\omega_1 = 3\omega_2$;$\omega_1 = 3.5\omega_2$;$\omega_1 = 4\omega_2$;$\omega_1 = 4.5\omega_2$,在如图 7 的试验台上完成各组试验,试验结果表明:$\omega_1 = 3\omega_2$ 时效果最好。为防止摘薯辊损伤薯块,其表层为橡胶。

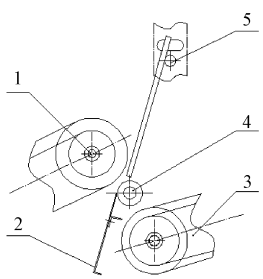


图 6　茎秆分离装置结构图

Fig.6　Structural drawing of stalk separation device

1.一级土薯分离装置; 2.导草装置; 3.二级土薯分离装置; 4.摘薯辊; 5.弹性梳杆组合

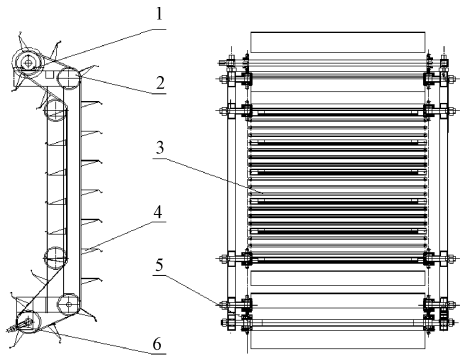
1. Primary soil and potato separator; 2. Straw oriented device; 3. Secondary soil and potato separator; 4. Picking potato roll;5. Elastic rods unit

图 7　茎秆分离试验装置

Fig.7　Experiment device of stalk separation

2.4 垂直提升装置

如图 8 所设计的垂直提升装置,其垂直提升相对于其它各种提升方式,提升路径最短,使得整机结构更加紧凑。另外,提升刮板之间为均布的栅杆,对杂物具有一定的分离作用。栅杆和提升刮板固定于带有侧耳的链条上,其工作平稳,对薯块损伤相对较小。提升装置接料端是实现提升功能的前提,其运动简图如图 9 所示,现对其相关参数确定如下:



a.主视图 Front view b.侧视图 Top view

图 8 垂直提升装置结构图

Fig.8 Structural drawing of vertical lifting device

1.主动链轮组合; 2.导向链轮组合; 3.栅杆; 4.提升刮板; 5.从动链轮组合; 6.张紧装置

1. Driving sprocket unit; 2. Guiding sprocket unit; 3. Palisades; 4. Lifting scraper; 5. Driven sprocket; 6. Tension device

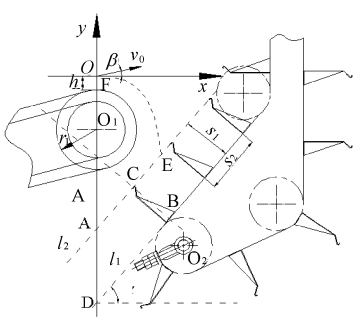


图 9 接料运动简图

Fig.9 Kinematic scheme of potato received

令提升装置刮板长 s_1、两刮板间距 s_2、倾角 α 及张紧轮圆心 O_2 坐标为(a, $-b$)。在 O 点(将要脱离土薯分离装置薯块质心处) 建立直角坐标系,O_2、B、C 在同一条直线上,F 点为土薯分离装置主动轮最顶端,设薯块初速度为 v_0,$l_{OF} = h$,不考虑空气阻力和物料间的相互作用力,则薯块运动参数方程如下:

$$\begin{cases} x = v_0 t\cos\beta \\ y = v_0 t\sin\beta - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中,β 为土薯分离装置与水平面的夹角(°);t_1 为薯块抛出后从 O 到 E 的运动时间(s);g 为重力加速度(m · s^{-2})。

由几何知识得 l_2 直线方程为:

$$x\tan\alpha - y + (s_1 + \gamma_2)\tan\alpha\sin\alpha + (s_1 + \gamma_2)\cos\alpha - a\tan\alpha - b = 0 \tag{5}$$

由(4) 和(5) 得:

$$\frac{g}{2(v_0\cos\beta)^2}x^2 + (\tan\alpha - \tan\beta)x + (s_1 + \gamma_2)\tan\alpha\sin\alpha + (s_1 + \gamma_2)\cos\alpha - a\tan\alpha - b = 0 \tag{6}$$

令 $k = (s_1 + r_2)\tan\alpha\sin\alpha + (s_1 + r_2)\cos\alpha - a\tan\alpha - b$,得 E 点横坐标为:

$$x_e = \frac{(v_0\cos\beta)^2(v_0\tan\beta - \tan\alpha)}{g} + (v_0\cos\beta)^2\sqrt{\frac{(\tan\alpha - v_0\tan\beta)^2}{g^2} - \frac{2k}{g(v_0\cos\beta)^2}}$$

薯块能够正常落入提升装置下端的前提条件是 E 在 C 右侧即 $x_e > x_c$,则有:

$$a - s_1\sin\alpha - r_2\sin\alpha < \frac{(v_0\cos\beta)^2(v_0\tan\beta - \tan\alpha)}{g} + (v_0\cos\beta)^2\sqrt{\frac{(\tan\alpha - v_0\tan\beta)^2}{g^2} - \frac{2k}{g(v_0\cos\beta)^2}}$$

其次,还需保证从薯块表面与直线 l_2 相切到薯块质心运动至直线 l_2 上时,刮板相对敞开的距离要大于薯块长轴的长即:

$$s_2 - \frac{d_1\sin\alpha}{2v_0}v > d_2 \tag{7}$$

式中,d_1 为薯块短轴长(mm);d_2 为薯块长轴长(mm);v 为刮板速度(m · s^{-1})。

则可得相关参数间关系式为:

$$\frac{2(s_2 - d_2)v_0}{d_1\sin\alpha} > v$$

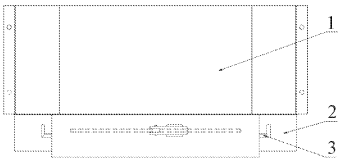
2.5 装袋装置的设计

为了避免人工捡拾装袋,本机设计了装袋装置,可在收获机上直接对马铃薯完成装袋。其具体结构如图 10 所示,筒体与筒地板焊合,扳手与圆盘轴铰接。装袋时将袋子挂于挂钩上,拉出扳手,并转动使其竖直。换袋过程中,使扳手水平即可。

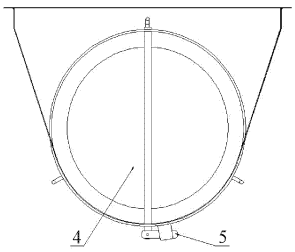
3 三维实体建模

根据前文确定的关键部件参数,在 Solidworks 中绘制本机三维模型如图 11 所示,相关尺寸大小与实际样机尺寸相同。由于本机结构复杂,本文采用 COSMOSMotion 完成了土薯分离装置以及垂直提升装置的仿真。结果表明相关参数选取符合设计要

求,各零件之间不存在干涉现象。



a.主视图 Front view



b.俯视图 Top view

图 10　装袋装置结构图

Fig.10　Structural drawing of bagging device

1.筒体; 2.筒底板; 3.挂钩; 4.圆盘; 5.扳手

1. Barrel; 2. Barrel baseplate; 3. Hook; 4. Disk; 5. Wrench

图 11　4U – 1400 型马铃薯联合收获机三维图

Fig.11　3D solid model of 4U – 1400 potato combine harvester

4　结　论

结合当前马铃薯生产状况,通过运动学分析和相关试验,成功地设计出了 4U – 1400 型马铃薯联合收获机。其优点体现在以下几个方面:1) 采用分体式三阶平面组合铲提高了入土和碎土能力,同时,仿形碎土辊保证了挖掘深度一致。2) 垂直提升装置提升效果好,使得整机结构更加紧凑,便于运输。3) 功能较全,可一次性实现薯块的挖掘、土薯分离、薯秧、杂草和残膜分离、垂直提升以及装袋等功能。省工省时,免去了种植户不必要的开支和劳动强度。对于国内马铃薯早日实现高水平的机械化收获具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] 屈冬玉,谢开云,金黎平,等.中国马铃薯产业发展与食物安全[J].中国农业科学,2005,38(2):358-362.

[2] 谢开云,屈冬玉,金黎平,等.中国马铃薯生产与世界先进国家的比较[J].世界农业,2008,(5):35-38.

[3] 王洋洋.引领马铃薯类食品新时尚[J].中国食品工业,2010,(1):34-34.

[4] 宋言明,王芬娥.国内外马铃薯机械的发展概况[J].农机化研究,2008,(9):225-226.

[5] Bulter G P, Bernet T, Manrique K. Mechanizationg of potato grading on small scale farms: a case study from peru[J]. Expl Agric, 2005, 41: 81-92.

[6] 曹树人.旱作区黑膜马铃薯栽培技术十要点[J].农机科技推广,2012,(6):47-48.

[7] 周良墉.1700/1710 型马铃薯联合收获机[J].河北农机,2008,(1):36-36.

[8] 晓　明.4ULDX – 1500 型马铃薯收获机[J].农业装备技术,2005,31(1):37-37.

[9] 李彦晶,魏宏安,杨小平,等.4U – 1400FD 型马铃薯联合收获机挖掘铲的参数优化[J].甘肃农业大学学报,2011,46(5):132-134.

[10] 桑永英,张东兴,张梅梅.马铃薯碰撞损伤试验研究及有限元分析[J].中国农业大学学报,2008,13:81-84.

(上接第 176 页)

[17] Ellis R H, Hong T D, Rober E H. Logarithmic relationship between moisture content and longevity in sesae seeds[J]. Annals of Botany, 1986,(61):405-408.

[18] 程红焱.种子超干贮藏技术应用面临的问题和研究方向[J].云南植物研究,2006,28(1):59-68.

[19] 林　坚,郑光华,张庆昌.回湿预处理防护超低含水量花生种子吸胀损伤的效果[J].植物学集刊,1994,7:294-298.

[20] 程红炎,郑光华,陶嘉龄.超干处理对几种芸蔓属植物种子生理生化和细胞超微结构的效应[J].植物生理学报,1991,17(3):273-284.

[21] 汪晓峰,郑光华,杨世杰,等.超干贮藏种子质膜流动性[J].科学通报,1999,44(7):733-739.

[22] 张明方.洋葱和觅菜种子超干保存及其生理生化基础研究[D].杭州:浙江大学,1998:58-67.

[23] Leoplod A C, Sun W Q, Bernal-Lguo I. The glassy state in seeds: analysis and function[J]. Seed Science Research, 1994,(4):174-176.

[24] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992,43:83-116.

[25] 孙梅霞,祖朝龙,徐经年.干旱对植物影响的研究进展[J].安徽农业科学,2004,32(2):365-367,384.

[26] Ramos M L G, Gordon A J, Minchin F R, et al. Effect of water stress on nodule physiology and biochemistry of a drought tolerant cultivar of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Annals of Botany, 1999,(83):57-63.