

大红萝卜收获机挖掘铲的设计及力学分析

刘新柱¹, 魏天路¹, 王玉花², 焦仁宝¹, 刘明普¹

(1. 佳木斯大学机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 佳木斯大学理学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要:为解决东北大红萝卜收获机械化较低, 收获速度较慢, 劳动强度大等突出问题, 采用数理统计方法对大红萝卜的自然生长特性进行分析, 得到了大红萝卜的直径、质量、食用根长度、食用根土下埋藏深度的分布区间等相关数据, 为大红萝卜收获机设计提供了必要的理论依据。对大红萝卜收获机的挖掘机构进行了分析, 建立了挖掘铲的力学模型, 得到了挖掘摩擦力、挖掘阻力随挖掘铲铲面倾角变化的关系曲线图, 为挖掘铲的铲面倾角设计提供了理论依据。从挖掘铲铲柄间距、挖掘铲长度、入土深度、铲面宽度、铲刃角等角度对挖掘铲结构进行了分析与设计, 为大红萝卜收获机研制进行了技术储备。

关键词: 红萝卜; 挖掘铲; 力学分析

中图分类号: S225.7*2

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)01-0083-04

Raphanus Sativus Harvester Design and Mechanical Analysis of Digging Shovel

LIU Xinzhu¹, WEI Tianlu¹, WANG Yuhua², JIAO Renbao¹, LIU Mingpu¹

(1. College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007; 2. College of Science, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to solve the obvious problems such as low mechanization, slow harvest speed and high labor intensity of *Raphanus sativus* harvesting in Northeast China, the natural growth characteristics of *Raphanus sativus* were analyzed by mathematical statistics method. The related data of diameter, quality, length of edible root and distribution range of buried depth under edible root soil were obtained, which provided a necessary theoretical basis for the design of *Raphanus sativus* harvester. The excavation mechanism of the *Raphanus sativus* harvester was analyzed, and the mechanical model of the digging shovel was established. The relationship curve of excavation friction and resistance with the dip angle of digging shovel surface were obtained, which provided a theoretical basis for the inclination angle design of the digging shovel. The structure of digging shovel was analyzed and designed from the angles spacing of shovel handle, length of shovel, depth of soil entry, width of shovel face and angle of shovel edge, which provided technical reserve for the development of *Raphanus sativus* harvester.

Key words: *Raphanus sativus*; Digging shovel; Mechanical analysis

大红萝卜又被称为东北大红萝卜, 原产于中国, 其根供食用, 是我国东北地区的特产之一, 由于气候及品种等因素形成了其极高的营养价值和药用价值。大红萝卜与白菜、马铃薯等同为东北地区冬季储藏较多的传统蔬菜之一, 因此在东北地区具有较大的种植面积和较高的年产量。

目前, 国内尚缺少成熟的大红萝卜收获机械,

现有的大红萝卜收获机械大都是在其它根茎类收获机械基础上改装的, 其结构笨重, 零部件易损, 故障率较高, 收获效率较低^[1-3]。大红萝卜收获时在很大程度上还依靠人力拔取、切缨、装袋运输, 劳动强度大, 生产效率低下。青壮年劳动力日出而作, 日落而息, 每天也仅可收获 2 500 kg 左右。随着城镇化的推进, 农村劳动力大规模向城市转移, 农忙季节劳动力成本极高, 往往花大价钱也雇不到合适的劳动力。大红萝卜每年最佳收获期也仅仅有一周左右^[4-6]。因此迫切需要研制、开发一种效率高、故障率低、质优价廉的大红萝卜收获机械来解决广大菜农的燃眉之急。

收稿日期: 2019-03-16

基金项目: 黑龙江省教育厅基本科研业务费基础研究项目(2016-KYYWF-0573)

作者简介: 刘新柱(1975-), 男, 副教授, 硕士, 从事力学教学及相关科研工作。

1 大红萝卜的自然生长特性

大红萝卜的自然生长特性及其几何形状和尺寸是设计大红萝卜收获机的重要依据。自然生长状态下,成熟的大红萝卜外形轮廓可分为长椭球体和扁椭球体,随机选取100个样本进行测量,可得到大红萝卜的直径、质量、食用根长度、土下埋藏深度等分布数据(见图1~图4)

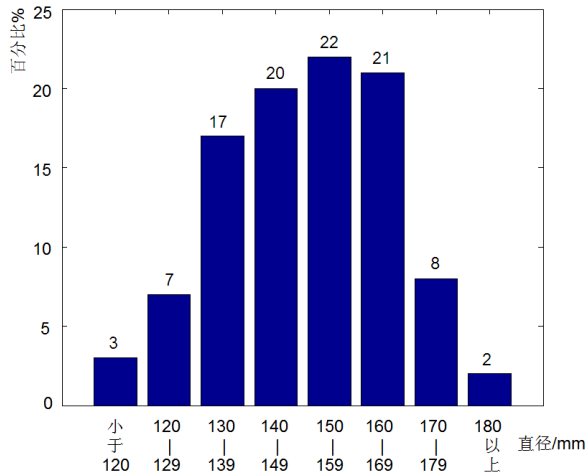


图1 大红萝卜直径分布区间

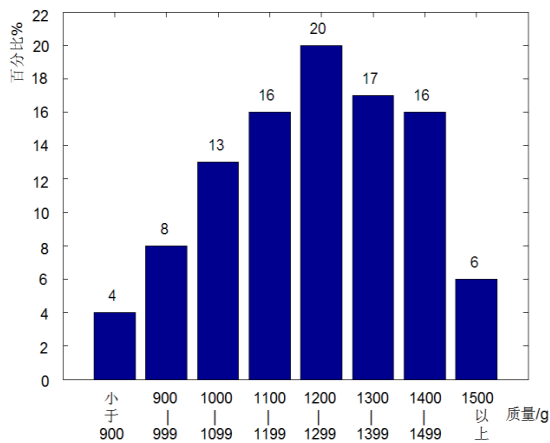


图2 大红萝卜质量分布区间

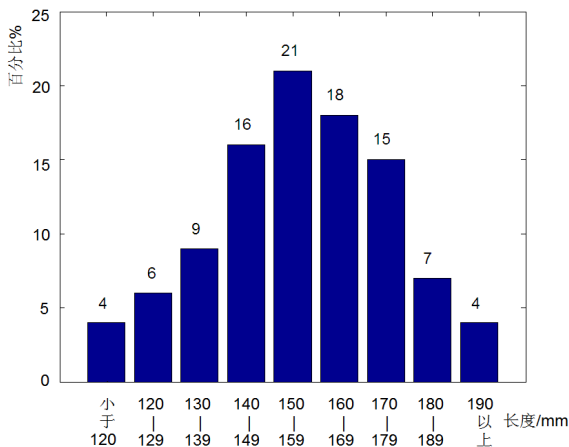


图3 大红萝卜食用根长度分布区间

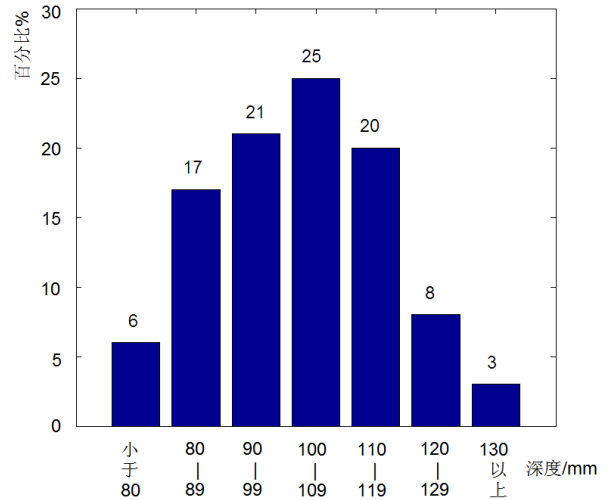


图4 大红萝卜土下埋藏深度分布区间

由图1可知,大红萝卜的直径主要分布在130~169 mm区间,其最大值为223 mm,平均值为156 mm。由图2可知,大红萝卜的质量主要分布在1 000~1 499 g区间,其最大值为1 962 g,平均值为1 259 g。由图3可知,大红萝卜的食用根长度主要分布在140~179 mm区间,其最大值为229 mm,平均值为158 mm。由图4可知,大红萝卜的食用根(不包含须根)土下埋藏深度主要分布在80~119 mm区间,其最大值为135 mm,平均值为102 mm。以上数据为设计大红萝卜收获机提供了必要的理论依据。

2 挖掘铲结构设计

目前国内、外较为通用的萝卜收获机械大都采用拔取式^[7-11]。东北农业大学的陈海涛等人对北方垄作萝卜的物理力学特性进行了研究,得出了大红萝卜根茎结合力小于自然土壤状态下所需拔取力的结论^[12]。欲降低漏拔率,减少损失,拔取式大红萝卜收获机必须利用挖掘铲进行松土,因此,挖掘铲的结构设计及力学分析尤为重要^[13]。

本项目设计了双侧松土式挖掘铲(图5),其结构主要由挖掘铲和铲柄组成。主要技术参数有:挖掘铲铲柄间距,挖掘铲铲面倾角、入土深

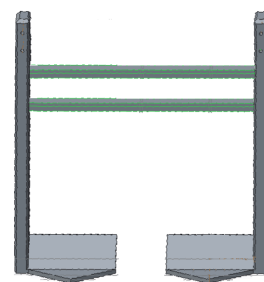


图5 挖掘铲示意图

度、铲面几何形状和尺寸等。

2.1 挖掘铲铲柄间距设计

自然状态下大红萝卜的拔取力只是略大于其根茎结合力^[2],结合大红萝卜的生长特性,可确定挖掘铲铲柄间距为 320 mm。此间距既可以令挖掘铲起到充分的松土作用,减小大红萝卜的拔取力,又可以有效降低大红萝卜的破损率,满足大红萝卜收获机的技术要求。

2.2 挖掘铲铲面倾角设计

以被挖掘物(大红萝卜与土壤的混合体)为研究对象,其受力分析如图 6 所示。

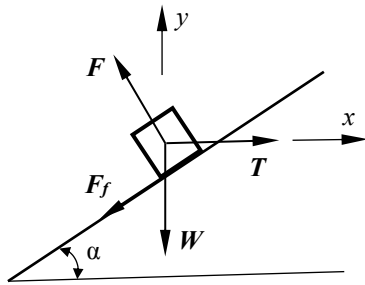


图 6 挖掘铲受力图

平衡状态下,在图示坐标系内列平衡方程可得:

$$\sum F_y = 0, F \cos a - W - F_f \sin a = 0 \dots\dots(1)$$

$$\sum F_x = 0, T - F \sin a - F_f \cos a = 0 \dots\dots(2)$$

式中:F—平衡状态时挖掘铲对被挖掘物的挖掘力,T—挖掘阻力,W—被挖掘物的重力, F_f —挖掘铲对被挖掘物的摩擦力,a—挖掘铲铲面倾角。

由式(1)可解得:

$$F_f = \frac{F \cos a - W}{\sin a} \dots\dots(3)$$

当挖掘力 F 和被挖掘物重力 W 一定时,挖掘摩擦力 F_f 随挖掘铲铲面倾角 a 的变化曲线图如图 7 所示。

由图 7 可知,随着挖掘铲铲面倾角 a 的增大,摩擦阻力 F_f 迅速降低,但过大的挖掘铲铲面倾角会增大拖拉机的功耗,令挖掘机构产生壅土现象^[4],而且不符合拔取式大红萝卜收获机的设计理念,因此挖掘铲铲面倾角不宜过大。

由式(2)可解得:

$$\begin{aligned} T &= F \sin a + F_f \cos a \\ &= F \sin a + F_N \mu \cos a \dots\dots(4) \\ &= F(\sin a + \mu \cos a) \end{aligned}$$

式中: F_N —被挖掘物对挖掘铲的正压力(平衡状态时和挖掘力 F 相等); μ —被挖掘物与挖掘铲

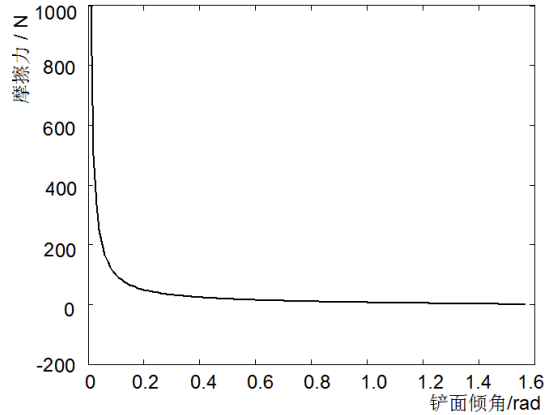


图 7 摩擦力与挖掘铲铲面倾角关系曲线图

之间的摩擦系数。

当挖掘力 F 一定时,挖掘阻力 T 随挖掘铲铲面倾角 a 的变化曲线图如图 8 所示。

由图 8 可知,随着挖掘铲铲面倾角 a 的增大,

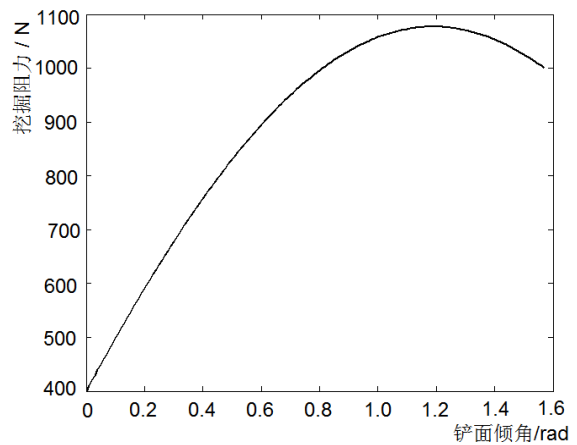


图 8 挖掘阻力与挖掘铲铲面倾角关系曲线图

挖掘阻力 T 也随之增大,且增速较快。但过小的掘铲铲面倾角将会产生挖掘铲入土困难的现象,且影响挖掘铲的入土深度,令大红萝卜受到损伤。因此挖掘铲铲面倾角也不宜过小。

综合以上分析结果并结合文献[15-19]的研究成果可确定掘铲铲面倾角应选择在 10° ~ 25° 之间。本项目设计挖掘铲铲面倾角 $a = 23^\circ$ 。

2.3 挖掘铲入土深度设计

大红萝卜的食用根土下埋藏深度主要分布在 80 ~ 119 mm 之间,最大值为 135 mm,为降低破损率且减小挖掘铲入土深度以降低拖拉机的功耗,本项目设计挖掘铲入土深度为 140 mm,基本满足大红萝卜收获机既定的设计目标。

2.4 挖掘铲铲面结构设计

本项目设计了五边形的平面挖掘铲,如图 9

所示。其主要技术指标有:铲面长度 $l(\overline{EG})$ 、铲面宽度 $b(\overline{BC} = \overline{AD})$,铲刃角 β 等。

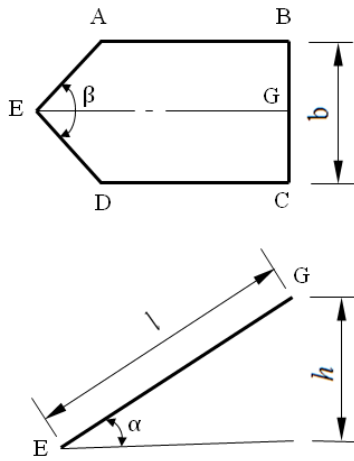


图9 挖掘铲铲面结构图

(1) 铲面长度

由图9所示几何关系可得到铲面长度 $l = h/\sin a$,结合挖掘铲铲面倾角 $a = 23^\circ$ 和挖掘深度 $h=140$ mm,并综合红萝卜的几何形状和两侧松土的挖掘方式,最终确定挖掘铲铲面长度为 $l=350$ mm,经实验检测,此长度松土效果良好,破损率较低,符合预期设计目标。

(2) 铲面宽度

综合挖掘铲柄间距和大红萝卜的自然生长特性,本项目设计的挖掘铲铲面宽度为 $b=125$ mm,经实验验证,松土效果良好,有效降低了拔取力,满足设计目标。

(3) 铲刃角

铲刃角 β 是挖掘铲的一项重要技术指标,过大的铲刃角会增大挖掘铲入土难度和增大挖掘阻力,且造成壅土现象;而铲刃角过小则会影响挖掘铲挖掘工作的稳定性,容易损伤大红萝卜。结合李涛等的研究成果^[20],最终确定挖掘铲的铲刃角为 $\beta = 90^\circ$ 。

3 结 论

(1)采用数理统计方法对大红萝卜的自然生长特性进行了分析,得到大红萝卜的直径主要分布在130~169 mm区间,平均值为156 mm;质量主要分布在1 000~1 500 g区间,平均值为1 259 g;食用根长度主要分布在140~179 mm区间,平均值为158 mm;食用根(不包含须根)土下埋藏深度主要分布在80~119 mm区间,平均值为102 mm。

(2)建立了挖掘铲的力学模型,分析了挖掘铲铲面倾角对挖掘阻力和摩擦力的影响,选取挖掘铲铲面倾角为 23° ;对挖掘铲的结构进行了设计,选取挖掘铲铲柄间距为320 mm,入土深度为140 mm;挖掘铲的形状为平面五边形,铲面长度为350 mm,铲面宽度为125 mm,铲刃角为 90° 。

参考文献:

- [1] 王 俊,杜冬冬,胡金冰,等. 蔬菜机械化收获技术及其发展[J]. 农业机械学报,2014,45(2):81-87.
- [2] 韩 霞,陈海涛,顿国强,等. 胡萝卜收获机械化研究的现状分析[J]. 农机化研究,2015,37(7):259-263.
- [3] 陆 建,缪 明,施卫卫,等. 白萝卜收获机的研究设计[J]. 农业装备技术,2016,42(1):26-28.
- [4] 沈 亮,杨 华,安红宇,等. 胡萝卜收获机的设计[J]. 农机化研究,2015,37(11):71-76.
- [5] 周国龙,张晋国,王洪伟,等. 白萝卜收获机挖掘铲参数的设计[J]. 农机化研究,2016,38(9):94-98.
- [6] 王青蓝,毕宏波,蔡红岩,等. 我国马铃薯加工业现状及对策[J]. 吉林农业科学,2008,33(6):97-99.
- [7] 付 威,陈海涛,王业成. 萝卜收获机的设计及关键部件仿真优化[J]. 农机化研究,2008,30(11):101-103.
- [8] 韩 风,陈海涛,任珂珂,等. 北方胡萝卜的物理力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2012,43(5):36-40,45.
- [9] Jozef K, Norbert L. The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage[J]. Maintenance and Reliability, 2011,39(1):35-41.
- [10] 王家胜,尚书旗. 自走式双行胡萝卜联合收获机的研制及试验[J]. 农业工程学报,2012,28(12):38-43.
- [11] Horia M, El-Sahhar E A, Mostafa M M, et al. A developed machine to harvest carrot crop[J]. Farm Machinery and Power, 2008, 25(4): 1163-1173.
- [12] 陈海涛,任珂珂,余 嘉. 北方垄作萝卜物理力学特性[J]. 农业工程学报,2010,26(6):163-169.
- [13] 邓伟刚,王春光,孙 宏,等. 马铃薯挖掘机挖掘铲力学模型构建[J]. 农机化研究,2014,36(1):84-86.
- [14] 吕金庆,陈春富,李世柱. 马铃薯挖掘机挖掘铲的设计[J]. 农机化研究,2004,26(5):105-106.
- [15] 陈书法,李耀明,孙星钊. 花生挖掘铲动力学分析与试验[J]. 农业机械学报,2005,36(11):59-63.
- [16] 陈书法,李耀明,孙星钊. 花生联合收获机挖掘装置的设计研究[J]. 中国农机化,2005(1):47-49.
- [17] 付 威,陈海涛,坎 杂. 萝卜收获机振动松土铲参数的优化[J]. 农业工程学报,2011,27(11):46-50.
- [18] 王俊发,马浏轩,邵东伟,等. 玉米根茬收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(6):68-73.
- [19] 崔振猛,张兆国,王法安,等. 4SD-1700型悬挂式三七收获机设计与试验[J]. 农机化研究,2019,41(2):134-139.
- [20] 李 涛,周 进,徐文艺,等. 4UGS2型双行甘薯收获机的研制[J]. 农业工程学报,2018,34(11):26-33.

(责任编辑:王丝语)