

# 圆盘挖掘式甜菜联合收获机设计与试验

王方艳<sup>1,2</sup>, 张东兴<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

**摘要:** 为了缓解中国甜菜收获装备短缺的现状, 设计了一种适合国内甜菜种植模式和农艺要求的圆盘挖掘式甜菜联合收获机, 并阐述了该机的总体配置及主要部件的结构。该机主要由传动系统、对行装置、挖掘装置、输送分离装置、升运装置等组成。其中, 液压控制系统提高了机械的操控性及自动化程度; 对行装置减少了甜菜的漏挖, 实现了自动对行收获; 圆盘式挖掘部件参数的优化设计有效减少了工作阻力, 输送分离装置和升运装置中的杆式输送链减少了甜菜的输送损失和含杂。田间试验表明, 收获机甜菜收获损失率不大于 3.42%, 粘土率不大于 1.18%, 损伤率不大于 1.82%, 折断率不大于 1.6%, 含杂率不大于 4.86%, 符合甜菜收获要求。该研究可为甜菜收获机械设计提供参考。

**关键词:** 联合收获机, 设计, 试验, 甜菜

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.002

中图分类号: S225.7<sup>+2</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-13-0007-08

王方艳, 张东兴. 圆盘挖掘式甜菜联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 7-14.

Wang Fangyan, Zhang Dongxing. Design and experiment of disc-dig sugar beet combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 7-14. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

甜菜是中国重要的糖料作物, 仅次于甘蔗而居第二位<sup>[1-3]</sup>。目前, 甜菜收获作业季节性强, 劳动强度大, 占用农时多, 已经严重制约了甜菜产业的进一步发展<sup>[4-5]</sup>。随着劳动力资源的结构性短缺和国际糖料需求的上涨, 研究甜菜联合收获技术及装备已成为甜菜产业发展的必然趋势。

欧美等发达国家对甜菜收获装备的研究比较早, 整体技术水平较高, 并逐渐形成了包括联合收获机和分段式收获机组等多个系列产品。目前, 欧美地区的联合收获机械以牵引式和自走式为主要, 机电一体化程度高, 普遍采用了液压、电子和计算机等高新技术(如电子对行装置和电磁液压控制挖深机构等), 配套动力大, 操作方便, 生产效率高, 可一次性完成打樱、切顶、挖掘、清理、输送和装运等作业, 适合大面积的农场使用<sup>[6-10]</sup>。日本、韩国等地区联合收获机一般与中小型拖拉机配套使用, 多采用铧式挖掘铲和转轮式清选装置, 结构紧

凑, 适用于甜菜的小地块单行收获<sup>[11-12]</sup>。

中国对甜菜机械的研制起步较晚, 机械化生产水平还很低<sup>[13-16]</sup>。现有的甜菜生产机械规格少, 性能不稳定, 技术储备和研制开发力度不够; 收获机械以小型机为主, 大中型农机具跟不上发展, 联合收获装备还处于试制阶段<sup>[17-23]</sup>。引进国外的甜菜收获机械, 超出了中国农民的购买能力, 只在少数国营农场、糖厂使用。由于种植模式、配套动力的差异和科研投入的匮乏, 甜菜收获作业仍以人工收获为主, 严重阻碍了甜菜生产的发展。因此, 本文在借鉴国外先进机型的基础上, 结合国内甜菜的种植模式和农艺特点, 研制性能稳定、价格合理的甜菜联合收获机, 一次性完成甜菜的挖掘、分离、升运、收集等功能, 对满足农户种植要求, 提高甜菜种植效益具有重要的意义。

## 1 总体结构与工作原理

随着中国甜菜纸筒移栽技术和移栽机械的成熟与推广, 立足国内的动力配套状况, 设计与轮式拖拉机配套使用的圆盘挖掘式甜菜联合收获机。该机械主要由机架、对行装置、挖掘装置、抛送装置、输送清理装置、升运装置、收集箱、液压系统、传动系统等组成, 一次性完成甜菜的挖掘、除土、输送、提升、收集作业。圆盘挖掘式甜菜联合收获机结构如图 1 所示, 主要参数如表 1 所示。该机行走和挖掘依靠拖拉机牵引, 甜菜块根的抛送、输送分

收稿日期: 2013-01-21 修订日期: 2013-05-27

基金项目: 农业部土壤-机器-植物系统技术重点实验室资助项目

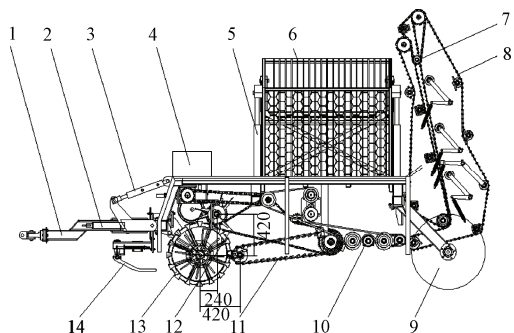
作者简介: 王方艳(1979-), 工程师, 博士生, 主要从事农业机械设计及性能试验方面的研究。青岛 青岛农业大学机电工程学院, 266109。

Email: wfy\_66@163.com

\*通信作者: 张东兴(1960-), 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备方面的研究, 北京 中国农业大学工学院, 100083。

Email: zhangdx@cau.edu.cn

离等动力由拖拉机动力输出轴提供，机具的对行、机架的升降、收集箱的起落以及升运装置的运动动力由液压系统提供。



1.牵引架 Traction frame 2.转向油缸 Steering cylinder 3.提升油缸 Lift cylinder 4.油箱 Oil tank 5.卸料油缸 Discharging oil cylinder 6.收集箱 Collecting box 7.液压马达 Hydraulic motor 8.升运装置 Hoisting equipment 9.行走轮 Road wheel 10.螺旋辊筒清理器 Screw roller cleaner 11.杆式输送机 Wire rod conveyor 12.抛送装置 Throwing device 13.挖掘圆盘 Digging disc 14.对行装置 Guiding device

图1 圆盘挖掘式甜菜联合收获机结构示意图

Fig.1 Structural schematic of disc-dig sugar beet combine harvester

工作时，拖拉机牵引收获机借助行走轮前行，对行装置依靠甜菜的外形轮廓实现装备的自动对行，2个圆盘挖掘装置分别对含有甜菜块根的土袋进行切割、松动、挖掘和松碎；被挖起的甜菜块根随着挖掘部件从地面滚动提升到一定高度，并被抛送装置拨送到后方的去土输送装置，经杆式输送链的抖动和螺旋辊筒的输送清理，使得绝大多数土壤和杂质与块根分离，并落到地上；最后甜菜块根被升运装置的杆式输送链夹持提升，并落入收集箱。

表1 圆盘挖掘式甜菜联合收获机主要参数

Table 1 Main parameters of disc-dig sugar beet combine harvester

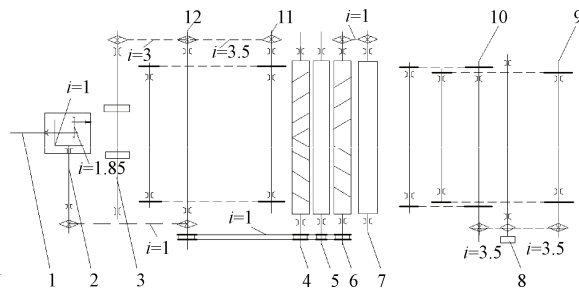
参数 Parameters	数值 Values
配套动力 Power /kW	29.4
行距 Row spacing /mm	600
挖掘深度 Digging depth /mm	50~200
行数 Rows	2
外形尺寸 (长×宽×高) Dimensions (length×width×height)/mm	2 400×1 600×2 100
整机质量 Total weight/kg	1 800

## 2 主要部件结构与参数

### 2.1 传动系统

圆盘挖掘式甜菜联合收获机采用分路传动系统，包括机械传动系统和液压控制系统2部分。动力经拖拉机的后动力输出轴传给安装在机架上的齿轮箱。一路动力通过齿轮箱动力输出轴带动链轮转动，并利用链条带动抛送装置中的抛送轮轴转

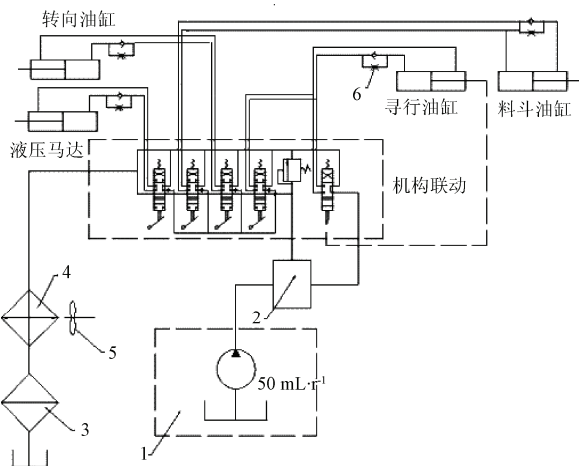
动，实现抛送轮的抛送功能；同时带动去土输送装置中的杆式输送链和螺旋辊筒转动，实现甜菜块根的输送、去土。另一路动力带动安装在齿轮箱后方的齿轮油泵转动，为液压控制系统提供动力。通过液压系统控制液压马达转动，实现后升运装置运动；利用不同位置油缸的伸缩，分别实现收获机械的对行、挖掘深度的调节和甜菜装卸。传动系统如图2所示。液压系统原理图如图3所示。



1.动力输入轴 Power input shaft 2.动力输出轴 Power output shaft 3.抛送轮轴 Throwing wheel shaft 4.螺旋辊筒轴 Screw roller shaft 5、7.钢辊轴 Steel roller shaft 8.液压马达 Hydraulic motor 9、10.升运链主动轴 Drive shaft of hoisting chain 11.输送链主动轴 Drive shaft of conveyor chain 12.输送系统主动轴 Drive shaft of transmission system

图2 传动系统图

Fig.2 Schematic of transmission system



1.齿轮泵 Gear pump 2.分流阀 flow divider valve 3.过滤器 Filter 4.散热器 Radiator 5.冷却风扇 Cooling fan 6.单向节流阀 One-way restrictive valve

图3 液压系统图

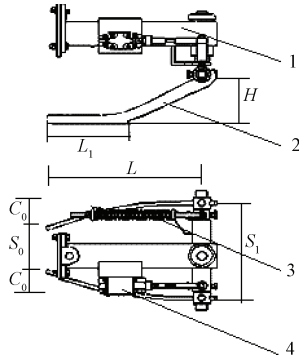
Fig.3 Schematic of hydraulic system

### 2.2 对行装置

对行装置主要用来修正收获机的前进方向，防止因机组的跑偏或甜菜种植的偏差而引起的甜菜收获损伤和漏挖。对行装置主要由对行机架、对行导板、手动换向阀等组成。对行装置结构如图4所示。

工作时，对行装置随地面前进，对行导板分别处在甜菜块根的两侧。当对行机构随地起伏时，回

位弹簧具有一定的压缩量，可实现对行机构垂直方向的回位。当对行装置一边的对行导板内侧接触到偏离甜菜垄行中心的甜菜块根时，对行导板就会受到甜菜块根轮廓的推力，带动机构联动，从而牵动手动换向阀的手柄伸长或缩短，开启不同的液压油路，使得安装在机架侧向的转向油缸进行相应的动作，从而调整收获机的前进方向，实现收获过程的自动对行。



1.对行机架 Guiding frame 2.对行导板 Guide plates 3.压力弹簧 Pressure spring 4.手动换向阀 Manual reversal valve

图 4 对行机构结构图

Fig.4 Structural schematic of guiding mechanism

对行机构是对行装置的重要组成部分，其结构及工作参数决定着对行的质量和效果，一般由甜菜块根的大小和田间生长状况确定。对行装置机架的离地高度影响着机构的通过性，对行导板的水平长度  $L_1$  和  $L$  决定着对行导板与块根接触的作用时间和机构运动的平稳性，2 个对行导板的距离  $S_0$  和  $S_1$  影响着对行装置调整范围，各参数存在以下关系

$$S_0 = d + 2C \quad (1)$$

$$S_1 = S_0 + 2C_0 \quad (2)$$

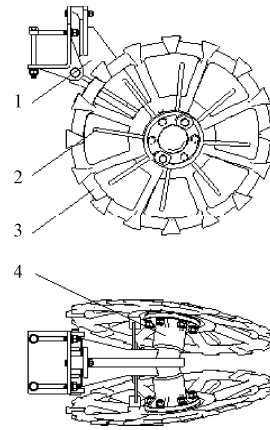
式中， $d$  为甜菜块根最小直径，mm； $C$  为允许偏差，mm； $C_0$  为允许甜菜块根偏离距离，mm。

经调查，移栽甜菜种植行距为 500~600 mm，株距为 250~300 mm，甜菜直径范围为 60~150 mm，甜菜青头离地高度为 30~80 mm。为了保证甜菜顺利通过对行装置，保持收获机行驶平稳，减少连续侧向位移的波动，选定对行装置机架的离地高度  $H$  为 150 mm；对行导板水平长度不小于甜菜株距，结合经验取  $L_1$  为 250 mm， $L$  为 370 mm；根据甜菜块根生长状况，取  $d$  为 60 mm， $C$  为 40 mm， $C_0$  为 65 mm，则  $S_0$  为 140 mm， $S_1$  为 270 mm。

### 2.3 挖掘装置

挖掘装置是甜菜联合收获机械的关键部件之一，主要完成甜菜块根的挖掘、去土，影响着挖掘收获的质量和效果，决定着收获的工作阻力。其位于对行装置的后方，抛送装置的前端，主要由挖掘

圆盘、堵漏盘、圆盘轴臂架、轴承套等组成。挖掘装置结构如图 5 所示。

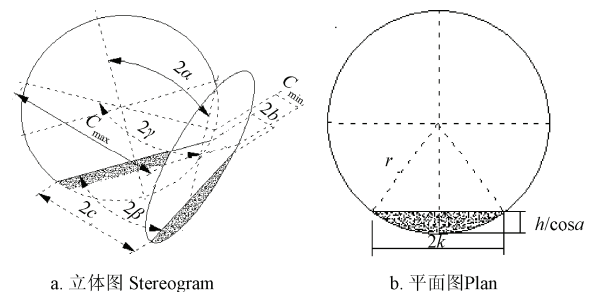


1.圆盘轴臂架 Disk shaft frame 2.堵漏盘 Plugging plate 3.挖掘圆盘 Digging disc 4.轴承套 Bearing sleeve

图 5 挖掘装置结构图

Fig.5 Structural schematic of digging device

挖掘装置中 2 个挖掘圆盘为非平行结构，与前进方向成倾斜安装。工作时，挖掘装置在机架的牵引下前进，挖掘圆盘依靠其与土壤的摩擦力产生滚动，并在前进过程中将含有甜菜块根的土袋切割、松碎，使得部分土壤松碎、侧漏，甜菜块根随着圆盘的滚动被提升。为了方便研究，将空间挖掘圆盘近似为平面圆盘。挖掘圆盘的工作参数如图 6 所示。



注： $C_{max}$  为两圆盘边缘最大距离，mm； $C_{min}$  为两圆盘边缘最小距离，mm； $2k$  为入土线长度，mm； $2c$  为 2 条入土线最大距离，mm； $2b$  为 2 条入土线最小距离，mm； $h$  为挖掘深度，mm； $2\alpha$  为两圆盘垂直轴张角， $^\circ$ ； $2\beta$  为两圆盘水平轴张角， $^\circ$ ； $2\gamma$  为两圆盘面的张角， $^\circ$ 。  
Note:  $C_{max}$  is maximum distance between two disk edge, mm;  $C_{min}$  is minimum distance between two disk edge, mm;  $2k$  is buried line length, mm;  $2c$  is maximum distance between two buried line, mm;  $2b$  is minimum distance between two buried line, mm;  $h$  is digging depth, mm;  $2\alpha$  is vertical axis angle,  $^\circ$ ;  $2\beta$  is horizontal axis angle,  $^\circ$ ;  $2\gamma$  is angle of two circular disks,  $^\circ$ .

图 6 挖掘圆盘工作参数

Fig.6 Working parameters of digging disc

各个参数存在以下关系

$$k = \frac{c - b}{2 \sin \beta} \quad (3)$$

$$k^2 = r^2 - \left( r - \frac{h}{\cos \alpha} \right)^2 \quad (4)$$

$$\sin \gamma = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{4r} \quad (5)$$

为了提高挖掘效果,减少甜菜损伤,工作时挖掘装置应满足以下关系

$$2c \geq B_{\max} + 2m_B \quad (6)$$

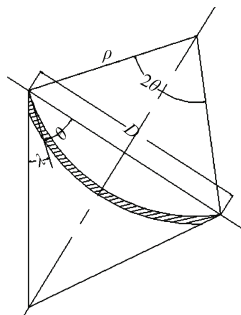
式中,  $B_{\max}$  为甜菜块根在垄行中分布的最大宽度, mm;  $m_B$  为挖掘圆盘相对于垄行中心线的平均偏差, mm。

$$c_{\max} = S - 2\Delta b - \Delta s \quad (7)$$

式中,  $S$  为甜菜行距, mm;  $\Delta b$  为圆盘轮缘厚度, mm;  $\Delta s$  为相邻挖掘部件圆盘之间的间隙, mm。

同时, 2 个挖掘圆盘入土线最小距离  $2b$  由甜菜块根的大小和栽植密度决定; 两圆盘边缘最小距离  $c_{\min}$  由甜菜块根收获的最小直径确定; 挖掘深度  $h$  与甜菜块根的长度和土壤条件有关; 挖掘圆盘的外倾角  $\alpha$  应近似于甜菜块根的外形锥度  $12 \sim 15^\circ$ 。根据 Gerasimchuk 和 Prohazka 理论<sup>[24]</sup>, 结合经验和试验结果, 确定  $\alpha=14.75^\circ$ ,  $\beta=13.26^\circ$ ,  $\gamma=15.23^\circ$ 。

挖掘圆盘既要入土阻力小, 又要有良好强度和碎土效果。为了便于圆盘切入坚硬的土壤, 挖掘圆盘为缺口球面圆盘, 采用 65Mn 铸造,  $800^\circ\text{C}$  回火处理。圆盘结构简图如图 7 所示。



注:  $\lambda$  为圆盘刃角, ( $^\circ$ );  $D$  为圆盘直径, mm;  $\theta$  为过球心的圆盘水平截面上扇形的半角, ( $^\circ$ );  $\rho$  为圆盘的曲率半径, mm。

Note:  $\lambda$  is the disc edge angle, ( $^\circ$ );  $D$  is the disc diameter, mm;  $\theta$  is the half angle of sector of center horizontal section, ( $^\circ$ );  $\rho$  is the disc curvature radius, mm.

图 7 挖掘圆盘结构简图

Fig.7 Structural schematic of digging disc

圆盘直径决定着挖掘装置的挖掘宽幅, 可借鉴圆盘耙等圆盘部件的圆盘曲面参数计算办法, 挖掘圆盘直径可根据作业要求的深度求得。

$$D = K \frac{h}{\cos \beta} \quad (8)$$

式中,  $h$  为作业深度, mm;  $K$  为经验系数, 一般取  $4 \sim 6$ 。

根据甜菜的种植农艺和收获条件, 作业深度为  $80 \sim 120$  mm。选取  $K=6$ , 则挖掘圆盘直径为  $480 \sim$

$720$  mm。借鉴格拉西姆楚克的研究结果, 选用挖掘圆盘直径为  $685$  mm。

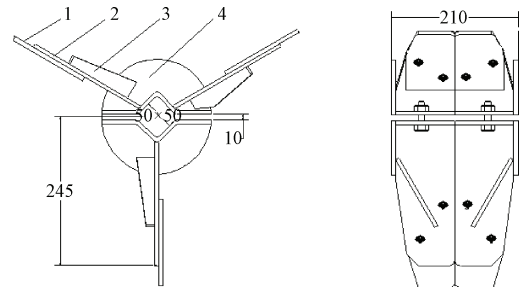
挖掘圆盘工作表面上各点的曲率是常数定值, 凸面周边磨刃, 入土、碎土能力强。当圆盘曲率半径越大时, 圆盘曲面越平滑, 土垡的提升效果越好。在过球心的水平截面上, 参数间存在以下关系

$$\rho = \frac{D}{2\sin \theta} \quad (9)$$

结合挖掘装置结构配置要求, 初步确定圆盘曲率半径  $\rho$  为  $1\ 100$  mm。同时, 圆盘刃角  $\lambda$  要满足刃口强度要求, 又要尽量取小些, 以减小切割阻力, 一般在  $15 \sim 22^\circ$ 。由于圆盘刃口为外磨刃, 选定圆盘刃角为  $15^\circ$ 。

## 2.4 抛送装置

抛送装置位于挖掘装置的后上方, 输送分离装置的前上方, 利用轴承座固联在机架上, 通过抛送轮轴带动抛送轮转动, 将被挖掘部件挖起的甜菜拨送到后输送分离装置。抛送轮为旋转件主要由辐板、加强筋、橡胶板等组成。抛送轮结构如图 8 所示。



1. 橡胶板 Rubber sheet 2. 辐板 Board 3. 加强筋 Stiffener 4. 半圆法兰 Semicircle flange

图 8 抛送轮结构

Fig.8 Structural schematic of throwing wheel

考虑整机的协调性, 抛送装置安装在挖掘部件后上方位置。抛送轮上均布安装 3 个辐板, 橡胶板厚  $6$  mm, 具有足够强度, 可完成甜菜连同土壤的抛送工作。抛送轮的转速影响着甜菜块根抛送的距离和下落的速度。当抛送轮转速过高时, 甜菜损伤率和输送链的扰动会增加; 转速过低时, 抛送甜菜不及时, 会出现堵塞, 影响工作效果。抛送轮的转速由下式确定。

$$n_1 = \frac{30v_1}{\pi R} \quad (10)$$

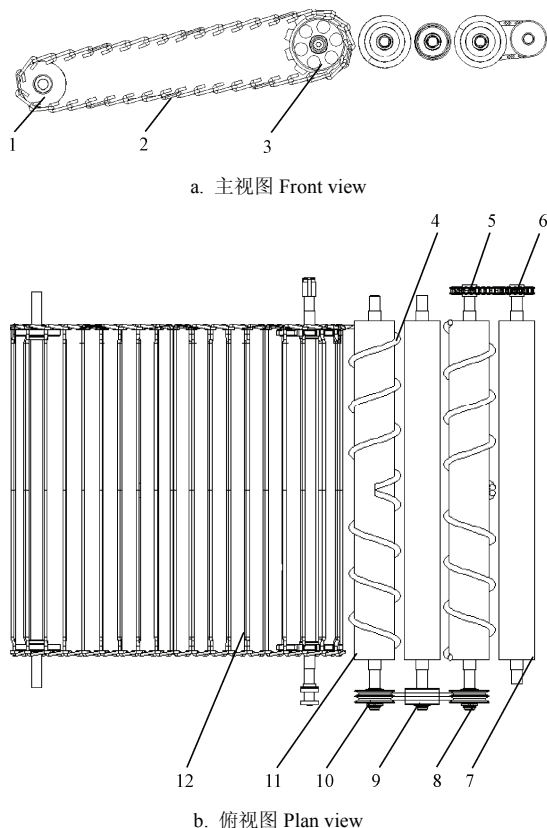
式中,  $n_1$  为抛送轮的转速, r/min;  $v_1$  为抛送轮橡胶板外端的速度, mm/s;  $R$  为橡胶板外端距抛送轮旋转中心的距离, mm。

根据经验, 通常抛送轮的线速度  $v_1$  与机具前进

速度  $v_m$  具有一定的关系, 即  $v_1=(2-4)v_m$ , 适宜速度为  $3\sim 4\text{ m/s}$ <sup>[25]</sup>。结合田间试验, 确定抛送轮转速为  $180\text{ r/min}$ 。

### 2.5 输送清理装置

输送清理装置主要包括杆式链输送器和螺旋辊筒清理器 2 部分。该装置借助杆式输送链的抖动和螺旋辊筒上设有的螺旋圆钢实现甜菜与土壤的分离, 并完成甜菜块根的定向输送, 具有分离块根、土壤和杂草的作用。其结构示意图如图 9 所示。



1. 输送链前轮 Front wheel of conveyor chain 2. 杆式输送链 Wire rod conveyor chain 3. 输送链轮 Conveyor chain wheel 4. 圆钢 Round steel 5、6 链轮 Chain wheel 7. 钢辊 Steel roller 8、10 皮带轮 Belt pulley 9. 张紧轮 Tensioning wheel 11. 螺旋辊筒 Screw roller 12. 钩形杆 Hooked wire rod

图 9 输送清理装置结构图

Fig.9 Structural schematic of conveying and cleaning device

杆式输送器主要由杆式输送链、输送链轮等组成。其中, 杆式输送链由钩形杆挂接而成, 负责甜菜块根与土壤、杂草的初步分离及块根的向后输送。这种输送结构清理和松土的效果好, 可以提高输送链与地面的安装角度。为达到较好的分离和输送效果, 根据甜菜的大小、行距和栽培工艺, 选择直径为  $10\text{ mm}$ , 长度为  $1\ 160\text{ mm}$  的钩形杆。钩形杆的结构如图 10 所示。杆式输送链采用 4 根弯曲钩形杆和 1 根直钩形杆交替的挂接组合方式, 节距

为  $65\text{ mm}$ , 通过链条与链轮的不连续接触, 实现无振动源的链条抖动, 以辅助杆式输送链完成甜菜的清理工作。

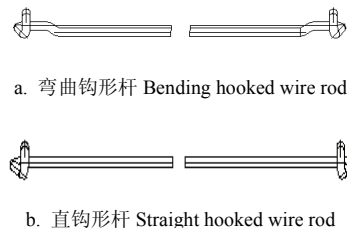


图 10 钩形杆结构图

Fig.10 Structural schematic of hooked wire rod

杆式链条的转速对工作部件的工作质量和平稳性影响较大, 且线速度越大, 工作部件的磨损越快, 工作中容易发生脱钩等不稳定情况。为了降低被抛甜菜块根对杆式链的冲击, 减小输送链的扰动, 杆式输送链的水平速度应接近于甜菜块根的水平速度。其输送链轮的转速  $n_2$  可由下式确定。

$$n_2 = \frac{60v_2}{\pi D_2} \quad (11)$$

式中,  $n_2$  为输送链轮的转速,  $\text{r/min}$ ;  $v_2$  为杆式输送链的线速度,  $\text{mm/s}$ ;  $D_2$  为输送链轮的直径,  $\text{mm}$ 。

结合试验, 确定输送链轮齿宽为  $20\text{ mm}$ , 牙数为  $10$ , 分度圆直径分别为  $210\text{ mm}$ , 转速为  $154\text{ r/min}$ , 输送前轮直径为  $160\text{ mm}$ 。

螺旋辊筒清理器作为二级清理装置, 由 2 个螺旋辊筒和 2 个钢辊交错配置而成, 主要借助盘绕在钢辊上的圆钢和钢辊的滚动清除甜菜块根上粘附的泥土、扯掉残留的茎叶和杂草的目的。结合工作状况和经验公式, 螺旋辊筒的直径可由下式确定。

$$D_1 \leq \frac{d_k \cos \varphi - l}{1 - \cos \varphi} \quad (12)$$

式中,  $D_1$  为螺旋辊筒的直径,  $\text{mm}$ ;  $\varphi$  为甜菜与金属的摩擦角,  $(^\circ)$ ;  $l$  为辊筒的间隙,  $\text{mm}$ ;  $d_k$  为甜菜块根直径,  $\text{mm}$ 。

盘绕螺纹螺距应满足下式。

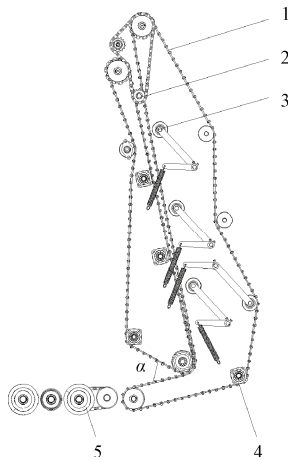
$$l_k < s < (D_1 + d_1) \cos \varphi \quad (13)$$

式中,  $l_k$  为块根的技术长度,  $\text{mm}$ ;  $d_1$  为螺线的圆钢直径,  $\text{mm}$ ;  $s$  为螺纹螺距,  $\text{mm}$ 。

结合甜菜物理几何尺寸和设计经验, 确定辊筒的间隙  $l$  为  $30\text{ mm}$ , 螺线的圆钢直径  $d$  为  $14\text{ mm}$ , 盘绕螺纹螺距  $s$  为  $130\text{ mm}$ , 螺旋辊筒直径为  $140\text{ mm}$ , 钢辊直径为  $120\text{ mm}$ , 可以有效提高螺旋辊筒清理器的输送, 清土效果。

## 2.6 升运装置

升运装置位于收获机后方，主要由液压马达、张紧轮、杆式输送链、压紧轮等组成，结构如图 11 所示。



1.杆式输送链 Wire rod conveyor chain 2. 液压马达 Hydraulic motor  
3.压紧轮 Pinch roller 4.张紧轮 Tensioning wheel 5.螺旋辊筒清理器  
Screw roller cleaner

图 11 升运装置结构示意图

Fig.11 Structural schematic of hoisting equipment

工作时，液压马达提供动力，带动 2 条杆式输送链夹持着甜菜运动，完成甜菜提升，并借助甜菜的惯性和重力抛落到收集箱内。在压紧轮的协助下，杆式输送链可以适应不同大小甜菜的夹持及升运工作。为了保证甜菜提升顺畅，减少升运过程中甜菜块根损伤，升运装置的杆式输送链运行速度小于螺旋辊筒速度。通过试验，选定 BM3-100 液压马达，排量 160 mL/r，输出轴转速 160~185 r/min；升运装置的杆式输送链形成的甜菜块根的喂入角  $\alpha$  略小于甜菜块根的楔形角，确定  $\alpha$  为  $28^\circ$ 。

## 3 样机田间试验及分析

### 3.1 试验条件

在河北省张家口市张北县小二台 KWS3148 移栽甜菜试验田进行样机性能试验。参照《农业机械试验条件测定方法的一般规定》(GB/T5262-2008)，对甜菜品种收获期的田间状况进行调查，甜菜行距为 600 mm，株距 250 mm，垄高 120 mm，块根直径为 60~120 mm，质量为 800~1 900 g。参照《土壤水分测定法》(NY/T52-1987)，并利用 TJSD-750 II 型土壤紧实度仪，测定土壤含水率为 10.2%，容重为  $2.21 \text{ g/cm}^3$ ，土壤平均硬度为 2 034 MPa。

### 3.2 试验方法

依据《甜菜收获机械 试验方法》(JB/T6276—2007)和《甜菜收获机 作业质量》(NY/T 1412—2007)，选取甜菜块根的粘土率、损失率、损伤

率、折断率、含杂率作为挖掘装置的性能评价指标。在东方红 40 马力拖拉机 II 档正常作业状态下，沿收获装置前进方向选取长度 20 m，宽度为一个作业幅宽的面积作为检测的取样单元，分别测得相应数据，求的试验指标，并考查收获机挖掘、分离、输送提升等各个部件的运转情况和整机的性能。

### 3.3 试验结果及分析

依据试验方法测得甜菜收获机的性能参数如表 2 所示。在试验过程中，样机收获顺畅，基本能够完成收获任务。工作状况如图 12 所示。

表 2 圆盘式双行甜菜联合收获机性能参数

Table 2 Performance parameters of double-row disc sugar beet combine

序号 Serial number	粘土率 Sticking soil rate	损失率 Loss rate	损伤率 Damage rate	折断率 Broken rate	含杂率 Impurity rate
1	2.8	3.4	0	0	6.2
2	0	4	4.4	2.5	4.2
3	3.1	0	0	0	6.7
4	0	5	4.7	3.2	4.1
5	0	4.7	0	2.3	3.1
平均值 Average value	1.18	3.42	1.82	1.6	4.86
技术要求 Technical requirements	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 5$	$\leq 6$	$\leq 7$

甜菜的含杂率主要由甜菜尾根的质量引起的，甜菜没有表面含杂。在样机收获极个别大甜菜时，发生了甜菜损伤和尾根折断的现象。损失率主要由收获装置不能及时对行引起的。因此，在后续的研究中还需加强样机对行装置的试制以及收获机适应性的改进。重点进行挖掘部件工作机理的研究，优化圆盘挖掘部件的结构和工作参数，提高挖掘收获的效果；改进对行装置结构，提高机构对行反映的灵敏度，增强对行机构对各类甜菜的适用性。



图 12 样机工作状况

Fig.12 Prototype working condition

## 4 结论

1) 圆盘挖掘式甜菜联合收获机可一次完成甜菜的挖掘、去土、输送、升运和收集等作业，甜菜

收获损失率不大于 3.42%，粘土率不大于 1.18%，损伤率不大于 1.82%，折断率不大于 1.6%，含杂率不大于 4.86%，满足设计要求。

2) 该机设计了分路传动系统, 由机械传动系统和液压控制系统 2 部分组成, 提高了机械的自动化程度; 采用机械与液压系统结合的对行调节装置, 借助甜菜的外轮廓, 实现了收获装置的实时对行, 减少了甜菜的漏挖; 空间圆盘式挖掘结构, 减小了挖掘装置的挖掘量, 提高了土壤与甜菜的分离效果; 组合式杆式输送链, 由弯曲杆和直杆交替挂接组合而成, 实现了无振动源的链条抖动, 提高了输送链的去杂效果, 降低了甜菜的含杂率。

#### [参 考 文 献]

- [1] 周建朝, 陈连江, 王绍禹, 等. 试谈我国甜菜科研面临的任务及对策[J]. 中国糖料, 1998(1): 32—36.  
Zhou Jianchao, Chen Lianjiang, Wang Shangyu, et al. The task and countermeasure of the scientific research of our country beet[J]. Sugar Crops of China, 1998(1): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [2] Licht F O. Crop protection in sugar beet[J]. Sugar Beet, 2007(10): 189—191.
- [3] Wang Fangyan, Zhang Dongxing. Experimental analysis on physical characteristics of sugar beet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(Supp.2): 297—303.
- [4] 刘金锁, 姜贵川, 李建东, 等. 甜菜收获机现状与发展趋势[J]. 农业机械, 2012(26): 13—15.  
Liu Jinsuo, Jiang Guichuan, Li Jiandong, et al. Present situation and development trend of harvester sugar beet[J]. Farm Machinery, 2012(26): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [5] 韩长杰, 尹文庆, 杨宛章, 等. 甜菜机械化收获方式分析与探讨[J]. 中国农机化, 2012(1): 71—74.  
Han Changjie, Yin Wenqing, Yang Wanzhang, et al. Analysis and discussion of mechanization harvest method of sugar beet[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 71—74. (in Chinese with English abstract)
- [6] 易东山, 芦珍林. 德荷马甜菜收获机的机械性能及使用[J]. 新疆农垦科技, 2007(4): 46—47.  
Yi Dongshan, Lu Zhenlin. The mechanical properties and the use of De homer sugar beet harvester[J]. Xinjiang Farmland Reclamation Science and Technology, 2007(4): 46—47. (in Chinese with English abstract)
- [7] 关鲁兴, 谢民生. 甜菜机械化收获配套技术及效益分析[J]. 新疆农机化, 2011(4): 44—46.  
Guan Luxing, Xie Minsheng. Analysis of mechanical harvesting supporting technology and benefits of sugar beet[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2011(4): 44—46. (in Chinese with English abstract)
- [8] 熊学海, 井双泉, 关长明, 等. 甜菜机械化收获初报[J]. 新疆农机化, 2009(4): 42—44.  
Xiong Xuehai, Jing Shuangquan, Guan Changming, et al. Initial report of sugar beet mechanized harvesting[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2009(4): 42—44. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lammers P S, Rose M. Harvest quality of six-row sugar beet tanker harvesters: test of lifters 2004 in Seligenstadt[J]. Landtechnik, 2005, 60(5): 252—253.
- [10] 李文秀, 吴晓莉, 邓勋华. 甜菜机械化收获技术和对策[J]. 农机科技推广, 2010(6): 45.  
Li Wenxiu, Wu Xiaoli, Deng Xunhua. Mechanized harvesting technology and development countermeasures of sugar beet[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2010(6): 45. (in Chinese with English abstract)
- [11] 汪广文, 李国军, 张亚云. 日本小型甜菜生产机械性能及问题分析[J]. 新疆农机化, 2010(6): 48—49.  
Wang Guangwen, Li Guojun, Zhang Yayun. Analysis of performance and problem of Japanese small sugar beet manufacturing machine[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2010(6): 48—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 汪广文, 李国军, 张亚云. 日本小型甜菜生产机械的应用及改进建议[J]. 中国甜菜糖业, 2010(2): 29—33.  
Wang Guangwen, Li Guojun, Zhang Yayun. Application and improvement proposal of Japanese small sugar beet machine[J]. China Beet and Sugar, 2010(2): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李芳芳, 李智勇. 甜菜收获呼唤机械化[J]. 农机科技推广, 2007(8): 35—35.  
Li Fangfang, Li Zhiyong. Beet harvesting calls mechanization[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2007(8): 35—35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 韩长杰, 尹文庆, 杨宛章, 等. 甜菜机械化收获方式分析与探讨[J]. 中国农机化, 2012(1): 71—74.  
Han Changjie, Yin Wenqing, Yang Wanzhang, et al. Analysis and discussion of sugar beet mechanization harvesting method[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 71—74. (in Chinese with English abstract)
- [15] 计福来, 张会娟, 胡志超, 等. 甜菜种植与机械化收获概况[J]. 农机化研究, 2009(4): 234—240.  
Ji Fulai, Zhang Huijuan, Hu Zhichao, et al. Status about beet planting and its harvesting mechanization[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(4): 234—240. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张富国. 甜菜机械收获现状、问题及发展意见[J]. 新疆农机化, 1998(1): 18—19.  
Zhang Fuguo. Harvest present situation, problems and development opinions of sugar beet[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 1998(1): 18—19. (in Chinese with English abstract)
- [17] 范素香, 侯书林, 赵匀. 国内外甜菜生产全程机械化概况[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 12—15.  
Fan Suxiang, Hou Shulin, Zhao Yun. Overview of full mechanization of sugar beet production in domestic and overseas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(3): 12—15. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王建楠, 胡志超, 彭宝良, 等. 国内外甜菜全程机械化生产现状与趋势[J]. 农业机械, 2009(6): 60—62.  
Wang Jiannan, Hu Zhichao, Peng Baoliang, et al. Production status and trend of sugar beet mechanization[J].

- Farm Machinery, 2009(6): 60—62. (in Chinese with English abstract)
- [19] 关鲁兴, 谢民生. 甜菜机械化收获配套技术及效益分析[J]. 新疆农机化, 2011(4): 44—45.
- Guan Luxing, Xie Minsheng. Analysis of techniques and benefit of sugar beet mechanized harvest[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2011(4): 44—45. (in Chinese with English abstract)
- [20] 卢秉福, 张祖立. 甜菜生产机械化的研究进展及发展趋势[J]. 新疆农机化, 2010(6): 50—52.
- Lu Bingfu, Zhang Zuli. Research progress and development trend of mechanization of sugar beet production[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2010(6): 50—52. (in Chinese with English abstract)
- [21] 谭北雁, 杨学军. 我国甜菜机械化收获现状及分析[J]. 农业机械, 2010(9): 94—97.
- Tan Beiyan, Yang Xuejun. Current situation and analysis on sugar beet mechanized harvest in China[J]. Farm Machinery, 2010(9): 94—97. (in Chinese with English abstract)
- [22] 付胜利. 4TSL-2 型甜菜收获机的研究与设计[J]. 农村牧区机械化, 2007(2): 32—33.
- Fu Shengli. Research and design of 4TSL-2 sugar beet harvester[J]. Mechanization in Rural and Pastoral Areas, 2007(2): 32—33. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张忠武, 张树宝, 赵东升. 甜菜生产全程机械化探索[J]. 农机使用与维修, 2008(5): 82—83.
- Zhang Zhongwu, Zhang Shubao, Zhao Dongsheng. Exploration of the full mechanization of sugar beet[J]. Farm Machinery Using and Maintenance, 2008(5): 82—83. (in Chinese with English abstract)
- [24] T H 西涅阿科夫, H M 潘诺夫. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981: 13.
- T H Signe Arkoff, H M Pannuofuc Theory and calculation of mechanical soil tillage[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1981: 13. (in Chinese with English abstract)
- [25] 蒋思臣. 农业生产机械化[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 267.
- Jiang Sichen. Mechanization of agricultural production[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2003: 267. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment of disc-dig sugar beet combine

Wang Fangyan<sup>1,2</sup>, Zhang Dongxing<sup>1\*</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of mechanical and electrical engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** The combine harvester is one of important tools for a sugar beet harvest. In order to solve time-consuming, tedious, and inefficient process in manual picking up of sugar beet by a traditional digger, and alleviate the shortage of sugar beet harvesting equipment, a disc-dig sugar beet combine harvester with medium horsepower tractors was designed based on the planting pattern and agronomic requirements, and the overall configuration and the structure of the main parts were described. The combine was composed of a rack, transmission system, guiding mechanism, digging device, conveying and cleaning device, hoisting equipment and driven system, et al. which enabled a one-stop achievement of sugar beet digging, conveying, removing soil and collecting. It effectively decreased the labor cost, simplified the commodity sugar beet processing links, and enhanced the efficiency of production. The driving system was configured in two independent ways, and equipped with a mechanical hydraulic control system, which improved the control accuracy and automation. With the hydraulic control system, the guiding mechanism reflected quickly and reduced the leakage (loss) of the sugar beet during harvesting. The disc digging component of the digging device reduced the excavated soil volume, improved the ability of breaking soil, and reduced the working resistance effectively. The throwing wheel moved sugar beet to the conveying and cleaning device, which was arranged behind the digging device. The hoisting equipment has a compact structure and good working reliability. Meanwhile, the web chain was composed of bending rods and bar rods, realized the chain jitter without source vibration, and reduced the transmission loss and the impurity of sugar beet. Field tests indicated that the rate of sticking to soil, the loss rate, the damage rate, the broken rate, and the impurity rate reached 0.8%, 4.5%, 2.4%, 1.6%, and 3.1%, respectively, which are in line with the sugar beet harvesting requirement. The results show that the developed harvester exhibits better performances and adaptation on the dry land. The further study will focus on the key parts parameters, in order to improve the applicability of the sugar beet harvester. This study can provide some references for the development and design of medium scale agricultural farming machinery based on the above parameter design, and at the same time, it can help to promote the development of sugar beet mechanization production, especially in China.

**Key words:** combine harvester, design, experiment, sugar beet

(责任编辑: 信世强)