doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.009

胡萝卜联合收获机单圆盘对顶切割装置设计与试验

王金武　关　睿　高鹏翔　周文琪　唐　汉
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:针对胡萝卜联合收获过程中对顶切割装置作业后胡萝卜损伤率高、切净率低等问题,设计了一种单圆盘对顶切割装置,并阐述了其主要结构及工作原理。在统计分析胡萝卜基本物理特性的基础上,通过理论计算确定了斜拉式导向齐平对顶机构的两对齐基板间距、拉齐区长度和对齐基板斜边角度等主要结构参数,达到胡萝卜茎叶精准拉齐的目的。以螳螂前肢胫节曲线为原型,将拟合优化后的曲线形状应用至圆盘动割刀和直割刀刃口上,构建切割机构-胡萝卜茎叶力学模型,分析其满足胡萝卜被高效切断的条件。对圆盘割刀进行运动学分析,建立圆盘割刀前进方向的运动学模型,确定影响装置工作性能的因素为胡萝卜输送速度和圆盘割刀转速。以胡萝卜收获机夹持输送皮带轮转速(胡萝卜输送速度)和圆盘割刀转速为试验因素,以胡萝卜根茎损伤率、茎叶切净率、切割平整度为试验指标,进行了二因素五水平二次正交旋转组合试验,通过对试验结果进行分析优化,确定最佳参数组合。结果表明,当胡萝卜收获机夹持输送皮带轮转速为 113 r/min、圆盘割刀转速为 156 r/min 时,对顶切割装置性能最优,此时胡萝卜损伤率均值为 0.53%、切净率均值为 95.41%、平整度均值为 94.10%。对优化结果进行田间试验验证,验证结果与优化结果基本一致,作业过程中装置工作平稳。

关键词:胡萝卜联合收获机;对顶拉齐装置;圆盘割刀;仿生;试验
中图分类号:S225.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0073-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Single Disc to Top Cutting Device for Carrot Combine Harvester

WANG Jinwu　GUAN Rui　GAO Pengxiang　ZHOU Wenqi　TANG Han
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of high damage and low cutting rate of carrots after the top cutting in the process of carrots combined harvesting, a single disc to top cutting device was designed and its main structure and working principle was described. On the base of statistical analysis of carrot basic physical properties, the main structural parameters of the cable-stayed guide flushing to top mechanism were designed, such as the distance between the two flushing base plates, the length of flushing section and the angle of the oblique edge of the flushing base plate, etc., with which, the purpose of accurate flushing the carrot stem leaf was achieved. Taking the curve of tibia of mantis forelimb as the original form to be fit and optimized and applied to the cutting edge of the movable cuter and straight-fixed cuter of the disc to construct the mechanical model of mechanism-carrot stem leaf, through which to verify and determine the condition for efficient cutting. By kinematic analysis to set up the kinematic model of the disc cuter in the direction of moving ahead, through which, the feeding speed of the carrot and the rotating speed of the disc cuter were determined as the factors affecting the device operating performances. Taking the carrot feeding speed and the disc cuter rotating speed as the testing factor, the damage rate and cutting rate of carrot stem leaf as the testing index, the two factors and five levels quadratic orthogonal rotation combination test was carried out. The testing result was analyzed and the optimal combination of operating parameters were determined that, when the rotating speed of the conveying belt wheel was 113 r/min, the rotating speed of the cuter was 156 r/min, the top cutting device functioned the best with the damage rate and the cutting rate of carrot up to 0.53% and 95.41% respectively, and the flushing degree up to 94.10%, whose field verification testing was met well. The device was operated stably.

Key words: carrot combine harvester; top pull device; disc cutter; bionic; experiment

收稿日期:2019-11-13　修回日期:2019-12-06
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701305)和国家重点研发计划省级项目(GX18B026)
作者简介:王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械和机械可靠性研究,E-mail:jinwuw@163.com
通信作者:唐汉(1991—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备及其设计优化方法研究,E-mail:tanghan19910102@163.com

0 引言

中国胡萝卜产量与种植面积均居世界首位,但胡萝卜收获机械化程度极低,主要采用人工收获[1-3]。部分地区采用马铃薯收获机兼收胡萝卜,在这种收获模式下需后期人工捡拾切割胡萝卜茎叶,收获后胡萝卜损伤率高,经济损失大[4-6]。对顶切割是胡萝卜收获过程中的关键环节,其切割性能直接影响收获后胡萝卜的经济价值[7],切割后剩余茎叶过长,胡萝卜易腐烂,胡萝卜根茎受伤便无法出售。因此,设计高效的对顶切割装置是保证胡萝卜联合收获作业质量的基础。

目前,国内外学者对对顶切割装置进行了系列研究,按照切割方式可分为双圆盘割刀式和拉拽杆式[8-10]。法国西蒙公司研制的 Liner 系列胡萝卜联合收获机[11]和金鑫等[12]研制的双行自走式胡萝卜联合收获机均采用双圆盘式切割装置,两圆盘割刀相对高速旋转,完成胡萝卜切割过程,割刀转速可根据联合收获机行进速度进行调节,作业效率高,但两圆盘割刀旋转产生的振动影响切割效果,导致胡萝卜根茎损伤率较高、茎叶切净率较低,其中 Liner 系列收获机损伤率和切净率分别为 18.4% 和 70.3%,双行自走式收获机损伤率为 1.8%、切净率为 90.6%。曾功俊等[13]研制了拉拽杆式分离装置,定性分析了相关参数对拉拽杆运动学特性的影响,解决了国外拉拽杆式分离装置分离不彻底的问题,但装置结构较为复杂,切割后胡萝卜根茎损伤率为 7.7%,茎叶切净率为 94%。

针对上述问题,本文基于仿生螳螂前肢胫节刃口曲线设计一种单圆盘对顶切割装置。采用斜拉式拉齐方式,实现胡萝卜茎叶精准拉齐,割刀刃口仿螳螂前肢曲线以更好地完成胡萝卜茎叶夹持顺势切割过程,通过分析其工作原理,确定关键部件的结构参数。通过台架试验得到装置最佳工作参数组合,并以此工作参数进行田间试验验证,以期实现低损伤率、高切割平整度和高茎叶切净率的胡萝卜机械化联合收获作业要求。

1 胡萝卜基本物理特性

为合理设计对顶切割装置,随机选取常见胡萝卜品种红参 7 寸成熟期样本 200 个,分别测量每个样本的主要物理特性参数,如图 1 所示。胡萝卜总长度 X_1 为 490 ~ 790 mm,根茎长度 X 为 110 ~ 240 mm,茎果结合部直径 d 为 9.04 ~ 14.21 mm,根茎最宽处直径 d_1 为 21.13 ~ 57.24 mm,胡萝卜茎叶被拉断力 A 为 87 ~ 346 N。

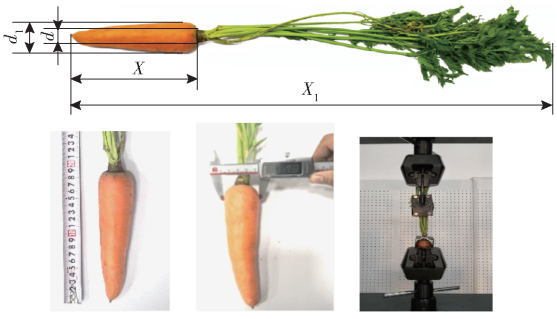


图 1 胡萝卜物理特性示意图

Fig. 1 Schematic of carrot physical properties

2 仿生单圆盘对顶切割装置结构与工作原理

单圆盘对顶切割装置主要由对齐基板(对齐左基板和对齐右基板)、对齐皮带、仿生割刀(圆盘割刀和直割刀)、圆盘割刀齿轮轴等部件组成,如图 2 所示。其中圆盘割刀和直割刀刃口曲线采用仿螳螂前肢胫节曲线结构设计,上下交叠安装。

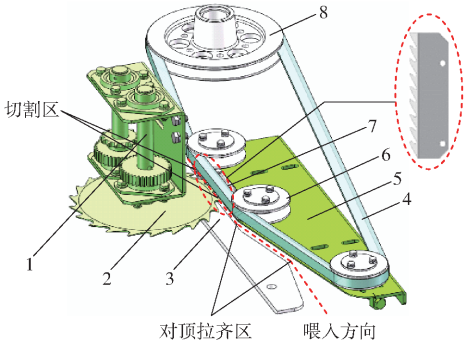


图 2 单圆盘对顶切割装置结构图

Fig. 2 Structural diagram of single disc to top cutting device

1. 圆盘割刀齿轮轴 2. 圆盘割刀 3. 对齐左基板 4. 对齐皮带 5. 对齐右基板 6. 对齐皮带辅轮 7. 直割刀 8. 对齐皮带主轮

仿生单圆盘切割装置工作过程主要包括茎叶聚紧拉齐及切茎两个阶段,其工作示意图如图 3 所示。工作时,由夹持输送装置将胡萝卜向上运输至对顶拉齐区,两对齐基板间距离仅允许胡萝卜茎叶通过,胡萝卜根茎无法通过,在夹持输送装置及斜拉式对

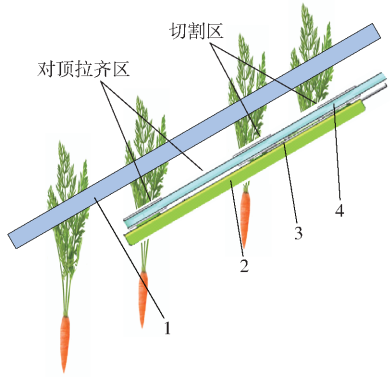


图 3 单圆盘对顶切割装置工作示意图

Fig. 3 Operating diagram of single disc to top cutting device

1. 夹持输送装置 2. 对齐基板 3. 单圆盘切割机构 4. 对齐皮带

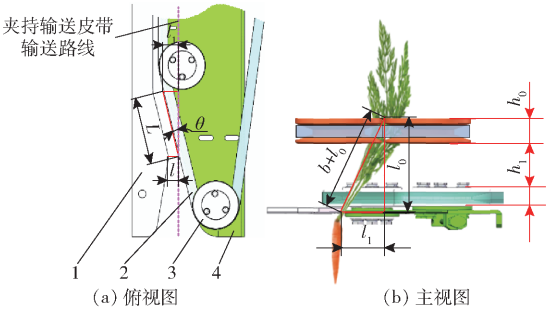
顶拉齐装置共同作用下将胡萝卜茎叶向斜上方聚紧拉齐至胡萝卜茎果结合部。圆盘割刀在割刀齿轮轴的带动下旋转，与直割刀形成切割区，由夹持输送装置将拉齐后的胡萝卜运输至切割区，经两割刀配合作用完成胡萝卜茎果分离过程。

3　关键部件设计

3.1　斜拉式导向齐平对顶机构

斜拉式导向齐平对顶机构是单圆盘对顶切割装置的关键部件之一，是胡萝卜茎果分离的首要步骤，其作用是将胡萝卜拉齐至茎果结合部，从而保证后续切割位置一致，对顶效果直接影响切割后胡萝卜的根茎损伤率和茎叶切净率[14-16]。本文设计了一种斜拉式导向齐平对顶机构，采用茎叶斜向拉齐及强制导向原理，满足胡萝卜有效排序喂入条件，提高了对胡萝卜茎叶的对齐效果。

如图 4a 所示，导向齐平对顶机构由对齐左基板、对齐右基板、对齐皮带和对齐皮带轮组成。在两对齐基板和夹持输送皮带配合作用下拉齐胡萝卜茎叶，与此同时对齐皮带将胡萝卜茎叶聚集束紧。其结构参数主要包括两对齐基板最小间距 l、拉齐区长度 L、右对齐基板斜边角度 θ 和对齐基板与夹持输送皮带距离 l_0。



(a) 俯视图　　(b) 主视图

图 4　斜拉式导向齐平对顶机构结构简图

Fig. 4　Cable-stayed guide flush flat structure diagrams

1. 对齐左基板　2. 对齐皮带　3. 对齐皮带轮　4. 对齐右基板

如图 4b 所示，导向齐平对顶机构结构参数主要与所夹持的胡萝卜物理参数有关，两对齐基板间距过大，切割时易损伤根茎，间距过小，胡萝卜无法顺利运输至切割区[17-18]，其设计应满足 $l > d$。根据胡萝卜物理特性可知，胡萝卜茎果结合部直径 d 为 9.04 ~ 14.21 mm。设计两对齐基板最小间距 l = 15 mm。为保证胡萝卜茎叶逐渐聚紧进入拉齐区，同时减少拐角处胡萝卜碰撞损伤，设计拉齐倾斜角即对齐右基板斜边角度 $\theta = 15°$。

胡萝卜茎叶被上拉长度和拉齐区长度是影响拉齐效果的主要因素，在胡萝卜输送速度一定条件下，茎叶被上拉长度增加，则拉齐区长度增加，茎叶与对齐基板间摩擦时间增大，切割后胡萝卜平整度降低。为保证胡萝卜茎叶拉齐效果，建立胡萝卜茎叶被上拉长度和拉齐区长度数学模型

$$(b + l_0)^2 = l_0^2 + l_1^2 \tag{1}$$

其中

$$l_1 = L\sin\theta \tag{2}$$

将式(1)和式(2)合并得

$$b = \sqrt{l_0^2 + (L\sin\theta)^2} - l_0 \tag{3}$$

式中　l_1——夹持输送皮带至对齐右基板外边缘投影距离，mm

b——胡萝卜茎叶被上拉长度，mm

如图 4b 所示，对齐基板与夹持输送皮带距离 l_0 与对齐皮带轮高度 h_0、夹持输送皮带导向轮高度 h_1 有关，其设计应满足 $l_0 > h_0 + h_1$，本设计选用对齐皮带为 B 型皮带，选型配套 B 型皮带轮高度 h_0 = 30 mm；夹持输送皮带选用双联 SPB 型皮带，选型配套 SPB 型皮带轮高度 h_1 = 65 mm，设计 l_0 = 110 mm。因此将式(3)进一步简化得

$$b = \sqrt{12\,100 + 0.067L^2} - 110 \tag{4}$$

前期拔取过程中胡萝卜茎叶夹持高度范围为 0 ~ 150 mm，因 l_0 = 110 mm，故拔取时夹持高度范围为 110 ~ 150 mm，切割后胡萝卜茎叶剩余长度 0 ~ 30 mm合格，胡萝卜茎叶被上拉长度范围为 0 ~ 40 mm，为保证所有胡萝卜切割后剩余茎叶长度达标且耗材最少，设计胡萝卜茎叶被上拉长度 b = 10 mm，则拉齐区长度 L = 185 mm。

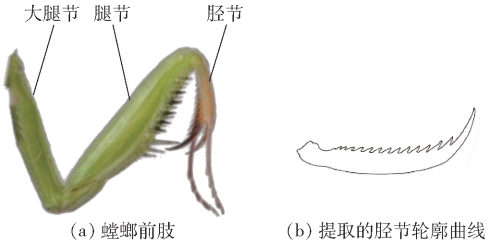
3.2　仿生动、定刀片设计

割刀是仿生单圆盘对顶切割装置的核心工作部件，其决定切割后胡萝卜根茎损伤率、茎叶切净率和茎叶切口是否平整。锯齿式切割器钳住茎秆能力强，切割质量好，同一速度条件下比较砍切和滑切，锯切方式切割阻力最低，刃口锯齿能够轻易锯开茎叶表皮，逐步切断茎叶[19-20]。螳螂作为昆虫界最优秀的捕食者，其足上尖锐的锯齿状倒刺可协助其迅速捕食切割体积大于其数倍的猎物[21-22]，该锯齿结构形状对胡萝卜割刀设计有重要指导意义。

3.2.1　仿生螳螂切割曲线提取

根据仿生学理论，以螳螂前肢为原型，通过提取螳螂胫节外轮廓曲线，将锯齿状曲线应用于动、定割刀刃上，以期达到割刀高效切割效果。将螳螂前肢样品置于体式显微镜下观察，所得轮廓结构如图 5a 所示。对图 5a 前肢胫节使用 Matlab 软件中高斯滤波函数命令消除原始图像噪声，其次采用 Sobel 算法对图像进行边缘检测，使用非极大值抑制函数命令抑制除去最大值之外所有梯度值，最后使用滞后阈值处理命令设置上阈值 120、下阈值 100，完成螳

螂前肢胫节边缘提取,所得轮廓曲线清晰完整,如图 5b 所示,与原图对比基本一致。



(a) 螳螂前肢 (b) 提取的胫节轮廓曲线

图 5 螳螂前肢胫节轮廓曲线

Fig. 5 Outline curves of tibia of mantis forelimb

为保证割刀快速高效切割胡萝卜茎叶,选取螳螂前肢胫节切割齿中主切割齿进行曲线拟合优化,依据曲线连续性原则,将曲线按照 x 轴单调性分为曲线 1 和曲线 2,使用 Origin 软件分别对两条曲线进行三次项方程式拟合,拟合后曲线如图 6 所示,曲线 1 和曲线 2 的拟合方程为

$$y_1 = -0.623\,36x^3 + 2.447\,16x^2 - 2.628\,52x + 1.182\,55 \tag{5}$$

$$y_2 = 28.213\,02x^3 - 146.144\,2x^2 + 253.302\,17x - 146.431\,9 \tag{6}$$

拟合度分别为 0.996 4 和 0.992 7,拟合精度高,符合加工要求。

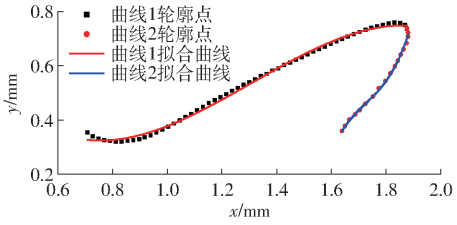


图 6 螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线

Fig. 6 Fit curves of tibia major cutting tooth of mantis forelimb

3.2.2 圆盘动割刀主要结构参数确定

将仿生拟合曲线应用至圆盘动割刀上,如图 7 所示。圆盘割刀的主要结构参数包括圆盘刀直径 D、齿数 z、齿深 h、刃角 α 等。

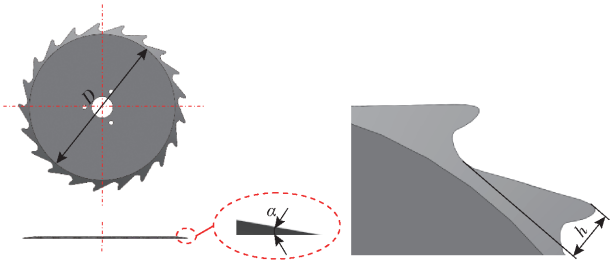


图 7 圆盘割刀结构参数示意图

Fig. 7 Structural diagram of parameters of disc cuter

为保证圆盘割刀齿均匀分布于刀盘边缘,避免设计产生半齿,建立圆盘割刀直径与圆盘割刀齿数数学模型

$$\pi D = jx_1 z \tag{7}$$

其中

$$j = \frac{h}{y_1} \tag{8}$$

式中 j——圆盘割刀螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线等比放大倍数

x_1——放大前螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线宽度,取 1.2 mm

y_1——放大前螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线高度,取 0.4 mm

为保证圆盘割刀齿顺利切割,齿高应大于等于胡萝卜茎果结合部直径,根据胡萝卜物理特性,其直径最大值为 14.21 mm,故 $h \geqslant 14.21$ mm,设计齿深 $h = 15$ mm。则螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线放大倍数 $j = 37.5$。式(7)整理得

$$D = \frac{45z}{\pi} \tag{9}$$

圆盘刀转速一定时,刀盘直径越大,同等时间内切割经过齿数越多,切割效果越好,根据圆盘刀安装位置最佳原则,设计圆盘刀直径 $D = 300$ mm,则圆盘刀齿数 $z = 21$。圆盘刀刃角越小,刃口越锋利,切割效果越好,但刃角过小会降低圆盘刀刚度,易发生爬刀现象,刃角最佳范围为 10°~15°[23-26],为保证圆盘刀切割质量设计圆盘刀刃角 $\alpha = 10°$。

3.2.3 圆盘割刀转速范围确定

为保证圆盘割刀顺利切割,胡萝卜茎叶经过切割区所用时间应大于圆盘割刀转过 1 齿所用时间,建立圆盘割刀转速与圆盘割刀齿数数学模型

$$\frac{1}{nz} \leqslant \frac{x_1 j}{v_c} \tag{10}$$

式中 n——圆盘割刀转速,r/min

v_c——夹持输送皮带线速度,m/s

由式(10)整理得 $n \geqslant \dfrac{4 \times 10^3 v_c}{63}$,为保证机器行进过程中顺利从土壤中夹持住胡萝卜,夹持输送带速度大于机器前进速度,即 $v_c > 0.7$ m/s,则圆盘刀转速 $n \geqslant 45$ r/min。

3.2.4 直割刀设计

将仿生拟合后曲线等比放大应用至直割刀刃口上,如图 8 所示。直割刀主要结构参数为直割刀齿深 H_1。直割刀刃长过短,胡萝卜茎叶无法全部喂入切割,易造成秧切不断和拥堵现象,为保证直割刀刃全部参与切割,直割刀齿深 H_1 应大于胡萝卜茎果结合部直径,同时为保证两割刀交错安装,避免漏切现象,直割刀齿深应大于圆盘割刀齿深,即 $H_1 > 15$ mm,设计 $H_1 = 17$ mm,则螳螂前肢胫节主切割齿拟合曲线放大倍数 $j_1 = 42.5$。

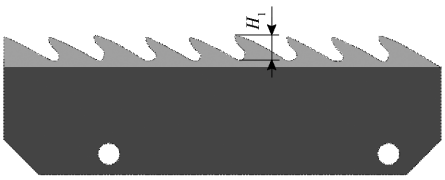


图 8　直割刀结构参数示意图

Fig. 8　Structural diagram of parameters of straight cuter

4　动、定割刀力学及运动学分析

4.1　力学分析

为验证仿生割刀满足胡萝卜被高效切断条件，将茎叶被切割平面简化为圆形，割刀切割过程中，茎叶受到夹持输送皮带拉力 T，垂直于两割刀刃口法向力 N_1 和 N_2，平行于两割刀刃口摩擦力 f_1 和 f_2，如图 9 所示。为保证胡萝卜茎叶进入切割区时被一次切断，茎叶不向外滑动，建立茎叶夹持力学模型

$$\begin{cases} T + f_1\cos\gamma + f_2\cos\varepsilon > N_1\sin\gamma + N_2\sin\varepsilon \\ N_1\cos\gamma + f_1\sin\gamma = N_2\cos\varepsilon + f_2\sin\varepsilon \\ f_1 = \mu N_1 \\ f_2 = \mu N_2 \end{cases} \tag{11}$$

式中　γ——圆盘动割刀切割角，(°)

ε——直割刀切割角，取 35°

μ 为胡萝卜茎叶与割刀摩擦因数，经试验测定为 0.3 ~ 0.6，茎秆切割阻力为 22 ~ 50 N，式(11)整理得

$$T > \frac{581(5\sin\gamma - 3\cos\gamma)}{10(5\cos\gamma + 3\sin\gamma)} + \frac{39}{10} \tag{12}$$

胡萝卜茎叶被拉断力 A 为 87 ~ 346 N，则夹持输送皮带拉力 T 应满足 $T < A$，则切割角 γ 应小于等于 87°，仿生圆盘动割刀切割角变化范围为 0° ~ 55°，满足切割角范围要求。

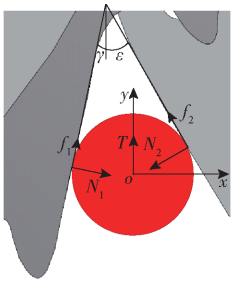


图 9　切割点受力分析图

Fig. 9　Force analysis diagram of cutting point

4.2　运动学分析

为验证仿生圆盘割刀切割效果优于现有胡萝卜联合收获机圆盘割刀，将圆盘割刀旋转中心设为坐标系原点，机器前进方向为 y 轴方向，x 轴水平垂直于机器前进方向，v_n 为圆盘割刀运动线速度，β 为圆盘割刀滑切角，如图 10 所示。滑切角与螳螂前肢胫节曲线锯齿角相同，即 $\beta = 55°$，滑切角越大，切割阻力越小，切割效果越好[27]，仿生圆盘割刀滑切角大于现有胡萝卜联合收获机圆盘割刀滑切角[28]，滑切效果更优。

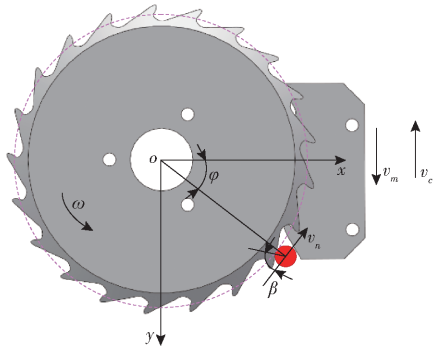


图 10　切割点运动示意图

Fig. 10　Diagram of cutting point movement

竖直方向合速度 v_y 是影响胡萝卜切割效果的主要因素，v_y 过大胡萝卜经切割区时间过短，刀具无法及时切割，切净率降低；v_y 过小胡萝卜茎叶与机具摩擦时间过长，切割平整度降低。对任一单根胡萝卜切割过程进行运动学分析，建立运动点数学模型

$$v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = v_m - \pi n D\cos\varphi\cos(\phi - 2\pi nt) - v_c\cos\varphi \tag{13}$$

式中　v_m——机器前进速度，取 0.7 m/s

φ——圆盘割刀与地面安装倾角，取 30°

ϕ——切割点初始角度，(°)

t——切割时间，s

由式(13)可知，圆盘割刀转速 n 和夹持输送皮带线速度 v_c 是影响竖直方向合速度 v_y 变化的主要因素，因此在本文试验阶段选取圆盘割刀转速和夹持输送皮带线速度为试验因素，进行正交旋转组合试验，得出最佳工作组合参数。鉴于夹持输送皮带线速度测定难度大、准确率低，为提高试验可操作性及准确性，本研究选取夹持输送皮带轮转速为试验因素。

5　试验与结果分析

5.1　试验条件

为确定单圆盘对顶切割装置最佳工作组合参数，于 2019 年 10 月 3 日在东北农业大学农具实验室进行了台架试验(图 11)。试验品种选择红参 7 寸，胡萝卜物理特性见上文。试验时由电机为夹持输送装置提供动力，将胡萝卜向上运输至单圆盘对顶切割装置，装置固定在胡萝卜夹持输送装置下方，圆盘割刀齿轮轴带动圆盘割刀旋转，完成胡萝卜的茎叶切割过程。

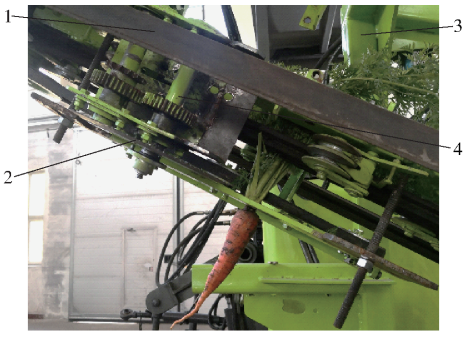


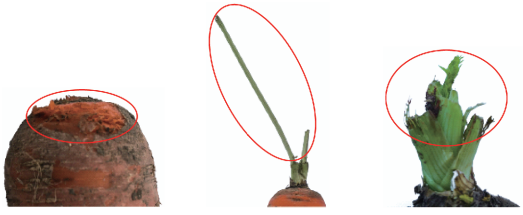
图 11 胡萝卜对顶切割试验装置

Fig. 11 Test device for carrot top cutting

1. 夹持输送皮带 2. 仿生单圆盘对顶切割装置 3. 机架 4. 圆盘割刀齿轮轴

5.2 试验因素与指标选取

由理论分析可知,夹持输送皮带线速度和圆盘割刀转速是影响胡萝卜切割质量主要因素,为减小试验误差,选取夹持输送皮带轮转速与圆盘割刀转速为试验因素。胡萝卜根茎是否损坏、茎叶切口是否规整是决定胡萝卜经济价值的主要因素。由田间调查可知,切割后剩余胡萝卜茎叶长度大于 3 cm 会导致胡萝卜腐烂速度加快,不利于胡萝卜储存。故选取胡萝卜根茎损伤率 y_1、茎叶切净率 y_2、切割平整度 y_3为评价指标。如图 12a 所示,胡萝卜茎果结合部处表皮脱落、果肉组织有破损均为损伤;如图 12b 所示,切割后胡萝卜茎叶剩余长度大于 3 cm 即为切不净;如图 12c 所示,扣除切不净茎叶后,切割平面凹凸不平即为切割不平整。



(a) 损伤 (b) 切不净 (c) 切割不平整

图 12 胡萝卜切割不合格示意图

Fig. 12 Diagrams of unqualified carrot cutting

5.3 试验内容与方法

分别对夹持输送皮带轮转速和圆盘割刀转速进行单因素预试验,皮带轮转速范围 60 ~ 144 r/min,圆盘割刀转速范围 105 ~ 165 r/min。在此基础上,采用二因素五水平二次旋转组合设计试验以确定仿生单圆盘对顶切割装置最佳组合参数,试验因素编码如表 1 所示。试验时选取同一时期于同一试验田种植生长,经人工筛选大小一致胡萝卜为试验样本,将胡萝卜 30 根为一组,每个试验方案重复 3 次,试验方案与结果如表 2 所示。

5.4 试验结果与分析

试验参数设计值与实际值误差小于 1.2%,可近似以夹持输送皮带轮转速和圆盘割刀转速的设计值对结果进行分析。通过 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行回归分析和因素方差分析,筛选出较为显著因素,进而得出性能指标与因素编码值间的回归方程

$$y_1 = 2.21 - 2.27X_1 - 2.09X_2 - 0.69X_1X_2 + 1.58X_1^2 + 1.09X_2^2 \quad (14)$$

$$y_2 = 94.21 - 1.68X_1 + 0.70X_2 + 0.34X_1X_2 - 0.31X_1^2 + 0.13X_2^2 \quad (15)$$

$$y_3 = 81.75 + 7.90X_1 + 11.39X_2 + 8.63X_1X_2 - 9.92X_1^2 - 4.82X_2^2 \quad (16)$$

式中 X_1——夹持输送皮带轮转速编码值

X_2——圆盘割刀转速编码值

为更直观分析试验指标与因素间关系,运用 Design-Expert 8.0.6 软件得到响应曲面,如图 13 所示。根据上述回归方程和响应曲面图可知,对顶切割装置圆盘割刀转速与夹持输送皮带轮转速存在交互作用。由图 13a 可知,圆盘割刀转速一定,根茎损

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of experimental factors

编码	因素	
	夹持输送皮带轮转速 x_1/(r·min^{-1})	圆盘割刀转速 x_2/(r·min^{-1})
-1.414	60	105
-1	72	114
0	102	135
1	132	156
1.414	144	165

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test schemes and results

序号	试验因素		性能指标		
	x_1/(r·min^{-1})	x_2/(r·min^{-1})	y_1/%	y_2/%	y_3/%
1	72	114	8.83	95.49	55.12
2	132	114	5.61	91.17	55.33
3	72	156	6.32	96.08	55.31
4	132	156	0.34	93.12	90.06
5	60	135	8.15	95.85	54.97
6	144	135	1.82	91.48	74.92
7	102	105	7.16	93.46	55.28
8	102	165	0.83	95.63	95.01
9	102	135	2.43	94.29	85.13
10	102	135	2.14	94.18	84.82
11	102	135	2.51	94.28	84.99
12	102	135	2.22	94.21	79.79
13	102	135	2.31	94.29	74.81
14	102	135	2.14	93.95	79.68
15	102	135	2.01	94.38	84.96
16	102	135	1.93	94.07	79.81

伤率随输送皮带轮转速升高逐渐降低；输送皮带轮转速一定，根茎损伤率随割刀转速升高逐渐降低；在对齐切割过程中造成胡萝卜根茎损伤主要原因为根茎与对齐切割装置的碰撞，胡萝卜被输送及切割时间越短，其与装置碰撞时间越短，根茎损伤率越小。由图 13b 可知，圆盘割刀转速一定，切净率随输送皮带轮转速升高逐渐降低；输送皮带轮转速一定，切净率随割刀转速升高逐渐升高；输送皮带轮转速升高，导致胡萝卜喂入速度升高，在圆盘割刀转速不变条件下，当胡萝卜喂入速度与割刀切割速度比过大时，部分胡萝卜茎叶未被割刀及时切割即被带离切割区，切净率降低；输送皮带轮转速不变，割刀转速升高，胡萝卜茎叶经切割区时被割刀齿切割次数增多，降低部分胡萝卜茎叶未被切割即因自身重力被拉断概率，切净率升高。由图 13c 可知，圆盘割刀转速一定，平整度随输送皮带轮转速升高先增大后减小；输送皮带轮转速一定，平整度随割刀转速升高逐渐增大；输送皮带轮转速过低，拉齐时胡萝卜茎叶与切割装置作用时间长，外围胡萝卜茎叶未进入切割区即被磨损，茎叶被切割后切面平整度低；输送皮带轮转速过高，胡萝卜喂入速度与圆盘割刀转速比过大，致使部分胡萝卜茎叶经过切割区时未经割刀及时切割便被拉断，降低切割平整度；输送皮带轮转速不变，割刀转速升高，胡萝卜茎叶与刀具作用时间降低，减少胡萝卜茎叶未被切割即受其重力被拉断现象，切割平整度上升。

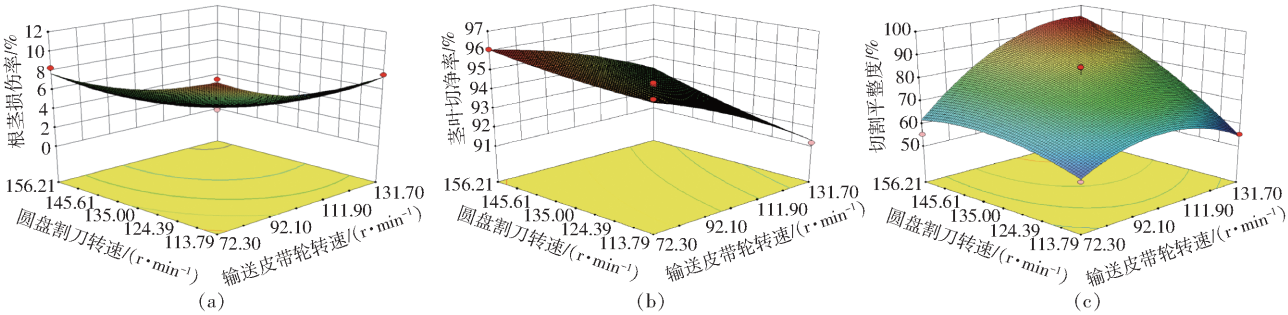


图 13　各因素对试验指标的响应曲面

Fig. 13　Response surfaces of all factors on seeding qualified index

5.5　试验优化与验证

为得到试验因素最佳水平组合，对试验因素进行优化设计。建立参数化数学模型，结合试验因素的边界条件，对胡萝卜根茎损伤率、茎叶切净率、切割平整度的回归方程进行分析，得到其非线性规划的数学模型

$$\begin{cases}\min\ y_1\\ \max\ y_2\\ \max\ y_3\\ \text{s.t.}\begin{cases}60\ \text{r/min}\leqslant x_1\leqslant 144\ \text{r/min}\\ 105\ \text{r/min}\leqslant x_2\leqslant 165\ \text{r/min}\\ 0<y_1(x_1,x_2)\leqslant 100\%\\ 0<y_2(x_1,x_2)\leqslant 100\%\\ 0<y_3(x_1,x_2)\leqslant 100\%\end{cases}\end{cases}\tag{17}$$

选用 Design-Expert 8.0.6 软件优化模块完成各评价指标的参数优化，当胡萝卜夹持输送皮带轮转速为 112.58 r/min，圆盘割刀转速为 156.21 r/min 时，对顶切割装置性能最优，其损伤率为 0.36%、切净率为 94.53%、平整度为 92.86%。考虑到试验的可操作性，将优化的试验条件调整为：输送皮带轮转速 113 r/min，圆盘割刀转速为 156 r/min。试验重复 3 次取平均值，根茎损伤率为 0.53%、切净率为 95.41%、平整度为 94.10%，与预测值基本一致，试验时少量胡萝卜在拉齐后与割刀盘存在夹角，但切割后产生的误差在可接受范围内。

5.6　田间性能试验

5.6.1　试验条件及方法

为检验所设计的单圆盘对顶切割装置的作业性能，结合台架试验优化结果，于 2019 年 10 月 5 日在黑龙江省哈尔滨市庆丰村进行田间性能试验，胡萝卜品种为红参 7 寸，种植垄距为 680 mm，行距为 12 mm，株距为 10 ~ 12 mm。经检测，收获时气温为 18℃，土壤类型为黑壤土，试验现场如图 14 所示。



图 14　田间性能试验

Fig. 14　Field performance test

机器行进速度设定为 0.7 m/s，输送带皮带轮转速 113 r/min，圆盘割刀转速 156 r/min，每次试验收获距离 30 m（前、后准备调试区各 10 m，测试区 10 m），重复 10 次，分别记录每次试验收获胡萝卜总株数，切割后胡萝卜损伤数、切净数和切面平整数，

将试验数据记录后计算平均值。

5.6.2 田间试验结果

根据试验数据计算获得对顶切割装置田间试验结果为:损伤率 0.61%、茎叶切净率 94.93%、切割平整度 92.91%。

田间试验结果表明,同一工况条件下田间试验作业质量略低于台架试验。由于田间作业时受地况影响致使胡萝卜在夹持运输及切割过程中产生不规则运动,降低装置对齐切割效果,但误差在可接受范围内,整体装置工作效果较好。

6 结论

(1)设计了胡萝卜联合收获机对顶切割装置,可实现高效切割作业,切割后满足胡萝卜切割平整度和茎叶切净率高、损伤率低的要求,减小了收获后的经济损失。

(2)以胡萝卜基本物理特性为基础,通过理论计算设计了斜拉式对顶拉齐机构,实现了胡萝卜茎叶的精准拉齐,应用 Matlab 软件提取优化了螳螂前肢胫节曲线,并将其应用至切割装置圆盘动割刀及直割刀刃口上,确定了圆盘刀及直割刀的关键结构参数,通过力学分析验证了切割装置满足胡萝卜被精准切断的条件,通过运动学分析确定试验因素为圆盘割刀转速和夹持输送皮带轮转速。

(3)采用二次正交旋转组合设计试验,建立了胡萝卜切割指标与试验因素间的数学模型,通过响应曲面图得出试验因素与切割指标影响趋势和交互关系。运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,对回归数学模型进行多因素优化,并根据优化结果进行田间及台架试验验证,得出最优参数组合为胡萝卜夹持输送皮带轮转速 113 r/min、圆盘割刀转速 156 r/min,此时对顶切割装置性能最优,其损伤率为 0.53%、切净率为 95.41%、平整度为 94.10%,田间试验结果与优化结果基本一致,能够满足胡萝卜机械化联合收获农艺要求。

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/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):81-87.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140214&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.014. (in Chinese)

[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.
HAN Xia, CHEN Haitao, DUN Guoqiang, et al. Analysis on situation of carrot mechanized harvesting technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 259-263. (in Chinese)

[3] 韩凤,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):36-41.
HAN Feng, CHEN Haitao, REN Keke, et al. Study on physical and mechanical properties of the carrot in north[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(5): 36-41. (in Chinese)

[4] 李凯锋,杨炳南,杨薇,等. 国内外胡萝卜种植现状及播种机研究进展[J]. 农业工程,2015,5(1):1-5.
LI Kaifeng, YANG Bingnan, YANG Wei, et al. Planting status and research progress on seeding machine of carrot at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(1): 1-5. (in Chinese)

[5] 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.
SHEN Liang, YANG Hua, AN Hongyu, et al. Design of carrot harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 71-76. (in Chinese)

[6] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):119-126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160717&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)

[7] 杨薇,李建东,高波,等. 胡萝卜种植与收获机械化现状与思考[J]. 农机化研究,2014,36(12):247-252.
YANG Wei, LI Jiandong, GAO Bo, et al. Research status and thinking of the mechanization of planting and harvesting carrot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(12): 247-252. (in Chinese)

[8] 李承鹏. 基于 EDEM 的胡萝卜拔取力的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
LI Chengpeng. Study on the extraction force of carrot based on EDEM[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[9] HACHIYA M, AMANO T, YAMAGATA M, et al. Development and utilization of a new mechanized cabbage harvesting system for large fields[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2004, 38(2):300-304.

[10] ABDEI-GANY M, EI-SAHHAR E A, MOSTAFA M M, et al. A developed machine to harvest carrot crop[J]. Misr. J. Ag. Eng., 2008, 25(4): 1163-1173.

[11] KOWALCZUK J, LESZCZYNSKI N, ZARAJCZYK J. The influence of a Simon harvester's operational parameters on the quality of carrot roots harvesting[J]. Inzynieria Rolnicza, 2001, 13(33): 218-222.

[12] 金鑫,杜新武,王世光,等. 胡萝卜收获机根茎分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(3):82-89.
JIN Xin, DU Xinwu, WANG Shiguang, et al. Design and experiment of stems cutting device for carrot harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 82-89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/

reader/view_ abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20160312&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 03. 012. (in Chinese)
[13] 曾功俊,陈建能,夏旭东,等. 胡萝卜缨果拉拽式分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):73 - 79.
ZENG Gongjun, CHEN Jianneng, XIA Xudong, et al. Design and experiment on pull tye of tassel fruit separation for carrot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 73 - 79. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20181009&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 10. 009. (in Chinese)
[14] 鹿光耀,尚书旗,王东伟,等. 胡萝卜联合收获机对顶部件的研究[J]. 农机化研究,2016,38(2):119 - 122,127.
LU Guangyao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Study on lacy components of carrot harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 119 - 122, 127. (in Chinese)
[15] 杨薇,李建东,杨宏伟,等. 胡萝卜联合收获机拉齐切割装置设计与试验[J]. 农业工程,2015,5(3):85 - 88.
YANG Wei, LI Jiandong, YANG Hongwei, et al. Design and experiment of uniformity cutting device of carrot harvester[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(3): 85 - 88. (in Chinese)
[16] MAKSIMOV L M, MAKSIMOV P L, MYAKISHEV A A. The separating device of a carrot harvesting combine[J]. Traktory I Selskokhozyaĭstvennye Mashiny, 2000(12): 12 - 13.
[17] 张宗玲,韩增德,刘立晶,等. 玉米穗茎兼收割台夹持输送装置参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):114 - 121.
ZHANG Zongling, HAN Zengde, LIU Lijing, et al. Parameters optimization for gripping and delivering device of corn harvester for reaping both corn stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 114 - 121. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20180313&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 013. (in Chinese)
[18] LESZCZYNSKI N. The influence of working parameters of a carrot harvester on carrot root damage [J]. Maintenance and Reliability, 2011(1): 35 - 41.
[19] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):221 - 226.
DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 221 - 226. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 2018s029&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 029. (in Chinese)
[20] 邱述金,郭玉明,郑德聪. 柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):72 - 79.
QIU Shujin, GUO Yuming, ZHENG Decong. Dynamic simulation of disc saw cutter system of caragana korshinskii harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 72 - 79. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20140812&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 08. 012. (in Chinese)
[21] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):103 - 114.
JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103 - 114. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20181012&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 10. 012. (in Chinese)
[22] 林静,张桐嘉,田阳,等. 秸秆深埋还田仿生开沟装置优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):50 - 59,67.
LIN Jing, ZHANG Tongjia, TIAN Yang, et al. Optimization and experiment on bionic deep-buried device for returning straw in field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 50 - 59,67. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 2018s008&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 008. (in Chinese)
[23] 张士强,李自芹,刘晓雯. 金属锯片齿型参数优化[J]. 机械设计与制造,2012(11): 192 - 194.
ZHANG Shiqiang, LI Ziqin, LIU Xiaowen. Optimization of the tooth profile parameters of metal saw[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(11): 192 - 194. (in Chinese)
[24] 杨海,周海波,冯小川,等. 锯齿形双圆盘切割器切割原理分析与仿真[J]. 农机化研究,2011,33(9): 23 - 26.
YANG Hai, ZHOU Haibo, FENG Xiaochuan, et al. Cutting principle analysis and simulation of hackle dual-disc cutter bar[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(9): 23 - 26. (in Chinese)
[25] 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(18):47 - 54.
ZHU Ruixiang, LI Chengxin, CHENG Yang, et al. Working performance of passive disc coulter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 47 - 54. (in Chinese)
[26] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社,1988.
[27] 侯守印,陈海涛,邹震,等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 41 - 51,217.
HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41 - 51,217. http://www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? file_no = 20190605&flag = 1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 06. 005. (in Chinese)
[28] 李凯锋. 自走式胡萝卜联合收获机关键技术的研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2015.
LI Kaifeng. Research on the key techniques of self-propelled carrots combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)