

# 基于虾夷扇贝体表结构的玉米茬根捡拾器仿生设计

陈东辉<sup>1,2</sup>, 刘伟<sup>1,2</sup>, 吕建华<sup>1,2</sup>, 常志勇<sup>1,2</sup>, 吴婷<sup>1,2</sup>, 慕海锋<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

**摘要:**针对收获过程中玉米根茬捡拾的难题,设计了一种新型的仿生玉米根茬捡拾器。通过开展捡拾器捡拾过程的运动学分析以及玉米根茬的运动学分析,对捡拾齿的几何结构做了优化设计。以虾夷扇贝体表棱纹轮廓为仿生原型,通过逆向工程技术,对虾夷扇贝体表轮廓进行拟合,得到其拟合函数。以正弦函数数学模型  $y = 1.5\sin(\pi x/4)$  为棱纹轮廓对捡拾器的工作曲面进行棱纹型仿生几何结构设计,其中,  $x$  的取值范围为  $[0, 4]$ 。利用有限元分析软件 ANSYS 分析捡拾齿与玉米根茬之间不同的摩擦因数和不同的捡拾位置对捡拾效果的影响。结果表明:捡拾齿工作面表面的仿生棱纹几何结构有利于增大捡拾器与玉米根茬之间的摩擦因数,从而促进玉米根茬的捡拾;在捡拾过程中,捡拾位置越低,越有利于玉米根茬的捡拾。

**关键词:**工程仿生学;捡拾器;运动学分析;结构优化;虾夷扇贝;仿生设计;有限元分析

**中图分类号:** TH122, S225.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2017)04-1185-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201704025

## Bionic design of corn stubble collector based on surface structure of *Patinopecten yessoensis*

CHEN Dong-hui<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, LYU Jian-hua<sup>1,2</sup>, CHANG Zhi-yong<sup>1,2</sup>, WU Ting<sup>1,2</sup>, MU Hai-feng<sup>1,2</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In corn stubble harvesting, in order to solve the difficulty of corn stubble picking-up, a new corn stubble collector was designed. First, the kinematics of the stubble picking-up process was carried out. Then, the picking-up finger was designed. Further, reverse engineering method was employed to examine the contour of the surface of *Patinopecten yessoensis* as a bionic model. The cloud points of the contour to the ridges on the surface were fitted. The bionic ribbed surface of the picking-up finger was designed with a sinusoidal function  $y = 1.5 \cdot \sin(\pi x/4)$  to present the ribbed contour, where  $x$  ranges from 0 to 4. For three different bionic corn stubble collectors, finite element software ANSYS was used to investigate the effects of friction coefficient between the picking-up finger and corn stubble, and the picking-up location on the performance of the collectors. Results

**收稿日期:** 2016-08-24.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFD0701102); 中国博士后科学基金项目(2015M571367); 吉林省科技发展计划项目(20150520075JH); 吉林省省级产业创新专项项目(2016C029); 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(吉教科合字[2016]442号).

**作者简介:** 陈东辉(1961-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 农业机械化工程与表面摩擦学. E-mail: dhchen@jlu.edu.cn

**通信作者:** 常志勇(1980-), 男, 在站博士后, 高级工程师. 研究方向: 农业机械化工程. E-mail: zychang@jlu.edu.cn

show that the bionic ribbed surface of the picking-up finger contributes to the increase of the friction between the finger and the corn stubble, which enhances the corn stubble picking-up effect. Lower picking-up position benefits the corn stubble picking-up process.

**Key words:** bionic engineering; corn stubble collector; kinematic analysis; structure optimization; *Patinopecten yessoensis*; bionic design; finite element analysis

## 0 引言

玉米根茬收获是近年来逐渐兴起的一种根茬处理方式,该方式可有效处理玉米根茬以保证后续工作的正常进行,更能带来一定的经济效益、社会效益和环境效益<sup>[1,2]</sup>。捡拾装置作为根茬收获机械的关键部件,其性能的优劣将直接影响根茬收获机械的作业性能<sup>[3]</sup>。

目前,国外尚未有关于玉米根茬收获机具和玉米根茬捡拾装置的研究报道。吉林大学权龙哲等<sup>[4]</sup>研制的玉米根茬收获系统,其捡拾作业由起茬铲切断须根系并将根土复合体一同铲起向后输送完成。华南农业大学陈学深等<sup>[5]</sup>研制的玉米根茬挖掘机采用根茬捡拾板完成根茬的捡拾。上述捡拾装置具有结构简单,挖掘、捡拾同时完成的优点。佳木斯大学于泳红<sup>[6]</sup>研制的玉米根茬起铺机,其捡拾作业由捡拾轮齿正向旋转捡拾玉米根茬,辅助捡拾轮逆向旋转辅助捡拾玉米根茬的方式完成。这种捡拾方式避免了对土壤的附加捡拾,提高了捡拾功率,但结构稍显复杂。目前的研究中捡拾效果、捡拾功耗等还没有达到令人满意的效果。因此,针对现有捡拾装置存在的问题,参照与玉米根茬结构特征相类似的地下作物(如薯类作物<sup>[7]</sup>、甜菜<sup>[8-10]</sup>等)采收装备的捡拾方式以及现有玉米根茬捡拾装置的捡拾方式<sup>[11]</sup>,从研究捡拾过程的运动特点入手,通过对捡拾齿捡拾过程及玉米根茬的运动学分析,建立了常用捡拾部件的捡拾理论,完成了玉米根茬捡拾齿捡拾曲线的设计,进一步设计了一种新型的玉米根茬捡拾器。

在根茬收获前,采用秸秆回收但保留根茬的作业方式,在根茬收获时,采用挖掘铲将根茬铲出,铲出后根茬以茬口在上、根部在下分布于地表<sup>[12]</sup>。在捡拾过程中,玉米根茬根土复合体的复杂结构<sup>[13]</sup>使玉米根茬在捡拾的过程中容易脱落而造成捡拾失败,且由于田间环境复杂,捡拾齿在捡拾过程中将会与土壤中的坚硬石块和玉米根土复合体接触并相互摩擦,容易造成捡拾齿工作面磨损而影响捡拾效果<sup>[14]</sup>。通过对贝类的生存环

境和表观形貌进行分析可知:其体表的棱纹几何结构不仅能增大其与海底泥沙的摩擦因数而增加附着能力,还能将其与泥沙间的滑动摩擦变为滚动摩擦,从而具有良好的耐磨损性能。

为了进一步改善捡拾齿的捡拾效果,并提高其附着性、耐磨性,本文以仿生学为手段,以虾夷扇贝为仿生原型,对捡拾齿的工作曲面进行了仿生设计。并利用有限元方法研究了捡拾齿与玉米根茬之间不同的摩擦因数和不同的捡拾位置对捡拾效果的影响。

## 1 玉米根茬捡拾器的设计

玉米根茬收获机捡拾器如图 1 所示,主要由捡拾器中心轴、捡拾齿盘、捡拾齿、定位套筒等组成。其中中心轴与捡拾齿盘 2 固定连接,中心轴向等间距安装捡拾齿盘共 17 个;每个捡拾齿盘有 4 组螺栓孔,每组两个,通过螺栓连接一把捡拾齿;捡拾齿与捡拾齿盘通过螺栓固定连接,每个捡拾齿盘上安装 4 把捡拾齿,并在捡拾齿盘周向上均匀交错分布;捡拾器安装在玉米根茬捡拾器的机架前方。安装捡拾齿盘个数为 17 个,齿盘间距为 80 mm。

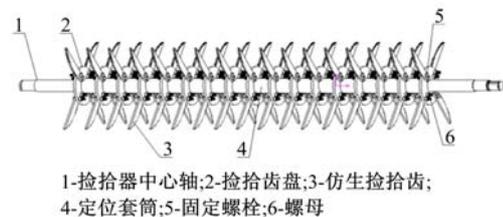


图 1 玉米根茬收获机捡拾器装配图

Fig. 1 Assembly drawing of corn stubble harvester's pickup device

### 1.1 捡拾器捡拾过程的运动学分析

#### 1.1.1 捡拾齿的运动学分析

玉米根茬收获机工作时,捡拾器绕主轴旋转的同时随着整机向前水平运动。因此,捡拾器捡拾齿的绝对运动是整机的水平运动与捡拾齿的旋转运动的合成。以捡拾器的旋转中心  $O$  为原点建立平面直角坐标系,  $X$  轴正方向与整机的前进

方向一致, Y 轴正方向竖直向下, 如图 2 所示。设整机的前进速度为  $v_m$ , 捡拾器的旋转速度为  $\omega$ , 则捡拾齿上任一端点  $P(x, y)$  的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos \omega t \\ y = R \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R$  为捡拾器半径;  $t$  为时间。

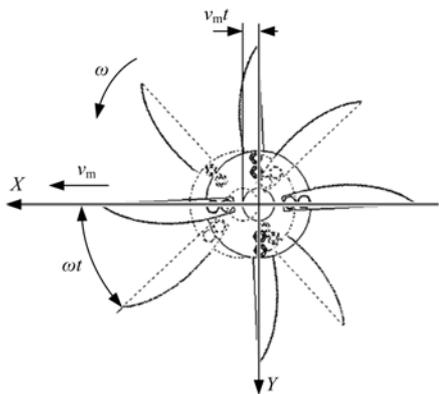


图 2 捡拾齿端点运动轨迹

Fig. 2 Motion curve of pickup finger's end

将式(1)对时间  $t$  求一阶导数可得捡拾齿端点  $P(x, y)$  在 X 轴和 Y 轴方向的速度方程:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_m - R\omega \sin \omega t \\ v_y = \frac{dy}{dt} = R\omega \cos \omega t \end{cases} \quad (2)$$

设  $v_p = R\omega$  为捡拾齿端点的线速度, 且令速度比  $\lambda = v_p/v_m = R\omega/v_m$ , 则捡拾齿端点在 x 轴上的分速度为:

$$v_x = v_m - R\omega \sin \omega t = v_m(1 - \lambda \sin t) \quad (3)$$

若  $\lambda > 1$ , 即  $v_p > v_m$  时, 捡拾齿端点的线速度大于整机的前进速度。当捡拾齿端点运动在一个确定的区间内时, 则  $1 - \sin \omega t < 0$ , 即  $v_x < 0$ 。此时, 捡拾齿端点的水平分速度方向与整机的前进方向相反, 捡拾齿端点的运动轨迹为余摆线, 能将玉米根茬捡拾起来向后输送。

若  $\lambda \leq 1$ , 即  $v_p \leq v_m$  时, 捡拾齿端点的线速度小于整机的前进速度, 则无论捡拾齿端点的旋转角度为多少, 均有  $1 - \sin \omega t \geq 0$ , 即  $v_x \geq 0$ 。此时, 捡拾齿端点的水平分速度方向始终与整机的前进方向相同, 无法将玉米根茬捡拾起来向后抛送。

由上所述可知, 为使旋转的捡拾器捡拾齿能将玉米根茬顺利地捡拾起来并抛扔进入一级拨茬器, 则在整个捡拾过程中, 捡拾齿端点的水平分速度均需满足  $v_x < 0$ , 即  $1 - \sin \omega t < 0$ 。

### 1.1.2 玉米根茬的运动学分析

捡拾器作业时, 通过逆时针旋转将玉米根茬捡拾起来, 并在离心力和重力的作用下, 将玉米根茬抛扔至一级拨茬器, 从而完成玉米根茬的捡拾工作。若捡拾器的转速太小, 则无法捡拾玉米根茬, 或者玉米根茬可能会被捡拾器直接带回而造成二次捡拾, 降低工作效率; 若捡拾器的转速太大, 则会增加能耗。因此, 需对捡拾器能将玉米根茬顺利抛送进入一级拨茬器的条件进行分析, 以确定合适的捡拾器旋转速度范围。

以捡拾器中心 O 为原点建立平面直角坐标系, X 轴方向与整机的前进方向相同, Y 轴方向竖直向上, 如图 3 所示。设捡拾器半径为  $R$ , 一级拨茬器半径为  $r$ , 捡拾器中心与一级拨茬器中心的水平距离为  $l_x$ , 垂直距离为  $l_y$ , 捡拾器的转速为  $\omega$ 。

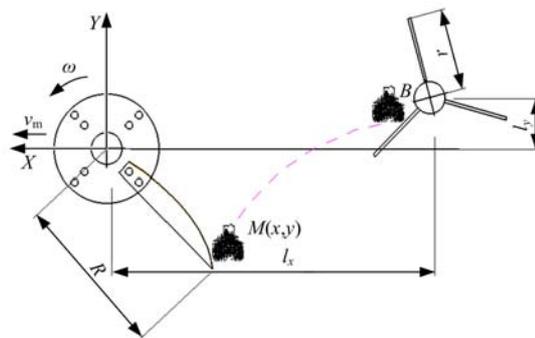


图 3 捡拾过程示意图

Fig. 3 Structural diagram of picking up progress

捡拾过程中玉米根茬由于重力及离心力的作用沿着捡拾齿曲线滑移至捡拾齿端点处被抛出, 则玉米根茬被抛出时的初始速度等于此时捡拾齿端点的速度, 即玉米根茬被抛出时的初始速度在 X 轴和 Y 轴上的分速度方程为:

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin \theta = v_m(1 - \lambda \sin \theta) \\ v_y = R\omega \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为速度比;  $\theta$  为玉米根茬被抛出时捡拾齿与 X 轴正方向的夹角。

通过对捡拾齿的运动学分析可知, 为使捡拾齿能将玉米根茬顺利地捡拾起来并抛扔进入一级拨茬器, 玉米根茬被抛出时的水平分速度需满足  $v_x < 0$ , 即  $1 - \sin \theta < 0$  的要求。设玉米根茬被抛出时的初始位置坐标为  $A(x_0, y_0)$ , 将玉米根茬看作质点  $M(x, y)$ , 则在忽略空气阻力的情况下, 玉米根茬的运动为斜抛运动, 即水平方向的匀速直线运动及竖直上抛运动的合成, 其运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t \\ y = y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t$  为玉米根茬抛出时间;  $g$  为重力加速度。

在确保玉米根茬顺利捡拾输送的前提下, 捡拾器的转速越小, 则其能耗越小, 因此需分析捡拾器能将玉米根茬顺利捡拾输送的最小转速。设捡拾器能将玉米根茬顺利捡拾并抛扔进入一级拨茬器的最小角速度为  $\omega_0$ , 此时玉米根茬的运动轨迹如图 3 所示。在保证玉米根茬顺利捡拾输送的前提下, 为使捡拾器的转速最小, 需令玉米根茬运动在能使一级拨茬器顺利向后输送根茬的拨指极限位置(即图 3 中所示 B 点) 时, 玉米根茬竖直方向的分速度为 0, 即玉米根茬斜抛至最高点。设此时一级拨茬器拨指与水平方向的夹角为  $\varphi$ , 玉米根茬被抛出时水平方向的分速度为  $v_{ax}$ , 竖直方向的分速度为  $v_{ay}$ , 则玉米根茬运动到 B 点所需时间为:

$$t = \frac{v_{ay}}{g} \quad (6)$$

设玉米根茬运动的水平位移为  $S$ , 垂直位移为  $H$ , 则可求得做斜抛运动的玉米根茬的位移如下:

$$\begin{cases} H = \frac{v_{ay}^2}{2g} \\ S = v_{ax} t_0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(4)(6)代入式(7)得:

$$\begin{cases} H = \frac{(R\omega_0 \cos\theta)^2}{2g} \\ S = \frac{R\omega_0 \cos\theta(v_m - R\omega_0 \sin\theta)}{g} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在整机前进速度及捡拾器半径确定的情况下, 捡拾器的最小角速度可根据玉米根茬抛出时捡拾齿与水平方向的夹角  $\theta$  和一级拨茬器拨指极限位置与水平方向的夹角  $\varphi$  求出。为了便于分析计算, 根据实验数据及参考农业机械设计手册<sup>[15]</sup>, 确定所设计的捡拾器的部分参数如表 1 所示。

表 1 部分基本参数

Table 1 Some basic parameters

参数	数值	是否可调
整机前进速度/(km · h <sup>-1</sup> )	3.6	否
捡拾器工作半径/mm	225	否
一级拨茬器工作半径/mm	225	否
捡拾拨指入土深度/mm	15	是

为了防止捡拾器与一级拨茬器在运动过程中

发生干涉, 本设计取捡拾器中心与一级拨茬器中心的水平距离  $l_x$  为 460 mm。取玉米根茬抛出时捡拾齿与水平方向的夹角  $\theta$  为 135°, 一级拨茬器拨指极限位置与水平方向的夹角  $\varphi$  为 45°, 根据各参数间的代数关系式有:

$$S = l_x - R\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) - r\cos\varphi = \frac{R\omega_0 \cos\theta(v_m - R\omega_0 \sin\theta)}{g} \quad (9)$$

代入已知参数化简可得:

$$0.025\omega_0^2 - 0.159\omega_0 - 1.39 = 0$$

通过计算可求得玉米根茬收获机捡拾器的最小角速度  $\omega_0$  为 11.304 rad/s。

将捡拾器的最小角速度  $\omega_0 = 11.304$  rad/s 代入式(3)可求得:

$$v_x = v_m(1 - \lambda\sin\theta) = -0.798 \text{ m/s} < 0 \quad (10)$$

因此, 玉米根茬被抛出时具有与整机前进方向相反的水平分速度, 此时速度  $\lambda = 2.5434 > 1$  捡拾器捡拾齿端点的运动轨迹为余摆线, 满足设计要求。

根据捡拾器角速度与转速的关系式可求得玉米根茬收获机捡拾器的最小转速为:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{11.304}{2\pi} = 1.8 \text{ rad/s} \quad (11)$$

即当玉米根茬收获机捡拾器的转速达到 108 r/min 时, 捡拾器就能将玉米根茬顺利捡拾起来并抛扔进入一级拨茬器, 从而完成捡拾工作。在本次设计中, 在保证玉米根茬捡拾率并尽量降低能耗的前提下, 考虑到后续工作的分析计算, 取捡拾器的转速为 150 r/min。

### 1.2 捡拾齿的曲线设计

设初始位置的捡拾器中心为坐标原点  $O_1$ , 以拖拉机的前进方向为  $X_1$  轴, 竖直向下的方向为  $Y_1$  轴, 建立定坐标系  $X_1O_1Y_1$ 。同时, 以捡拾器中心为坐标原点  $O$ , 建立动坐标系  $XOY$ , 把捡拾器固定于动坐标系  $XOY$  中, 如图 4 所示, 则捡拾器的实际运动可以看成是动坐标系  $XOY$  在定坐标系  $X_1O_1Y_1$  中既前进又旋转。

设整机的前进速度为  $v_m$ , 捡拾器的旋转角速度为  $\omega$ , 捡拾器捡拾齿上任意一点的极坐标为  $P(r, \varphi)$ , 则  $P$  点在定坐标系  $X_1O_1Y_1$  中的坐标方程为:

$$\begin{cases} x = v_m t + r\cos(\theta + \varphi) \\ y = r\sin(\theta + \varphi) \end{cases} \quad (12)$$

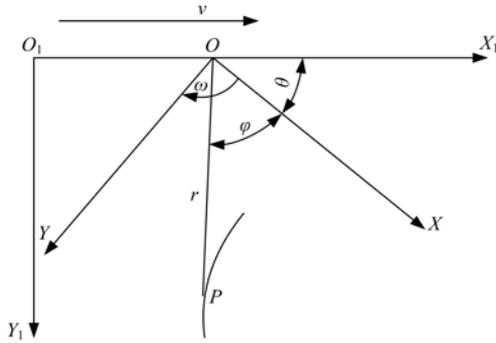


图 4 捡拾器在动坐标系与定坐标系中的位置

Fig. 4 Position of pickup device in moving coordinate system and fixed coordinate system

式中:  $t$  为时间;  $\theta$  为捡拾器在时间  $t$  内旋转的角度,  $\theta = \omega t$ 。则  $P$  点的速度方程为:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_m - r\omega \sin(\theta + \varphi) \\ v_y = \frac{dy}{dt} = r\omega \cos(\theta + \varphi) \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)带入式(13)中可得:

$$\begin{cases} v_x = v_m - \omega y \\ v_y = r\omega \cos(\theta + \varphi) \end{cases} \quad (14)$$

令  $v_x = 0, v_y = 0$ , 可解得:

$$y = \frac{v_m}{\omega}, \theta + \varphi = \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

因此,捡拾器捡拾齿的速度瞬心在回转中心铅垂线的正下方,距离  $O$  的距离为  $v_m/\omega$ , 捡拾齿的运动相当于绕速度瞬心做回转运动。

为简化分析,取  $O_1 X_1$  与  $OX$  重合时为捡拾齿曲线的解析位置,并过此时的速度瞬心  $O_2$  建立极坐标系,如图 5 所示,则此时捡拾齿的运动相当于绕速度瞬心  $O_2$  做回转运动。设捡拾齿上任意一点的极坐标为  $P(r, \varphi)$ ,  $P$  点速度方向与法线方向的

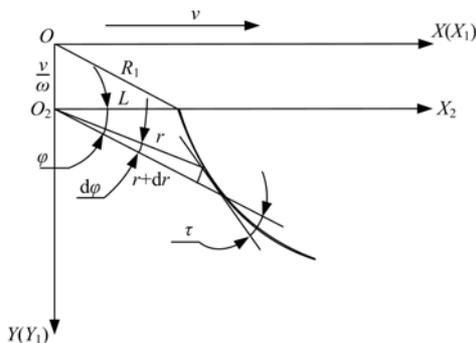


图 5 捡拾齿与动坐标系、定坐标系的相对位置

Fig. 5 Pickup finger's relative position in moving coordinate system and fixed coordinate system

夹角为  $\tau$ 。

在如图 5 所示的极坐标中,取极角  $\varphi$  的增量  $d\varphi$ ,极径  $r$  的增量  $dr$ ,则可用极角  $\varphi$  和极径  $r$  表示捡拾器捡拾齿曲线的微分方程如下:

$$r \cdot d\varphi = \tan \tau \cdot dr \quad (16)$$

由式(16)可知,捡拾器捡拾齿曲线的形状与角  $\tau$  的变化规律有关。参考农业机械部件如旋耕刀刃口曲线的设计可知,  $\tau$  值越大,捡拾齿的滑移能力越强,则捡拾过程中玉米根茬越容易滑落,不利于玉米根茬的捡拾。若  $\tau$  值太小,则捡拾过程中捡拾齿容易与玉米根茬发生缠绕或者堵塞,且玉米根茬容易被捡拾齿带回而造成二次捡拾。由于金属与玉米秸秆之间的最小摩擦角为  $23^\circ \sim 33^\circ$ ,在本设计中可取  $\tau$  值为  $30^\circ$ 。

因此当  $\tau=30^\circ$  时,对式(16)进行积分:

$$\int \frac{dr}{r} = \cot \frac{\pi}{6} \cdot \int d\varphi \quad (17)$$

可求得捡拾器捡拾齿的曲线方程:

$$r = L \cdot e^{\cot \frac{\pi}{6} \cdot \varphi} \quad (18)$$

这是以速度瞬心  $O_2$  为原点的等角螺线,且当  $\varphi = 0$  时,令  $r = L$ ,则由图 5 可知:

$$L = r_{\varphi=0} = \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{v_m}{\omega}\right)^2} \quad (19)$$

式中:  $R_1$  为捡拾器圆盘半径。

由于整机前进速度  $v_m$  为 3.6 km/h,捡拾器角速度  $\omega$  为 15.7 rad/s,取捡拾齿盘的设计半径为 75 mm,则可求得

$$L = \sqrt{0.075^2 - \left(\frac{1}{15.7}\right)^2} = 40 \text{ mm} \quad (20)$$

代入式(19)可得捡拾器捡拾齿的曲线方程为:

$$r = 40e^{\sqrt{3}\varphi} \quad (21)$$

且由于捡拾器的工作半径为 225 mm,将其代入式(21)可求得:

$$\varphi = \frac{\ln 225 - \ln 40}{\sqrt{3}} = 1 \quad (22)$$

因此,角  $\varphi$  的取值范围为  $(0, 1)$ 。

## 2 捡拾齿仿生设计

### 2.1 仿生原型的选取

虾夷扇贝 (*Patinopecten yessoensis*) 属于滤食性双壳贝类,软体动物门。通过对虾夷扇贝的生存环境和表观形貌进行分析可知,其体表的棱纹几何结不仅能增大其与海底泥沙的摩擦因数而

且能增加其附着能力,还能将其与泥沙间的滑动摩擦变为滚动摩擦,从而具有良好的耐磨损性能<sup>[16,17]</sup>。

### 2.2 棱纹结构特征提取

本试验采用可携式三维精密激光扫描仪对虾夷扇贝外表面进行扫描测量,利用逆向工程技术<sup>[18,19]</sup>对数据进行处理。扫描测量试样如图 6 所示。

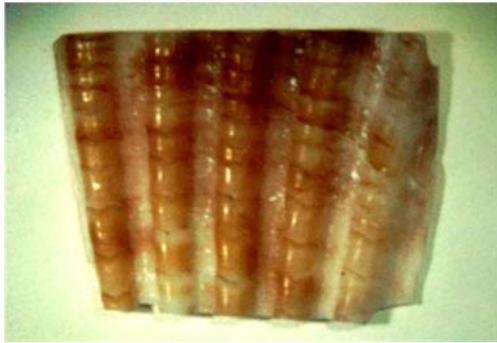


图 6 扫描测量试样

Fig. 6 Sample for scanning and measuring

### 2.3 棱纹结构曲线拟合

将逆向工程得到的特征点数据导入 Origin<sup>[20]</sup> 软件中进行非线性曲线拟合,通过观察和分析特征点的分布规律,选取正弦函数对特征点进行散点拟合处理,得到的拟合方程为:

$$\varphi(x) = A\sin(Bx + C) + H \quad (23)$$

式中: A、B、C、H 为实数,且  $A \neq 0, B \neq 0$ 。

利用拟合方程(23)对特征点进行拟合,并计算拟合曲线的评估判定系数和残差平方和  $S^{SE}$ ,同时得到如图 7 所示的虾夷扇贝体表轮廓点云和拟合曲线。

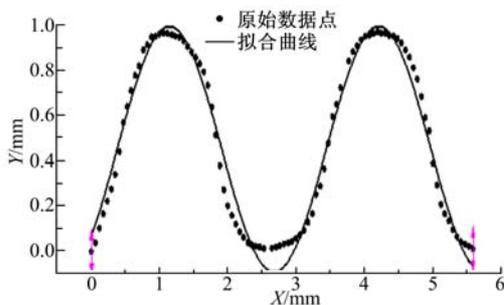


图 7 虾夷扇贝体表轮廓点云及拟合曲线

Fig. 7 Cloud points of contour of *Patinopecten yessoensis* and its fitting curve

由拟合结果可知曲线的拟合方差  $R^2$  为 0.97415,残差平方和  $S^{SE}$  为 0.22753。因此利用正弦函数拟合能满足本次设计的要求。

### 2.4 捡拾齿棱纹型仿生几何结构表面设计

考虑到试验的具体情况和试件的可加工性,将试件表面的仿生棱纹几何结构特征设计为正弦函数的半个周期,取仿生棱纹几何结构的高度为 1.5 mm,宽度为 4 mm,则其满足的正弦函数数学模型为:

$$y = \frac{3}{2}\sin\frac{\pi}{4}x \quad (24)$$

式中:  $x$  的取值范围为  $[0, 4]$ ,则棱纹型仿生几何结构的剖面图如图 8 所示。

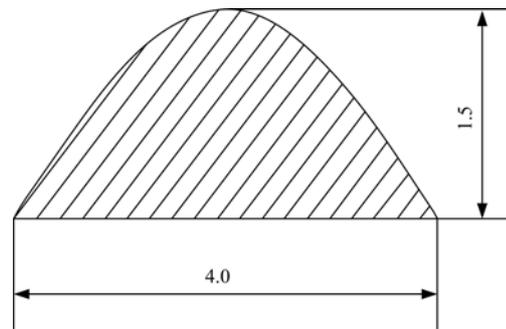


图 8 仿生棱纹几何结构剖面图

Fig. 8 Profile of bionic ribbed structure

根据式(22)所示的捡拾齿曲线和式(24)所示的棱纹形几何结构,利用 Pro/Engineer 软件设计出 3 种不同表面结构的捡拾齿,如图 9 所示。

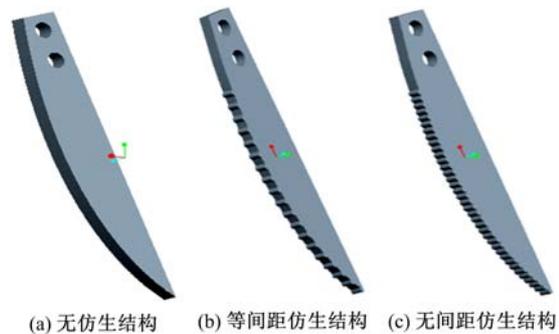


图 9 捡拾齿三维结构示意图

Fig. 9 Three-dimensional structure diagram of pickup fingers

## 3 有限元模型的建立

为了验证捡拾器捡拾齿表面的仿生棱纹几何结构有利于玉米根茬的捡拾工作。利用 ANSYS Workbench<sup>[21]</sup> 软件的瞬态动力学模块<sup>[22]</sup>对捡拾器与玉米根茬之间的 3 种不同摩擦因数  $\mu$  (0.5、0.6、0.7) 及不同的作用点位置(碰撞时捡拾器相对于整机前进方向的转角  $\theta$  分别为  $80^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $100^\circ$ ) 对玉米根茬的变形及运动趋势进行对比研

究<sup>[23-25]</sup>。

应用 Pro/Engineer5.0<sup>[26]</sup> 软件建立捡拾器、玉米根茬、土壤的三维实体模型并将其导入 ANSYS Workbench 有限元分析软件中。设置材料属性,捡拾齿盘的材料选用 45 号钢,捡拾齿的材料选用 65Mn 弹簧钢,玉米根茬与土壤的弹性模量  $E$  为  $1.12 \times 10^6$  Pa、泊松比  $\mu$  为 0.3、密度  $\rho$  为  $1.08 \times 10^{-6}$  kg/m<sup>3</sup>。将土壤模型简化为平板,将玉米根茬模型置于土壤模型上,定义玉米根茬与土壤的连接关系为摩擦接触,摩擦因数为 0.4。定义捡拾器捡拾齿与玉米根茬之间的连接关系为摩擦接触,将摩擦因数  $\mu$  分别设置为 0.5、0.6 和 0.7。经计算得到:捡拾器相对于整机前进方向的转角  $\theta$  为  $80^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $100^\circ$  时对应的等效角速度分别为 9.82、9.71、9.89 rad/s,将等效角速度分别施加到捡拾器上。

#### 4 有限元分析结果与讨论

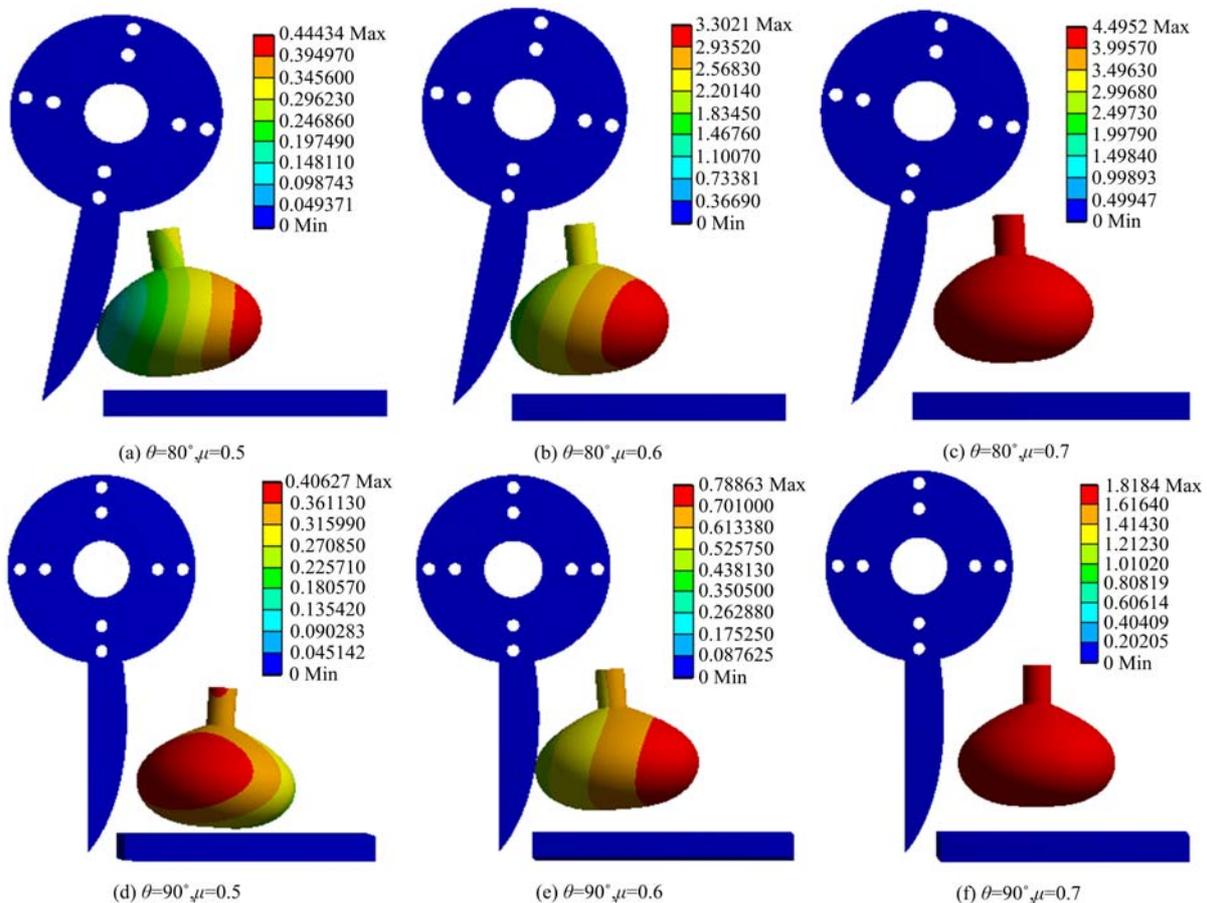
在不同摩擦因数和捡拾位置的情况下,捡拾器与玉米根茬相互作用的结果如图 10 所示。

(1) 摩擦因数对玉米根茬最大变形量及运动趋势的影响

如图 10 所示,在  $\theta$  相同的情况下,玉米根茬随着摩擦因数的增加最大变形量逐渐增大。此外,通过对比玉米根茬相对捡拾器的位置可以发现:摩擦因数为 0.7 时玉米根茬向上的运动趋势较摩擦因数为 0.5、0.6 时更为明显。即当捡拾器与玉米根茬之间的摩擦因数增大时有利于玉米根茬的捡拾,因此,在捡拾齿工作面表面设计仿生棱纹几何结构有利于玉米根茬的捡拾工作。

(2) 作用点位置对玉米根茬最大变形量及运动趋势的影响

如图 10 所示,在捡拾器与玉米根茬之间的摩擦因数  $\mu$  一致的情况下,对比玉米根茬在捡拾器不同转角下发生碰撞的变形情况可知:当捡拾器转角为  $90^\circ$  时发生碰撞,玉米根茬的最大变形量最小,这是因为当捡拾器转角为  $90^\circ$  时,根据式 (2) 可知此时捡拾齿的绝对速度最小,则捡拾器对玉米根茬的冲击力也最小;当捡拾器转角为  $100^\circ$  时发生碰撞,玉米根茬的最大变形量较转角为  $80^\circ$  时大,这是因为当捡拾器转角为  $100^\circ$  时,捡拾器与玉米根茬的碰撞点的半径更大,此时捡拾齿碰撞点处的绝对速度较  $80^\circ$  时大,从而捡拾器对玉米根茬的冲击力更大。此外,当捡拾器转角为



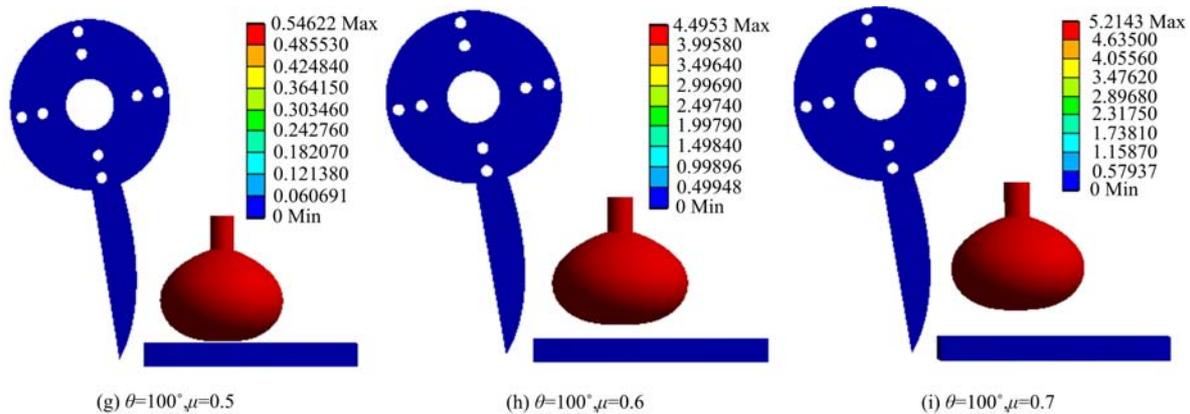


图 10 捡拾器转角不同时,捡拾器与玉米根茬在不同摩擦因数下相互作用的最大变形输出结果

Fig. 10 Simulation analysis results for different friction coefficients between pickup finger and corn stubble with varying rotation angle of corn stubble collector

100°时,玉米根茬的向上运动趋势较 80°、90°时更为明显,这是由于此时捡拾器对玉米根茬的作用点位置更低,在其重心以下,这将更有利于玉米根茬的捡拾工作。

## 5 结 论

(1)设计了一种新型的仿生玉米根茬捡拾器。通过理论分析和计算确定了捡拾齿曲线为： $t = 40e^{\sqrt{3}\varphi}$ ,且角  $\varphi$  的取值范围为(0,1)。

(2)虾夷扇贝外表面棱纹轮廓具有正弦函数特征,据此所设计的仿生捡拾齿的棱纹型仿生几何结构表面的棱纹轮廓方程为： $y = 1.5\sin(\pi x/4)$ ,其中,  $x$  的取值范围为[0,4]。

(3)经过有限元分析可知:捡拾齿工作面表面的仿生棱纹几何结构有利于增大捡拾器与玉米根茬之间的摩擦因数,从而促进玉米根茬的捡拾和脱土。在捡拾过程中,捡拾位置越低,越有利于玉米根茬的捡拾。

### 参考文献:

[ 1 ] 吴根,白丽梅,于洋,等. 生物质转化能源技术的发展现状及趋势探讨[J]. 环境科学与管理,2008, 33(1):66-70.  
Wu Gen, Bai Li-mei, Yu Yang, et al. Development and prospect of biomass energy conversion technology[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(1): 66-70.

[ 2 ] Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues[J]. Progress in Energy and Combustion

Science, 2005, 31(2): 171-192.

[ 3 ] 徐宝库. 玉米根茬收获机整机的结构设计及优化[D]. 长春:吉林大学生物与农业工程学院,2012.  
Xu Bao-ku. Structural design and structure optimization of corn stubble harvester [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2012.

[ 4 ] 权龙哲,曾百功,马云海,等. 基于 TRIZ 理论的玉米根茬收获系统设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 26-32.  
Quan Long-zhe, Zeng Bai-gong, Ma Yun-hai, et al. Design of corn stubble harvester based on TRIZ theory[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 26-32.

[ 5 ] 陈学深,马旭,武涛,等. 玉米根茬挖掘机根土分离装置设计[J]. 广东农业科学, 2011, 38(13): 158-160.  
Chen Xue-shen, Ma Xu, Wu Tao, et al. Design of root soil separating device for corn stubble digging machine [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(13): 158-160.

[ 6 ] 于泳红. 玉米根茬起铺机关键部件试验研究[D]. 佳木斯:佳木斯大学机械工程学院,2011.  
Yu Yong-hong. Experimental research on the key components of the corn root stubble[D]. Jiamusi: Institute of Mechanical Engineering, Jiamusi University, 2011.

[ 7 ] 吴守一. 农业机械学[M]. 北京:中国农业机械出版社,1987.

[ 8 ] 计福来,张会娟,胡志超,等. 甜菜种植与机械化收获概括[J]. 农机化研究,2009,31(4):234-240.  
Ji Fu-lai, Zhang Hui-juan, Hu Zhi-chao, et al. Sugarbeet planting and mechanization generalization[J].

- Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 234-240.
- [9] 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 Su-xiang, Hou Shu-lin, Zhao Jun. General mechanization of beet production at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 12-15.
- [10] 刘百顺, 王春光, 郭文斌. 甜菜机械特性的研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(6): 102-104.  
Liu Bai-shun, Wang Chun-guang, Guo Wen-bin. Study on mechanical properties of sugarbeet [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(6): 102-104.
- [11] 曾百功. 玉米根茬收集装置研制及关键机构机理分析[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2013.  
Zeng Bai-gong. Development of maize stubble harvesting machine and mechanism analysis of its key components [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2013.
- [12] 谢恒. 玉米根茬切挖装置的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2015.  
Xie Heng. Design and experimental study of corn stubble device [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2015.
- [13] 孙剑. 玉米根茬结构和力学特征及与土壤的摩擦学性能[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2011.  
Sun Jian. Structural and mechanical characteristics of corn stubble and its tribological properties against soil [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2011.
- [14] 吴婷. 玉米根茬捡拾器的仿生设计与模拟分析[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2015.  
Wu Ting. Bionic design and simulation analysis of corn stubble collector [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2015.
- [15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [16] 田喜梅. 典型贝类壳体生物耦合特性及其仿生耐磨研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2013.  
Tian Xi-mei. Biological coupling and bionic anti-wear properties of typical molluscan shells [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2013.
- [17] 荣宝军. 耐磨仿生几何结构表面及其土壤磨料磨损[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2008.  
Rong Bao-jun. Biomimetic geometrical structure surfaces with anti-abrasion function and their abrasive wear against soil [D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2008.
- [18] 成思源, 谢韶旺. Geomagic Studio 逆向工程技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [19] 罗之军, 何彪. 基于 Geomagic Studio 的逆向工程技术[J]. 贵州工业大学学报, 2008, 37(5): 102-104.  
Luo Zhi-jun, He Biao. Reverse engineering technology based on geomagic studio [J]. Journal of Guizhou University of Technology, 2008, 37(5): 102-104.
- [20] 武新, 张永胜. Origin 在曲线拟合中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(17): 206-208.  
Wu Xin, Zhang Yong-sheng. Application of Origin in curve fitting [J]. Computer Engineering and Application. 2005, 41(17): 206-208.
- [21] 张岩. ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [22] 许京荆. ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [23] Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. 3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 40(1): 51-62.
- [24] Tong J, Moayad B Z. Effects of rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements: A computer simulation [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 55-64.
- [25] Abu-Hamdeh N H, Reeder R C. A nonlinear 3D finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow [J]. Soil and Tillage Research, 2003, 74(2): 115-124.
- [26] 赵淳, 王英玲. Pro/E Wildfire 5.0 实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.