

免耕播种机仿形爪式防堵清茬机构参数分析*

范旭辉^{1,2} 贾洪雷¹ 张伟汉¹ 杨海天² 顾耀权² 李洪刚²

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林省农业机械研究院, 长春 130022)

【摘要】 论述了一种免耕播种防堵装置——仿形爪式清茬机构的工作原理, 推导了轮爪上任一顶点的运动轨迹、速度和加速度方程并给出了相应计算机绘图, 分析了该机构的参数对工作性能的影响。结果表明: 运动偏角 δ 宜在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间选取, 运动偏角 δ 比爪轮半径 R 对清茬机构工作幅宽影响大, 轮爪宜采用后倾的布置形式。

关键词: 免耕播种 仿形 爪式 清茬机构

中图分类号: S223.2⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)10-0056-05

Parametric Analysis of Finger-type Anti-blocking Residue-cleaner for No-till Planting

Fan Xuhui^{1,2} Jia Honglei¹ Zhang Weihai¹ Yang Haitian² Gu Yaoquan² Li Honggang²

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Jilin Province Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130022, China)

Abstract

Work principle of a new anti-blocking mechanism for no-till planting was described. Equations about the trajectory, the absolute velocity and the acceleration of any vertex on the finger wheel were deduced. Associated graphics were constructed by software, and parameters of the device were analyzed. The results indicated that the movement angles δ was chosen between $20^\circ \sim 40^\circ$ and had great influence on working width compared with radius of the finger wheel. Backward inclined distribution should be adopted for the finger.

Key words No-till planting, Profile modeling, Finger-type, Residue-cleaner

引言

秸秆粉碎还田是保护性耕作体系中的核心技术之一。它将前茬作物秸秆(含根茬)粉碎均匀地铺撒在地表上,防止地表裸露,提高土壤抗水蚀和风蚀的能力;减少土壤水分蒸发,提高农田蓄水保墒能力;提高土壤的有机质含量,培肥地力^[1-3]。但是秸秆覆盖对土壤提温有所影响,可能会延缓农作物的出苗和生长发育;播种机在秸秆覆盖的土壤工作时容易堵塞,影响播种质量;播种时种子可能落在残茬上,不能与土壤良好的接触,影响种子发芽;秸秆与

土壤的混杂减弱镇压作用效果。为了克服上述弊端,应有效地清除种床上秸秆、残茬以及大的土块,保证免耕播种及出苗质量^[2-3]。

为此,设计了仿形爪式清茬机构,将它安装在免耕播种机前端,可以有效地扫除种床上的秸秆和残茬,提高种床土壤温度和播种机的通过性。本文将从其工作原理、运动学分析以及结构参数等几个方面进行研究和探讨。

1 工作原理

清茬机构在借鉴拨禾星轮原理和形状的基础

收稿日期: 2010-12-15 修回日期: 2011-03-28

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B09、2011BAD16B10)、国家农业科技成果转化资金资助项目(2010GB2B100110)和吉林省科技发展计划资助项目(20090711)

作者简介: 范旭辉, 硕士生, 吉林省农业机械研究院工程师, 主要从事农业机械研究, E-mail: eckbjomfan@163.com

通讯作者: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术及仿生智能作业机械研究, E-mail: jiah@vip.163.com

上,又结合了双圆盘开沟器的结构形式,使它对残茬同时具有拨动和侧分两项功能。该机构主要包括一对与地面相接触的轮爪式拨草轮(以下简称为爪轮)、收敛支臂架、调节深浅的凸轮以及下限位支臂等主要工作部件组成,如图 1 所示。一对爪轮成“八”字型安装在收敛支臂架上,其前端彼此收敛到一点而互不干涉;爪轮中间为圆盘区,沿着圆盘区的圆周均匀地分布着多个相同的指形轮爪(通常 8~14 个);一对爪轮安装在收敛支臂架上,可以随收敛支臂架绕转轴整体转动,从而实现爪轮对地面的仿形。

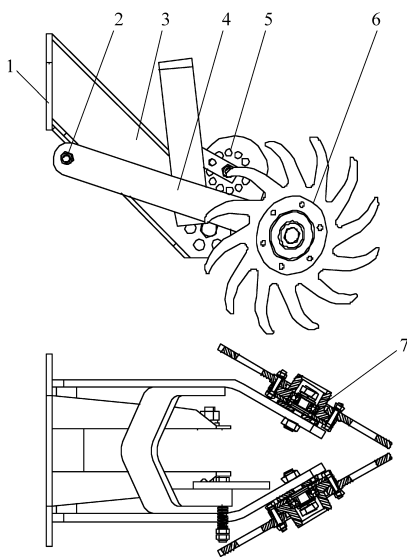


图 1 仿形爪式清茬机构

Fig.1 Finger-type residue cleaner

1. 机架连接板 2. 转轴 3. 下限位支臂 4. 收敛支臂架 5. 凸轮 6. 爪式拨草轮 7. 轴承座及轴承

清茬机构安装在免耕播种机的前端,工作时爪轮上的轮爪插入秸秆、残茬层与土壤接触,在收敛支臂架推力和土壤反力形成的力偶作用下使爪轮转动。旋转的轮爪将其下方的秸秆抬起向侧后方抛出,其余残茬随爪轮前进被分至两侧,形成一条土壤裸露的区域,如图 2 所示。

2 爪轮的运动学分析

2.1 爪轮上任一顶点的运动轨迹

如图 3 所示,取坐标系 $Oxyz$,坐标原点 O 为轮爪与土壤接触点, x 、 y 轴分别平行和垂直爪轮平面, z 轴为垂直于地面方向。图中, H 为残茬层厚度, h 为啮合点高度。

以 O 点为起点,爪轮上任一顶点的运动轨迹坐标方程为

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

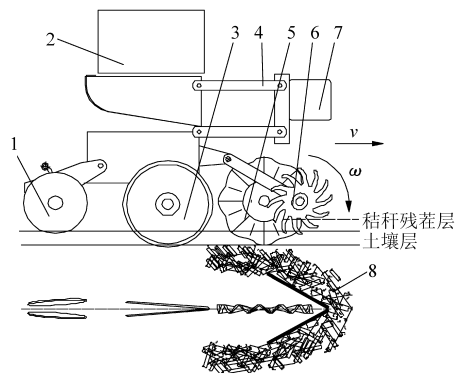


图 2 免耕播种机结构简图

Fig.2 Schematic diagram of no-till planting

1. V 型镇压轮 2. 种肥箱 3. 双圆盘开沟器 4. 四连杆 5. 波纹圆盘 6. 清茬机构 7. 播种机主梁 8. 秸秆和残茬土壤层

式中 v ——清茬机构前进速度

R ——爪轮半径 δ ——爪轮运动偏角

ω ——爪轮转动角速度 t ——时间

轮爪的有效工作区间,即轮爪对残茬层产生作用的区间,其相位角 ωt 为 $2k\pi - \arccos \frac{R-H}{R} \leq \omega t \leq$

$$2k\pi + \arccos \frac{R-H}{R}。$$

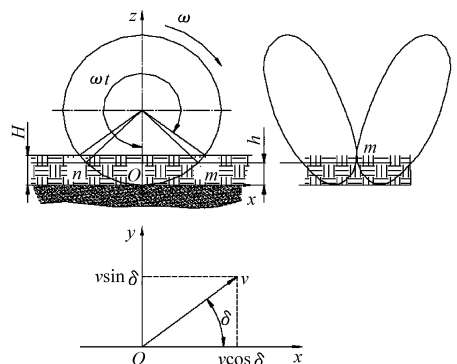


图 3 爪轮运动分析简图

Fig.3 Sketch of finger wheel for motion analysis

根据式(1)作出爪轮上任一顶点(设为 a 点)运动轨迹如图 4 所示。由图可知,爪轮从 a 点到 c 点回转一周的运动是一个复合运动,可以看作是从 a 点到 b 点的纯滚动和 b 点到 c 点的无转动的平移运动所合成,该点的运动轨迹是一条空间螺旋线。从 xOy 平面上看,在有效工作区间内爪轮顶点横向移动明显,这说明轮爪对残茬具有侧向推移功能。在一定范围内,若运动偏角 δ 增加,则 bc 变大,滑移作用就强,对覆盖物的侧推作用也就变强;反之,侧推作用变弱。但运动偏角 δ 过大,会影响爪轮的转动,增大前进阻力^[4]。

2.2 爪轮顶点的速度和加速度方程

对式(1)求导,得轮爪顶点的绝对速度在各坐标轴上分量为

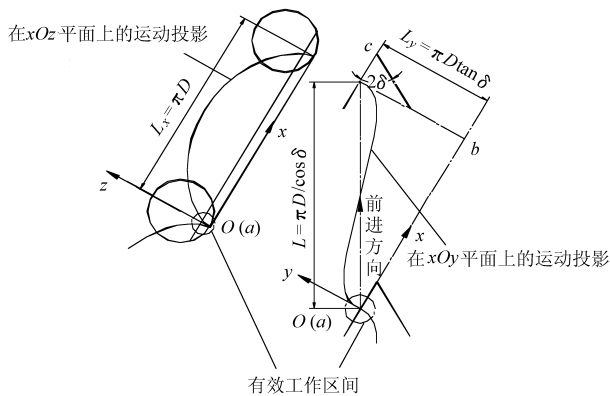


图4 爪轮任一顶点的运动轨迹

Fig.4 Trajectories of any vertex on finger wheel

$$\begin{cases} v_{ax} = \frac{dx}{dt} = v\cos\delta + \omega R\cos\omega t \\ v_{ay} = \frac{dy}{dt} = v\sin\delta \\ v_{az} = \frac{dz}{dt} = \omega R\sin\omega t \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)求导,得轮爪顶点加速度在各坐标轴上分量为

$$\begin{cases} a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 R\sin\omega t \\ a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = 0 \\ a_z = \frac{d^2z}{dt^2} = \omega^2 R\cos\omega t \end{cases} \quad (3)$$

爪轮角速度

$$\omega = -\frac{v\cos\delta}{R(1+\eta)} \quad (4)$$

式中 η ——爪轮转动滑移率, $\eta > 0$

爪轮顶点的绝对速度

$$v_a = \sqrt{v_{az}^2 + v_{ay}^2 + v_{ax}^2} = \sqrt{\omega^2 R^2 + v^2 + 2v\omega R\cos\delta\cos\omega t} \quad (5)$$

假设滑移是均匀的,爪轮可看成以等角速度 ω 旋转,其顶点线速度可表示为 $\omega R = -\frac{v\cos\delta}{1+\eta}$ 。将此代入式(5)中,轮爪的绝对速度可整理成

$$v_a = v \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda\cos\omega t\cos\delta} \quad (6)$$

$$\text{其中 } \lambda = \frac{\omega R}{v} = -\frac{\cos\delta}{1+\eta} \quad (7)$$

根据式(6),作出爪轮任一顶点在一个周期内的绝对速度曲线如图5所示(使用函数绘图软件 Origin 生成)。图中,横坐标表示爪轮顶点的相位角,纵坐标表示该点在不同相位角所对应的绝对速度。

由图5可见,所有速度曲线的最小值均出现在 ωt 为 0° 、 360° 、 720° ...附近,即爪轮的最低点、土壤

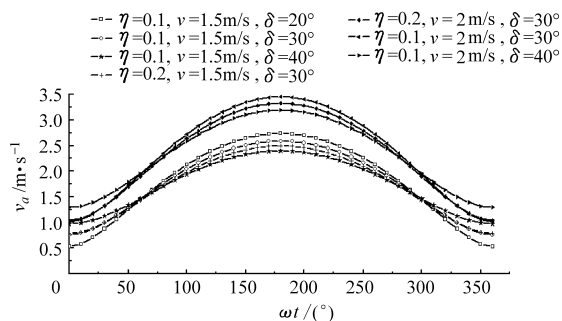


图5 爪轮任一顶点的绝对速度变化曲线

Fig.5 Absolute velocity curves of finger's any vertex

层附近。速度的最大值出现在 ωt 为 180° 、 540° ...附近,即该顶点运动到距地表最高位置。相位角 ωt 为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时,该顶点的绝对速度逐渐增大; ωt 为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 时,绝对速度逐渐减少^[5]。

从图5中还可以看出,爪轮顶点的绝对速度与 η 、 v 、 δ 等参数有关。爪轮前进速度 v 相同时,各速度曲线相交在相位角 60° 和 300° 附近,轮爪在该点的绝对速度相同。当爪轮半径 R 设计为残茬层厚度 H 的2倍时,爪轮顶点进入残茬层和离开残茬层界面的相位角分别为 300° 和 60° ,其绝对速度大小接近,受运动偏角 δ 和滑移率 η 的影响较小。在轮爪的有效工作区间内,运动偏角 δ 相对滑移率 η 对爪端的绝对速度影响较大。当运动偏角 δ 增大时,轮爪的角速度减小,在有效工作区间内的绝对速度增大,轮爪对残茬层推移作用较强,对残茬的拨动作用较弱。

3 爪轮的结构参数

图6为爪轮结构示意图。

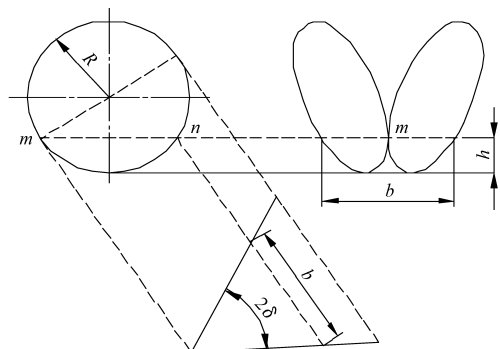


图6 爪轮结构示意图

Fig.6 Structural sketch of finger wheel

3.1 爪轮啮合的结构参数

(1) 啮合点高度

啮合点高度 h 是影响拨草质量主要参数之一。为使清茬干净,要求 h 值应略小于或等于于秸秆残茬层厚度 H ,即 $h \leq H$ 。在设计中,若 h 值取值过大,啮合点高于 H ,将使轮爪在秸秆层中啮合不严,造成中

间的残茬遗漏;但 h 值太小,又使秸秆从聚点上面进入双轮盘之间,造成轮爪夹秆堵塞。

(2) 工作幅宽

清茬机构的工作幅宽 b 可参考条耕或带耕的耕作幅宽,一般在 15 ~ 25 cm 之间^[6]。影响清茬宽度的参数主要为爪轮半径 R 和两爪轮的夹角 2δ 。工作幅宽

$$b = 2l_{mn} \sin\delta = 4 \sin\delta \sqrt{R^2 - (R - h)^2} = 4 \sin\delta \sqrt{2Rh - h^2} \quad (8)$$

式中 l_{mn} ——爪轮上点 m 和点 n 之间的实际长度
 h 应根据实际残茬厚度 H 选择,运动偏角 δ 应在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 之间,根据 b 、 h 和 δ 等参数的取值范围可确定爪轮半径 R 大致在 150 ~ 200 mm 之间。由式(8)可知, b 随着 R 和 δ 的增大而增大,分别把 R 和 δ 看作常数,对式(8)求偏导得

$$\frac{\partial b}{\partial \delta} = 4(2Rh - h^2)^{\frac{1}{2}} \cos\delta > 0 \quad (0 < \delta < \frac{\pi}{4}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial b}{\partial R} = 4h(2Rh - h^2)^{-\frac{1}{2}} \sin\delta > 0 \quad (0 < \delta < \frac{\pi}{4}) \quad (10)$$

将式(9)除以式(10)得

$$\frac{\partial b}{\partial \delta} = \frac{4(2Rh - h^2)^{\frac{1}{2}} \cos\delta}{4h(2Rh - h^2)^{-\frac{1}{2}} \sin\delta} = (2R - h) \cot\delta \quad (11)$$

式(11)中, $\delta < 45^\circ$,所以 $\cot\delta > 1$;同时 $2R - h \geq 1$,所以式(11)的值也远大于 1,即运动偏角 δ 比爪轮半径 R 对清茬机构工作幅宽影响要大。所以设计清茬机构时,由结构因素来确定爪轮的半径,而采取加大运动偏角 δ 来加宽清茬幅宽。

3.2 轮爪

3.2.1 布置形式

轮爪按安装角度可分为径向、前倾和后倾 3 种布置形式,如图 7 所示^[7]。

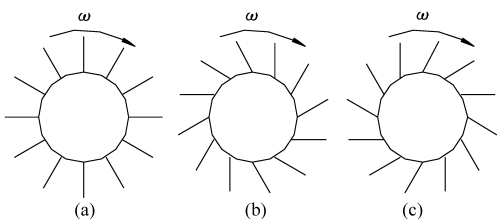


图 7 轮爪的布置形式

Fig. 7 Distribution patterns of finger

(a) 径向 (b) 后倾 (c) 前倾

轮爪在 xOy 平面上工作时起拨茬作用,对残茬有向侧后方的拨动和脱茬作用,轮爪能从残茬层中顺利脱出,没有秸秆缠绕。

拨茬和脱茬,二者是相互矛盾着的对立面。所

谓拨茬是秸秆受轮爪拨动,不沿着轮爪面滑移,能随爪轮转动而运动;所谓脱茬是秸秆与轮爪工作面有相对位移。试验中发现脱茬问题较拨茬问题更为突出,一旦轮爪缠秆,立即影响爪轮的转动,从而影响轮爪拨动残茬的效果,引起清茬机构堵塞和种床秸秆的拖堆。因此,处理拨茬和脱茬的关系,首先是保证脱茬,而后尽量兼顾拨茬。

径向布置的轮爪在工作区间内易于满足拨茬,但不利于脱茬。当爪轮在高速作业时,秸秆易被轮爪拨动、挑起,随轮爪旋转一周后又抛到清茬机构的前方。轮爪为后倾布置时,只要后倾角度适当,不但不影响轮爪的拨茬,而且还有利于秸秆的排放,防止了秸秆的缠绕;前倾布置的轮爪容易挑秆,清茬效果不好。

从径向和后倾布置的轮爪运动轨迹可以看出(图 8),在有效工作区间内,后倾布置的轮爪对秸秆的作用是:先压制、再拨动、最后挑起、排放,这样清扫秸秆的作用效果好,作用范围也更大。综上所述,轮爪布置形式宜选择后倾。

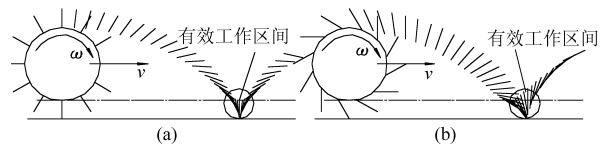


图 8 轮爪的动态轨迹图

Fig. 8 Trajectories of finger

(a) 径向 (b) 后倾

3.2.2 形状和数量

参照拨禾星轮的形状,对轮爪爪形进一步优化设计^[7],如图 9 所示。将爪端用圆弧 R_2 延展到外圆上,圆弧与轮爪的直线部分相切。这样可以进一步提高轮爪爪端的脱茬能力;同时能够降低轮爪和土壤之间的压强,从而减小轮爪对土壤的搅动,减少种床土壤流失。另外,将相邻轮爪根部用圆弧 R_1 过渡连接(R_1 应大于秸秆直径),防止爪根夹秆,有利于秸秆的排放^[7-12]。

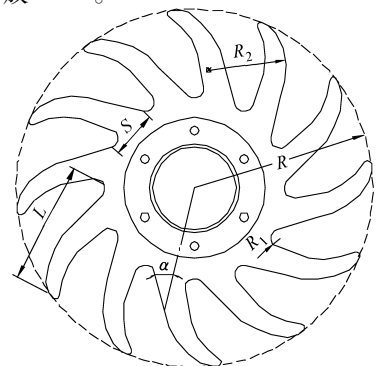


图 9 爪轮爪形图

Fig. 9 Sketch of finger's shape

为保证轮爪能连续拨动残茬,爪轮上要设有一定数量的轮爪。轮爪数量在保证齿根空间不夹秆的情况下尽量多取。轮齿数量为

$$q = \left\lfloor \frac{2\pi(R-l)}{S} \right\rfloor \quad (12)$$

式中 l ——轮爪长度,略大于残茬层厚度 H
 S ——相邻齿根弦长,略大于秸秆直径^[13]

4 试验

清茬机构安装在 2BMD-4 型多功能免耕播种机播种开沟器前端,于 2006~2010 年春季,随该机在长春市新立城镇、梨树县、吉林农业大学等地进行玉米和大豆免耕播种试验,累计作业面积达 120 hm²。

2009 年 5 月,在吉林农业大学试验地对播种前、后的地表秸秆覆盖率和免耕播种机通过性能进行了测定。试验结果表明,播种前地表秸秆覆盖率平均为 75.15%,免耕播种后平均为 47.1%,为播种前的 62.7%。从作业的实际作用效果和试验数据上看,清茬效果良好,能满足免耕播种防堵的要求。

5 结论

(1)通过建立清茬机构爪轮顶点的运动轨迹方程,绘制出爪轮顶点的运动轨迹图,模拟了清茬机构在工作区间内对秸秆的清理过程。通过建立速度和加速度方程,绘制不同参数下轮爪上任一顶点的绝对速度变化曲线。当运动偏角 δ 增大时,轮爪的角速度减小,在有效工作区间内爪轮顶点的绝对速度增大,轮爪对残茬层侧推作用较强,对残茬的拨动作用较弱。通过试验比较,运动偏角 δ 宜在 20°~40° 之间选取。

(2)运动偏角 δ 比爪轮半径 R 对清茬机构工作幅宽影响大。设计该类清茬机构时,由结构因素来确定爪轮的半径,适当加大运动偏角 δ 来加宽清茬幅宽。

(3)轮爪采用后倾的布置形式,有利于提高轮爪的脱茬能力,减少对土壤的扰动。

(4)轮爪数量在保证齿根不夹秆的情况下尽量多取。

参 考 文 献

- Jia Honglei, Wang Lichun, Li Chunsheng, et al. Combined stalk-stubble breaking and mulching machine[J]. *Soli & Tillage Research*, 2010, 107(1): 42~48.
- 高焕文,李问盈. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京:化学工业出版社,2004:40~54.
- 农业部农业机械化管理局. 中国保护性耕作[M]. 北京:中国农业出版社,2008:78~110.
- 李宝筏. 农业机械学/21世纪[M]. 北京:中国农业出版社,2003:39~43.
- 马廷玺,信增瑞. 圆盘耕作部件的几何参数和工作参数分析[J]. 农业机械学报,1988,19(2):40~48.
Ma Tingxi, Xin Zengrui. The analyses of the geometric and operation parameters of the disk tool[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1988, 19(2): 40~48. (in Chinese)
- 贾洪雷,马成林. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报,2010,41(10):28~34.
Jia Honglei, Ma Chenglin. Tillage soil protection of black soil zone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(10): 28~34. (in Chinese)
- 胡瑞谦. 质点在绕水平轴等速旋转平面型叶片上运动的分析[J]. 农业机械学报,1980,11(4):62~72.
- 许乃章. 扶禾器拨指与拨禾星轮工作原理的理论分析[J]. 农业机械学报,1980,11(2):61~75.
- 蓝文锋. 拨禾星轮的曲线[J]. 农业机械学报,1982,13(1):85~91.
Lan Wenfeng. The curve of star wheel for head-feed combine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1982, 13(1):85~91. (in Chinese)
- 马骥,毛国伦. 宽割幅立式割台采用被动式星轮扶禾器部件的试验研究[J]. 农业机械学报,1980,11(2):76~86.
Ma Ji, Mao Guolun. Research and test of large cutting width vertical type reaper with star wheel lifter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1980, 11(2): 76~86. (in Chinese)
- 奥紫锋. 利用计算机探讨余摆线在农机中应用时最佳参数选择[J]. 农业机械学报,1985,16(3):78~86.
Ao Zifeng. Determination of the optimum trochoid parameters used in farm machines by computer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1985, 16(3): 78~86. (in Chinese)
- 贺俊林,佟金,陈志,等. 指形拨禾轮分禾机构的虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报,2007,38(6):53~56.
He Junlin, Tong Jin, Chen Zhi, et al. Virtual design and kinematic simulation for feed-in mechanism with finger rotor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 53~56. (in Chinese)
- 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1988:1155~1157.