

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.012

步行式插秧机等径凸轮强制推秧装置反求设计与试验*

陈建能 周丽莎 王英 徐高欢 赵匀 张传伟

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要:为解决共轭凸轮推秧装置结构尺寸过大的问题,提出了等径凸轮推秧装置。该推秧装置由等径凸轮控制推秧杆运动。根据推秧杆农艺要求及椭圆齿轮行星系驱动机构构造了推秧杆的理想运动学曲线,建立了该推秧装置的反求模型。基于VB 6.0编写了其反求设计及仿真软件,得到一组满足农艺要求的参数,包括机构参数和等径凸轮廓线。根据这组参数研制了该推秧装置并进行高速录像试验。理论分析及试验结果表明,该推秧装置能够满足推秧杆的农艺要求,且具有比共轭凸轮推秧装置更小巧的结构尺寸。

关键词: 插秧机 推秧装置 等径凸轮 运动学 反求 试验

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0069-05

Reverse Design and Experiment of Walking-type Rice Transplanter with Equal-diameter Cam Seedling-pushing Mechanism

Chen Jianneng Zhou Lisha Wang Ying Xu Gaohuan Zhao Yun Zhang Chuanwei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The equal-diameter cam seedling-pushing mechanism was proposed in order to solve the problem that the structure size of conjugate cam seedling-pushing mechanism was too big. In the proposed seedling-pushing mechanism, equal-diameter cam was used to control the motion of seedling-pushing rod. Ideal kinematic curves of seedling-pushing rod were constructed and reverse model of the proposed seedling-pushing mechanism was established according to requirements of planting agriculture as well as driving mechanism with planetary elliptic-gear trains. Then a reverse design and simulation software was compiled based on VB 6.0. A set of optimum parameters including structural parameters as well as pitch curve of equal-diameter cam were obtained through the software, which could meet the requirements of planting agriculture. The seedling-pushing mechanism was developed based on these parameters and testified by high-speed video. Analysis and results of the experiments showed that the proposed seedling-pushing mechanism could meet the requirements of planting agriculture and had a smaller outer dimension compared to conjugate cam seedling-pushing mechanism.

Key words: Rice transplanter Seedling-pushing mechanism Equal-diameter cam Kinematics Reverse Experiment

引言

分插机构主要包括栽植臂及其驱动机构两个部分,它是插秧机的核心工作部件,决定着插秧机的作

业性能。其中栽植臂的作用是将秧苗从插秧机秧箱上取下并插入水田中,为了防止秧苗回带、减少漏插,通常在栽植臂内安装一套推秧装置。传统的推秧装置在不同的插秧速度下会造成推秧提前或滞

收稿日期: 2012-09-22 修回日期: 2012-10-10

* 国家自然科学基金资助项目(51275481)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B08)、浙江省自然科学基金资助项目(Y1110100)、浙江省新苗计划资助项目和浙江理工大学521人才培养计划资助项目

作者简介: 陈建能,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究, E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

后^[1-2],为此笔者曾提出了共轭凸轮强制推秧装置,通过建模、分析和优化,该推秧装置满足农艺要求并克服了传统推秧装置存在的缺陷^[3],但是其结构尺寸较大带来动力学特性欠佳的问题^[4]。为此本文提出等径凸轮推秧装置,建立其分析模型并进行机构参数反求和试验。

1 椭圆齿轮行星系驱动机构与等径凸轮推秧装置

采用椭圆齿轮行星系作为步行式插秧机分插机构的驱动机构,由以焦点作转动中心的3个全等椭圆齿轮组成:初始安装相位相同的中心椭圆齿轮(太阳轮)和中间椭圆齿轮(中间轮),以及相对中间轮转过 δ_0 角的行星椭圆齿轮(行星轮),如图1所示。工作时,太阳轮固定不动,动力从行星架输入,带动中间轮和行星轮转动,栽植臂壳体与行星轮固结^[5-7]。

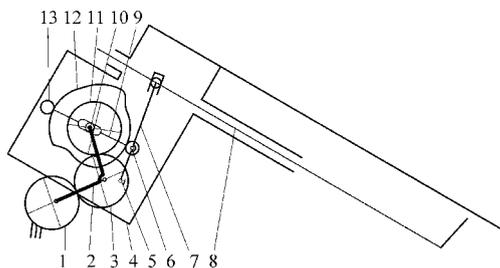


图1 椭圆齿轮行星系驱动机构与等径凸轮推秧装置

Fig. 1 Drive mechanism with planetary elliptic-gear trains and equal-diameter cam seedling-pushing mechanism

1. 太阳轮 2. 行星架 3. 中间轮 4. 栽植臂壳体 5. 拨叉轴
6. 铰链 7. 拨叉 8. 推秧杆 9. 滚子杆 10. 行星轮轴 11. 行星轮 12. 等径凸轮 13. 滚子

栽植臂壳体内有一套等径凸轮推秧装置:动力从行星架输入,带动与其固结的等径凸轮转动;滚子杆为等径凸轮从动件,其上装有距离不变的两个滚子;当等径凸轮转动时,两个滚子始终与等径凸轮的轮廓保持接触,带动滚子杆运动;拨叉通过拨叉轴支撑在栽植臂壳体上,与滚子杆通过铰链连接,在滚子杆的带动下摆动,从而实现推秧杆相对栽植臂壳体的往复直线运动,将取下的秧苗推出。

2 等径凸轮强制推秧装置反求模型

为方便分析,将涉及到的相关参数列于表1。

2.1 推秧杆农艺要求及运动学曲线

在一个插秧循环内,栽植臂要完成取秧和插秧2个动作。秧爪取秧结束后随等径凸轮转动,当相对拨叉转到推秧位置时开始推秧。推秧过程中,拨叉绕拨叉轴旋转,带动推秧杆推出秧爪上的秧块;推秧结束后,拨叉在等径凸轮和滚子杆的作用下回转

表1 分析符号说明

Tab. 1 Specifications of symbols

符号	意义
a/mm	椭圆长半轴
$\phi/(\circ)$	某一时刻行星架转过的角位移(<0)
$\phi_0/(\circ)$	行星架的初始角位移(>0)
l/mm	滚子杆杆长
l_2/mm	滚子2到凸轮轴心的距离
l_3/mm	拨叉轴心到滚子1的距离
h/mm	推秧杆轨迹最高点和最低点的高度差
S/mm	行星轮轴心到推秧杆末端的距离
$\alpha_0/(\circ)$	行星架的初始安装轴线与行星轮轴心与推秧杆末端连线的夹角(为锐角)
$\phi_1/(\circ)$	拨叉与动坐标系水平线的夹角
$\phi_3/(\circ)$	行星轮转角
$\phi_4/(\circ)$	滚子1摆角
r_i/mm	滚子半径
$\beta_0/(\circ)$	取秧角
k	椭圆的短长轴之比
$\dot{\phi}/(\circ) \cdot \text{s}^{-1}$	行星架的转速(匀速)
$\delta_0/(\circ)$	行星架夹角
l_1/mm	滚子1到凸轮轴心的距离
$\varphi_{31}/(\circ)$	行星轮相对行星架角位移
l_4/mm	拨叉轴心到滚子2的距离
a'/mm	拨叉轴心到凸轮轴心的距离
s_1/mm	拨叉轴心到推秧杆的垂直距离
$\beta/(\circ)$	拨叉轴心与凸轮轴心的连线与动坐标系水平线夹角
$\phi_2/(\circ)$	拨叉与滚子杆夹角
$\dot{\phi}_3/(\circ) \cdot \text{s}^{-1}$	行星轮角速度
$\phi_5/(\circ)$	滚子2摆角
e	拨叉放大比
$\beta_1/(\circ)$	推秧角

并缩回推秧杆。当拨叉回到初始位置(即最高端)时,进入等径凸轮的圆弧段,拨叉相对静止。为保证能将秧针上的秧苗推出,推秧杆相对栽植臂的行程与取下的秧块长度要大致相等。根据文献^[7~8]对椭圆齿轮行星系分插机构数学模型的建立和分析,当 $a = 16.272 \text{ mm}$, $k = 0.985$, $\alpha_0 = 27^\circ$, $\phi_1 = 7^\circ$, $\delta_0 = 83^\circ$, $S = 248.5 \text{ mm}$ 时,秧针轨迹和姿态能够满足插秧农艺要求。据此设计推秧行程为 18 mm ,推秧阶段(阶段I)行星架的转角为 $65^\circ \sim 86^\circ$,回程阶段(阶段II)行星架的转角为 $87^\circ \sim 123^\circ$,其余时间推秧杆静止,其理想运动学曲线如图2所示。

2.2 推秧装置反求模型的建立

为方便分析,令定坐标系 xOy 固结在行星架轴心上, x 轴取水平方向。令动坐标系 $x'O'y'$ 固结在栽植臂等径凸轮轴心上,由等径凸轮轴心指向推秧杆且与推秧杆垂直即为动坐标系 x' 轴的方向,如图3所示。

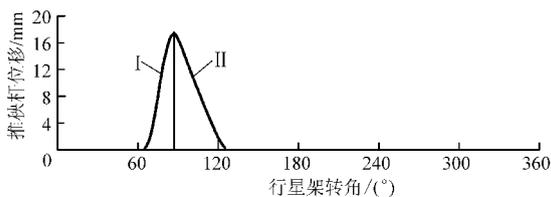


图 2 推秧杆相对栽植臂位移与行星架转角关系

Fig.2 Relationship between displacement of seedling-pushing rod relatives to planting arm and angle of plant carrier

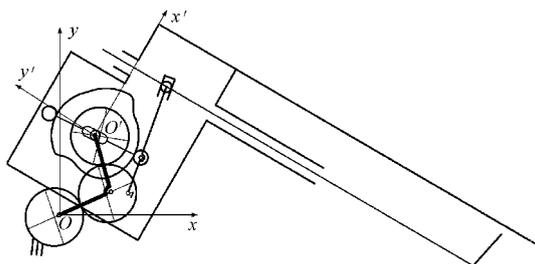


图 3 坐标系设定

Fig.3 Settings of coordinates

2.2.1 动坐标系 $x'O'y'$ 中等径凸轮反求模型的建立

(1) 等径凸轮从动件运动规律

根据推秧杆相对栽植臂位移与行星架转角关系(图 2),可求得拨叉的运动规律;拨叉和滚子杆通过铰链连接,则由拨叉的运动规律可求得滚子杆的运动规律,即得凸轮从动件运动规律(图 4)。

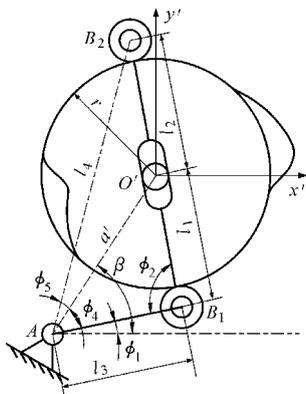


图 4 等径凸轮从动件运动规律求解示意图

Fig.4 Motion rules of equal-diameter cam follower

设行星架转过 ϕ 角时,推秧杆相对栽植臂的位移为 $g(\phi)$,则拨叉转角为

$$\phi_1 = \arctan \frac{g(\phi)}{s_1} \quad (1)$$

滚子 1 摆角为

$$\phi_4 = \beta - \phi_1 \quad (2)$$

其中, $\beta = \pi - \arctan \frac{y'_A}{x'_A}$, x'_A, y'_A 为拨叉转动中心在动坐标系中的坐标,为已知结构参数。

在 $\triangle O'AB_1$ 中, $l_1 = \sqrt{a'^2 + l_3^2 - 2a'l_3 \cos \phi_4}$,则在 $\triangle O'AB_1$ 中运用余弦公式可得

$$\phi_2 = \arccos \frac{l_1^2 + l_3^2 - a'^2}{2l_1l_3} \quad (3)$$

在 $\triangle AB_1B_2$ 中, $l_4 = \sqrt{l^2 + l_3^2 - 2ll_3 \cos \phi_2}$,则在 $\triangle O'AB_2$ 中,运用余弦公式可得滚子 2 的摆角

$$\phi_5 = \arccos \frac{a'^2 + l_4^2 - l_2^2}{2a'l_4} \quad (4)$$

其中 $l_2 = l - l_1, l$ 为定值。

(2) 凸轮转角和行星架转角关系

等径凸轮和行星架固结,栽植臂壳体和行星轮固结,拨叉支撑在栽植臂壳体上,则拨叉转动中心相对等径凸轮的角位移等于行星轮相对行星架的角位移 ϕ_{31} 。

(3) 等径凸轮理论轮廓曲线

利用反转法^[9]求解等径凸轮理论轮廓,如图 5 所示。在初始位置滚子杆处于位置 $B_{01}B_{02}$,拨叉处于位置 A_0B_{01} ,当拨叉转动中心相对等径凸轮转动中心反转 ϕ_3 时,滚子杆处于位置 B_1B_2 ,拨叉处于位置 AB_1 ,则凸轮理论廓线上任意一点坐标可表示为

$$\begin{cases} x'_1 = -a' \cos(\beta + \phi_3) + l_3 \cos(\beta + \phi_3 - \phi_4) \\ y'_1 = -a' \sin(\beta + \phi_3) + l_3 \sin(\beta + \phi_3 - \phi_4) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x'_2 = -a' \cos(\beta + \phi_3) + l_4 \cos(\beta + \phi_3 + \phi_5) \\ y'_2 = -a' \sin(\beta + \phi_3) + l_4 \sin(\beta + \phi_3 + \phi_5) \end{cases} \quad (6)$$

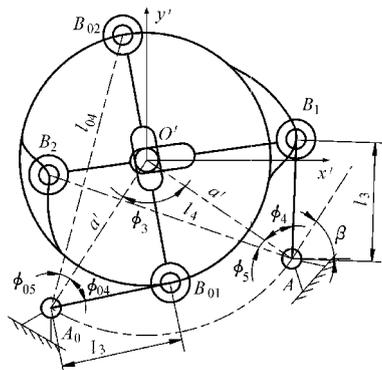


图 5 等径凸轮反转法示意图

Fig.5 Reversal method of equal-diameter cam

(4) 等径凸轮实际工作轮廓曲线

由理论廓线可求得实际工作轮廓曲线,笔者在文献[3]已经给出详细的推导,限于篇幅,这里不再详述。

2.2.2 定坐标系 xOy 中等径凸轮反求模型的建立

根据动坐标系和定坐标系的关系,可求出定坐标系 xOy 中的等径凸轮实际工作轮廓曲线,笔者在文献[3]已经给出详细的推导,限于篇幅,这里不再详述。

3 等径凸轮推秧装置反求设计与仿真软件

根据第 2 节建立的推秧装置反求模型和所建立

的椭圆齿轮行星系分插机构数学模型,基于 Visual Basic 6.0^[10~13]编写了如图6所示的反求设计及仿真软件。该软件能够根据给定的推秧杆运动规律,反求推秧装置的结构参数和凸轮廓线,并对安装等径凸轮推秧装置的步行式插秧机分插机构进行相对运动和绝对运动的模拟。

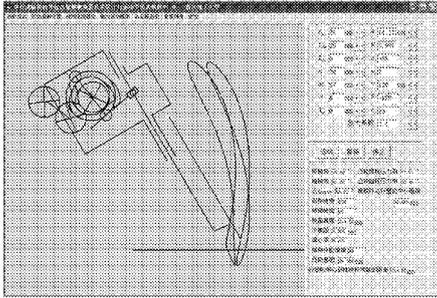


图6 等径凸轮推秧装置反求设计及仿真软件界面

Fig.6 Reverse design and simulation software of equal-diameter cam seedling-pushing mechanism

该软件的输入参数:椭圆齿轮行星系驱动机构参数 $a, k, \alpha_0, \phi_0, \delta_0$; 强制推秧装置参数 $r_t, l, l_3, s_1, \beta, a'$ 和 e ; 输出参数 β_0, β_1, h 、凸轮的轮廓曲线和凸轮压力角 α 等。它能够使输出参数随着推秧装置的结构参数变化进行实时更新,同时能够显示推秧杆的静轨迹和动轨迹、行星轮轴心轨迹以及这些轨迹和秧苗之间的相对位置。

4 反求结果及分析

利用第3节的反求设计及仿真软件,根据农艺要求,优化后得到一组较优参数: $a = 16.272 \text{ mm}$, $k = 0.985$, $\alpha_0 = 27^\circ$, $\phi_0 = 7^\circ$, $\delta_0 = 83^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $r_t = 6 \text{ mm}$, $a' = 34 \text{ mm}$, $s_1 = 57 \text{ mm}$, $l = 52 \text{ mm}$, $l_3 = 21 \text{ mm}$, $e = 3.5$ 。此时,分插机构轨迹姿态如图7所示, $\beta_0 = 5.51^\circ$, $\beta_1 = 60.20^\circ$, 推秧角和取秧角差值为 54.69° , $h = 261.19 \text{ mm}$, $S = 248.5 \text{ mm}$, 行星架转过 64° 时推秧杆开始推秧, $65^\circ \sim 86^\circ$ 为推秧过程, $87^\circ \sim 123^\circ$ 推秧杆缩回,其余时间推秧杆相对栽植臂壳体静止,满足插秧农艺要求^[10]和推秧杆农艺要求。

反求得到图8所示的等径凸轮实际廓线,其结构尺寸比共轭凸轮小;等径凸轮传动过程中最大压力角为 17.53° ,远小于文献[2]中共轭凸轮的主、副凸轮最大压力角 41.3° 和 29.54° 。可见等径凸轮推秧装置比共轭凸轮推秧装置结构更为紧凑,动力学特性更好。

5 步行式插秧机等径凸轮推秧装置的试验

根据第4节得到的参数试制了图9所示的推秧装置,并对其进行了高速摄像试验。试验时采用高

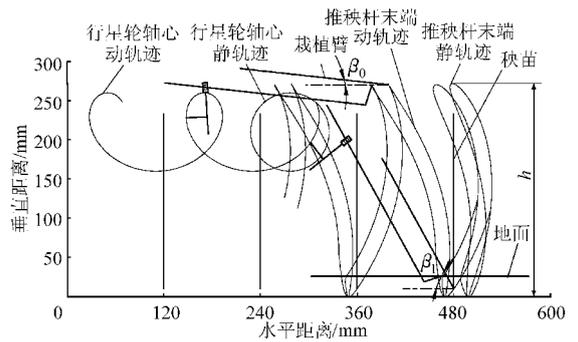


图7 等径凸轮推秧装置分插机构轨迹姿态图

Fig.7 Locus and pose of transplanting mechanism with equal-diameter cam seedling-pushing mechanism

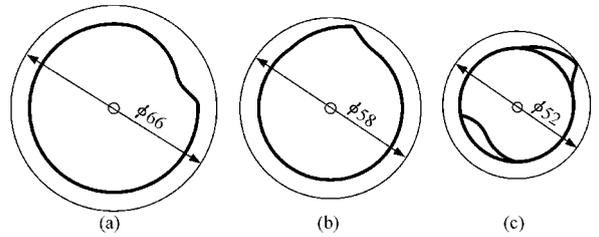


图8 共轭凸轮与等径凸轮的廓线比较

Fig.8 Profile comparison between conjugate cam and equal-diameter cam

(a) 共轭凸轮主凸轮 (b) 共轭凸轮副凸轮 (c) 等径凸轮

速摄像机、视频采集卡、图像监视器以及 Blaster's MAS 图像分析软件等设备。试验在高速插秧试验台上进行,由两个 1.3 kW 的强光进行照射,椭圆齿轮行星系驱动机构转速为 $100, 150$ 和 200 r/min , 高速摄像拍摄速率为 250 帧/s 。

试验前,先在秧针末端做上标记以便后续对视频进行分析;同时调整高速摄影机的重放频率与视频采集的频率相适应,以免丢帧造成误差。准备工作完成后启动试验台,使转速分别达到 $100, 150$ 和 200 r/min ,待转速稳定后对图像进行采集。

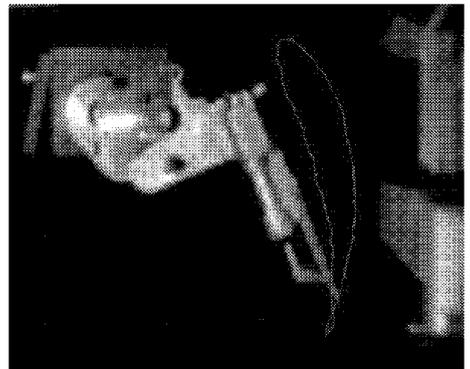


图9 等径凸轮强制推秧装置高速摄像试验

Fig.9 High-speed video experiment of equal-diameter cam seedling-pushing mechanism

将采集到的结果输入 Blaster's MAS 图像分析软件进行分析,在3种不同的转速下,推秧杆均能在一个周期内正常完成推出和缩回,将秧苗插入泥土

中。试验过程中,从推秧杆开始推秧到完成推秧,持续的时间分别为 0.036、0.024 和 0.016 s,行星架实际转角与设计转角误差为 $\pm 3^\circ$,在 $62^\circ \sim 88^\circ$ 范围内波动。误差主要来源于加工精度不足导致装配存在间隙。图 9 中秧针末端静轨迹,与图 6 中理论静轨迹相比基本吻合,不吻合的原因有:①加工误差。②试验误差(即拍摄时摄像头位置不准)。③描点误差(视频处理时某些位置标志点无法看清导致拾取误差)。

由此可知,该推秧装置的实际静轨迹与理论静轨迹基本一致,验证了理论建模以及反求结果的正

确性。

6 结论

(1)步行式插秧机等径凸轮推秧装置在传统推秧装置的基础上,取消推秧弹簧,使插秧机能够在不同速度下正常作业,并且解决了推秧提前或滞后的问题,同时较好地满足了插秧农艺要求和推秧农艺要求。

(2)等径凸轮推秧装置具有比共轭凸轮推秧装置更小的外形尺寸和压力角,结构更加小巧紧凑,具有更好的动力学特性。

参 考 文 献

- Vareed Thomas Edathiparambil. Development of a mechanism for transplanting rice seedling[J]. Mechanism and Machine Theory, 2002, 37(9): 395 ~ 410.
- 陈建能,王英,张翔,等. 基于共轭凸轮的强制推秧机构反求设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 98 ~ 102.
Chen Jianneng, Wang Ying, Zhang Xiang, et al. Reverse design of compulsory seedling-pushing mechanism based on conjugate cam[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 98 ~ 102. (in Chinese)
- 陈建能,王英,赵雄,等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置的反求设计及仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 78 ~ 82, 37.
Chen Jianneng, Wang Ying, Zhao Xiong, et al. Reverse design and simulation of walking-type rice based on conjugate cam transplanter's seedling-pushing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 78 ~ 82, 37. (in Chinese)
- 王英,陈建能,周丽莎,等. 步行式插秧机共轭凸轮推秧装置动力学分析及试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 51 ~ 57.
Wang Ying, Chen Jianneng, Zhou Lisha, et al. Dynamic analysis and experiment of the conjugate cam seedling-pushing device applied on walking-type rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 51 ~ 57. (in Chinese)
- 谢仁华,管嫦娥. 椭圆齿轮传动后插式分插机构动力学分析与试验[J]. 机械传动, 2009, 33(6): 78 ~ 81.
- 俞高红,谢仁华,赵匀. 椭圆齿轮传动后插旋转式分插机构运动分析与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 45 ~ 48.
Yu Gaohong, Xie Renhua, Zhao Yun. Kinematic analysis and experiment of backward rotary transplanting mechanism with elliptical gears transmission [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 45 ~ 48. (in Chinese)
- Chen Jianneng, Zhao Yun, Yu Gaohong, et al. Establishment and verification of dynamics model of seedling-pushing device in transplanting mechanism with planetary elliptic gears[J]. Transactions of CSAE, 2003, 19(5): 71 ~ 76.
- 陈建能,赵匀. 高速插秧机椭圆齿轮行星系分插机构的参数优化[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 46 ~ 49.
Chen Jianneng, Zhao Yun. Parameters optimization of transplanting mechanism with planetary elliptic gears for high-speed transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 160 ~ 162.
- 赵匀. 机构数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 55 ~ 60.
- 彭波,孙一林. Visual Basic 编程技术全接触[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
- 陈锦昌,陈亮. 计算机图形学基础[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2010.
- 赵匀. 农业机械计算机辅助分析和设计[M]. 北京:清华大学出版社, 1998: 163 ~ 188.

(上接第 7 页)

- 严天一,任坤儒,王玉林,等. 车辆半主动悬架系统模糊混合控制策略[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 11 ~ 15, 27.
Yan Tianyi, Ren Kunru, Wang Yulin, et al. Fuzzy hybrid control strategy of semi-active suspensions for vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 11 ~ 15, 27. (in Chinese)
- 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 11 ~ 15.
Chen Ping, Chen Wuwei, Zhu Hui, et al. Modeling and simulation on stochastic road surface irregularity based on Matlab/Simulink [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 11 ~ 15. (in Chinese)