

# XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统\*

伟利国<sup>1</sup> 张 权<sup>2</sup> 颜 华<sup>3</sup> 刘阳春<sup>1</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院机电技术应用研究所, 北京 100083;

2. 中国农业机械化科学研究院新闻与信息部, 北京 100083;

3. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

**【摘要】** 以 XDNZ630 型水稻插秧机为试验平台, 采用 RTK - GPS 定位技术, 进行农业机械自动导航试验。增加了插秧机转向机构、变速机构和栽插机构的电控功能, 实现了自动控制。根据 GPS 接收机与车载传感器获取车辆姿态信息, 采用 PID 控制方法, 构建转向闭环控制系统, 实现插秧机的自动对行导航及地头转向, 并进行了插秧机路面与田间导航跟踪试验。试验结果表明, 在插秧机对行导航作业中, 车辆行进速度不大于 0.6m/s 时, 对行跟踪误差小于 10cm, 完全可以满足插秧作业精度要求。

**关键词:** 水稻插秧机 全球定位系统 导航

**中图分类号:** S375; TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0186-05

## GPS Automatic Navigation System Design for XDNZ630 Rice Transplanter

Wei Ligu<sup>1</sup> Zhang Quan<sup>2</sup> Yan Hua<sup>3</sup> Liu Yangchun<sup>1</sup>

(1. *Institute of Mechatronics Technology and Application, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China* 2. *Department of News and Information, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China* 3. *State Key Laboratories in Areas of Soil - Plant - Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China*)

### Abstract

An automatic navigation system was developed on XDNZ630 rice transplanter using RTK - GPS technology. The steering mechanism, gear change mechanism and transplanting mechanism of the rice transplanter were modified from manual control system to electronic control system by using servo motors. According to the position information of the rice transplanter acquired from GPS receiver and vehicle sensors, the close-loop feedback control system of steering was built. The system can accurately control rice transplanter to follow row navigating and turn around at the end of the field by PID tracking method. The road and field experimental results indicated that the lateral tracking error could be kept within 10 cm when the speed of the rice transplant was not greater than 0.6 m/s. The control system can completely satisfy the precision requirement of rice transplanting.

**Key words** Rice transplanter, Global position system, Navigation

### 引言

目前在农业工程中应用最广泛的自动导航技术是 GPS、机器视觉以及多传感器融合技术。随着全球定位系统精度的不断提高以及应用成本的下降, GPS 技术在精准灌溉、施肥、农业智能机器人以及农用车的导航定位方面的应用越来越广泛<sup>[1~4]</sup>。

为满足水稻插秧的农艺要求, 插秧机作业时在保证行距均匀, 直线成行栽插, 以便后期管理和收获。由于土壤条件多变, 作业环境艰苦, 驾驶员的驾驶水平及长时间枯燥乏味的跟踪驾驶, 对插秧作业的准确性有很大影响, 易产生重行、漏行等问题, 从而影响产量。插秧机实现 GPS 自动导航将有效地减轻驾驶员的劳动强度, 提高生产率及水稻产量。

收稿日期: 2010-12-20 修回日期: 2011-02-27

\* 国家高技术研究计划(863 计划)资助项目(2006AA10A305)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAC55B01)

作者简介: 伟利国, 高级工程师, 主要从事精准农业智能控制研究, E-mail: weilg78@126.com

本文以 XDNZ630 型水稻高速插秧机为平台,增加行走与栽插机构电控功能<sup>[5-6]</sup>,结合 GPS 技术与智能控制策略,使插秧机能跟踪预设路径行走,实现插秧机自动导航作业。

## 1 插秧机平台结构改进

将农田作业机械人工驾驶和手工操作机构改进为电控机构是实现农田作业机械自动导航控制和变量作业的关键之一。XDNZ630 型高速水稻插秧机为四轮驱动的 6 行乘坐式插秧机,行距 30 cm,发动机最大功率 13.2 kW,田间最大行驶速度 1.2 m/s。为实现插秧机自动导航作业,分别对 XDNZ630 型高速插秧机的液压助力转向机构、HST 无级变速系统、制动系统、液压升降控制系统、地面仿形进行改进,如图 1 所示。液压升降控制采用电动推杆推动液压阀控制杆,再由插秧机液压系统实现秧苗台及栽插机构的上升和下降动作(图 1f)。为使插秧机在地头可以实现自动原地掉头和应对突发情况下的紧急制动,对左右轮制动方式进行了改进,如图 1c、1g 所示。左右制动控制采用电动推杆推动制动连板,实现左右轮的制动。

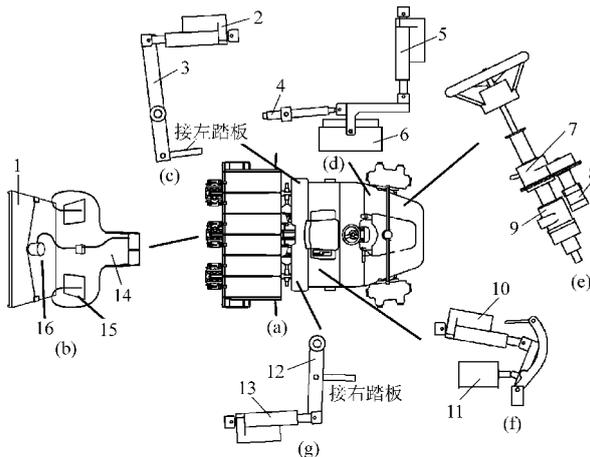


图 1 插秧机改进后示意图

Fig. 1 Diagram of rice transplanter operating mechanism transformation

- (a) 插秧机 (b) 仿形控制系统 (c) 左制动机构  
(d) HST 无级变速系统 (e) 转向机构  
(f) 升降控制系统 (g) 右制动机构

1. 秧盘 2、5、10、13. 电动推杆 3、12. 连板 4. 位移传感器  
6. HST 7. 离合齿轮箱 8. 转向电动机 9. 液压助力器 11. 液压阀 14. 角度传感器 15. 浮舟 16. 执行电动机

### 1.1 转向机构

国内外对转向控制系统进行了较多研究,常用方法可分为电液控制方法和电动机控制方法<sup>[7]</sup>。XDNZ630 型水稻插秧机转向机构由方向盘、液压转向助力器和齿轮传动箱组成。转向机构由转向电动机驱动离合齿轮箱,带动液压转向助力器,从而模仿

人工驾驶操作方向盘,如图 1e 所示。转向电动机选用日本安川 SGMJV-04AAA61 型交流伺服电动机,额定功率 400 W,额定扭矩  $M_0 = 1.27 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,额定转速  $n_0 = 3\ 000 \text{ r/min}$ 。转向电动机经减速器后通过离合齿轮箱将动力传到液压转向助力器上,再经主变速箱驱动转向轮。转向输出轴末端安装角度传感器,反馈转向角度。离合齿轮箱是为了自动和手动操作切换而自行设计的,其结构示意如图 2 所示。主动齿轮与牙嵌齿轮保持啮合状态,通过离合控制杆带动拨叉拨动牙嵌上下移动,牙嵌与牙嵌齿轮结合时,通过电动机传动,转向机构处于自动模式,反之,转向机构为手动模式,通过方向盘控制转向。

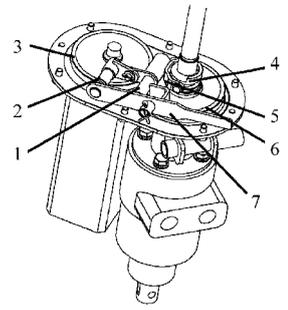


图 2 离合齿轮箱机构示意图

Fig. 2 Structure of clutch gear box

1. 拨叉回转轴 2. 控制杆回转轴 3. 主动齿轮 4. 牙嵌 5. 拨叉 6. 牙嵌齿轮 7. 离合操作切换而自行设计的,控制杆

根据测定<sup>[8]</sup>,插秧机正常工作时方向盘转动所需力矩  $M_z \geq 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。在本设计中,电动机减速器减速比  $i_0 = 40$ ,离合齿轮箱传动比  $i_1 = 1$ ,减速电动机动力经离合齿轮箱后输出扭矩

$$M_1 = M_0 i_0 i_1 = 50.8 \text{ N}\cdot\text{m} > M_z$$

主变速箱转向传动齿轮减速比  $i_2 = 10.5$ ,转向输出轴额定转速

$$n_1 = \frac{n_0}{i_0 i_1 i_2} = 7.14 \text{ r/min}$$

转向时插秧机前轮的转向极限位置由转向桥上的限位螺栓限定,内侧轮转向极限角为  $45^\circ$ 。采用三维设计软件建立转向轮、转向桥、转向四杆机构的模型,分析得出:内侧车轮转向  $45^\circ$  时,外侧车轮转动约  $32^\circ$ ,中间转向输出轴摆杆转动约  $36^\circ$ 。可知转向轮从左极限转至右极限位置时,转向输出轴转角  $\theta = 72^\circ$ ,所需时间

$$t = \frac{\theta}{\frac{360n_1}{60}} = 1.68 \text{ s}$$

考虑机械传动的损失、田间作业时的打滑率,自动转向机构在动力及时间上完全可以满足操作需要。

### 1.2 HST 无级变速系统

插秧机通过调节 HST 中液压阀内流体的流向和流量实现行驶过程中前进或后退的无级变速控制。将手动控制 HST 操作杆改为电动推杆驱动,如图 1d 所示。电动推杆行程为 80 mm,额定扭矩为

75 N·m,工作电压 12~24 V。电动推杆动作时推动控制连板转动实现对阀的控制。在 HST 控制连板上安装位移传感器,反馈阀的控制位置,位移传感器的伸出长度对应电动推杆相应的伸出长度,对应尺寸事先通过试验得到,并存储于车载计算机中,通过实时检测位移传感器的反馈量,精准控制电动推杆的长度,实现插秧机的无级变速。经测试,电动推杆工作电压为 24 V 时,HST 变速系统从停止挡到前进最高速挡,电控装置执行时间为 2.1 s;从停止挡到后退最高速挡,电控装置执行时间为 1.9 s,满足田间作业要求。

### 1.3 仿形控制系统

XDNZ630 型水稻插秧机工作时,地面仿形机构可随着地势纵向高、低变化,通过液压控制上、下起伏动作,但横向地势的变化,无法做到地面仿形,行与行之间插秧深度的一致性无法得到保证。本文设计了栽插机构横向地面仿形机构,如图 1b 所示。栽插机构仿形反馈控制系统由现场控制器、左右浮舟、角度传感器、执行电动机组成。栽插机构上左、右 2 个浮舟通过扎线与角度传感器相连,左右浮舟可以随着插秧盘左、右地面起伏而上、下浮动,角度传感器感知浮舟的起伏动作,现场控制器采用 PID 控制方法控制执行电动机动作,执行电动机带动栽插机构做相应的调整,从而实现栽插机构横向的地面仿形,保证插秧深度一致。经测试,该仿形控制系统控制精度为  $\pm 2^\circ$ ,有助于提高插秧作业合格率。

## 2 自动导航系统

### 2.1 系统结构

插秧机自动导航系统具备两方面的功能:一是定位,即精确判断插秧机当前相对于已知参考点的位置以及插秧机的姿态;二是控制,即决策和执行必要的操纵控制量,使插秧机可以在预定的路线上行走。插秧机自动导航系统包括 GPS、车载计算机、微控制器、传感器及各执行机构等部分组成,系统组成

如图 3 所示。

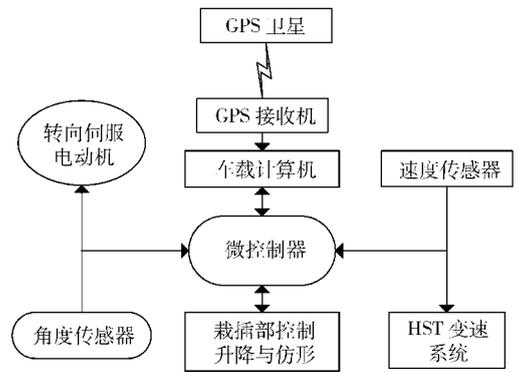


图 3 自动导航系统

Fig. 3 Automatic navigation system

GPS 采用 RTK 定位方式,基准站为 Trimble 5700 接收机,移动站为 AgGPS 332 农业型 GPS 接收机,静态定位精度小于 2 cm,定位信息输出频率设定为 5 Hz。采用高性能的车载计算机为整个插秧机平台导航控制中心,通过处理 GPS、角度传感器信息实现智能行为决策,输出导航信息指令。微控制器通过 AD 模块实时采集角度、速度传感器测量值,获取导航控制过程中插秧机姿态信息,根据车载计算机的导航信息指令,控制转向电动机驱动器正确地执行动作,调整 HST 变速系统,控制车速在一定范围内,以及实现液压升降与地面仿形控制。微控制器与车载计算机之间通过串口进行数据传输。转向电动机则完成驱动力传递,带动转向轮偏转,及时准确地实现转向动作。

### 2.2 转向控制

插秧机自动导航控制中主要是转向控制。转向电动机控制器采用 PID 控制方式,其控制框图如图 4 所示。微控制器通过角度传感器采集当前转向轴的转角信息,并作为反馈值返回给车载计算机。车载计算机根据偏航距离、偏航角度与插秧机转向轴当前转角信息,由已建立的模糊控制规则,给出转向控制策略,然后微控制器输出控制信号,控制转向电动机动作,从而构成转向闭环控制系统<sup>[9-10]</sup>。

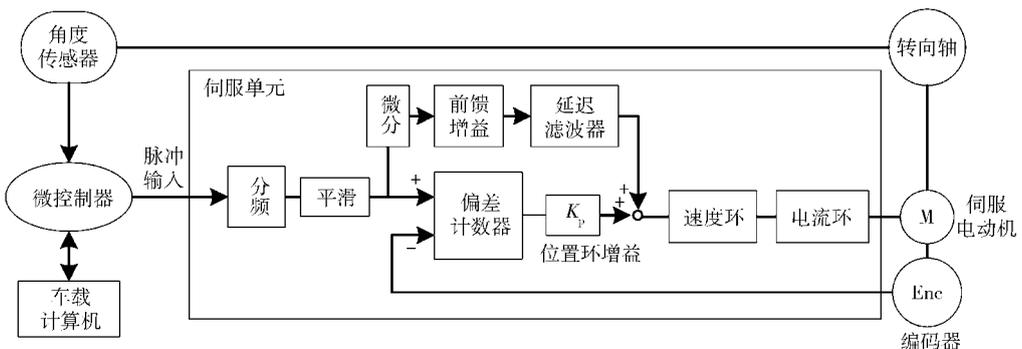


图 4 转向控制框图

Fig. 4 Diagram of steering control

### 3 试验

#### 3.1 沥青路面试验

为了检测插秧机自动导航系统的导航精度,在中国农业机械化科学研究院小王庄试验站附近选取一段宽阔的沥青路,进行了插秧机对行导航试验。

##### 3.1.1 试验步骤

首先在沥青路面两端确定 2 个点 A、B, AB 直线距离大于 70 m, 利用 GPS 接收机测定 2 点经、纬度信息, 并通过车载计算机内路径规划软件设定预定行走的 AB 直线路径。将滴水式划线器安装在插秧机上, 用来标记插秧机地面行走轨迹。划线器与 GPS 导航天线安装在插秧机中心轴线上。启动导航控制系统, 插秧机以一定的速度自动导航, 同时划线器对行走路径进行标记。插秧机整个行进过程分为上线和对行导航 2 个阶段。开始为上线过程, 即行走路径与预定路径垂直误差小于 10 cm, 连续大于 3 s 以上, 插秧机即完成上线过程。接着为对行导航过程, 即与预定路径进行比较, 衡量插秧机对行精度。

##### 3.1.2 试验结果

插秧机自动导航完成后, 在地面 AB 两点拉一条白色细渔线, 作为导航基准线, 划线器记录的插秧机行走路径与导航基准线进行比较, 如图 5 所示。使用米尺测量两者之间的垂直偏移距离, 试验数据如表 1 所示。经试验检测, 插秧机行走速度小于等于 3 km/h 时, 自动对行导航误差小于 10 cm。

#### 3.2 田间试验

田间试验在天津市农机化示范推广中心水田中进行, 水田泥脚深度 20 ~ 30 cm。插秧机行走速度 0.6 m/s。GPS 接收机实时记录插秧机作业行走位置的经、纬度数据, 然后对经、纬度数据进行 Gauss 坐标转换处理, 绘制实际跟踪轨迹, 从而对导航系统进行评价和分析。图 6 为田间试验及作业跟踪行走轨迹, 从图中可以看出, 除了地头转向处出现较大跟踪

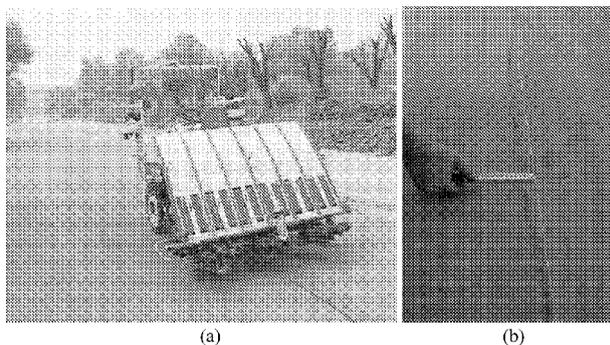


图 5 现场测量照片

Fig. 5 Pictures of the actual measurement

(a) 自动导航 (b) 测量误差

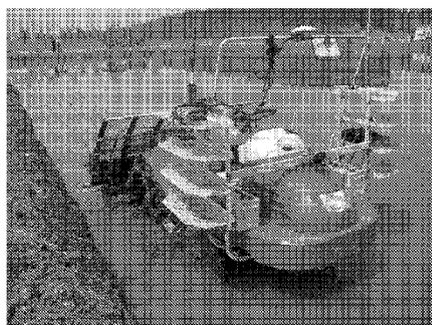
表 1 试验结果

Tab. 1 Experimental data

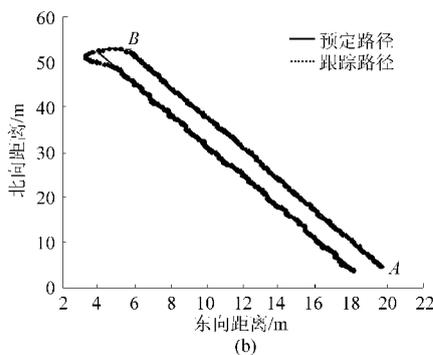
行程编号	行进速度/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	采样点编号	采样点偏差/cm
L1	1.8	1	4.5
		2	3.0
		3	0
		4	2.5
		5	4.0
L2	2.2	6	5.0
		7	6.5
		8	6.0
		9	8.5
		10	8
		11	7.5
		12	9.0
L3	2.5	13	4.5
		14	0
		15	2.5

误差外, 跟踪轨迹与预定路径基本吻合。在地头转向和直线对行跟踪的衔接处, 出现较大跟踪误差, 除了与机械最大转向角相关外, 控制策略方面还需进一步改进。

经试验测量, 插秧机对行跟踪误差不大于



(a)



(b)

图 6 田间跟踪试验结果

Fig. 6 Line tracking result of rice transplanter

(a) 试验现场 (b) 跟踪轨迹

10 cm, 自动驾驶系统具有良好的控制精度和稳定性, 能够满足水稻插秧的自动对行作业要求。

#### 4 结论

(1) 为了进行农业机械导航和变量作业试验研究, 将 XDNZ630 型插秧机的行走与栽插机构进行电控改造, 以伺服电动机为动力, 设计了基于 GPS 技

术的控制器, 实现了插秧机的自动驾驶作业。

(2) 转向机构采用永磁型伺服电动机驱动, 控制器采用了位置控制方式, 闭环反馈控制方法实现了转向系统的自动跟踪控制。

(3) 插秧机在田间试验时, 在车辆行进速度不大于 0.6 m/s 时, 跟踪最大误差小于 10 cm, 基本满足插秧机自动对行的精度要求。

#### 参 考 文 献

- 1 李建平, 林妙玲. 自动驾驶技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 232 ~ 236.  
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 232 ~ 236. (in Chinese)
- 2 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95 ~ 97.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95 ~ 97. (in Chinese)
- 3 Yoshisada Nagasaka, Naonobu Umeda, Yutaka Kanetai, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 223 ~ 234.
- 4 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动驾驶控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.  
Zhang Zhigang. Automatic guidance system based on DGPS for rice transplanter [D]. Guangzhou: South China Agriculture University, 2006. (in Chinese)
- 5 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118 ~ 122.  
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 118 ~ 122. (in Chinese)
- 6 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 88 ~ 92.  
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 7 Zhang Q. A generic fuzzy electrohydraulic steering controller for off-road vehicles [J]. Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(9): 791 ~ 799.
- 8 孙恒, 陈作模. 机械原理 [M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- 9 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2000.
- 10 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 1 ~ 5.  
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1 ~ 5. (in Chinese)

(上接第 222 页)

- 5 孙久荣, 郭策, 程红, 等. 蛻螂与壁虎刚毛的比较及改形对其功能的影响[J]. 动物学报, 2005, 51(4): 761 ~ 767.  
Sun Jiurong, Guo Ce, Cheng Hong, et al. Comparison of the setae between the dung beetle *Copris ochus* and the gecko *Gekko gekko* and the effects of deformation on their functions [J]. Acta Zoologica Sinica, 2005, 51(4): 761 ~ 767. (in Chinese)
- 6 佟金, 孙霁宇, 张书军, 等. 神农蛻螂前胸背板表面形态分形及润湿性[J]. 农业机械学报, 2002, 33(4): 74 ~ 76.  
Tong Jin, Sun Jiyu, Zhang Shujun, et al. Fractal and wettability of pronotum surface morphology of *Catharsius molossus* Linnaeus [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4): 74 ~ 76. (in Chinese)
- 7 张金. 三种昆虫膜翅结构仿生模型与纳米力学[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
Zhang Jin. Structural biomimetic models and nanomechanics of membranous wings of three species of insects [D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)