

旋转式水稻插秧机移箱机构耐磨损设计*

赵 匀 黄节泵 张玮炜

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

【摘要】 相对于曲柄摇杆乘坐式水稻插秧机,旋转式水稻插秧机速度提高了1倍,移箱机构速度和秧箱质量增加,使双螺旋轴滑道两端冲击载荷增加了5倍,滑块和双螺旋轴两端滑道磨损严重。为了减小磨损和冲击,在双螺旋轴两端配置缓冲弹簧。通过建立滑道、滑块的运动学和动力学模型以及编写优化程序,得出双螺旋轴两端回转槽优化曲线和缓冲弹簧弹性系数。优化后,在缓冲弹簧的作用下滑块与双螺旋轴两端滑道的作用力显著减小,使采用尼龙替代优质钢材加工双螺旋轴具有可行性。对各种尼龙材料和钢材加工的双螺旋轴和滑块进行了耐磨性对比试验。试验结果表明,耐磨尼龙66双螺旋轴和45号淬火钢滑块能够满足插秧机的工作寿命要求。

关键词: 水稻插秧机 移箱机构 耐磨损设计

中图分类号: S223.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0058-05

Design of Wear-resistance Seeding Feeder Mechanism of Rotary Rice Transplanter

Zhao Yun Huang Jiepeng Zhang Weiwei

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

Abstract

Compared to crank-rocker riding rice transplanter, the speed of rotary rice transplanter is doubled. In addition, the force impact on the ends of the rotative phase of double helix axis are five times stronger with the quality of feeder moving mechanism and rice seedings box is added. So the abrasion between the slider and the slide is more serious. In order to reduce the abrasion and impact, buffer springs were equipped to both ends of the double helix axis. By setting up the kinematic and dynamic models of slider and slide and writing the optimizing program, the optimal curve in rotative trough at both ends of the double helix axis and the stiffness coefficient of the buffer spring were obtained. After optimization, the force between the slider and the slide were cut down observably referring to the buffer spring added to both ends of the double helix axis, which made the use of nylon material instead of rolled steel to produce double-helix axis feasible. Nylon materials and rolled steel were used to produce double-helix axis and slide, then comparison experiments of attrition resistance were carried out. The result of the experiments indicated wear-resisting nylon 66 double-helix axis and quench steel No. 45 could conform to the rice transplanter's working longevity.

Key words Rice transplanter, Seeding feeder mechanism, Wear-resistance design

引言

相对于曲柄摇杆乘坐式水稻插秧机,旋转式水稻插秧机速度提高了1倍,相应的移箱机构速度增

加了1倍,秧箱和秧苗的质量增加了0.5倍,致使移箱机构的动能和双螺旋轴滑道两端冲击载荷增加了5倍,滑块和双螺旋轴两端滑道磨损严重。文献[1]中在优化移箱机构缓冲弹簧的弹性系数时,缓冲弹

簧完全抵消了滑块对滑道的压力。这样设计存在两个弊端,首先在双螺旋轴的非回转阶段,滑块对滑道也存在压力,所以在双螺旋轴的回转阶段滑块对滑道的压力没有必要完全抵消;其次,插秧机在地头的插秧速度变慢,相应滑块的移动速度变小,此时缓冲弹簧产生的弹力在抵消滑块对滑道的压力外,还对滑道产生一个反向压力,造成滑道的严重磨损。本文针对先前研究中存在的问题,建立移箱机构改进后的运动学和动力学模型,通过对模型进行优化并结合虚拟样机试验对添加缓冲弹簧前、后的效果进行对比,最终设计耐磨损移箱机构。考虑到双螺旋轴的加工比较麻烦(特别是两端回转曲线),导致加工成本较高,利用尼龙材料加工双螺旋轴,以减小双螺旋轴的生产成本和减小质量。

1 移箱机构缓冲装置

移箱机构是通过双螺旋轴的转动,带动滑块向左或向右移动,从而带动秧箱移动(图1)。在双螺旋轴两端的秧箱回转阶段,滑块在很短时间内带动秧箱实现减速、变向和加速3个运动过程,使得滑块和滑道之间产生很大的磨损和冲击,此时的磨损和冲击比正常移动过程要大很多。在双螺旋轴的两端安装缓冲弹簧能有效减小磨损和冲击。

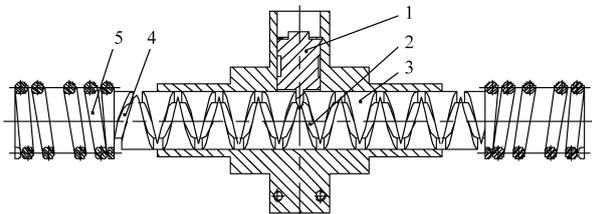


图1 滑块和双螺旋轴的安装位置示意图

Fig.1 Installation location of slider and double helix axis

1. 滑块 2. 滑道 3. 双螺旋轴 4. 滑块回转槽 5. 缓冲弹簧

2 运动学和动力学模型的建立

滑块带动秧箱的移动过程分为正常移动阶段和回转阶段。在正常移动阶段,滑块和滑道之间的作用力(图2)主要是由秧箱与秧箱架的摩擦力引起的(滑块自身的质量和滑块与滑道之间摩擦力忽略不计)。此时秧箱与秧箱架的摩擦力 $F_x = mg\mu$, 而滑块对滑道的正压力为

$$F_{N1} = F_x \cos\gamma = mg\mu \cos\gamma \quad (1)$$

式中 m ——秧苗、秧箱及其附件的质量

μ ——秧箱与秧箱架的摩擦因数

γ ——滑道螺旋升角

在回转阶段,滑块和滑道之间的正压力为

$$F_{N2} = F \cos\varphi \quad (2)$$

式中 φ ——滑道与滑块之间的摩擦角

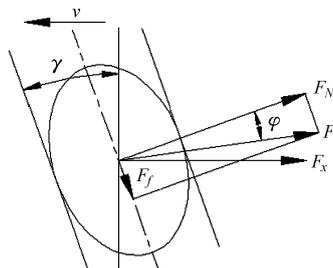


图2 滑块和双螺旋轴滑道受力分析图

Fig.2 Force analysis of slider and double helix axis

秧箱在双螺旋轴两端回转阶段速度的改变是依靠秧箱与秧箱架的摩擦力以及缓冲弹簧的作用力。根据能量守恒原理,建立动力学模型为

$$\frac{1}{2}m(v_0^2 - v^2) = \int_{x_0}^x kx dx + \int_{x_0}^x mg\mu dx \quad (3)$$

式中 v_0 ——滑块的初始速度

v ——某时刻的速度

x_0 ——弹簧预压缩量

x ——滑块某时刻的位置

k ——缓冲弹簧弹性系数

该模型中缓冲弹簧产生的能量和秧箱与秧箱架的摩擦能完全抵消滑块的动能,滑块与滑道的作用力为零。插秧机在地头的插秧次数比一般情况下少,要求滑块的速度 v_0 比一般情况小,此时式(3)中,缓冲弹簧使滑块的速度减为零时滑块带动秧箱还未到达双螺旋轴的换向端点,需要靠双螺旋轴与滑块之间反向摩擦力强迫秧箱换向,加剧双螺旋轴回转阶段滑道磨损。因此,在计算缓冲弹簧的弹性系数时滑块的初始速度 v'_0 要小于正常插秧时的速度 v_0 ,此时弹性系数 k 变成 k' 。当滑块运动到顶端时 $v=0$,弹簧最大压缩量为 x_n ,由式(3)得

$$k' = \frac{mv_0'^2 - 2mg\mu(x_n - x_0)}{x_n^2 - x_0^2} \quad (4)$$

将 $v = dx/dt$ 代入式(3),弹性系数 k' 替代 k ,初始速度 v'_0 替代 v_0 ,化简得到

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \sqrt{-\frac{k'}{m}x^2 - 2g\mu x + v_0'^2 + \frac{k'}{m}x_0^2 + 2g\mu x_0} \\ x &= \frac{\sqrt{b^2 + 4acs} \sin(t\sqrt{a} + c_0) + b}{2a} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $a = \frac{k'}{m}$ $b = -2g\mu$ $c = v_0'^2 + \frac{k'}{m}x_0^2 + 2g\mu x_0$

$$c_0 = \arcsin\left(\frac{2ax_0 - b}{\sqrt{b^2 + 4ac}}\right)$$

秧箱从回转开始到回转结束,滑块刚好转过一周,滑块从 x_0 到 x_n ,再从 x_n 到 x_0 分别转过 180° ,则

转角 θ 与 x 的关系为

$$\theta = 180x/x_n \quad (6)$$

将式(5)代入式(6),化简得

$$\theta = 180 \frac{\sqrt{b^2 + 4acs} \sin(t\sqrt{a} + c_0) + b}{2ax_n} \quad (7)$$

当移箱机构滑块的速度为 v_0 , 在弹性系数为 k' 的缓冲弹簧作用下, 建立改进后的动力学模型为

$$\frac{1}{2}m(v_0^2 - v^2) - \int_{x_0}^x k'xdx - \int_{x_0}^x mg\mu dx = \int_{x_0}^x Fdx$$

利用数值积分方法计算添加弹簧时作用力 F 为

$$F = \frac{mv_i^2 - mv_{i+1}^2 - k'(x_{i+1}^2 - x_i^2) - 2mg\mu(x_{i+1} - x_i)}{2(x_{i+1} - x_i)}$$

式中 v_i, v_{i+1} —— 回转前、后时刻滑块的速度

x_i, x_{i+1} —— 回转前、后时刻滑块的位移

而未添加缓冲弹簧时作用力 F 为

$$F = \frac{mv_i^2 - mv_{i+1}^2 - 2mg\mu(x_{i+1} - x_i)}{2(x_{i+1} - x_i)}$$

3 双螺旋轴滑道优化设计与仿真模拟

根据机构的运动学模型和动力学模型, 基于 Visual Basic 6.0 编写优化软件, 程序优化界面如图 3 所示, 图中曲线即双螺旋轴两端回转阶段展开曲线。用于优化的结构和工作参数为: 分插机构插秧次数 $n = 400$ 次/min, $v_0 = 133$ mm/s, $v'_0 = 100$ mm/s, $m = 90$ kg, $x_n = 10$ mm, $\tan\varphi = 0.03$, $\mu = 0.06$, $x_0 = 0$ 。 μ 值通过模拟实际工况测量计算和对照手册推荐值综合得出。由于在双螺旋轴的两端给弹簧一个预压缩量比较困难, 且 x_0 对双螺旋轴的优化影响不大, 故取 $x_0 = 0$ 。

将双螺旋轴两端回转优化曲线嵌入到双螺旋轴

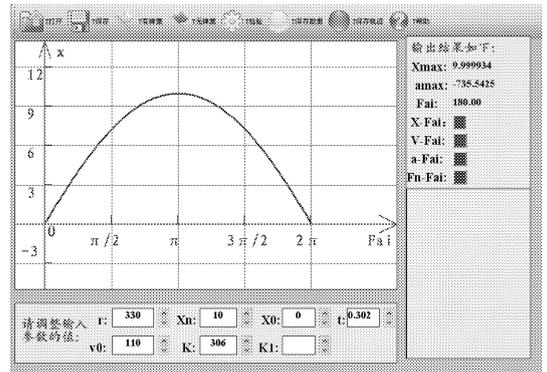
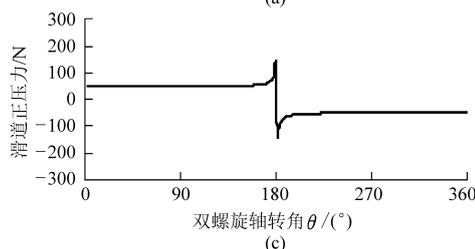
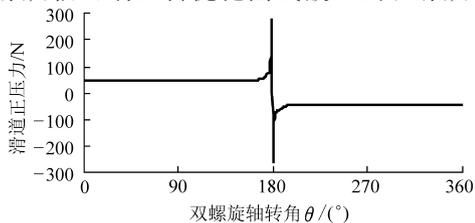


图 3 双螺旋轴优化界面

Fig. 3 Optimization interface of double helix axis

中, 完成双螺旋轴三维建模, 装配高速水稻插秧机移箱机构的三维模型, 导入到 ADAMS 软件完成移箱机构的虚拟样机试验。

4 优化与仿真结果

在双螺旋轴优化程序中, 通过比较添加缓冲弹簧前、后滑块与滑道之间的正压力 F_{N2} 来衡量双螺旋轴两端回转曲线和缓冲弹簧弹性系数的优劣, 此时弹性系数 $k' = 306$ N/mm, 配合移箱机构的虚拟样机试验得到双螺旋轴回转阶段滑块对滑道的正压力曲线(图 4)。从图 4a、4b 可以看出, 双螺旋轴在回转阶段的极限位置会产生一个很大冲击, 导致滑块和双螺旋轴滑道产生严重磨损。从图 4c、4d 可以看出, 添加缓冲弹簧后滑块对滑道绝大部分的冲击被抵消, 避免了双螺旋轴回转阶段严重磨损。通过双螺旋轴回转阶段正压力的 VB 优化曲线和虚拟样机试验曲线比较可以发现, 两者所示的正压力基本吻合, 说明双螺旋轴回转阶段曲线和缓冲弹簧弹性系数的优化是可行的。

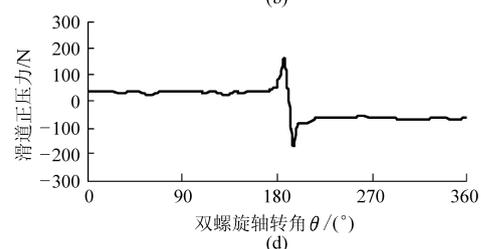
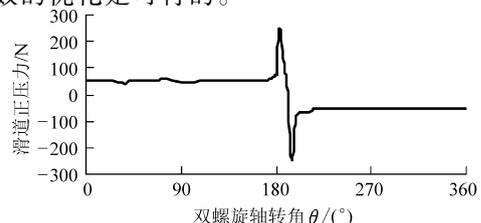


图 4 螺旋轴回转阶段正压力曲线

Fig. 4 Positive pressure curves of double helix axis' rotative phase

(a) 无弹簧缓冲时(VB 优化) (b) 无弹簧缓冲时(ADAMS 仿真) (c) 添加弹簧缓冲时(VB 优化) (d) 添加弹簧缓冲时(ADAMS 仿真)

5 尼龙(PA)材料的应用与试验

双螺旋轴在缓冲弹簧作用下,避免了回转阶段剧烈磨损而导致双螺旋轴局部失效,使得采用尼龙替代优质钢材加工双螺旋轴具有可行性。由于双螺旋轴滑道轨迹复杂,加工成本非常高(加工中心每小时最多加工两根),通过模具生产尼龙材料的双螺旋轴可以大大降低生产成本。

在耐磨损试验台上(图5),通过分组耐磨试验验证适合双螺旋轴工作的尼龙材料以及配套设备的材料。从试验结果(表1)可以看出,增强尼龙66制造的双螺旋轴和滑块在模拟正常插秧情况下4h时滑块已完全失效,耐磨尼龙66制造的双螺旋轴和滑块在相同条件下8h时滑块完全失效,而试验的双螺旋轴滑道经测量无显著变化。图6为磨损前、后

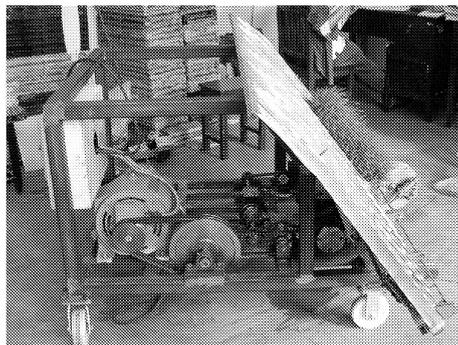


图5 耐磨损试验台

Fig. 5 Abrasion test bed

(左边磨损前,右边磨损后)双螺旋轴(端部)和滑块。在耐磨试验中,当滑块向左移动时滑块的右侧始终与双螺旋轴右侧与滑块等长的滑道接触,而当滑块回转后,向右移动时滑块的左侧始终与双螺旋轴左侧与滑块等长的滑道接触。

表1 尼龙材料试验安排与结果

Tab.1 Test of nylon material

试验序号	试验对象	试验条件	试验时间	试验结果
1	增强尼龙66双螺旋轴和增强尼龙66滑块	黄油润滑,转速400 r/min,载荷约800 N (模拟正常插秧情况)	4 h	滑块与双螺旋轴接触部分全部磨损,双螺旋轴滑道凭借肉眼观察和游标卡尺测量均无显著变化
2	耐磨尼龙66双螺旋轴和耐磨尼龙66滑块	黄油润滑,转速400 r/min,载荷约800 N (模拟正常插秧情况)	8 h	滑块与双螺旋轴接触部分全部磨损,双螺旋轴滑道凭借肉眼观察和游标卡尺测量均无显著变化
3	增强尼龙66双螺旋轴和45号淬火钢滑块	黄油润滑,转速400 r/min,载荷约800 N (模拟正常插秧情况)	50 h	双螺旋轴滑道凭借肉眼观察和游标卡尺测量均无显著变化
4	耐磨尼龙66双螺旋轴和45号淬火钢滑块	黄油润滑,转速400 r/min,载荷约800 N (模拟正常插秧情况)	50 h	双螺旋轴滑道凭借肉眼观察和游标卡尺测量均无显著变化

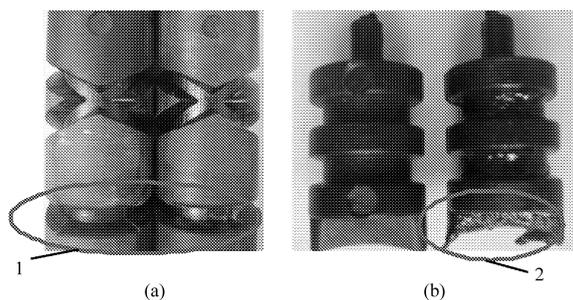


图6 磨损试验前后的双螺旋轴(端部)和滑块

Fig.6 Fore-and-aft abrasion test of double helix axis (end) and slider

(a) 双螺旋轴(端部) (b) 滑块

1. 双螺旋轴回转槽 2. 磨损后的滑块

在移动过程中,滑块一直处于磨损状态,而双螺旋轴滑道只与滑块接触部分处于磨损状态,其他绝大部分滑道处于非接触状态。且二者受力和材料均相同,因此滑块磨损量约等于双螺旋轴滑道的总磨损量,滑块上端磨损长度为4 mm,双螺旋轴滑道总长度为880 mm,因此双螺旋轴滑道一侧磨损率为

$l = 2/880 = 0.23\%$ 。实际测试验证了以上分析,当滑块完全磨掉后,双螺旋轴滑道的磨损量非常小,不易通过肉眼观察和一般的测量工具测量得到,因此通过试验中滑块的磨损量计算求取双螺旋轴的磨损量与失效的总时间。当双螺旋轴滑道一端的磨损量超过0.6 mm时工作失效,试验1所选用的增强尼龙66双螺旋轴失效的总时间为 $T_1 = 4 \times 0.6/0.0023 = 1043$ h,而试验2所选用的耐磨尼龙66双螺旋轴失效的总时间 $T_2 = 8 \times 0.6/0.0023 = 2086$ h。按照一台高速插秧机工作寿命1500 h(参考国内相关插秧机使用情况)计算,增强尼龙66双螺旋轴的使用寿命不能满足插秧的时间要求,而耐磨尼龙66双螺旋轴完全满足插秧时间要求。试验3和4分别是验证在同样的试验条件下将尼龙材料滑块换成45号淬火钢滑块,在50 h的时间内双螺旋轴滑道的磨损量,凭借肉眼观察和游标卡尺测量无显著变化。根据模拟实际工况测量和对照手册推荐值可知,试验2的试验对象动摩擦因数 $\mu_1 = 0.35$,而试验4的试

验对象的动摩擦因数 $\mu_2 = 0.039$, 可见 μ_2 远小于 μ_1 , 用 45 号淬火钢滑块替换尼龙材料滑块, 双螺旋轴的磨损量会更小, 因此耐磨尼龙 66 双螺旋轴和 45 号淬火钢滑块(滑块加工简单, 无需制作尼龙模具)的工作寿命完全满足插秧机的工作寿命。通过查阅相关资料和测量可知, 耐磨尼龙 66 双螺旋轴的生产成本为 20 元, 质量为 0.24 kg, 而 45 号淬火钢双螺旋轴的生产成本为 120 元, 质量为 1.5 kg。耐磨尼龙 66 双螺旋轴相对于 45 号淬火钢双螺旋轴从生产成本和质量上都有了显著减小。

6 结论

(1) 通过在双螺旋轴两端添加缓冲弹簧, 优化双螺旋轴回转阶段曲线和缓冲弹簧弹性系数, 使得滑块在回转阶段对滑道的正压力显著减小, 避免双螺旋轴回转阶段剧烈磨损而局部失效, 为采用尼龙材料生产双螺旋轴提供了可能性。

(2) 插秧机上的双螺旋轴应用尼龙材料使零件质量变小, 加工成本大大降低。

参 考 文 献

- 1 杨文珍, 赵匀, 李革, 等. 高速水稻插秧机移箱螺旋轴回转轨道优化设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 167 ~ 168.
- 2 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 3 韩玉娟. 圆柱分度凸轮的曲线设计与数控加工解析[J]. 现代制造技术与装备, 2009(4): 32 ~ 33.
Han Yujuan. Cylindrical indexing cam curve design and CNC machining analysis[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2009(4): 32 ~ 33. (in Chinese)
- 4 杨文珍, 杨友东, 赵匀, 等. 高速水稻插秧机四轴移箱机构原理设计[J]. 中国农机化, 2005(5): 67 ~ 69.
Yang Wenzhen, Yang Youdong, Zhao Yun, et al. Design of four-axes seeding feeder mechanism of high efficient rice transplanter[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2005(5): 67 ~ 69. (in Chinese)
- 5 徐飞军, 李革, 赵匀. 水稻插秧机移箱机构的发展研究[J]. 农机化研究, 2008, 30(5): 1 ~ 4.
Xu Feijun, Li Ge, Zhao Yun. Develop and research of the seedling feeder mechanism [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(5): 1 ~ 4. (in Chinese)
- 6 赵匀, 张国凤, 陈建能, 等. 高速水稻插秧机的减冲击移箱机构: 中国, ZL 200510049492. 4[P]. 2007-09-01.
- 7 骆志高, 陈保磊, 庞朝利. 金属塑料复合材料减振耐磨性能的试验研究[J]. 塑料工业, 2009, 37(5): 60 ~ 63.
Luo Zhigao, Chen Baolei, Pang Chaoli. Test research on vibration and anti-wear behaviors of metal-plastic compound materials[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(5): 60 ~ 63. (in Chinese)
- 8 陈传志, 崔冬芳. 含油尼龙材料摩擦系数的影响因素[J]. 铁道技术监督, 2005(12): 9 ~ 11.

(上接第 46 页)

- 3 孙占祥. 辽西旱地农业高产高效技术体系研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
Sun Zhanxiang. Study on technical system of dryland farming for high yield and efficiency in western Liaoning province [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 4 马洪亮, 高焕文, 李洪文, 等. 驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 47 ~ 50.
Ma Honglian, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Experimental study on corn stalk and rootstalk cutting by driven disc[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 47 ~ 50. (in Chinese)
- 5 北京农业工程大学. 农业机械学: 上册[M]. 北京: 农业出版社, 1996.
- 6 包文育. 东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
Bao Wenyu. Study on key parts and holistic device of the no-till planter of the ridge cropping system in northeast area of China [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 7 Grisso R B, Holshouser D, Pitman R. Planter/drill considerations for conservation tillage systems[R]. Virginia Cooperative Extension, 2007: 442 ~ 457.
- 8 高焕文, 李洪文, 姚宗路. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 78 ~ 82.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Yao Zonglu. Study on the Chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78 ~ 82. (in Chinese)