

行星刷式株间锄草机械手优化与试验*

陈子文 李 南 孙 哲 李 涛 张春龙 李 伟
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对根系较发达作物和易板结土壤工况下的株间锄草,设计了行星刷式株间锄草机械手。研究了锄草机械手避苗锄草的工作原理,建立了运动学模型,研究了刷盘上点的运动轨迹和速度曲线随行星轮系传动比变化的规律。将覆盖率、入侵率及保护区范围作为锄草效果的评价指标,通过设计锄草机械手的结构参数,对锄草刷盘运动轨迹进行仿真,分析刀杆偏心距、锄草刷盘直径及装置相对作物行横向偏移对覆盖率和入侵率的影响。仿真结果表明刀杆偏心距 80 mm、横向偏移 20 mm 以及锄草刷盘直径 60 ~ 180 mm 为最优参数,可获得直径 30 ~ 140 mm 的保护区及 80% 以上的株间覆盖率。对优化后的机械手进行大田锄草试验,选用传动比为 3 的行星轮系,平均锄草率可达 89.3%,平均伤苗率为 3.5%,满足锄草要求。

关键词: 机械锄草 株间锄草 机械手 行星轮系 优化

中图分类号: S224.1⁺5; TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0094-06

Optimization and Experiment of Intra-row Brush Weeding Manipulator Based on Planetary Gear Train

Chen Ziwen Li Nan Sun Zhe Li Tao Zhang Chunlong Li Wei
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: An intra-row brush weeding manipulator was designed for the crops with developed root system and compact soil condition. The manipulator is a part of intelligent weeding machine. Brush weeding with brush placed on a vertical rotating axis which is mounted on eccentric shank for avoiding crops is a new method for intra-row weeding. The principles of weeding and crop plants avoiding were studied. The mathematical model of device was established for kinematic analysis. In order to optimize the best structure parameter, the effect of three parameters (eccentricity of brush, diameter of brush, lateral offset) on crop row and trajectory of brush weeding device was analyzed based on Matlab. The results showed that 80 mm eccentricity of brush and 20 mm lateral offset which could acquire more than 80% coverage area of manipulator in the row were optimal parameters. Field trials showed that an average of 89.3% weeds could be removed and 3.5% crops were damaged when the transmission ratio of planetary gear was 3. Therefore, the intra-row weeding manipulator was able to meet the intra-row weeding requirements.

Key words: Mechanical weeding Intra-row weeding Manipulator Planetary gear Optimization

引言

将株间分割成不连续区域,因此机械株间锄草更加困难,目前主要依靠人工。锄草机械手是锄草的执行机构,直接影响锄草效率和效果。O'Dogherty

相对行间杂草,株间杂草更加接近作物^[1],并

收稿日期: 2015-01-12 修回日期: 2015-02-10

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA041507、2013AA102406)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013X1004)和北京高等学校青年英才计划资助项目(31056101)

作者简介: 陈子文,博士生,主要从事农业机器人研究,E-mail: chenziwen_0309@163.com

通讯作者: 张春龙,讲师,主要从事农业机器人和机器视觉研究,E-mail: zcl1515@cau.edu.cn

等^[2]设计了带豁口盘状锄草刀,并提出旋转避苗的思想,通过改变刀盘豁口大小,可以改变作物保护区大小。Home^[3]设计的一款株间行间混联锄草装置,巧妙地采用槽凸轮机构,将电动机的连续旋转运动转化为锄刀往复摆动。Bontsema 等^[4]设计的株间水平旋转弹指刀由直径 30 cm 旋转盘、两个锄刀和弹簧组成,由液压马达驱动,在离心力和弹簧拉力作用下,通过控制装置转速使锄刀向旋转盘外打开或向内收回。胡炼等^[5-6]研制了一款爪齿株间锄草装置,仿真分析其运动参数对锄草效果的影响,室内试验表明装置的避苗和锄草切换控制快速可靠,伤苗率小于 8%。张春龙等^[7-8]研制了基于四轮移动平台的锄草机器人,采用三指手爪锄刀,仿真分析获得锄草率在 90% 以上。张朋举等^[9-10]设计了用于株间作业的八爪式机械锄草装置,并对其进行虚拟样机设计,通过运动仿真优化装置结构和运动参数使锄草伤苗率小于 10%。

本文主要针对根系较发达作物和易板结土壤工况,设计行星刷式株间锄草机械手,并基于 Matlab 轨迹仿真得到最大覆盖率下最优参数;最后通过锄草试验验证该株间机械手的锄草效果,为智能株间锄草技术提供一种新型末端执行方案。

1 行星刷式株间锄草机械手结构与原理

1.1 锄草机械手结构

行星刷式株间锄草机械手为智能锄草机器人的锄草执行单元,锄草装置安装于智能锄草机器人前端,通过拖拉机牵引运动。一个机械手负责一行株间锄草作业,根据大田种植行数要求相应增加或减少其数量。

图 1 为行星刷式株间锄草机械手的结构图,此装置由液压马达或电动机驱动,采用锄草刷盘作为锄草执行部件,通过刷盘相对地面的运动将杂草幼苗从茎部刷断或被土壤覆盖。采用旋转避苗的思想,利用偏心刀杆使机械手通过旋转实现远离作物行或在作物行内 2 种状态,主轴旋转同时带动速度检测装置和位置检测装置,采用增量编码器和齿轮齿传感器配合使用,并实时采集主轴转速和转角。偏心刀杆的旋转带动刀杆、刀杆轴、行星齿轮和锄草刷盘共同绕主轴轴心转动。行星齿轮与固定在箱体上的太阳齿轮构成行星齿轮系机构,从而刀柄轴绕主轴旋转的同时,自身在刀杆内也产生一个转动。

根据行星轮系机构可计算出锄草刷盘自转转速 n_w 与主轴公转转速 n_s 的关系为

$$n_w = \frac{z_1 + z_2}{z_2} n_s = (i + 1) n_s \tag{1}$$

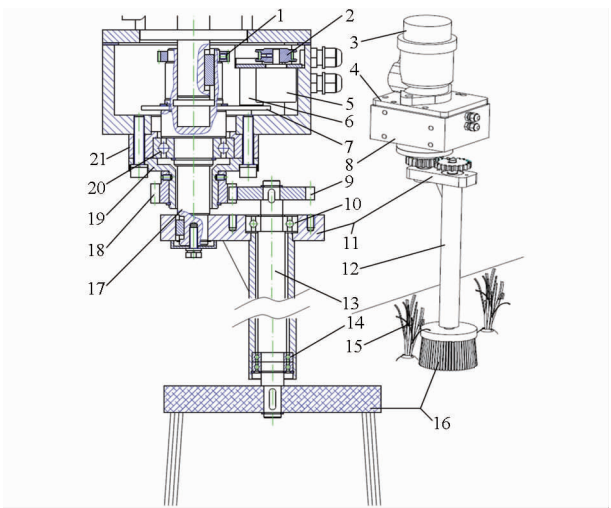


图 1 行星刷式株间锄草机械手结构图

Fig. 1 Intra-row brush weeding manipulator based on planetary gear train

1. 大同步带轮 2. 小同步带轮 3. 液压马达 4. 箱盖 5. 编码器
6. 霍尔开关 7. 霍尔开关检测盘 8. 箱体 9. 行星齿轮
10. 刀杆上端轴承 11. 刀柄 12. 刀杆 13. 刀杆轴 14. 刀杆下端轴承 15. 作物苗 16. 锄草刷盘 17. 主轴 18. 太阳齿轮
19. 太阳齿轮安装座 20. 主轴轴承 21. 轴承座

式中 z_1 ——太阳齿轮齿数
 z_2 ——行星齿轮齿数
 i ——行星轮系传动比

1.2 工作原理及控制方法

锄草装置遇到作物,主轴带动锄草刀杆旋转到离作物行最远的位置;当锄草装置运动到株间位置时,主轴带动锄草刀杆进入株间位置。简化 $y_R = f(x_R)$ 这种旋转控制方法使之更加具有可行性;锄草刷盘从一棵作物运动到下一棵作物主轴旋转一圈,且在作物位置处锄草刷盘应在距离作物行最远的位置,称初始位置。基于控制方法得到 n_s 与车速 v 的关系式为

$$n_s = \frac{1}{L} v \tag{2}$$

式中 L ——作物株距

图 2 为基于该控制方法的刷盘运动轨迹图及其参数, S 为刀杆偏心距, R 为锄刀相对作物行的横向偏移,简称横向偏移, D 为锄草刷盘直径,作物保护区为以作物根茎为圆心的圆形区域,相邻作物保护

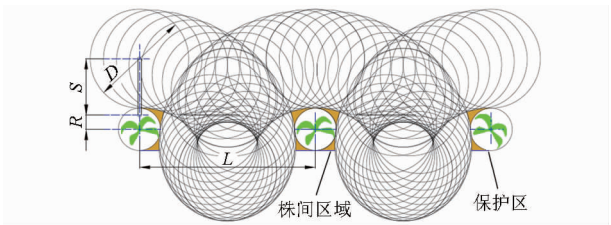


图 2 锄草刷盘运动轨迹和参数

Fig. 2 Brush weeder trajectory and parameters

区中间的区域为株间区域,其中结构参数 S 、 D 及 R 直接影响锄草刷盘运动轨迹在株间区域的覆盖面积。行星轮系传动比 i 、刷盘刷毛材质和长度及机器前进速度 v 直接影响锄草效果。

2 锄草刷盘数学模型及运动学分析

2.1 数学模型

设从一棵作物运动到下一棵作物所需时间为 t_0 ,则根据锄刀运动控制方法,得到主轴角速度 w_s 为

$$w_s = \frac{2\pi}{t_0} = \frac{2\pi v}{L} \tag{3}$$

则锄草刷盘中心点的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_R = vt + S\sin\left(\frac{2\pi v}{L}t\right) \\ y_R = R + S\cos\left(\frac{2\pi v}{L}t\right) \end{cases} \quad (t \in [0, t_0]) \tag{4}$$

式中参数见图 2,该轨迹为摆线,记为 $y_R=f(x_R)$ 。根据行星刷盘运动轨迹模型(如图 3 所示),推导出刷盘边缘点的运动轨迹。点 $(0,0)$ 和点 $(x_L,0)$ 为作物位置,点 $(0,y_1)$ 为主轴中心位置,则 $R=y_1$ 。点 $(0,y_2)$ 为锄草刷盘中心位置,则 $S=y_2-y_1$ 。设 t 时间里,锄草装置向前运动到 $(x_1,0)$ 位置,主轴旋转 α ,锄草刷盘自转角度为 β 。

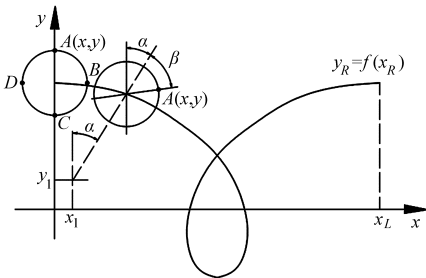


图 3 行星刷式锄草刷盘运动轨迹模型

Fig.3 Trajectory model of brush weeder

锄草刷盘实际转角

$$\alpha + \beta = (1 + i) w_s t \tag{5}$$

从而推出锄草刷盘边缘上点的运动轨迹方程

$$\begin{cases} x = \frac{D}{2} \sin\left((1 + i) \frac{2\pi v}{L} t + c\pi\right) + x_R \\ y = \frac{D}{2} \cos\left((1 + i) \frac{2\pi v}{L} t + c\pi\right) + y_R \end{cases} \quad (t \in [0, t_0]) \tag{6}$$

式中 c 为常数,取 0 、 $1/2$ 、 1 、 $3/2$ 分别对应锄草刷盘最外沿上 A 、 B 、 C 、 D 点的运动轨迹方程。图 4 为当传动比 $i=1$ 时,4 个点的实际运动轨迹。

2.2 运动学分析

锄草刷盘上点速度为 3 个运动速度的合成:车的行进速度、锄草刷盘公转速度和锄草刷盘自转速

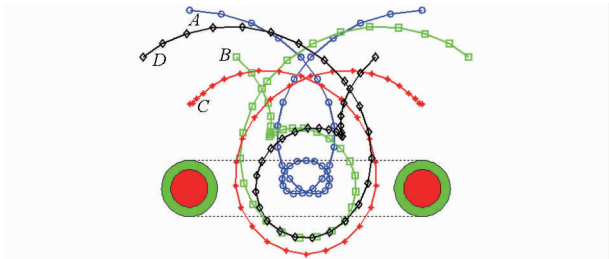


图 4 刷盘上点的运动轨迹

Fig.4 Path of points on brush

度。

锄草刷盘上点的运动速度随时间的变化曲线方程为

$$\begin{cases} v_{wx} = \frac{\pi D v}{L} \frac{z_1 + z_2}{z_2} \cos\left((1 + i) \frac{2\pi v}{L} t + c\pi\right) \\ v_{wy} = -\frac{\pi D v}{L} \frac{z_1 + z_2}{z_2} \sin\left((1 + i) \frac{2\pi v}{L} t + c\pi\right) \end{cases} \quad (t \in [0, t_0]) \tag{7}$$

式中 v_{wx} ——锄草刷盘边缘点运动速度在 x 轴的分量

v_{wy} ——锄草刷盘边缘点运动速度在 y 轴的分量

从而得到刷盘边缘点的线速度

$$v_w = \sqrt{v_{wx}^2 + v_{wy}^2} \tag{8}$$

当刀杆偏心距 S 和刷盘直径 D 确定后,影响锄草刷盘转速的因素为传动比 i 和车速 v 。图 5 为车速在 1 km/h ,传动比 $i=1$ 时,锄草刷盘上 4 个点的线速度曲线。可见刷盘上不同点运动到不同位置时对应的线速度不同,可以弥补无行星轮系结构的锄草装置刷盘上各点的速度趋势一样的缺点。图 6 为不同传动比下 A 点线速度比较,可见增大传动比,可增加刷盘边缘点的平均速度,且产生速度峰值的位移增加。

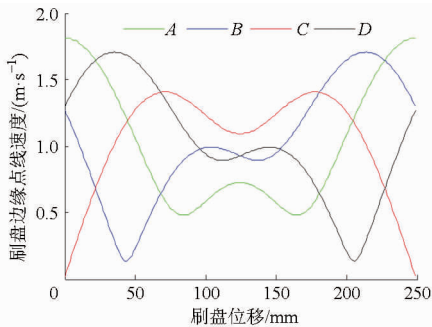


图 5 锄草刷盘上点的线速度曲线

Fig.5 Line speed curves of four points on brush weeder

3 Matlab 轨迹仿真及结构参数优化

3.1 影响锄草刷盘运动轨迹参数

选择玉米播种机播种株距 250 mm 作为仿真

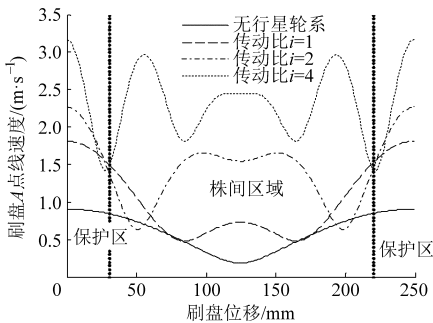


图6 点A在不同传动比下的线速度曲线

Fig. 6 Line speed graph of point A with different gear ratios

的作物间距。选取40、60、80、100 mm 4种不同的刀杆偏心距,并使用4种不同直径的锄草刷盘,分别为60、100、140、180 mm。通过调节横向偏移 R ,使在不同偏心距及不同刷盘尺寸情况下锄草刷盘运动轨迹均获最大作物保护区直径,锄草刷盘运动仿真轨迹如图2所示,其中褐色部分为刷盘运动轨迹未覆盖到的株间区域。通过仿真并计算运动轨迹在株间区域覆盖面积及入侵保护区的面积,得到锄草刷盘运动的覆盖率、入侵率^[8]及其他参数。见表1。

表1 不同结构参数下锄草刷盘运动仿真结果

Table 1 Motion simulation results of weeding brush with different structure parameters					
偏心距/ mm	刷盘直 径/mm	保护区直 径/mm	横向偏 移/mm	覆盖率/ %	入侵 率/%
100	60	120	-15	80.75	1.92
	100	70	-15	88.17	0.02
	140	36	-15	96.96	3.95
	180	0	-15	100	100
80	60	140	20	78.77	0.31
	100	100	20	87.73	0.15
	140	60	20	94.56	0.34
	180	30	20	98.60	1.70
60	60	170	60	48.25	0
	100	130	60	66.35	0
	140	90	60	85.21	0
	180	50	60	93.71	0
40	60	220	100	41.33	0.04
	100	190	100	42.91	0.07
	140	140	100	49.99	0.14
	180	100	100	65.15	0.22

3.2 综合分析及参数优选

根据表1的仿真数据,分析锄草刷盘直径与生成作物保护区的关系,如图7所示。设置最小保护区为30 mm,可见偏心距为80、60、40 mm时,3种尺寸刷盘均满足最小保护区的要求,当偏心距为100 mm时,只能选择150 mm以下的刷盘才能满足最小保护区要求。由于锄草刷盘贴近地表运动,通

过更换不同型号的刷草刷盘,使刷盘运动过程中产生不同直径的作物保护区,来适应不同大小或不同生长时期的作物,因此获得更大范围保护区也是偏心距优选的条件之一,从图中可见偏心距越小获得的最大和最小作物保护区均越大。其中80 mm、60 mm和40 mm偏心距可分别获得30~140 mm、50~170 mm和100~220 mm的保护区范围。

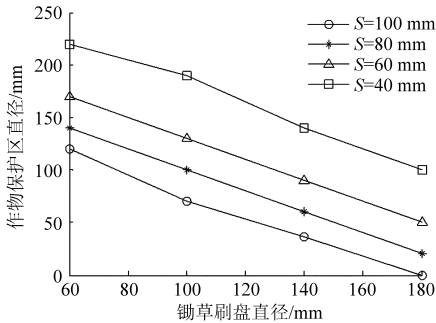


图7 锄草刷盘直径与保护区直径的关系曲线

Fig. 7 Effect of brush weeder diameter on no-till circle diameter

图8和图9分别是4种偏心距情况下锄草刷盘直径与株间覆盖率和入侵率的关系。将大覆盖率和小入侵率作为衡量指标。可见锄草刷盘直径和偏心距与株间的覆盖率成正比关系,当偏心距为100 mm和80 mm时,4种锄草刷盘的株间覆盖率均在80%以上,但入侵率总体较大,100 mm偏心距采用180 mm锄草刷盘入侵率达到100%,无法使用。偏心距为60 mm时,使用130 mm以下的刷盘,获得的覆盖率均小于80%,当采用60 mm锄草刷盘时,覆盖率为48.25%。40 mm偏心距获得的覆盖率均小于70%,最小覆盖率为41.33%。在40 mm和60 mm偏心距下产生的入侵率很小,但覆盖率也过小,导致株间锄草率过低,无法满足株间锄草的要求。

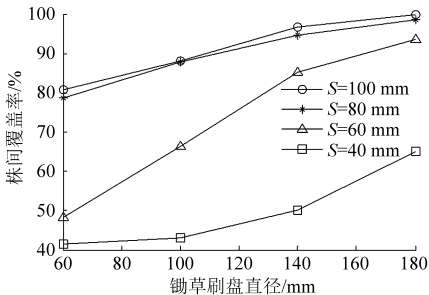


图8 锄草刷盘直径与株间覆盖率的关系曲线

Fig. 8 Effect of brush weeder diameter on coverage ratio of weeding brush in row

综合考虑保护区、覆盖率及入侵率的需求,偏心距80 mm均满足要求。因此选用刀杆偏心距为80 mm、横向偏移20 mm为最优参数,可获得30~140 mm保护区范围,株间覆盖率在80%以上。

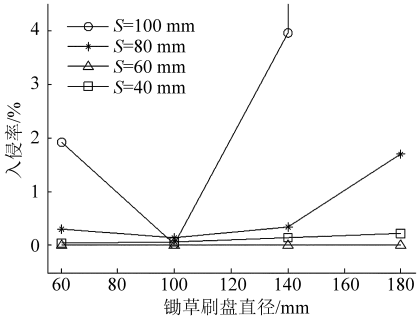


图9 锄草刷盘直径与入侵率的关系曲线

Fig.9 Effect of brush weeder diameter on invade ratio of weeding brush in row

4 试验与分析

为验证优化后行星刷式株间锄草机械手的锄草效果,在中国农业大学通州试验站进行锄草试验,试验作物为玉米,平均株距为 250 mm,每行 200 棵。图 10 为液压马达驱动的锄草机械手实物图,其中刀杆偏心距为 80 mm,锄草刷盘直径为 150 mm,刷毛为长 80 mm 的硬尼龙材质,对行星轮系传动比 $i = 1$ 和 $i = 3$ 两种情况分别进行锄草试验。由于株间锄草作业涉及到机器视觉苗草检测及液压马达伺服控制等相关技术,为使其他技术尽量少地干扰锄草机械手的试验效果,选用 1 km/h 的作业时速进行试验。试验前随机选择 5 块 0.5 m² 的区域并记录其中的杂草总数,试验后记录该 5 块区域内锄掉的杂草



图 10 锄草机械手实物图

Fig.10 Photo of weeding manipulator

数及每行伤害的作物数,分别计算出锄草率和伤苗率,见表 2。可见优化后锄草机械手锄草效果良好,最小锄草率为 81.2%,最大伤苗率为 4.5%,增大传动比可提高锄草率,但伤苗率也随之增大。

表 2 两种传动比的锄草试验数据

Tab.2 Experimental results of two kinds of transmission ratio of planetary gear

试验号	i	锄草率/%	伤苗率/%
1	1	82.5	3
	3	89.6	2
2	1	85.6	3.5
	3	90.4	4
3	1	84.2	1
	3	87.8	3.5
4	1	81.2	3
	3	89.4	4.5
平均	1	83.4	2.5
	3	89.3	3.5

5 结论

(1) 针对根系较发达作物及易板结土壤工况下的株间锄草,设计了一种行星刷式株间锄草机械手,研究其避苗和锄草的原理,并分析了影响锄草率的相关参数。

(2) 建立了相应运动学模型,发现通过改变行星轮系传动比可有效提高刷盘上点在株间的覆盖范围及其运动速度。试验表明传动比增大可提高锄草率,但伤苗率也有所增加,当传动比为 3 时,平均锄草率达到 89.3%。

(3) 通过刷盘运动轨迹仿真得到最优刀杆偏心距为 80 mm。采用直径为 60 ~ 180 mm 的锄草刷盘,获得 30 ~ 140 mm 作物保护区范围,刷盘株间覆盖率均在 80% 以上。传动比为 1 时,大田试验获得的平均锄草率为 83.4%,平均伤苗率为 2.5%,满足株间锄草要求。

参 考 文 献

1 Griepentrog H W, Dedousis A P. Mechanical weed control[M]//Dedousis A P, Bartznas T. Soil engineering: soil biology, vol. 20, 2010;171 - 179.

2 O'Dogherty M J, Gowin R J, Dedousis A P, et al. A mathematical model of the kinematic of a rotating disc for inter- and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2):169 - 179.

3 Home M. An investigation into the design of cultivation systems for inter-and intra-row weed control[D]. Silsoe: Cranfield University, 2003.

4 Bontsema J, Aaaelt C J, Lempens P W J, et al. Intra-row weed control-A mechatronics approach[C]//1st IFAC Workshop on Control Applications and Ergonomics in Agriculture, 1998.

5 胡炼,罗锡文,严乙桢,等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(14):10 - 16.

Hu Lian, Luo Xiwen, Yan Yian, et al. Development and experiment of intra-row mechanical weeding device based on trochoidmotion of claw tooth[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 10 - 16. (in Chinese)

6 胡炼,罗锡文,张智刚,等. 基于余摆运动的株间机械除草爪齿避苗控制算法[J]. 农业工程学报,2012,28(23):12 - 18.

- Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Control algorithm for intra-row weeding claw device based on trochoidal motion[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 12–18. (in Chinese)
- 7 张春龙, 黄小龙, 耿长兴, 等. 智能锄草机器人系统设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 196–185.
Zhang Chunlong, Huang Xiaolong, Geng Changxing, et al. Design and simulation of intelligent weeding robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 196–185. (in Chinese)
- 8 黄小龙, 刘卫东, 张春龙, 等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 42–46.
Huang Xiaolong, Liu Weidong, Zhang Chunlong, et al. Optimal design of rotating disc for intra-row weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 42–46. (in Chinese)
- 9 张朋举, 张纹, 陈树人, 等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 56–59.
Zhang Pengju, Zhang Wen, Chen Shuren, et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 56–59. (in Chinese)
- 10 陈树人, 张朋举, 尹东富, 等. 基于 LabVIEW 的八爪式机械株间除草装置控制系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊2): 234–237.
Chen Shuren, Zhang Pengju, Yin Dongfu, et al. Control system of eight claw intra-row mechanical weeding device based on LabVIEW[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 234–237. (in Chinese)
- 11 陈勇, 郑加强, 郭伟斌. 除草机器人机械臂运动分析与控制[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 105–108.
Chen Yong, Zheng Jiaqiang, Guo Weibin. Kinematics analysis and motion control for weeding robotic arm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 105–108. (in Chinese)
- 12 吴崇友, 张敏, 金诚谦, 等. 2BYS-6 型水田中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 51–54.
Wu Chongyou, Zhang Min, Jin Chengqian, et al. Design and experiment of 2BYS-6 type paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 51–54. (in Chinese)
- 13 Pérea-Ruiz M, Slaughter D C, Gliever C J, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 80: 41–49.
- 14 Pérez-Ruiz M, Slaughter D C, Fathallah F A, et al. Co-robotic intra-row weed control system[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126: 45–55.
- 15 Melander B. Optimization of the adjustment of a vertical axis rotary brush weeder for intra-row weed control in row crops[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68(1): 39–50.
- 16 Fogelberg F, Gustavsson A D. Mechanical damage to annual weeds and carrots by in-row brush weeding[J]. Weed Research, 1999, 39(6): 469–479.