

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.006

# 基于触觉感知的水稻行弯度测量装置设计与试验

陈学深 黄柱健 马旭 齐龙 方贵进

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:**为解决水田环境下稻行弯度信息提取问题,提出一种触觉感知方法。根据除草期内水稻与杂草的生理高度及力学差异,基于弯曲传感器设计了一种稻株定位的感知梁。通过力学分析,建立了感知梁与稻株接触作用的力学模型,结合稻株抗弯强度,确定了感知梁抗弯刚度的设计原则。在此基础上,构建感知梁标定试验装置,获得了装置偏距与感知梁电压差的映射关系。基于多传感器技术,通过采集4根感知梁的电压(形变)变化特征,计算出稻行弯度。为检验测量装置的精度及稳定性,进行了田间试验,行进速度试验表明:行进速度的提高不利于测量结果的稳定性,在行进速度为1.5 m/s时,平均误差为5.90 mm,最大误差为8.30 mm;稻穴株数试验表明:测量误差与稻穴株数有一定的相关性,稻穴株数为6株以上的测量误差最小,平均误差为2.56 mm,4~5株的平均误差较大,为4.36 mm,1~3株测量的平均误差最大,为6.17 mm;水层厚度试验表明:测量误差与水层厚度没有明显相关性,误差均能控制在14 mm范围内。该装置测量结果可满足避苗机械除草等精准控制的要求。

**关键词:** 水稻; 除草; 触觉感知; 识别

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)02-0045-09

OSID:



## Design and Experiment of Tactile Sensing Device for Measuring Rice Curvature

CHEN Xueshen HUANG Zhujian MA Xu QI Long FANG Guijin

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to solve the technical problem of extracting rice row curvature information in paddy field environment, a tactile sensing method was proposed. According to the mechanical difference and the physiological height of rice and weeds during the weeding period, a kind of tactile beam which was based on bending sensor was designed. Through the mechanical analysis, a dynamic model of the contact between tactile beam and rice seedlings was established. Combined with the bending strength of rice seedling, the principle of the bending rigidity of the tactile beam was determined. Through building the tactile beam calibration test bench, the functional relationship between the device offset and the pressure difference of tactile beam was obtained. On this basis, based on multi-sensor technology, according to the voltage characteristics generated by the four tactile beams, the calculation method of rice seedling bending was proposed. In order to verify the measurement accuracy and the stability of the device, several field experiments were carried out. The test of speed of travel showed that the acceleration of travel speed was harmful to the stability. At the speed of 1.5 m/s, the average relative error was 5.90 mm and the maximum error was 8.30 mm. The test of rice hole number indicated that the measurement error became lowest when the number of rice hole was more than 6 and the average error was 2.56 mm. The average error was 6.17 mm when the number of rice hole was between 1 and 3. The average error was 4.36 mm when the number of rice hole was between 4 and 5. The test of water layer thickness indicated that there was no significant correlation between measurement errors and water layer thickness and the lateral offset of neighboring rice seedlings can be controlled within 14 mm. The

收稿日期: 2019-06-18 修回日期: 2019-10-10

**基金项目:** 广东省重点领域研发计划专项(2019B020221002)、国家自然科学基金项目(51575195)、广州市科技计划项目(201803020021)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-01-43)

**作者简介:** 陈学深(1977—),男,副教授,主要从事现代农业技术与智能装备研究,E-mail: chenxs@scau.edu.cn

**通信作者:** 马旭(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: maxu1959@scau.edu.cn

measurement result of this device can satisfy the requirement of accurate control such as rice mechanical weeding avoiding plants and provide new ideas and examples to solve the problem of crop identification and detection in the paddy field environment.

**Key words:** rice; weeding; tactile perception; identification

## 0 引言

植保除草是水稻生产过程中的重要环节<sup>[1-2]</sup>, 鉴于化学除草的抗药性、作物药害、环境污染等问题<sup>[3-5]</sup>, 大力发展机械除草是保证农业可持续发展的关键。然而, 机械除草易伤苗, 诱发作物病害, 影响稻米品质和产量<sup>[6-9]</sup>, 严重制约了其规模化发展。机械伤苗的主要原因之一在于水田土壤硬底层深度、硬度不均, 导致插秧机两侧驱动轮限深及行驶阻力差异显著, 无论人工驾驶还是自动导航, 插秧作业时总会产生航向偏差<sup>[10-11]</sup>, 使栽植后的稻苗呈现一定弯度, 通过人为转向实现对行避苗, 存在除草部件调节相对机身运动具有一定的滞后性, 在纠偏期间除草部件对稻苗不可避免造成损伤。因此, 感知稻行弯曲程度, 对除草部件的作业路径实施差异化的调控, 实现智能化避苗控制技术十分必要。

快速、准确地自动获取稻株的识别与定位信息是稻行信息获取及智能避苗控制的关键。目前, 基于机器视觉的实时信息获取技术是作物信息感知的主流方法, 主要根据作物的颜色、纹理、形状进行分类。金小俊等<sup>[12]</sup>根据杂草不同的颜色特征, 提出了一种图像分割算法, 将农田杂草识别出来。HAMUDA 等<sup>[13]</sup>根据花椰菜叶片的饱和度、色调值等差异区分作物和杂草, 对不同环境下的花椰菜识别率达 99.04%。陈树人等<sup>[14]</sup>基于 5 种不同颜色特征对棉田中铁苋菜进行识别, 该方法对杂草中棉花识别的准确率为 82.1%。也有一些学者, 从作物的纹理特征入手, TANG 等<sup>[15]</sup>采用 Garbor 小波进行纹理特征提取, 设计了一个 3 层 BP 神经网络, 实现对田间杂草分类识别, 对作物和杂草的正确识别率达 100%。徐艳蕾等<sup>[16-17]</sup>提出了基于模糊顺序形态学的植物叶片脉络边缘特征提取方法, 试验结果表明, 该方法能克服噪声、有效提取叶片信息。还有一些学者通过形态进行杂草识别, 吴兰兰等<sup>[18-19]</sup>对获取的图像进行处理, 把目标对象的形状特征作为支持向量机的输入向量, 以实现玉米田间杂草识别, 试验结果表明, 其正确识别率达 98.3%。上述作物信息获取方式均以作物特征的有效表达与准确提取为前提。然而, 稻田积水反光、光照、倒影、绿藻等复杂背景影响, 稻株(穴)间顶部叶冠相互遮掩, 禾本科杂草与水稻形态相似, 导致现阶段基于视觉的作物信

息获取技术及设备的适应范围主要集中在背景差异显著的旱田作物上, 且识别对象多为特征明显的叶菜类作物。针对水田这种复杂开放式、非结构农田环境, 快速、准确地实现稻株识别与定位还需采用创新性技术。

本文针对水田环境提出基于触觉感知的稻株识别与定位技术, 以及稻行弯度信息的实时获取方法, 为智能机械除草部件的避苗作业提供决策依据。

## 1 触觉感知方式的农艺基础

在实际生产中由于单位面积上的取秧量不同<sup>[20-22]</sup>、稻穴内生理分蘖数量不一致<sup>[23-25]</sup>, 导致稻株个体差异显著; 另外, 杂草分布具有随机性、簇生性等特点<sup>[26]</sup>, 对触觉方式的稻株识别有一定的干扰; 再有, 水田作业环境复杂, 机具俯仰、摇摆及振动等姿态变化, 也使得触觉传感器与稻株的接触位置不稳定, 而影响测量结果。因此, 触觉方式实现水稻的识别与定位具有一定难度。

稻株的触觉感知要紧密围绕水稻生长的农艺特点。首先, 为使感知装置测量不受机具姿态变化影响, 充分利用除草期内<sup>[8, 27-28]</sup>(移栽后 7~22 d) 稻田 3~5 cm 的浅水层<sup>[29]</sup>(为保证稻苗在返青、扎根、活棵及分蘖时期生长需要), 使感知装置作业时, 能漂浮在水面上, 以保证与稻株接触位置相对稳定; 在此基础上, 利用稻穴内稻株群茎基部成束, 相邻稻株茎基部独立, 稻株株高远大于杂草的生理特点, 选择稻株茎基部与杂草冠层之间的位差空间作为稻株的触觉识别区, 可避开杂草干扰, 如图 1 所示。识别区内偶尔有稻株与杂草共处情况, 也可通过稻草生理抗弯刚度的差异进行辨识, 因此, 基于触觉的稻株信息获取具有一定的识别和定位空间。

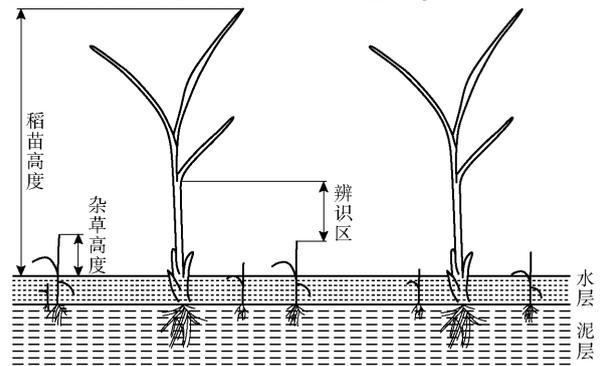


图 1 除草期水稻与杂草的生长状态

Fig. 1 Growth status of rice and weeds in weeding stage

## 2 感知装置结构及工作原理

感知装置主要由弯曲传感器、壳体及相关电子器件组成,如图2所示。触觉感知元件为两排弯曲传感器,每排对称安装于下壳体左右两侧,弯曲传感器根部与圆形橡胶基座相连,防止田间积水从根部渗入壳体,并缓解弯曲传感器根部的应力集中。后排弯曲传感器通过根部的调节螺母在滑槽上移动,以适应不同株距(11~22 cm)水稻的测量要求。同时,为保证壳体在稻行(行间为30 cm)左或右极限位置时,两侧弯曲传感器都能与稻株接触,壳体宽度设计为18 cm,单侧弯曲传感器设计为13 cm。仿形杆底部设有螺纹,与盖板通过螺纹连接,仿形杆中部和顶部为三角形空心柱体,顶部与插秧机车架上改制的三角形套筒滑动连接,并在仿形杆顶部设有一销孔,与锁销配合防止滑动极限时脱落。此结构设计防止感知装置与机具发生相对转动;同时与机具的滑动连接,也使该装置在稻田水面上以漂浮状态工作,不受机具起伏影响,保证了感知梁与稻株接触作用位置的相对稳定。

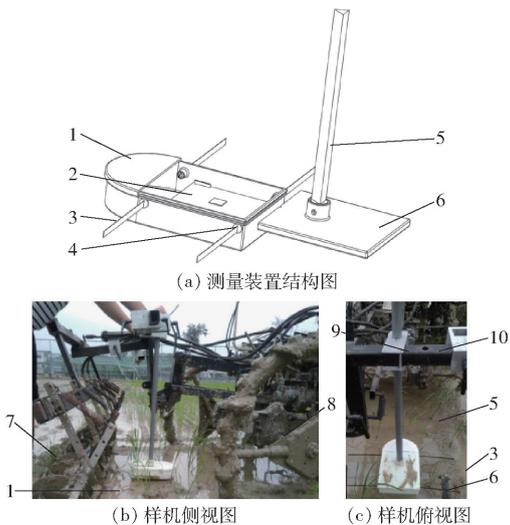


图2 感知装置

Fig.2 Sensing device

1. 壳体 2. 控制板 3. 感知梁 4. 基座 5. 仿形杆 6. 盖板  
7. 除草部件 8. 水田拖拉机 9. 机架 10. 固定夹具

弯曲传感器作为感知装置的核心部件,采用形变敏感的悬臂梁结构,本文将悬臂梁式弯曲传感器简称为感知梁。感知梁在与稻株接触、形变、脱离过程中受到周期性的阻滞,产生的形变反映了稻株与感知梁接触点的位置信息,经过标定将其转换成电压信号,在此基础上,根据4根感知梁上的形变电压特征,实现相邻稻株横向偏量的测量。为使测量的横向偏量能为多个除草轮(一般为6或7个)提供调控数据,机具的作业路径应与插秧时的作业路径

一致;同时,为避免机具掉头换行时,测量装置处于稻行接缝处(此处稻行两侧的苗带弯度不同)引起测量误差,测量装置放置在机尾中间位置。工作时,感知装置漂浮稻田水面上,随机具在稻行内行进,经过某一稻列(方向与机具行进方向垂直)时,感知梁与稻株茎基部相接触,由同排左右两侧的感知梁产生的电压(弯曲)差异可计算出感知装置中心轴偏离稻行中心线的距离(偏距)。在此基础上,继续行进经过下一稻列时,如果稻株移栽位置存在横向偏量,装置此时测量的偏距较上一稻列将发生改变,改变量大小表征了相邻稻株的横向偏量。因此,可通过感知梁在相邻稻列间的弯曲差异建立稻株横向偏量的定量关系模型,随着感知装置进一步行进,经过的稻株横向偏量将被持续测量,通过相应计算,可测得由稻株偏量累积形成的稻行弯度。

## 3 感知梁设计

### 3.1 水稻茎基部弯曲受力模型建立

感知梁抗弯刚度对稻株识别与定位具有重要作用,刚度偏大,测量时易使稻株受迫变形,导致感知梁弯曲程度偏小,影响测量精度;刚度偏小,感知过于敏感,易受杂草干扰。因此,需要确定适宜的抗弯刚度,保证感知梁与稻株接触测量时,稻株不变形或轻微变形。

测量装置工作时,感知梁与稻株茎基部接触过程中,稻株茎秆将产生不同程度的弯曲变形。由梁理论可知,水稻茎基部弯曲可分为自身重力引起的纵力弯曲和横向作用力引起的横力弯曲,如图3a所示。取稻株茎基部OA段为受力体,高度为 $h$ ,将OA段茎秆视为等刚度梁,弯曲刚度为 $EI$ ,OA段的茎叶重力为 $P$ , $e$ 为稻株重心 $P$ 与A点的水平距离。水稻茎基部受到感知梁在行进方向的横向作用力 $F$ ,茎基部任意点挠度为 $\gamma$ ,A点最大挠度为 $w_{\max}$ ,由此建立水稻茎基部弯曲的力学模型,如图3b所示。

根据力平移定理及小挠度理论,可得出水稻茎基部弯矩方程为

$$M(x) = -[Pe + F(h-x) + P(w_{\max} - \gamma)] \quad (1)$$

由于除草期内稻叶数量较少,且重量较轻,因此忽略稻叶重量引起的纵力弯曲,式(1)可简化为

$$Elw''(x) = -M(x) = -F(h-x) \quad (2)$$

解微分方程(2),得挠度通解为

$$Elw'(x) = -\frac{1}{2}F(h-x)^2 + C_1 \quad (3)$$

$$Elw(x) = \frac{1}{6}F(h-x)^3 + C_1x + C_2 \quad (4)$$

式中 $C_1$ 、 $C_2$ 为任意常数。

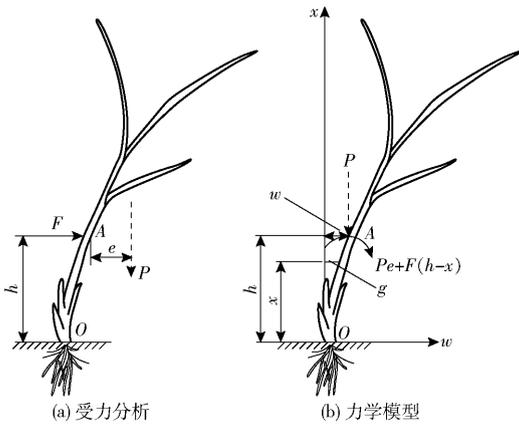


图3 稻株力学分析图

Fig. 3 Mechanical analysis charts of rice

将边界条件  $x = w = 0$  代入式(3)、(4)得

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{2}Fh^2 \\ C_2 = -\frac{1}{6}Fh^3 \end{cases} \quad (5)$$

将  $C_1$ 、 $C_2$  代入式(4)得挠度公式

$$w(x) = \frac{Fx^2}{6EI}(3h - x) \quad (6)$$

由式(6)可知,在感知梁与稻株接触高度一定的情况下,  $w(x)$  由横向作用力  $F$  决定,横向作用力  $F$  越大引起稻株的挠度也越大,稻株变形也越明显。为此,确定感知梁抗弯刚度,应根据稻株实际力学参数,并结合装置的测量原理。本文以稻株与感知梁常见的接触高度 8 cm 为基准,应用拉力计实测除草期内稻株在此高度上的茎秆挠度,统计表明,当施加作用力小于 0.24 N 时,稻茎挠度一般不超过 1 cm,此位移量不会对测量精度造成太大影响。因此,为保证稻株在测量时仅发生小变形,感知梁抗弯刚度设计原则应满足在感知梁根部施加 0.24 N 作用力时,在作用力方向上感知梁的弯曲程度应保证测量装置能通过被测量对象。这样感知梁任意位置与稻株作用时,既保证感知装置可通过稻株,又减小了稻株变形。

### 3.2 感知梁制作

感知装置的核心部件为 Flex 2.2 型柔性弯曲传感器,由分子聚合物 PEDOT:PSS(聚 3,4-乙炔二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸)薄膜制作而成。考虑到柔性弯曲传感器自身弯曲刚度较小,过于敏感易受干扰,采用了不同厚度的薄钢片作为弯曲传感器的衬底以增加其弯曲刚度,片与片间通过多根橡胶套固定,结构如图 4 所示。其中,衬底组成为 3 片 0.2 mm、2 片 0.5 mm 及 1 片 1 mm 的薄钢片,不同厚度的薄钢片,可以获得相应的抗弯刚度以适应除草期内的稻草力学参数;同时,多片结构在弯曲或反弹时,橡胶套与

钢片、钢片与钢片之间相对运动的内部摩擦也消耗了振动能量,在一定程度上抑制了弯曲传感器在相邻稻株间非接触状态下的振动,提高了数据采集的可靠性。

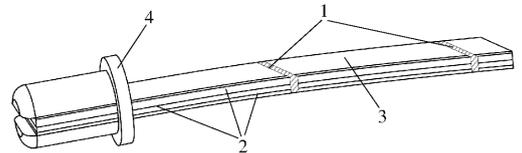


图4 感知梁结构图

Fig. 4 Structural diagram of sensing beam

1. 橡胶套 2. 衬套 3. 弯曲传感器 4. 底座

### 3.3 感知梁标定

由于弯曲传感器是电阻式传感器,必须将弯曲传感器检测到的电阻信号转换为电压信号并将该信号值转换为数字量信号以便于被单片机识别。在设计单片机系统中,单片机的供电电源为 5 V,因此转换后的信号电压范围应在 0 ~ 5 V。弯曲传感器数据采集电路如图 5 所示。在该弯曲传感器数据采集电路中,  $R_1$  和  $R_2$  为串联电阻,  $R_3$  为弯曲传感器的电阻。为了保证采集到的电压信号值处于合理的范围内(0 ~ 5 V 之间),串联电阻均为 10 k $\Omega$ 。GND 为接地端,与单片机接地端共地;  $V_{CC}$  为电源电压,设定  $V_{CC}$  为 5 V 电源;  $V_{out}$  为采集电路信号输出端电压,则输出电压为

$$V_{out} = \frac{5}{R_1 + R_2 + R_3} R_3 \quad (7)$$

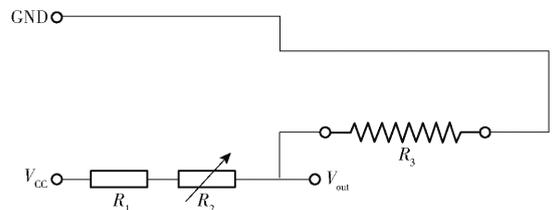


图5 弯曲传感器采集电路

Fig. 5 Bending sensor acquisition circuit

为了实时获取感知装置与稻行中心线的距离,对前、后排弯曲传感器分别进行标定,得到同排左右两侧感知梁的形变电压差与感知装置偏距(感知装置中心与所在稻行中心线的距离)的对应关系,标定装置如图 6 所示,包括导轨架、标定杆、标尺等。

标定杆用以模拟稻株茎秆,行距为 300 mm,株距为 150 mm,通过以每次 10 mm 的距离横移左右两侧的标定杆,获得感知装置从左侧极限位置(左侧感知梁根部与标定杆接触)至右侧极限位置(右侧感知梁根部与标定杆接触)的偏距。试验时,推动测量装置在导轨上滑动,弯曲传感器与标定杆从接触到脱离过程中,输出电压随弯曲传感器弯曲程度增加而逐渐增大,当弯曲传感器脱离标定杆时,输出

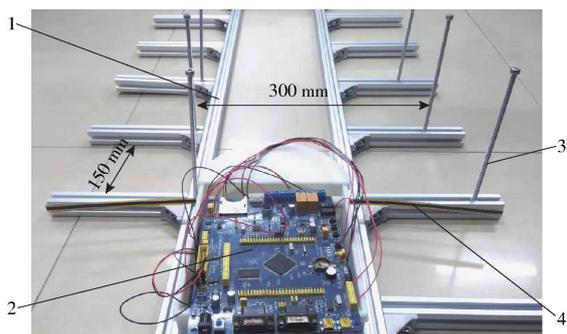


图 6 标定装置实物图

Fig. 6 Physical picture of calibration device

1. 导轨 2. 控制板 3. 标定杆 4. 弯曲传感器

电压骤然减小。此时,记录弯曲传感器最大电压(最大变形量),并以同排左右两侧弯曲传感器的电压差作为  $x$  轴,对应的装置偏距作为  $y$  轴,建立坐标并拟合标定数据,规定  $y$  轴正向表示感知装置在稻行偏左位置,反之在稻行偏右位置, $y$  值为零表示在稻行正中间位置。考虑电路电压信号稳定问题,对每次标定试验重复 3 次,数据取平均值,拟合结果如图 7 所示,可见装置偏距与感知梁的电压差呈非线性关系,具体映射关系为:前排  $y_1 = 1.885 6x^2 + 0.326x - 6.675 1$ ,后排  $y_2 = 2.127 4x^2 - 0.903 6x - 6.407 7$ 。因弯曲传感器初始电阻不同(经过剪短处理),当装置偏距为零时,左右两侧弯曲传感器的电压差可能不为零。

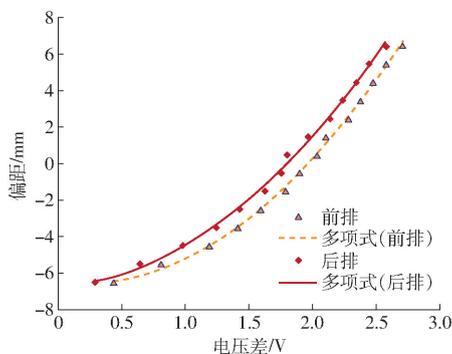


图 7 装置偏距与电压差关系曲线

Fig. 7 Diagram of device offset and voltage difference

## 4 水稻行弯度测量方法

### 4.1 相邻稻株横向偏量计算方法

机插秧过程中,相邻稻株产生的横向偏量在苗带内的累积形成了稻行弯度,准确获取相邻稻株的横向偏量是水稻行精准描述的关键。为此,利用多传感器技术,以前后排独立测量数据的平均值为偏量数据,并将其与前后排共同测量的偏量数据进行验证比较,剔除异常数据,以期提高稻株横向偏量测量的精度及可靠性。

感知梁与相邻稻株接触测量过程如图 8 所示。

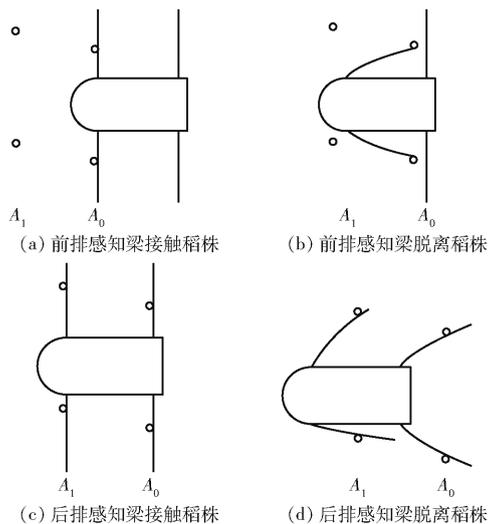


图 8 感知梁与相邻稻株接触测量过程示意图

Fig. 8 Contact measurement process between

sensing beam and adjacent rice

感知梁沿稻行行进依次经过任意稻列  $A_0$ 、 $A_1$ ,以前排弯曲传感器与稻列  $A_0$  刚好接触为初始位置,如图 8a 所示。继续行进,前排左右两侧的弯曲传感器将受稻列  $A_0$  阻滞而发生弯曲变形,进一步行进,前排弯曲传感器在脱离稻列  $A_0$  时刻后,弯曲的峰值将被记录,如图 8b 所示。因此,经过同一稻列时左右两侧弯曲传感器弯曲峰值差异可作为测量感知装置偏离稻行中心线的距离,即装置偏距。脱离稻列  $A_0$  后的弯曲传感器在梁材料自身弹性作用下形变量迅速减小至恢复线性状态,直到与下一稻列  $A_1$  接触,如图 8c 所示,同样方法后排感知梁也可测量感知装置处于稻列  $A_1$  时的偏距。理想水稻移栽模式下,感知装置在相邻稻列  $A_0$ 、 $A_1$  测得的偏距应该相等。然而,实际中出现的偏距差异正是因为相邻稻列在移栽时出现了横向偏量。因此,相邻稻株的横向偏量可以用偏距差异量表示。

同理,相邻稻列  $A_0$ 、 $A_1$  间的偏量也可通过后排弯曲传感器获得,为了提高准确性取前后排感知结果的平均值为相邻稻列的偏量。但由于弯曲传感器与稻株接触及脱离过程中,稻田杂草阻碍干扰及机具在相邻株距间航向略微变化等原因,难免会对稻株位置形成误判,影响相邻稻株偏量数值的准确性。为此,采集前后排弯曲传感器同时受到稻株阻碍而发生弯曲变形的数据,如图 8d 所示,并记录形变峰值,则此时由前后排感知梁分别获取前后相邻稻列  $A_0$ 、 $A_1$  的偏距,可作为感知梁的偏量检验量,并与前后排感知梁的平均偏量结果进行比较,根据实际生产作业情况,当两种感知方式相差不超过规定范围,则判定相邻稻列的偏量为可靠数据,作为后续水稻行弯度计算的基础数据。

## 4.2 水稻行弯度计算方法

为获得稻行弯度信息,建立绝对坐标系  $xOy$ ,  $x$  轴为稻行方向,  $y$  轴为稻列方向,如图 9 所示,  $D_n$  为任意偏植的稻株,过  $D_n$  作稻行  $x$  的平行线,则  $d_n$  为相应稻株的横向偏量;稻株  $D_n D_{n-1}$  连线与  $y$  轴夹角  $\delta$  为相邻稻株的偏角,则  $D_1 D_n$  段稻行的弯度可表示偏角的累积之和,则有

$$\delta = \sum_{i=1}^{n-1} |\delta_i| \quad (8)$$

公式(8)也可用稻株的横向偏量表示为

$$\delta = \sum_{i=1}^{n-1} \left| \arcsin \frac{d_n}{l_{D_{n-1}D_n}} \right| \quad (9)$$

式中  $l_{D_{n-1}D_n}$ ——第  $n-1$  株与第  $n$  株稻株的距离

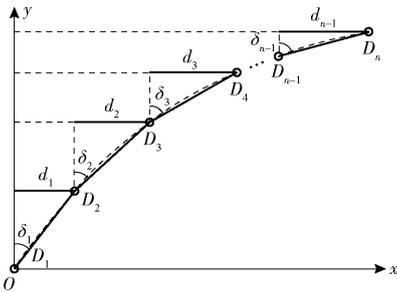


图 9 稻行弯度示意图

Fig. 9 Diagram of rice row curvature

## 5 田间试验

### 5.1 试验条件

稻行弯度可由相邻稻株的偏角进行量化描述,而偏角取决于相邻稻株的横向偏量。因此,稻株弯度测量试验的指标选定为相邻稻列的横向偏量。同时,为了检验水稻行弯度测量装置在田间实际环境下的测量精度及稳定性,选择对测量结果有主要影响的实际生产因素进行试验,明确装置的行进速度、稻穴株数及水层厚度等因素对测量结果的影响规律。

田间试验在广东省肇庆市国家水稻产业技术体系综合试验站进行,稻行弯度的大小、数量及弯曲方向由插秧机操作人员根据常规作业情况随机产生,如图 10 所示。测试区长度为 150 m,划分成若干测试段,每个测试段包含 91 个稻穴(共有 90 组相邻稻株的横向偏量),测试段间预留 10 m 起步区,以保证机具进入测区后速度稳定。试验对象为移栽 15 d 的杂交稻五优 1179,水稻行距 30 cm,株距 15 cm,株高 15~20 cm,稻穴株数 2~6 株,稻穴直径 2~3 cm。此时,杂草萌发主要以稗草、千金子等禾本科为主,株高为 3~5 cm。

### 5.2 试验方法

水稻行弯度测量主要为机械除草避苗控制系统提供决策数据。本文选择水稻行距 30 cm,行间除



图 10 稻行弯度测量试验区

Fig. 10 Test zone for measuring curvature of rice row

草部件作业宽度 20 cm 为机械除草实况,规定除草轮与稻株安全距离为 2 cm,则除草轮左右横向避让苗移动的距离阈值为 3 cm,因此,为使测量装置对避苗控制系统有指导作用,测量的横向偏量误差应小于 3 cm。

试验时,测量装置随插秧机行进,进入测试区前调整好移动速度,并在测试过程中保持速度稳定。以测试区内第 1 株稻株(穴)为基准,测量与相邻稻株横向偏量,随测量装置行进,相邻稻株的横向偏量将被持续记录,直到测试区内最后 1 株稻株(穴)为止。

#### 5.2.1 不同行进速度的偏量测量试验

感知梁以不同行进速度与稻株接触产生的瞬时冲击力是不同的,在稻草力学参数辨识上可能形成误判;另外,在稻行间行进,感知梁与稻株周期性作用产生的形变频率也会随行进速度的提高而增加,造成悬臂式感知梁的摆动干扰,可能影响测量精度。因此,需要分析不同行进速度对测量结果的影响。

根据水田机械除草常规作业行进速度,选择 0.5、1.0、1.5 m/s 为试验因素,在水层厚度为 5 cm 情况下,统计测试段内连续 90 组稻株的横向偏量。在此基础上,将测量结果与人工测量结果进行比较,获得感知装置测量结果的误差分布情况。

#### 5.2.2 不同稻穴株数的偏量测量试验

除草期内,稻穴内稻株丛生,移栽时取秧量不同、生长过程中分蘖数不一,测量时感知梁与稻株接触作用的力值及位置将会影响稻株的识别与定位精度,因此,需要分析不同稻穴株数差异对测量误差的影响规律。

为了比较不同稻穴株数的离散程度对测量结果的影响,插秧机在多个测试区内行驶,行进速度为 1.0 m/s,水层厚度为 5 cm 时,随机选择 1~3 株、4~5 株及 6 株以上的稻穴各 20 组,检验不同稻穴株数对测量精度及稳定性的影响。

#### 5.2.3 不同水层厚度的偏量测量试验

根据装置结构和工作原理可知,感知装置与稻株接触测量位置由稻田水层厚度决定,在水田作业

条件下,要求感知装置对水层厚度应具有一定的适应性。因此,以除草期常规水层厚度 3、4、5 cm 为因素,在行进速度为 1.0 m/s 时,统计测量段内连续 90 组测量点的稻株横向偏量。在此基础上,将测量结果与人工测量结果比较,获得感知装置测量结果的相对误差分布情况。

### 5.3 试验结果与分析

#### 5.3.1 行进速度与测量误差分析

在 3 种行进速度下,水层厚度为 50 mm 时各测

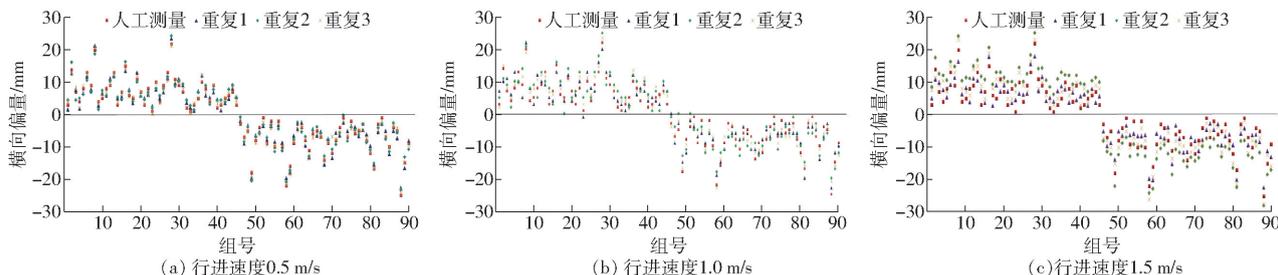


图 11 不同行进速度的横向偏量测量结果

Fig. 11 Lateral deviation measurement results at different travel speeds

#### 5.3.2 稻穴株数与测量误差分析

不同稻穴株数的横向偏量测量结果如表 1 所示,误差大小与株数有一定的相关性。其中,稻穴株数为 6 株以上的测量误差最小,平均误差为 2.56 mm,4~5 株的平均误差较大,为 4.36 mm,1~3 株测量的平均误差最大,为 6.17 mm。主要原因

量点的测量结果与人工测量数值比较,误差分布如图 11 所示,从测量误差的稳定性看,行进速度越大测量误差分布越为离散,说明行进速度的提高不利于测量结果的稳定性。相反,低速行进的测量结果稳定性更好。从测量的精度看,行进速度由低到高,3 次重复的平均误差分别为 4.95、5.36、5.90 mm,最大误差分别为 6.6、7.4、8.3 mm。因此,在不同行进速度下,就测量精度及稳定性方面判断触觉作为一种稻株识别与定位的感知方式是可行的。

在于稻穴株数越多生理力学的抗弯刚度越大,在与感知梁接触作用时自身变形就越小,感知梁测量也就越准确。相对而言,1~3 株稻株茎秆力较小,感知梁在其茎秆梳滑过程中茎秆的轻微变形会影响感知梁的弯曲程度,进而影响测量结果,但从避苗控制系统的实际应用角度,测量的精度及对不同稻穴株

表 1 不同稻穴株数的横向偏量测量误差统计

Tab. 1 Statistical results of errors in measuring lateral deviation of number of rice hole

稻穴株数/ 株	组号																				平均误差 mm
1~3	4.3	5.2	7.1	6.0	8.8	4.3	7.1	5.3	6.3	6.6	7.0	4.8	7.7	6.4	5.3	7.8	7.2	6.3	4.3	5.6	6.17
4~5	4.5	3.3	6.5	4.2	5.1	3.4	5.7	2.9	3.4	5.6	3.9	4.6	3.8	4.8	3.2	6.2	2.5	5.2	3.4	5.1	4.36
6及以上	3.1	2.6	2.6	1.3	2.4	2.9	3.2	2.1	2.5	2.4	2.5	2.3	4.4	2.1	2.5	3.4	1.8	2.7	1.8	2.5	2.56

数的适应性满足测量要求。

#### 5.3.3 稻田水层厚度与测量误差分析

为评价所设计的感知装置是否适应不同水层厚度的要求,在 3 种水层厚度下,进行了相邻稻株偏量测量试验,获得的测量误差变化如图 12 所示。

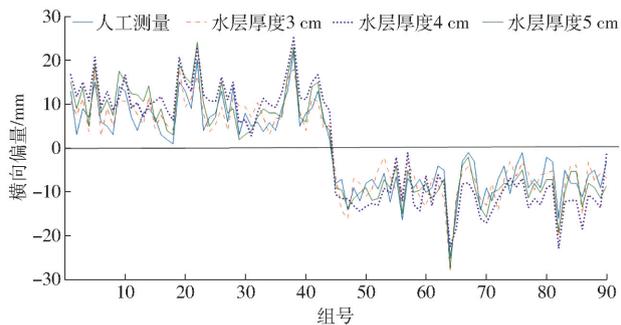


图 12 不同水层厚度的横向偏量测量结果

Fig. 12 Lateral deviation measurement results at different water layer thicknesses

由图 12 可知,稻株横向偏量的测量误差与水层厚度没有明显相关性,测量点均在人工测量点附近上下浮动,相邻稻株横向偏量的误差控制在 14 mm 范围内。因此,感知装置的测量结果受水层厚度影响较小,测量精度也满足避苗作业的实际要求。

## 6 结论

(1) 针对水田环境下稻株的识别与定位问题,提出了一种触觉感知方法,农机与农艺融合,根据稻草辨识的力学差异及除草期的生理高度,确定了感知梁的抗弯刚度,并进行了传感器标定,建立了装置偏距与感知梁电压差的映射关系。

(2) 设计了一种基于弯曲传感器的感知梁,并结合多传感器技术,通过 4 根感知梁形变的电压特征测量出相邻稻株的横向偏量。在此基础上,提出

了一种稻行弯度计算方法。

(3) 行进速度试验表明, 行进速度的提高不利于测量结果的稳定性, 在行进速度为 1.5 m/s 时, 平均误差为 5.90 mm, 最大误差 8.30 mm; 稻穴株数试验表明, 稻穴株数为 6 株以上的测量误差最小, 平均

误差为 2.56 mm, 4 ~ 5 株的平均误差较大, 为 4.36 mm, 1 ~ 3 株测量的平均误差最大, 为 6.17 mm; 水层厚度试验表明, 测量误差与水层厚度没有明显相关性, 相邻稻株横向偏量的误差可控制在 14 mm 范围内。

### 参 考 文 献

- [1] 王金峰, 王金武, 闫东伟, 等. 3SCJ-2 型水田行间除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 71-78, 202. WANG Jinfeng, WANG Jinwu, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of 3SCJ-2 type row weeding machine for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 71-78, 202. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170609&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170609&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.009. (in Chinese)
- [2] 张曲, 肖丽萍, 蔡金平, 等. 我国水稻生产机械化发展现状[J]. 中国农机化, 2012, 33(5): 9-12, 16. ZHANG Qu, XIAO Liping, CAI Jinping, et al. Present situation of rice production mechanization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(5): 9-12, 16. (in Chinese)
- [3] 杨彩宏, 田兴山, 岳茂峰, 等. 农田杂草抗药性概述[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 236-240. YANG Caihong, TIAN Xingshan, YUE Maofeng, et al. Review on weeds resistance in cropland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(22): 236-240. (in Chinese)
- [4] 赵学平, 王秀梅, 王强, 等. 农美利等除草剂对水稻药害的研究[J]. 浙江农业学报, 2000, 12(6): 368-373. ZHAO Xueping, WANG Xiumei, WANG Qiang, et al. Phytotoxicity of bispyribac sodium and other herbicides to rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2000, 12(6): 368-373. (in Chinese)
- [5] REBICH R A, COUPE R H, TURMANE M, et al. Herbicide concentrations in the mississippiriver basin-the importance of chloroacetanilide herbicide degradates[J]. Science of the Total Environment, 2004, 321(1-3): 189-199.
- [6] 李江国, 刘占良, 张晋国, 等. 国内外田间机械除草技术研究现状[J]. 农机化研究, 2006, 28(10): 14-16. LI Jiangguo, LIU Zhanliang, ZHANG Jinguo, et al. Review of mechanical weeding technique in field at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(10): 14-16. (in Chinese)
- [7] 马旭, 齐龙, 梁柏, 等. 水稻田间机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 162-168. MA Xu, QI Long, LIANG Bai, et al. Present status and prospects of mechanical weeding equipment and technology in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 162-168. (in Chinese)
- [8] 陶桂香, 王金武, 周文琪, 等. 水田株间除草机械除草机理研究与关键部件设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 57-63. TAO Guixiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Herbicidal mechanism and key components design for paddy weeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 57-63. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151109&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151109&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.009. (in Chinese)
- [9] 陈振歆, 王金武, 牛春亮, 等. 弹齿式苗间除草装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 81-86. CHEN Zhenxin, WANG Jinwu, NIU Chunliang, et al. Design and experiment of key components of trash cultivator's working in paddy rice seeding lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 81-86. (in Chinese)
- [10] 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21-26. LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21-26. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180502&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180502&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)
- [11] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 15-22. ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. An automatic drive control technique for rice drill seeder in uneven paddy fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 15-22. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181102&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181102&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.002. (in Chinese)
- [12] 金小俊, 陈勇, 侯学贵, 等. 基于机器视觉的除草机器人杂草识别[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 104-108. JIN Xiaojun, CHEN Yong, HOU Xuegui, et al. Weed recognition of the machine vision based weeding robot[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 31(2): 104-108. (in Chinese)
- [13] HAMUDA E, MC GINLEY B, GLAVIN M, et al. Automatic crop detection under field conditions using the HSV colour space and morphological operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 133: 97-107.
- [14] 陈树人, 沈宝国, 毛罕平, 等. 基于颜色特征的棉田中铁苋菜识别技术[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 149-152. CHEN Shuren, SHEN Baoguo, MAO Hanping, et al. Copperleaf herb detection from cotton field based on color feature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 149-152. (in Chinese)

- [15] TANG L, TIAN L F, STEWARD B L, et al. Classification of broadleaf and grass weeds using gabor wavelets and an artificial neural network[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4):1247.
- [16] 徐艳蕾,贾洪雷,包佳林. 基于模糊顺序形态学的植物叶片脉络边缘提取[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13):193-198. XU Yanlei, JIA Honglei, BAO Jialin. Plant leaf vein edge detection based on fuzzy order morphology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13):193-198. (in Chinese)
- [17] 赵继印,徐艳蕾,焦玉斌. 基于顺序形态学的图像边缘检测快速算法的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(11):2195-2199. ZHAO Jiyin, XU Yanlei, JIAO Yubin. The fast arithmetic study of image edge detection based on the order morphology[J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(11):2195-2199. (in Chinese)
- [18] 吴兰兰,刘剑英,文友先,等. 基于支持向量机的玉米田间杂草识别方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1):162-166. WU Lanlan, LIU Jianying, WEN Youxian, et al. Weed identification method based on SVM in the corn field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):162-166. (in Chinese)
- [19] 吴兰兰. 基于数字图像处理的玉米苗期田间杂草的识别研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010. WU Lanlan. Study on identification of weeds in maize seedling stage based on digital image processing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [20] 付立东,隋鑫. 不同取秧量与穴距对机插水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12):70-72. FU Lidong, SUI Xin. Effect of different seedling volume and clock distance on the yield of planting rice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(12):70-72. (in Chinese)
- [21] 滕飞,陈惠哲,朱德峰. 不同机插取秧量对杂交稻生长及产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(3):79-82. TENG Fei, CHEN Huizhe, ZHU Defeng. Effects of different mechanically transplanted seedling area on growth and yield of hybrid rice[J]. Crops, 2015(3):79-82. (in Chinese)
- [22] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5):1-20. LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1-20. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180501&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180501&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.001. (in Chinese)
- [23] 蒋郁,崔宏伟,区颖刚,等. 基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6):23-31, 49. JIANG Yu, CUI Hongwei, OU Yinggang, et al. Positioning method of rice seedlings based on edge fitting in separated region of stem base[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):23-31, 49. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170603&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170603&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.003. (in Chinese)
- [24] 张耗,余超,陈可伟,等. 直播方式对水稻生理性状的产量影响及其成本分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13):58-64. ZHANG Hao, YU Chao, CHEN Kewei, et al. Effect of direct-seeding methods on physiological characteristics and grain yield of rice and its cost analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13):58-64. (in Chinese)
- [25] 吕伟生,曾勇军,石庆华,等. 基于机插晚稻分蘖成穗特性获取基本苗定量参数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1):30-37. LÜ Weisheng, ZENG Yongjun, SHI Qinghua, et al. Calculation of quantitative parameters of basic population of machine transplanted late rice based on its tillering and panicle formation characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1):30-37. (in Chinese)
- [26] 邱佩,崔远来,韩焕豪,等. 淹灌和间歇灌溉对晚稻田杂草群落多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22):115-121. QIU Pei, CUI Yuanlai, HAN Huanhao, et al. Effect of flooding irrigation and intermittent irrigation patterns on weed community diversity in late rice fields[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22):115-121. (in Chinese)
- [27] 王金峰,高观保,闫东伟,等. 水田电动双行深施肥除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):46-57. WANG Jinfeng, GAO Guanbao, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of electric control double row deep fertilizing weeder in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):46-57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180706&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180706&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.006. (in Chinese)
- [28] 王金武,李超,李鑫,等. 铺膜插秧后水田 3SCJ-1 型除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):102-109. WANG Jinwu, LI Chao, LI Xin, et al. Design and experiment of 3SCJ-1 type weeding machine for paddy field applied to film mulching and transplanting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):102-109. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180412&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180412&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.012. (in Chinese)
- [29] 齐龙,赵柳霖,马旭,等. 3GY-1920 型宽幅水田中耕除草机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):47-55. QI Long, ZHAO Liulin, MA Xu, et al. Design and test of 3GY-1920 wide-swath type weeding-cultivating machine for paddy[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8):47-55. (in Chinese)