doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.024

支撑式水田平地机结构设计与试验

陈高隆[1]　胡　炼[1,2]　汪　沛[1,2]　赵润茂[1,2]　冯达文[1]　田　力[1]
黄志铖[1]　陈禹琦[1]　王靖霆[1]
(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.农业装备技术全国重点实验室,广州 510642)

摘要:水田平整是水稻生产不可或缺的环节。为了改善水田平地机对坑洼硬底层的适应性,进一步提高作业性能,设计了支撑式水田平地机。根据平地铲工作原理,对平地铲高度调节机构进行运动学分析;在此基础上,设计了平地铲及其高度调节机构。设计了支撑杆结构,研究了支撑杆对平地铲运动特性的影响。开展了有/无支撑杆对比试验和水田平整试验。对比试验结果表明,有支撑杆的平地铲在试验全程高度变化幅度减少 15% 以上,在田面凸起位置高度变化幅度减少 30% 以上,同时,平地铲高度变化次数减少。表明有支撑杆平地铲更有利于平地铲高度控制,更适用于坑洼硬底层作业。0.21 hm^2 的水田平整试验结果表明,平整后田面高度标准差 S_d 为 21.66 mm,田面高度相对平整基准高度绝对偏差不大于 30 mm 的测量点占比 ρ 为 86.54%;总面积为 1.89 hm^2 的 2 块水田平整试验结果表明,平整后 S_d 分别为 26.02 mm 和 27.43 mm,ρ 分别为 80.53% 和 81.03%。全部试验田块经平整后的 S_d 均小于 30 mm,且 ρ 均高于 80%,达到了水田平整要求,验证了支撑式水田平地机结构设计有效性,可为坑洼硬底层水田机械化平整提供装备支撑。

关键词:水田平整;平地机;支撑杆;农田地形
中图分类号:S222.5+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)02-0252-09　　**OSID**:

Structural Design and Test of Supported Paddy-field Leveling Machine

CHEN Gaolong[1]　HU Lian[1,2]　WANG Pei[1,2]　ZHAO Runmao[1,2]　FENG Dawen[1]
TIAN Li[1]　HUANG Zhicheng[1]　CHEN Yuqi[1]　WANG Jingting[1]
(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The leveling of paddy fields is an indispensable part of rice production. Aiming to improve the adaptability of existing leveling machines to the bumpy hard bottom layer of paddy fields and further enhance the operational performance, the supported paddy-field leveling implement was developed. Firstly, according to the working principle of the leveling shovel, the height adjustment mechanism of the leveling shovel was kinematically analyzed. On this basis, the leveling shovel and its height adjustment mechanism were designed. Secondly, the supported rod structure was designed, and the influence of the supported rods on the motion characteristics of the leveling shovel was studied. Finally, a comparison test with/without supported rods and a paddy-field leveling test were carried out. The results of the comparison test showed that the amplitude of height change of the leveling shovel with the supported rods was reduced by more than 15% throughout the test, and reduced by more than 30% in the convex position of the field surface. Meanwhile, the number of height changes of the leveling shovel was reduced. It showed that the leveling shovel with supported rods was more conducive to the height control of leveling shovels and was more suitable for the operation of bumpy hard bottom layer of paddy fields. The leveling test results for 0.21 hm^2 of paddy field showed that the standard deviation (S_d) of the topography height was 21.66 mm, and the proportion (ρ) of points ($|h_i - \bar{h}| \leqslant 30$ mm, where h_i indicated the height of each measuring point, and $\bar{h}$ indicated the average height of all measuring points.)

收稿日期:2024-10-09　修回日期:2024-11-11
基金项目:新一代人工智能国家科技重大专项(2021ZD0110902)和国家自然科学基金项目(32071913、32101623)
作者简介:陈高隆(1995—),男,博士生,主要从事精准作业研究,E-mail:dbalong@163.com
通信作者:赵润茂(1990—),男,副教授,主要从事农业机器人研究,E-mail:rmzhao@scau.edu.cn

was 86.54%. The test results for two paddy fields with a total area of 1.89 hm^2 showed that the standard deviations S_d for the two fields were 26.02 mm and 27.43 mm, and the proportions ρ were 80.53% and 81.03%, respectively. After leveling, the standard deviation S_d in all test fields was less than 30 mm, and the proportion ρ was higher than 80%, which met the requirements of paddy-field leveling, and verified the structural advantages and design validity of the supported paddy-field leveling machine. This can provide equipment support for mechanized leveling of paddy fields with bumpy hard bottom layer.

Key words: paddy-field leveling; leveling machine; supported rods; field topography

0　引言

在全球范围内,水田占耕地总面积的9%[1],在粮食生产方面发挥着至关重要作用[2],特别是在东亚、东南亚和南亚以及非洲部分地区[3]。水稻是三大粮食作物之一,全球大部分水稻(75%)在水田环境下种植[4]。水稻生产灌溉方式以漫灌和淹灌为主,不平整农田会导致水资源利用率低[5]。通过改善农田平整度不仅可以节约水稻生产用水,提高灌溉效率与灌水均匀度[6-9],还可以提高土地利用率、稻种发芽率、杂草防治效率、作物成熟均匀度和作物产量,以及减少肥药施用量[10-15]。综上所述,水田平整是水稻生产必不可少的环节。由于水田旱平机械受土质、土壤含水率与降雨季节应用限制,因此,水田平整机械更有利于在多季稻地区争抢农时。

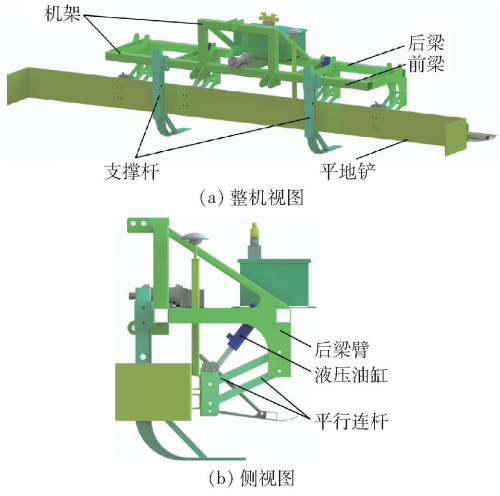
目前,诸多研究者研制了水田平整机械。LUO等[16]研制了以乘坐式水稻插秧机为配套动力的水田激光平地机,但其更适用于小面积农田,如华南地区。碎片化和不平整农田会阻碍机械化生产与降低农业生产效率[17]。诸多国家已开展农田改造措施,如“小农大田”和“高标准农田建设”[18-22]。单块农田面积呈增大趋势,这促使以拖拉机为配套动力的平整机械成为主流。严乙桉等[23]根据拖拉机后桥结构,设计了挂接支座以连接平整机具与拖拉机,但挂接支座无法兼容不同型号拖拉机。胡炼等[24]研制了1PJ-4.0型水田激光平地机,提高了平整机具与不同型号拖拉机连接的通用性,但平整机具控制响应迟滞且调节速度低。基于此,HU 等[25]进一步研制了激光控制旋刮式水田平地机,提高了平整机具控制的动态响应性能。上述平整机具机架与拖拉机三点悬挂固连,形成一个刚体,机具机架自由度与拖拉机一致,平地铲高度调节通过额外增加的独立自由度实现。当以拖拉机前轮为转动点,后轮行驶至凸起地形时,平地铲高度变化幅度大于凸起地形高度。若平地铲高度无法及时调节,会导致出现挖坑和堆土现象。拖拉机与平地铲之间距离越大,这种现象更为明显。

现有水田平整机具与拖拉机三点悬挂装置固接。当拖拉机行驶于坑洼硬底层下,平地铲高度变化幅度增大,这增加了平整控制系统作业难度。为了解决现有水田平地机对坑洼硬底层适应性差的问题,本文设计支撑式水田平地机关键部件结构,研究支撑杆对平地铲高度变化的影响,并开展有/无支撑杆对比性能和水田平整试验,以验证平地机作业效果。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

支撑式水田平地机整机结构如图1所示,主要由机架、支撑杆、平地铲和高度调节机构等组成。机架包括前梁、后梁和后梁臂等结构。高度调节机构由平行连杆和液压油缸等组成,其分别与平地铲和机架连接。液压油缸伸缩动作可实现平地铲高度调节。支撑杆安装在机架前梁上,且安装间距根据配套拖拉机后轮轮距进行调节,以保证支撑杆沿后轮轮辙路径移动。



(a) 整机视图

(b) 侧视图

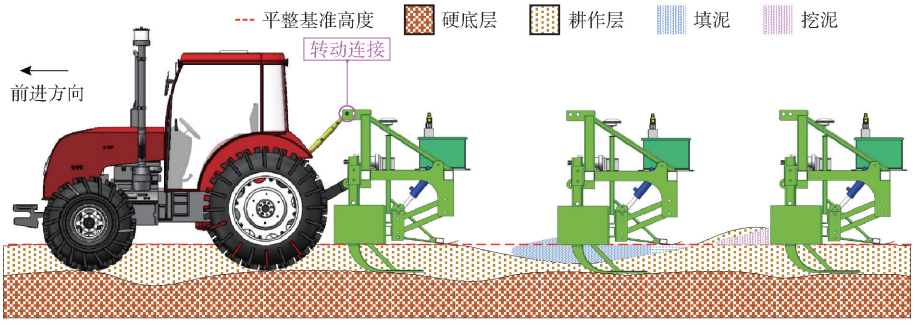
图1　支撑式水田平地机

Fig. 1　Supported paddy-field leveling machine

1.2　工作原理

如图2a所示,支撑式水田平整机具与拖拉机三点悬挂转动连接。机具机架高度不受拖拉机高度变化影响。为实现平地铲高度自动控制,根据旱田平整机械地轮的支撑仿形原理[26],提出了支撑式水田平地机设计方案。如图2所示,机具因自重下降使支撑杆支撑于水田硬底层。平整作业前,根据水田地形高度信息计算平整基准高度。平整作业中,支

撑杆在坑洼不平的硬底层移动,使平地铲高度在作业中偏离平整基准高度[27]。当农田田面和平整基准高度一致时(图 2a),平地铲不挖泥且不卸泥;当农田田面高于平整基准高度时(图 2c),平地铲铲运高于平整基准高度的泥浆;当农田田面低于基准高度时(图 2b),平地铲卸泥填坑。支撑式水田平地机对农田田面进行“挖高填低”作业,以提高水田田面平整度。



(a) 地形高度与平整基准高度一致 (b) 地形高度低于平整基准高度 (c) 地形高度高于平整基准高度

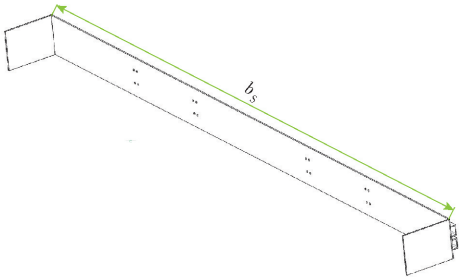
图 2 水田平地机工作原理

Fig. 2 Working principle of paddy-field leveling machine

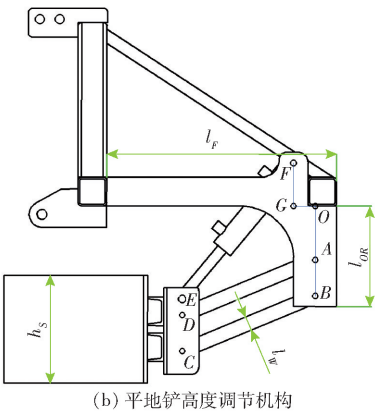
2 关键部件设计与运动学建模

2.1 平地铲

根据平地铲结构和作业参数,设计平行连杆尺寸和安装位置。通过建立平地铲运动学模型,对液压油缸选型并设计其安装位置。如图 3 所示,平地铲结构参数包括高度(h_S)与宽度(b_S),设定 h_S 为 0.3 m 与 b_S 为 5 m。如图 4 所示,平地铲工作参数包括调节行程(h_A)和极限位置(最高位 $ABC'D'$ 和最低位 $ABC''D''$)。由于支撑杆在硬底层上移动,调节行程主要由硬底层地形高度决定。参照文献[28]获取华南农业大学教学科研基地水田(3.33 hm^2)硬底层地形高度数据。结果表明水田硬底层地形高度变化幅值约为 0.3 m,则设定该值为平地铲调节行程。平地铲极限位置主要由干涉情况和水田耕作层深度共同决定。平地铲最高位设置需确保平地铲不与机架干涉,设定平地铲处于最高位时与机架底部保留一定距离(h_{UI}),设定 h_{UI} 为 0.02 m。平地铲最低位设置需确保平地铲不与支撑杆干涉,且满足水田浅耕作层区域的作业需求。当平地铲处于最低位时,设定平地铲与支撑杆保留一定距离(h_{BI})。由于单次旋耕作业深度为 0.15 ~ 0.18 m[29],设定 h_{BI} 为 0.1 m。



(a) 平地铲



(b) 平地铲高度调节机构

图 3 平地铲及其高度调节机构

Fig. 3 Leveling shovel and its height adjustment mechanism

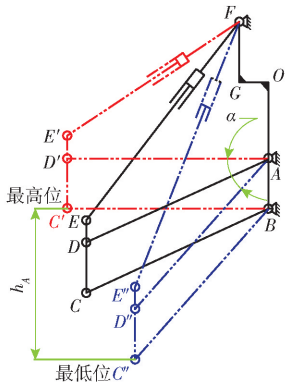


图 4 平地铲高度调节原理

Fig. 4 Adjustment principle of leveling shovel height

平地铲结构和工作参数决定平行连杆尺寸和安装位置。图 3b 和图 4 为高度调节机构示意图和平地铲调节原理图。点 O 为机架后梁的底端点。点 A、B、C 和点 D 为平行连杆的转动点,且点 C'、点 C'' 和点 D'、点 D''分别为点 C 和点 D 的不同位置。点 F 和点 E 分别为液压油缸上连接点和下连接点,且点 E'为点 E 不同位置。

为保证机架后梁臂不破坏平整后的田面,后梁

臂长度 l_{OR}需满足

$$\begin{cases} l_{OR} \leqslant h_S + h_{UI} \\ l_{OR} \geqslant l_{OB} \end{cases} \tag{1}$$

式中　l_{OB}——后梁底端与连接点 B 的距离，m

为保证高度调节机构满足作业需求，设定平地铲处于最高位时 AD'垂直于 OB，则平行连杆需满足

$$\begin{cases} l_{AD} \leqslant l_F \\ h_A = l_{AD}\sin\alpha \\ l_W > l_{AB}\cos\alpha \end{cases} \tag{2}$$

式中　l_{AD}——点 A 和点 D 间距离，m

l_F——机架前梁和后梁距离，m

α——平地铲从最高位运动至最低位时连杆 AD 转角，(°)

l_W——连杆 AD 宽度，m

l_{AB}——点 A 和点 B 距离，m

通过建立平地铲运动学模型，对液压油缸选型并设计其安装位置。如图 5 所示，以机架后梁底端点 O 为原点建立平面坐标系。

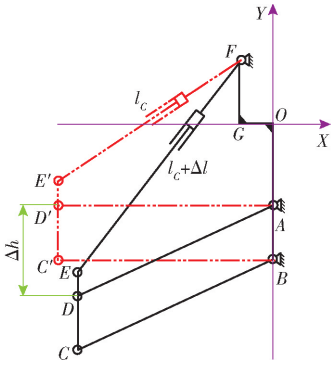


图 5　平面坐标系

Fig. 5　Plane coordinate system

以点 F 为圆心与油缸长度为半径，建立油缸下连接点 $E(x_1, y_1)$运动轨迹为

$$(x_1 + l_{OG})^2 + (y_1 - l_{GF})^2 = (l_C + \Delta l)^2 \tag{3}$$

式中　l_{OG}——油缸上连接点 F 距离机架后梁底端点 O 横向距离，m

l_{GF}——油缸上连接点 F 距离机架后梁底端点 O 纵向距离，m

l_C——油缸初始长度，m

Δl——油缸伸长量，m

以点 A 为圆心与 l_{AD}为半径，建立点 $D(x_2, y_2)$运动轨迹为

$$x_2^2 + (y_2 + l_{OA})^2 = l_{AD}^2 \tag{4}$$

式中　l_{OA}——原点 O 与点 A 间距离，m

点 E 与点 D 相对位置关系为

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \\ y_1 - y_2 = l_{DE} \end{cases} \tag{5}$$

式中　l_{DE}——连接点 E 与点 D 的距离，m

连接点 $D(x_2, y_2)$和平地铲调节高度 Δh 的关系为

$$-y_2 = l_{OA} + \Delta h \tag{6}$$

结合式(3)～(6)得到平地铲运动学模型，即油缸伸缩量 Δl 与平地铲调节高度 Δh 的关系为

$$l_{AD}^2 - \Delta h^2 - 2l_{OG}\sqrt{l_{AD}^2 - \Delta h^2} + l_{OG}^2 + (l_{DE} - l_{OA} - l_{GF} - \Delta h)^2 = (l_C + \Delta l)^2 \tag{7}$$

根据式(7)可对液压油缸选型并设计其安装位置。

2.2　支撑杆仿形性能分析

如图 6 所示，水田平整机具以拖拉机前轮为转动点，后轮行驶至凸起地形时，平地铲高度变化幅度 h_C 大于凸起地形高度 h_T。若平地铲高度无法及时调节，会导致出现挖坑和堆土现象。拖拉机与平地铲之间距离越大，这种现象更为明显，如图 7 中，$l_2 > l_3 > l_1$。

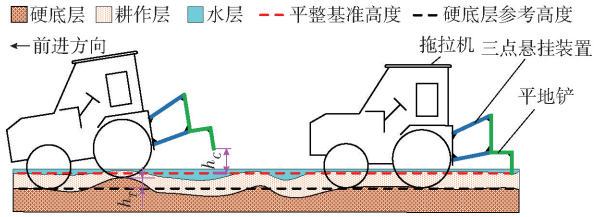
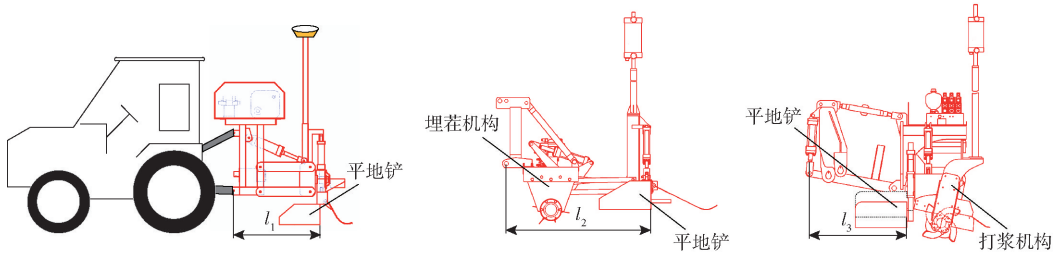


图 6　平地铲高度变化幅度

Fig. 6　Amplitude of height change of leveling shovel

如图 8 所示，本文设计的支撑杆支撑平整机具沿着硬底层地形运动。平地铲高度变化幅度主要受硬底层地形影响。因此，当支撑杆和平地铲的相对高度保持不变时，平地铲高度轨迹(h_P)与硬底层地形高度具有一致性。



(a) 文献[25]平地机　(b) 文献[30]埋茬平地机　(c) 文献[31]平地打浆机

图 7　水田平地机

Fig. 7　Paddy-field leveling machines

以机架底端为起算点，支撑杆长度 h_R 需满足

$$h_R = h_{UI} + h_S + h_A + h_{BI} \tag{8}$$

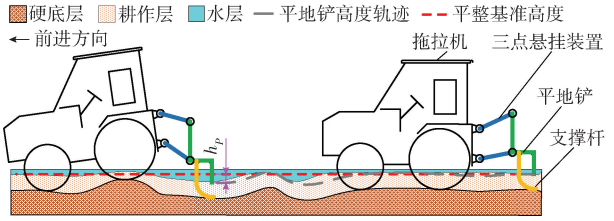


图 8 支撑杆仿形性能

Fig. 8 Profiling performance of supported rods

3 有/无支撑杆对比试验

3.1 材料与方法

如图 9 所示，于 2022 年 10 月在华南农业大学教学科研基地开展试验。为验证支撑杆具有减少平地铲高度变化幅度与次数的优势，设计了有支撑杆和无支撑杆对比试验。为保证有/无支撑杆对比试验行驶路径一致，选取局部存在凸起地形的旱田，先开展有支撑杆试验使支撑杆在旱田中生成移动轨迹，再沿此轨迹开展无支撑杆试验。在试验中，平地铲姿态仅受农田地形起伏影响，且不与田面接触，保证平地铲不搬运土方且不消除支撑杆移动轨迹。水田硬底层是由于长期水分管理、耕作和土壤压实而形成具有较大承载能力的紧实土层，其平整度差，呈不规则坑洼状，坑洼大小不一，深浅不等。所选旱田经历了水稻收获作业、多次干湿循环和农机碾压后，已发生土壤固结现象，仅表层因拖拉机胎花作用而形成浅薄松土，以保证拖拉机多次行驶的试验地形相同。因此，旱田局部凸起地形与硬质特征同水田硬底层一致，可保证试验结果有效性。以雷沃欧豹 M804 型拖拉机为配套动力悬挂平整机具，平整机具主要技术参数如表 1 所示。此外，按照拖拉机后轮轮距安装支撑杆，保证支撑杆沿着后轮轮辙移动。全球导航卫星系统（Global navigation satellite system，GNSS）接收器安装于平地铲上方，将显控终端作为数据采集平台且以频率 10 Hz 采集平地铲高度信息。对比试验分别以速度 0.8、1.0、1.2 m/s 开

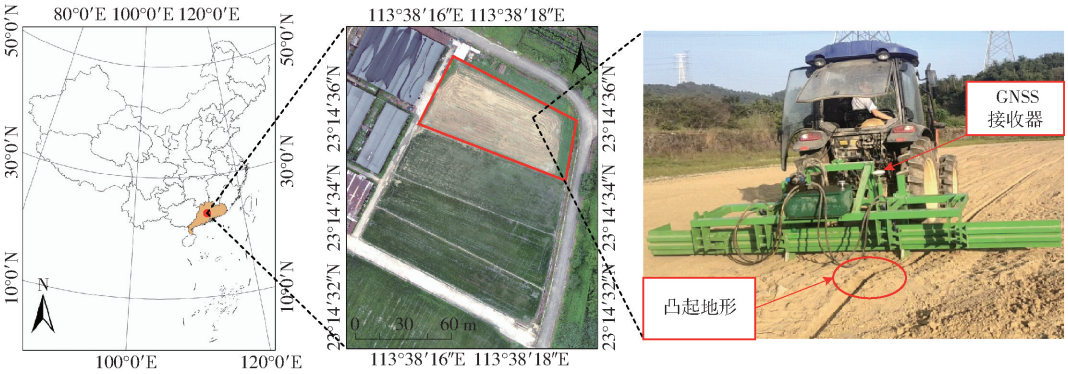


图 9 有/无支撑杆对比试验的试验地点

Fig. 9 Test site for comparison test with/without support rods

表 1 平整机具主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of leveling implement

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 000×1 050×1 300
机具质量/kg	600
平地铲幅宽/m	5
平地铲高度/m	0.3
平地铲质量/kg	217
土壤切削角/(°)	90
铲调节幅度/m	0.3

3.2 结果与分析

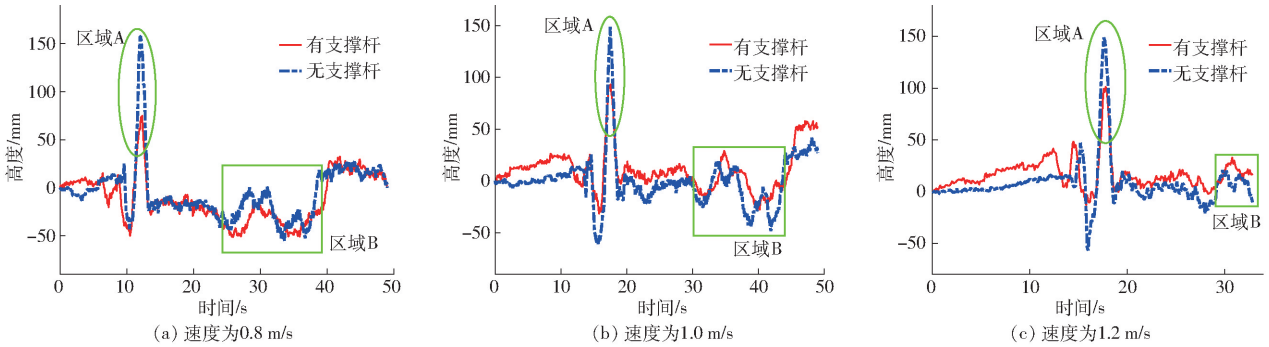
由显控终端采集的平地铲高度经 Matlab R2023a 处理结果如图 10 所示。

由图 10 可知，有支撑杆和无支撑杆平地铲高度曲线变化趋势具有一致性，二者主要差异在于曲线峰值(区域 A)。无支撑杆曲线峰值明显高于有支撑杆，这是由于拖拉机经过凸起地形使拖拉机俯仰角变化造成的。表 2 为两组在 3 种速度下高度峰值。

由表 2 可知，有/无支撑杆对比试验的行驶路径一致条件下，3 种速度下曲线峰值差分别为 82.59、55.79、47.59 mm。相比于无支撑杆，有支撑杆平地铲在 3 种速度下高度变化幅度分别减少 52.45%、37.45% 和 31.98%。

为了分析平地铲在试验全程的高度变化，进一步对高度分布进行统计，如图 11 所示。与有支撑杆平地铲相比，无支撑杆高度分布中离群点明显较多。在 3 种速度下，有支撑杆平地铲高度变化标准差(σ)比无支撑杆分别减少 15.09%、17.82% 和 31.75%，表明在试验全程有支撑杆平地铲高度变化幅度小。

除了曲线峰值，两条曲线差异还表现在曲线极点数量(区域 B)。放大图 10 区域 B 位置曲线，如图 12 所示。



(a) 速度为0.8 m/s　(b) 速度为1.0 m/s　(c) 速度为1.2 m/s

图 10　平地铲高度变化曲线

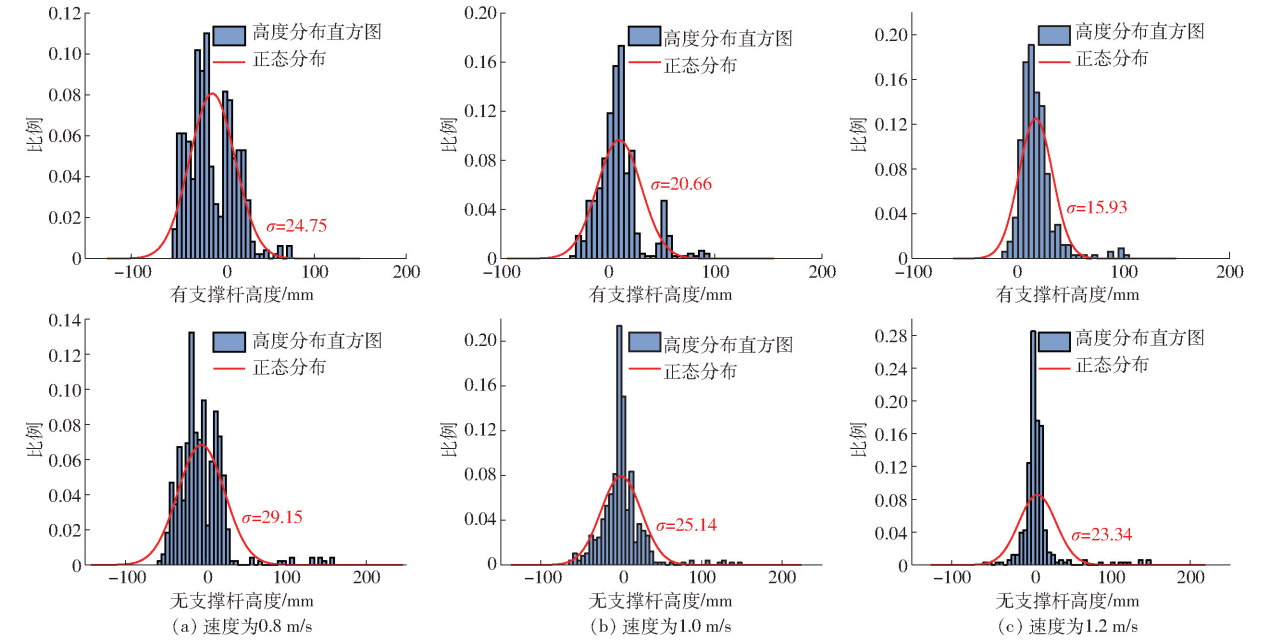
Fig. 10　Leveling shovel height change curves

表 2　3 种速度下平地铲高度变化峰值

Tab. 2　Peaks of leveling shovel height change at three travelling speeds

速度/(m·s^{-1})	高度峰值/mm	
	有支撑杆	无支撑杆
0.8	74.86	157.45
1.0	93.19	148.98
1.2	101.23	148.82

不考虑测量噪声情况下,无支撑杆平地铲高度变化曲线极值点比有支撑杆多。当有支撑杆平地铲高度呈“∧”形变化时,无支撑杆平地铲高度呈“M”形变化;当有支撑杆平地铲高度呈“∨”形变化时,无支撑杆平地铲高度呈“W”形变化。这是由于拖拉机前后轮依次经过凸起或凹陷地形时,其俯仰角出现正负值交替,导致无支撑杆平地铲高度变化曲线呈“W”和“M”形波动。此外,当“∧”和“∨”形峰值和谷值越大,无支撑杆平地铲高度“W”和“M”曲线的中间极值点越大。因此,在平整作业中,有支撑杆平地铲高度变化次数减少。



(a) 速度为0.8 m/s　(b) 速度为1.0 m/s　(c) 速度为1.2 m/s

图 11　平地铲高度分布

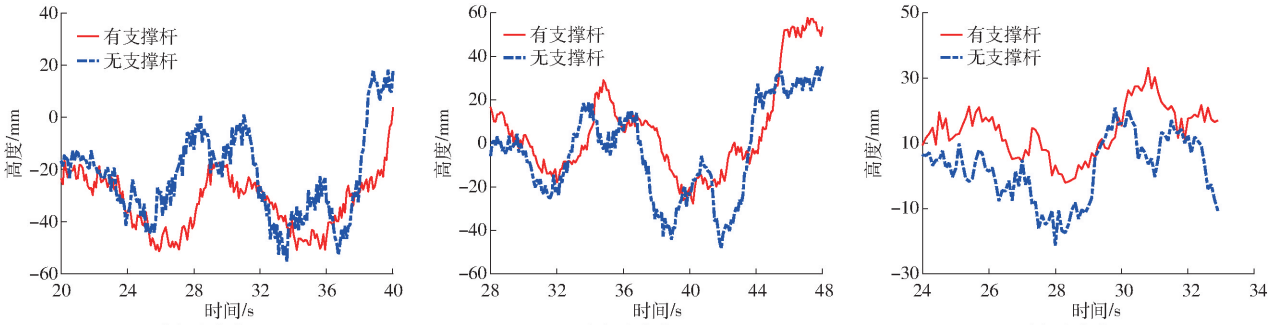
Fig. 11　Height distribution of leveling shovels

上述试验结果表明,在坑洼硬底层地形下,支撑式水田平地机可减少平地铲高度变化幅度和次数。通过减少平地铲高度变化幅度,可减少执行元件伸缩量与伸缩至极限状态的次数。通过减少平地铲高度变化次数,可减少执行元件伸缩频次,降低液压系统工作负荷,提高平地机作业性能。因此,支撑式水田平地机更适用于坑洼硬底层作业。此外,通过降低执行元件伸缩量和伸缩频次,可减少控制时间和频次,有效提高高速精准平整作业可靠性。

4　水田平整试验

4.1　材料与方法

平整机具主要技术参数如表 1 所示。如图 13 所示,农田平整控制系统主要由 GNSS 接收器和显控终端组成。平整作业前,通过显控终端来设定平整基准高度。平整作业中,GNSS 接收器检测平地铲实时高度信息并传输至显控终端,显控终端处理高度信息并下发控制信号至液压系统来驱动执行元



(a) 速度为0.8 m/s (b) 速度为1.0 m/s (c) 速度为1.2 m/s

图 12 区域 B 的放大视图

Fig. 12 Enlarged view of area B

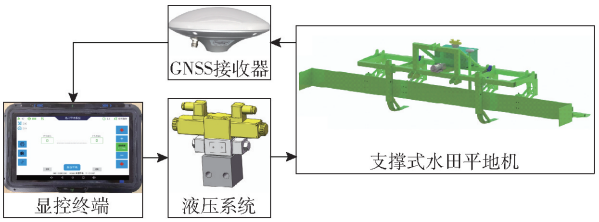


图 13 农田平整控制系统

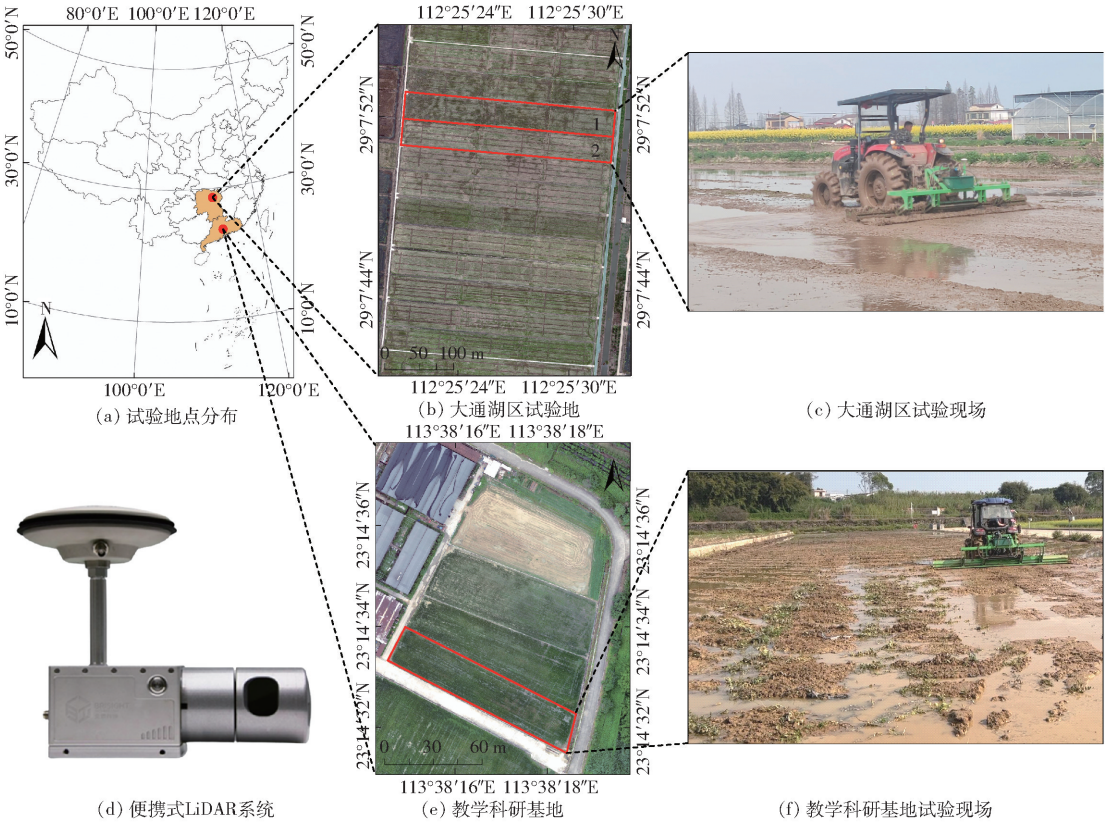
Fig. 13 Leveling control system

件,保证实时调节平地铲运动至平整基准高度。

如图 14 所示,于 2023 年 3 月在华南农业大学教学科研基地和湖南省益阳市大通湖区分别开展田间试验。如表 3 所示,2 次试验在农田面积、农田前茬作物、农田准备方式和配套动力机械方面具有差异性。为分析支撑式水田平地机的作业效果,采用便携式激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)系统(金景科技,精度:20 mm)(图 14d)来获取农田平整前后地形点云数据。

4.2 结果与分析

将便携式 LiDAR 系统采集的原始数据,经 InertialExplorer 和 Scanlook PC 处理生成三维点云数据,且采用 CloudCompare 对点云数据按照高度值进行渲染,渲染结果如图 15 所示。平整前农田田面地形高度差在 100 mm 内,且旋耕作业产生间隔分布的曲线凸起和凹陷地貌。平整作业改善了农田地形高度差异,并解决了凸起和凹陷间隔分布问题,表明平整作业可实现“挖高填低”效果,而图 15b 中局部地形偏高(红色区域)的主要原因是旋耕作业后耕作层土壤软硬不一,导致平整作业后耕作层土壤发生不同程度的沉降。



(a) 试验地点分布 (b) 大通湖区试验地 (c) 大通湖区试验现场

(d) 便携式LiDAR系统 (e) 教学科研基地 (f) 教学科研基地试验现场

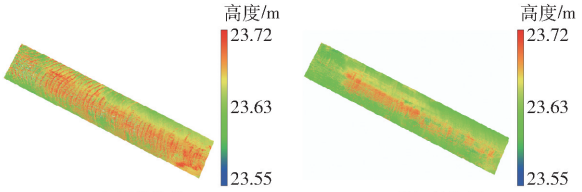
图 14 水田平整试验的试验地点与过程

Fig. 14 Test site and process of paddy field leveling test

表 3　水田平整试验条件

Tab. 3　Test conditions of paddy field leveling test

地点	农田序号	农田面积/hm²	前茬作物	农田准备	配套动力
广州	1	0.21	荷兰豆	旋耕	雷沃欧豹 M804 型拖拉机
湖南	1	0.90	油菜	小并大推土、旋耕	东方红 LY1004 型拖拉机
	2	0.99			



(a) 平整前　(b) 平整后

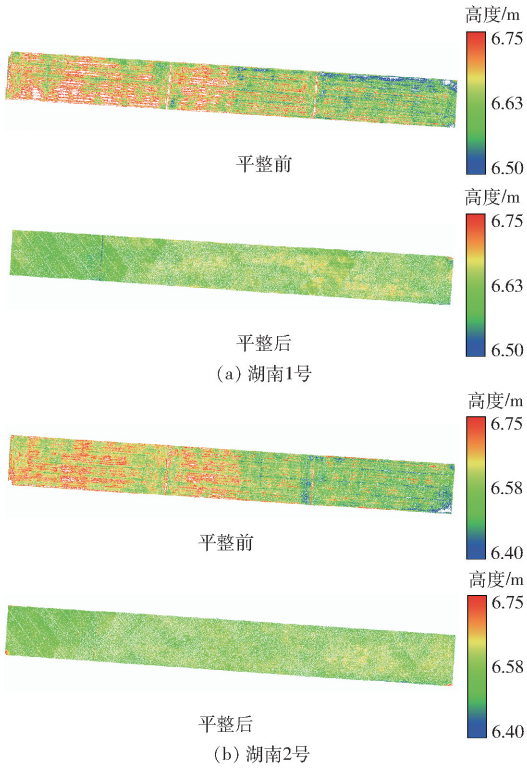
图 15　广州 1 号田地形数据渲染结果

Fig. 15　Rendering results of topographic data for field 1 in Guangzhou City

以农田田面地形高度标准差 S_d[32-33]与农田田面高度相对平整基准高度绝对偏差不大于 30 mm 测量点占比 ρ[30, 34]评价农田平整质量。平整作业后，农田田面地形高度标准差 S_d 为 21.66 mm，ρ 为 86.54%，表明支撑式水田平地机可改善田面平整情况。与文献[24]进行对比，文献[24]水田面积为 0.25 hm²，平整后 S_d 为 26.40 mm，且 ρ 为 69.40%。在水田面积相近情况下，本研究 0.21 hm² 水田平整后 S_d 与 ρ 指标均优于文献[24]。

湖南省益阳市大通湖区的试验田块平整前后原始测量数据经 InertialExplorer、Scanlook PC 和 CloudCompare 进行依次处理，结果如图 16 所示。平整前农田地形沿长边方向存在严重高度差异，其中 2 号田地形高度差约 300 mm，1 号田地形高差则次之。平整作业减少了农田在长边方向的地形高度差异。田块渲染图颜色层次减少，单色覆盖率和均匀性高表明农田平整后农田田面具有良好的平整度。

采用指标 S_d 和 ρ 评价农田平整质量，统计 2 块试验田平整质量。湖南试验田块 1 平整后 S_d 为 26.02 mm，ρ 为 80.53%；湖南试验田块 2 平整后 S_d 为 27.43 mm，ρ 为 81.03%。由此可知，平整后 S_d 均小于 30 mm，且 ρ 均大于 80%，达到了水田平整要求，验证了支撑式水田平地机结构设计有效性。与文献[24]进行对比，本文水田面积比文献[24]大 3.8 倍情况下，S_d 与文献[24]基本一致，且 ρ 均高于文献[24]的 10%以上。



(a) 湖南1号　(b) 湖南2号

图 16　田地形数据渲染结果

Fig. 16　Rendering results of topographic data

5　结论

(1)通过水田平整试验结果验证了支撑式水田平地机的结构设计有效性。由支撑式水田平地机进行水田平整试验，0.21 hm² 水田平整后田面高度标准差 S_d 为 21.66 mm，田面高度相对平整基准高度的绝对偏差不大于 30 mm 的测量点占比 ρ 为 86.54%；总面积为 1.89 hm² 的 2 块水田平整后 S_d 分别为 26.02 mm 和 27.43 mm，ρ 分别为 80.53% 和 81.03%。试验田块经平整后 S_d 均小于 30 mm，且 ρ 均高于 80%，达到了水田平整要求。

(2)有/无支撑杆对比试验结果表明，支撑式水田平地机减少了平地铲高度变化幅度和次数，可提高平地铲高度控制精度，更适用于坑洼硬底层作业。相比于无支撑杆，有支撑杆平地铲在试验全程高度变化幅度减少 15%以上，在田面凸起位置高度变化幅度减少 30%以上，且平地铲高度变化次数减少。

参　考　文　献

[1] LIU Yalong, GE Tida, GROENIGEN K J V, et al. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis[J]. Communications Earth & Environment, 2021, 2(1): 1-9.

[2] MACLEAN J L, DAWE D C, HARDY B, et al. Rice almanac: source book for the most important economic activity on earth [M]. Third edition. UK: CABI, 2002.

[3] PAN Jinhua, WANG Jin, ZHUANG Shunyao. Higher soil carbon and nitrogen sequestration in rice than non-rice soils following land reclamation[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237: 105963.

[4] NAWAZ A, REHMAN A U, REHMAN A, et al. Increasing sustainability for rice production systems[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 103: 103400.
[5] SINGH M, SIDHU H S, SINGH Y, et al. Performance evaluation of automatic vis-à-vis manual topographic survey for precision land levelling[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(2): 300 - 310.
[6] SOUSA P L D, DEDRICK A R, CLEMMENS A J, et al. Effect of furrow elevation differences on level-basin performance[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1995, 38(1): 153 - 158.
[7] RAJPUT T B S, PATEL N. Enhancement of field water use efficiency in the Indo-Gangetic Plain of India[J]. Irrigation and Drainage, 2005, 54(2): 189 - 203.
[8] SINGH N K, SINGH J B, SINGH A K, et al. Feasibility of laser land leveling in rice-wheat systems of the Central Indo-Gangetic Plains[J]. International Journal of Pure & Applied Bioscience, 2018, 6(6): 167 - 171.
[9] 魏新华, 王庆壮, 吉鑫, 等. 基于混合扩张状态观测器的农田平地机液压系统反步滑模控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 37 - 46.
WEI Xinhua, WANG Qingzhuang, JI Xin, et al. Backstepping sliding mode control for hydraulic system in farmland leveller based on hybrid extended state observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 37 - 46. (in Chinese)
[10] SHEIKH A T, MUGERA A, PANDIT R, et al. The adoption of laser land leveler technology and its impact on groundwater use by irrigated farmland in Punjab, Pakistan[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(12): 2026 - 2038.
[11] LATIF A, SHAKIR A S, RASHID M U. Appraisal of economic impact of zero tillage, laser land levelling and bed-furrow interventions in Punjab, Pakistan[J]. Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 13: 65 - 81.
[12] JAT M L, SINGH Y, GILL G, et al. Advances in soil science: laser-assisted precision land levelling impacts in irrigated intensive production systems of South Asia[M]. New York: CRC Press, 2015: 323 - 352.
[13] BAKAR B A, AHMAD M T, GHAZALI M S S, et al. Leveling-index based variable rate seeding technique for paddy[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(4): 729 - 736.
[14] CHEN Gaolong, HU Lian, LUO Xiwen, et al. A review of global precision land-leveling technologies and implements: current status, challenges and future trends[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108901.
[15] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 1 - 16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1 - 16. (in Chinese)
[16] LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, LI Qing, et al. Study on leveling control for a paddy laser leveler[C]// 2007 ASAE Annual Meeting Presentation, 2007.
[17] NGUYEN V H, BALINGBING C, SANDRO J, et al. Precision land leveling for sustainable rice production: case studies in Cambodia, Thailand, Philippines, Vietnam, and India[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(5): 1633 - 1652.
[18] SHARIFI A, GORJI M, ASADI H, et al. Land leveling and changes in soil properties in paddy fields of Guilan Province, Iran [J]. Paddy and Water Environment, 2014, 12(1): 139 - 145.
[19] BARUAH S, MOHANTY S, ROLA A C. Small Farmers Large Field (SFLF): a synchronized collective action model for improving the livelihood of small farmers in India[J]. Food Security, 2022, 14(2): 323 - 336.
[20] 陈正, 刘瀛弢, 贺德俊, 等. 中国高标准农田建设现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 1 - 8.
CHEN Zheng, LIU Yingtao, HE Dejun, et al. Current situation and development trend of well-facilitated farmland construction in China[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 1 - 8. (in Chinese)
[21] 罗纨, 王嘉诚, 贾忠华, 等. 稻麦轮作高标准农田控制排水对排水与氮素输出削减效果模拟[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 272 - 279, 311.
LUO Wan, WANG Jiacheng, JIA Zhonghua, et al. Simulation of effect of controlled drainage on reducing drainage and nitrogen output from high standard farmland in rice and wheat rotation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 272 - 279, 311. (in Chinese)
[22] 袁翠霞, 赵春江, 任艳敏, 等. 基于 U - Net 网络的高标准农田道路识别方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 163 - 169, 218.
YUAN Cuixia, ZHAO Chunjiang, REN Yanmin, et al. Recognition method of high-standard farmland road based on U - Net [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 163 - 169, 218. (in Chinese)
[23] 严乙桉, 罗锡文, 资双飞, 等. 基于 50 马力轮式拖拉机的水田激光平地机设计与试验[C]// 创新农业工程科技 推进现代农业发展——中国农业工程学会 2011 年学术年会, 2011.
[24] 胡炼, 罗锡文, 林潮兴, 等. 1PJ - 4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 146 - 151.
HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Development of 1PJ - 4.0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146 - 151. (in Chinese)
[25] HU Lian, XU Yi, HE Jing, et al. Design and test of tractor-attached laser-controlled rotary scraper land leveler for paddy fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2020, 146(4): 04020002.
[26] 胡炼, 杜攀, 罗锡文, 等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 15 - 21.
HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15 - 21. (in Chinese)

(下转第 274 页)

SUN Liang, LIU Bing, CHEN Xuan, et al. Design of differential transplanting mechanism for zigzag wide-narrow row rice pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 18 - 27. (in Chinese)

[22] ZHOU L, YU J Q, WANG Y, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2020, 374: 353 - 376.

[23] TANG Han, GUAN Tianyuan, XU Fudong, et al. Test on adsorption posture and seeding performance of the high-speed precision dual-chamber maize metering device based on the seed characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108471.

[24] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):83 - 94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83 - 94. (in Chinese)

[25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[26] 郭鹏,郑效帅,王东伟,等. 气力辅助充种式花生精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):64 - 74.
GUO Peng, ZHENG Xiaoshuai, WANG Dongwei, et al. Design and experiment of precision seed metering device with pneumatic assisted seed-filling for peanut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 64 - 74. (in Chinese)

[27] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)

[28] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于 DEM - CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):54 - 66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54 - 66. (in Chinese)

(上接第 260 页)

[27] ZHAO Runmao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. A novel approach for describing and classifying the unevenness of the bottom layer of paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 552 - 560.

[28] TU Tuanpeng, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Methods and experiments for collecting information and constructing models of bottom-layer contours in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107719.

[29] 孙永健, 郑洪帧, 徐徽, 等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 10 - 18.
SUN Yongjian, ZHENG Hongzhen, XU Hui, et al. Mechanical dry direct-sowing modes improving growth, development and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 10 - 18. (in Chinese)

[30] 杜攀. 浮动悬挂式激光平地机设计与试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
DU Pan. Design and experimental study of the floating suspended laser grader[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[31] ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and test of laser-controlled paddy field levelling-beater[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 57 - 65.

[32] 刘刚, 林建涵, 司永胜, 等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 71 - 74.
LIU Gang, LIN Jianhan, SI Yongsheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 71 - 74. (in Chinese)

[33] 汪沛, 冯达文, 陈高隆, 等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 41 - 48.
WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 41 - 48. (in Chinese)

[34] 胡炼, 彭靖怡, 赖桑愉, 等. 基于 BDS 和 IMU 的挖掘机铲斗位姿测量方法与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 12 - 19.
HU Lian, PENG Jingyi, LAI Sangyu, et al. Method and experiments of excavator bucket position and attitude measurement using BDS and IMU[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 12 - 19. (in Chinese)