

悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验

胡 炼^{1,2} 杜 攀^{1,2} 罗锡文^{1,2} 周 浩^{1,2} 唐灵茂^{1,2} 苏洪毅^{1,2}

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对牵引式旱地激光平地机转弯半径大、两轮支撑易出现压实轮辙、小田块精准平地适应性差等问题,设计了一种悬挂式多轮支撑旱地激光平地机,该机通过拖拉机三点悬挂机构浮动功能与多轮支撑相结合,实现激光控制平地作业。建立了平地铲浮动调节数学模型,确定了平地机结构参数与工作参数,分析了支撑轮对土壤的压实,设计了由两组刚性轮组成的支撑轮结构,减小了支撑轮对松软土壤的压实轮辙。田间试验结果表明,悬挂式多轮支撑旱地激光平地机作业性能稳定,田面最大高程差从平整前 20.8 cm 降至平整后 7.3 cm,相对高程标准偏差 S_d 从平整前 4.48 cm 下降到平整后 1.72 cm,平整后绝对差值小于 3 cm 的采样测量点累计百分比 91.94%,显著改善了田面平整情况,满足田块精准平地要求。平地前后网格点土壤紧实度分析结果表明,悬挂式多轮支撑旱地激光平地机的多支撑轮对试验田块 0~17.5 cm 深度范围的土壤紧实度具有一定的压实影响,深度达 17.5 cm 及以上时,土壤紧实度基本稳定,整田表层土壤压实均匀。松软土壤经过均匀压实后,减小了土壤后期的沉降,保证了田面平整度。通过作图法对比分析了悬挂式平地机与牵引式平地机在田角处不能平整的面积比例,平整 100 m×100 m、36.5 m×36.5 m、25.8 m×25.8 m 田块时,牵引式平地机不能平整面积占比分别为 0.78%、5.8% 和 19.4%,而悬挂式平地机不能平整面积占比小,分别为 0.09%、0.68% 和 2.25%,表明悬挂式平地机小田块平地作业更具优势。

关键词: 激光平地; 悬挂式; 支撑轮; 平整度; 紧实度

中图分类号: S222.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0015-07

Design and Experiment on Multi-wheel Support Laser Land Leveler Hanging on Tractor

HU Lian^{1,2} DU Pan^{1,2} LUO Xiwen^{1,2} ZHOU Hao^{1,2} TANG Lingmao^{1,2} SU Hongyi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The laser land leveling of turning radius is large and the two-wheel support is easy to appear rim, which is not suitable for the accurate flat land of the small field. A multi-wheel support laser land leveling hanging on tractor was designed. By analyzing the floating function of the three-point suspension mechanism of the tractor and the multi-wheel support, the working principle of the laser-controlled flat shovel was realized. The mathematical model of the floating lifting shovel was established, and the structural parameters and working parameters of the grader were determined. Based on compaction analysis of the support wheel, the support wheel structure composing of two sets of rigid wheels was designed, which reduced the compaction and rim of the soft surface of the two-wheel support. The field test of the prototype showed that the operation performance of the machine was stable. The maximum elevation difference and standard deviation of the field were reduced from 20.8 cm and 4.48 cm to 7.3 cm and 1.72 cm, respectively. The cumulative percentage of the sampling points with the absolute difference between the sampling point and the mean was less than 3 cm was 91.94%, which can significantly improve the smoothing of the field and meet the requirements of accurate flat land in the small field. The

收稿日期: 2019-05-06 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701105)和国家自然科学基金项目(31601225)

作者简介: 胡炼(1984—),男,副研究员,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lianhu@scau.edu.cn

通信作者: 罗锡文(1945—),男,教授,中国工程院院士,主要从事农业工程和精准农业研究,E-mail: xwluo@scau.edu.cn

soil compaction degree of the grid points before and after the flat ground was compared and analyzed, which indicated that the compaction effect of the multi-wheel support on the test field appeared at 0 ~ 17.5 cm. However, when the depth was more than 17.5 cm, the soil compaction was basically stable, and the surface soil of the whole field was compacted evenly. Moreover, the soft soil was moderately compacted after leveling, which reduced the sedimentation in the later stage of the soil and ensured the smoothness of the field. The percentage of an area that can not be leveled in the field corners of the traction leveler and hanging leveler was analyzed through the mapping method. The result showed that in the 100 m × 100 m, 36.5 m × 36.5 m and 25.8 m × 25.8 m, the proportion of area that can not be leveled with traction leveler was 0.78% ,5.8% and 19.4% , respectively, while the hanging leveler was only 0.09% , 0.68% and 2.25% , respectively, which showed that the hanging leveler was more suitable for small field flats.

Key words: laser land leveling; hanging; support wheel; flatness; tightness

0 引言

平整的农田能节约灌溉用水、提高灌溉效率、有效抑制杂草生长、改善作物成熟均匀性以及提高作物产量^[1-3]。激光平地技术是先进的农田平整技术,采用该技术平地可节水 47%,较传统的人工平地节水 15%,具有显著的经济效益和社会效益^[4-8]。

激光平地技术在欧美等国已广泛应用,Topcon、Trimble 和 John Deer 等生产厂商可提供成熟的牵引式旱地激光平地机,同时在进一步拓展平地机功能和开展新技术研究。IRSEL 等^[9]设计了一种能够自动调平和牵引力测量的激光平地机,采用双油缸实现左右调平,通过测量牵引力实时监测平地铲拉土负载,平地铲超载时能自动提升,达到节省时间和燃料的目的。HUSEYIN 等^[10]通过比较不同幅宽平地铲工作时间,研究了预测平地铲工作时间的数学模型。此外,基于 GNSS 的平地技术也逐步得到应用^[11-12]。我国于 20 世纪 80 年代引进国外机型进行试验,并开始自主研发^[13-16],在激光控制系统方面取得了一些成果^[17-20]。在我国北方地区,旱地激光平地机通过大功率拖拉机牵引,大面积农田平整效率高,但其转弯半径较大,对小块农田适应性较差。我国水稻种植地块小,除了几个平原地区外,大部分地区是小地块,约占水稻种植总面积的 70%。农户种植规模 90% 以上为 0.13 ~ 0.33 hm²^[21]。现有的牵引式旱地激光平地机对于这种小块农田适用性较差,采用两个轮胎作为支撑轮支撑平地铲升降,在土壤松软的田块易出现明显压实轮辙^[22],影响平地效果。而无支撑轮支撑的悬挂式平地机难以实现激光控制平地,手动控制平地铲升降仿形作业,平地效果差^[23]。

本文针对牵引式旱地激光平地机转弯半径大、两支撑轮支撑易产生轮辙等问题,研究设计一种悬挂式多轮支撑旱地激光平地机,并进行平地试验。

1 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计

1.1 整机设计

悬挂式多轮支撑旱地激光平地机如图 1 所示,主要由三点悬挂机架、接收器调节桅杆、平地铲、高程调节架、高程油缸、支撑轮架和支撑轮组成。通过拖拉机三点悬挂机构挂接平地铲,利用三点悬挂机构的浮动功能和多轮支撑实现平地铲高程运动的调节,同时平地铲可由拖拉机三点悬挂机构手动提升。平地铲与三点悬挂机架相连,高程调节架与平地铲相接,支撑轮通过支撑轮架与高程调节架下端铰接,高程油缸一端与高程调节架上端铰接,另一端与支撑轮架铰接,构成一个两边长度不变一边伸缩的三角形,实现平地铲与支撑轮的相对运动。支撑轮由多个刚性轮组成,其总宽与平地铲幅宽一致,增大轮子与田面的接触面积,分散对田面的应

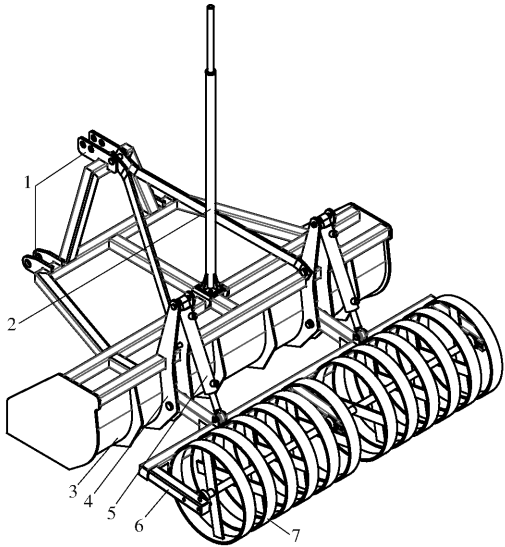


图 1 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机结构图
Fig. 1 Structure diagram of multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor

1. 三点悬挂机架 2. 接收器调节桅杆 3. 平地铲 4. 高程调节架 5. 高程油缸 6. 支撑轮架 7. 支撑轮

力,减少支撑轮压实轮辙,同时适度均匀压实表层松软土壤。

1.2 工作原理

悬挂式多轮支撑旱地激光平地机通过三点悬挂机架与拖拉机三点悬挂机构相连,将拖拉机三点悬挂机构放至最低点并设为浮动功能,支撑轮支撑平地铲升降,激光平地控制器控制高程油缸伸缩调节平地铲高程运动,设置合适的平地铲铲土深度后切换激光平地控制器为“自动模式”。悬挂式多轮支撑旱地激光平地机作业原理如图2所示,图2a状态

下,农田田面高度正好保证平地铲高度在设定平地位置,激光接收器零位接收到激光信号,控制器不调节;图2c状态田面较高,控制器控制高程油缸缩短,拖拉机三点悬挂机构和平地铲下降至设定高度,平地铲铲土;图2b状态田面较低,通过控制高程油缸伸长驱动平地铲上升到设定平面,平地铲卸土。因此,在支撑轮支撑和激光平地控制器自动控制作用下,平地铲铲底始终以旋转的激光平面为基准设定铲土高度,对农田表层土壤“挖高填低”,实现精准平地。

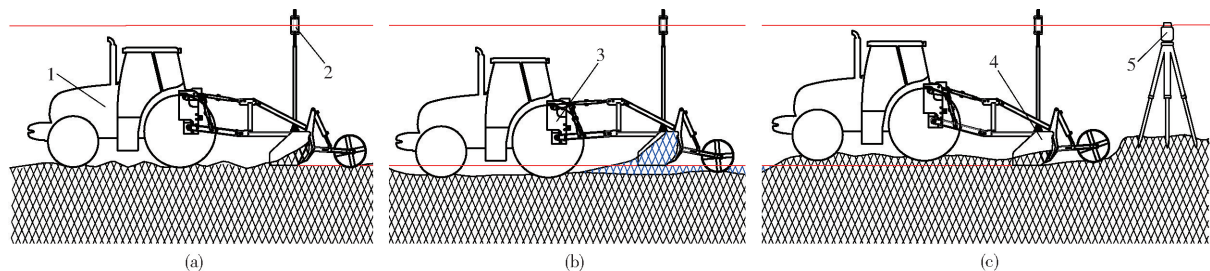


图2 平地机工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of laser land leveler

1. 拖拉机 2. 激光接收器 3. 三点悬挂机构 4. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机 5. 激光发射器

1.3 关键部件设计

1.3.1 平地铲与浮动调节分析

平地铲铲刀设计为切土角 37° 、抛土角 37° 、翻土角 10° 和铲壁半径 0.25 m ,可较好实现平地铲铲土、升土、翻土和集土功能,且减小切削阻力和表面沾土^[24-26]。为保证平地铲始终在理想的切土角和翻土角工作,作业时应尽量保持平地铲上下平动。因此,三点悬挂机架与拖拉机三点悬挂机构挂接时,可调节三点悬挂机构保证上下拉杆向侧面投影呈平行四边形,从而减小因上下拉杆处于不规则四边形转动导致的高程调节平地铲俯仰姿态变化,影响平地铲作业和激光接收器接收激光信号的精度。

图3为悬挂式多轮支撑旱地激光平地机平地铲高程调节运动简图。黑色实线为平地铲支撑轮架水平所处位置,蓝色中心线表示平地铲上升高度 h 后的位置。视拖拉机三点悬挂上下铰接点处于竖直线上且固定不动, A 为支撑轮架转动点, E 为高程油缸上铰接点, AE 处于竖直线上。 B 为高程油缸下铰接点, C 为支撑轮中心点。在平地铲与拖拉机三点悬挂机构浮动连接的情况下,由支撑轮支撑,高程油缸 BE 作为原动件伸缩驱动平地铲的升降。

设计支撑轮与平地铲放置地面上时, AC 平行于地面, AE 垂直于 AC ,当原动件 BE 伸长 l 后

$$\alpha = 180^\circ - \arccos \frac{h}{l_{A'C'}} \quad (1)$$

$$l_{B'E'}^2 = l_{A'E'}^2 + l_{A'B'}^2 - 2l_{A'E'}l_{A'B'}\cos\alpha \quad (2)$$

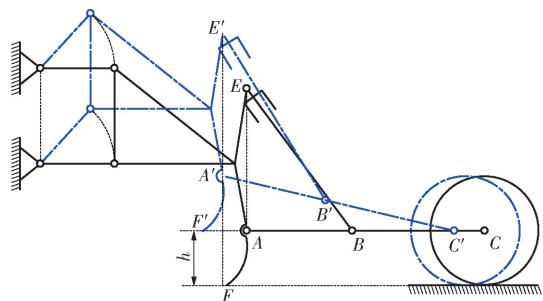


图3 平地铲升降原理图

Fig. 3 Lifting principle diagram of leveling shovel

油缸伸长长度为

$$l = l_{B'E'} - l_{BE} \quad (3)$$

因此,由式(1)~(3)得平地铲上升高度 h 与油缸伸长长度 l 关系为

$$h = \frac{l_{A'C'}}{2l_{A'E'}l_{A'B'}} [(l_{BE} + l)^2 - (l_{A'E'}^2 + l_{A'B'}^2)] \quad (4)$$

式中 α ——支撑轮架与高程调节架的夹角, $(^\circ)$

h ——平地铲上升高度,mm

l ——原动件 BE 伸长量,mm

$l_{A'C'}$ —— $A'C'$ 的长度,mm

$l_{B'E'}$ —— $B'E'$ 的长度,mm

$l_{A'E'}$ —— $A'E'$ 的长度,mm

l_{BE} —— BE 的长度,mm

1.3.2 支撑轮与压实分析

如图1所示,支撑轮由支撑轮架和两组刚性轮组成,两组刚性轮通过支撑轴安装在轴承座上,支撑轮架转动点与平地铲高程调节架下端铰接。

农田压实增加土壤机械阻力和能耗^[27],土壤压实是轮胎与土壤相互作用导致土壤结构被破坏的过程^[22],轴载相同时增大接触面积是减少轮胎压实的有效措施^[28]。轮胎与刚性轮在土壤压实应力传递存在差异,由于压力与载荷呈正比,与接触面积呈反比,即在轴载相同的情况下,支撑面越大,越能减小支撑轮对田面的压实影响。如图4所示,若支撑轮由2组每组6个刚性轮组成,在轴载一定时,与2轮支撑对比,单个轮胎单次所造成的压实可以深入到土壤中,而单个刚性轮压实单次影响仅为单个轮胎的1/6,因此,采用多轮支撑可有效减小支撑轮的压实轮辙。

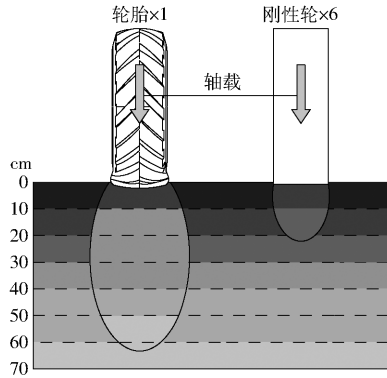


图4 压实应力对比示意图
Fig.4 Comparison diagram of compaction stress

2 田间试验与结果分析

2.1 试验方法

试验于2018年12月在华南农业大学科研基地试验田进行,试验现场如图5所示。试验样机长×宽×高为2.25 m×2 m×3 m,质量为335 kg,三点悬挂机架立柱高0.5 m,长1 m,铲高0.5 m,支撑轮架长0.6 m,高程连接架铰接点间距0.6 m,支撑轮外径为0.5 m。试验用久保田704型拖拉机,平地铲最大上升高度为0.3 m。平地铲以支撑轮接地处为基准线,高程油缸伸至最长时,平地铲高于基准线0.3 m;高程油缸缩至最短时,平地铲低于基准线0.18 m。即在高程油缸行程为0.2 m的情况下,平地铲高程可升降0.48 m。路上行走、田间掉头或田间倒车时,由拖拉机控制三点悬挂机构整体升降;田间作业时,则将拖拉机三点悬挂机构放至最低位置并设置为浮动模式。

如图6所示,平地机激光控制系统^[17-18]由激光发射器、激光接收器和控制器组成,激光发射器发射旋转的激光为基准平面,安装于调节桅杆上的激光接收器接收激光信号,控制器依据激光接收器信号通过液压系统控制高程油缸伸缩自动调节平地铲高

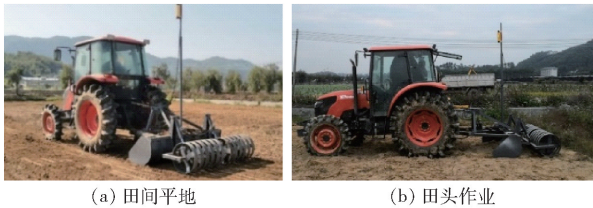


图5 田间试验
Fig.5 Pictures of field experiment

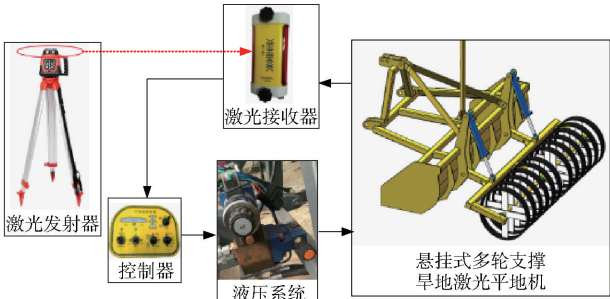


图6 控制系统原理图
Fig.6 Control system

程,始终保持在设定铲土高度平地作业。

试验田块长×宽为50 m×35 m,前茬为玉米,试验前旋耕一遍,含水率为15.93%。为了减少人为因素对田面高程测定的影响,将田块按5 m×5 m网格划分,共63个网格点。平地前后均采用全站仪,对试验田块中40 m×25 m进行网格化采样(索佳CX-102LN,精度:(2+2×10⁻⁶D) mm)^[29]。在田埂上选择两个稳固的控制点,在其中一点设站,对中调平,选取另一点后视定向,手持棱镜(高1.21 m)立于网格点田面,通过全站仪棱镜尖粗瞄目标点,调焦精瞄测量坐标。采用紧实度仪(SC900型,每2.5 cm深度自动记录一次紧实度,测量范围:0~7 000 kPa)测量各网格点处0~30 cm紧实度,平整后在各网格点附近(距离小于5 cm)重复测量。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 平地作业平整度

采用Matlab软件处理全站仪测得的数据,结果如图7所示。图中黄色表示田面地势较高,蓝色表示田面地势较低。从图7a可以看出,平整前田块高低不平,而图7b所示颜色分布较均匀且趋向浅蓝色,表明悬挂式多轮支撑旱地激光平地机作业实现了“挖高填低”的平地效果,图中黄色较高区域是平地铲内土壤从平地铲侧面溢出形成的土堆。

为分析平整质量,采用农田田面相对高程标准偏差 S_d 评价土地平整精度^[20],田块内所有采样测量点高程与期望相对高程绝对差小于3 cm的测量点累计百分比 α 评价田间地面形状差异^[30],统计结果如表1所示。

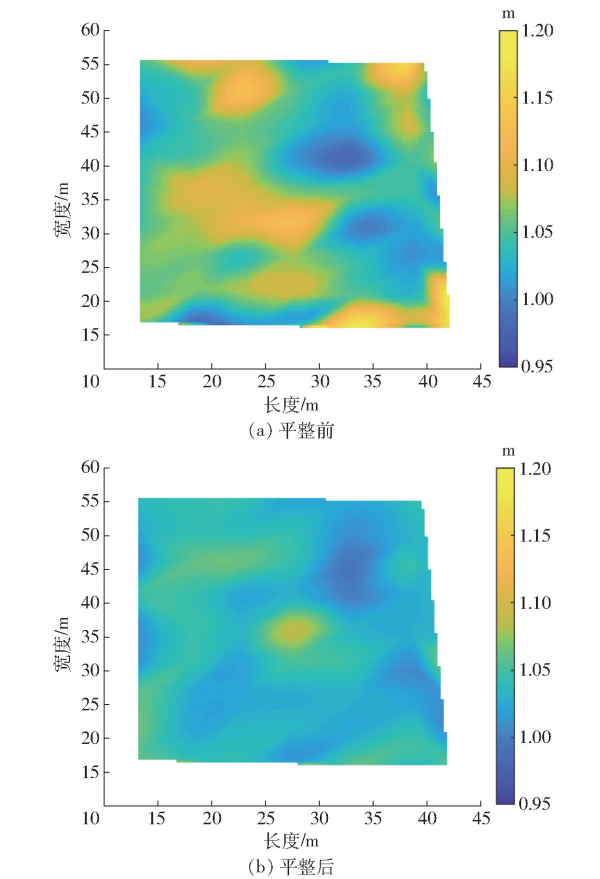


图 7 平地前后平整度
Fig. 7 Flatness before and after leveling

表 1 平整质量统计结果

Tab.1 Leveling quality statistics

平地状态	最大高程差/cm	S_d /cm	α /%
平整前	20.8	4.48	56.5
平整后	7.3	1.72	91.94

田间平地作业表明,悬挂式多轮支撑旱地激光平地机能够稳定作业,田面最大高程差从平整前 20.8 cm 降至平整后 7.3 cm,相对高度的标准偏差从平整前 4.48 cm 下降至平整后 1.72 cm,平整后绝对差值小于 3 cm 的采样测量点累计百分比为 91.94%,悬挂式多轮支撑旱地激光平地机在小田块作业效率高,显著改善了田面平整情况。

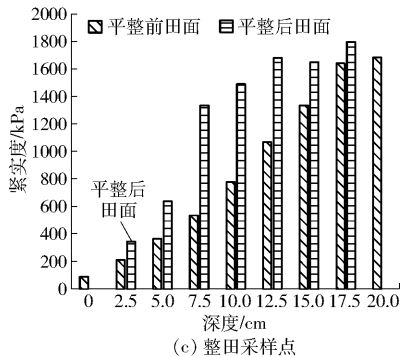
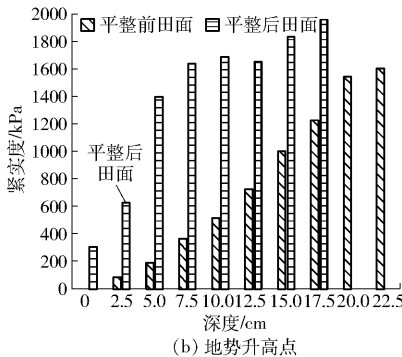
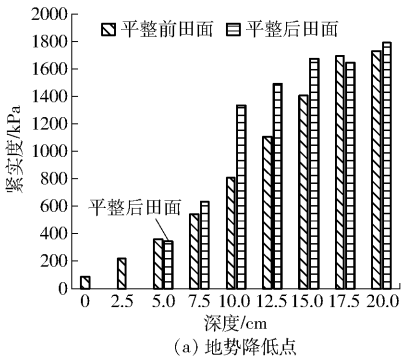


图 8 土壤不同深度平均紧实度

Fig. 8 Average depth of soil compaction at different depths

2.2.2 支撑轮压实情况

为分析悬挂式多轮支撑旱地激光平地机对作业田块的压实影响,将网格点紧实度按平整后采样点地势变化分为地势降低、地势升高和整田 3 组。

田面地势降低采样点共 40 个,平均地势相对于平地前下降了 4.4 cm。为分析平地前后同一深度土壤紧实度变化,平整后地势降低点的田面对应平整前 5 cm 深处,如图 8a 所示,平整后田面土壤紧实度为 344.9 kPa,与平整前 5 cm 深处紧实度相近,紧实度随深度增加而增大,到 17.5 cm 土壤深处紧实度基本不受影响。

平整后田面地势升高采样点共 23 个,平均地势相对于平整前上升了 1.8 cm。为分析平地前后同一深度土壤紧实度变化,平整前地势升高点田面对应平整后 2.5 cm 深处,如图 8b 所示。对比平整前地势升高点紧实度,平整后深度 2.5 ~ 17.5 cm 范围内,紧实度随深度增加而增大,表明支撑轮对填土在 0 ~ 17.5 cm 处有明显的压实作用。填后松软土壤经过适度均匀压实后,减少了土壤后期的沉降,更真实地反映了田面平整度。

对于整块田,平整后田面地势平均下降 2.3 cm。为分析平地前后同一深度土壤紧实度变化,平整前地势升高采用点田面对应平整后 2.5 cm 深处,如图 8c 所示。平整后深度 2.5 ~ 17.5 cm 范围内,紧实度随深度增加而增大,趋势与地势升高点和地势降低点一致。表明悬挂式多轮支撑旱地激光平地机作业对该田 0 ~ 17.5 cm 处土壤紧实度具有一定的压实影响,深度达 17.5 cm 后土壤紧实度基本稳定。

由上述分析可知,悬挂式多轮支撑型平地机对农田压实影响深度在 0 ~ 17.5 cm 内。通过平地机挖高填低后,不论是高处挖后还是低处填后,表层土壤的紧实度基本一致。但若仅采用 2 支撑轮胎,与支撑轮接触的土壤的压实将超 6 倍,易出现明显轮辙。

2.2.3 转弯半径

牵引式旱地激光平地机转弯半径大,通常不考虑倒车作业,田角部分区域难以得到平整。但悬挂式平地机提升方便,能灵活倒车至田头作业,如图9所示。幅宽相同的悬挂式平地机和牵引式平地机田角作业路径如图9所示,图中网格单位为1 m×1 m,红色箭头线表示平地机作业轨迹,拖拉机长4.5 m,牵引式平地机平地铲长5 m,悬挂式平地机平地铲的支撑轮长度1.5 m。图9a为拖拉机提升悬挂式平地机倒至田角后前进作业,由于平地铲后支撑轮长1.5 m,横向和纵向平整不到的面积均为4.5 m²,横向和纵向重合平整不到的面积为2.25 m²(图中红色斜线阴影部分);图9b为拖拉机牵引式平地机田角平整时沿田边转弯作业,因转弯半径大导致平整不到的面积达19.4 m²,是悬挂式平地机的8.6倍。

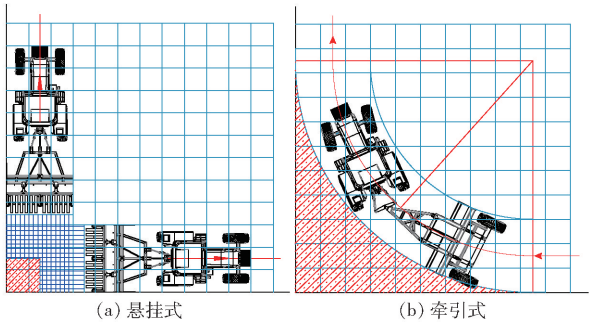


图9 平地机田角作业对比

Fig. 9 Comparison of hanging and towing leveler in field corner

当田块面积越小时,牵引式平地机不能平整的面积占比越大,如表2所示。100 m×100 m田块牵引式平地机不能平整面积占比0.78%,田块3、4不能平整面积占比分别达到5.8%和19.4%;而悬挂

式平地机不能平整面积占比小,分别是0.09%、0.68%和2.25%。因此,对于小田块的平整作业,悬挂式旱地激光平地机优势明显。

表2 不能平整面积所占百分比

Tab. 2 Percentage of area that can not be leveled			
田块序号	长×宽/ (m×m)	百分比/%	
		悬挂式	牵引式
1	100×100	0.09	0.78
2	57.7×57.7	0.27	2.3
3	36.5×36.5	0.68	5.8
4	25.8×25.8	2.25	19.4

3 结论

(1)设计了悬挂式多轮支撑旱地激光平地机,实现了激光控制悬挂式平地机精准平地作业。田间试验结果表明,田面最大高程差从平整前20.8 cm降至平整后7.3 cm,相对高程标准偏差从平整前4.48 cm下降到平整后1.72 cm,平整后绝对差值小于3 cm的采样测量点累计百分比91.94%,显著改善了田面平整情况。

(2)悬挂式多轮支撑旱地激光平地机的多支撑轮对试验田块0~17.5 cm深度范围的土壤紧实度具有一定压实影响,深度17.5 cm及以上的土壤紧实度基本稳定,整田表层土壤压实均匀,可减少松软区域土壤后期的沉降,保证了田面平整度。

(3)悬挂式平地机可减少不能平整面积占比,采用作图法对比分析了悬挂式平地机与牵引式平地机在田角不能平整面积的比例,结果表明,在平整田块4时,牵引式平地机不能平整面积高达19.4%,而悬挂式平地机仅为2.25%。

参 考 文 献

[1] JAT M L, CHANDNA P, GUPTA R, et al. Laser land leveling: a precursor technology for resource conservation [M]. Rice-Wheat Consortium Technical Bulletin Series, 2006, 7: 1-48.

[2] LARSON N, SEKHRI S, SIDHU R. Adoption of water-saving technology in agriculture; the case of laser levelers [J]. Water Resources & Economics, 2016, 14: 44-64.

[3] RICKMAN J F. Manual for laser land leveling [M]. Rice-Wheat Consortium for the Indo-Gangetic Plains, 2002.

[4] ASIF M, AHNMED M, GAFOOR A, et al. Wheat productivity, land and water use efficiency by traditional and laser land-leveling techniques [J]. Online Journal of Biological Sciences (Pakistan), 2003, 3(2): 141-146.

[5] MAQSOOD L, KHALIL T M. A review of direct and indirect implications of laser land leveling as agriculture resource conservation technology in Punjab province of Pakistan [C]//Global Humanitarian Technology Conference. IEEE, 2014: 349-354.

[6] ABDULLAEV I, HASSAN M U, JUMABOEY K. Water saving and economic impacts of land leveling: the case study of cotton production in Tajikistan [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007, 21(3-4): 251-263.

[7] TANG Lingmao, HU Lian, ZANG Ying, et al. Method and experiment for height measurement of scraper with water surface as benchmark in paddy field [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 198-205.

[8] 任文涛, 胡忠飞, 崔红光, 等. 激光平地乳芽直播节水效果的研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 72-75.

REN Wentao, HU Zhongfei, CUI Hongguang, et al. Effect of laser-controlled land leveling and baby rice seedling direct planting on saving water [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 72-75. (in Chinese)

[9] IRSEL G, ALTINBALIK M T. Adaptation of tilt adjustment and tracking force automation system on a laser-controlled land leveling machine [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150: 374-386.

- [10] HUSEYIN Y, ISMET O. Prediction of the working time requirement and field capacity of laser controlled land leveling machines [J]. Tarım Makinaları Bilimi Dergisi, 2010, 6(1): 19–28.
- [11] NEMENYI M. The role of GIS and GPS in precision farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 40(1–3): 45–55.
- [12] 刘刚, 康熙, 夏友祥, 等. 基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 27–33.
LIU Gang, KANG Xi, XIA Youxiang, et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27–33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180503&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.003. (in Chinese)
- [13] 坎杂, 田学艳, 江英兰, 等. 农用激光平地机的应用现状及其发展前景[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 126–127.
KAN Za, TIAN Xueyan, JIANG Yinglan, et al. Agricultural application status and development prospect of laser grader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 126–127. (in Chinese)
- [14] 顾丽雅. 拖式激光控制平地机研制[D]. 天津: 天津大学, 2005.
GU Liya. The research of scraper by laser control[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [15] 韩静鸽, 刘琦. 1JPD–200 型旱地激光平地机关键部件设计与分析[J]. 农业科技与装备, 2015(6): 29–31.
HAN Jingge, LIU Qi. Design and analysis on key components of type 1JPD–200 dry land laser leveling machine[J]. Agricultural Science & Technology & Equipment, 2015(6): 29–31. (in Chinese)
- [16] 姚东伟, 刘存祥. JPD–360 型旱地激光平地机的研究设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(6): 85–95.
YAO Dongwei, LIU Cunxiang. JPD–360 type dry laser grader research design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6): 85–95. (in Chinese)
- [17] 林建涵, 刘刚, 汪懋华, 等. 用于激光平地机的激光控制系统的研究[C]//中国农业工程学会学术年会, 2005.
- [18] 杨伟伟. 水田激光平地机控制系统优化设计[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
YANG Weiwei. Optimal design for the control system for paddy field laser leveler[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [19] HU Lian, YANG Weiwei, HE Jing, et al. Roll angle estimation using low cost MEMS sensors for paddy field machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 183–188.
- [20] 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)
- [21] 陆为农. 水稻生产机械化发展现状及展望[J]. 农机科技推广, 2006(2): 13–16.
LU Weinong. Progress and development of mechanical rice production[J]. Agriculture Machinery Technology Extension, 2006(2): 13–16. (in Chinese)
- [22] 王宪良. 农机作业土壤压实评价及组合铲松土技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
WANG Xianliang. Study on the evaluation of soil compaction by agricultural tire and combination shovel loose soil technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 王瑶. 基于离散元方法的平地机铲刀工作性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WANG Yao. Research on the working performance of grader blade based on the discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [25] 李龙城. 推土铲铲壁设计参数的研究[J]. 农业机械学报, 1979, 10(4): 85–96.
LI Longcheng. A research of parameters of the design of blade walls of bulldozers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(4): 85–96. (in Chinese)
- [26] 崔步安, 侯志强, 倪翔宇, 等. 平地机铲刀弧形结构研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(11): 94–96.
CUI Buan, HOU Zhiqiang, NI Xiangyu, et al. Research on arc structure of grade blade[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(11): 94–96. (in Chinese)
- [27] 张兴义, 隋跃宇. 农田土壤机械压实研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 122–125.
ZHANG Xinyi, SUI Yueyu. International research trends of soil compaction induced by moving machine during field operations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 122–125. (in Chinese)
- [28] HAMZA M A, ANDERSON W K. Soil compaction in cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(2): 121–145.
- [29] 林观土, 罗锡文, 李庆, 等. 全站仪在农田土地平整中的应用及精度分析[J]. 广东农业科学, 2007(4): 46–48.
LIN Guantu, LUO Xiwen, LI Qing, et al. Application of total station on the leveling of farmland and precision analysis[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2007(4): 46–48. (in Chinese)
- [30] 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/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 146–151.
HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxin, et al. Development of 1PJ–4.0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146–151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140423&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.023. (in Chinese)