

冬小麦精准分层施肥宽苗带播种联合作业机研究

祝清震¹ 武广伟^{2,3} 朱志豪¹ 张恒源¹ 高原源¹ 陈立平^{1,3}

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097;
3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 宽苗带冬小麦种植和肥料分层施用技术具有较好的应用推广价值, 为了促进农艺农机融合, 设计了一款宽苗带冬小麦精准分层施肥播种联合作业机, 以及一套与其配套使用的精量排肥/排种控制系统。首先确定了联合作业机的整体架构, 并对其限深机构、三点悬挂机构等进行重点设计, 其中限深机构的支架安装倾角设置为 15°, 使限深轮旋转中心与旋耕机构刀轴旋转中心的水平间距增大 115 mm, 以避免前抛土块或秸秆对限深机构正常滚动的影响, 另将传统三点悬挂机构上悬挂点由球形副变换为移动副, 使种肥分层投送机构的纵向横梁时刻与地面平行; 然后开发了精量排肥/排种控制系统, 确定了嵌入式主机、液压马达电控驱动模块等关键硬件的选型方案, 设计了嵌入式主机的操作软件界面, 使联合作业机能够精准控制深、浅层肥和种子的排量; 最后对联合作业机主要技术参数、旋耕深度等 15 项指标进行检测, 试验结果表明, 联合作业机所测指标均满足规定的性能要求, 能够满足田间的肥料分层施用、宽苗带播种农艺技术要求。

关键词: 冬小麦; 宽苗带播种; 分层施肥; 控制系统

中图分类号: S223.2⁺4; S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0025-11

OSID:



Design and Test on Winter Wheat Precision Separated Layer Fertilization and Wide-boundary Sowing Combined Machine

ZHU Qingzhen¹ WU Guangwei^{2,3} ZHU Zhihao¹ ZHANG Hengyuan¹ GAO Yuanyuan¹ CHEN Liping^{1,3}

(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

3. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: Wide-boundary sowing pattern of winter wheat and base-fertilizer separated layer application technology have good value for extension and application. In order to promote the integration of agronomy and agricultural machinery, a winter wheat separated layer fertilization-sowing planter combined machine and a set of precision fertilizer-seed metering control system matched with the combined machine were developed. Firstly, the overall structure of combined machine was determined, and its layered delivery mechanism of seed and fertilize, depth limiting mechanism, three-point suspension mechanism and compacting mechanism were designed and elaborated. The installation angle of depth limiting mechanism was set to be 15°, and then the horizontal distances between material's outlet orifice of layered delivery mechanism and the center of rotary tiller was increased by 115 mm, which could reduce the influence of soil and straw on the normal rolling of depth limiting mechanism. Moreover, the suspension point on the traditional three-point suspension mechanism was transformed from spherical pair to moving pair, which could keep the longitudinal beam of layered delivery mechanism parallel to the ground at all times, and then improve the stable seed and fertilizer delivery depth of the combined machine. Secondly, a set of precision fertilizer-seed metering control system matched with the combined machine were developed, and then the key hardware of control system, such as embedded host, electrical control model of hydraulic motor, attitude discrimination method of machine and driving speed analysis module were also determined. Moreover, the system control model was proposed and the operation software interface of

收稿日期: 2021-09-29 修回日期: 2021-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600、2016YFD0200601)和江苏省自然科学基金项目(BK20210776)

作者简介: 祝清震(1989—),男,讲师,博士,主要从事小麦精准施肥和播种技术研究,E-mail: qingzhen_zhu@ujs.edu.cn

通信作者: 武广伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事农业信息技术与精准农业技术研究,E-mail: wugw@nrcita.org.cn

embedded host was designed. The combined machine with precision fertilizer-seed metering control system could accurately control discharge of deep fertilizer, shallow fertilizer and seed. Finally, totally 15 indexes of the combined machine with precision fertilizer-seed metering control system were tested and evaluated by a third party inspection agency inspection. The test results showed that all technical indexes of the combined machine met the specified performance requirements, and the combined machine could satisfy agronomic and agricultural machinery technical requirements of rotary tillage, separated layer fertilizer application and wide-boundary sowing of winter wheat.

Key words: winter wheat; wide-boundary sowing; separated layer fertilization; control system

0 引言

小麦的产量受控于群体数量^[1]和个体生产力^[2]两方面,因此农艺学者建议在增加单位面积小麦穗数的同时,需要尽可能减轻单株穗粒重的降低幅度,才能获得较高的产量^[3],其中宽苗带冬小麦种植技术和肥料分层施用技术因为具有植株分散均匀、群体质量好、分蘖成穗率高和肥料利用效率高等优点,被农艺学者广泛认可,并鼓励在中国进行大面积推广应用^[4-8]。因此开展与宽苗带冬小麦种植,以及基肥分层施用技术相关的配套农业装备研究非常有意义。

近年来,国内外学者对宽苗带冬小麦播种^[9]和肥料分层施用机械装备^[10]进行了大量研究。如在宽苗带冬小麦播种装备方面,文献[11]采用燕尾槽式布种器,设计了气力输送式小麦免耕施肥播种机;文献[12-13]基于种子自流打散原理,设计了一种斜置三角式分种装置;针对宽苗带播种均匀性差和开沟阻力大的问题,文献[14-15]设计了8 cm 苗带宽度的窝眼轮式排种器配套内四等分输种管装置;为了提高宽苗带播种器的横向匀种效果,文献[16]设计了鸭掌型宽苗带撒播器,并对其关键结构参数进行优化。在肥料分层施用理论研究和装备研制方面,刘晓东等^[17]提出了一种基于肥料流均匀分布的上下层肥量按比例分配、上层肥料左右分施技术,并设计了一种分层定量施肥装置;杨庆璐等^[18-19]设计了一种各层肥量可调的空间分层施肥装置和气力集排式变量排肥系统,使肥料可在土壤中形成半包围种子的分布状态;张俊雄等^[20]设计了一种玉米分层正位穴施装置,该装置能够将肥料按比例投送到玉米种子下侧7~23 cm 的不同深度耕层中;杨然兵等^[21]设计了一种适用于一垄两行马铃薯种植模式的深度可调分层施肥开沟器。

目前将宽苗带播种与基肥分层施用相结合的联合作业装备未见研究报道,另外部分播种施肥作业装备的自动化和智能化水平相对较低,不能满足精量播种施肥技术的要求,因此开展同时具有宽苗带冬小麦播种、基肥分层施用两项功能的联合作业机

和精准控制系统研究工作非常必要。借鉴上述文献研究成果,本文拟设计一款宽苗带冬小麦分层施肥播种联合作业机,以及基于CAN总线通信技术,开发一套3路精量排肥/排种控制系统,对该联合作业机的作业效果进行田间试验检测,为我国冬小麦宽苗带种植和基肥分层施用技术的推广提供装备支撑。

1 整机结构和工作原理

1.1 整机结构

根据冬小麦宽苗带种植和基肥分层施用农艺管理方法,提出宽苗带种植模式下的冬小麦精密播种和分层施肥联合作业的技术方案,将宽苗带精密播种、基肥精准分层施用与传统旋耕整地作业过程相结合,设计了如图1所示的宽苗带冬小麦分层精准施肥播种机(简称联合作业机),联合作业机主要由三点悬挂机构、精量排肥/排种控制系统、深层肥箱、浅层肥箱、种箱、镇压机构、种肥分层投送机构、旋耕机构、机架、限深机构等组成。

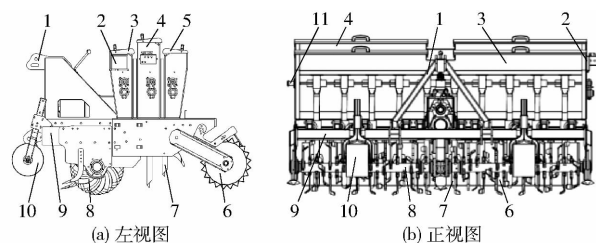


图1 联合作业机总体结构图

Fig.1 Overall structural diagrams of combined machine

1. 三点悬挂机构 2. 精量排肥/排种控制系统 3. 深层肥箱 4. 浅层肥箱 5. 种箱 6. 镇压机构 7. 种肥分层投送机构 8. 旋耕机构 9. 机架 10. 限深机构 11. 外槽轮凹槽有效工作长度调节机构

如图1所示,联合作业机采用三点悬挂的方式与拖拉机等动力牵引装备进行铰接,以机架前侧的三点悬挂机构作为基准,机架下侧从前向后依次安装固定限深机构、旋耕机构、种肥分层投送机构和镇压机构,上侧由前向后依次固定三点悬挂机构、深层肥箱、浅层肥箱和种箱,其中深层肥箱、浅层肥箱和种箱下侧分别安装外槽轮式排肥器和排种器,外槽

轮式排肥器和排种器的下侧通过输肥/输种软管与种肥分层投放机构的物料入口连接,外槽轮式排肥/排种器通过驱动轴串联的方式连接,深层肥箱、浅层肥箱和种箱一侧安装精量排肥/排种控制系统,另一侧设置外槽轮凹槽有效工作长度调节机构。

联合作业机主要技术参数设置如表 1 所示,其中联合作业机的旋耕作业深度、种子撒播深度、浅层肥料施用深度、深层肥料施用深度都可以根据当地的农艺要求进行调整,但是必须保证旋耕作业深度大于等于深层肥料的施用深度。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main structural parameters of device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 810×2 146×1 415
作业行数	10
作业幅宽/mm	2 550
配套动力/kW	88.2
旋耕深度/mm	180~200
播种深度/mm	30~50
浅层肥料施用深度/mm	60~100
深层肥料施用深度/mm	130~180
作业速度/(km·h ⁻¹)	3~8

1.2 工作原理

联合作业机由拖拉机提供前进动力,旋耕机构的前端通过可伸缩万向传动轴与拖拉机的动力后输出轴连接,依靠齿轮变速、换向等操作进行驱动旋耕机构的刀轴转动,固定在刀轴外侧的旋耕刀一方面随联合作业机做水平直线运动,另一方面绕刀轴旋转中心做匀速转动,两种运动的合成,可以完成切垡、碎土和抛土作业,被旋耕刀切下的土垡依次向旋耕机构后侧抛撒;种肥分层投送机构在随旋耕机构做直线运动的同时,深层肥料输送管、浅层肥料输送管和种子输送管的下端出料口会持续排出深层肥料、浅层肥料和小麦种子,由于旋耕机构旋耕刀将前侧切下的土垡持续向后抛出,种肥分层投放机构下端排出的深层肥料、浅层肥料和种子被回落到旋耕沟底的土垡覆盖,由于种肥分层投放机构的深层肥料输送管、浅层肥料输送管和种子输送管的下端出料口的空间位置不同,以及被旋耕刀切抛的土垡回落到沟底的过程存在一个时间差,能够实现深层肥料、浅层肥料和小麦种子层叠分布的技术效果,如图 2 所示,详细的物料分层投放工作原理见文献[22]。

种肥分层投送机构上侧的深层肥箱、浅层肥箱和种箱可以根据不同地区冬小麦根系的浅层、深层土壤养分需求,以及宽苗带冬小麦种植要求,存放不同种类的肥料和小麦种子,精量排肥/排种控制系统可以通过精准调节液压马达转速进行独立控制深层

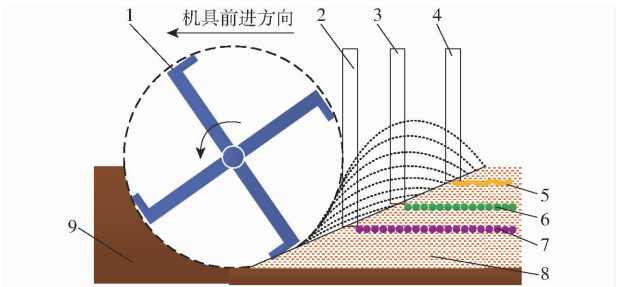


图 2 联合作业机种肥分层投送工作原理及技术效果示意图

Fig.2 Working theory and technical effect of fertilizer-seeds stratified application by combined machine

1. 旋耕机构 2. 深层肥料输送管 3. 浅层肥料输送管 4. 种子输送管 5. 种子条带 6. 浅层肥料条带 7. 深层肥料条带 8. 已耕土壤 9. 未耕土壤

肥箱、浅层肥箱和种箱的排量,以达到精确控制深层肥料、浅层肥料和小麦种子排量的要求,另一方面,参考文献[23],外槽轮凹槽有效工作长度调节机构可以根据精量排肥/排种控制系统的最佳转速要求,对深层肥料、浅层肥料和种子的外槽轮凹槽有效工作长度进行机械调整。

为了提高联合作业机的工作稳定性,在旋耕机构前侧配备了限深机构,种肥分层投送机构后侧配备镇压机构,三点悬挂机构具有地面仿形功能。根据旋耕作业深度以及深层肥料、浅层肥料和种子的农艺管理要求,可以对限深机构限深轮的离地高度进行调整,镇压机构对种肥分层投送后的地表进行镇压,形成较紧实的土壤耕层环境,减少浅层化肥挥发、小麦种子裸露和土壤跑墒等现象的发生,并提高施肥播种后地表的平整性,三点悬挂机构可以根据作业区域地表的平整状况,提供一定的补偿空间,防止限深机构或镇压机构离开水平地面现象的发生。

2 关键机构设计

为了达到种子和基肥精准分层投送的技术效果,需要对该装置的关键机构进行设计,其中联合作业机的旋耕机构等设计过程见文献[24],本文主要对种肥分层投送机构和作业稳定性关键组件的设计进行阐述。

2.1 种肥分层投送机构

根据联合作业机工作原理和文献[24],对种肥分层投送机构单体进行设计,如图 3 所示,该机构主要由深层投肥管、浅层投肥管、投种管、宽苗带撒播装置、套筒、定位螺栓、U 型螺栓、纵向梁等组成,其中关键部件宽苗带撒播装置的工作原理和结构设计过程见文献[16]。该机构前端固定在联合作业机的机架中部横梁上,后端固定在联合作业机的机架

后梁上,深层投肥管、浅层投肥管和投种管分别通过定位螺栓固定在对应的套筒上,套筒又通过 U 型螺栓固定在纵向梁上。

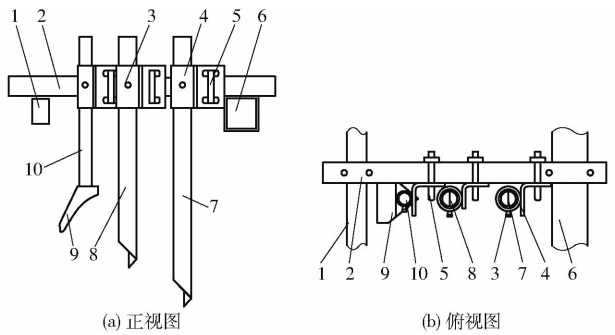


图 3 种肥分层投送机构结构示意图

Fig. 3 Layered delivery mechanism of seed and fertilizer
1. 机架中部横梁 2. 纵向梁 3. 定位螺栓 4. 套筒 5. U 型螺栓 6. 机架后梁 7. 深层投肥管 8. 浅层投肥管 9. 宽苗带撒播装置 10. 投种管

为了使联合作业机满足不同地区的冬小麦宽苗带播种和肥料分层施用的物料投送深度农艺要求,通过调节种肥分层投送机构上的定位螺栓和 U 型螺栓,分别使深层投肥管、浅层投肥管、投种管在套筒内上下移动和在纵向横梁上前后移动,进而调节深层投肥管、浅层投肥管、投种管的作业深度。

2.2 作业稳定性关键组件

2.2.1 限深机构

为了提高联合作业机的物料分层投送深度稳定性,设计了限深机构,单体结构组成和安装方式如图 4 所示,主要由限深轮、支架、基座、定位销和刮土板等组成,其中基座安装固定在联合作业机的机架前梁上,支架上端可以在基座内上下移动,通过定位销将支架固定在基座上,支架下侧通过轴承座将限深轮固定,支架中部安装刮土板,刮土板外侧紧贴限深轮外圆周,用于实时刮除限深轮外轮廓上的粘附泥土和秸秆。支架上侧设置多个限位孔,通过调节支架上限位孔与基座上限位孔的配合关系,可以达到调节限深轮轴心与水平地面垂直距离的技术效果。

传统限深机构的支架一般垂直固定在机具的机架前梁上,即限深轮的支架与铅垂线的夹角 α_1 为 0° ,这类布置方案在配合旋耕机构工作过程中,部分秸秆和土块会随旋耕刀做夹带旋转运动,最后抛落到旋耕机构前侧,由于限深轮旋转中心与旋耕机构刀轴旋转中心的水平间距过小,前抛的秸秆和土块会落到限深轮下侧或与限深轮发生碰撞现象,不利于限深轮正常滚动,进而影响联合机具的作业深度稳定性,因此必须增大限深轮旋转中心与旋耕机构刀轴旋转中心的水平间距,本文在综合考虑联合作业机整体架构的基础上,对限深机构固定方式进行

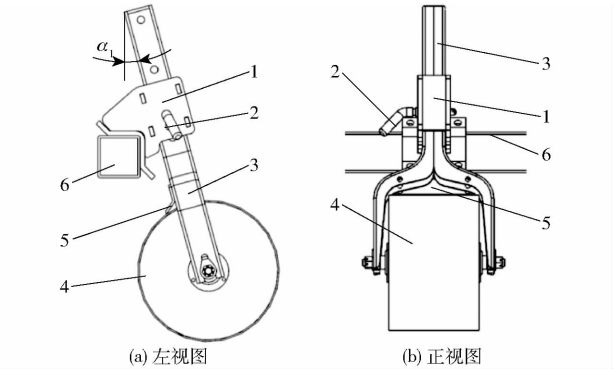


图 4 限深机构结构示意图

Fig. 4 Depth limiting mechanism

1. 基座 2. 定位销 3. 支架 4. 限深轮 5. 刮土板 6. 机架前梁

优化研究,将 α_1 设置为 15° ,使限深轮旋转中心与旋耕机构刀轴旋转中心的水平间距增大 115 mm,以减少前抛土块或秸秆对限深机构正常滚动的影响。

2.2.2 镇压机构

旋耕机构作业完毕后,表层土壤较松软,存在表层水分挥发过快、跑墒严重等现象,另外不主动对肥料分层施用和播种后的地表进行镇压,也会造成浅层肥料挥发和影响种子的发芽率,因此必须对旋耕、分层施肥和播种后的地表进行镇压作业。本研究为联合作业机配备的镇压机构整体结构如图 5 所示,主要由镇压辊、防滑齿、刮土板、支撑臂、高度调节臂等组成。

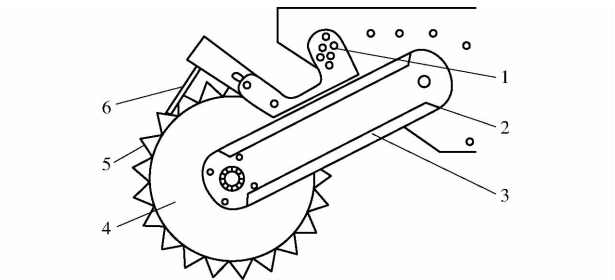


图 5 镇压机构结构示意图

Fig. 5 Compacting mechanism

1. 高度调节臂 2. 机架侧板 3. 支撑臂 4. 镇压辊 5. 防滑齿 6. 刮土板

镇压机构的支撑臂下侧通过轴承对镇压辊的两侧进行固定,上侧通过销钉与机架的侧板铰接,中部设置高度调节臂,通过调节高度调节臂与机架侧板的配合关系,可以对镇压辊轴心的离地高度进行调整,以满足联合作业机对不同土壤条件的镇压力需求;刮土板紧贴镇压辊外圆周,可以对粘连在镇压辊外圆周的泥土和秸秆等进行及时刮除;另外镇压辊外圆周布置 9 组均匀排列的防滑齿,单组防滑齿的宽度为 1.6 cm,可以有效提高镇压辊的抓地能力,以提高镇压机构对作业后地表的压实平整效果。

2.2.3 三点悬挂机构

联合作业机通过三点悬挂的方式与拖拉机等动力装备之间铰接,本文将三点悬挂机构以外的联合作业机其它组件看作一个整体,传统式三点悬挂机构组成和运动过程简化为如图 6a 所示,其中三点悬挂机构的上悬挂点和下悬挂点分别与拖拉机的上拉杆和下拉杆之间采用球形铰接, Δh 为限深轮的垂直浮动位移, Δh_1 为传统式三点悬挂机具后侧的垂直浮动位移, α_2 为上拉杆转过的角度, β 为下拉杆转过的角度。

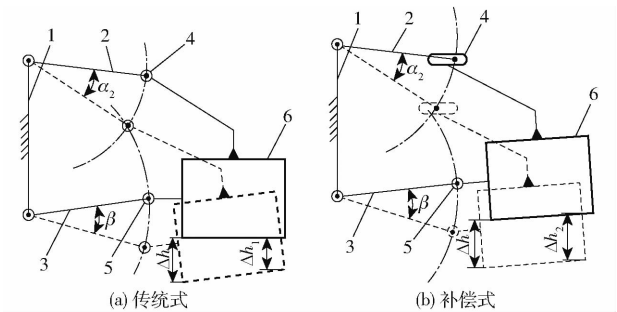


图 6 三点悬挂机构运动简图

Fig. 6 Motion sketches of three-point suspension mechanism

1. 拖拉机 2. 上拉杆 3. 下拉杆 4. 上悬挂点 5. 下悬挂点
6. 机具

三点悬挂机构的自由度计算式为

$$F = 3N_j - 2P_l - P_h \quad (1)$$

式中 F ——机构自由度

N_j ——能够进行活动的机构件数量

P_l ——机构中低副数量

P_h ——机构中高副数量

由图 6a 可知,传统式三点悬挂机构中的活动构件主要有上拉杆、下拉杆和机具 3 个,且 4 个铰接点均为低副,因此由式(1)可知,整个机构的自由度为 1,在作业过程中,机架前侧的限深轮可以根据地形高低变化做自由仿形运动,但是联合作业机的纵向跨度较大,传统式三点悬挂机构是否能保证联合作业机后侧种肥投送机构和镇压辊的作业深度稳定性有待深入分析和讨论,假设联合作业机作业过程中,前侧限深机构的限深轮向下浮动距离为 Δh ,在不改变上拉杆的前提下,此时对应镇压辊向下浮动距离为 Δh_1 ,由于传统三点悬挂机构只有 1 个自由度,此时 $\Delta h > \Delta h_1$,考虑到联合作业机的深层肥料、浅层肥料和种子的投送深度标定过程是在机架水平状态下进行的,联合作业机前后俯仰角的改变,会使深层肥料、浅层肥料和种子的实际投送深度偏离目标投送深度。

为了提高种肥分层投送过程的物料深度稳定性,对联合作业机的三点悬挂机构进行改进,改进后

的三点悬挂机构运动过程如图 6b 所示,主要是对上悬挂点的连接方式进行了优化,将球形副变换为移动副,其中 Δh_2 为补偿式三点悬挂机构后侧垂直浮动位移。对改进后的三点悬挂机构的自由度进行分析,当上悬挂点位于长孔中部时,改进后的三点悬挂机构拥有 4 个活动构件,5 个连接点,且这 5 个连接点都为低副,由式(1)可知,此时三点悬挂机构的自由度为 2;当上悬挂点位于长孔两端时,联合作业机具与上拉杆之间的连接变为球形铰,此时整个三点悬挂机构拥有 3 个活动构件,4 个低副连接点,三点悬挂机构的自由度仍然为 1。因此当联合作业机处于举升状态时,三点悬挂机构有 1 个自由度,当联合作业机处于作业状态时,三点悬挂机构有 2 个自由度。以图 6b 中联合作业机前侧限深轮向下浮动 Δh 为例,对改进后的三点悬挂架作业效果进行运动学分析,设此时联合作业机后侧镇压轮向下浮动的位移为 Δh_2 ,由于三点悬挂机构具有 2 个自由度,此时机架在一定范围内可以绕下拉杆悬挂点进行转动(必须受上悬挂点孔的水平长度限制),在一定程度上可以保证 $\Delta h = \Delta h_2$,使种肥分层投放机构的纵向横梁时刻与地面平行,并进行独立仿形,以达到提高种子肥料的实际投送深度稳定效果。

3 精准控制系统设计

3.1 系统架构设计

为了提高联合作业机的智能化程度,同时提高联合作业机的排肥/排种量控制精度,在前期开发的四要素精准变量施肥控制系统的基础上^[25-26],为联合作业机开发了 3 路精量排肥/排种控制系统,该控制系统架构主要由嵌入式主机、PID 控制器、多路集成比例阀、光电转速编码器、机具姿态解析模块、行驶速度解析模块、液压马达、触摸屏、卫星天线、角度传感器、蓄电池和液压油泵等组成,其总体架构如图 7 所示。其中实线表示电源线 and 数据线,虚线

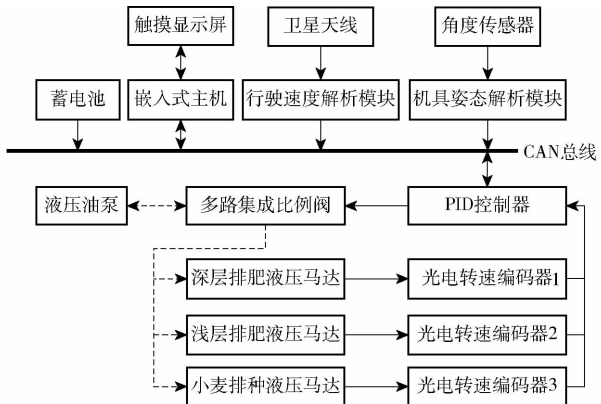


图 7 控制系统总体架构图

Fig. 7 Control system overall structure

表示液压油路,控制系统的电力和液压油源分别来自拖拉机的车载蓄电池和液压油泵。控制系统能够对机组的作业姿态、位置信息、行驶速度和马达转速等数据进行实时监测,根据获取的数据信息对深层肥、浅层肥和小麦种子进行精准闭环控制。

表 2 通信协议 ID 含意
Tab. 2 Meaning of communication protocol ID

标识	优先级	数据页	PDU 格式	PDU 特性	源地址	参数组	含意
0x18FF2280	6	0	255	34	65314	128	PID 控制器上传马达实际转速信号
0x08FF2326	2	0	255	35	65315	38	嵌入式主机下传马达目标转速信号

3.2 硬件设计及选型

3.2.1 嵌入式主机

嵌入式主机是智能农业装备和控制系统的核心硬件,其主要任务是控制和协调各模块的稳定运行,根据精量排肥/排种控制系统的总体结构和工作原理可知,其主要任务和功能包括:配置深层肥料的目标排量、浅层肥料的目标排量和小麦种子的目标播量,联合作业机的物理参数,获取和处理机具的作业姿态信息,获取和分析机具的位置信息,通过 CAN 总线对下位机控制器进行通信和发送指令,并接收来自下位机的反馈信息。为了满足以上任务和功能,对市场广泛销售的车载控制终端进行调研和对比分析,最终为精量排肥/排种控制系统选取 NEXCOM 公司生产的 VMC1000 车载控制终端,该车载控制终端预装的操作系统为 Windows XP Embedded,并配备 7 寸的液晶显示屏和多种数据接口,能够满足复杂农田环境下对数据运算和信息处理需求,另外,该车载控制终端可以为精准控制系统交互界面软件的设计开发提供良好平台。

3.2.2 液压马达电控驱动模块

精量排肥/排种控制系统需要同时对深层肥料、浅层肥料和小麦种子的排出量进行控制,因此控制系统的液压马达电控驱动模块必须能够同时控制 3 路液压马达,并且 3 路之间应该相互独立。本文设计的单路液压马达电控模块的架构和工作原理如图 8 所示,主要由 PID 控制器、光电转速编码器、电液比例控制阀、摆线液压马达等组成,其中摆线液压马达通过联轴器与排肥/排种轴连接,PID 控制器是整个电控驱动模块的核心,其主要功能是接收嵌入式主机下传的马达目标转速信号,以及光电转速编码器实时监测到的液压马达转速数据,精准调节电液比例阀的开度,改变液压油回路的流量,以达到精准控制液压马达转速的效果,另外能够将实时监测到的液压马达转速信号上传至嵌入式主机。

PID 控制器作为执行机构与嵌入式主机之间的

本文基于 ISO 11783 标准,编制了精准控制系统各组成模块之间数据通信的 CAN 总线协议,该控制系统主要包含嵌入式主机、PID 控制器、行驶速度解析模块和机具姿态解析模块的 4 个 CAN 节点,通信协议 ID 含意如表 2 所示。

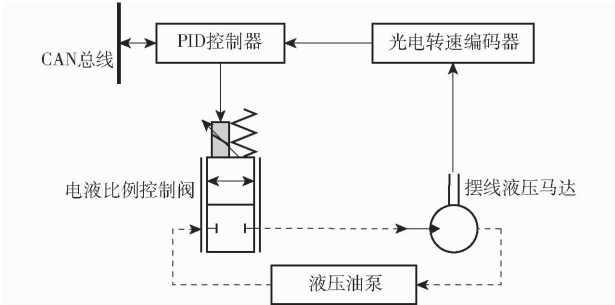


图 8 单路液压马达电控模块
Fig. 8 Electrical control model of single channel hydraulic motor

连接纽带,其工作性能将直接影响控制系统的控制精度和运行稳定性,本文选用德国力士乐公司生产的 RC 系列控制器作为电控驱动模块的 PID 控制器,该控制器能够实现电液比例阀与其它开关功能的可编程控制,支持模拟电流、模拟电压、开关信息以及频率作为输入信号处理,同时可以对过压、电气干扰提供自动保护,另外 RC 系列控制器能够提供 RS 串行 CAN 总线接口,很方便与装有 BODEM 软件的便携式计算机以及嵌入式主机进行数据通信,便于进行电控模块运行过程中的参数设置和变量诊断。为了实现 RC 系列控制器对摆线液压马达的自测速闭环稳定控制效果,本文设置其比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 分别为 0.2、0.15 和 0.15,数据采集周期 T 为 1 ms。

相较于霍尔式转速传感器,光电式转速传感器具有更高的测量精度,同时对复杂大田环境的适应性和抗干扰能力更强,本文采用上海霍德光电科技有限公司生产的 H80M 增量型光电编码器对摆线液压马达的转速进行实时监测和数据上传 RC 控制器,该型号光电编码器分辨率脉冲数最大可以达到 2 500 P/r。

3.2.3 机具姿态解析模块

相较于传统的精准排肥/排种控制系统架构,本文在精准控制系统架构中添加了机具姿态解析模块,以提高整个控制系统的智能化程度。可以通过

判断拖拉机三点悬挂机构下拉杆的角度变化,对机具的作业姿态进行监测判别^[25-26],其工作原理如图 9 所示,可以将三点悬挂机构的下拉杆和上拉杆看作刚性杆结构,已知联合作业机只存在抬升和作业两种姿态,当两种姿态之间相互变化时,下拉杆相对于水平地面的角度也会发生变化,因此在下拉杆上安装角度传感器可以对联合作业机的作业姿态进行判别。

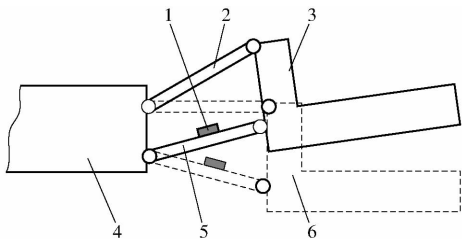


图 9 机具姿态判别监测方法示意图

Fig. 9 Attitude discrimination method of machine

1. 角度传感器 2. 上拉杆 3. 抬升状态的机具 4. 拖拉机 5. 下拉杆 6. 作业状态的机具

本文选用团队前期研制的 MPU6050 角度传感器实时记录下拉杆的角度,并采用 MCUSTM32F103 型单片机实时获取 MPU6050 角度传感器输出的角度数据,然后通过 RS232 接口上传到嵌入式主机,机具姿态解析模块的内部架构和封装样式如图 10 所示。

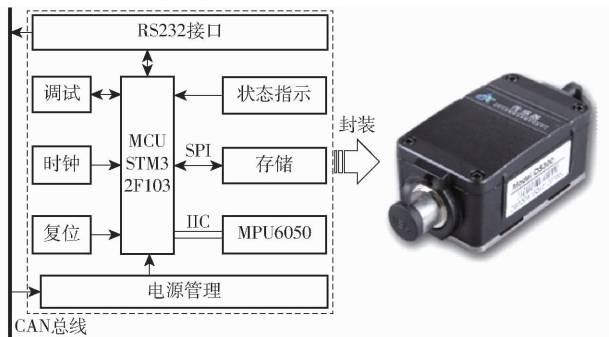


图 10 机具姿态监测传感器

Fig. 10 Attitude monitoring sensor of machine

3.2.4 行驶速度解析模块

精准控制的行驶速度解析模块通过 GNSS 定位装置实时获取联合作业机的空间位置变化信息数据,进而解析出机具的当前行驶速度数据,由于 VMC1000 型车载控制终端拥有 Mini PCI-E 数据扩展接口,同时为了提高精量排肥/排种控制系统的集成度,选用 NV08C Mini PCI-E 模块对联合作业机的位置信息进行采集,该模块较好兼容 GPS、GALILEO、GLONASS 和 BDS 等定位数据协议,能够满足复杂农田作业环境下精准控制系统的定位功能需求,因此将该模块直接嵌入到 VMC1000 型车载控制终端上,实时读取联合作业机的定位数据,并设置

GNSS 数据更新频率为 10 Hz,联合作业机行驶速度的解析式为

$$v_{i+1} = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

式中 x_i, y_i, z_i —— i 时刻联合作业机在空间坐标系 x, y, z 轴方向上的坐标, m
 $x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}$ —— $i+1$ 时刻联合作业机在空间坐标系 x, y, z 轴方向上的坐标, m
 t_i, t_{i+1} ——联合作业机具分别到达 i 点和 $i+1$ 点的时间, s
 v_{i+1} ——联合作业机具在 $i+1$ 点时的作业速度, m/s

3.3 控制算法和软件界面设计

3.3.1 控制算法设计

根据精量排肥/排种控制系统的功能需求,对系统的控制算法流程进行设计,如图 11 所示。

控制系统启动后,通过触摸显示屏录入联合作业机的设备参数、深层肥料目标施用量、浅层肥料目标施用量以及小麦目标播种量等信息,其中联合作业机的设备参数主要包括机具的作业幅宽、播种施肥行数等,并建立嵌入式主机与行驶速度解析模块、机具姿态解析模块、液压马达电控驱动模块的串口连接关系,嵌入式主机通过获取联合作业机的作业速度、工作姿态,以及结合已输入的设备参数、肥料目标施用量和小麦目标播种量信息,来确定排肥/排种轴的目标转速。

深层肥料、浅层肥料和小麦种子的实时目标排出量计算方式为

$$\begin{cases} \frac{mnNt}{60} = 1\,000GS \\ t = \frac{l}{v} \\ l = \frac{1\,000S}{M} \\ G = \frac{100n}{9v} \end{cases} \quad (3)$$

式中 t ——时间, s
 S ——作业面积, hm^2
 l ——联合作业机行驶距离, m
 v ——联合作业机行驶速度, m/s
 n ——排肥/排种轴目标转速, r/min
 G ——肥料/种子的目标排量, kg/hm^2
 m ——排肥/排种轴旋转一周排肥/排种器的排量, g/min

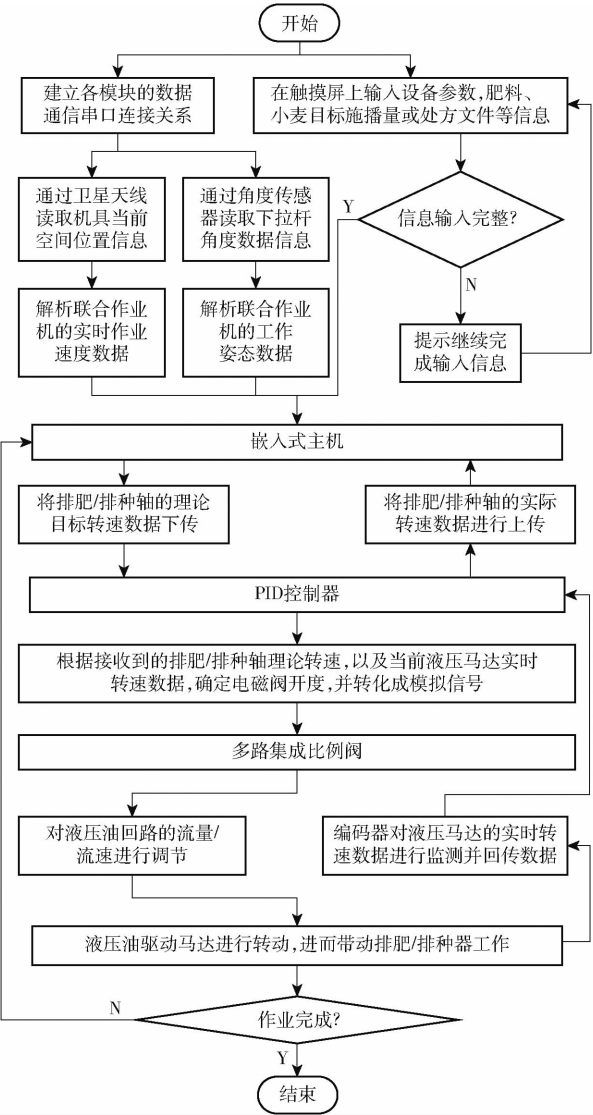


图 11 系统控制流程图

Fig. 11 Control flowchart of system

N ——联合作业机排肥/排种管行数,为 10 行
 M ——联合作业机的作业幅宽,为 2.55 m

然后将该数据信息转化成液压马达的转速信号下传 PID 控制器,PID 控制器通过改变电液比例阀开度,调节液压油的流速和流量,以达到控制液压马达转速的目的,PID 控制器通过光电编码器对液压马达转速数据进行实时监测,对液压马达的转速进行微调 and 校正,以提高排肥/排种量的精度,进而构成一个闭环的微控制系统,同时 PID 控制器将接收到的液压马达实时转速数据上传到嵌入式主机进行存储,便于后期统计作业区域的实际施肥和播种量数据。

3.3.2 软件界面设计

基于精量排肥/排种控制算法和流程图,使用 Visual Studio 2008 MFC 作为开发语言,对精量排肥/排种控制系统的软件界面进行规划和设计,操作软件的初始界面包含处方地图显示模块、作业状态显示模块以及系统设置等按钮等,其中作业状态显示模块主要包含通讯信息、GNSS 定位信息、机具作业姿态信息、机具配置参数信息、肥料的目标排量和实际排量、小麦播种的目标排量和实际排量等,软件界面如图 12 所示。点击软件系统主界面上的“系统设置”按钮,可以进行设备管理、化肥种子排量标定管理,不同化肥品类管理数据查询、施肥配置管理和施肥处方图管理信息的录入和操作等;“系统设置”界面下包括设备管理模块、标定系统模块、化肥信息管理模块和施肥配置模块等。其中设备管理模块主要对 GNSS 定位、CAN 总线和作业姿态传感器进行操作管理;标定系统模块主要包含排量标定和标定验证两个模块,辅助操作人员完成排肥/排种器的标定工作;化肥信息管理模块主要用于常用肥料品类的属性信息建档,以减少重复性工作;种肥施播设置界面主要用于肥料施用和播种的设置,能够结合实



图 12 软件工作界面

Fig. 12 Work interfaces of software

际精准变量施肥作业需求,使机具按自定义施肥作业或按处方图作业。

4 田间性能试验

2020 年 5 月,在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地,委托北京市农业机械试验鉴定推广站的专家组,按照《冬小麦分层精准施肥播种机检测试验大纲》对联合作业机的工作效果进行试验检测。

4.1 试验方法

试验区域地势平坦,土壤含水率 6.2%,土壤坚实度 2 614 kPa;机具配套动力为约翰迪尔 1204 型拖拉机;选择中化山东肥业有限公司生产的蓝精灵复合肥(蓝色)和山东红日化工股份有限公司生产的艳阳天复合肥(粉红色)分别作为深层肥和浅层肥,小麦品种为京冬 22 号。

试验前对联合作业机进行试运转和调试,使机器在正常工作状态下进行性能试验和生产试验,主要对机具 15 项指标进行检验测试,其中深、浅层肥排肥精度,排种精度,深、浅层肥各行排肥量一致性变异系数,以及各行排种量一致性变异系数检测项是在联合作业机行进速度 7.2 km/h、排肥轴转速 25 r/min、排种轴转速 40 r/min 时测定,详细试验检测过程如图 13 所示。



图 13 机具田间性能试验

Fig. 13 Field performance experiments of machine

4.2 试验结果与分析

4.2.1 试验结果

联合作业机的检测性能要求和工作性能测试结果见表 3。

由表 3 可知,联合作业机的 15 项检测指标均满足《冬小麦分层精准施肥播种机检测试验大纲》规定的性能要求,说明联合作业机能够满足田间的旋耕整地、肥料分层施用、冬小麦宽苗带播种的农艺管理技术要求,并具有较好的田间应用前景。

4.2.2 结果分析

为了达到深层肥料、浅层肥料和种子的精准投送、层叠分布的技术效果,联合作业机将播种和施肥过程与旋耕刀的切削、后抛土壤过程相结合,利用被切削土壤回落到旋耕沟底的时间差,完成物料的精准

表 3 15 项检测指标的要求和测试结果
Tab.3 Performance requirements and test results of 15 indexes

检验参数		标准值	检测值
外形尺寸/(mm×mm×mm)			2 810 × 2 146 ×1 415
主要技 术参数	作业行数		10
	作业幅宽/mm		2 550
	配套动力/kW		88. 2
旋耕深度/mm		≥180	180
播种平均深度/mm		40 ~ 50	46
播种深度合格率/%		≥90. 0	90. 0
深层肥料施用平均深度/mm		150 ~ 160	158
深层肥料施肥合格率/%		≥90. 0	90. 0
浅层肥料施用平均深度/mm		70 ~ 90	80
浅层肥料施肥合格率/%		≥90. 0	100
深层肥排肥精度/%		≥95. 0	97. 3
浅层肥排肥精度/%		≥95. 0	96. 3
排种精度/%		≥95. 0	96. 1
深层肥各行排肥量一致性 变异系数/%		≤5. 0	3. 6
浅层肥各行排肥量一致性 变异系数/%		≤5. 0	4. 9
各行排种量一致性变异系数/%		≤5. 0	4. 3
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)		≥1. 6	1. 8

准分层投送,由于该过程的土壤扰动较大,参考团队前期研究结果^[16,22],尽管表 3 中的浅层肥料施肥合格率能够达到 100%,但是播种深度合格率和深层肥料施肥合格率仅为 90%,说明该联合作业机的物料投送深度精准性还有优化空间,需要后期对其工作原理和关键机构进行深入研究,以提高联合作业机的物料投送精度和稳定性。

试验人员在对联合作业机的精准控制系统工作性能检测过程中发现,深、浅层肥料排肥精度和排种精度 3 个指标均在 96% 以上,能够满足相关性能指标要求,说明精准控制系统的排肥、排种精度较高,但是深、浅层肥各行排肥量一致性变异系数和各行排种量一致性变异系数的 3 项指标尽管满足小于等于 5.0% 的要求,但是浅层肥各行排肥量一致性变异系数和各行排种量一致性变异系数却大于深层肥各行排肥量一致性变异系数,以及与文献[26]相比,也具有一定差距,经过分析发现,其主要是由于联合作业机在检测过程中,仅对排肥轴转速 25 r/min 和排种轴转速 40 r/min 的一种工况下的 3 项指标进行了测定,而且存在外槽轮排肥器和排种器结构形式不一样,浅层肥料相对于深层肥料的投送量比例不一致,以及深层肥料、浅层肥料和小麦种子的物料特性有差异等原因,这些状况在一定程度上都会造成以上 3 项检测指标存在差异。

5 结论

(1)设计了一种宽苗带冬小麦分层精准施肥播种联合作业机,并阐述了土壤后覆盖方式下的种子、肥料分层投放原理,确定了关键部件种肥分层投送机构、限深机构、三点悬挂机构和镇压机构的关键参数,其中限深机构的支架安装倾角 α 设置为 15° ,使限深轮旋转中心与旋耕机构刀轴旋转中心的水平间距增大115 mm,三点悬挂机构的上悬挂点由球形副变换为移动副,以提高联合作业机种子、肥料的分层投送深度的稳定效果。

(2)基于CAN总线通信技术,提出了精量排肥/排种控制模型,设计了适用于联合作业机的3路

精量排肥/排种控制系统和嵌入式人机交互软件,并确定了控制系统的关键硬件:嵌入式主机、液压马达电控驱动模块、机具姿态解析模块和行驶速度解析模块的选型方案,控制系统通过对机组的作业姿态、位置信息、行驶速度和马达转速等信息进行实时监测,对深层肥、浅层肥和小麦种子的施播量进行精准闭环控制。

(3)对联合作业机的旋耕深度、播种深度合格率、作业效率等15项指标进行试验检测,结果表明,联合作业机的15个工作性能指标均满足规定的性能要求,说明联合作业机满足田间的旋耕整地、肥料分层施用、冬小麦宽苗带播种的农艺管理技术要求,具有较好的田间应用前景。

参 考 文 献

- [1] MELASH A, MENGISTU D, ABERRA D, et al. The influence of seeding rate and micronutrients foliar application on grain yield and quality traits and micronutrients of durum wheat[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 85: 221–227.
- [2] ZHU Yuangang, CHU Jinpeng, DAI Xinglong, et al. Delayed sowing increases grain number by enhancing spike competition capacity for assimilates in winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2019, 104(2): 49–62.
- [3] RANJAN R, GONTIA A, PAL A, et al. Morphological and physiological responses of dual purpose wheat (*Triticum aestivum* L.) to nitrogen and seed rates: a review[J]. Agricultural Research Communication Centre, 2016, 37(4): 279–289.
- [4] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 等. 黄淮海区冬小麦超高产栽培的理论与实践[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 577–585.
YU Zhenwen, TIAN Qizhuo, PAN Qingmin, et al. Theory and practice on cultivation of super high yield of winter whert in the wheat fields of Yellow River and Huaihe River districts[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(5): 577–585. (in Chinese)
- [5] MATOCHA C, GROVE J, KARATHANASIS T, et al. Changes in soil mineralogy due to nitrogen fertilization in an agroecosystem[J]. Geoderma, 2016, 263: 176–184.
- [6] 王锡久, 孙茂真, 许卫霞, 等. 深松分层施肥技术对冬小麦产量及其构成因子的影响[J]. 山东农业科学, 2015, 47(3): 76–79.
WANG Xijiu, SUN Maozhen, XU Weixia, et al. Effects of subsoiling and layered fertilization technology on winter wheat yield and its components[J]. Shandong Agriculture Sciences, 2015, 47(3): 76–79. (in Chinese)
- [7] 夏光利, 毕军, 桂桂芳, 等. 分层施肥对冬小麦产量及氮素效应的影响研究[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 72–74, 78.
XIA Guangli, BI Jun, SHI Guifang, et al. Effects of layered fertilization on yield and nitrogen effect of winter wheat[J]. Shandong Agriculture Sciences, 2016, 48(4): 72–74, 78. (in Chinese)
- [8] COLACO A, MOLIN J. Variable rate fertilization in citrus: a long term study[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(2): 169–191.
- [9] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1–14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1–14. (in Chinese)
- [10] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1–19.
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1–19. (in Chinese)
- [11] 于兴瑞, 耿端阳, 杜瑞成, 等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 148–155.
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 141–148. (in Chinese)
- [12] 牛琪, 王庆杰, 陈黎卿, 等. 秸秆后覆盖小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 52–59.
NIU Qi, WANG Qingjie, CHEN Liqing, et al. Design and experiment on straw post-covering wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 52–59. (in Chinese)
- [13] 王超, 李洪文, 何进, 等. 稻麦轮作区气动式小麦精准投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 43–53.
WANG Chao, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of pneumatic wheat precision seed casting device in rice-wheat rotation areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 43–53. (in Chinese)

[14] 姜萌, 刘彩玲, 魏丹, 等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 53 – 62.
JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53 – 62. (in Chinese)

[15] 刘彩玲, 魏丹, 都鑫, 等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 75 – 84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75 – 84. (in Chinese)

[16] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 小麦宽苗带撒播器弹籽板结构设计与优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 1 – 11.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Structural design and optimization of seed separated plate of wheat wide-boundary sowing device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 1 – 11. (in Chinese)

[17] 刘晓东, 王绪坪, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 1 – 10.
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHEN Liyuan, et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1 – 10. (in Chinese)

[18] 杨庆璐, 黄幸媛, 王庆杰, 等. 玉米空间分层施肥装置结构优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 175 – 185.
YANG Qinglu, HUANG Xingyuan, WANG Qingjie, et al. Structure optimization and experiment of corn layered fertilization device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 175 – 185. (in Chinese)

[19] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式变量排肥系统分层施肥量调节装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 1 – 10.
YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Development of layered fertilizer amount adjustment device of pneumatic centralized variable fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 1 – 10. (in Chinese)

[20] 张俊雄, 刘华猛, 高金, 等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 66 – 72.
ZHANG Junxiong, LIU Huameng, GAO Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 66 – 72. (in Chinese)

[21] 杨然兵, 杨红光, 连政国, 等. 马铃薯种植机分层施肥开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 104 – 113.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, LIAN Zhengguo, et al. Design and experiment of separated layer fertilization furrow opener for potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 104 – 113. (in Chinese)

[22] 祝清震, 武广伟, 安晓飞, 等. 基肥定深施用装置排肥口位置与施肥深度关系模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 8 – 17.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, AN Xiaofei, et al. Relationship model of fertilizer outlet location and fertilizer application depth of depth-fixed application device of base-fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 8 – 17. (in Chinese)

[23] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12 – 20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12 – 20. (in Chinese)

[24] 祝清震, 武广伟, 陈立平, 等. 基于旋耕覆土的冬小麦基肥分层定深施用装置设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 18 – 26.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Design of stratified and depth-fixed application device of base-fertilizer for winter wheat based on soil-covering rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 18 – 26. (in Chinese)

[25] 尹彦鑫, 王成, 孟志军, 等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68 – 74.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68 – 74. (in Chinese)

[26] 祝清震, 武广伟, 罗长海, 等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 155 – 163.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155 – 163. (in Chinese)