

播种机导种技术与装置研究进展分析

廖宜涛^{1,2} 李成良¹ 廖庆喜^{1,2} 王磊¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 机械化播种是农业机械化的重要组成部分。机械化播种主要通过播种机将种子由种箱运移至种床合理位置, 以确保种子行株距的分布均匀, 为种子萌发、植株个体与群体生长发育创造良好的环境。机械化播种的技术核心是种子群的有序单粒化和单粒化状态的保持, 即精量排种技术和种子平稳运移技术。种子由种箱运移至种床是一个多环节串联过程, 导种环节是播种过程中使种子保持均匀有序状态入土的末端环节之一, 既影响前序过程种子的有序状态, 又决定后续种子田间分布的均匀性。本文根据物体自由度约束概念, 将播种机导种划分为无约束导种、欠约束导种和全约束导种 3 种形式, 系统阐述了 3 种导种技术与装置对种子运移的约束状态、技术特点和适用对象, 结合国内外技术装备研究现状和机械化播种技术要求, 指出了导种技术与装置的未来发展方向, 为播种机导种技术与装置创新设计提供参考。

关键词: 播种机; 导种; 零速投种; 自由度约束

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)12-0001-14

OSID:



Research Progress of Seed Guiding Technology and Device of Planter

LIAO Yitao^{1,2} LI Chengliang¹ LIAO Qingxi^{1,2} WANG Lei¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Mechanized seeding is an important part of agricultural mechanization. The planter mainly transports seeds from the seedbox to the seedbed obeyed a reasonable agronomy position, which would create a suitable environment and uniform space for seed germination and plant growth of individual and group. For this purpose, the precision planter applied precision seeding technology and reposeful seed migration technology to guarantee the seed placed in the reasonable seedbed position by singulating the seed orderly from seedbox and maintaining the singulated state to delivery to the seedbed. The seed migration process was a process of organizing multiple links in series. The seed guiding step was a connecting link between the preceding step of seed discharging from the seed metering device and the following step of settling in the seedbed, which affected the orderly state of seeds in the pre-sequence process and determined the uniform distribution of subsequent seeds in the seedbed. The research of seed guiding technology and the device of the planter was reviewed. According to the concept of object degree of freedom constraint, the seed guiding was generalized into three types: seed unconstrained, seed under-constrained, and seed fully-constrained. The seed movement constraints, technical characteristics, and applicable objects of the three technical principles and devices were analyzed systematically. Combining the research progress of domestic and foreign technical equipment and the technical requirements of mechanized seeding, the development of seed guiding technology and device was discussed. The research provided a reference for the research of seed guiding technology and the innovative design of seed guiding devices.

Key words: planter; seed guiding; zero-speed seeding; freedom constraint

收稿日期: 2020-09-14 修回日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975238, 51875229)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)和国家油菜产业体系专项(CARS-12)

作者简介: 廖宜涛(1982—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计与测控研究, E-mail: liaotao@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: tiaoxq@mail.hzau.edu.cn

0 引言

播种是农业生产基础环节,要求播量稳定、行距和株距均匀、播深稳定,播种质量对作物产量产生直接影响。种子的田间分布由行距、株距和播深组成的三维空间坐标值所决定^[1]。传统的人工播种方式作业效率低,难以保证稳定的行距、株距和播深;机械化方式播种作业效率高、均匀性好、出苗整齐,利于作物的田间管理和机械化收获。精确行距、株距和播深的机械化精量播种方式是精准农业和智慧农业发展的技术基础。

播种机按照农艺要求的播量和行株距将合格种子均匀播入一定深度的种沟内,并覆以适量的土壤镇压,具有多功能联合作业的大中型、复合型播种机还可以同步完成耕整地、开沟、施肥等作业。播种机为种子萌发和植株个体、群体生长发育创造良好的环境和均匀空间,减轻了劳动强度,提高了生产效率和播种质量^[2-4]。

播种机作业时,将种子由种箱运移至种床合理位置。在前处理环节,播种机土壤工作部件整理好种床和种沟。在播种环节,种箱内的种子群在排种器的作用下定量分离形成连续种子流,运移过程中的籽粒处于由混沌群体到有序单粒化阶段,根据种子在排种器中的状态可以分为充种、囊种、护种、卸种等环节;从排种器排出的种子经导种装置约束落入种沟,形成满足农艺要求的均匀株距分布,运移过程中的籽粒处于有序单粒化状态保持阶段,主要包括导种和投种环节。在后处理环节,播种机配套的覆土器、镇压轮等工作部件对种沟的种子进行覆土、镇压等作业。种子的运移过程是一个多环节串联过程,任何环节都将直接影响种子田间分布均匀性。

机械化播种的技术核心是种群的有序单粒化和单粒化状态保持,即精量排种技术和种子平稳运移技术^[5]。精量排种技术是国内外学者研究的重点和热点^[4-6]。导种和投种环节作为播种过程中使种子保持均匀有序状态入土的末端环节,对种子最终田间分布的均匀性具有重要作用。种子与导种装置的碰撞及与种床土壤的弹跳滑移是破坏均匀有序运移状态、并导致田间播种行株距不均的主要原因^[7-8],研究导种装置运移机理、进行结构创新设计对提高播种质量具有重要意义。

种子在空间具有沿3个直角坐标轴方向移动和绕3个坐标轴转动的6个自由度。在导种过程中,导种装置对种子运移过程每施加一个约束,种子运移自由度就减少一个,即种子运动的随机性减小,播种均匀性提高。为避免种子在导种运移过程中因受

到剪切作用而发生损伤,除大蒜等要求种子直立、鳞芽向上的作物播种对其转动自由度有约束要求外^[9],其他作物一般不需要施加转动约束,给予种子一定的局部自由运动空间。

本文综述国内外播种机导种技术与装置的研究进展,对各类导种原理与导种装置对种子运移的约束状态进行分析,根据种子运移过程对自由度约束情况,将导种技术原理划分为无约束导种、欠约束导种和全约束导种3种形式,对3种形式的导种原理与导种装置优缺点及适用对象进行系统阐述与归纳,为播种机导种技术研究和导种装置创新设计提供参考。

1 无约束导种研究进展

无约束导种是指种子脱离排种器到落入种床土壤过程仅受惯性力和重力的作用,运动过程不受任何约束,具备6个运动自由度。图1是两种典型的采用无约束导种原理的播种机,该类播种机采用芯铰式播种开沟器,在机器前进时,由开沟器分开并隔离种床土壤,为排种器排出的种子流创造自由下落空间,种子在重力和离开排种器时的初始运动速度作用下落入种沟,再经过回流土壤和覆土装置覆土,完成播种。应用该原理的播种机导种装置结构简单,常与种沟开沟器集成于一体,并将排种器与开沟器集成为一个工作单元。由于无约束导种时种子运移只受惯性力和重力作用,因此离开排种器时的投种高度和投种初始速度对排种均匀性有很大的影响,是研究重点^[10-13]。

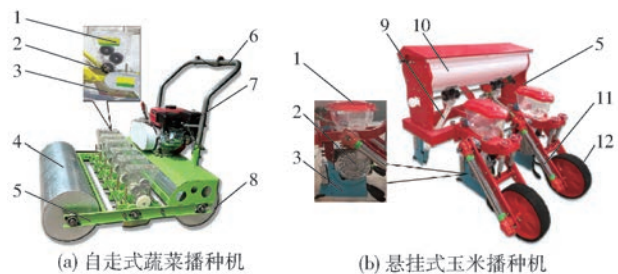


图1 无约束导种播种机结构图

Fig. 1 Structural charm of unconstrained seed guiding device planter

1. 种箱 2. 排种器 3. 开沟器 4. 驱动轮 5. 机架 6. 手推把手 7. 汽油机 8. 后镇压轮 9. 落肥管 10. 肥箱 11. 密封式传动轴 12. 橡胶轮

投种高度是投种口至种床土壤的垂直距离,根据排种器安装位置可分为低位投种和高位投种,一般由排种器结构、导种形式、传动方式以及整机结构共同决定^[14]。投种高度越大,种子运移过程经历的时间越长,落点不确定性越大,田间分布均匀性越差。张建平等^[15]应用 Monte Carlo(蒙特卡罗)方法

模拟了气吸式排种器播种大豆时投种高度对播种均匀性的影响,发现当投种高度小于 20 cm 时,随投种高度增加,排种变异系数增长迅速;当投种高度大于 20 cm 时,随投种高度增加,排种变异系数增长缓慢且逐渐趋近于固定值。研究结果证明,当投种高度过大,垂直地面的分速度增大,动能增大,落地与土壤接触时的非弹性碰撞随机性增加,种子落地后的运动处于随机状态,排种均匀性变异系数符合随机统计规律。为提高播种均匀性,无约束导种常采用“低位投种”,即将排种器设计在靠近种床土壤的位置来降低投种点与种沟垂直高度,从而一定程度降低种子与种床土壤碰撞弹跳滑移。邢赫等^[16-17]运用高速摄影研究水稻气力式排种器的稻种在送种正压作用下脱离排种盘后的轨迹以及投种成穴性,研究发现在水稻种子投种高度为 15 cm 以下时,种子运动时间短、随机性低,投种高度对水稻成穴性影响不显著。

奥地利 Wintersteiger 公司^[18-20]研制的 Monoseed TC 型自走式小区单粒播种机,排种器为一对组合吸缝盘和驱动格轮,排种器与开沟器合为一体,通过尽可能降低投种高度缓解了种子与种床土壤的弹跳滑移,提高了播种精度,在很多国家和地区得到推广使用。河北德易播农机发展有限公司研制的 DB 系列蔬菜播种机均采用无约束导种,通过芯钵式开沟器隔离土壤,为排种器排出的单粒连续种子流创造无约束自由下落空间,投种高度小,低速低振动工况下播种均匀性较好^[21]。

投种速度是投种时种子水平分速度和种子垂直地面分速度的合速度,一般由排种元件半径、排种元件工作转速、投种角度及型孔数量共同决定^[14];投种绝对水平分速度是种子水平分速度和机具前进速度的合速度,是影响投种质量的主要因素^[22-23];投种绝对水平分速度越大,种子与种床土壤碰撞时,水平方向的弹跳滑移现象就越严重,粒距均匀性和排种合格指数就越低。根据两者关系可分为向前投种、向后投种和零速投种;当种子水平分速度与机具前进速度大小相等、方向相反时,两者相互抵消,此时可视为零速投种^[24]。以气吸式马铃薯排种器^[25-27]为例,当排种器转速为 25 ~ 31 r/min 时,零速投种对排种质量影响较小;当排种器转速为 31 ~ 40 r/min 时,零速投种可有效提高排种合格指数,降低变异系数。“反向投种”是实现零速投种的重要途径之一,即对排种器排出的种子进行反向加速,获得与播种机前进方向相反的惯性作用,平衡机组前进速度,减小种子落入种沟瞬间与种床土壤水平方向的弹跳滑移,提高种子落点准确性。如采用正压

气流对气吸式马铃薯排种器^[25-27]排出的种子沿播种机前进方向反向加速,结合具体作业速度,并准确调节正压气流的大小和投种时的正压气室位置,达到理论零速投种,在排种器工作转速为 35 r/min 时,排种合格指数为 95.22%,相比于非零速投种提高 6.13 个百分点。

综合分析可知,无约束导种装置结构简单,但对种子运动无自由度约束,受投种高度和投种初速度影响,存在种子运动随机性大、种子落点准确性差的情况,通过“低位投种”和“反向投种”可一定程度提高播种均匀性。无约束导种主要适用于粒径较大、质量较大、农艺要求株距较高的大中粒径种子播种,如马铃薯、玉米等,其自由导种过程不易被种子自由下落空间内的空气、机器的振动等干扰破坏;当应用于小粒径种子播种时,如图 1a 的手推自走式蔬菜播种机,仅在低速、低振动工况下作业质量好。

2 欠约束导种研究进展

欠约束导种状态下种子脱离排种器到落入种床土壤过程中施加一定的约束,进而使种子在导种过程中具有相对固定的运移轨迹,主要方式是在排种器卸种口增设导种管,利用导种管的曲线构造来约束种子运移自由度,规划种子运动轨迹、落地速度和角度,并使导种管出口尽可能接近种沟进行低位零速投种。该方式既可降低种子与种床土壤弹跳滑移现象,又可预留足够空间安装仿形机构或播深调节机构,便于播种机的设计与整体布局。导种管材料要有足够的弹性和伸缩性,以适应开沟器升降、同步仿形和株距调整^[2]。导种管类型有塑料波纹软管、塑料光滑软管、塑料硬管、橡胶波纹软管、金属卷片管、蛇皮管等^[28],目前应用最广泛是塑料波纹软管、塑料硬管和塑料光滑软管。

根据种子在导种管内运移过程的主要作用力,可以分为重力式导种和气送式导种。重力式导种是指种子仅受重力牵引从排种器口滑落到种沟内,在导种管内会与约束其运动的管壁发生摩擦、碰撞等作用;在沿导种管下滑时,运移曲线斜率必须大于种子与管道的摩擦因数,且运移过程要保证种子有足够的动能;因此其运移过程动能变化、规划设计合理导种路径是重力式欠约束导种技术的研究重点。气送式导种是种子受重力牵引,并同时在导种管内气流裹挟作用下运移到种沟内,适应于宽幅播种机,种子通常处于悬浮状态,运动主要受导种管内气流场的影响,因此导种管内气流输送速度、压力损失、气流场均匀稳定是气送式欠约束导种技术的研究重点。

2.1 重力式欠约束导种

重力式导种是目前应用最广的欠约束导种技术,导种过程中,种子与导种管内的摩擦、碰撞越剧烈,种子运移无序程度越高,播种均匀性越低。KOCHER等^[29]以美国 John Deere 公司的高速气吸播种机为研究对象,以球形种子和扁平形种子为研究对象,对比新导种管和粗糙度更大的旧导种管,发现更换新导种管可以使播种精度提升 20% 以上。国内外农机学者结合理论分析、数值模拟、台架试验及高速摄影等手段和方法开展了动力学能量损耗、投种均匀性影响因素、导种管结构设计、种子运移规律和土壤与种子接触过程等方面相关研究。

ENDRERUD^[30]运用种子在导种管运动时的动力学能量变化规律,以种子在导种管内投送过程动能损耗最小为目标,对导种管内种子投送影响因素进行了探究,研究表明:当导种管倾斜角为 90° 时,即导种管与水平面垂直时,动能损耗最大;当导种管倾斜角为 45° 时,导种管直径对能量损耗无影响;当导种管倾斜角为 60° 时,导种均匀性最佳。廖庆喜等^[31]以玉米种子为研究对象,通过台架试验发现导种管直径对排种性能影响显著,当导种管直径为 22 mm、长度为 500 mm、导种管倾斜角为 60° 时,可保证较高的播种均匀性。刘建英等^[32]利用离散元对导种管施加直线运动和正弦振动,对玉米种子经导种管落入土壤的过程进行模拟,模拟结果表明:当免耕播种机作业速度为 1.389 m/s 时,最佳导种管高度为 500 mm。

高速摄影技术可在短暂曝光的时间内精准捕捉物体高速运动过程^[33-35],为种子运移规律研究、导种管结构设计和导种管布置方式确定提供手段和依据。于海业等^[36]通过高速摄影观察小麦种子在排种口处、导种管内及脱离导种管到着地过程 3 个阶段的运动状态,发现种子在导种管内的运动存在滑动、滚动和滑动兼滚动 3 种随机状态,主要以滑动运动为主,且存在运动速度趋于一致的一段滑动范围。

排种器转速对种子卸种轨迹存在影响。王乐等^[37]基于高速摄像技术对不同排种器转速下玉米种子落入导种管口位置及在导种管中运动轨迹进行研究,表明排种器转速对种子投送轨迹和种子落地水平位移存在显著性影响。李渤海等^[38]应用 EDEM 软件模拟玉米种子在导种管内的运动情况,并利用高速摄影技术得出不同排种盘转速下种子的不同运动轨迹,研究结果表明:随排种盘转速的增加种子的水平方向位移逐渐增加,当转速大于 27 r/min 时,种子水平位移出现大幅度的偏移。王金武等^[39-40]运用高速摄影捕获了玉米种子投种运

移规律,试验结果表明:当工作转速为 15 ~ 45 r/min、倾斜角为 0° 时,种子正面及侧面轨迹水平位移随工作转速增加而增加;当工作转速大于 35 r/min 时,种子轨迹及落点位置分布逐渐离散;在工作转速为 30 r/min、倾斜角为 $-12^\circ \sim 12^\circ$ 时,轨迹投种角随倾斜角的增加而减小。王磊^[41]、余佳佳等^[42-43]对不同类型的正负气压组合式排种器开展高速摄像试验,发现种子以一定初速度离开排种器后的运动轨迹曲线为空间抛物线,投种位移和投种速度随着卸种正压增大而增大。因此导种管的设计要符合种子卸种运动轨迹,根据不同工况下投种轨迹曲线设计特殊的导种管曲线轨迹和结构来约束种子运移路径,避免种子因剧烈碰撞改变有序运动次序,并实现零速投种,通常采用塑料成型工艺制作成倾斜曲线式、截面渐缩的方管型导种管。

图 2 为美国 John Deere 公司^[44]免耕播种机及配套导种管,该导种管为倾斜曲线式结构,导种截面上宽下窄呈渐缩趋势,排种器排出的种子在重力作用下沿导种管内壁滑落,配置于导种管内侧的光电传感系统可同步检测重播及漏播情况。图 3 所示为德国 Horsch 公司^[45-46]MAESTRO SW 型气吸式精密播种机配套导种管,同样采用倾斜曲线式结构,导种截面也呈现上宽下窄渐缩趋势;内侧设有光电传感器可同步检测重播及漏播情况,实现单粒精密播种。对于具有复杂曲线结构的导种管应用逆向工程手段重构其三维几何模型,相对传统的理论计算和试验研究,可缩短导种管的设计周期,降低设计成本^[47]。

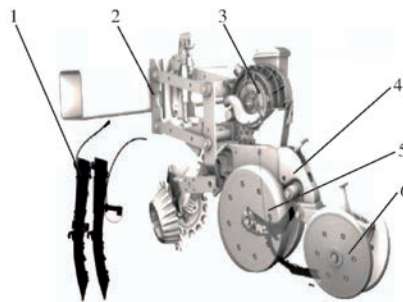


图 2 免耕播种机及配套检测导种管

Fig. 2 No-tillage planter and matching detection seed guiding tube

1. 导种管 2. 仿形机构 3. 排种器 4. 机架 5. 开沟器 6. 镇压机构

双段式导种管通过合理曲线构造可减小种子与导种管壁的弹跳碰撞且保证种子具有合适的落地速度和角度。杨文彩等^[48]基于零速投种理论将传统直线式导种管改进成双段式导种管,该导种管由直线段和圆弧段组成,配置于 2BQ-28 型三七精密播种机,解决了播种不均匀、不稳定的问题。仲云龙

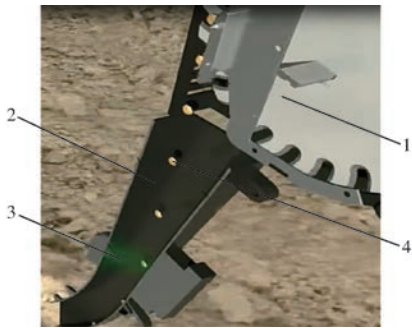


图3 Maestro SW 型精密播种机配套检测导种管
Fig. 3 Matching detection seed guiding tube for Maestro
SW type precision planter
1. 排种器 2. 导种管 3. 光电传感器 4. 种子

等^[49]设计了一种配套于旋耕灭茬施肥播种联合作业机的双段式导种管,根据连续抛投形成抛物线原理将导种管前段曲线设计为下凹抛物线,减小种子与管壁的碰撞;根据最速降线原理将导种管后段曲线设计为摆线,使种子在导种管内滑行时间最短,同时又具有合适的落地角度和落地速度;通过台架试验得出播种均匀性变异系数最高为 13.2%,播种均匀性较好。李玉环等^[50]通过分析原导种管投种过程玉米种子下落情况,提出了一种利用推种装置实现直线投种的方法,设计的直线投种原理排种器与配套导种管如图 4 所示,减少了玉米种子与导种管壁的碰撞,提高了高速作业播种质量。

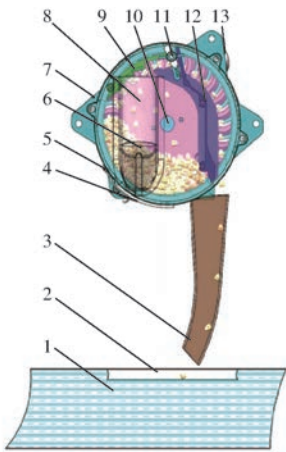


图4 气吸式高速精量排种器直线投种过程示意图
Fig. 4 Diagram of linear seeding process of high speed
precision metering device with air suction
1. 土壤 2. 种沟 3. 导种管 4. 卸种挡板 5. 快卸装置 6. 前
壳体 7. 后壳体 8. 种盘 9. 清种机构 10. 传动轴 11. 清种
调节装置 12. 推种装置 13. 进气口

重力式导种管可一定程度上限制种子运移自由度,但随着播种机作业速度的增加,由于导种管自身局限性、种子入射角差异大,实际生产中播种机存在颠簸起伏振动等因素,需考虑种子在导种管内运动随机性和种子飞出导种管的运动轨迹随机性等

问题。
2.2 气送式欠约束导种

气送式导种涉及气力输送技术,是气力式播种机的核心^[51],其通过正压气流对导种管内种子运移自由度进行柔性约束,进而减少种子与导种管壁的随机碰撞。气送式导种技术根据种子分配原理主要分为直接气送式和分配气送式,导种管内部涉及气固两相流输送理论及随机过程理论,种子在导种管内运动状态复杂,通常设计成细长的塑料光滑软管。

气送式导种管直径对气力输送系统工作状态影响显著。过小的导种管管径会导致额外的压力损失,引起气流波动或阻塞,过大的导种管管径会导致气流稳定性差且能耗大,选择合适的导种管直径对提高气送式导种管性能具有重要意义。YATSKUL 等^[52]建立了气送式播种机气力输送系统的设计方法,提出了一种计算压力损失的理论计算方法,指出了导种管参数是影响气力输送系统的首要因素;以小麦、肥料及小麦肥料混合物作为研究对象,分别在管径为 20、25、30 mm 三水平下进行对照试验,建立了气流速度、输送浓度及导种管管径之间的关系,指出了理想的导种管管径。Horsh、Kuhn 和 John Deere 等国外农机企业常采用的气送式导种管直径为 20 ~ 30 mm^[52]。

气送式导种管气流输送速度是影响气力输送系统工作状态的重要因素之一。过高的气流速度会增加导种管中种子破碎率,导致种子发芽率和抗病性下降,过低的气流速度会增加导种管堵塞风险^[51-53]。导种管气流输送速度与种子破碎率呈幂次相关^[54-55],合适的气流输送速度范围对于提高气送式导种管性能具有重要意义,目前常采用的气流输送速度为 18 ~ 24 m/s^[52]。何有璋^[56]使用 7 类种子、12 种导种管进行试验,探究各类种子在各种导种管内的运动规律和影响导种均匀性的因素,发现气流速度与种子输送速度的关系曲线为上凹单增的;对于悬浮速度高的大而重型种子可采用 20 m/s 左右或更高的气流输送速度;对于悬浮速度低的小而轻型种子可采用 17 m/s 左右或更低的气流输送速度。

2.2.1 直接气送式导种

直接气送式导种技术主要采用“排种器精量排种 + 气力输送”,气流裹挟着种子通过导种管,降低了种子碰撞无序的风险,具有作业速度快、播种均匀性好、机具振动对排种影响小等优点。德国 Amazone 公司^[57-58]研制的 EDX 系列高速精密播种机结构如图 5 所示,采用正压气流输送式导种方式,气力滚筒式排种器可实现“一器多行”排种,排出的

种子在正压吹力的作用下沿导种管内壁快速滑落入土壤,种子与导种管壁碰撞少,播种均匀性好,导种效率高,可实现低位投种和同步仿形,最高作业速度可达 15 km/h。英国 Ferguson 公司^[59]研制的 MF543 型机架式通用播种机,导种管同样采用正压气流输送式导种方式。祁兵等^[60-61]根据集中排种和气送导种原理,设计了一种中央集排气送式玉米精量排种器,采用正压气流输送式导种方式,气力滚筒式排种器可实现“一器多行”排种,排种装置通过直接固定于机架实现与仿形机构的分离,排种器振动小,播种均匀性好且对高速作业有较好的适应性。

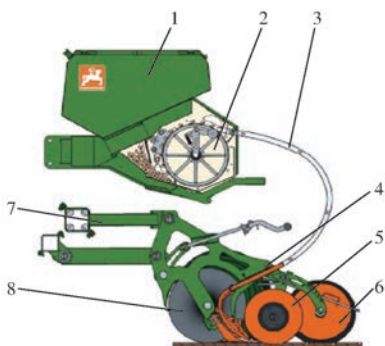


图 5 EDX 系列高速精密播种机结构图

Fig. 5 Structural charm of EDX series high-speed precision planter

1. 种箱 2. 滚筒式排种器 3. 气送式导种管 4. 机架 5. 仿形驱动轮 6. 覆土镇压轮 7. 仿形机构 8. 双圆盘开沟器

瑞典 Vaderstad 公司^[62]研制的 Tempo 系列玉米精量播种机导种过程采用正压气流弹射投种技术,通过气流约束使种子快速通过导种管投射入种床土壤,导种过程如图 6 所示,可适用于高速作业且播种精度高,最高作业速度可达 20 km/h。意大利 Maschio Gaspardo 公司^[63]研制的 CHRONO 型高速精密播种机(图 7)和荷兰 Lockwood 公司^[64]研制的马铃薯气吸交错式播种机,导种过程均采用正压气流弹射投种技术。王超等^[65]设计了一种气动式小麦精准投种装置,该装置根据引射器原理设计而成,在高速气流的冲击作用下将种子从加速管中高速推入土壤,完成小麦高速精准投种作业,播种均匀性好。

直接气送式导种技术通过正压气流对导种管内种子运移自由度进行再约束,种子处于悬浮状态,降低了种子碰撞无序的风险,可实现播种单体的同步仿形、低位投种,一器多行远距离输送宽幅播种,具有作业速度快、播种均匀性好、机具振动影响小等优点。

2.2.2 分配气送式导种

分配气送式导种技术主要采用“机械定量供种 + 气流分配成行 + 气力输送”形式,可实现“一器多

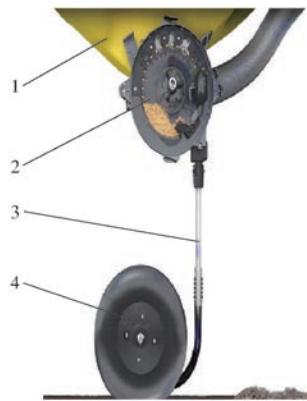


图 6 Tempo 系列玉米精量播种机气流投射导种装置

Fig. 6 Tempo series corn precision planter air flow projection seed guiding device

1. 种箱 2. 排种器 3. 气送式导种管 4. 覆土镇压轮

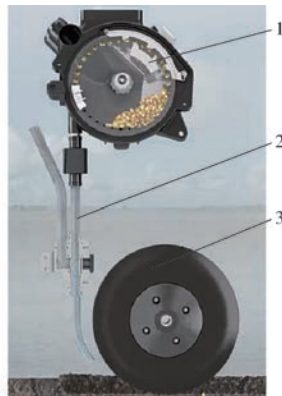


图 7 CHRONO 型高速精密播种机气流投射导种装置

Fig. 7 CHRONO type high-speed precision planter air flow projection seed guiding device

1. 排种器 2. 气送式导种管 3. 覆土镇压轮

行”,具有作业幅宽大、作业速度快、适用范围广等优点,已在美国、法国、德国、意大利等发达国家得到大规模推广使用^[66-69],代表机型主要包括:德国 Amazone 公司^[70]生产的 Citan 大型气送式精量播种机(图 8a)、德国 Lemken 公司^[71]生产的 Solitair 系列气送式精量播种机(图 8b)、法国 Kuhn 公司^[72]生产的 Maxima 系列气送式精量播种机(图 8c)和意大利 Maschio Gaspardo 公司^[73]生产的 Pinta 系列气送式精量条播机(图 8d)等。

张晓辉团队^[74-77]连续多年对气送式集排系统开展研究工作,研制出 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统。刘立晶等^[78-79]通过改进国外气送式集排系统,研制出 2BMG-24Q 型气流输送式小麦免耕播种机。农业部南京农业机械化研究所^[80-81]研制的 2BDZQ-33800 型气力集排式水稻直播机,其配套的基于电驱控制的气力集排系统采用“集中排种 + 气流均匀分配”形式,可实现“一器 33 行”作业,排种效率高。

雷小龙等^[82-83]针对气送式集排器(图 9)具有



图 8 国外分配气送式播种机

Fig. 8 Foreign air-assisted distribution planter

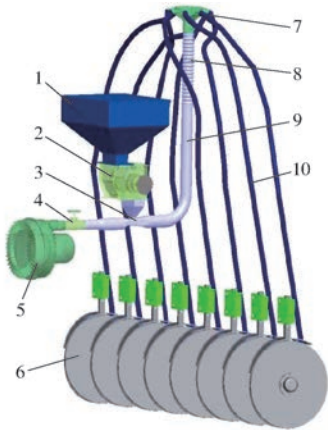


图 9 气送式集排器示意图

Fig. 9 Structure of air-assisted centralized metering device

1. 种箱 2. 供种装置 3. 供料装置 4. 气压调节阀 5. 风泵
6. 双圆盘开沟器 7. 分配器 8. 增压管 9. 输种管道 10. 导种管

较长导种管和气流扰动影响种子运动轨迹的问题,分析了导种管材料、直径、长度组合、角度布置、气流压强等因素对排种性能的影响。李衍军等^[84]通过分析气送式排种系统导种管长度与导种管内气流流速的关系,得到了不同长度导种管管内气流速度流场分布图及种子量分布图,为解决不同长度导种管导致排种性能不佳等问题提供了理论依据。

分配气送式导种技术与直接气送式导种技术导种运移自由度约束机理基本相同,具有作业幅宽大、作业速度快、适用范围广等优点。相比于重力式导种管,作业质量和播种效率大大提高,主要用于油菜、水稻、小麦和玉米等作物大中型宽幅高速播种机。但易受前序分配环节种子状态与气流状态的影响,保证形成的均匀的气固耦合流平均分配到各行导种管内是分配气送式导种技术研究的重点和

难点。

3 全约束导种研究进展

全约束导种是指通过新型导种装置对种子离开排种器后的运移进行全自由度约束或者进行仅具有局部自由度的全约束,强制种子保持其有序状态,是一种保证播种粒距均匀分布的主动式导种方式,可有效避免因播种机振动和其他原因导致的种子与导种管壁、种床土壤产生“碰撞异位”和“弹跳异位”,常见的方式有带式导种和点播式导种等。

3.1 带式全约束导种

带式导种是目前先进的全约束导种技术之一,其通过输送带将种子从排种器出口单粒有序运移至低位进行投种。美国 John Deere 公司^[85]研制的 John Deere 2015 系列毛刷带式导种装置,其配套播种单体结构如图 10 所示,可通过调节毛刷带的转速使种子落入土壤瞬间的水平分速度与播种机前进速度相近且反向,相互抵消实现零速投种。美国 Precision Planting 公司^[86]研制的 SpeedTube 型输送带式导种装置,其结构如图 11 所示,安装于排种器卸种口处,通过拨指的旋转运动将排种器排出的种子运送至输送带上,在输送带的转动下将种子运送至底部并导入种床土壤,可通过调整输送带转速保证种子达到最佳投种状态,最高作业速度可达 20 km/h。



图 10 John Deere 2015 系列播种单体

Fig. 10 John Deere 2015 series seeding monomer

1. 覆土镇压轮 2. 机架 3. 毛刷带式导种装置 4. 排种器 5. 平行四连杆同步仿形机构

陈学庚等^[87]、康建明等^[88]针对免耕播种机双圆盘式开沟器投种点高的问题,设计了一种传动与投种机构一体的带式导种装置,使种子进入由输送带与种道护板形成的输种腔内,从而沿着预定轨迹运动至投种位置,完成投种。陈晨^[89]设计了一种精量播种机带式导种装置,该导种装置通过螺栓固定在排种架上,通过排种轴驱动导种装置传动,在导种带隔腔的约束下将种子单粒平稳输送至种床土壤,有效降低了投种高度,提高了播种精度。刘全威^[90]提出了一种精准取种、平稳输种和精准投种的播种

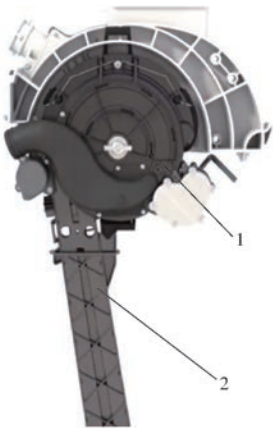


图 11 SpeedTube 型输送带式导种装置

Fig. 11 SpeedTube type conveyor belt seed guiding device

1. 排种器 2. 输送带式导种装置

技术,设计了一种拨指同步带式导种装置,种子在推种板的作用下从排种器型孔落入导种装置的输种腔,在拨指同步带和护种板的作用下将种子强制有序输送至种床土壤,可实现精准投种。王希英等^[91-92]改进设计了一种双列交错勺带式马铃薯精量排种器,排种器工作过程主要分为充种、运移、清种、导种和投种 5 个串联阶段。工作时,取种凹勺单粒取种,柔性排种带的相邻种勺与导种护罩间形成封闭空间,种薯被运移至投种点抛送瞬间由于离心力突变进行零速投种,避免种薯抛甩,提高了播种均匀性。

带式导种装置可缩短种子自由运动行程,降低种子运移过程中的碰撞风险,保证从排种器排出种子的均匀有序状态,能够满足精密播种机的高速作业。为避免导种过程中种子发生剪切损伤,带式导种装置通常将种子约束在一个输种腔内,给予种子一定局部自由运动空间。

3.2 点播式全约束导种

点播式排种器是通过鸭嘴、穴播器等装置将种子运移至土壤深处进行播种,属于全约束的种子运移。赵建托等^[93]设计了一种玉米全膜覆盖直插式播种装置,采用凸轮和曲柄机构控制成穴器,可实现播种时间段内成穴器水平绝对速度为零。赵武云等^[94]设计了一种玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机,采用凸轮-曲柄滑块机构和运动放大机构控制成穴器投种,可实现成穴器播种段和出土段水平分速为零。戴飞等^[95-96]将转动导杆机构与正弦机构串联,运用近等速补偿机构与放大机构相配合实现零速投种。石林榕等^[97]设计了一种玉米直插穴播机强排-强启排种装置,利用共轭凸轮实现鸭嘴取种和投种,利用前进速度补偿机构来抵消投种水平分速度,保证零速投种,大大减少了种子与种床的弹跳滑移。

侯加林等^[98-100]设计了一种行星轮鸭嘴式大蒜插播机,其结构如图 12 所示,采用星轮式鸭嘴插播机导种装置,在导种鸭嘴的护送下将大蒜种子精准直立插入土壤,播种质量高。李复辉等^[101]设计了一种舵轮式玉米免耕精量施肥播种机,该播种机的关键工作部件为舵轮勺盘式穴播器,其既充当行走轮又充当排种器,播种质量较好,但不适用于高速作业,播种效率较低。刘俊孝等^[102]提出一种气力吸种、定点打穴、精准投种的点播方式,设计了一种针孔管式小麦精准点播装置,其结构如图 13 所示,关键工作部件针孔吸种管兼具取种、导种和投种的功能,播种均匀性好。

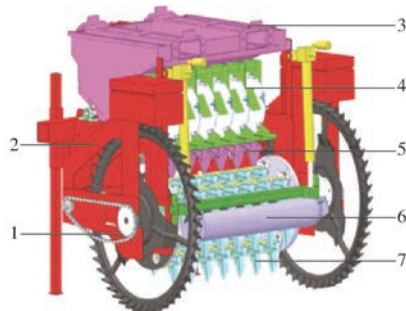


图 12 行星轮式大蒜插播机示意图

Fig. 12 Structure of planetary wheel garlic planter

1. 传动系统 2. 机架 3. 种箱 4. 排种装置 5. 接种鸭嘴 6. 压平辊 7. 插播装置

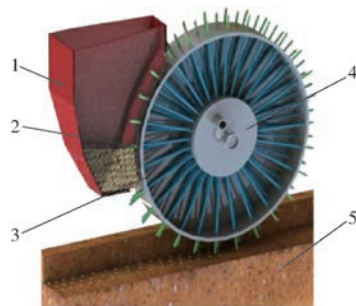


图 13 针孔管式小麦精准点播装置示意图

Fig. 13 Structure of pinhole-tube wheat precision seeding device

1. 种箱 2. 针孔吸种管 3. 播种轮 4. 气力分配机构 5. 土壤

点播式导种装置采用点播式将种子插播至适宜播深的种床土壤,在土壤的摩擦力和回流作用下消除种子落入种床土壤的弹跳滑移现象,可适用于穴播、铺膜播种等低速作业。

4 技术特色分析

播种机导种装置的结构和种类繁多,根据种子运移过程的自由度约束状态,可以分为无约束导种、欠约束导种和全约束导种 3 种技术原理,3 种技术原理各有其技术特点和适用对象,其特点总结概括对比如表 1 所示。其中无约束导种和重力式欠约束

导种装置结构相对简单;气送式欠约束导种装置导种运移稳定性较高,需要辅助配气系统;全约束导种装置对种子进行自由度约束强制有序运移,有效解

决了种子投送过程的碰撞异位和弹跳异位现象,大大提高了播种质量和播种均匀性,符合精密播种要求,但在一定程度上增加了系统复杂性。

表 1 不同导种技术原理特点对比

Tab. 1 Comparison of characteristics of different seed guiding technology principles

原理	装置	技术特点	研究重点	适用作物
无约束	芯铰式播种开沟器	结构简单,适用于低速作业,粒距均匀性适中	排种器与开沟器集成设计、低位投种,排种器卸种位设计、零速投种	播种有一定深度的小粒径蔬菜种子(低速、无振动工况),玉米、马铃薯等种子粒径较大、质量较大种子
欠约束	重力式导种管	安装方便,低速作业,粒距均匀性适中	导种路径规划与设计、排种导种仿形单体集成设计	适用性强,应用广泛,包括谷子、油菜、水稻、小麦等播量大、播种株距要求不高的作物,玉米、大豆等粒距均匀性要求适中的作物
	气送式导种管	种子运移受导种路径影响小,适用于大型宽幅高速播种,需要配气系统,结构复杂	气力系统匹配,气流场稳定性与均匀性优化	
全约束	导种带	播种精度高,适应速度高,机构设计复杂	导种机构与排种器集成设计、零速投种	棉花、人参、大蒜等经济价值高,播种株距(穴距)要求严格的作物
	穴播器	穴距均匀性高,低速作业,覆膜播种,机构设计复杂	覆膜播种农机农艺融合,穴粒数精确控制	

改进导种装置,提升导种性能的方法主要有两种:基于零速投种理论,通过对种子进行反向加速,尽量平衡机组前进速度,减小种子落入种沟瞬间的水平分速度,减少了种子与种床的接触碰撞与滑移,无约束导种技术主要以该理论为指导;通过导种装置(导种管、导种带、鸭嘴、穴播器等)来限制种子从排种器排出到落入种床土壤过程的运动轨迹,减小种子运动随机性,降低投种高度,从而提高播种均匀性,欠约束和全约束导种技术主要利用该方法。

5 展望

随着农业机械化技术发展和机械化水平提升,大型化、高速化、精密化、自动化和智能化已成为播种机发展的方向。国内外学者围绕提高播种质量和效率为目标,对多种形式的导种装置结构进行创新和优化。通过对国内外各类导种技术与装置的研究现状分析,结合机械化播种发展趋势,总结导种技术与装置的发展方向如下:

(1)导种环节作为播种过程中保持均匀有序状态入土的末端环节,承接排种器排出的有序种子流,决定种子最终田间分布的均匀性,无约束、欠约束和全约束导种技术各存在优缺点和适用条件,未来应坚持三者并存发展。种子在导种、落入种床过程中都存在随机的振动和碰撞影响,在机械化播种技术研究中,应根据种子田间均匀性统计规律探讨实际生产条件下各类导种方式与装置对种子有序运移状态的影响程度。种子离开导种装置时的投种速度是播种串联环节末端环节,“零速投种”,即种子接触种沟瞬间绝对速度趋近于零可以避免种子的随机弹

跳^[103],是国内外导种技术与装置研究的理论依据和最终目标,未来应继续深入研究和应用“零速投种”理论,如通过虚拟仿真技术和高速摄影等技术研究种子,特别是中小粒径种子与土壤的碰撞过程,以播种机“零速投种”为目标创新设计排种器与配套导种装置。

(2)对于播种粒距均匀性要求不严格的作物,推荐应用结构简单、适用性强的无约束或重力式欠约束导种装置,主要研究导种装置的无约束空间结构及其与排种装置的集成设计、欠约束导种装置对种子动能的影响及导种路径合理设计。对于采用集排式排种器、作业幅宽大、种子运移距离较远、运移路径受局限的播种机,应重点开展适用的气送式欠约束导种装置研究。对于播种精度要求高的作物,当种子质量和粒径较大时,种子有序运移状态不易受干扰破坏,可以采用无约束导种装置,在排种器性能研究基础上,进一步开展与种沟开沟器、覆土镇压机构集成化设计,通过结构优化降低投种高度和投种速度;对于精密播种中小粒径种子或种子着床方向有特定要求的作物,应采用全约束主动导种装置,未来需要创新导种方式和结构,提高导种频率,以提升精密播种作业速度。

(3)播种技术核心为种群有序单粒化和单粒化状态保持,即精量排种技术和平稳运移技术,研究适应于不同区域、不同种植模式、不同种植作物的播种机、排种器及配套导种装置,应农机农艺相结合,增强播种机、排种器及配套导种装置的通用性;并加强新型短程精密播种技术研究,如开发气吸点播式精密排种器、多连杆单粒精密排种导种机构等,实现精

量排种技术与平稳运移技术相融合。

(4)利用信息化手段实现播种机的智能化是播种领域技术发展趋势和研究热点,播种工作状态监测、播种量检测和种子田间分布信息检测是播种关键信息。导种装置是种子落入种床的末端通道,是安装检测器的理想载体,与导种装置集成、准确可靠地检测种子信息是研究的重点,小粒径种子、异常的多粒聚集种子及大播量作物种子的检测是研究难点。通过实时探测种子运移时间间隔判断前端排种

器工作状态,对异常情况进行警报处理,统计计算播种量是智能播种机对播种信息的应用方向;未来可以进一步通过对种子导种、投种时间进行延迟补偿,获得田间更精准的种子分布信息,结合种子出苗、成苗信息,探索不同机械化耕播方式、种床条件、种肥土壤关系下的机械化播种匀苗全苗壮苗指数,评价播种机作业性能、作业质量,并研制基于成苗信息预测的一播全苗智能播种装备,实现机械化播种高产稳产群体智能化构建。

参 考 文 献

- [1] 付卫强. 玉米免耕精密播种质量控制关键技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2019.
FU Weiqiang. Study on key technology of quality control for maize no-tillage drilling machinery[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 王文君. 玉米优质种床构建关键技术及行间耕播机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Wenjun. Research on key technologies of constructing high-quality maize seedbed and its inter-row till-planter[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [4] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jc-sam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [5] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [6] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):1-18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)
- [7] GIERZ L, KESKA W, GIERZ S. Laboratory tests of time transport of wheat grain in the seed tube of drill[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2012, 57(1): 37-40.
- [8] SUSHIL S, PANNU C J S. Development and evaluation of seed metering system for water soaked cotton seeds[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin American, 2014, 45(1): 41-47.
- [9] 刘静. 不同大蒜品种及鳞芽播种朝向对生长特性与品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
LIU Jing. Effects of different garlic varieties and bulbil seeding directions on growth characteristic and quality[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [10] 陈立东,何堤. 气吸式播种机播种质量影响因素分析[J]. 现代化农业,2005(12):37-38.
- [11] 宋金鹏,余东梅,吴鹏飞. 作物精量播种中均匀株距的影响因素及应对措施[J]. 安徽农业科学,2010,38(3):1438-1439,1453.
- [12] 周军平,刘立晶,刘忠军,等. 精密播种机株距均匀性影响因素分析[J]. 农机化研究,2014,36(7):49-53.
ZHOU Junping, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Influence factors analysis of the plants distance uniformity of precision planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 49-53. (in Chinese)
- [13] 吕金庆,王英博,李紫辉,等. 加装导流板的舀勺式马铃薯播种机排种器性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(9):19-28.
LÜ Jinqing, WANG Yingbo, LI Zihui, et al. Performance analysis and experiment of cup-belt type potato seed-metering device with flow deflector[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 19-28. (in Chinese)
- [14] 刘宏新,王福林. 排种器试验研究的因素选择及分析[J]. 农机化研究,2007,29(5):77-79.
LIU Hongxin, WANG Fulin. The choice and analysis of factors in seed-metering device experimental study[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(5): 77-79. (in Chinese)
- [15] 张建平,李飞雄. 气吸式排种器排种均匀性的 Monte Carlo 模拟[J]. 农业工程学报,1994,10(1):56-62.
ZHANG Jianping, LI Feixiong. The Monte Carlo simulation on release homogeneity of suction-type metering device[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 56-62. (in Chinese)
- [16] 邢赫,臧英,曹晓曼,等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(12):23-30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23-30. (in Chinese)
- [17] 邢赫. 水稻精量穴播气力式排种器的优化设计与试验研究[D]. 广州:华南农业大学,2016.

- XING He. Optimization design and experiment of precision pneumatic hill-drop drilling of rice[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 杜辉,樊桂菊,刘波. 气力式精量播种机与排种器的研究现状[J]. 农业装备技术,2002(3):13-14.
- [19] 杨薇. 玉米育种精量播种关键技术与装备研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2019.
- YANG Wei. Research on technology and equipment of precision seeding in maize breeding[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019. (in Chinese)
- [20] Monoseed TC[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <http://www.seedmech.com/producto/monoseed-tc>.
- [21] 杜佳伟,杨学军,刘立晶,等. 小粒种子精量播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程,2017,7(6):9-13.
- DU Jiawei, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 9-13. (in Chinese)
- [22] 徐志勇,孙晓春,张绪清,等. 影响气吸式播种机播种精度的因素分析[J]. 江苏农机化,2016(3):55-56.
- [23] 陈立东. 气吸式排种器性能参数设计及其对排种质量影响的试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2006.
- CHEN Lidong. Performance parameter design of air-suction seed metering device and experiment study of effects on sowing quality[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [24] 北京农业工程大学. 农业机械学:上册[M]. 北京:中国农业出版社,1991:199-213.
- [25] 吕金庆,杨颖,尚琴琴,等. 气吸式马铃薯排种器正压吹种零速投种性能优化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(20):40-48.
- LÜ Jinqing, YANG Ying, SHANG Qinqin, et al. Performance optimization test on air-suction potato seed metering device with positive pressure airflow and zero-speed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 40-48. (in Chinese)
- [26] 杨颖. 气吸式马铃薯排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
- YANG Ying. Design and experimental research on air-suction potato seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [27] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):1-16.
- LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)
- [28] 张波屏. 播种机设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [29] KOCHER M F, COLEMAN J M, SMITH J A, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(2): 177-183.
- [30] ENDREERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(2): 177-184.
- [31] 廖庆喜,舒彩霞. 精播机输种管对排种均匀性影响的试验研究[J]. 湖北农业科学,2004(4):126-128,125.
- [32] 刘建英,张鹏举,刘飞. 离散元模拟导种管高度对排种性能的影响[J]. 农机化研究,2016,38(1):12-16.
- LIU Jianying, ZHANG Pengju, LIU Fei. The discrete element simulation guide tube height effects on seeding performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 12-16. (in Chinese)
- [33] 张三喜,姚敏,孙卫平. 高速摄像及其应用技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [34] 王静,廖庆喜,田波平,等. 高速摄像技术在我国农业机械领域的应用[J]. 农机化研究,2007,29(1):184-186.
- WANG Jing, LIAO Qingxi, TIAN Boping, et al. The present and development tendency of high-speed photography applied on agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(1): 184-186. (in Chinese)
- [35] 郭培生,章小勤,孙荣. 高速摄像技术在我国农业机械领域的应用探讨[J]. 农业与技术,2019,39(20):46-47.
- [36] 于海业,马成林,马旭,等. 小麦种子在输种管内运动状态的观察与分析[J]. 农业机械学报,1996,25(增刊):62-65.
- YU Haiye, MA Chenglin, MA Xu, et al. The observation and analysis on the moving states of wheat seeds in seed-transporting pipe[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996,25(Supp.): 62-65. (in Chinese)
- [37] 王乐,邱立春,李永奎. 玉米种子在导种管中运动过程的高速摄像分析[J]. 农机化研究,2010,32(10):130-132.
- WANG Le, QIU Lichun, LI Yongkui. High-speed photography analysis on process of corn seeds moving in seed tube[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(10): 130-132. (in Chinese)
- [38] 李渤海,衣淑娟,牟忠秋,等. 气吸式排种器导种装置仿真分析及试验研究[J]. 农机化研究,2020,42(11):150-154,161.
- LI Bohai, YI Shujuan, MU Zhongqiu, et al. Simulation analysis and experimental study on seed guide device of air-suction metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 150-154, 161. (in Chinese)
- [39] 王金武,唐汉,王金峰,等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):29-37,46.
- WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29-37, 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.005. (in Chinese)
- [40] 唐汉. 波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
- TANG Han. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [41] 王磊. 类球形蔬菜种子精量播种机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2015.
- WANG Lei. Design and experiment of precision planter for quasi-spherical vegetable seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [42] 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报,2014,

- 33(3):103-108.
- YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 103-108. (in Chinese)
- [43] 余佳佳. 气力式油菜精量排种器结构解析与排种过程仿真研究[D]. 武汉:华中农业大学,2013.
- YU Jiajia. Study on structural analysis and metering process simulation of pneumatic precision metering device for rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [44] SAUDER D A. Plattner: US 7152540B1[P]. 2006-12-26.
- [45] MAESTRO S W[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <https://www.horsch.com/cn/产品/播种机/精密度播种机/maestro-sw>.
- [46] 张瑞. 一年两熟地区麦茬地玉米免耕播种播深控制机构的研究[D]. 北京:中国农业大学,2016.
- ZHANG Rui. Study on precision depth-control mechanism of corn no-till planter in double-cropping area[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [47] 刘立晶,杨慧. 基于 Geomagic Design 软件的导种管三维逆向工程设计[J]. 农业工程学报,2015,31(11):40-45.
- LIU Lijing, YANG Hui. 3D reverse engineering design on seed tube based on Geomagic Design software[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 40-45. (in Chinese)
- [48] 杨文彩,杜一帆,宋志鹏,等. 2BQ-28 型三七精密播种机导种管的改进设计[J]. 河南科技,2017,35(5):750-754.
- YANG Wencai, DU Yifan, SONG Zhipeng, et al. Improved design of seed tube on the 2BQ-28 type notoginseng precision seeder[J]. Henan Science, 2017, 35(5): 750-754. (in Chinese)
- [49] 仲云龙,张永良,闫军朝,等. 旋耕灭茬施肥播种联合作业机导种管设计[J]. 农机化研究,2011,33(12):98-99,105.
- ZHONG Yunlong, ZHANG Yongliang, YAN Junchao, et al. Design and research of the curve of seed tube in co-operation machine of rotary tiller fertilization sowing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(12): 98-99, 105. (in Chinese)
- [50] 李玉环,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(9):26-35.
- LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese)
- [51] 刘友华,刘立晶,李衍军,等. 气送式播种机气压平衡装置设计与试验[J]. 农业工程,2019,9(5):78-83.
- LIU Youhua, LIU Lijing, LI Yanjun, et al. Design and experiment of pressure balance device of pneumatic conveying seeder [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(5): 78-83. (in Chinese)
- [52] YATSKUL A, LEMIERE J. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166: 1-12.
- [53] 魏海,谢焕雄,胡志超,等. 花生荚果气力输送设备参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(2):6-12.
- WEI Hai, XIE Huanxiong, HU Zhichao, et al. Parameter optimization and test of pneumatic conveying equipment for peanut pods[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 6-12. (in Chinese)
- [54] 高天宝,李勇. 气力输送过程中的粮食颗粒破碎问题[J]. 粮食与饲料工业,2006(12):13-15.
- GAO Tianbao, LI Yong. The promble of foodstuff particle breaking during pneumatic conveying[J]. Cereal & Feed Industry, 2006(12): 13-15. (in Chinese)
- [55] 王明旭,秦超,李永祥,等. 气力输送过程中粮食颗粒的输送特性研究[J]. 农机化研究,2014,36(9):18-22.
- WANG Mingxu, QIN Chao, LI Yongxiang, et al. Study on transport characteristics of grain particles in pneumatic conveying [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 18-22. (in Chinese)
- [56] 何有璋. 气流输种管结构及气流参数的研究[J]. 成都农机学院学报,1982(1):24-31,61.
- [57] ED precision air seeder[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <http://www.amazone.net/1262.asp>.
- [58] RAJENDER S C, RAMESH K S, MAHESH K G, et al. Effects of crop establishment techniques on weeds and rice yield[J]. Crop Protection, 2014,64: 7-12.
- [59] 李洪昌,高芳,赵湛,等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报,2014,35(2):12-16,56.
- LI Hongchang, GAO Fang, ZHAO Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12-16, 56. (in Chinese)
- [60] 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15.
- QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- [61] 祁兵. 中央集排气送式精量排种器设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- QI Bing. Design and experiment of a centralized pneumatic metering device [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [62] VADERSTAD A B. Zone 3-seed placement[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <http://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/tempor-12-18/#zone-4777>.
- [63] CHRONO-Tecnologia di seming ad alta velocità[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <http://www.maschio.com/menu-istituzionale/fiere-and-eventi/chrono-high-speed-planting-technology>.
- [64] LOCKWOOD M. Air cup s-series planters[EB/OL]. (2020-08-10)[2020-08-10]. <http://www.lockwoodmfg.com/Lockwood-Potato-Equipment/Planters/AirCupSSeriesPlanters>.
- [65] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 43-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.005. (in Chinese)
- [66] KOLLER A, WAN Y, MILLER E, et al. Test method for precision seed simulation systems[J]. Transactions of the ASABE,

- 2014, 57(5): 1283–1290.
- [67] FURUHATA M, CHOSA T, SHIOYA Y, et al. Developing direct seeding cultivation using an air-assisted strip seeder[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2015, 49(3): 227–233.
- [68] MANZONE M, PAOLO M, MARIO T, et al. Performance evaluation of a cyclone to clean the air exiting from pneumatic seed drills during maize sowing [J]. Crop Protection, 2015, 76: 33–38.
- [69] 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216–220. YANG Hui, LIU Lijing, ZHOU Junping, et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 216–220. (in Chinese)
- [70] Siewnik wielkopowierzchniowy Citan[EB/OL]. (2020–08–10)[2020–08–10]. <https://www.amazone.pl/264.asp>.
- [71] 气力式精量播种机 Solitair 12K[EB/OL]. (2020–08–10)[2020–08–10]. <http://www.lemken.cn/Proinfo.aspx?id=148##Menu=ChildMenu4>.
- [72] 法国库恩气吸式精量玉米播种机 MAXIMA 6 行[EB/OL]. (2020–08–10)[2020–08–10]. <https://info.b2b168.com/s168-49563966.html>.
- [73] PINTA[EB/OL]. (2020–08–10)[2020–08–10]. https://www.maschio.com/catalog/product/pinta/zh_cmn.
- [74] 孙齐磊. 气流—阶集排式播种机的研制及试验分析[D]. 泰安:山东农业大学,2003. SUN Qilei. Study and test analysis of one-step seed-centralized pneumatic drill[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [75] 常金丽. 机械定量气流式集中排种系统的研究及其排种特性试验分析[D]. 泰安:山东农业大学,2007. CHANG Jinli. Research and experimental analysis of centralized pneumatic seeding system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [76] 常金丽,张晓辉. 2BQ–10 型气流—阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136–141. CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136–141. (in Chinese)
- [77] 张晓辉,王永振,仇利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):59–67. ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [78] 刘立晶,杨学军,李长荣,等. 2BMG–24 型小麦免耕播种机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(10):39–43. LIU Lijing, YANG Xuejun, LI Changrong, et al. Design of 2BMG–24 no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 39–43. (in Chinese)
- [79] 刘立晶,刘忠军,杨学军,等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):54–57. LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 54–57. (in Chinese)
- [80] 建农. 2BDZQ–33800 型宽幅折叠式水稻直播机[J]. 农业装备技术,2016,42(4):64.
- [81] 祁兵,张文毅,余山山,等. 气力集排式水稻排种系统播量控制模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):125–131. QI Bing, ZHANG Wenyi, YU Shanshan, et al. Establishment of seeding amount control model for centralized pneumatic metering system for rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 125–131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.017. (in Chinese)
- [82] 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12):16–26. LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16–26. (in Chinese)
- [83] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉:华中农业大学,2017. LEI Xiaolong. Design and working mechanism of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [84] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):55–64. LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55–64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200606&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.006. (in Chinese)
- [85] GAMER E B, THIEMKE D B, RYLANDER D J, et al. Seeding machine with seed deliver system;US 9480199B2[P]. 2006–11–01.
- [86] SAUDER G A, DILL K R, DUNLAP D L, et al. Apparatus and method for controlled delivery of seed to an open furrow; US 6681706B2[P]. 2002–02–26.
- [87] 陈学庚,钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):8–15. CHEN Xuegeng, ZHONG Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 8–15. (in Chinese)
- [88] 康建明,温浩军,王士国,等. 带式导种装置对排种均匀性影响的试验研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(5):42–45. KANG Jianming, WEN Haojun, WANG Shiguo, et al. Experimental study on impact of belt type conductor delivery on seeding uniformity[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 42–45. (in Chinese)
- [89] 陈晨. 精量播种机带式导种装置结构设计及性能试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.

- CHEN Chen. Structure design and performance test research of the belt seed guide device of precision planter[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [90] 刘全威. 高速播种机种子精准投送机构设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- LIU Quanwei. Design and experiment of seed precise delivery mechanism for high-speed planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [91] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错勾带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82–90.
- WANG Xiyi, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161111&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.011. (in Chinese)
- [92] 王希英. 双列交错勾带式马铃薯精量排种器的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- WANG Xiyi. Design and experiment research on double-row criss-cross spoon-belt potato precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [93] 赵建托, 赵武云, 任颜华, 等. 玉米全膜覆盖双垄沟播机直插式播种装置设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 40–43, 96.
- ZHAO Jiantuo, ZHAO Wuyun, REN Yanhua, et al. Design and simulation of direct insert corn planting device of furrow seeder with whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 40–43, 96. (in Chinese)
- [94] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91–97.
- ZHAO Wuyun, DAI Fei, YANG Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91–97. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131117&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.017. (in Chinese)
- [95] 戴飞, 赵武云, 马军民, 等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 49–56.
- DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Junmin, et al. Operation performance test of hill-seeder based on mechanism with approximate constant speed for corn whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 49–56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s008&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.008. (in Chinese)
- [96] 戴飞, 赵武云, 石林榕, 等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 74–81.
- DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 74–81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161110&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.010. (in Chinese)
- [97] 石林榕, 赵武云, 杨小平, 等. 玉米直插穴播机强排-强启排种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 41–47.
- SHI Linrong, ZHAO Wuyun, YANG Xiaoping, et al. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 41–47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180206&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.006. (in Chinese)
- [98] 侯加林, 黄圣海, 牛子儒, 等. 双鸭嘴式大蒜正头装置调头机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 87–96.
- HOU Jialin, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Mechanism analysis and test of adjusting garlics upwards using two duckbill devices[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 87–96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181110&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.010. (in Chinese)
- [99] 李天华, 黄圣海, 牛子儒, 等. 行星轮式大蒜插播机插播直立度优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 37–45.
- LI Tianhua, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Optimization and experiment of planting perpendicularity of planetary wheel garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 37–45. (in Chinese)
- [100] 黄圣海. 双鸭嘴式大蒜播种机正头与插播装置数值模拟与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- HUANG Shenghai. Numerical simulation and experimental study on the adjusting device and inserting device of double duckbill garlic planter[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [101] 李复辉, 杜瑞成, 刁培松, 等. 舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 33–38.
- LI Fuhui, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.1): 33–38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s107&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007. (in Chinese)
- [102] 刘俊孝, 王庆杰, 李洪文, 等. 针孔管式小麦精准点播装置设计与吸种性能研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 10–18.
- LIU Junxiao, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Design and seed suction performance of pinhole-tube wheat precision seeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 10–18. (in Chinese)
- [103] 佟超. 零速投种技术及其理论设计[J]. 机械研究与应用, 1995(1): 16–18, 25.
- TONG Chao. Zero speed seed casting technology and its theoretical design[J]. Mechanical Research and Application, 1995(1): 16–18, 25. (in Chinese)