

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001

玉米播种与测控技术研究进展

苑严伟¹ 白慧娟² 方宪法^{1,2} 王德成² 周利明¹ 牛康¹

(1. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 目前,我国玉米播种作业处于机械化水平较高、智能化水平较低的状态,主要表现为“播种机是播种的主体,而人是播种质量监控的主体”。要改变这一模式,必须在播种作业中充分采用智能化技术,最大程度代替人的作用。玉米播种包括排种、投种、着床3个过程,本文围绕这一过程,阐述了玉米播种与测控技术的工作原理、技术特点及发展动态。在分析归纳各项播种技术优缺点的基础上,对比国内外玉米精密播种技术的发展现状、差距,并结合精准农业背景下对玉米播种技术提出的要求,展望了我国玉米播种技术的发展趋势。

关键词: 玉米; 播种; 测控; 播种深度

中图分类号: S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0001-18

Research Progress on Maize Seeding and Its Measurement and Control Technology

YUAN Yanwei¹ BAI Huijuan² FANG Xianfa^{1,2} WANG Decheng² ZHOU Liming¹ NIU Kang¹

(1. *The State Key Laboratory of Soil, Plant and Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China*
2. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*)

Abstract: Maize can be used as food, animal feed and industrial raw material. The increase in maize yield is of great value to support growing population in the world. At present, it is widely planted around the world, and maize planters are generally adopted in the seeding process. Because cultivatable field is limited, increasing the yield per area is the only way to increase the whole yield. Precision seeding is an effective method to increase the yield. However, the precision that mechanization contributes to the seeding has been maximized. In order to further improve the seeding precision, intelligent technology has gradually been used on maize planters. For domestic planters, it is relatively high on the mechanization level, but it is low on the intelligent level. Maize planters play important role in the seeding process, however, people still have to play a part in monitoring the state of planters. It is not only labor-intensive, but also lacking of precision. Therefore, intelligent technologies must be fully used to replace the human labor. The seeding process can be classified into metering process, transporting process and landing process. From this perspective, the working principle, technical feature and developing situation of seeding technology and its measurement and control technology applied to maize planters were described. On the basics of analyzing and generalizing all advantages and disadvantages of seeding technology, the developing trends of seeding technologies were prospected, and the new demands about maize seeding technologies in the background of precision agriculture were predicted.

Key words: maize; seeding; measurement and control; seeding depth

0 引言

提高玉米播种质量是提高玉米产量的关键途

径,目前,主要通过精密播种技术提高玉米播种质量。玉米精密播种技术是将定量的玉米种子,按照农艺要求的行距、株距和播种深度进行穴播,同时按

收稿日期: 2018-07-20 修回日期: 2018-08-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200607)
作者简介: 苑严伟(1980—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail: yyw215@163.com
通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

照农艺要求的种肥间距,进行种肥深施^[1]。精密播种技术可以提高玉米植株田间分布的均匀性,最大限度地减小植株间对土壤水分、养分的竞争,从而提高产量^[2]。

精密播种技术主要通过玉米播种机来实现。为了提升播种机的性能,国内学者进行了大量研究,对排种器的结构进行优化设计(排种盘型孔数、型孔结构、型孔直径等)^[3-12],优选播种机的作业参数(如排种盘的气压、转速、播种机作业速度等)^[11,13-15],优化导种管的结构^[13,16],优选开沟器^[17],探索播种机作业状态的改变对播种机性能的影响^[18]等。目前,国内播种机在机械结构与性能方面与国外的差距已明显缩小,然而,在智能化程度上还远远落后。国内播种机排种器采用地轮驱动较多,研究表明高速作业时排种性能会大幅度下降^[19-20],而采用电动机驱动播种单体时,播种性能优于地轮驱动^[21-23];播种机上几乎没有安装排种测控设备,故障诊断仍然依靠人来完成;播种机仍主要依靠导种管导种,高速时无法实现稳着床,株距一致性差;播种机仿形和播深调节仍然主要依靠平行四杆、机械弹簧和限深轮结合的方式,播深一致性有待提高。而针对以上问题,国外知名农机企业(如美国 John Deere、Precision Planting 公司等)不仅有智能化解决方案,其先进的播种机产品也已经进入市场,引领了播种机的发展方向。目前,高速、高精度是播种机的发展趋势,单靠机械性能的提升无法满足高速时的高精度要求,在先进的播种技术的基础上采用测控技术是解决以上问题的新途径,也是提升播种机智能化水平的必然要求。

玉米播种机不仅要追求高速、高精度的发展方向,也要符合精准农业的发展要求。精准农业概念产生于 20 世纪 90 年代初,逐渐成为当今世界农业发展的新潮流,其基本内涵是根据土壤肥力和作物生长状况的空间差异,调节对作物的投入,实现各类农业资源的高效利用,获得高效益^[24]。精密播种是精准农业的关键环节,精准农业背景下的精密播种是把播种机和作业环境同时作为研究对象,基于气象信息、土壤特性等进行变量播种,前提是信息的快速获取,这都依赖于传感器等测控技术的发展。

目前,我国玉米播种机的速度、精度和智能化水平均较发达国家还有一定差距,必须针对各项关键技术逐项突破。玉米精密播种过程是一个系统工程,包括排种、投种、着床 3 个主要环节,各环节紧密关联,互相影响。要获得较高的播种性能,即好的合格指数、重播指数、漏播指数和种距变异系数等^[25],必须追求每一个环节的精密,从而必须提升每一个

环节的播种与测控水平。本文围绕玉米播种全过程,综述排种、投种、着床 3 个环节中播种与测控技术的国内外研究及应用现状,总结国内差距所在,指出国内玉米播种技术未来的发展方向。

1 精密排种与测控技术

为实现精密播种,首先在排种环节提供均匀有序的单粒化种子流,使其既不重播,也不漏播。排种器是排种环节的核心部件,需按照设定的农艺要求提供单粒化的种子流。目前,排种器的研究成果比较多,除研发了多种类型的排种器外,还发现了很多有价值的规律^[26],并且每一条规律已经被多次证明,这些研究成果可以用于指导生产实际,排种器已经实现了稳定且高速地播种^[27]。然而,排种器驱动方式也会影响排种精度,传统的排种器由地轮通过一系列的机械传动来驱动,具有一定的局限性,采用新型的驱动系统驱动排种器逐渐成为发展趋势^[19]。这些新型的驱动系统具体是根据采集的播种机作业速度信号控制驱动系统(液压马达、电动机等)的转速,从而实现对排种器转速的精确控制。采集播种机作业速度信号的方法有增量式光码盘脉冲个数测速、电磁式转速传感器测速、开关型霍尔传感器测速、GPS 测速、北斗导航系统测速等。新型排种驱动系统不仅提高了排种精度,也为变量播种技术的实现提供了可能。目前,排种环节的研究包括针对排种器本身性能的研究、排种驱动技术的研究、变量播种技术的研究。后两个方面是排种环节的新课题,逐渐受到广泛关注。

1.1 排种驱动技术

玉米播种机播种质量不仅取决于排种器的性能,还受到排种器驱动方式的影响。目前,Maschio、Kinze、Horsch、Precision Planting、John Deere 等知名农机企业中,地轮驱动、液压驱动、电动机驱动等驱动方式都有应用,用户可以选配。而国内企业生产的播种机仍以地轮驱动为主。

传统的排种器驱动方式是地轮通过链传动驱动,地轮是驱动排种器的动力源。如图 1 所示,地轮通过一系列机械传动将动力传递给排种器。随着作业速度的提升,地轮的滑移以及链传动的不稳定性也会增加。AYKAS 等^[28]和 YALÇIN 等^[29]的研究表明,不同播种机的地轮滑移程度为 6.08% ~ 8.77%。另外,在采用地轮驱动方式的情况下,排种速率不能实现大范围的无级调速,无法实现播种量快速且准确的调节^[19]。

自 20 世纪 80 年代起,出现了液压马达驱动、电动机驱动等地轮驱动的替代方案。液压马达驱动是

以液压马达作为动力源驱动排种器,通过不同的传动方式将动力从液压马达传递到排种器。如图2所示,是两种不同的液压马达驱动方案^[30]。



图1 地轮驱动排种器
Fig.1 Ground wheel drives seed meter

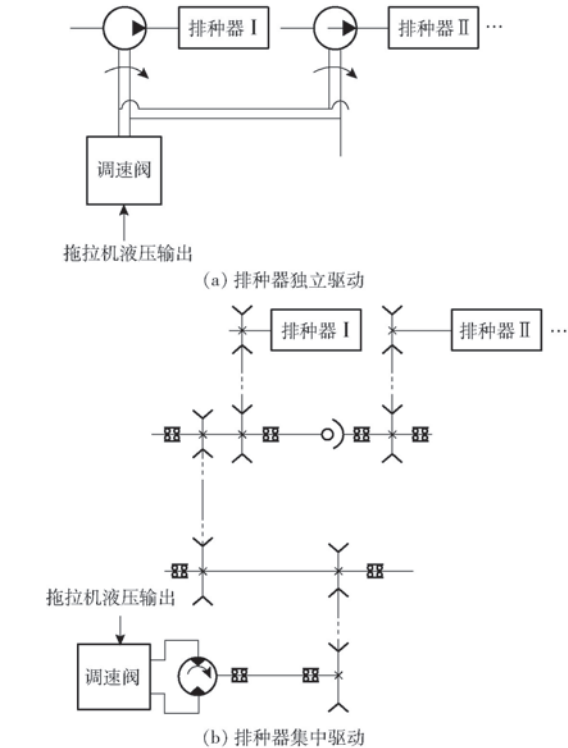


图2 液压马达驱动方案
Fig.2 Hydraulic motor driving program

意大利 Maschio 公司用液压马达驱动传动主轴,再通过万向节将传动主轴的动力分配给各播种单体^[31],如图3所示。



图3 液压马达驱动排种器
Fig.3 Hydraulic motor drives seed meter

电动机驱动是以电动机作为动力源驱动排种器,一般地,一个播种单体由一台电动机驱动。如图4所示,Precision Planting 公司采用电动机直接驱动排种器^[32]。



图4 电动机驱动排种器
Fig.4 Motor drives seed meter

表1对各种驱动方式的动力源、优缺点进行了比较,并列举了各种驱动系统的代表机型。

目前,电驱排种方式在国内外都是研究的热点,在国内主要处于实验室阶段,产品化仍处于起步阶段^[26]。采用电驱排种技术,主要是采用电动机替代机械传动结构,直接驱动排种器,可以基于播种机的作业速度和设定的株距信息,实时地调节电动机的转速,从而实时调节排种器转速,使排种速率和播种

表1 各类排种驱动方式的比较
Tab.1 Comparison between driving modes of seed meters

驱动方式	动力源	优点	缺点	代表机型
地轮驱动	地轮	制造成本低;工作相对可靠;能较好地实现排种速率与拖拉机前进速度的匹配	传动部分需要专门维护和保养;容易发生地轮打滑现象,影响播种精度,无法适应高速播种;株距调节不方便;无法实现对播种单体的独立控制	现代农装科技股份有限公司 2BMY-4 型免耕精密播种机
液压驱动	液压马达	结构简单紧凑;运动惯性小,响应速度快,驱动扭矩大;可大范围无级调速;易于实现速度控制、方向控制与启停控制,可适应高速作业;可以实现对播种单体的独立控制;自润滑,防锈	需要采用比例流量控制,系统成本高;存在最低稳定转速范围,工作过程有较多能量损失;故障诊断和维修不方便	美国 John Deere 公司 DR18 播种机;意大利 Maschio 公司 MAXIMETRO 播种机
电动机驱动	电动机	系统结构简单,转速调节方便;易于实现速度、方向与启停的自动化控制;控制精度高于液压马达;可适应高速作业;便于实现播种单体的独立控制;故障诊断较液压方便	调速范围小于液压驱动系统;驱动扭矩相对较小	德国 Horsch 公司 Maestro CC 播种机;美国 Precision Planting 公司 vDrive 系统

机的作业速度相匹配,达到较高的排种精度。YANG 等^[23]设计了一款玉米播种机的开环控制和驱动系统,采用步进电动机和齿轮传动驱动排种器,提高了排种盘转动的稳定性,同时也降低了对电动机最大输出扭矩的要求,地轮的作业速度通过编码器实时测量。HE 等^[21]、张春岭等^[33]在杨丽等研究的基础上,针对步进电动机高速时的低扭矩特点,设计了基于直流电动机驱动的闭环控制系统,实现对电动机转速的控制。CAY 等^[19,22]比较了电驱排种和地轮驱动的播种机性能,认为传统的地轮驱动方式可以用电驱方式取代,同时发现影响种距一致性的主要因素是排种盘的旋转速度和种盘上的型孔数。

在产品化方面,德国 Horsch 公司的播种机采用电驱排种系统,通过减速器直接驱动排种器^[34],但是排种系统沿排种轴方向的尺寸较大,如图 5 所示。



图 5 Horsch 电驱排种系统

Fig. 5 Electric drive seeding system of Horsch

Precision Planting 公司的电驱排种系统采用了齿轮啮合的方式将电动机的动力传递给排种器^[35],减小了排种器整体尺寸,如图 6 所示。

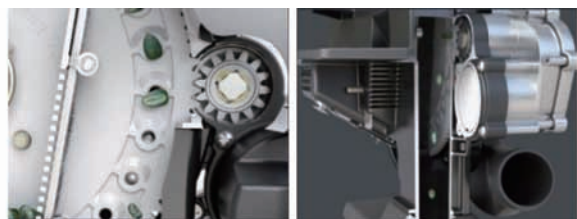


图 6 Precision Planting 电驱排种系统

Fig. 6 Electric drive seeding system of Precision Planting

采用电驱排种系统不仅可以提高排种精度,适应高速播种作业,而且能够实现对每一路播种单元的单独启停控制。Precision Planting 的播种机采用了电驱排种系统,在曲线地块作业时,可以对内行和外行的播种单体独立控制,使内行的速度低于外行的速度,最终实现播种的均匀性,如图 7 所示^[36]。

1.2 变量播种技术

传统的精密播种技术缺少对具体作业环境的考虑,采用粗放型的平均化投入方式,保证种量一致、种距一致、播深一致,限制了田块最大潜力的发挥。变量播种是在精准农业背景下对精密播种技术提出的新要求^[24],即基于田块小区土壤特性差异,调节播种量、播种密度和播种深度,充分发挥土地潜力,



图 7 Precision Planting 曲线补偿

Fig. 7 Curve compensation of Precision Planting

实现产量和收益最大化。LOWENBERG-DEBOER^[37]的试验研究表明,在土壤肥沃的地方采用大的播种密度,在土壤贫瘠的地方采用小的播种密度,可以提高产量。

变量播种技术目前仅限于研究和示范,实际应用非常有限。BULLOCK 等^[38]进行了变量播种试验,把产量的影响因素总结为:①在作物的生长期基本不变的常量因素,称之为小区特性,如土壤质地、坡度等。②可控因素,称之为生产物料的施用率,如种子、肥料、农药等。③不可控制的随机因素,如气候等。试验表明,变量播种获得收益的前提是了解小区特性对播种密度和产量的影响机制,需要进行长期、大量、广泛的试验,获得精确的播种处方图。LICHT 等^[39]基于土壤特性和地形特征进行了玉米变量播种的田间试验,历时 3 个生长季,选择了土壤特性有明显差异的 3 个区,一共获得 9 个试验结果,但最终结果并不理想,只有 5 个试验结果得到了最优的播种速率,其中只有 3 个试验结果具有分析的价值。试验结果表明,由于播种速率对气候因素和田间特性的变异性的响应,以及各因素之间的交互作用,根据田间土壤特性和地形变量来寻求最优播种率的方法很难实现。因此,需要针对不同的小区分别进行变量播种试验,探索各个小区的变量播种规律,生成各自的处方图。

目前,播种领域的变量作业主要基于土壤肥力和产量生成的施肥处方图进行变量施肥,而少有变量播种的报道。市场上的变量施肥播种机实质上都是变量施肥机和播种机的组合,如凯斯的 Flexi-Coil 变量播种机,可以基于施肥处方图,利用变量控制器控制电液伺服马达的转速,从而实时调节施肥量^[40]。然而,由于通过传感器实时检测获取土壤养分图的方法尚不成熟,土壤养分图获取仍然依靠土壤采样,不仅耗时耗力,成本高,而且获取的数据量有限。

变量播种的核心内容是变量播种处方图和变量播种机。变量播种处方图的获取是一个难点,目前仍未解决。变量播种机的技术关键在于可以实时地调节排种速率,可以通过液压马达或电驱排种技术

实现。由于变量播种处方图获取的难度较大,变量播种技术的应用受到限制。

2 平稳投种与测控技术

投种技术是实现玉米精密播种的一项关键技术,投种过程是指玉米种子从排种器出口到达种沟的过程。传统的播种机一般采用曲形导种管进行投种,结构简单,安装方便,种子离开排种盘后在重力的作用下沿着导种管下落,到达种沟,在此过程中,种子与排种管壁发生碰撞,到达种沟时发生弹跳,在高速播种的情况下,弹跳更加剧烈,这会影响播种的均匀性,进而影响产量。因此,投种技术的研究也一直是精密播种领域的研究课题之一。由于播种作业环境复杂,需要播种质量监测设备实现漏播报警,预防缺苗减产,而排种器的结构比较复杂、紧凑,安装监控模块难度大,通常安装在结构较为简单的投种装置上,对投种过程中单粒化的种子流进行监控。本节主要对投种技术及投种过程涉及到的测控技术进行阐述。

2.1 平稳投种技术

为了实现精密播种,学者提出了零速投种、点播式投种、带式投种和气力式投射等多种方式。

楼超^[41]阐述了零速投种理论,即保证种子落入种床的瞬间相对地面速度接近于零。零速投种主要有“重力投种”和“二次投种”两种方式,“重力投种”是指排种口排出的种子在重力作用下下落,途经曲形导种管,获得与播种机作业速度大小相等、方向相反的水平分速度。“二次投种”是将排种口排出的种子再通过机械作用向播种机前进的相反方向加速,使种子在投种时获得与播种机前进方向相反、大小相等的水平分速度。导种管是利用“重力投种”方式实现“零速投种”的主要部件,主要采用后弯抛物线的形式,距地面一定高度,连接在排种口,可以抵消掉种子在播种机前进方向的分速度,减少种子落入种沟的弹跳现象,提高播种精度。KOCHER 等^[13]以 John Deere MaxEmerge Plus Vacumeter Planter 的新旧导种管为试验对象,进行了播种性能对比试验,发现新导种管的播种性能更好,主要是由于新导种管内壁光滑,旧导种管内壁粗糙。YAZGI^[16]在不同的作业速度和理论种距的试验条件下,研究了不同的导种管形状对排种性能的影响,就排种合格率而言,塑料波纹管式导种管的性能比金属光滑面差很多。刘立晶等^[42]基于对进口导种管结构的逆向工程设计,设计了一款新型导种管,进行了无导种管、进口导种管、新型导种管的性能对比试验,试验结果表明,导种管的使用优于无导

种管的情况。导种管的设计需要考虑多种因素,如:直线段部分长度、直线段部分与水平方向夹角、圆弧部分曲率、圆弧圆心角、截面面积和粗糙度等,这些因素都会影响排种性能,在排种盘适当的转速下,合理的导种管结构和精密的排种器配合,可以实现零速投种。导种管作为投种装置,在排种盘转速较低时,种子贴着导种管壁排出,管内碰撞少,种子落入种沟时弹跳小,随着排种盘转速增高,种子在导种管内的碰撞增多,种子排出导种管的轨迹无法预测,因此,导种管具有一定的局限性。

点播式投种方式是指利用与地面垂直的往复式投种机构将种子直接送进种沟。魏宏安等^[43]设计了垂直插入式小麦覆膜穴播机,采用转筒结构,运用平行四杆机构原理,实现了成穴器——鸭嘴的直立接种、垂直入土和出土;李复辉等^[44]设计了舵轮式玉米免耕精量施肥播种机,其关键部件舵轮既是行走轮又是投种器,缩短了投种行程,可直接把种子送到土壤中。点播式投种方式,实质是用点播的方式让土壤包围种子,由于种子受到土壤的摩擦力,从而消除了落入种沟时的弹跳,该投种方式能够保证种距的一致性,但其无法实现高速作业。

带式投种技术是目前先进的投种技术之一,其通过传送带将种子从排种器出口运输到较低的投种高度后投种。美国 John Deere 公司研发了毛刷导种带,种子从气吸式排种器排出后,粘附在导种带上,导种带柔性夹持种子并携种子运动,到达较低投种位置时投种,精确地把种子排在种沟底部,实现零速投种^[45-46],如图 8 所示;美国 Precision Planting 公司 2014 年研发了由步进电动机驱动的“SpeedTube”投种系统,可安装在该公司生产的“vSet”气吸式排种器上,一对齿形喂入轮相对旋转将排种盘吸孔上的种子“摘”下,送入到输种带的叶片隔腔中,种子在输种带叶片高速推压下从播种单体的上端输送到接近种沟的位置,然后被叶片抛出,“零速”落入种沟,该输种系统可将播种机作业速度提高至 16 km/h,且能够较好地保持株距一致性,而且输种带的传动速度随着播种机前进速度的变化而变化^[47],如图 9 所示。采用带式投种方式,可对种子在排种器与种沟之间的行程进行很大程度地控制,降低最终的投种高度,缩短种子的自由运动行程,从而减少种子运动的不确定性,减少种子在种沟的弹跳,能够实现精密播种机的高速作业。

气力式投射方式是指利用正压气流将排种器口的种子吹到种沟中,气流对种子的作用力,减少了种子的自由运动,从而实现了对种子运动轨迹的控制。吕金庆等^[48]以气吸式马铃薯排种器为研究对象,利

用正压气流对下落的种子施加与播种机前进方向相反的作用力,以实现零速投种,结构如图 10 所示。荷兰 Lockwood 公司的马铃薯播种机采用了相同排种原理的排种器^[49],如图 11 所示。瑞典 Väderstad 公司的 Tempo 播种机播种速度超过了 20 km/h,种植深度精度为 $\pm 0.5\text{ cm}$,重播率为 0.35%,漏播率为 1.21%,平均播种精度为 98.5%,株距变异系数为 24.3%,在作业速度达到 17 km/h 时,播种机的变异系数通常接近 20%。高速作业时可以实现高精度播种,主要取决于加压排种器的设计,其中采用了力量投射技术,利用气压对种子从排种器落入土壤的整个过程进行完全的控制^[50],其排种管结构如图 12 所示。

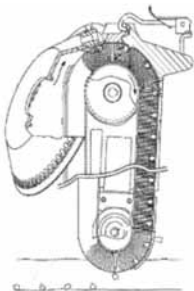


图 8 John Deere 导种带
Fig. 8 Seed-guiding belt of John Deere



图 9 SpeedTube 投种系统
Fig. 9 SpeedTube seed-guiding system

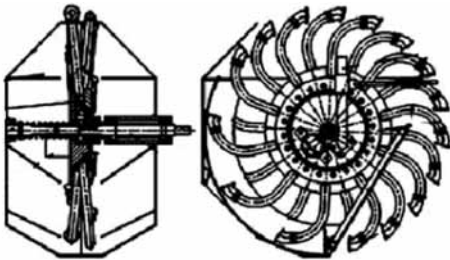


图 10 正压气流式排种器结构图
Fig. 10 Structure of seed meter with flowing positive pressure air

2.2 投种过程中的测控技术

黏油带法是传统的排种器性能检测方法^[51],由于可获得的样本数量有限,浪费种子,污染环境,耗时耗力,近年来,逐渐被智能化检测的手段所取代。投种过程中的检测技术是用传感器、高速摄像机等

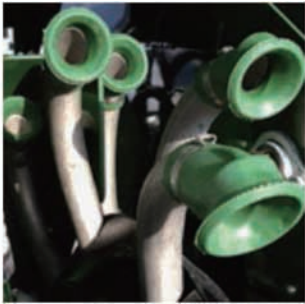


图 11 Lockwood 马铃薯排种器
Fig. 11 Potato seedmeter of Lockwood



图 12 Väderstad 投种装置
Fig. 12 Seed-guiding device of Väderstad

手段代替人监测种子流的状态,实时地获取排种器的作业状态,在线评估排种性能,并在问题出现时发出报警信号,提醒人采取调整措施或进行自动调整。投种过程中的测控技术有两方面的应用,一方面用于试验室条件下,对排种器的性能进行检测,另一方面用于田间作业环境下,对播种机的性能进行实时监测,以避免播种机在复杂多变的田间作业环境下性能下降。目前,播种机的性能指标主要有排种性能的合格指数、重播指数、漏播指数和种距变异系数等^[25],均是以种距或株距的测量为基础。

目前,对种子流的检测技术主要有基于光电传感器的检测技术和基于高速摄像与图像处理的检测技术。

2.2.1 基于光电传感器的检测技术

采用光电传感器方式的检测系统主要由光电传感器、速度传感器、控制器和显示终端组成,结构组成如图 13 所示^[2]。

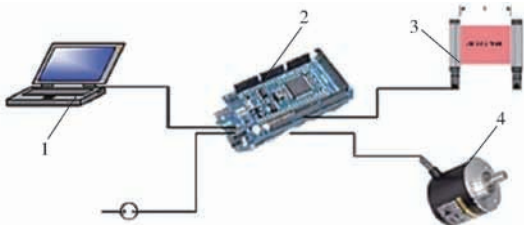


图 13 光电检测系统方案图
Fig. 13 Scheme diagram of photoelectric monitoring system
1. 显示终端 2. 控制器 3. 光电传感器 4. 速度传感器

光电传感器用于监测种子流的状态,一般由发

射端的光源和接收端的敏感元件组成,发射端和接收端相对安装在投种区域的两侧,形成监测区域,排种器排出的种子经过此区域时,光电传感器可以实时监测种子流的状态。光电传感器的工作原理是:光源发出光线,由敏感元件接收光线,排种过程中,种子经过监测区域时,会遮挡发射端光源发出的光线,触发接收端发出电平信号,进而得到相邻两粒种子下落的时间间隔。Horsch 公司将光电传感器安装在导种管上,监测种子的通过状态,如图 14 所示。



图 14 Horsch 光电传感器
Fig. 14 Photoelectric sensor of Horsch

John Deere 公司将传感器安装在沟槽式输送系统上,种子在输送系统的夹持下通过传感器时,和输送系统处于相对静止状态,传感器获得的信号会非常准确,并将信号传给控制器,如图 15 所示^[52]。对于光电传感器的导种管配置和导种带配置方式,前者在排种速率增加时,会漏掉一些种子,最后需要对记录结果进行调整,后者的记录结果更准确。



图 15 John Deere 沟槽式输送系统与传感器
Fig. 15 Reflective seed sensor and sensor on trench-delivery system of John Deere

播种机性能监测中使用的光电传感器包括光纤传感器、光敏电阻传感器、红外线传感器、激光传感器等。最近几年,使用光纤传感器监测小粒种子(如黑麦、油菜、谷物)播种机性能的研究较多^[53-55],主要以监测播量和排种性能为主,这些播种机多是采用外槽轮排种器,种子呈柱状流出,研究表明采用光纤传感器的监测系统有较高的测量精度。而玉米播种机性能监测系统一般采用光敏电阻传感器、红外线传感器和激光传感器等。光敏传感器接收端采用光敏电阻,发射端的光源类型不固定;红外线传感器发射端的光源采用红外发光二极管,接收端的敏感元件类型不固定;激光传感器发射端的光源采用激光二极管,接收端的敏感元件类型不固定。光电传感器发射端的光源一般包括红外发光

二极管、发光二极管和激光二极管,接收端的敏感元件主要包括光敏二极管、光敏三极管、光敏电阻和硅光电池。因此,通过不同的组合可以组成多种传感器。

文献[56-58]均采用发光二极管和光敏电阻分别作为发光元件和光敏元件,组成光敏电阻传感器,实时监测播种机的作业状态,并在监测到故障时发出报警信号。文献[59-60]采用近红外发光二极管和光敏三极管组成传感器,监测排种器的性能,并与黏油带系统的监测结果进行了对比,两者相关系数为 0.951。金衡模等^[61]设计了玉米精播机漏播补偿系统,采用两组传感器分别用于原播种系统和补播系统的性能监测,两组传感器分别是红外发光二极管和光敏三极管的组合、发光二极管和光敏电阻的组合。XIA 等^[62]采用 3~4 组红外发光二极管和光敏三极管在排种管上均匀对称地配置,实时地监控播种机的性能,并能进行光电报警。OKOPNIK 等^[63]采用 DFRobot RB-DFR-49 红外线传感器检测种距,红外发光二极管和红外光电二极管之间形成三维监测区域,当种子通过监测区域时,种子反射的红外线会激发红外光电传感器产生 5 V 的高平信号,当种子在监测区域之外时,接收端输出 0 V 的低平信号,通过改变光电传感器与皮带表面的距离来调整监测区域的大小。史智兴等^[64-65]采用激光二极管和硅光电池设计了激光束栅格光电传感器和双路激光逆向直射光电传感器,改善了传感器对落种的覆盖性能,减少了漏检。宋鹏等^[66]采用一字线激光器和紧密排列的贴片光敏二极管作为光电传感器的发射端和接收端,监测排种器的性能。表 2 为几种不同结构的传感器,为了提高传感器的覆盖性能,一方面尽量使光束的直径小于种子的尺寸,避免种子从光束内部通过,无法完整遮挡光束,另一方面使传感器的监测区域对种子的通过区域进行全覆盖,避免漏检。

KARIMI 等^[69]对光敏电阻传感器、红外线传感器、激光传感器 3 种非接触式种子流量检测技术进行了对比试验,3 种传感器的原理如图 16 所示,试验结果表明,红外线传感器的检测结果与电子秤的测量结果最接近,综合比较得出,红外线传感器是光电检测系统的较优选择。

光电传感器具有很多优点,适用于漏播检测,具有高的测量灵敏性、快的测量速度,成本低,数据采集和使用都很方便^[2]。然而,也有一些缺点,对于重播检测,当种子颗粒较小、播种速度较快时,误差较大,也无法检测种子破碎率。周利明等^[70]针对现有的光电传感器较难监测重播的情况,基于微电容

表 2 各类应用于播种机性能检测系统的光电传感器的对比

Tab.2 Comparison between photoelectric sensors applied to planters' performance monitoring system			
发光元件/ 接收元件	结构/原理	特点	文献 序号
近红外发光 二 极 管/光 敏三极管	光电传感器由 24 组直径为 5 mm 的近红外发光二极管和光敏三极管组成,发光二极管和光敏三极管相对安装,形成 12.7 cm×11.7 cm×2.5 cm 的长方体光电门,其中,横截面积为 7.6 cm×6.6 cm 的空间位于长方体光电门的中部作为种子的通道,在种子通过的方向上,每 12 组光电传感器形成 1 层,共设置两层光门,一层是发光二极管安装在上,光敏三极管在下,另一层逆向安装	可以代替黏油带系统检测精密排种器的性能,由于发光二极管和光敏三极管的直径是 5 mm,对于尺寸小于 3 mm 的种子可能漏检	[59-60]
红外发光二 极 管/硅 光 电池	传感器由 1 个红外发光二极管、1 个焦距为 5 cm 的凸透镜、16 片硅光电池贴成的面积为 6 mm×24 mm 的硅光电池组组成。发光管放在凸透镜焦点上,发射的光经过透镜后变成平行光,均匀地照在硅光电池上,种子下落时,硅光电池会产生相应的脉冲	可以对精密排种器的各项性能指标进行无盲区的检测	[67]
红外发光二 极 管/红 外 接收二极管	监测装置被安装在紧靠开沟器上方处,传感器发射端为 1 个直径 10 mm 的红外发光二极管,工作时发出波长 850 nm、发射角度 45°的红外光,监测装置内部的长方体结构长、宽、高为 45 mm×35 mm×40 mm,并在发射端安装焦距为 17.5 mm 的凸透镜,红外发光二极管安装在凸透镜的焦点位置,红外光经凸透镜后平行射向接收端,接收端采用紧密排列的宽度为 2 mm 的贴片式红外接收二极管,串联成一字型	当尺寸小于 4 mm 的种子从两二极管之间通过时会漏检。该监测系统的单粒监测精度达到 98.8%,漏播率监测误差小于 0.3%,重播率监测误差小于 0.6%,播种量监测精度大于 94.4%	[68]
激 光 二 极 管/硅 光 电 池	传感器包括红光半导体激光二极管 1 只(带透镜)、8 mm×8 mm 硅光电池 1 只、反光镜 2 片。激光经过反光镜多次反射,可以得到覆盖整个排种管截面的激光束栅格,激光束直径为 2 mm 左右;精细调整激光二极管方向,可以控制激光束的反射次数即栅格密度	激光定向性好、光线可见,只要种子直径大于激光束栅格的间隙,通过检测截面时就会阻断激光束,不会出现漏检	[64]
激 光 二 极 管/硅 光 电 池	2 只激光二极管和 2 片硅光电池组成 2 个光电转换单元并且逆向安放,2 条激光束之间的距离为 6~7 mm,激光束距通道管壁 4~5 mm。2 片硅光电池串联使用,任何一路光束受阻挡,都能在串联电池两端产生明显的输出电压变化。2 对光电器件逆向安装,以避免同向安置时光束相互影响	只要玉米种子通过光束间隙时不是最窄的姿态,就会阻挡激光束产生落种信号	[65]
激 光 二 极 管/光 敏 二 极 管	监测系统安装于开沟器上方距排种器底部出口 120 mm 处,传感器发射端为一字线激光器,接收端采用封装贴片光敏二极管,光敏二极管相互间距 2 mm,封装尺寸为 2 mm×1.2 mm,通电后,发射端发出可见光,形成一字线光斑照射至接收端,光敏二极管被光线照射,种子下落会遮挡光线,接收端电路输出脉冲信号	实现了实际播种工况下播种量、漏播、重播量等参数的获取,适用于直径大于 2 mm 的种子检测,播种检测精度为 98%,漏播检测精度为 96%	[66]
发 光 二 极 管/光 敏 电 阻	在导种管两侧分别安装发光二极管和光敏电阻电路,发光管的光照在光敏电阻上,当种子通过时,由于种子的下落挡住了发光管照在光敏电阻的一部分光,而使光敏电阻光照强度变小,电阻变大,光敏电阻上的电压增大。通过采集、处理、分析光敏电阻上的电压值的变化来实现种、肥状态的监测	光敏电阻的相对灵敏度可达 90%以上;光敏式种肥监测装置对精密播种的监测精度在 96%以上	[56-58]

信号获取与分析的方法,设计了电容传感器,由电容传感器获取种子运动信息,利用峰值搜索方法获取所捕获的相邻 2 个籽粒脉冲的时间间隔及脉冲积分面积,实现对排种性能的监测,特别能检测出两粒种子同时下落的情况。

2.2.2 基于高速摄像和图像处理的检测技术

基于高速摄像和图像处理技术的检测系统包括高速摄像机、图像采集卡、照明系统、计算机等部分^[71-74],方案如图 17 所示^[75]。

高速摄像机用于对排种器排出的种子流进行图像采集,需要有较高的检测速度,以及较高的成像质量和分辨率,如 CCD 相机等;图像采集卡用于将摄像机拍摄的图像传输给计算机,应具有较高的传输

速率,并能快速进行 A/D 转换;照明系统用于为摄像提供一个良好的光照环境;计算机具有人机交互接口,用于显示、存储图像,并借助专门的图像处理软件处理和分析图像。

当前,关于高速摄像和图像处理检测技术的研究较多。陈进等^[76]提出了采用此检测方式分析种子破碎和重播情况的方法,将图像像素点的面积和与设定的单粒种子的面积范围比较,若小于最小值,则发生了破碎,认为是漏播,若大于最大值,则认为是重播。NAVID 等^[77]利用图像处理技术对番茄种子排种器的性能进行了检测,并与传统的黏油带检测方式进行了对比,发现黏油带方式的测量值和种距的设定值有较好的一致性,而采用图像处理检测

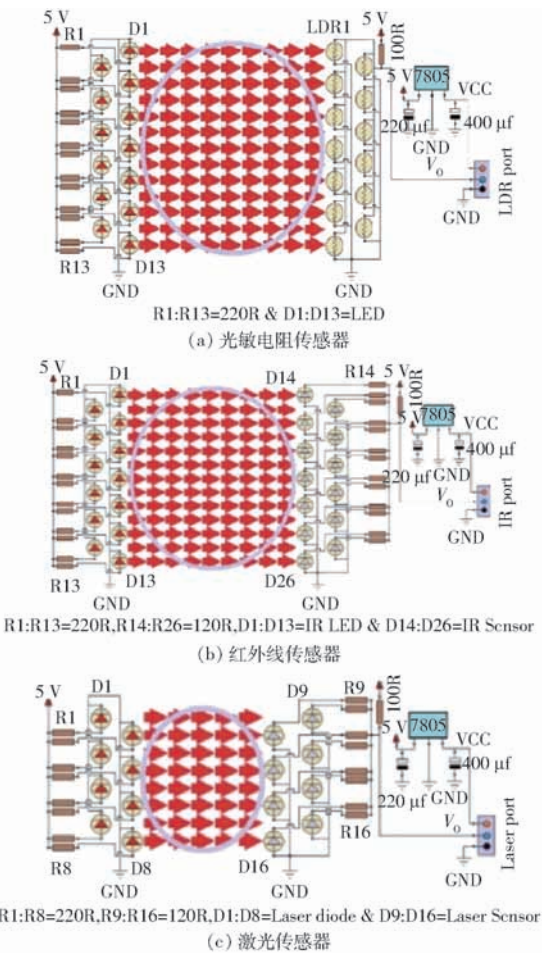


图 16 各类光电传感器原理图

Fig. 16 Schematic diagram of various photoelectric sensors

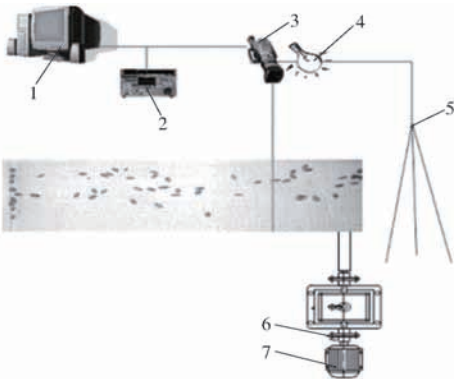


图 17 基于高速摄像和图像处理的检测系统方案

Fig. 17 Detection system scheme based on high-speed camera and image processing

1. 计算机 2. 图像采集卡 3. 高速摄像机 4. 照明系统 5. 三脚架 6. 编码器 7. 电动机

方式的测量值与种距的设定值有一定的差异,且两种检测方式测得的种距值具有线性关系,两种检测方式测量值的差异是由种子下落时的状态导致的,图像处理的检测方式是在假定种子自由落体的情况下获得种距值,而黏油带的测量值是真实情况下的种距值,如果要用图像处理方式的测量值代替黏油带方式的测量值,则需要采用程序进行调节。

AKDEMIR 等^[75]研发了播种机室内性能检测的图像分析系统,采用两台摄像机,一台对落种过程进行监测,用于计数,一台对传送带上的种子进行监测,用于计算种距。MANGUS 等^[18]采用了高速摄像和图像处理技术去测量播种机不同作业状态下(加速、减速、转弯等)的速度和单粒率,并与光电传感器的检测结果进行了对比,误差率为 $(0.8 \pm 0.2)\%$,从而验证了高速摄像和图像处理检测技术的可行性,该方式与其他高速摄像检测方式的不同之处在于,提前对排种盘上的型孔进行标定,作业过程中,对转动的型孔依次进行高速摄像,图像只有以下 4 种情况:型孔单粒充种、双粒充种、3 粒充种和未充种,通过图像处理技术,可以准确地判断排种情况,过程如图 18 所示。

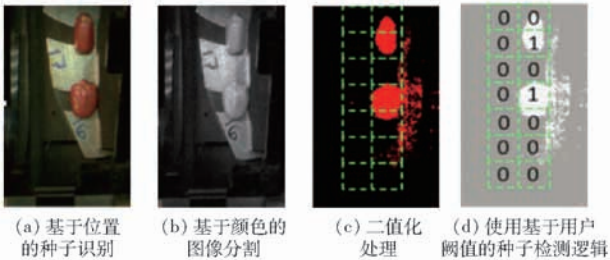


图 18 高速摄像和图像处理的过程

Fig. 18 Process of high-speed camera shooting and image processing

相对于光电传感器检测技术检测重播率误差较大的局限性,高速摄像和图像处理相结合的检测技术可以更准确地检测重播率,另外,还可以检测种子的破碎率。但这种检测技术也有一些局限性,其对软件、硬件和环境的要求都很高,需要有高分辨率的摄像机、专业化的图像处理软件和均匀的照明环境,且需要对摄像机进行复杂的标定,以及后续的图像处理操作,不仅成本较高,而且劳动强度较大。

光电传感器检测技术、高速摄像和图像处理检测技术各有优缺点。前者成本低,使用方便,应用更为广泛;后者对检测种子的颗粒尺寸没有要求,且有更高的检测精度,可应用于精密排种器的室内性能检测。

3 平稳着床与测控技术

在精密排种技术和平稳投种技术的基础上,为了确保排种和投种过程中实现的种距一致性,最终实现播种的均匀性,需要使种子平稳地着床。当前,种沟构建、外力压种、播深控制等技术是种子平稳着床的关键技术,也是玉米播种领域的主要研究方向。

3.1 种沟构建技术

种沟构建技术是实现精密播种的关键^[78],优质

种床结构可分为3层,分别为种下土壤、种上土壤和土壤表层的土块、残茬等覆盖物^[79],如图19所示,种下土壤应紧实,利于提墒,种上土壤应松碎紧密,利于空气和热量的流通,土壤表层的覆盖物用于防止水分蒸发^[80]。构建适宜的种床土壤结构,保证良好的种床性能,不仅可以为种子提供虚实相间的生长环境,有利于提高水分的利用率,还可以减少种子的触土弹跳,提高种子的分布均匀性、播深一致性^[27]。

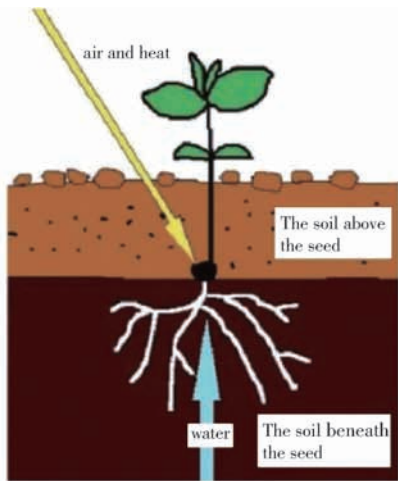


图 19 种床结构示意图

Fig. 19 Schematic diagram of seed bed structure

开沟器是种沟构建的主要部件,其工作质量直接决定种沟的形状,进而影响播种质量。开沟器有多种形式,按照入土角的不同,可以分为锐角和钝角开沟器两类,锐角开沟器的入土性能通常优于钝角开沟器,锐角开沟器主要包括锄铲式和芯铧式,钝角开沟器主要包括滑刀式和圆盘式。不同类型的开沟器适用于不同的作业环境。由于圆盘式开沟器依靠周边切刃滚动工作,因此适用于整地条件差的作业环境(如免耕作业环境),也能够实现高速作业。由于芯铧式、双圆盘式、滑刀式开沟器在开沟时对土层扰动较小,可实现湿土覆种,因此,适用于干旱地区。一般而言,开沟时对土层扰动较小的开沟器,自覆土性能相对较差,需要专门的覆土部件进行覆土(如滑刀式);而自覆土性能较好的开沟器,一般会扰乱土层,使干湿土混合,不适用于干旱地区(如锄铲式)。相对而言,双圆盘开沟器是一种适应性较好的开沟器,而滑刀式开沟器在非免耕条件下,播种质量较高。

近年来,学者们对开沟器进行了大量的研究,以提高入土与切土性能、减阻耐磨为目的,主要涉及开沟器的结构、表面材料、作业参数和作业环境等^[81-87]。BUFTON等^[88]研究了落种速度、落种角度及地表类型对种子在种沟内位移的影响;落种速

度越低,位移越小;落种角度在 $75^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 之间时,位移最小;与压实表面相比,种子落在剪切表面上的位移较小;此外,尺寸较小的不规则形状种子的位移小于尺寸较大的球状种子。马旭等^[89]建立了种子着地速度、着地角度、开沟角度、播种深度和土壤湿度等影响因素与种子弹跳滚动位移的数学模型,为田间植株分布预测和计算机仿真研究奠定了基础。为实现精密播种,开沟器需要满足开沟阻力低、开沟质量好的要求,以利于平稳落种,提高种子分布的均匀性。然而,关于种沟质量的研究相对缺乏。不同的开沟器结构会形成不同的种沟形状,会对种子触土后的状态产生不同影响。袁锐^[90]研究了沟形对种子触土后弹跳滚动的影响,对于V型开沟器,开沟角越小,种子的位移越小。宽度较窄、沟内平整的种沟,种子触土后的弹跳滚动位移较小。贾洪雷等^[91]设计了双V形筑沟器,相对于圆盘式开沟器,开沟深度均匀,开出种沟较窄,沟形稳定,沟壁平滑,土壤紧实,有利于保证播种深度一致性、种子分布直线性。由以上研究可知,开沟器影响种床的质量,从而影响种子在种沟内的分布均匀性,然而通过文献可知,开沟器对种床质量影响方面的研究较少。

作物生长需要一个上松下实的土壤耕层环境^[92],主要通过种沟镇压和播后镇压来实现。文献^[27, 93-94]的研究表明,种沟镇压可增加或保持种沟含水量,缩短出苗时间。目前,耕层环境往往忽略了种沟镇压,只进行播后镇压。BLANCO等^[95]提出,当播深较深时,不能单纯依靠增加镇压轮的配重实现种子带所在耕层的土壤压实,否则,表层土壤将被过分镇压。播种深度为 $0\sim 200\text{ mm}$ 时,作物正常生长的土壤坚实度临界值为 $2\sim 3\text{ MPa}$,土壤坚实度超过此临界值时,将会抑制作物根系生长^[96-97]。播种机上采用种沟镇压装置可保证种下土壤的坚实度,其原理是在开沟器之后安装种沟镇压装置,对初始种沟进行造型和镇压,提高种沟质量的同时,可提高种沟土壤的坚实度,减少种子在种沟内的弹跳,保持和增加土壤的含水率。如图20所示,意大利Maschio公司播种机种沟镇压装置安装在圆盘开沟器后,可以对种沟进行造型和镇压,减少种子触土后的位移,提高种子分布的一致性^[98]。

3.2 外力压种技术

种子落入种沟时,会发生触土弹跳或滚动,通过采用压种装置对落种及时地进行按压,可以有效地减少种子的弹跳或滚动,提高种子的分布均匀性。因此,精密播种机上通常装有压种装置。

压种装置主要有压种舌和压种轮两种形式。图21为Precision Planing公司的压种舌,直接安装

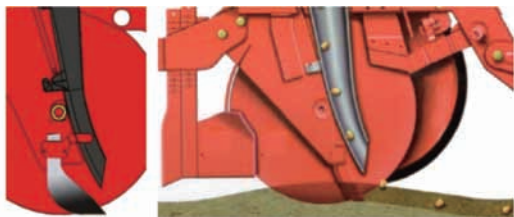


图 20 Maschio 种沟镇压装置

Fig. 20 Maschio's suppression device of seed groove



图 21 Precision Planting 压种舌

Fig. 21 Seed-pressing tongue of Precision Planting

在 SpeedTube 投种装置的底部,可以防止落种的弹跳^[99]。

德国 Horsch 公司采用比较柔软的橡胶滚筒作为压种装置,直接安装在导种管的后面,当种子离开导种管后立即固定种子,防止种子的滚动和跳动^[100],如图 22 所示。



图 22 Horsch 压种轮

Fig. 22 Seed-pressing wheel of Horsch

3.3 播深测控技术

播种深度影响出苗时间和出苗率,适宜的播种深度,种子可获得较好的水分条件和养分条件。HÇKANSSON 等^[101]通过大麦出苗试验得出,随着播种深度的增加,出苗时间线性增长。对于不同的土壤情况,适宜的播种深度范围有所不同。播种深度一致,可以保证种子同时出苗,减小大小苗现象导致的植株间的竞争。当播深过浅时,会导致种子成长初期缺水,也可能被禽类所捕食^[102];播深过深时,在出苗之前,种子内的营养成分已消耗殆尽。KARAYEL 等^[103]研究了播种深度对出苗率的影响,得到了播种深度一致时出苗率高的结论。

土壤的阻力、地表残留会引起开沟器的振动,而造成开沟深度的变动^[104-105],KARAYEL 等^[106]的研究表明,即使在实验室条件下,开沟深度也会发生变化。因此,为保证适宜的播种深度,需要对播种单体的播种深度进行控制。针对传统播种机,播种单

体通过平行四杆机构及安装在开沟器后面的镇压轮或限深轮,实现对地面的仿形,并且在平行四杆机构上安装机械弹簧,减少播种单体的振动,保持一致的播种深度^[107]。该方式是在作业前调整好弹簧的压紧力,同时调整好限深轮和开沟器的相对高差,通过试播一段距离来检查作业质量,达到合格率后开始正式作业,整个作业过程中不再调节播种深度,这无法适应地表土壤条件多变的情况。

对于通过三点悬挂机构安装在拖拉机上的机具,早期是通过调节拖拉机三点悬挂机构的角度来调节作业深度。LEE 等^[108]设计了耕作深度控制系统,主要由设置单元、检测单元、控制单元、液压单元以及三点悬挂和机具单元组成。检测单元采用光学传感器测量传感器和地表之间的距离,倾斜角传感器测量拖拉机的俯仰角,提升臂传感器测量提升臂的位置,通过 3 个传感器采集的信号计算耕作机具的耕作深度,作为控制单元的输入信号,与设置单元传递给控制单元的信号进行对比,得到偏差信号,控制电磁阀的开闭,从而控制液压缸的运动,间接地控制拖拉机的三点悬挂装置,调节安装在三点悬挂装置上的耕作机具的作业深度,通过实验获得了系统的响应特性。MOUAZEN 等^[109]和 SAEYS 等^[110]为了在线检测土壤同一深度的坚实度,把土壤坚实度测量仪通过三点悬挂安装在拖拉机上,分别研发了测量机架相对地表高度的传感器和用于作业深度控制的模型。测量仪的机架相对地表的高度变化信号通过 wheel-LVDT 传感器获得;作业深度控制模型基于电液控制技术而建立,主要通过调节拖拉机三点悬挂机构的角度,来保持坚实度测量仪在地表下的作业深度不变。

对于机具作业深度的测控方法,学者们进行了大量研究。VAN DER LINDEN 等^[111]研发了红外激光三角测量传感器,实时地测量行间机械锄草器的作业深度,结果表明该深度传感器不受太阳光的影响,可以有效识别土壤和作物,此外,针对运动中的机具,测量精度可以达到 5 mm。NIELSEN 等^[112]设计了播种机开沟深度的测量系统和电液控制系统,采用角度传感器测量开沟器的角度,通过计算得到开沟深度,与设定的开沟深度对比,获得偏差信号,作为控制系统的输入信号,通过室内试验比较了深度控制系统的 3 种控制算法:三点位置控制、P 控制、PID 控制,发现三点位置控制的响应最快,而 PID 控制最稳定,也最准确。NIELSEN 等^[113]研发的播深测量系统,主要由线性位移传感器和超声波传感器组成,分别用于测量开沟器相对机架的位置变化和机架与地表的高度变化,在控制器中将两个

传感器获得的信号进行联立,可以得到实际的开沟深度。NIELSEN 等^[114]在田间试验中,控制系统采用三点位置控制算法,与未采用控制系统的情况相比,播种深度变异性由 $\pm 8\text{ mm}$ 减小为 $\pm 2\text{ mm}$ 。

目前,在播种机上,一般采用单体仿形技术实现更精确的仿形,从而提高播种深度的一致性,一般也基于播种单体进行播种深度的测量和控制。SHARIPOV 等^[115]在同一个绝对地理参照坐标系下,测量了播种深度以及机具的垂直和剖面冲击力,研究了播种深度的变动和开沟器受力之间的关系,得到引起播种深度大幅度变动的垂直冲击力和剖面冲击力的频率和波长。在此基础上,SHARIPOV 等^[116]建立了开沟器竖直方向运动的数学模型,这一模型包括开沟器装配体、作为被动控制系统的镇压轮、半主动电磁流变阻尼系统。针对半主动电磁流变阻尼系统,对 3 种假设模型(Bingham, Dahl 和 Bounc - Wen 模型)进行了对比仿真试验,从减小机具竖直位移和作用力的角度来看,半主动控制系统要优于被动控制系统,并且 Bounc - Wen 模型的性能最优。蔡国华等^[117]和 WEN 等^[118]采用超声波传感器实时检测开沟深度,并设计了控制系统,通过液压系统来调节开沟深度。赵金辉等^[119]设计了播种机开沟深度控制系统,采用两个位移传感器获取实时的开沟深度,与设定开沟深度的偏差超过设定范围时,通过液压系统调节四连杆仿形机构,进而调节开沟深度,使其满足要求,控制系统响应时间为 0.12 s ,测量的开沟深度稳定性系数大于 90% 。黄东岩等^[120]设计了一种主动作用式播种深度自动控制系统,采用 PVDF 压电薄膜传感器测量播种机限深轮的胎面形变量,根据胎面形变量实时监测播种单体对地表的压力,通过安装在四连杆间的空气弹簧调节播种单体对地表的压力,通过控制播种单体对地表的压力来控制播种深度。李玉环等^[121]设计了玉米播种深度控制系统,选用压力传感器测量镇压轮的压力,当超出预设阈值范围时,通过电动推杆驱动覆土器运动,调节覆土量,从而调节播种深度,播深合格率高于 90% 。JIA 等^[122]设计了一款自适应性耕作深度监控系统,采用地表适应性摆臂和光学编码器测量摆臂的旋转,测得的角度通过公式可以转换为耕作深度,通过田间试验,得到该系统在规则地表的测量误差为 11.3 mm 。SUOMI 等^[123]在条播机上安装了 8 个传感器,用于测量开沟器的作业深度,并将此信号作为控制系统的输入信号,在串联的控制系统中采用 PID 控制算法调节液压开沟器的压力,采用 ISO 11783 协议进行通信。WEATHERLY 等^[124]研制了一款主动式播种深度控制系统,该系

统利用干燥面传感器检测土壤电阻以得到土壤水分信息,再通过控制器、液压系统、调节机构等将圆盘开沟器调整至合适位置,从而把种子播在土壤中含水率较适宜的位置。

当前,在国外先进的农机企业中,在播种机上安装播深测控装置较为广泛。德国 Horsch 公司、Knize 公司、意大利 Maschio 公司、美国 Precision Planting 公司等均采用液压或气压装置对开沟器的作业深度进行控制,尤其是美国 Precision Planting 公司研发的气力式下压装置,设置了两个气囊,分别用于提起和下压开沟器,通过自动增加或减小压力来实现。如图 23 所示,是不同的典型播种深度调节装置^[98, 125 - 127]。

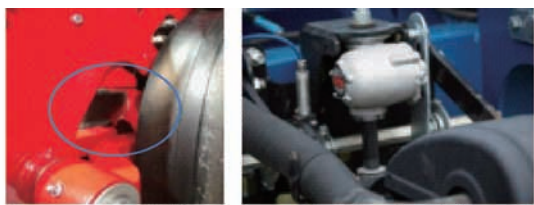


图 23 播深调节装置

Fig. 23 Seed depth adjusting device

德国 Horsch 公司通过在播种单体上安装力传感器实时获取播种单体对地表的压力,并采用液压装置改变播种单体的下压力,达到调节播种深度的目的(图 24a)。美国 Agleader 公司研发了下压力测控系统,其针对播种单体受地面障碍物影响而发生弹跳的情况,设计了蓄能装置,保证播种单体运动的稳定性,系统响应时间仅为 1 s ,借助于该系统能够快速、准确地实现播种深度的一致性(图 24b)。

总之,播深测控技术的研究目标是实现作业深度的一致性,基本原理主要是通过实时地测量开沟器的作业深度,并与设定的理论作业深度对比,偏差超过设定范围时,启动控制系统进行调节,具体是通过电磁阀的开闭,调节液压或气压装置的压力,由于



(a) Horsch公司播种单体内下压力检测传感器 (b) Agleader公司播种深度测控装置

图24 播深测控装置

Fig. 24 Seed depth measurement and control device

开沟器与气压或液压装置连接,从而开沟器的作业深度可调,直至达到设定的理论深度,最终实现播深的一致性。

4 讨论和建议

近年来,玉米播种技术经历了快速的发展,在机械化的基础上开始逐步趋于智能化,玉米播种质量大大提升。然而,从国内外的发展现状来看,尚存在以下问题,在以后的研究中需要重点关注和解决:

(1) 玉米排种器的驱动问题

目前,在国外知名农机企业中,地轮驱动、电动机驱动、液压马达驱动等多种驱动方式均有应用,可以满足用户的不同需求。采用电驱、液压马达等新型排种驱动技术,极大地提高了播种的速度和精度。然而,在国内农机企业中,地轮驱动仍然是主要甚至唯一的排种器驱动方式,电驱排种技术主要处于实验室阶段,而关于液压马达驱动排种的研究和应用则更少,国内播种机的驱动方式限制了播种速度和精度的提升。建议在未来的研究中,加强对电驱和液压马达驱动排种技术的研究和应用,为我国播种机速度和精度的提升提供技术保障。

(2) 玉米变量播种处方图的获取问题

变量播种处方图的获取在国内外都是难点。一方面,受到土壤传感器技术水平的限制,在线检测土壤特性的技术还不成熟,而传统的土壤采样法成本高、数据量少,无法为变量播种提供足够的数据支撑。另一方面,影响玉米产量的因素众多,包括土壤特性、肥料和农药的施用量、气候因素等,在众多因素交互作用下,探索获得高产高收益的适宜播种量,需要开展长期的、大范围的试验,也具有很大难度。目前,变量播种处方图主要基于产量图和土壤养分图生成,考虑的因素尚不充分,国内外尚无变量播种成功实践的相关报道,因此,变量播种技术的价值仍然需要未来实践的验证,其发展也依赖于各方面技术的进步。

(3) 平稳投种技术在国内的研究及应用问题

目前,国外发达国家已经研发成功了先进的带式和气力式投种系统,提升了高速作业(可达

20 km/h)时的种距一致性。然而,国内播种机播种速度为6~8 km/h,目前仍主要依靠导种管进行投种,速度和精度都有待提升。因此,国内应加快平稳投种技术的研究及应用,从而为播种机速度和精度的提升奠定基础。

(4) 播深测控技术的研究及应用问题

目前,国外发达国家已经研发成功了针对播深的测控设备,可以实时地通过压力传感器及液压、气压系统测量并调节播种深度,在播种机上已有大量应用。国内播种机主要依靠机械弹簧和平行四杆机构进行被动的仿形,播种深度的精度及一致性有待提高。因此,国内应加强播深测控技术的研究和应用。

(5) 播种测控技术的应用推广问题

目前,国外播种机的智能化水平远高于我国,一般在播种机上安装各类传感器用于在线监测播种机的性能,机手通过驾驶室内的智能终端可以观察播种机的实时作业状态,包括播种量、株距合格指数、下压力等,在一定程度上,智能化技术既解放了人力,也大大提升了播种精度,减少了故障率。然而,尽管国内在智能化测控技术方面取得了很多成果,包括播量监测、漏播监测等技术,但目前国内市场上,应用相关成果的播种机少之又少,其主要原因在于安装测控设备的成本较高。因此,在研究层面上,不仅要提高测控设备的精度,也要尽量降低测控设备的成本,在政府层面上,应该加强对测控设备的政策补贴力度,促进技术的推广应用。

5 展望

现代化农业背景下,高速、高精度、智能化成为玉米播种机的发展方向,同时,精准农业对播种机提出了变量作业的新要求。目前,在播种机的速度、精度、智能化程度等方面,国内与国外均存在一定差距。然而,由于国内外的地形、种植习惯、经济发展水平等有差异,需要结合国内的实际情况,因地制宜地开展玉米播种与测控技术的研究。基于现有技术以及未来发展的方向,我国玉米播种与测控技术将主要朝以下方向发展:

(1)从排种器驱动方式上看,今后将向多种驱动方式并存的方向发展。目前,对于电驱排种技术,国内已经开展了大量的研究工作,具有了一定的技术积累,而关于液压马达驱动排种的研究相对较少。因此,未来国内将向电驱排种技术为主、地轮驱动和液压马达驱动等驱动方式为辅,多种驱动并存的方向发展。

(2)在精准农业背景下,播种机会朝着变量播种的方向发展。目前,变量播种主要指的是基于小

区特性的变密度播种,未来可能会涉及到基于小区特性的变深度播种。国外,有部分地区开始尝试基于小区特性的变深度播种,但尚未发现相关报道。

(3)从投种技术上看,今后将向多种投种技术并存的方向发展。带式投种方式和气力式投射方式满足高速作业的要求,未来会成为国内主要的投种方式。

(4)智能化技术将成为玉米播种技术中研究的热点。智能化技术包括各类传感器技术、控制技术

等,智能化测控设备不仅有助于提高玉米播种的精度和速度,减少故障率,还极大地解放了人力。

随着研究的深入,对播种技术的研究将更加全面和充分,排种驱动技术、投种技术、种沟构建技术、外力压种技术、播深控制技术和智能化测控技术等都将深入研究。在玉米播种过程中,排种、投种、着床3个环节相互关联,均影响播种性能,研究中应采用系统工程的思想,对各环节统筹考虑。此外,农机与农艺深度融合是提升我国玉米播种水平的关键。

参 考 文 献

- 高艳. 玉米精量播种技术[J]. 中国种业, 2014(2): 74.
- CAY A, KOCABIYIK H, KARAASLAN B, et al. Development of an opto-electronic measurement system for planter laboratory tests[J]. Measurement, 2017, 102: 90–95.
- 杨丽, 史嵩, 崔涛, 等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 48–53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s10&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010.
- YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Suppl.): 48–53. (in Chinese)
- 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 43–47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120209&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009.
- LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43–47. (in Chinese)
- 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)
- 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 10–18.
- SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 10–18. (in Chinese)
- YAZGI A, DEGIRMENCIOLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 56: 128–135.
- 王金武, 唐汉, 周文琪, 等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 68–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010.
- WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68–76. (in Chinese)
- 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8–16.
- CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8–16. (in Chinese)
- 王金武, 唐汉, 关睿, 等. 动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 48–57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171206&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.006.
- WANG Jinwu, TANG Han, GUAN Rui, et al. Optimization design and experiment on clamping static and dynamic finger-spoon maize precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 48–57. (in Chinese)
- SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429–438.
- YAZGI A, DEGIRMENCIOLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347–356.
- 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.
- KARAYEL D, BARUT Z B, ÖZMERZİ A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 437–444.
- DING Y, LIAO Q, HUANG H. The seeding migration trajectory extraction and analysis of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(1): 477–482.
- YAZGI A. Effect of seed tubes on corn planter performance[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2016, 32(6): 783–790.
- KARAYEL D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 121–125.
- MANGUS D L, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Development of high-speed camera hardware and software package to evaluate real-time electric seed meter accuracy of a variable rate planter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 314–325.
- CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters part I: design and laboratory simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 71–79.

- 20 STAGGENBORG S A, TAYLOR R K, MADDUX L D. Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(5): 573–580.
- 21 HE X, CUI T, ZHANG D, et al. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 184–192.
- 22 CAY A, KOCABIYIK H, MAY S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters part II: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 11–17.
- 23 YANG L, HE X, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1–9.
- 24 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1–8.
- WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1–8. (in Chinese)
- 25 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
- 26 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. 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.
- 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. (in Chinese)
- 27 郑嘉鑫. 大豆精密播种机种沟构建技术及开沟装置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- ZHENG Jiaxin. Furrow construction technology and furrowing machine for soybean precision planters [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- 28 AYKAS E, YALÇIN H, YAZGI A. Balta tipi gömücü ayağa sahip tek dane ekim makinalarının farklı bölgelerde mısır ekiminde ekim performanslarının karşılaştırılması[J]. Journal of Agricultural Machinery Science, 2013, 9(1): 67–72.
- 29 YALÇIN H, YAZGI A, AYKAS E. Yerli yapım baltalı tip tek dane ekim makinalarının laboratuvar ve tarla koşullarında ayıaäği ekim performansının belirlenmesi[J]. Journal of Agricultural Machinery Science, 2013, 9(3): 231–238.
- 30 杨壮, 高琪珉, 张银平, 等. 基于液压马达集中驱动的玉米免耕播种机设计与试验[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 248–253.
- YANG Zhuang, GAO Qimin, ZHANG Yinping, et al. Design and experiment of a no-tillage corn planter centralized driven by hydraulic motor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 248–253. (in Chinese)
- 31 MASCHIO-GASPARDINO CHINA. Hydraulic transmission [EB/OL]. [2018–06–26]. http://www.maschio.com/catalog/product/maximetro/zh_cmn.
- 32 Precision Planting LLC. Ready row unit offers easy, affordable way to upgrade planters [EB/OL]. [2018–06–26]. http://www.precisionplanting.com/#ag_insights/.
- 33 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51–59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007.
- ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 51–59. (in Chinese)
- 34 HORSCH Maschinen GmbH. EINZELKORNDOSIERGERÄT [EB/OL]. [2018–06–26]. <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/einzelkornsaemaschinen/maestro/maestro-cc/>.
- 35 Precision Planting LLC. Multi-hybrid capabilities powered by vSet & vDrive [EB/OL]. [2018–06–26]. http://www.precisionplanting.com/#products/vset_select/.
- 36 Precision Planting LLC. Green on the curves [EB/OL]. [2018–06–26]. <http://www.precisionplanting.com/#products/vdrive/>.
- 37 LOWENBERG-DEBOER J. Economics of variable rate planting for corn[M]. ROBERT P C, RUST R H, LARSON W E. Madison: AMER SOC Agronomy, 1999: 1643–1651.
- 38 BULLOCK D G, BULLOCK D S, NAFZIGER E D, et al. Does variable rate seeding of corn pay? [J]. Agronomy Journal, 1998, 90(6): 830–836.
- 39 LICHT M A, LENSSEN A W, ELMORE R W. Corn (*Zea mays* L.) seeding rate optimization in Iowa, USA[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(4): 452–469.
- 40 庄卫东, 汪春, 王熙. Flexi-Coil 变量播种机使用设置的分析[J]. 农机化研究, 2006, 28(3): 56–57.
- ZHUANG Weidong, WANG Chun, WANG Xi. The Analysis and operating setup for Flexi-Coil's variable planter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(3): 56–57. (in Chinese)
- 41 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.
- 42 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)
- 43 魏宏安, 邵世禄. 垂直插入式小麦覆膜穴播机的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 34–37.
- WEI Hongan, SHAO Shilu. Study on wheat hill-drop planter used for perpendicularly inserting film mulching field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 34–37. (in Chinese)
- 44 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007.
- 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(Suppl. 1): 33–38. (in Chinese)
- 45 Deere & Company. ExactEmerge™ Row Unit [EB/OL]. [2018–06–26]. <https://www.deere.com/en/planting-equipment/row-units/exactemerge-row-unit/>.
- 46 Deere Company. Seedmeter assembly for a seeding machine: US20160128271 A1[P]. 2016–05–12.
- 47 Precision Planting LLC. SpeedTube [EB/OL]. [2018–06–26]. <http://www.precisionplanting.com/#products/speedtube/>.

- 48 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)
- 49 Lockwood Mfg. Air Cup S-Series Planters [EB/OL]. [2018-06-26]. <http://uat.lockwoodmfg.com/Lockwood-Potato-Equipment/Planters/AirCupSSeriesPlanters>.
- 50 Väderstad AB. Zone 3-Seed placement [EB/OL]. [2018-06-26]. <https://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/tempo-r-12-18/#zone-4777>.
- 51 KELLY P J, PALMER A L. A system for the measurement and analysis of the spatial distribution of seeds from seed meters[J]. Agricultural Engineering Australia, 1996, 25(1): 36-42.
- 52 Deere & Company. Sensors for trench delivery system on ExactEmergetm planters [EB/OL]. [2018-6-26]. <https://www.deere.com/en/planting-equipment/1775nt-16row30-planter/>.
- 53 AL-MALLAHI A A, KATAOKA T. Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 121: 412-419.
- 54 DING Y, WANG X, LIAO Q, et al. Design and experiment of performance testing system of multi-channel seed-metering device based on time intervals [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 11-18.
- 55 AL-MALLAHI A A, TAKASHI K. Monitoring the flow of seeds in grain drill using fiber sensor[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 311-314.
- 56 张继成,陈海涛,欧阳斌林,等. 基于光敏传感器的精密播种机监测装置[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013,53(2): 265-268,273.
ZHANG Jicheng, CHEN Haitao, OUYANG Binlin, et al. Monitoring system for precision seeders based on a photosensitive sensor [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(2): 265-268, 273. (in Chinese)
- 57 张锡志,李敏,孟臣. 精密播种智能监测仪的研制[J]. 农业工程学报, 2004,20(2): 136-139.
ZHANG Xizhi, LI Min, MENG Chen. Research and development of precision seeding intelligent monitor[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 136-139. (in Chinese)
- 58 李敏,孟臣,张锡志. 精密播种智能监视仪的研制[J]. 自动化与仪表, 2001,16(1): 3-6.
LI Min, MENG Chen, ZHANG Xizhi. Study on intelligent monitor for accurate sowing [J]. Automation & Instrumentation, 2001, 16(1): 3-6. (in Chinese)
- 59 LAN Y, KOCHER M F, SMITH J A. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(2): 119-127.
- 60 KOCHER M F, LAN Y, CHEN C, et al. Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(1): 237-245.
- 61 金衡模,高焕文. 玉米精播机漏播补偿系统设计[J]. 农业机械学报, 2002,33(5): 44-47.
KIM Hyungmo, GAO Huanwen. Design of a microcomputer-controlled loss sowing compensation system for a maize precision drill [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 44-47. (in Chinese)
- 62 XIA L, WANG X, GENG D, et al. Performance monitoring system for precision planter based on MSP430-CT171[Z]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 158-165, 345.
- 63 OKOPNIK D L, FALATE R. Usage of the DFRobot RB-DFR-49 infrared sensor to detect maize seed passage on a conveyor belt[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 102: 106-111.
- 64 史智兴,高焕文. 排种监测传感器的试验研究[J]. 农业机械学报, 2002,33(2): 41-43.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. RLD optoelectronic sensor for seeding monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(2): 41-43. (in Chinese)
- 65 史智兴,高焕文. 玉米精播机排种监测报警装置[J]. 中国农业大学学报, 2003,8(2): 18-20.
SHI Zhixing, GAO Huanwen. A seeding monitoring & alarming device for corn precision seeder [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(2): 18-20. (in Chinese)
- 66 宋鹏,张俊雄,李伟,等. 精密播种机工作性能实时监测系统[J]. 农业机械学报, 2011,42(2): 71-74.
SONG Peng, ZHANG Junxiong, LI Wei, et al. Real-time monitoring system for accuracy of precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 71-74. (in Chinese)
- 67 刘洪强,马旭,袁月明,等. 基于光电传感器的精密排种器性能检测[J]. 吉林农业大学学报, 2007,29(3): 347-349.
LIU Hongqiang, MA Xu, YUAN Yueming, et al. Performance detection of precision seed-metering device based on optoelectronic sensor [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2007, 29(3): 347-349. (in Chinese)
- 68 郝向泽,何旭鹏,邹翌,等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统的研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 120-124.
HAO Xiangze, HE Xupeng, ZOU Yi, et al. Research on the sowing performance monitoring system for precision seeders based on photoelectric sensor [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(1): 120-124. (in Chinese)
- 69 KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 165-172.
- 70 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报, 2012,28(13): 16-21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16-21. (in Chinese)
- 71 廖庆喜,邓在京,黄海东. 高速摄影在精密排种器性能检测中的应用[J]. 华中农业大学学报, 2004,23(5): 570-573.
LIAO Qingxi, DENG Zaijing, HUANG Haidong. Application of the high speed photography checking the precision metering performances [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(5): 570-573. (in Chinese)
- 72 李伟,林家春,谭豫之,等. 基于图像处理技术的种子粒距检测方法研究[J]. 农业工程学报, 2002,18(6): 165-168.
LI Wei, LIN Jiachun, TAN Yuzhi, et al. Measuring method of seed spacing on test rig based on image processing techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 165-168. (in Chinese)

- 73 马旭,王剑平,胡少兴,等. 用图像处理技术检测精密排种器性能[J]. 农业机械学报, 2001,32(4): 34-37.
MA Xu,WANG Jianping, HU Shaoxing, et al. Detection of a precision seedmeter performance using image processing technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001,32(4): 34-37. (in Chinese)
- 74 KARAYEL D, WIESEHOFF M, ÖZMERZI A, et al. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.
- 75 AKDEMIR B, KAYISOGLU B, BENET B. Development of an image analysis system for sowing machine laboratory tests [J]. AMA—Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America, 2014, 45(3): 49-55.
- 76 陈进,边疆,李耀明,等. 基于高速摄像系统的精密排种器性能检测试验[J]. 农业工程学报, 2009,25(9): 90-95.
CHEN Jin, BIAN Jiang, LI Yaoming, et al. Performance detection experiment of precision seed metering device based on high-speed camera system[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 90-95. (in Chinese)
- 77 NAVID H, EBRAHIMIAN S, GASSEMZADEH H R, et al. Laboratory evaluation of seed metering device using image processing method[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2011, 2(1): 1-4.
- 78 于建群,钱立彬,于文静,等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009,40(6): 53-57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-57. (in Chinese)
- 79 BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 3-22.
- 80 VOORHEES M L, WALKER P N. Tractionability as a function of soil-moisture [J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(5): 806-809.
- 81 COLLINS B A, FOWLER D B. Effect of soil characteristics, seeding depth, operating speed, and opener design on draft force during direct seeding[J]. Soil and Tillage Research, 1996, 39(3): 199-211.
- 82 VAMERALI T, BERTOCCO M, SARTORI L. Effects of a new wide-sweep opener for no-till planter on seed zone properties and root establishment in maize (*Zea mays* L.): a comparison with double-disk opener[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(2): 196-209.
- 83 DARMORA D P, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertiliser drills[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(2): 127-139.
- 84 TESSIER S, SAXTON K E, PAPENDICK R I, et al. Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence [J]. Soil and Tillage Research, 1991, 21(3-4): 347-360.
- 85 马云海,马圣胜,贾洪雷,等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014,30(5): 36-41.
MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Measurement and analysis on reducing adhesion and resistance of bionic ripple opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 36-41. (in Chinese)
- 86 顾耀权,贾洪雷,郭慧,等. 滑刀式开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(2): 38-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130208&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008.
- GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38-42. (in Chinese)
- 87 王庆杰,何进,姚宗路,等. 驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008,39(6): 68-72.
WANG Qingjie, HE Jin, YAO Zonglu, et al. Design and experiment on powered disc no-tillage planter for ridge-tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 68-72. (in Chinese)
- 88 BUFTON L P, RICHARDSON P, ODOGHERTY M J. Seed displacement after impact on a soil surface [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(4): 327-338.
- 89 马旭,于海业,杨海宽. 种子落于沟沟后弹跳滚动位移的测定及建模[J]. 农业机械学报, 1998,29(增刊): 62-66.
MA Xu, YU Haiye, YANG Haikuan. The determining and model establishing of seed bouncing and rolling displacement after impact on a furrow [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Suppl.): 62-66. (in Chinese)
- 90 袁锐. 精密播种机开沟器对种子触土后位移的控制及部件的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
YUAN Rui. Research of its displacement after seeds touching soil controlled by the furrow opener of precision planter and its parts [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 91 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 大豆播种机双V型筑沟器设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017,47(1): 323-331.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of a double-V-shaped furrow opener of soybean seeder [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 323-331. (in Chinese)
- 92 苏文泉,郑百义,王宜利,等. 试论黑土耕层土壤容重的自身调节作用[J]. 作物杂志, 1993(4): 20-22.
- 93 IQBAL M, MARLEY S J, ERBACH D C, et al. An evaluation of seed furrow smearing[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1243-1248.
- 94 VOORHEES W B, EVANS S D, WARNES D D. Effect of preplant wheel traffic on soil compaction, water-use, and growth of spring wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(1): 215-220.
- 95 BLANCO H, LAL R. Principles of soil conservation and management[M]. London: Springer, 2008.
- 96 GEMTOS T A, LELLIS T. Effects of soil compaction, water and organic matter contents on emergence and initial plant growth of cotton and sugar beet[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(2): 121-134.
- 97 MOSADDEGHI M R, HAJABBASI M A, HEMMAT A, et al. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 55(1): 87-97.
- 98 MASCHIO-GASPARDINO CHINA. Seeding Tube [EB/OL]. [2018-06-26]. http://www.maschio.com/catalog/product/maximetro/zh_cmnn.
- 99 Precision Planting LLC. Plant 2x Faster [EB/OL]. [2018-06-26]. <http://www.precisionplanting.com/#products/speedtube/>.
- 100 HORSCH Maschinen GmbH. Maestro CC [EB/OL]. [2018-06-26]. <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/einzelkornsaemaschinen/maestro/maestro-cc/>.
- 101 HÖKANSSON I, ARVIDSSON J, KELLER T, et al. Effects of seedbed properties on crop emergence: 1. temporal effects of temperature and sowing depth in seedbeds with favourable properties[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Plant Soil

- Science, 2011, 61(5): 458–468.
- 102 KIRKEGAARD NIELSEN S, MUNKHOLM L J, LAMANDÇ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174–180.
- 103 KARAYEL D, OZMERZI A. Effect of tillage methods on sowing uniformly of maize[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2002, 44: 2–23.
- 104 GARRIDO M, LA C, BAGUENA E, et al. Evaluating the need for an active depth-control system for direct seeding in Portugal [C]//Proceedings of the 8th European Conference on Precision Agriculture, 2011: 371–381.
- 105 CHAUDHURI D. Performance evaluation of various types of furrow opener on seed drills—a review [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(2): 125–137.
- 106 KARAYEL D, OZMERZI A. Evaluation of three depth-control components on seed placement accuracy and emergence for a precision planter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2008, 24(3): 271–276.
- 107 ÖZMERZI A, KARAYEL D, TOPAKCI M. Effect of sowing depth on precision seeder uniformity [J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 227–230.
- 108 LEE J, YAMAZAKI M, OIDA A, et al. Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor design and response experiments of control system[J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(4): 229–238.
- 109 MOUAZEN A M, ANTHONIS J, SAEYS W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 1: sensor design for measurement of frame height variation from soil surface [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 139–150.
- 110 SAEYS W, MOUAZEN A M, ANTHONIS J, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 2: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 267–280.
- 111 VAN DER LINDEN S, MOUAZEN A M, ANTHONIS J, et al. Infrared laser sensor for depth measurement to improve depth control in intra-row mechanical weeding[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(3): 309–320.
- 112 NIELSEN S K, NÖRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690–698.
- 113 NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÇ M, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 207–214.
- 114 NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÇ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174–180.
- 115 SHARIPOV G M, PARAFOROS D S, PULATOV A S, et al. Dynamic performance of a no-till seeding assembly [J]. Biosystems Engineering, 2017, 158: 64–75.
- 116 SHARIPOV G M, PARAFOROS D S, GRIEPENTROG H W. Modelling and simulation of the dynamic performance of a no-till seeding assembly with a semi-active damper[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 139: 187–197.
- 117 蔡国华,李慧,李洪文,等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 11–16.
- CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 11–16. (in Chinese)
- 118 WEN L, FAN X, LIU Z, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system[J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 53–58.
- 119 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 35–41.
- ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35–41. (in Chinese)
- 120 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 1–8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001.
- HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1–8. (in Chinese)
- 121 李玉环,孟鹏祥,耿端阳,等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 62–68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s010&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.010.
- LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 62–68. (in Chinese)
- 122 JIA H, GUO M, YU H, et al. An adaptable tillage depth monitoring system for tillage machine[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 187–199.
- 123 SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30–35.
- 124 WEATHERLY E T, BOWERS C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing [J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(2): 295–305.
- 125 HORSCH Maschinen GmbH. Kontrollieren die Sätiefe [EB/OL]. [2018–06–26]. <https://www.horsch.com/produkte/saemaschinen/einzelkornsmaemaschinen/maestro/maestro-sw/>.
- 126 Kinze Manufacturing. Pneumatic down pressure [EB/OL]. [2018–06–26]. <https://www.kinze.com/owners/retrofit-kits>.
- 127 Precision Planting LLC. AirForce [EB/OL]. [2018–06–26]. <http://www.precisionplanting.com/#products/airforce/>.