棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验

张学军[1,2]，张海涛[1]，史增录[1※]，靳 伟[1]，陈 勇[1]，于永良[3]
（1. 新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；2. 新疆农业工程装备创新设计实验室重点实验室，乌鲁木齐 830052；
3. 新疆天诚农机具制造有限责任公司，铁门关 841007）

摘 要：针对棉花精量穴播作业过程中取种、排种不畅造成空穴的问题，该研究开发了一种棉花精量穴播器取种状态监测系统。以齿盘式穴播器为对象，在分析其工作过程的基础上，确定监测点位置。采用激光对射型传感器和霍尔传感器作为信息监测元件，用 STM32 单片机实现合格穴数和空穴率的计算，通过 nRF24L01 无线通信模块实现人机交互终端数据交互，并进行室内和田间试验。台架试验表明，在穴播器工作转速 30～45 r/min 范围内，系统转动圈数监测精度不变，为 100%，合格穴数监测精度达到 97%以上，空穴数监测精度达到 93%以上，监测系统的准确性满足使用要求。田间试验结果表明，光照对监测系统无影响，合格穴数监测精度最低为 96.17%，空穴数监测精度最低为 93.11%，与台架试验相比，系统精度下降不超过 1 个百分点。系统监测与人工实测的合格穴数、空穴数的 F 值<$F_{0.05}$(6.39)，$P_{0.05}$ 值>0.05，系统监测值与人工实测值差异不显著。该研究提出的齿盘取种性能的监测方法有效可行，开发的取种状态监测系统在田间作业时具有良好的准确性和稳定性，满足棉花精量穴播器取种状态监测的要求，对促进棉花精量穴播作业自动化、智能化具有重要意义。

关键词：传感器；棉花；精量穴播器；空穴数检测；监测系统
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.05.002
中图分类号：S223.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-6819(2022)-05-0009-11

张学军，张海涛，史增录，等. 棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(5)：9-19.
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.05.002 http://www.tcsae.org
Zhang Xuejun, Zhang Haitao, Shi Zenglu, et al. Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(5): 9-19. (in Chinese with English abstract) doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2022.05.002 http://www.tcsae.org

0 引 言

据统计，2021 年新疆棉花种植面积 250.6 万 hm^2，占全国棉花种植面积的 82.76%，其中新疆棉花产量 512.9 万 t，占全国棉花产量的 89.50%，新疆已成为名副其实的全国第一大产棉区，在棉花产业中占有举足轻重的地位。目前，新疆棉花种植采用地膜覆盖精量穴播技术，要求每穴 1 粒棉种且粒距均匀一致，不仅节约棉种用量，也极大的降低了播种成本，因此，棉花精量播种技术对棉花生产提质增效具有重要意义[1-4]。

穴播器是精量播种机中的核心部件，具有结构简单、操作方便等特点，广泛用于农作物穴播生产中。目前，新疆地区普遍使用的棉花精量穴播器类型有齿盘式、夹持式和窝眼式三种[5]，由于齿盘式穴播器结构简单，作业质量较稳定，而被广泛使用。穴播器随地面滚动进行穴播作业时，穴播器自身转动及前进时易振动，加之工作的环境恶劣，易出现取种、排种不畅造成空穴现象；再者穴播器内部完全封闭，不易及时发现空穴现象，则会导致棉花播种时大面积空穴，而造成棉花减产，影响棉农经济收入。因此，开展棉花精量穴播器监测系统的研究，实时监测穴播器内取种情况，以便于驾驶员及时检查、调整。

在 20 世纪 40 年代，国外一些发达国家将电气控制技术应用于播种机械[6-8]。美国、意大利、菲律宾等国家针对不同作物种子研制出基于光电法、图像识别法、压电法、电容法等[9-12]不同形式的监测系统对排种过程进行实时监测。美国 John Deere 公司[13]在播种机上安装光电传感器作为检测元件，配合信号采集电路，实现对种子的漏播实时监测，通过图形处理技术将漏播数据进行分析，方便驾驶员了解播种情况。美国 Precision Planting 公司[14]研制出一套 WaveVision 监测器，该监视器通过高频无线电波测量种子质量，解决了无法监测到种子并排下落以及尘土被认为是种子等难题，并且可以实现播种机工况的监控。意大利 MC Electronic 公司[15]研制的 ESD 播种监测系统可实现小麦、玉米种子监测的同时还能对土壤中有机物含量进行监测。Borja 等[16]设计了气动式玉米播种机，在该机上装备有机器视觉技术和机电一体化技术融合的控制系统，能准确的检测到漏播种子。

国内播种机械繁多，但带有监测系统的播种机型较少。目前国内的研究者对播种机排种监测系统的研究仍在不断深入。丁幼春等[17-19]在油菜排种器基础上，安装种子流传感检测模块对各行播量、排种频率和漏播量进行监测，田间试验得出，播量监测精度不低于 96.5%。杨硕等[20-21]利用落种监测传感器探测落种时间间隔进行玉

收稿日期：2021-11-22 修订日期：2022-01-02
基金项目：自治区区域协同创新专项（科技援疆计划）项目（2021E02055）
作者简介：张学军，博士，教授，研究方向为农业机械化装备。
Email：tuec@163.com
※通信作者：史增录，高级实验师，研究方向为农业工程技术与装备。
Email：shizlfd@qq.com

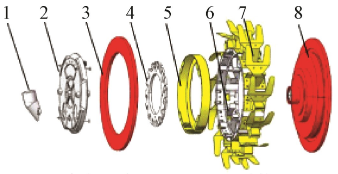
米粒距监测与漏播预警，提高了粒距均匀性。贾洪雷等[22]采用光电传感器与编码器结合的方式设计了排种器吸种状态检测系统，获取排种器工作状况。黄东岩等[23-24]利用 PVDF（聚偏二氟乙烯）压电薄膜传感器对指夹式排种器排种信息进行监测，并将排种信息通过 GPRS DTU 模块上传到远程服务器。田间试验得出，漏播量监测精度在 89%以上，排种量监测精度在 90.4%以上。

实际作业中，由于田间环境恶劣和设备成本较高的原因，图像法、压电法受到了一定限制。目前，多数播种监测系统研究载体为条播机，对于穴播机适配性较低。因此，本文结合新疆地区广泛使用的齿盘式精量穴播器为研究载体，设计了一种基于激光对射型传感器和霍尔传感器的取种状态监测系统，获取齿盘式穴播器的取种信息，运用 nRF24L01 无线通信模块与人机交互终端进行数据传输，以促进棉花精量穴播作业自动化、智能化发展。

1 监测系统总体方案

1.1 齿盘式穴播器结构与工作原理

齿盘式精量穴播器结构如图 1 所示，主要由种管、定盘、取种齿盘、隔种圈、压盘、分种盒、鸭嘴及腰带总成、动盘等组成。隔种圈通过蝶形螺栓紧固于定盘上，取种齿盘与动盘采用螺钉连接。



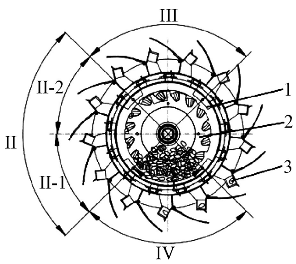
1.种管 2.定盘 3.压盘 4.取种齿盘 5.隔种圈 6.分种腔 7.鸭嘴及腰带总成 8.动盘

1.Seed tube 2.Order plate 3.Pressure plate 4.Seed picking disc 5.Spacer ring 6.Seed distribution box 7.Duckbill and belt assembly 8. Moving plate

图 1 齿盘式穴播器整体结构

Fig.1 Overall structure of toothed disk type dibbler

齿盘式穴播器工作过程可分为充种、携种、转运、投种 4 个阶段，如图 2 所示。充种过程和携种过程在取种齿盘和隔种圈组成的取种间完成；转运过程和投种过程是在隔种圈与分种腔组成的投种空间完成。



1.隔种圈 2.取种齿盘 3.棉种 Ⅰ.充种区 Ⅱ.携种区 Ⅱ-1.携种区下部 Ⅱ-2.携种区上部 Ⅲ.种子转运区 Ⅳ.投种区

1.Spacer ring 2.Seed picking disc 3.Cotton seed Ⅰ.Seed filling region Ⅱ.Seed carrying region Ⅱ-1.Downstream area of the seed carrying region Ⅱ-2.Upstream area of the seed carrying region Ⅲ.Seed transfer region Ⅳ. Seed discharging region

图 2 齿盘式穴播器工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the working principle of the toothed disk type dibbler

棉种从种管进入穴播器内部，堆积在隔种圈底部形成种子群。工作时，穴播器在地面滚动，取种齿盘沿隔种圈内侧挡板顺时针转动进入充种区，与棉种产生相对运动，棉种在重力、种子间相互作用力下，沿导种槽充入取种齿盘边缘囊状型孔完成充种；取种齿盘继续沿隔种圈内侧护种挡板经过携种区，在清种刷与重力作用下型孔周围多余棉种掉落至充种区，型孔内棉种在隔种圈内侧护种挡板上部缺口处因失去挡板的支持作用从而掉落至分种腔内，完成种子转运；分种腔内棉种随穴播器转动沿分种腔壁滑落至鸭嘴，待转动至地面，鸭嘴与地面接触并打开完成投种。

1.2 监测系统结构与工作原理

精量穴播器取种状态监测系统结构如图 3 所示，主要由激光对射型传感器和霍尔传感器组成的信号采集模块、信号处理模块、STM32 单片机、无线通信模块、声光报警模块和人机交互终端六大部分组成。

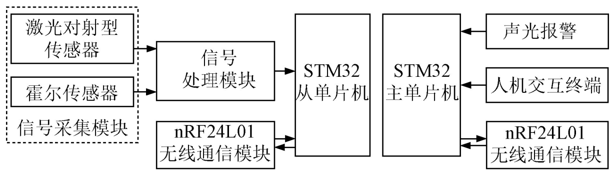


图 3 监测系统结构示意图

Fig.3 Monitoring system structure schematic

取种齿盘型孔内棉种经过隔种圈上安装的激光对射型传感器，引起光强度变化，输出电信号，信号经放大整形电路处理，形成脉冲序列信号；利用霍尔传感器监测穴播器转动圈数，输出高电平信号；采集的信号送入 STM32F103C8T6 从单片机，经分析、处理后得到穴播器转动圈数、空穴率和合格穴数等参数，通过 nRF24L01 无线通信模快将取种信息传输至终端显示屏，当空穴率超过设定阈值时，系统发出声光报警，提醒驾驶员下车检查。

1.2.1 转动圈数监测

当装有磁铁的分种盒转动经过霍尔传感器时，传感器输出脉冲信号，单片机捕获高电平信号来获取转动圈数信息，从而获得理论合格穴数。

1.2.2 空穴数、合格穴数监测

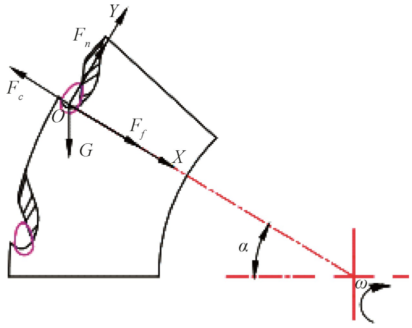
携带棉种的取种齿盘经过激光对射型传感器时，棉种遮挡住激光发射管与接收管组成的光线通路，输出低电平信号，通过单片机外部中断捕获低电平信号，计数器记合格穴数加一，获得合格穴数；没携带棉种的取种齿盘经过时，激光对射型传感器接收管导通，输出高电平信号，单片机外部中断捕获高电平信号，计数器记空穴数加一，获得空穴数。

1.3 取种监测点选取

为了保证激光对射型传感器能较好的监测取种信息，取种监测点的选取在整个监测系统方案设计中尤为重要。前期利用高速摄像机观察穴播器整个工作过程中取种齿盘型孔内棉种的运动情况，判断 4 个阶段中是否具备监测的条件（型孔周围不存在其他多余棉种，只有型孔内有棉种并且不受其他因素干扰。），为后续对该

区域中型孔内的棉种的受力分析奠定基础。

根据前期通过高速摄像机对充种与携种阶段的研究可知：携种区Ⅱ-1 靠近充种区，取种齿盘型孔被种群覆盖，不易观察型孔内棉种具体情况；携种区Ⅱ-2 远离充种区，能较好的观察到型孔内棉种情况。对携种区Ⅱ-2 中型孔内棉种的受力情况进行分析，将棉种视为材质均匀刚体，以棉种质心为坐标原点 O，沿质心与取种齿盘中心连线方向为坐标 X 轴，沿取种齿盘的切线方向为 Y 轴，辅助坐标系如图 4 所示。



注：F_c 为离心力，N；F_n 为型孔壁对棉种的支持力，N；F_f 为棉种与型孔壁之间的摩擦力，N；G 为棉种重力，N；ω 为穴播器的角速度，rad·s^{-1}；α 为取种齿盘转动角度，(°)。

Note: F_c is the centrifugal force, N; F_n is the support force of the type hole wall on the seed, N; F_f is the friction force between the seed and the type hole wall, N; ω is the angular velocity of the dibbler, rad·s^{-1}; α is the angle of rotation of the seeding disc, (°).

图 4　携种区Ⅱ-2 中型孔内棉种受力分析

Fig.4　Analysis of the force on cotton seeds in the medium size hole of seed carrying area II-2

根据图 4，列动平衡方程如下：

$$\begin{cases} F_c = mr\omega^2 \\ F_f = \mu F_n \\ mg\sin\alpha + F_f - F_c = 0 \\ mg\cos\alpha = F_n \end{cases} \tag{1}$$

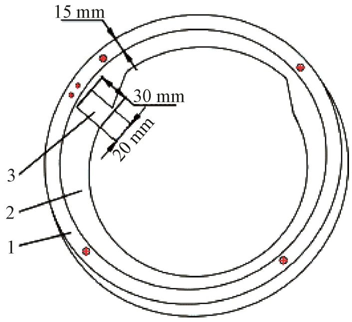
式中μ为棉种与型孔壁之间的摩擦系数；m 为棉种的质量，g；r 为棉种质心到取种齿盘中心的距离，mm；$G=mg$，g 为重力加速度 m/s^2。

整理式（1）得棉种在型孔内不滑动的条件为

$$\omega \leqslant \sqrt{\frac{g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}{r}} \tag{2}$$

查阅相关文献[27]，将 r=100 mm，ω=3.14～4.71 rad/s，α=0°～45°带入式（2）中，计算结果满足棉种在型孔内不滑动的条件，说明在携种区Ⅱ-2 中棉种已完全充入型孔，不存在滑动情况。因此，监测点位置应选择在携种区Ⅱ-2 对应的隔种圈上监测准确性会较高。

为使隔种圈具有辅助监测的作用，结合监测点位置，对隔种圈结构进行改进。为此，本文将监测点位置所对应的隔种圈内侧护种挡板上大小为30 mm×20 mm的长方形区域裁去，用于安装传感器接收模组；将原始隔种圈外侧四处挡板结构改为环形挡板结构。环形挡板宽度为15 mm，与原始隔种圈四处挡板宽度一致，方便内侧护种挡板所对应的外侧环形挡板有足够的宽度安装传感器发射模组，同时不影响与定盘连接。改进后的隔种圈结构如图 5 所示。



1.外侧环形挡板　2.内侧护种挡板　3.传感器接收区
1. Outer ring baffle　2. Inner seed guard baffle　3. Sensor receiving area

图 5　隔种圈结构示意图

Fig.5　Schematic diagram of the structure of spacer ring

2　监测系统硬件设计

2.1　主芯片

该监测系统采用基于 ARM Cortex-M 内核的 STM32F103C8T6 单片机。STM32F103C8T6 单片机具有 128K 的嵌入式 FLASH、20K 的 SRAM 和 32 字节存储器以及 4 个通用 16 位定时器/计数器、2 个 PWM 定时器，其工作频率达 72MHz。在通讯接口方面，有 2 个 SPI、1 个 CAN、3 个 USART 和 2 个 IIC。

2.2　取种信息监测传感器

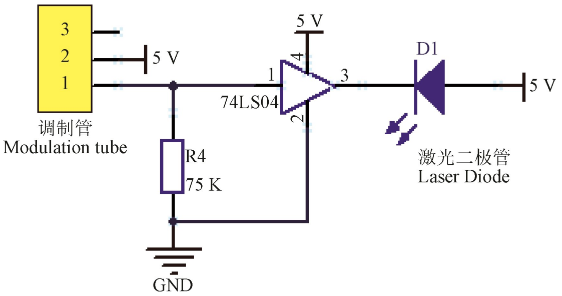
目前排种信息监测所采用的传感器大多数为光电传感器，其中发射端采用红外发光二极管，接收端采用光敏三极管，其受灰尘和光照影响较大。因此，需要选用一种抗干扰性强的传感器。根据穴播器工作过程和抗干扰性，选用激光对射型传感器和霍尔传感器监测取种齿盘型孔内棉种信息。

2.2.1　激光对射型传感器

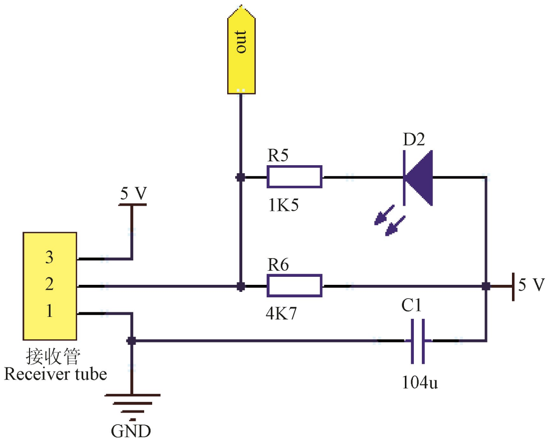
激光对射型传感器由发射模组、接收模组和调制管等组成[25]。发射模组选用 5mW N 型激光二极管，接收模组选用光敏二极管。为了防止可见光对反射激光的干扰，加入调制管对发射激光频率进行调制，调制与接收模块接收频率相同。常见的激光传感器的驱动电路有三极管驱动和反相器驱动两种，区别在于前者驱动 1～2 个发射管，后者可以驱动多个发射管，驱动能力强、激光亮度高。本设计选取 74LS04 型反相器驱动。激光传感器发射和接收部分电路如图 6 所示。

激光对射型传感器监测模型如图 7a 所示，取种齿盘材料为透明的亚克力，透光性可达 92%以上，激光能较好地穿透取种齿盘。在接收模组上安装透镜，取种齿盘转动将透镜上的灰尘擦去，防止灰尘对接收模块的干扰，增强了激光接收能力。

将激光对射型传感器发射模组通过螺栓固定于隔种圈外侧环形挡圈，接收模组则以镶嵌的方式嵌入隔种圈内侧挡板并用螺钉紧固，实现与改进的隔种圈组合。激光发射模组、接收模组和型孔在一条水平线上，发射模组与接收模组距离为50 mm，激光发出的光斑正好对应型孔大小，可以保证型孔内棉种顺利通过监测区域的同时阻断激光光束。激光对射型传感器安装实物如图 7b 所示。

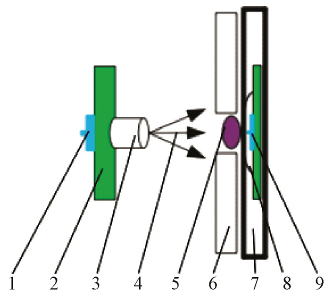


a. 激光对射型传感器发射管电路
a. Laser-to-sensor transmitter tube circuit



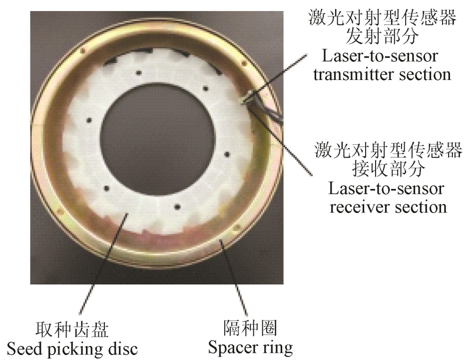
b. 激光对射型传感器接收管电路
b. Laser-to-sensor receiver tube circuit

图 6 激光对射型传感器电路
Fig.6 Laser-to-sensor circuit



1.调制管 2.发射电路板 3.激光头 4.激光光束 5.棉种 6.取种齿盘 7.隔种圈 8.透镜 9.接收管
1.Modulation tube 2.Transmitting circuit board 3.Laser head 4.Laser beam 5.Cotton seed 6.Seed picking disc 7.Spacer ring 8.Lens 9.Receiver tube

a. 激光对射型传感器监测模型
a. Laser-to-sensor monitoring model



b. 激光对射型传感器安装实物图
b. Laser-to-sensor installation physical diagram

图 7 激光对射型传感器
Fig.7 Laser-to-sensor

2.2.2 霍尔传感器

为了获得穴播器转动圈数，得出理论合格穴数，选用 A44E 开关型霍尔传感器。该霍尔传感器由霍尔电压发生器、稳压器、差分放大器、斯密特触发器和输出级组成。当安装有磁铁的分种盒经过霍尔传感器时，传感器输出脉冲电压，经 UA741 运算放大器放大后，驱动 2N3904 半导体三极管工作，单片机 I/O PB13 读取电压值。开关型霍尔传感器电路如图 8 所示。

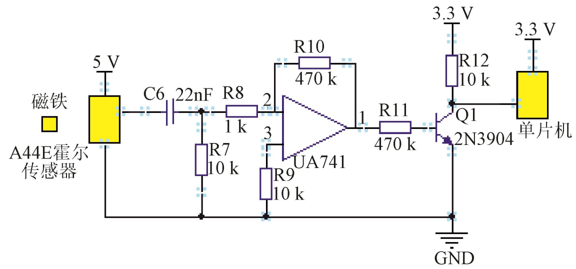
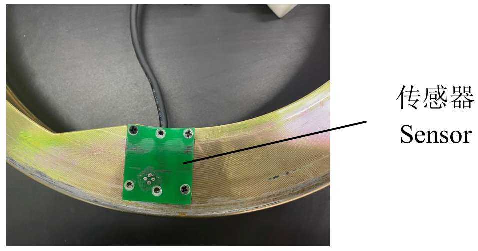
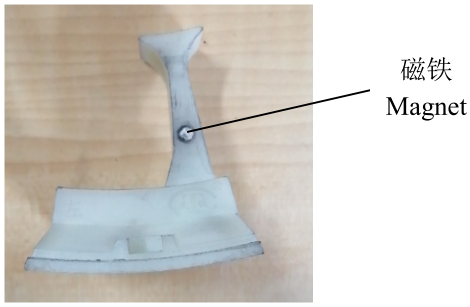


图 8 开关型霍尔传感器及电路
Fig.8 Switching Hall sensor and circuit

穴播器在作业时，由分种盒组成的分种腔与动盘一起转动。为了准确采集穴播器转动圈数信息，将霍尔传感器安装在不随动盘转动的隔种圈上，具体位置在激光对射型传感器接收模组背面，紧贴分种盒；直径为 3 mm 的圆形磁铁镶嵌在与霍尔传感器直线相对的分种盒内。安装位置如图 9 所示。



a. 霍尔传感器安装位置
a. Hall sensor mounting position



b. 磁铁安装位置
b. Magnet mounting position

图 9 霍尔传感器与磁铁安装位置
Fig.9 Design of Hall sensor and magnet mounting positions

2.3 光电信号处理电路

由于传感器输出电信号较为微弱，为了准确监测取种状态信息，光电信号必须经过放大、整形处理。光信号处理电路如图 10 所示。由 AD8045 运算放大器等组成的主放大电路，其中 AD8045 运算放大器自身增益带宽积为 1 GHz，在该处理电路中增益为 10 倍的放大倍数，标

准带宽为 40 MHz，该部分电路对激光对射型传感器产生的微小信号进行低噪声、高精度放大，以便获得稳定的脉冲信号；通过 AD8611 比较器等组成的信号比较电路形成方波信号，比较器的参考电压为 0.8 V，输入端电压略低于参考电压；经 NE555P 单稳态触发器组成的脉宽调整电路将比较电路处理后的信号调制为系统所需要的规整方波信号，最后由单片机 I/O PB15 串口捕获，定时器 1 μs 计数一次上升沿脉冲。

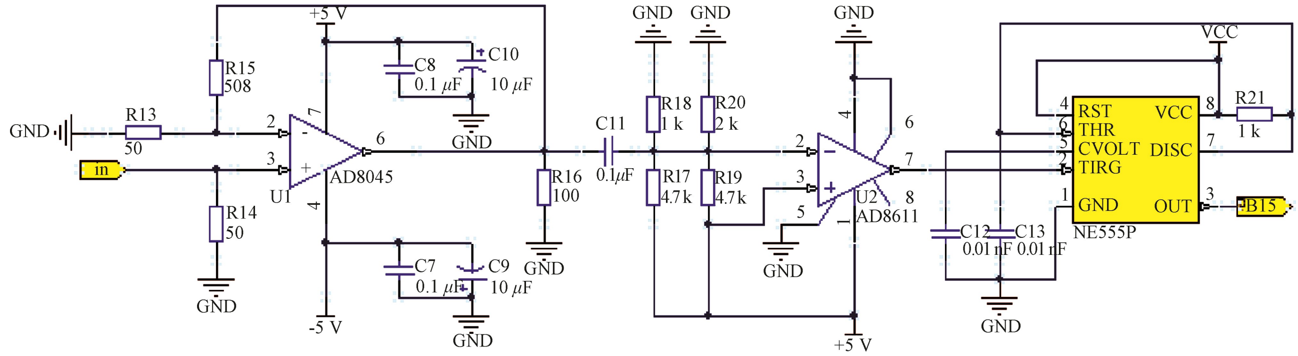


图 10　光电信号处理电路

Fig.10　Optical signal processing circuit

2.4　无线通信接口电路

选用两个 nRF24L01 无线通信模块完成从单片机与人机交互终端主单片机之间的数据传输。nRF24L01 是由 NORDIC 公司生产的工作在 2.4～2.5 GHz 的 ISM 频段的单片无线收发器芯片，其接口引脚有 CSN（片选线）、SCK（时钟线）、MISO（控制数据线）、MOSI（控制数据线）、IRQ（中断信号）和 CE（模式控制线），功能分别是：

CSN：nRF24L01 无线模块的片选信号线，当 CSN 为低电平，进入工作模式。

SCK：nRF24L01 无线模块通过 SPI（串行接口）时钟与 STM32 单片机通信。

MISO：从 SPI 数据输出，主 SPI 数据输入。

MOSI：从 SPI 数据输入，主 SPI 数据输出。

IRQ：nRF24L01 通过该中断信号线，在发生状态变化时，通知单片机。

CE：当 CSN 为低电平时，CE 和寄存器一起选择 nRF24L01 无线模块模式。

将 nRF24L01 无线模块标识的 CSN、SCK、MISO、MOSI、IRQ、CE 的 6 个信号线与 STM32F103C8T6 单片机的 PA1、PA2 和 PA4～PA7 引脚连接。

2.5　人机交互终端

选用北京迪文科技有限公司生产的型号为 DMT80480L070-15WT 电阻式触摸屏完成相关参数的设定及信息的显示。人机交互终端如图 11 所示，适用于 6 行和 12 行棉花精量播种机，界面主要显示每行空穴率、空穴数、转动圈数、通讯状态和合格穴数等参数以及开始、结束、消音和设置触摸按键。空穴率、空穴数、转动圈数和合格穴数通过数值的形式显示，通讯状态则用绿灯和红灯显示，绿灯为正常，红灯为故障。若某行空穴率高于设定阈值时，该行空穴率数值闪烁并发出声光报警。

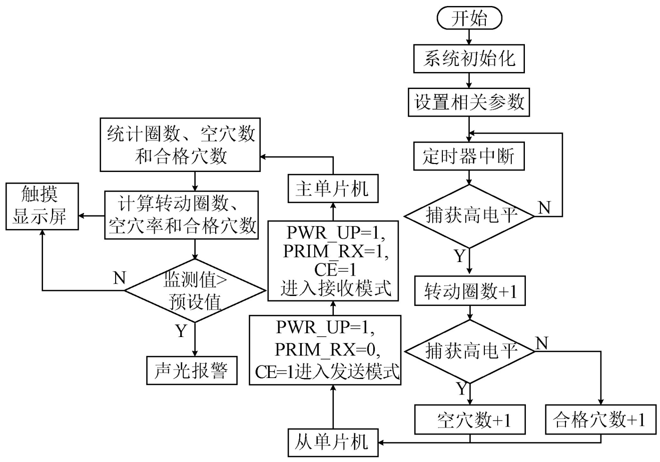
将触摸屏短接跳线短接后，通信电平变成 3.3 V 双极晶体管通信电平（TTL 电平）/场效应管通信电平（CMOS 电平），与主单片机通过全双工通用同步/异步串口（USART）进行数据传输。工作时只需将主单片中的发送数据（TX）引脚和接收数据（RX）引脚与触摸屏相关引脚连接即可。

图 11　人机交互终端

Fig.11　Human-computer interaction terminal

3　监测系统软件设计

监测系统软件程序设计包括：主程序设计、信号采集子程序设计、信号处理子程序设计、无线通信子程序设计和人机交互子程序设计。单片机程序采用 C 语言编程。系统软件流程如图 12 所示。



注：PWR_UP、PRIM_RX 分别为 nRF24L01 芯片中寄存器（0x00）的第 1 位和第 0 位；CE 为模块控制线。

Note: PWR_UP, PRIM_RX are bits 1 and 0 of the register (0x00) in the nRF24L01 chip, respectively;CE is the module control line.

图 12　监测系统软件流程图

Fig.12　Monitoring system software flow chart

主程序将系统内各模块进行初始化，与各模块子程序之间相互协调，根据各模块实现的功能调用子程序；信号采集处理子程序通过单片机接收外部中断信号，对转动圈数、空穴数和合格穴数进行计数，并计算空穴率，当空穴率超过设定阈值，系统自动启动声光报警装置。无线通信子程序是将从单片机处理后的信息数据传输至主单片机并在触摸显示屏显示。人机交互子程序设计了触摸显示屏界面的交互逻辑，用于信息的显示与人机交互。

启动监测系统后，单片机串口和时钟、nRF24L01 无线传输模块引脚、触摸显示模块引脚等进行初始化操作。

信号采集是通过对 I/O 口进行定义与初始化，单片机并行处理外部中断信号接收。设置 TIM1、TIM2 和 TIM3 为计数模式，TIM4 为定时器模式。TIM1 用于对霍尔传感器输出高电平信号计数；TIM2 用于对激光对射型传感器输出脉冲序列变化的上升沿计数；TIM3 用于对激光对射型传感器输出脉冲序列变化的下降沿计数。中断函数执行时间小于信号采集电路输出信号的时间，满足多行监测需求。

数据处理通过独立线程方式，定时读取每行圈数、空穴数和合格穴数，参照国家农业行业标准 NY/T 987-2006《铺膜穴播机作业质量》[26]，通过转动圈数计数得到理论合格穴数，结合空穴数从而获得空穴率，空穴率计算公式为

$$\text{理论合格穴数}=\text{转动圈数}\times\text{穴播器穴数} \tag{3}$$

$$\text{空穴率}=\frac{\text{监测空穴数}}{\text{理论合格穴数}}\times 100\% \tag{4}$$

由式（4）计算得出的空穴率与预设空穴率数值进行对比，判断空穴的程度，若监测值＞阈值，进行报警，反之不报警。

无线通信子程序首先进行初始化，置 CSN 为低，数据被不断的写入 Tx_FIFO 缓存区。通过设置 CE、PWR_UP 和 PRIM_RX 参数完成发送模式或接收模式切换。接收到发送数据指令时，PWR_UP=1，PRIM_RX=0，CE=1 并保持 10 μs 以上，即将 nRF24L01 无线模块设置为发送模式，填充当前数据缓存区，等待下次发送；上位机中的 nRF24L01 无线模块接受到接收数据指令时，PWR_UP=1，PRIM_RX=1，CE=1，即将 nRF24L01 无线模块设置为接收模式，等待接收数据。

人机交互界面基于 DGUS 开发软件进行设计，DGUS 软件处理流程如图 13 所示。DWIN 屏配置第一步，使用 Excel 软件记录、整理好变量分配记录；第二步，利用 PS 软件（或其他绘图软件）进行界面设计及界面相关元素设计。在设计过程中，选择调色板系统为 65k 色。第三步，在指定区域依次配置数据录入、RTC 设置、基本触控、按键值返回、参数配置等触控按钮和变量图标、数据变量、文本显示、RTC 显示等变量触控按钮。将界面播种信息数据映射为对应键值后录入到指定的变量存储空间中。第四步，生产的配置文件利用 SD 卡下载到 DWIN 屏中，即完成触控设置界面设计。

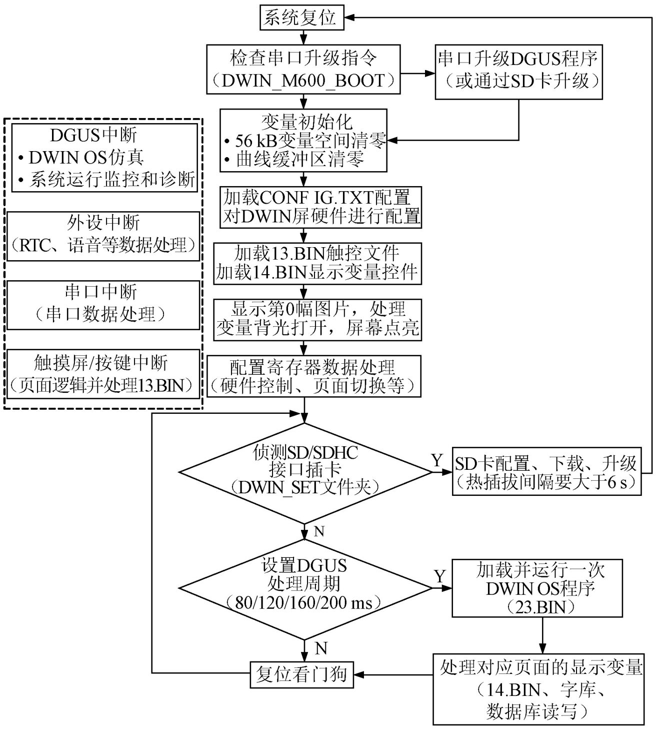


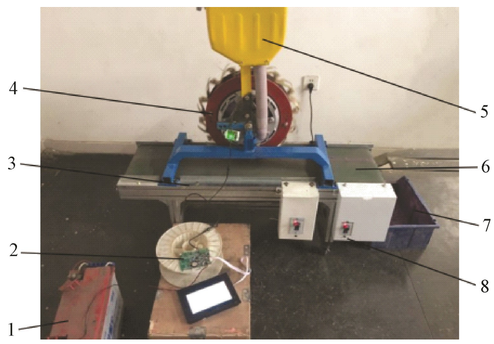
图 13 DGUS 软件处理流程图

Fig.13 DGUS software processing flow chart

4 监测系统性能试验

4.1 台架试验设备与方法

为验证监测系统的准确性，在台架试验台上模拟田间试验分别进行了转动圈数、合格穴数和空穴数监测试验。选用新陆早 78 号棉花种子作为试验样本，采用 15 穴的棉花齿盘式穴播器。试验台如图 14 所示。包括台架、种床带、齿盘式穴播器、种箱、种床带电动机、穴播器驱动电动机、监测系统、调速装置、接种盒、12 V 蓄电池。



1.12V 蓄电池 2.监测系统 3.台架 4.齿盘式穴播器 5.种箱 6.种床带 7.接种盒 8.调速装置

1.12V battery 2.Monitoring system 3.Bench 4.Tine disc dibbler 5.Seed box 6.Seed bed belt 7.Inoculation box 8.Speed control unit

图 14 穴播器性能检测试验台

Fig.14 Performance testing test rig for dibblers

根据文献[27]可知，由于不同转速下穴播器内种子的运动速度及轨迹差异较大，因此转速是影响取种监测可靠性的重要因素。台架试验中通过调速装置控制不同穴播器工作转速。此外，由于穴播器的密封性较好，且外圈采用铸铁等材料，透光性较差，因此自然光照对播种

监测影响不显著。为了防止棉种排出后跳跃，影响人工记录，将去掉穴播器动鸭嘴，并在种床带上贴双面胶，增加棉种与种床带的摩擦力，同时在种床带末端放置接种盒，方便人工记录。该齿盘式穴播器单籽率可达到98%，保证了每穴排出仅 1 粒棉种。将种床带速度调整到最低，通过对种床带上的棉种计数获得准确无误的人工合格穴数；人工空穴数获取方式是通过目标测试 300 穴（相当于穴播器转动 20 圈）减去人工合格穴数。

4.1.1　转动圈数监测试验

试验目的是在于评估监测系统中的霍尔传感器对穴播器转动圈数监测的准确性，（即理论合格穴数监测的准确性。）转动圈数对合格穴数、空穴数监测精度指标无影响，仅对空穴率存在影响。

穴播器实际规定的作业速度范围为 2.5～4 km/h[26]，转化为穴播器工作转速范围为 30～45 r/min。试验中在穴播器上做一标记，分别设定 30、35、40、45 r/min 穴播器工作转速，每个转速下令穴播器转动 50 圈，人工观察记录实际转动圈数并与系统监测转动圈数对比，计算转动圈数监测精度。

4.1.2　合格穴数监测试验

为了评估系统合格穴数监测的准确性，试验中设定穴播器工作转速分别为 30、35、40、45 r/min，每个转速下选取 300 穴进行统计，重复 3 次。采用人工数种的方法，统计种床带上的实际合格穴数。通过监测合格穴数与实际合格穴数对比，计算合格穴数监测精度，取 3 次试验平均值作为合格穴数监测试验结果。根据国家农业行业标准 NY/T 987-2006《铺膜穴播机作业质量》[26]及当地农艺要求，排出 1～2 粒棉种的穴数均为合格穴数。

4.1.3　空穴数监测试验

为进一步评估系统对空穴数监测的准确性，采取人工减少穴播器取种区域的棉种量，人为增加空穴的概率，进行空穴数监测试验。试验中设定穴播器工作转速分别为30、35、40、45 r/min，每个转速下选取300 穴进行统计，重复3 次。采用人工数种方法，统计种床带上实际空穴数，将监测空穴数与实际空穴数对比，计算出空穴数监测精度，取 3 次试验平均值作为空穴数监测试验结果。

4.2　结果与分析

4.2.1　转动圈数监测试验结果与分析

不同转速下转动圈数监测试验结果如表 1 所示，结果表明：随穴播器工作转速提高，系统转动圈数监测精度不变，精度为 100%，满足监测需求。

表 1　不同转速下转动圈数监测结果

Table 1　Results of monitoring the number of revolutions at different speeds

穴播器转速 Speed of the dibbler/(r·min^{-1})	实际转动圈数 Actual number of revolutions	监测转动圈数 Monitoring number of revolutions	精度 Precision/%
30	50	50	100
35	50	50	100
40	50	50	100
45	50	50	100

4.2.2　合格穴数监测试验结果与分析

不同转速下合格穴数监测试验结果如表 2 所示，结果表明：随穴播器工作转速提高，合格穴数监测精度下降不明显，精度达到 97%以上，造成精度略微下降的原因在于取种时少部分尺寸较小棉种完全充入型孔，转速过快时无法被传感器监测到。但系统总体监测精度仍满足对合格穴数监测要求。

表 2　不同转速下合格穴数监测结果

Table 2　Results of monitoring the number of qualified holes at different speeds

穴播器转速 Speed of the dibbler/(r·min^{-1})	实际合格穴数 Actual number of qualified holes	监测合格穴数 Monitoring number of qualified holes	合格穴数监测精度 Monitoring accuracy of qualified holes/%
30	299	296	98.99
35	299	294	98.32
40	300	292	97.33
45	300	291	97.00

4.2.3　空穴数监测试验结果与分析

不同转速下空穴数监测试验结果如表 3 所示，结果表明：随穴播器工作转速提高，监测系统空穴监测精度略微下降，其原因为取种区棉种数量较少，取种齿盘与棉种撞击频率提高，产生少量碎种，导致传感器误测，但系统监测精度仍能达到 93%以上。空穴监测精度符合监测系统要求。

表 3　不同转速下空穴数监测结果

Table 3　Results of cavity number monitoring at different rotational speeds

穴播器转速 Speed of the dibbler/(r·min^{-1})	实际空穴数 Actual number of holes	监测空穴数 Monitoring number of holes	空穴数监测精度 Monitoring accuracy of holes/%
30	90	87	96.67
35	93	89	95.70
40	93	88	94.62
45	92	86	93.48

4.3　田间试验

4.3.1　设备与方法

为考察监测系统性能在田间能否满足设计要求，于2021 年 4 月 25 日在新疆库尔勒市 29 团 20 连开展了棉花精量穴播器取种状态监测系统田间试验，对监测系统的准确性和稳定性进行验证。

试验设备与材料为：包衣处理的新陆早 78 号棉种、2MBJ-3/12 机械式棉花精量播种机、铁牛 TNP1604 拖拉机、监测系统、卷尺、挖种勺等。

在播种作业开始前，使播种机处于静止状态，检验光照对传感器的影响。穴播器内不加入棉种，打开监测系统，分别在太阳光下、遮挡自然光条件下进行测试，结果表明：两种条件下，监测终端显示为 0，田间自然光对传感器无影响。

为进一步验证监测系统田间监测性能，往种箱添加足量棉种，通过人工挖种获得合格穴数和空穴数，监测终端显示屏装在拖拉机驾驶室。田间试验如图 15 所示。

图 15　田间试验
Fig.15　Field test

依据国家农业行业标准 NY/T 987-2006《铺膜穴播机作业质量》[26]控制拖拉机作业速度在慢III档，约 2.5、3 km/h（对应穴播器工作转速约为 30、35 r/min）和在慢Ⅳ档，约 3.5、3.8 km/h（对应穴播器工作转速 40、45 r/min）的行进速度下，6 个装有监测系统的穴播器单体为一组，各行进速度进行一次试验。根据国家标准 GB/T 6973-2005《单粒（精密）播种机试验方法》[28]，每次试验前，在试验田前后两端分别划定 20 m 作为播种机及拖拉机速度调整区域，其中 100 m 作为播种机稳定作业数据采集区。由于该齿盘式穴播器是鸭嘴穴播，鸭子嘴高度、宽度均为 30 mm。作业时，穴播深度为 30～40 mm，播种投种的区域大小为鸭嘴的开口范围，人工挖种检验操作简单，精度高。随机选取 1 071 穴进行检测，利用挖种勺将已播穴内棉种挖出进行实际合格穴数和空穴数人工计数统计，并与系统监测的合格穴数和空穴数结果对比。其中，合格穴数监测精度为监测合格穴数与实际合格穴数的百分比；空穴数监测精度为监测空穴数与实际空穴数的百分比。

4.3.2　试验结果与分析

田间试验结果如表 4 所示。结果表明：在播种机行进速度 2.5～4 km/h 范围内，棉花精量穴播器取种状态监测系统的合格穴数监测精度和空穴数监测精度随播种机行进速度的提高，呈现下降趋势，但系统整体合格穴数监测精度和空穴数监测精度均在 93%以上。

田间试验系统的合格穴数监测精度最低为 96.17%，与台架试验相比，监测精度下降了 0.83 个百分点；空穴数监测精度最低为 93.11%，与台架试验相比，监测精度下降了 0.37 个百分点，但整体系统精度下降不超过 1 个百分点。分析其原因是由于地面坑洼，机具在作业过程中产生振动导致系统监测精度降低。

利用 F 检验对系统监测与人工实测数据样本的方差齐性进行分析，结果如表 5。结果表明：4 组转速下的系统监测与人工实测的合格穴数、空穴数的 F 值 $<F_{0.05}(6.39)$，$P_{0.05}$ 值>0.05，系统监测值与人工实测值没有显著性差异，说明监测系统在田间作业下具有良好的准确性和稳定性。

表 4　监测系统田间试验结果
Table 4　Results of field trials of monitoring systems

行进速度 Travel speed/(km·h^{-1})	传感器编号 Sensor No.	理论合格穴数 Number of theoretical qualified holes	实际合格穴数 Actual number of qualified holes	实际空穴数 Actual number of holes	监测合格穴数 Monitoring number of qualified holes	监测空穴数 Monitoring number of holes	合格穴数监测精度 Monitoring accuracy of qualified holes/%	空穴数监测精度 Monitoring accuracy of holes /%
2.5	1	1 071	1 052	19	1 030	18	97.91	94.74
	2	1 071	1 055	16	1 028	16	97.44	100
	3	1 071	1 050	21	1 026	20	97.71	95.24
	4	1 071	1 052	19	1 026	18	97.53	94.74
	5	1 071	1 051	20	1 022	19	97.24	95.00
	6	1 071	1 053	18	1 023	17	97.15	94.44
3.0	1	1 071	1 056	15	1 025	14	97.06	93.33
	2	1 071	1 052	19	1 020	18	96.96	94.74
	3	1 071	1 052	19	1 022	18	97.15	94.74
	4	1 071	1 055	16	1 025	15	97.16	93.75
	5	1 071	1 053	18	1 018	17	96.68	94.44
	6	1 071	1 051	20	1 021	19	97.15	95.00
3.5	1	1 071	1 056	15	1 023	14	96.88	93.33
	2	1 071	1 052	19	1 018	18	96.77	94.74
	3	1 071	1 052	19	1 015	17	96.48	89.47
	4	1 071	1 054	17	1 020	16	96.77	94.12
	5	1 071	1 055	16	1 018	15	96.49	93.75
	6	1 071	1 054	17	1 017	16	96.50	94.12
3.8	1	1 071	1 053	18	1 015	17	96.39	94.44
	2	1 071	1 056	15	1 014	14	96.02	93.33
	3	1 071	1 055	16	1 014	14	96.11	87.50
	4	1 071	1 054	17	1 012	16	96.02	94.12
	5	1 071	1 053	18	1 013	17	96.20	94.44
	6	1 071	1 054	17	1 015	16	96.30	94.12

表 5 合格穴数、空穴数 F 检验

Table 5　Number of qualified holes, number of holes F test

项目 Items	行进速度 Travel speed/(km·h^{-1})	系统监测 System monitoring			人工实测 Manual measurement			df	F 值	$P_{0.05}$ 值
		平均值 Average	方差 Variance	标准差 Standard deviation	平均值 Average	方差 Variance	标准差 Standard deviation			
合格穴数 Number of qualified holes	2.5	1 025.83	8.97	2.99	1 052.17	2.97	1.72	5	3.02	0.13
	3.0	1 021.83	7.76	2.79	1 053.17	3.77	1.94	5	2.06	0.22
	3.5	1 018.50	7.5	2.74	1 053.83	2.57	1.60	5	2.92	0.13
	3.8	1 013.83	1.17	1.07	1 054.17	1.37	1.17	5	1	0.50
空穴数 Number of holes	2.5	18	2	1.41	18.83	2.97	1.72	5	0.67	0.33
	3.0	16.83	3.77	1.94	17.83	3.77	1.94	5	1	0.50
	3.5	16	2	1.41	17.17	2.57	1.60	5	0.77	0.40
	3.8	15.67	1.87	1.37	16.83	1.37	1.17	5	1.37	0.37

注：df 为自由度；F 值表示显著程度；$P_{0.05}$ 值表示在显著性水平 α=0.05 下的显著性差异。

Note: df is the degree of freedom; F values indicate the degree of significance; $P_{0.05}$ values indicate significant differences at the significance level α=0.05.

5 结　论

1）在分析齿盘式穴播器工作过程的基础上，确定了在携种区Ⅱ-2 区域作为取种监测点位置，设计了以 5 mW N 型激光二极管作为发射模组，光敏二极管作为接收模组的激光对射型传感器以及 A44E 型霍尔传感器，可有效监测齿盘式穴播器的取种过程，实现了空穴数和合格穴数的实时监测。

2）棉花精量穴播器取种状态监测系统采用激光对射型传感器和霍尔传感器获取取种齿盘取种状态信息，通过 STM32F103C8T6 单片机接收、分析和处理取种信号，通过 nRF24L01 无线传输模块完成与人机交互终端的数据传输，由人机交互终端显示空穴率和合格穴数；当空穴率高于阈值时，声光报警模块发出声光报警，实现了棉花精量穴播器取种状态监测的实时报警功能，极大降低了播种作业中大面积空穴的情况。

3）监测系统的台架试验和田间试验验证了监测系统的准确性和稳定性。台架试验结果表明：穴播器工作转速在 30～45 r/min 范围内，系统转动圈数监测精度不变，为 100%，合格穴数监测精度达到 97%以上，空穴数监测精度达到 93%以上。田间试验结果表明：播种机作业速度在 2.5～3.8 km/h 范围内，棉花精量穴播器取种状态监测系统的合格穴数监测精度和空穴数监测精度随播种机行进速度的提高，呈现下降趋势，但系统整体合格穴数监测精度和空穴数监测精度均在 93%以上，且光照对监测系统无影响。对田间试验数据进行 F 检验可得：系统监测与人工实测的合格穴数、空穴数的 F 值<$F_{0.05}$(6.39)，$P_{0.05}$ 值>0.05，系统监测值与人工实测值差异不显著，以激光对射型和霍尔传感器为监测元件的监测系统在田间作业时具有良好的准确性和稳定性，满足棉花精量穴播器取种状态监测的要求。

4）田间试验系统的合格穴数监测精度最低为 96.17%，与台架试验相比，监测精度下降了 0.83 个百分点；空穴数监测精度最低为 93.11%，与台架试验相比，监测精度下降了 0.37 个百分点，但整体系统精度下降不超过 1 个百分点。分析其原因是由于地面坑洼，机具在作业过程中产生振动导致系统监测精度降低。

[参　考　文　献]

[1] 朱延静. 2021 年中国棉花产量小幅下降，新疆播种面积增加 [EB/OL]. http://www.chinanews.com.cn/cj/2021/12-14/9629416.shtml, 2021-12-14.

[2] 高卫红，杨磊. 新疆统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社，2018.

[3] 董万城，张立新，李文春，等. 新疆棉花播种机械应用现状及发展趋势[J]. 新疆农机化，2021(2)：11-15.
Dong Wancheng, Zhang Lixin, Li Wenchun, et al. Current situation and development trend of cotton sowing machinery application in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2021(2): 11-15. (in Chinese with English abstract)

[4] 黄鸿浩. 精量排种器现状及发展分析[J]. 时代农机，2019，46(5)：34-35.

[5] 李国林，宋炜，毛俐，等. 国内外几种主要排种器的特点[J]. 农业科技与装备，2011(8)：70-73.
Li Guolin, Song Wei, Mao Li, et al. Characteristics of several major seed dispensers at home and abroad[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2011(8): 70-73. (in Chinese with English abstract)

[6] 李海龙. 玉米播种监测系统的研究与应用[J]. 农业科技与装备，2019(2)：54-55.
Li Hailong. Research and application of maize sowing monitoring system[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2019(2): 54-55. (in Chinese with English abstract)

[7] 林晴，邓干然，何冯光，等. 农作物种植机械监控系统研究进展[J].现代农业装备，2020，41(1)：12-17.
Lin Qing, Deng Ganran, He Fengguang, et al. Research progress of crop planting machinery monitoring system[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(1): 12-17. (in Chinese with English abstract)

[8] 丁幼春，王凯阳，刘晓东，等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报，2021，37(8)：30-41.
Ding Youchun, Wang Kaiyang, Liu Xiaodong, et al. Research progress of seed sowing detection technologyfor small and medium sized seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the

CSAE), 2021, 37(8): 30-41. (in Chinese with English abstract)

[9] Hadi K, Hossein N, Bahram B, et al. A practical approach to comparativedesign of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017(142): 165-172.

[10] Karayel D, Wiesehoff M, Ozmerzi A, et al. Laboratory measurement of seed drillseed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 89-96.

[11] Leemans V, Destain M F. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 59(1/2): 1-12.

[12] 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: 1-4.

[13] John Deere. Monitoring and documentation[EB/OL] (2015-08-04) [2016-01-08]. http://www.Deere.com/en_US/parts/parts_by_industry/ag/seeding/monitoring/monitoring.Page.

[14] Precision Planting. WaveVision [EB/OL]. (2014-07-15) [2021-03-01]. https://www.precisionplanting.com/Products/product /wavevision.

[15] MC Electronics. Sistema full semina [EB/OL].(2018-04-11) [2019-11-08]. https://www.mcelettronica.it/it/prodotti/semina/semina-di-precisione/full-semina_272c28.html.

[16] Borja A A, Amongo R M C, Suministrado D C, et al. A machine vision assisted mechatronic seed meter for precision planting of corn[C]//Nagoya: IEEE 2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), 2018, 4: 183-187.

[17] 丁幼春，杨军强，朱凯，等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报，2017，33(9)：29-36.
Ding Youchun, Yang Junqiang, Zhu Kai, et al. Design and experiments of seed flow sensing device for oilseed rape precision seed rower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2017, 33(9): 29-36. (in Chinese with English abstract)

[18] 丁幼春，张莉莉，杨军强，等. 油菜精量直播机播种监测系统传感装置改进及通信设计[J]. 农业工程学报，2018，34(14)：19-26.
Ding Youchun, Zhang Lili, Yang Junqiang, et al. Improvement of sensing device and communication design for seeding monitoring system of rape precision direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 19-26. (in Chinese with English abstract)

[19] 丁幼春，陈礼源，董万静，等. 油菜宽幅播种作业监测系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(13)：38-45.
Ding Youchun, Chen Liyuan, Dong Wanjing, et al. Design and experiment of the sowing monitoring system for a wide-width rapeseed planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(13): 38-45. (in Chinese with English abstract)

[20] 杨硕，王秀，高原源，等. 玉米精密播种粒距在线监测与漏播预警系统研究[J]. 农业机械学报，2021，52(3)：17-24.
Yang Shuo, Wang Xiu, GaoYuanyuan, et al. Research on online monitoring and early warning system of precision sowing grain spacing and missed sowing of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 17-24. (in Chinese with English abstract)

[21] 杨硕，王秀，武广伟，等. 玉米精密播种机播量监测系统设计与试验[J]. 农机化研究，2022，44(5)：37-44.
Yang Shuo, Wang Xiu, Wu Guangwei, et al. Design and experiment of a sowing volume monitoring system fora precision corn planter[J]. Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 37-44. (in Chinese with English abstract)

[22] 贾洪雷，路云，齐江涛，等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J].农业工程学报，2018，34(19)：28-39.
Jia Honglei, Lu Yun, Qi Jiangtao, et al. Detecting seed suction performance of air suction feeder by photoelectric sensor combined with rotary encoder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 28-39. (in Chinese with English abstract)

[23] 黄东岩，朱龙图，贾洪雷，等. 基于 GPS 和 GPRS 的远程玉米排种质量监测系统[J]. 农业工程学报，2016，32(6)：162-168.
Huang Dongyan, Zhu Longtu, Jia Honglei, et al. Remote maize seeding quality monitoring system based on GPS and GPRS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 162-168. (in Chinese with English abstract)

[24] 黄东岩，贾洪雷，祁悦，等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报，2013，29(23)：15-22.
Huang Dongyan, Jia Honglei, Qi Yue, et al. A seeder row monitoring system based on polyvinylidene difluoridepiezoelectric film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 15-22. (in Chinese with English abstract)

[25] 雷志锋. 激光二极管的筛选和寿命评价[J]. 环境适应性和可靠性，2008，3：37-40.

[26] 中国国家标准化管理委员会，NY/T 987-2006：铺膜穴播机作业质量[S]. 北京：中国农业出版社，2006.

[27] 张学军，陈勇，史增录，等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播排种器设计与试验[J]. 农业工程学报，2021，37(19)：27-36.
Zhang Xuejun, Chen Yong, Shi Zenglu, et al. Design and experiment of a double-bin turntable type vertical disc hole sowing seeder for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 27-36. (in Chinese with English abstract)

[28] 中国国家标准化管理委员会，6973-2005：单粒（精密）播种机试验方法[S]. 北京：中国农业出版社，2006.

Design and experiments of seed pickup status monitoring system for cotton precision dibblers

Zhang Xuejun[1,2], Zhang Haitao[1], Shi Zenglu[1※], Jin Wei[1], Chen Yong[1], Yu Yongliang[3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*;
2. *Key Laboratory of Innovation Design Laboratory*, *Xinjiang Agricultural Engineering Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*;
3. *Xinjiang Tiancheng Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd.*, *Tiemenguan* 841007, *China*)

Abstract: A seed planting dibbler has been commonly used to make holes for transplants and bedding plants. However, the dibbler rolls with the ground can be easy to vibrate for the undesired empty hole in the seed row during sowing operation, particularly when turning or moving forward, due to the harsh working environment. Furthermore, the empty hole cannot be found in time, where the dibbler can be completely closed inside, leading to a large area of empty holes for the yield reduction when sowing cotton. A cotton precision dibbler has been a high demand to deal with the empty holes caused by the seed extraction and discharge during hole sowing operation. In this study, a new monitoring system was developed for the seed pickup in a precision dibbler during cotton sowing. The position of the monitoring point was first determined in the working process of the toothed disk dibbler. The indoor and field tests were then conducted, where the laser alignment and Hall sensors were used as the monitoring elements, an STM32 microcontroller was used to calculate the number of qualified holes and the empty hole rate, and an nRF24L01 wireless communication module was for the human-machine interaction terminal data interaction. The bench test showed that the monitoring accuracy was not less than 97% and 93.48% for the numbers of qualified and empty holes, respectively, as the working speed of the dibbler increased in the range of 30-45 r/min. Specifically, the overall monitoring accuracy was not less than 96.17% and 93.11% for the number of qualified and empty holes, with the increase of the sower travel speed in the range of 2.5-4 km/h. It infers that the monitoring system of seed extraction fully met the requirements of cotton sowing. Moreover, the lighting did not affect the monitoring system. More importantly, the accuracy of the monitoring system decreased by no more than 1%, compared with the bench test. A chi-square test was also performed on the system monitoring and manual measurement data samples using F-test. It was found that $F<F_{0.05}$ (6.39), $P_{0.05}>0.05$ for the number of qualified and empty holes of system monitoring and manual measurement, indicating excellent accuracy and stability under field operation. Anyways, the monitoring system can be effective and feasible for the seed extraction performance of the tine disc, fully meeting the requirements of seed extraction monitoring in the cotton precision dibbler. The finding can also provide a strong reference to promote the automation and intelligence of cotton precision hole sowing.

Keywords: sensors; cotton; precision dibblers; missed sowing detection; monitoring systems