doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.09.004

基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究

马若飞[1,2]　伟利国[1,2]　赵　博[1,2]　周利明[1,2]　刘阳春[1,2]　邢高勇[1,2]
(1.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083)

摘要:旋耕作业时通常用耕深衡量作业质量,适合的耕深能打破土壤板结、改善土壤结构,促进作物根系生长。目前耕深检测研究场景主要为旱田,检测方法主要为倾角传感器间接检测,而水田土质松软,作业过程中会出现机具下陷和姿态变化的问题。为此,本文设计了一种适用于不同土壤环境的耕深检测系统。为检测地形起伏及机具下陷,设计一种地面仿形机构,通过耦合仿真探究其设计参数,验证可行性;为提高单传感器间接检测稳定性,使用三点悬挂倾角检测和北斗卫星系统(Beidou system, BDS)相对高程数据融合的检测方法,并建立耕深检测模型(Tillage detection model, TDM)。提出自适应迭代扩展卡尔曼算法(Adaptive iterative extended Kalman filter, AIEKF)对传感器获取数据先滤波再融合,获得更稳定、准确的耕深。在参考传统耕深测量方法的基础上,提出了 RTK - BDS 高程差值的测量方法获取耕深真值,并和传统方法进行了对比。仿形机构耦合仿真试验结果表明,所设计的仿形机构检测绝对误差小于 0.5 cm,仿形后土槽高程最大形变量为 2.89 mm。田间试验结果表明,TDM 检测模型能有效反映耕深变化,AIEKF 处理后数据较 KF 处理后数据信噪比平均提升 1.41 dB,融合得到的耕深较两种单一传感器检测的耕深 MAPE 平均分别提高 2.30% 和 2.07%,融合后平均 MAPE 为 3.95%,平均 RMSE 为 1.08 cm。提出的 RTK - BDS 差值真值检测法和传统检测法最大绝对误差为 2.45 cm,能较好完成耕深真值检测。

关键词:旋耕整地;运动仿真;耕深检测;RTK - BDS
中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)09-0052-13　　**OSID**:

Rotary Tillage Depth Detection Based on Multi-sensor Data Fusion

MA Ruofei[1,2]　WEI Liguo[1,2]　ZHAO Bo[1,2]　ZHOU Liming[1,2]　LIU Yangchun[1,2]　XING Gaoyong[1,2]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Tillage depth is usually used to measure the quality of rotary tillage. Suitable tillage depth can break soil compaction, improve soil structure and promote crop root growth. At present, the research scene of ploughing depth detection is mainly dry field, and the detection method is mainly indirect detection by inclination sensor. However, the soil of paddy field is soft, and the problems of sinking and attitude change will occur in the operation process. Therefore, a tillage depth detection system suitable for different soil environments was designed. In order to detect terrain relief and tool sag, a ground copying mechanism was designed, and its design parameters were explored through coupling simulation to verify its feasibility. In order to improve the indirect detection stability of single sensor, the detection method of three-point suspension inclination detection and relative elevation data fusion of Beidou system (BDS) were used, and a tillage detection model (TDM) was established. Adaptive iterative extended Kalman filter (AIEKF) was proposed to filter and then fuse data acquired by sensors to obtain more stable and accurate depth. On the basis of referring to the traditional tillage depth measurement method, the RTK - BDS elevation difference measurement method was proposed to obtain the true tillage depth value, and compared with the traditional method. The coupling simulation results showed that the absolute error was less than 0.5 cm and the maximum shape variable of soil trough elevation was 2.89 mm. Field experiment results showed that TDM detection model can effectively reflect the change of ploughing depth. The signal-to-noise ratio of AIEKF processing data was increased by 1.41 dB on average

收稿日期:2023 - 12 - 07　修回日期:2023 - 12 - 31
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000601)
作者简介:马若飞(1999—),男,硕士生,主要从事农业智能装备与信息化技术研究,E-mail:973446123@qq.com
通信作者:伟利国(1978—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业智能装备与信息化技术研究,E-mail:weilg78@126.com

compared with that of KF processing data, and the ploughing depth data obtained by fusion was increased by 2.30% and 2.07% on average compared with the ploughing depth MAPE detected by two single sensors, respectively. After fusion, the average MAPE was 3.95% and the average RMSE was 1.08 cm. The maximum absolute error of RTK - BDS difference truth detection method and traditional detection method was 2.45 cm, which can complete the truth detection of ploughing depth well.

Key words: rotary tillage preparation; motion simulation; tillage depth detection; RTK - BDS

0　引言

随着国家对农业机械化发展的支持,各式农业机械开始大量运用,提高了农业生产作业效率和产量[1]。但由于农业机械在田间作业时,拖拉机轮胎对土壤造成重复碾压[2],会造成土壤压实并在耕作层下部形成坚实的犁底层[3]。犁底层质地紧密,容重较大,阻碍了作物向下穿插汲取水分、养分,导致作物产量降低[4]。旋耕作业可以形成碎土层,扩大土壤孔隙度,降低土壤容重,使得土壤透气、透水性能大幅提升,能够有效改良土壤和提高农作物产量,且不会对表层土壤进行翻扣,不会扰乱土层、造成土壤养分流失[5]。耕深[6]作为旋耕作业的重要评价指标,一般作物旋耕耕深要求在 15 ~ 25 cm 之间[7]。耕深过深,不仅会导致拖拉机油耗增大,还会破坏土层,影响后期耕种;耕深过浅,会导致农艺不达标,影响松土、增肥效果。

耕深检测分为检测方法和数据处理 2 部分。在土壤坚实度较高的耕田内,常用的方法有使用测距传感器直接法和使用角度传感器间接法。栗震霄[8]设计的超声波测距耕深检测装置,具有一定的可靠性和稳定性。谢斌等[9]通过倾角传感器检测提升臂角度,建立电压和耕深的线性关系,检测稳定系数为 3.34%。VAN 等[10]开发和评估一种基于激光的光学传感器,用于改善农业机械工作深度控制。MICHAEL 等[11]将摄像机安装在驾驶室上,通过对采集的图像进行处理,得到机具倾角直接测量耕深。直接法较为直观但易受到干扰,间接法原理简单但需要精确标定配合,且不同机具、工况都会影响检测精度。

在土壤坚实度较低、粘度较大的水田内[12],旋耕时会出现机具下陷和姿态变化的情况[13],简单的单传感器检测已不满足检测要求,因此有学者开始探索建立新的检测模型和使用多传感器融合[14]的方式。夏俊芳等[15]利用倾角传感器和位姿传感器检测提升臂和车身姿态的变化,修正因车身俯仰变化导致的检测不准。王雷等[16]利用磁致伸缩传感器、超声波传感器检测耕深,并对两个传感器的数据利用 S - G 滤波加权融合,结果显示最大误差为 3.16%。蒋啸虎等[17]利用激光测距传感器和超声波测距传感器,通过卡尔曼算法将两种数据融合,结果比单一传感器更为精确稳定。KIM 等[18]采用传感器数据融合测量方法,设计由线性电位器、测斜仪和光学距离传感器组成的实时耕深测量系统。上述方式在一定程度上解决了复杂环境下耕深检测问题,但模型只在俯仰方向进行了研究,且多传感器融合时均使用直接法类型的传感器,不具有代表性。

在数据处理上,考虑到作业过程中的震动和复杂田间环境造成传感器的检测噪声,采用先滤波后融合的方式。滤波通常采用卡尔曼滤波家族方法,经典卡尔曼算法(Kalman filter, KF)只针对线性系统效果良好,其改进型:扩展卡尔曼(Extended Kalman filter, EKF)、无迹卡尔曼(Untraced Kalman filter, UKF)和容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman filter, CKF)等应用更广泛。WU 等[19]利用卡尔曼滤波算法消除了现场采集数据中的运动噪声和混合噪声,提高了数据质量。YUAN 等[20]分析并改进了 UKF,并通过试验验证其非线性滤波效果。LIU 等[21]以 MESE 为应用场景分析和验证了 CKF 的效果优于其他卡尔曼滤波效果。在融合时,为提高系统实时性,减少处理算法计算量,也可采用卡尔曼算法融合数据。GAO 等[22]利用 EKF 融合了惯性测量、里程表和北斗卫星导航系统数据,将定位精度提高到毫米级。CHIANG 等[23]通过扩展卡尔曼滤波器将 INS、GNSS 和基于网格的 SLAM 数据结合,克服了单传感器的缺陷。

采用类卡尔曼方法时,须考虑其对实际情况中非线性问题的处理。综合考虑,UKF 和 CKF 需要对协方差矩阵进行 Cholesky 分解,而协方差矩阵在实际应用时无法保持为正。因此 UKF 和 CKF 存在算法终止的风险。相比而言,EKF 稳定性更高,且不需要复杂的矩阵分解计算。但 EKF 在线性化时舍弃了一阶以上的高阶精度,导致线性化误差。为此,本文在 EKF 过程中,通过将得到的后验估计代入观测方程更新观测方程雅可比矩阵,并在每次计算过程中重新利用观测值使估计接近真值的方法,得到迭代扩展卡尔曼滤波(Iterative extended Kalman filter, IEKF)。在复杂环境中为了进一步减少噪声协方差造成的误差,提出通过在每次循环过程中使用一种遗忘因子,自适应更新噪声协方差值的自适

应迭代扩展卡尔曼滤波(AIEKF),以提高算法滤波和融合效果。

1 检测机构设计

1.1 仿形机构结构

为获取旋耕作业前地形特征并检测拖拉机下陷情况,本文设计一种地面仿形机构。为了减小拖拉机横滚方向上姿态变化造成的影响,该机构设计为左右对称结构,可同时检测耕作路径两侧的地形。因此,本文的仿形机构采用平行四边形结构[24],通过检测上横连杆角度反映地面地形情况。

该机构由机体连接件、横长支架、限位孔板、前竖杆、后竖杆、连接件、横连杆、回位弹簧、托板和位姿传感器组成。托板分为上下两部分,下部呈雪橇状,可减小作业时地面行驶阻力;上部三面为斜坡结构,防止作业时泥土积压到托板上。在作业时弹簧呈拉升状态,用于给托板提供下压力,使托板始终贴合地面。同时,为防止托板在仿形过程中前倾嵌入泥土中,将托板和连接件连接位置前置,使托板重心后移。位姿传感器安装在上横连杆,最终转换输出为地形表面结构信息,仿形机构如图 1 所示。

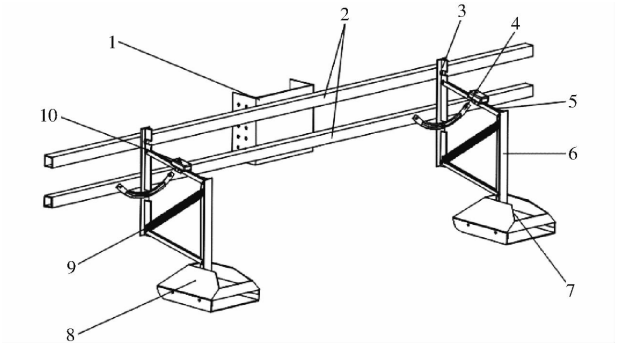


图 1 仿形机构结构示意图

Fig. 1 Sketch of copying mechanism

1. 机体连接件 2. 横长支架 3. 前竖杆 4. 限位孔板 5. 横连杆 6. 后竖杆 7. 连接件 8. 托板 9. 回位弹簧 10. 位姿传感器

该仿形机构可在俯仰方向和横滚方向上各自转动。这种设计不仅使机构与地面之间更加贴合,还可补偿作业时车体俯仰、横滚姿态变化造成的误差。

1.2 机构仿真设计

为检测设计合理性,对机构进行运动学仿真。仿真通过 ADAMS 和 EDEM 两款虚拟仿真软件耦合实现。使用 ADAMS 来观察机构部件运动特性;使用 EDEM 来建模土槽,使其具有真实土壤特性。

使用 Solidworks 对设计的仿形机构进行建模,因仿形机构为两侧对称结构,为减少后期耦合计算量,只对仿形机构单边进行研究。后导入 ADAMS 中,设定相关接触、驱动和力,其中回位弹簧拉力为 50 N。仿真试验后,输出平行四边形机构上横连杆俯仰角和横滚角,作为实际仿形中从位姿传感器上获得的数据。

在该仿形机构中,机架俯仰角为 α,即拖拉机机身俯仰角,机架横滚角为 β,即拖拉机机身横滚角,左、右侧仿形机构横连杆俯仰和横滚角度分别为 P_l、R_l、P_r、R_r,横连杆长度为 l。机架距离地面初始高度为 H_f。综上,得到左右 2 个平行四边形机构底面和机架距离分别为

$$H_{lf} = l\sin P_l \cos R_l \pm l_f \sqrt{1-\cos\alpha} \pm H_f \sin\beta \quad (1)$$

$$H_{rf} = l\sin P_r \cos R_r \pm l_f \sqrt{1-\cos\alpha} \pm H_f \sin\beta \quad (2)$$

式中 l_f——左右两平行四边形机构之间水平距离

使用 EDEM 建立符合现实作业情况不规则地面,以东北淋溶黑土土壤特性进行建模,选择使用球状颗粒、核状颗粒作为基本土壤颗粒,土壤颗粒单元半径 3 mm[25],且该种土壤含水率较高,土壤与耕作部件之间粘附力较大,选择 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型[26-27],整个土槽长 × 宽为 1 500 mm × 700 mm,其他仿真基本参数如表 1 所示,土槽实物图如图 2 所示。

表 1 仿真试验 EDEM 建模参数

Tab. 1 Simulation experiment EDEM modeling parameters

参数	数值
土槽材料密度/(kg·m^{-3})	7 860
土槽材料泊松比	0.3
土槽材料剪切模量/Pa	8×10^{10}
土壤密度/(kg·m^{-3})	1 300
土壤泊松比	0.38
土壤剪切模量/Pa	1×10^{6}
土壤与土壤间恢复系数	0.6
土壤与土壤间静摩擦因数	0.5
土壤与土壤间动摩擦因数	0.4
土壤与土槽内壁间恢复系数	0.6
土壤与土槽内壁间静摩擦因数	0.5
土壤与土槽内壁间动摩擦因数	0.05

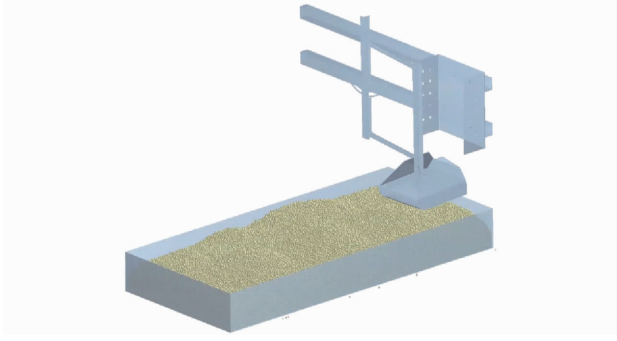


图 2 仿形机构仿真土槽模型

Fig. 2 Emulating mechanism of soil tank model

1.3 仿真试验

对建模完成后的土槽,使用 EDEM 后处理中 Ruler 工具测量生成土槽表面形状,并绘制其表面高

程图，作为仿形真值，如图 3 所示。

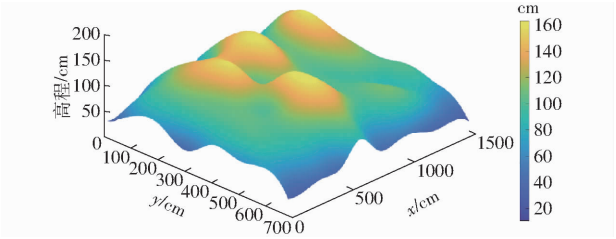


图 3　模拟地面模型示意图

Fig. 3　Schematic simulated ground models

将仿真试验得到的上横连杆俯仰角和横滚角代入式(2)计算得出仿形机构检测值，并和真值进行比较，如图 4 所示。

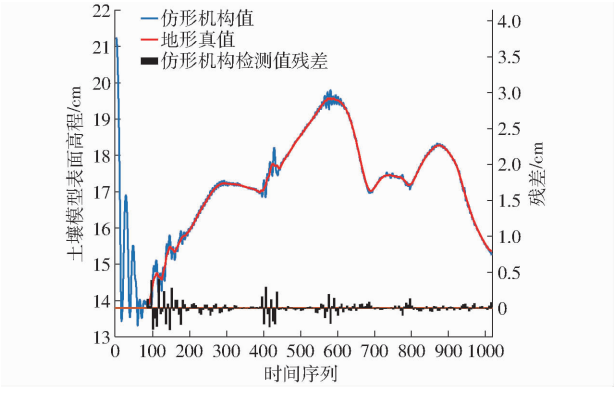


图 4　仿形机构仿真检测值和真值对比

Fig. 4　Comparison between simulated value and true value of copying mechanism

从图 4 可看出，由于仿形机构底板开始状态是悬浮在土槽上空，刚开始出现仿形高程快速下落的现象，而经过几次振荡后恢复正常仿形功能，故出现机构仿形值过大的情况。在仿形过程中，可看出机构在坡面顶端时会出现较大的振荡现象，误差增大。原因为回位弹簧力过大，而在坡面顶端时仿形机构底板和地面接触面积小，从而使整个平行四边形机构出现抖动，但检测结果残差绝对值均在 0.5 cm 之内，基本满足仿形检测需求。

仿形后，再次测量土壤地形图，将仿形前后两次土壤地形图按相同大小网格划分，并分别对比在对应点上两者之差，绘制两次测量结果差值图，如图 5 所示。

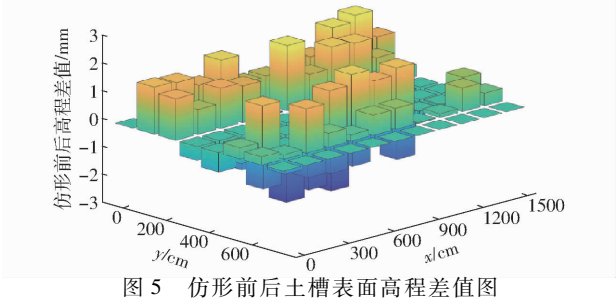


图 5　仿形前后土槽表面高程差值图

Fig. 5　Residual map of soil trough surface elevation before and after copying

经过对比，发现前后两者的平均误差为 0.89 mm，最大绝对误差为 2.89 mm。

综合仿形结果和土槽损伤结果，该机构设计合理，能较准确反映地形状况。且整个仿形机构对土壤地形影响较小，为在田间试验中能有较好的仿形效果和较小的土地表面损伤，可选择弹力更小的回位弹簧。

2　检测系统设计

2.1　方案设计

针对不同土壤类型旋耕耕深检测存在的问题，本研究提出多传感器融合方案，其主要由 4 个位姿传感器和 1 组 BDS 双天线系统组成。系统传感器安装位置如图 6 所示。

2 个位姿传感器安装于仿形机构横连杆上，整个仿形机构通过机体连接件，利用螺栓连接在拖拉机机体前方，可检测地面地形状况和拖拉机在田内的下陷深度；另一个位姿传感器安装于驾驶室后方，



图 6　传感器安装示意图

Fig. 6　Sensor installation diagram

在拖拉机横向中线和后轮与地面接触点垂线的交点处,检测拖拉机作业过程中的姿态变化;BDS 双天线系统主天线安装在拖拉机顶部中心位置,副天线安装在旋耕机顶部中心位置,分别输出拖拉机定位信息、拖拉机航向角和两个机具之间的相对位置信息;最后 1 个位姿传感器安装于拖拉机三点悬挂下悬臂上,检测三点悬挂下悬臂抬升和下压角。

本系统还包括一个以 STM32 单片机为主控芯片的下位机和以工控机为主体的上位机。下位机可根据设计的延时配准程序,完成各个传感器间的时间配准。

在上位机上,首先对所有传感器输出的信号进行滤波处理,再通过检测模型对拖拉机因下陷和姿态变化产生的误差进行修正,融合 BDS 双天线系统、三点悬挂位姿传感器检测得到的耕深,结合仿形机构检测到的地形,最终展示检测值,检测系统流程如图 7 所示。

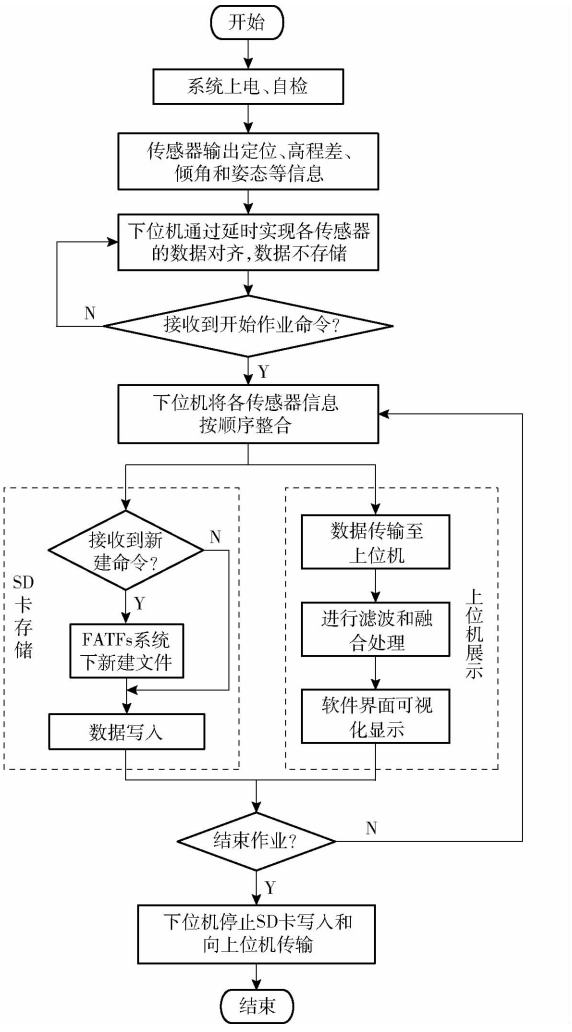


图 7 检测系统流程图

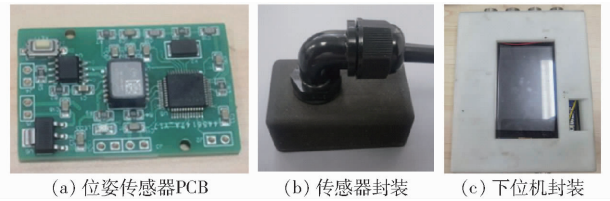
Fig. 7 Test system flowchart

2.2 硬件设计

为保证耕深检测实时性,设置采样频率为 5 Hz。为保证各个传感器后期的数据融合,本系统通过硬件方式进行时间配准。

位姿传感器采用村田 SCL3300 - D01 传感芯片,内部控制芯片为 STM32F103c8t6,通过 CAN 通信协议与下位机数据交互。BDS 双天线系统为和芯星通 UB482 系统,使用 RS232 通信协议和下位机数据交互,在作业前设置输出数据格式,即交替发送主天线的 RTK 差分定位信息、航向角以及双天线的高程差信息。

下位机以 STM32F103ZET6 芯片为主控芯片,外围电路包括 RS232 电平转换模块、串口模块、CAN 收发器、SDIO 控制器等硬件模块,实现和各个传感器数据交互和存储。下位机和各个传感器以航空插头连接,保证其密封性。传感器封装、PCB 和下位机封装如图 8 所示。



(a) 位姿传感器PCB (b) 传感器封装 (c) 下位机封装

图 8 检测系统硬件实物图

Fig. 8 Test system hardware diagram

在传感器时间配准上,以 BDS 双天线向下位机发送数据的时间戳作为本系统的基准时间线,当下位机收到 BDS 双天线系统发出的定位信息时,通过单片机延时程序,在合适的时间向 3 个位姿传感器分别发送开始运行的指令完成和 BDS 双天线系统时间对齐。当下位机接收到每个位姿传感器返回的角度信息后,系统开始正常工作,整个检测硬件系统结构如图 9 所示。

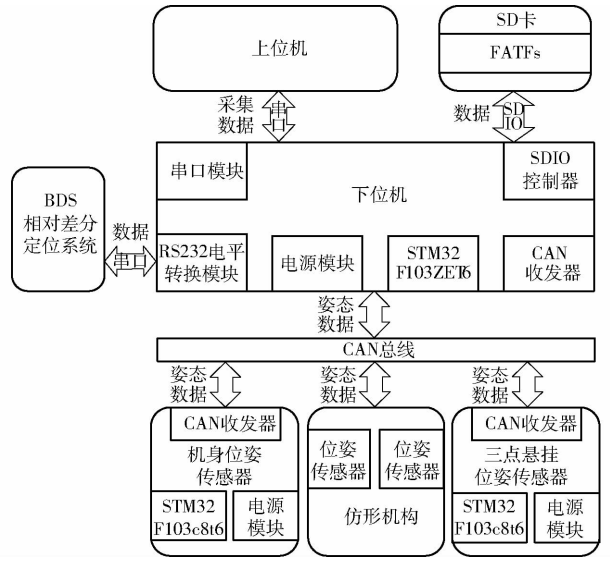


图 9 检测系统硬件结构图

Fig. 9 Test system hardware structure diagram

2.3　检测模型构建

经前期研究，建立更全面的耕深检测几何模型（TDM）是准确检测耕深的基础。在建立模型前先进行一些简化实际情况的假设：①所建立的模型不考虑机械间隙的影响。②拖拉机作业时的俯仰姿态变化以拖拉机后轮与地面接触点为旋转中心[15]。③拖拉机作业时的横滚姿态变化以机身位姿传感器安装位置为旋转中心。

在拖拉机俯仰方向，总共有 2 个旋转运动，一个是绕着后轮和地面接触点的转动，通过安装在拖拉机机身上的位姿传感器检测，记车身和水平面夹角为 α；另一个是绕着三点悬挂下悬臂铰接点的转动，通过安装在三点悬挂下悬臂上的三点悬挂位姿传感器检测，记三点悬挂旋转角为 θ，旋耕机到三点悬挂距离为 c。则当拖拉机机身没有俯仰角度变化时，其耕深为

$$h = c\sin\theta \tag{3}$$

车身俯仰方向上运动示意图如图 10 所示。

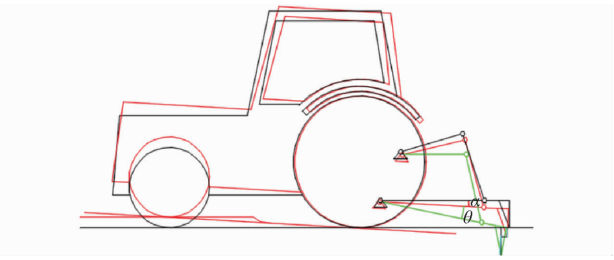


图 10　车身俯仰方向上运动示意图

Fig. 10　Body pitchangle diagram

在分析横滚姿态影响时，俯仰方向上的变化对其无影响，根据假设①，拖拉机横滚角即是旋耕机横滚角变化，机身位姿传感器检测到的横滚角为 β，车身横滚方向上运动示意图如图 11 所示。同时，车身航向角度 γ 可以由 BDS 双天线检测得到。

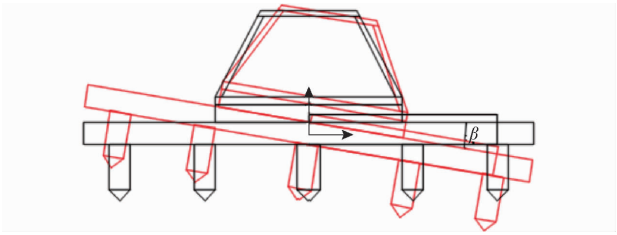


图 11　车身横滚角度示意图

Fig. 11　Body rollangle diagram

以拖拉机某一边后轮最下方的点和仿形机构对应位置点的距离之差得到下陷深度，通过拖拉机机顶上的主天线得到拖拉机机身起伏变化。

以田间设立基站为原点，以正东、正北、垂直向上方向分别为 x、y、z 轴，建立大地坐标系 D，其坐标通过加右下角标 D 来区分；以拖拉机上机身位姿传感器为原心，以车前进方向、车前进右侧方向、垂直向上方向为 x、y、z 轴正方向，建立拖拉机坐标系 T，其坐标通过加右下角标 T 来区分。上述两个坐标系原点都可以通过 BDS 系统定位得到，BDS 坐标系原点在大地坐标系上 x、y、z 的相对距离，分别为 x_{tf}、y_{tf}、z_{tf}。

在拖拉机坐标系中，根据对拖拉机的测绘，可以分别得到旋耕机在仿形机构两个检测单元上的对应位置的旋耕刀最下方点在拖拉机系上的坐标，分别为 $(x_{Tld}, y_{Tld}, z_{Tld})$、$(x_{Trd}, y_{Trd}, z_{Trd})$。仿形机构 2 个检测单元和地面接触点坐标分别为 $(x_{Tlf}, y_{Tlf}, z_{Tlf})$、$(x_{Trf}, y_{Trf}, z_{Trf})$。

根据坐标变化公式，拖拉机坐标系上的点均可以转换到大地坐标系上，转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta\cos\gamma - \sin\alpha\sin\gamma & -\cos\alpha\cos\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta \\ \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\cos\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta \\ -\sin\beta\cos\gamma & \sin\beta\sin\gamma & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{tf} \\ y_{tf} \\ z_{tf} \end{bmatrix} \tag{4}$$

作业过程中耕深在同一采样时刻有左右两个检测值，因此，可以表示为

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{Dlf} - z_{Dld} \\ z_{Drf} - z_{Drd} \end{bmatrix} \tag{5}$$

在考虑拖拉机田间作业时下陷和姿态变化的影响后，通过式（3）~（5）可以利用各传感器数据检测计算得到准确的耕深。

2.4　自适应迭代扩展卡尔曼算法

通过卡尔曼算法完成对数据滤波和融合，为适应田间环境，对原始算法研究改进，提出自适应迭代扩展卡尔曼算法，整个算法流程图如图 12 所示。

2.4.1　迭代扩展卡尔曼滤波

EKF 通过泰勒级数展开将非线性系统线性化。该算法简化计算，只保留一阶级数，同时也引入高阶损失误差，导致系统出现正反馈误差和非一致性的问题。为了减小扩展卡尔曼算法忽略高阶无穷小带来的误差，采用迭代方法。将后验估计代入观测方程，通过多次迭代的测量更新过程来更新观测方程雅可比矩阵，通过重复使用观测值，使每次估计值能更接近于真实值，而减小算法误差。

假设存在一个非线性连续系统

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_{k+1} = f(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{w}_k & (\boldsymbol{w}_k \sim (0, \boldsymbol{Q}_k)) \\ \boldsymbol{y}_k = h(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{v}_k & (\boldsymbol{v}_k \sim (0, \boldsymbol{R}_k)) \end{cases} \tag{6}$$

式中　$\boldsymbol{x}_k$——k 时刻系统状态阵

$\boldsymbol{x}_{k+1}$——$k+1$ 时刻系统状态阵

$\boldsymbol{y}_k$——k 时刻状态阵观测量

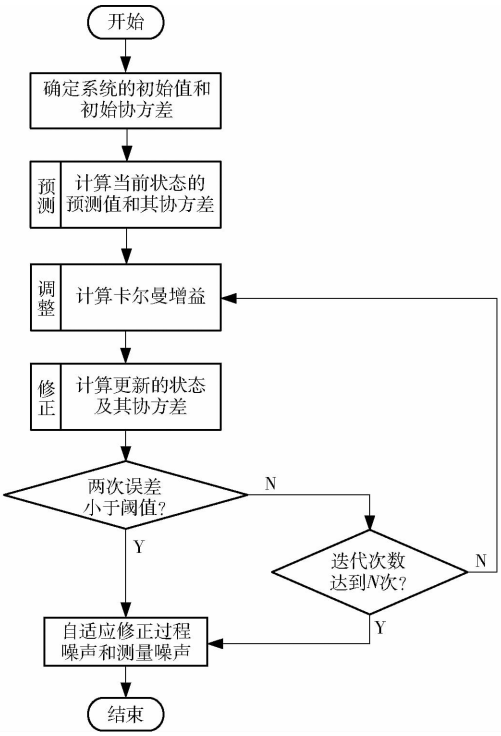


图 12 自适应迭代扩展卡尔曼算法流程图

Fig. 12 Flowchart of adaptive iterative extended Kalman algorithm

$\boldsymbol{w}_k$——过程噪声

$\boldsymbol{Q}_k$——k 时刻过程噪声协方差

$\boldsymbol{v}_k$——测量噪声

$\boldsymbol{R}_k$——k 时刻测量噪声协方差

当算法开始循环迭代前,输入初始估计值 $\hat{\boldsymbol{x}}_0$ 和初始协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_0$,随后开始迭代扩展卡尔曼算法过程。估计预测步为

$$\boldsymbol{x}_k^- = f(\boldsymbol{x}_k) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{P}_k^- = \boldsymbol{A}_{k-1}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{A}_{k-1}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_k \tag{8}$$

其中

$$\boldsymbol{A}_{k-1} = \frac{\partial f}{\partial x}(\boldsymbol{x}_{k-1}^+) \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{x}_k^-$——k 时刻先验状态估计值

$\boldsymbol{P}_k^-$——k 时刻真实值与预测值之间的协方差

$\boldsymbol{P}_{k-1}$——$k-1$ 时刻真实值与最优估计值之间的协方差

$\boldsymbol{A}_{k-1}$——$k-1$ 时刻状态转移矩阵

$\boldsymbol{x}_{k-1}^+$——$k-1$ 时刻预测估计值

设迭代次数为 N,a 为误差阈值,一般取 $N=10$。不断迭代计算卡尔曼增益和后验估计值、协方差,可得

$$K_{k,n} = \boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{H}_{k,n}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_{k,n}\boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{H}_{k,n}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{R}_k)^{-1} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{P}_{k,n} = (\boldsymbol{I} - K_{k,n}\boldsymbol{H}_{k,n})\boldsymbol{P}_{k-1} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{x}_{k,n}^+ = \boldsymbol{x}_k^- + K_{k,n}(\boldsymbol{y}_k - h(\boldsymbol{x}_k^-)) \tag{12}$$

式中 $K_{k,n}$——第 n 次迭代的卡尔曼增益

$\boldsymbol{H}_{k,n}$——第 n 次迭代的状态观测矩阵

$\boldsymbol{x}_{k,n}^+$——第 n 次迭代的预测估计值

$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

$\boldsymbol{P}_{k,n}$——第 n 次迭代的预测协方差

直至 2 次迭代差值小于设定阈值 a,即

$$\| x_{k,n+1}^+ - x_{k,n}^+ \| \leqslant a \tag{13}$$

或迭代次数达到 N 后,迭代过程结束。取最后一次迭代得到 k 时刻的后验估计值和协方差。通过上述操作,可降低 EKF 忽略高阶的误差。

2.4.2 噪声协方差自适应

与 KF 相同,IEKF 也假设过程噪声和测量噪声是符合高斯分布的白噪声,过程噪声和测量噪声通常被设置为常量。但由于外界因素的影响,对传感器特性产生影响,会随温度、相对湿度等一系列的外界影响发生变化,噪声矩阵会随时间发生变化。所以,固定噪声协方差 $\boldsymbol{Q}_k$ 和 $\boldsymbol{R}_k$ 很难满足实际条件的要求。

为了解决该问题并进一步提高估计精度,采用一种改进的 Sage - Husa 估计器对过程噪声和测量噪声进行自适应修正,即

$$\boldsymbol{Q}_{k+1} = (1-d_k)\boldsymbol{Q}_k + d_k(K_{k+1}\boldsymbol{\varepsilon}_k\boldsymbol{\varepsilon}_k^{\mathrm{T}}K_{k+1}^{\mathrm{T}} - (\boldsymbol{P}_k - \boldsymbol{P}_k^-)) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{R}_{k+1} = (1-d_k)\boldsymbol{R}_k + d_k(\boldsymbol{\varepsilon}_k\boldsymbol{\varepsilon}_k^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{H}_k\boldsymbol{P}_k^-\boldsymbol{H}_k^{\mathrm{T}}) \tag{15}$$

$$d_k = \frac{1-\beta}{1-\beta^k} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k = \boldsymbol{y}_k - \hat{\boldsymbol{y}}_k \tag{17}$$

式中 $\boldsymbol{Q}_{k+1}$——$k+1$ 时刻过程噪声协方差

$\boldsymbol{R}_{k+1}$——$k+1$ 时刻测量噪声协方差

d_k——遗忘因子,取 0.9 ~ 1

$\hat{\boldsymbol{y}}_k$——状态阵观测量最优估计值

$\boldsymbol{\varepsilon}_k$——$k$ 时刻检测值与真实值差值

式(14) ~ (17)根据不同的情况不断对噪声的协方差进行自适应修正,从而进一步提高数据滤波融合效果。

3 田间试验

3.1 试验条件

为验证耕深检测系统实际检测效果,于 2023 年 10 月中旬在吉林省四平市(43°17′N,124°37′E)进行了田间试验。四平市位于中国东北部,地处温带季风性气候,年平均气温 5℃,无霜期 100 ~ 160 d,年降水量 650 mm 左右,年日照时数 2 259 ~ 3 016 h。耕作土壤类型主要为淋溶黑土,同时也有砂质土、白浆土等其他土壤类型,各种土壤如图 13 所示。本次试验在试验场地附近选取 3 种不同类型土壤耕地,以验证耕深检测系统在不同类型土壤检测效果。试验前使用山东莱恩德公司的 LD - TYD - 1 型土壤硬

度计(最大量程 4 000 kPa)检测不同类型土壤耕地在不同深度的土壤坚实度,结果如表 2 所示。



(a) 淋溶黑土　(b) 白浆土　(c) 砂质土

图 13　试验田实景图

Fig. 13　Actual maps of experimental field

表 2　土壤坚实度测量结果

Tab. 2　Soil firmness measurement results

土壤类型	种植作物	测量深度/cm	土壤平均坚实度/kPa
淋溶黑土	水稻	15	579. 65
		20	734. 66
		25	1 395. 83
白浆土	玉米	15	654. 43
		20	1 653. 21
		25	2 063. 48
砂质土	花生	15	401. 39
		20	1 075. 62
		25	1 514. 56

经过实地测量,实际作业时,拖拉机驾驶员控制拖拉机以低速(1. 2 km/h)和高速(3. 6 km/h)两种速度作业;且控制 3 种旋耕深度,即浅耕(15 cm)、中耕(20 cm)和深耕(25 cm)。

3. 2　试验步骤

3. 2. 1　标定试验

首先对仿形机构、BDS 双天线系统和三点悬挂位姿传感器进行标定试验。在安装好所有传感器后,将作业机具停放在水平地面上,待系统正常工作后,仿形机构自然接触地面,采集其上 2 个位姿传感器角度,采集 2 min,取平均值作为仿形机构标准水平面的基准值,即完成仿形机构标定。在拖拉机启动后,使三点悬挂分别在提升 0、20、35 cm 和下降 10、20 cm 的位置悬停,采集三点悬挂位姿传感器和 BDS 双天线的数据,每个位置采样 2 min,取每个位置采集到的一组数据平均值作为标定值,即完成三点悬挂位姿传感器标定试验。

3. 2. 2　耕作试验

耕作试验共进行 3 组,分别在淋溶黑土、白浆土和砂质土上进行,每组试验有 3 个步骤,分别为耕前地形测量、耕时系统测量和耕后真值测量。每组试验进行 6 次作业,每次作业直线长度为 120 m。

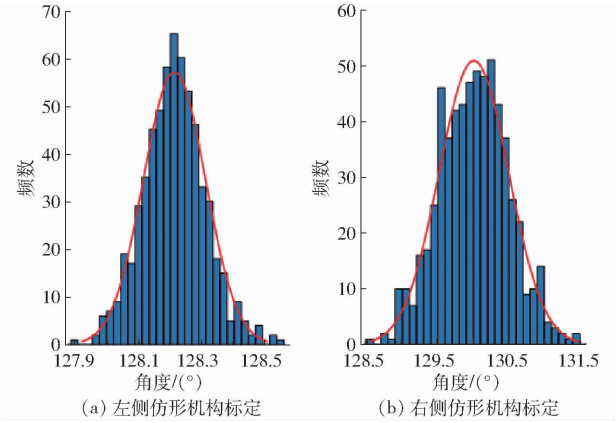
耕前地形测量:利用田间非作业区域设置的基站和定位天线以及支架组成手持式 RTK - BDS 定位仪测量,以此来读取每个测量点经纬度位置信息和高程信息。结合本耕深检测系统在机具两边检测的特点,测量时在拖拉机作业轨迹上两侧对称处均进行检测、每次测量间隔 2 m,且测量后在作业区外标记测量点位置,方便耕后真值测量时检测点能相互对应。

耕时系统测量:根据所能控制的试验条件,每组试验设立 6 次作业试验工况,分别为低速浅耕、低速中耕、低速深耕、高速浅耕、高速中耕和高速深耕。拖拉机以不同工况作业时,采集并保存各个传感器数据,且为方便后续分析,每次作业后,下位机独立保存此次试验数据。

耕后真值测量:为测量作业后耕深真值,参考国标规定[7],并在耕前地面检测所做的标记点进行刨土测量。同时为验证 RTK - BDS 单点定位法的真值检测效果,在刨开的土坑内使用 RTK - BDS 定位仪测量。

3. 3　标定试验结果

将仿形机构上的两个位姿传感器得到的数据绘制成分布直方图,如图 14 所示。并取其平均值作为仿形机构零值角度,分别为左侧 128. 20°,右侧 129. 99°。



(a) 左侧仿形机构标定　(b) 右侧仿形机构标定

图 14　仿形机构零值角度标定

Fig. 14　Zero angle calibration of copying mechanism

在 BDS 相对位置差分定位系统和三点悬挂位姿传感器的标定试验中,以每个位置三点悬挂提升时的平均角度正弦函数和臂长乘积(图 15a)和高程差平均值(图 15b)为 x 轴,以旋耕机上下移动的真值为 y 轴,分别绘制拟合线。并将两种传感器标定点进行直线拟合,BDS 双天线系统拟合表达式为

$$y = -1.07x + 212.6 \quad (R^2 = 0.997) \tag{18}$$

三点悬挂位姿传感器拟合表达式为

$$y = 3.03x - 12.3 \quad (R^2 = 0.940) \tag{19}$$

由式(18)、(19)可知,2 种传感器输出值和耕深之间均满足很好的相关性,且 BDS 双天线系统的相关性更好,更符合一次函数,且其斜率接近 -1,能直观反映耕深变化的绝对值。

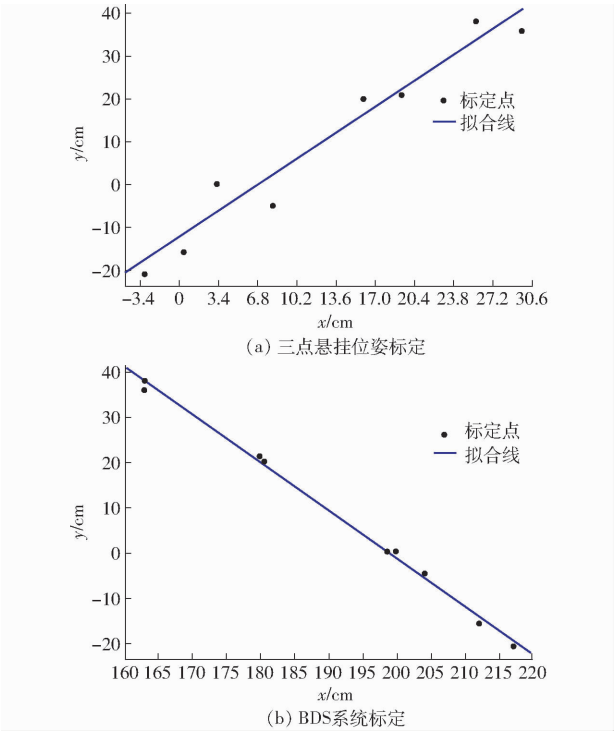


图 15 两种传感器耕深标定拟合曲线

Fig. 15 Two kinds of sensor depth calibration curve fitting

3.4 自适应迭代扩展卡尔曼滤波结果

将机具高速作业时各传感器采集的原始数据，在代入检测模型计算修正后，分别用卡尔曼滤波算法和自适应迭代扩展卡尔曼滤波算法对其进行滤波处理，结果如图 16 所示。

使用 Matlab 的 snr 函数计算每一次作业中耕深的原始数据和两种滤波算法处理后数据信噪比，并将结果按照直方图形式绘制，如图 17 所示。由图 17 可知，在白浆土高速深耕工况下，原始卡尔曼算法处理后数据较原始数据信噪比提高 8.26 dB，自适应迭代扩展卡尔曼算法处理后数据较原始数据信噪比提高 9.21 dB，较原始卡尔曼算法处理后数据信噪比提高 0.95 dB，自适应迭代扩展卡尔曼算法的滤波效果更好。且在不同土壤工况作业以及不同预设耕深时，自适应迭代扩展卡尔曼算法较原始数据信噪比平均提高 9.15 dB，较原始卡尔曼算法处理后数据信噪比平均提高 1.41 dB，自适应迭代扩展卡尔曼滤较算法处理后数据较原始信号质量提高较多，均能使数据信噪比转正，且较原始卡尔曼算法处理后数据信噪比质量平均提升 34.76%。

和真值作比较，从图 16 可知，白浆土深耕工况时，改进后的算法较经典卡尔曼滤波的 MAPE 减小 14.36%，RMSE 减小 25.87%，改进后卡尔曼滤波算法相比经典能更好地接近于真值。其余不同工况均满足改进后的算法更接近耕深真值的趋势。

由图 17 看出，在淋溶黑土作业环境下原始信号

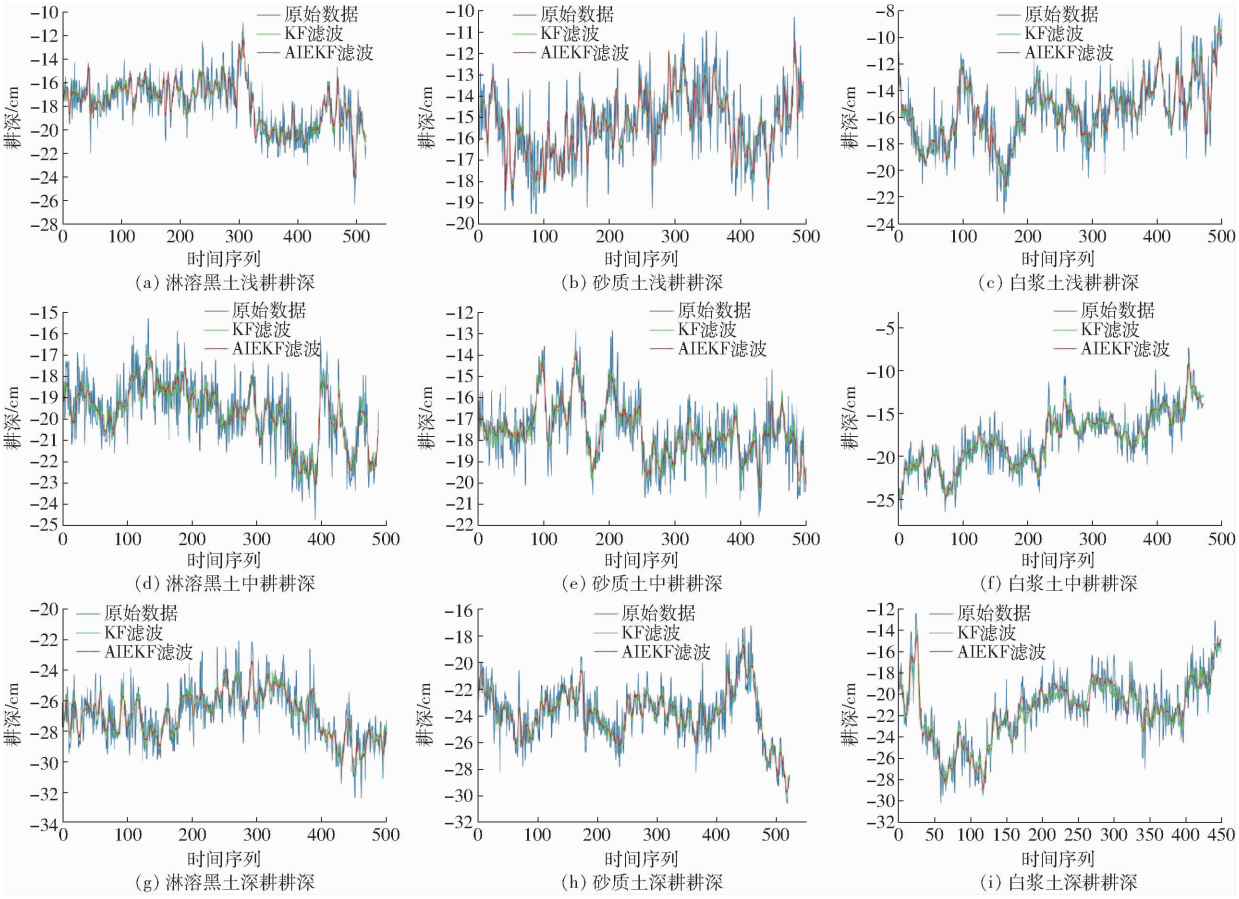


图 16 滤波算法比较

Fig. 16 Filter algorithm comparison diagrams

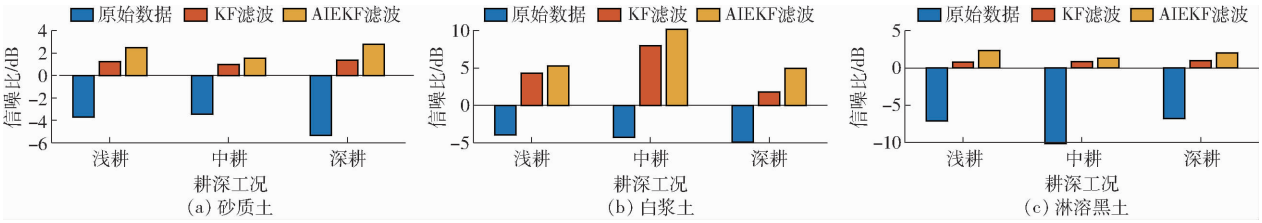


图 17　滤波后数据信噪比对比

Fig. 17　Comparison of signal to noise ratio of filtered data

信噪比最小，噪声占比远大于信号，而在滤波后，信号信噪比均转正，滤波后信号质量有较大改进，对于继续进行数据融合的分析提供了基础。在白浆土作业工况下，原始数据信噪比表现最好，是因为白浆土表面是硬土层，使作业机具作业环境较为平坦，数据良好。对比白浆土和淋溶黑土滤波效果可得，该改进卡尔曼滤波算法在原始数据较好的情况下，滤波后效果更好。因此，在实时性要求不高的情况下，可先对数据进行初步预处理后，再使用 AIEKF 算法滤波，会有更好的滤波效果。

3.5　自适应迭代扩展卡尔曼算法融合结果

自适应迭代扩展卡尔曼算法还可以继续进行数据融合，此时将估计值和观测值分别用两种传感器滤波后的数据代替，算法其余过程不变，即可完成数据融合。

因左右两侧耕深数据会因车身姿态相对应变化，故只需分析一边的耕深数据。仍以旋耕作业左侧检测的数据为例，将 BDS 双天线系统和三点悬挂陀螺仪检测耕深滤波后的数据代入算法进行融合，并将上述滤波后数据、融合后数据，以及使用刨土法测量的真值进行比较，如图 18 所示。

由图 18 可以看出，有些非真值检测点处的检测值和真值趋势差距较大，是因为真值采样点是 2 m 为间隔，期间的地形变化不定，导致耕深检测值变

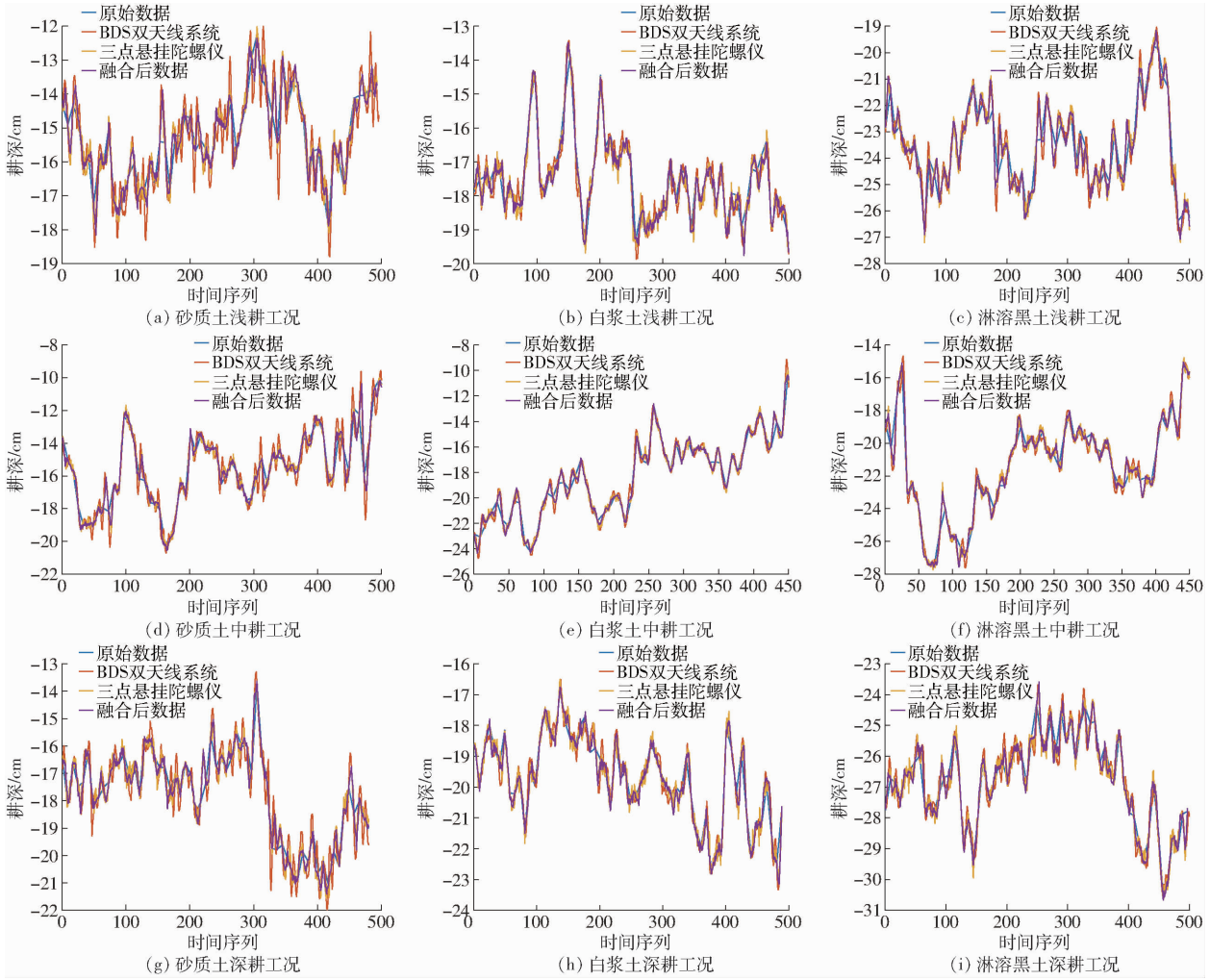


图 18　两种传感器融合效果对比

Fig. 18　Comparison of fusion effect of two sensors

化,后续试验中可以增加真值采样点再进行分析。

由图 18 还可以看出在不同的土壤和不同的预设耕深的工况下,原始数据符合真值的变化趋势,其中以白浆土工况高速作业时的深耕情况来看,滤波后 BDS 双天线的 MAPE 为 5.24%,RMSE 为 1.21 cm,三点悬挂位姿传感器的 MAPE 为 5.68%,RMSE 为 1.47 cm,表明所建立的耕深检测模型能较好地描述耕深变化。

计算两种传感器单独检测和融合后耕深值 MAPE,结果如图 19 所示。

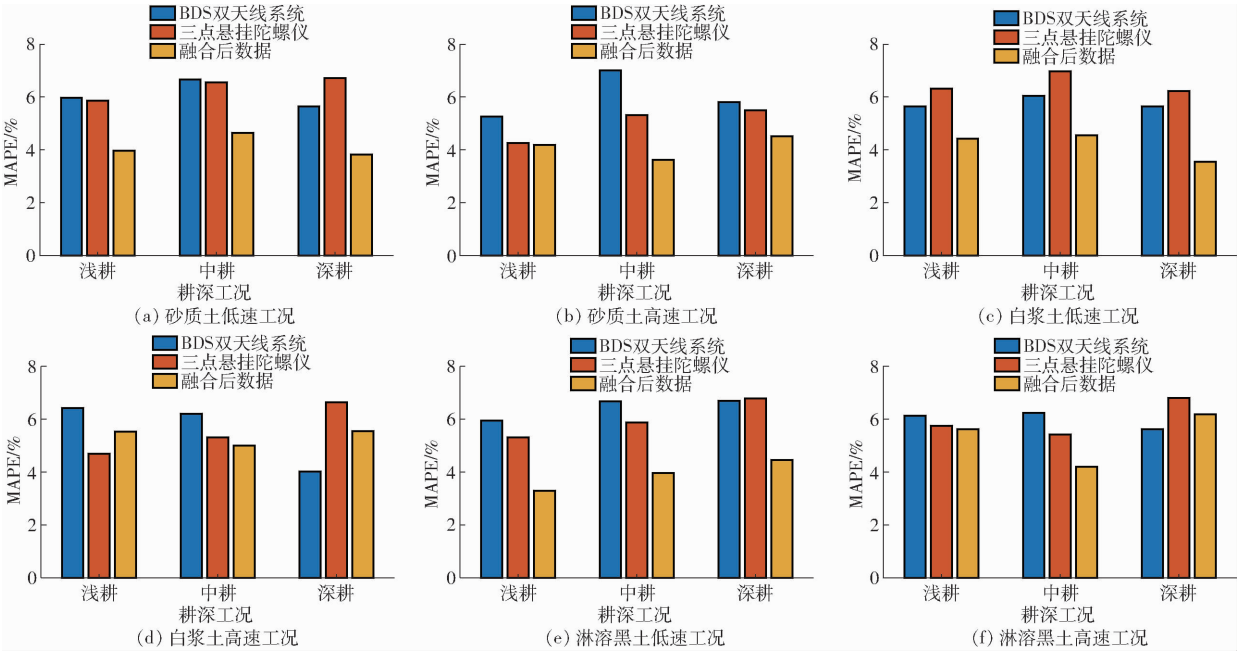


图 19 两种传感器融合结果 MAPE 对比

Fig. 19 MAPE comparison of fusion results of two sensors

结合图 18、19 可以看出,在白浆土工况作业时,BDS 双天线系统输出的耕深较同工况下三点悬挂位姿传感器输出的耕深更接近于真值,而在砂质土工况作业时,两种传感器检测值和真值间的误差接近,而在淋溶黑土工况作业时,则是三点悬挂位姿传感器输出的耕深较同工况下 BDS 双天线系统输出的耕深更接近于真值。原因为,BDS 双天线系统通过天线的中心点的相对距离检测耕深,对车身姿态旋转有时不敏感。从土壤坚实度数据看出淋溶黑土较为松软,会导致车身姿态变化,而白浆土表面较为坚实平坦,更适合 BDS 双天线系统。

同时也可以看出融合后的耕深较单独两种传感器都具有更小的误差,融合后得到的耕深较三点悬挂位姿传感器单个检测的 MAPE 平均提高 2.07%,较 BDS 双天线系统单个检测 MAPE 平均提高 2.30%,表明该算法可以有效将两种数据融合。融合后低速工况下 MAPE 为 3.86%,RMSE 为 0.87 cm,高速工况下 MAPE 为 4.31%,RMSE 为 1.25 cm,平均 MAPE 为 3.95%,平均 RMSE 为 1.08 cm。

由图 19 可知,当预设耕深一样时,比较速度对检测的影响,速度快时,误差会有所增加。对于此现象,是由于速度慢时,传感器在相同一段检测距离上感知的信息更多,加上后期的滤波和融合处理,结果会更偏向真值,而作业速度快时,相同距离信息量就会少。因此,在后期改进中,可以增加传感器采样频率,来获取更多田地信息。当速度一致时,随着耕深增加,误差也有减小的趋势。对于此现象,由于耕深大时,各个传感器绝对变化值大,相对误差会相应减小。综上,本文耕深检测系统在不同土壤、多种工况下均良表现好。

3.6 真值检测方法对比

传统的耕深真值检测方法为刨土测量,但该种方法工作量较大,且对测量点附近的土壤会产生影响,因此,提出了使用单点 RTK - BDS 定位仪进行耕深真值检测的方法。该方法在旋耕前和旋耕后,分别在相同的点位进行检测,通过两次对应点的高程差得到耕深。分别选取砂质土、白浆土、淋溶黑土 3 种土壤中耕工况,检测结果如图 20 所示。

由图 20 可以看出,通过两种方法检测到的耕深真值两者相差不大,基本趋势一致,最大绝对误差为 2.45 cm,平均误差 1.1 cm。利用 BDS 定位系统在精准度相差不大的情况下,人力投入更少,数据也可在系统内自动保存处理,因此,用该方法进行检测可行。

通过双天线和 4 个位姿传感器为检测主体,以

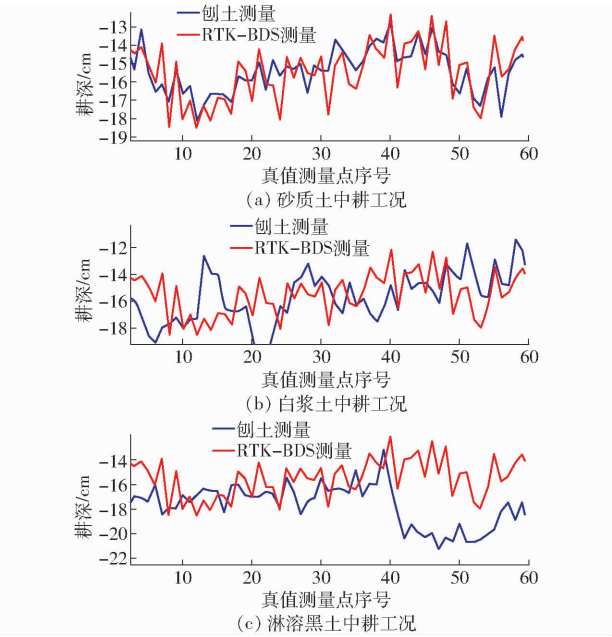


图 20　真值检测法对比

Fig. 20　Comparison diagrams of truth detection method

及相关算法完成了应对不同土壤的旋耕作业深度测量，精度和可靠性均达到预期，且融合后效果较单一传感器有明显提升，证明了检测方法的优越性。且本研究的检测系统成本较低，安装简单，可在未来进一步完善优化上位机界面，并使之产品化推广应用。

4　结论

（1）分析现有的旱地旋耕耕深检测方法的基础上，考虑到含水率较高的土壤，本系统采用多传感器融合的方法，设计了三自由度仿形机构，并分析建立了高精度耕深检测模型。经过耦合仿真试验验证，所设计的仿形机构检测绝对误差小于 0.5 cm，仿形后土槽高程最大形变量为 2.89 mm，满足作业需求。

（2）分析各个传感器在作业过程中所检测到的噪声后，提出了自适应迭代扩展卡尔曼算法进行数据滤波和融合。经过试验验证，在经过 AIEKF 处理后数据较原始数据信噪比平均提升 9.15 dB，较 KF 算法信噪比平均提升 1.41 dB，融合得到的耕深较三点悬挂位姿传感器和 BDS 双天线系统检测的耕深值 MAPE 平均分别提高 2.07% 和 2.30%，有效降低了噪声误差，提高了检测精度，融合后低速工况下 MAPE 为 3.86%，RMSE 为 0.87 cm，高速工况下 MAPE 为 4.31%，RMSE 为 1.25 cm，平均 MAPE 为 3.95%，平均 RMSE 为 1.08 cm。

（3）提出了用 RTK－GPS 高程差测量真值的方式，经过试验验证，该方法和国标规定的刨土检测法，检测的基本趋势一致，最大绝对误差为 2.45 cm，在保证准确情况下，数据还可在系统内自动保存处理，大幅降低农户工作量。

参　考　文　献

[1] 刘成良，林洪振，李彦明. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报，2020，51(1)：1－18.
LIU Chengliang，LIN Hongzhen，LI Yanming，et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(1)：1－18. (in Chinese)

[2] MUDARISOV S，GAINULLIN I，GABITOV I，et al. Soil compaction management：reduce soil compaction using a chain-track tractor[J]. Journal of Terramechanics，2020，89：1－12.

[3] TEKN A B，YALIN H. Design and development of a front mounted on-the-go soil strength profile sensor[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry，2019，43(2)：151－163.

[4] SHAH A N，TANVEER M，SHAHZAD B，et al. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity：an overview[J]. Environmental Science & Pollution Research International，2017，24(11)：1－12.

[5] EDRRIS M K，AL-GAADI K A，HASSABALLA A A，et al. Impact of soil compaction on the engineering properties of potato tubers[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2020，13(2)：163.

[6] 郑侃，何进，王庆杰，等. 联合整地作业机具的研究现状[J]. 农机化研究，2016，38(1)：257－263.
ZHENG Kan，HE Jin，WANG Qingjie，et al. The current research status of ccombined tillage machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2016，38(1)：257－263. (in Chinese)

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 5668—2017 旋耕机[S]. 北京：中国标准出版社，2007.

[8] 栗震霄. 超声波农机作业深度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2000，31(3)：88－91.
LI Zhenxiao. Research and design of operating depth measurement apparatus for farm implement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2000，31(3)：88－91. (in Chinese)

[9] 谢斌，李皓，朱忠祥，等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报，2013，29(4)：15－21.
XIE Bin，LI Hao，ZHU Zhongxiang，et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(4)：15－21. (in Chinese)

[10] VAN DER L S，MOVAZEN 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.

[11] MICHAEL E，ROBERT B G. Computer vision based pose detection of agricultural implements without a priori knowledge of their geometry and visual appearance[C]//2018 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based

Surveillance (AVSS), 2018.
[12] HIREMATH S A, VAN DER HEIJDEN G W A M, VAN EVERT F K, et al. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 41 - 50.
[13] 黄培奎, 张智刚, 罗锡文, 等. 农机具姿态倾角测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 9 - 16.
HUANG Peikui, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design and test of tilt angle measurement system for agricultural implements[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 9 - 16. (in Chinese)
[14] SESNIE S E, JOHNSON L, YURCICH E, et al. Multisensor models for assessing recurrent fire compatibility with habitat recovery for a critically endangered species[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 269: 112824.
[15] 夏俊芳, 李栋, 刘国阳, 等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 386 - 395.
XIA Junfang, LI Dong, LIU Guoyang, et al. Design and test of electro-hydraulic monitoring device for hitch tillage depth based on measurement of tractor pitch angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 386 - 395. (in Chinese)
[16] 王雷, 杜治千, 汪凌, 等. 耕深测量装置研究与多元线性回归模型预测分析[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 139 - 145.
WANG Lei, DU Zhiqian, WANG Ling, et al. Research on tillage depth measuring device and prediction analysis of MLR model [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(6): 139 - 145. (in Chinese)
[17] 蒋啸虎, 佟金, 马云海, 等. 基于卡尔曼滤波融合算法的深松耕深检测装置研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 53 - 60.
JIANG Xiaohu, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Study of tillage depth detecting device based on Kalman filter and fusion algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 53 - 60. (in Chinese)
[18] KIM Y, KIM T, KIM Y, et al. Development of a real-time tillage depth measurement system for agricultural tractors: application to the effect analysis of tillage depth on draft force during plow tillage[J]. Sensors, 2020, 20(3): 912 - 918.
[19] WU Q, MA Y, LI D, et al. Denoising algorithm of ground-airborne time-domain electromagnetic method based on Variational Bayesian-based adaptive Kalman filter (VBAKF)[J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 202: 104674.
[20] YUAN Z Q, WANG Z C, XIN Y, et al. Synchronous identification of nonlinear structural parameters and unknown external excitation based on improved UKF[J]. Engineering Structures, 2024, 298: 117094.
[21] LIU N, SU Z, LI Q, et al. A combined CKF - PSR method for random noise compensation of vibratory gyroscopes[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 25: 100241.
[22] GAO Z, GE M, LI Y, et al. Modeling of multi-sensor tightly aided BDS triple-frequency precise point positioning and initial assessments[J]. Information Fusion, 2020, 55: 184 - 198.
[23] CHIANG K W, TSAI G J, CHANG H W, et al. Seamless navigation and mapping using an INS/GNSS/grid-based SLAM semi-tightly coupled integration scheme[J]. Information Fusion, 2019, 50: 181 - 196.
[24] 汪凌. 水田旋耕耕深与平整度测量方案研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
WANG Ling. Research on the measurement scheme of paddy rotary tillage depth and flatness[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021. (in Chinese)
[25] 丁启朔, 任骏, BELAL E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38 - 48 (in Chinese)
[26] 吕金庆, 刘金妮, 赵治明, 等. 马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 19 - 29.
LÜ Jinqing, LIU Jinni, ZHAO Zhiming, et al. Design and test of key components of potato soil-crushing site preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 19 - 29. (in Chinese)
[27] 张冲, 范旭辉, 李明森, 等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 52 - 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and test of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 52 - 59. (in Chinese)