[文章编号] 1003－4684(2025)05-0011-07

水田复式整地机自动控制系统的设计与试验

李 乐[1]，王焱清[1,2]

(1 湖北工业大学农业机械工程研究设计院，湖北 武汉 430068；
2 湖北省农机装备智能化工程技术研究中心，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对传统农机多姿态调节程度较低的问题，设计一种基于双姿态传感器的水田自动整地系统，不仅确定了复式整地机姿态检测方法，还进行了液压油路设计。该系统以 STM32F103 单片机为核心控制器，配备双姿态传感器，基于嵌入式实时操作系统 RT-Thread 开展多任务软件设计，实现了复式整地机耕深和角度同步调节。实验结果显示：整地试验后的最大耕深差由 20.8 cm 降至 13.2 cm；耕深小于 3 cm 的分布比例由 17%提升至 62%；地面平整度由 5.1 cm 优化至 2.9 cm。由此可见，改进后的系统显著提升了水田整地的平整度。

[关键词] 水田自动整地系统；双姿态传感器；同步调节；RT-Thread
[中图分类号] S222.5 [文献标识码] A

传统农机的姿态自动调节程度较低，难以适应田间复杂的工作状况。在水田整地作业时，由于硬底层凹凸不平，拖拉机随地势上下波动，致使整地机的姿态也随之改变，不仅会出现空载、整地耕深过高、拖拉机熄火等现象[1-2]，还会影响水田整地的均匀性[3-4]。

当前，针对水田泥脚深浅不一、土壤承受能力差异大以及泥水工况恶劣等复杂作业环境的整地机研究较为单一，尚无完善的产品。胡炼等[11]设计了一种用于旋耕作业的自动调平系统。该系统通过传感器实时采集拖拉机横滚角数据，精准控制调平油缸动作，使旋耕机具始终保持水平状态；同时以油缸伸出位移作为反馈信号，构建闭环控制系统，显著提升耕作稳定性。万松等[12]设计了一款与旋耕机配套的平地系统。该系统利用倾角传感器采集平地托板姿态角，通过调节油缸实现托板姿态调整。试验结果显示，该系统能有效提升水田平整度，但平地托板的高程调节仍需人工手动操作完成。杨青丰等[13]设计的一套应用于激光平地机的自动调平系统，采用双油缸替代提升杆作为执行机构，显著提升了田面平整度。然而，该双油缸策略因对拖拉机原有结构改动较大，导致其无法适配不同型号的拖拉机，存在通用性不足的问题。梁冉冉等[14]研发了一套基于双 GNSS 的精准平地系统。该系统借助双 GNSS 实时获取机具的高程与角度信息，并通过控制双油缸实现机具姿态的精准调节。试验结果显示，该系统的平地精度能够满足作业要求。周俊等[15]设计了一款水田旋耕平地一体机。该设备采用双 GNSS 获取机具的高程和倾角数据，通过控制姿态调节油缸实现机体姿态调整，同时利用蓄能器有效解决液压油温过高问题，经不同工况下的田间试验验证，其平整度均达到作业标准。然而，由于该一体机的平地功能由旋耕机挡板实现，无法根据不同作业工况灵活调节旋耕机与平地铲的相对位置，导致设备通用性较差。而国外科研人员早在 21 世纪初期就在自动整地控制系统领域取得卓越成就，主要代表有日本 Topcon 公司的 System 5 土地平整系统[16]、加拿大 Forward 集团的 GCS900 系统[17]、瑞士 Leica 公司的 GNSS 平地控制系统[18]、美国 trimble 公司的 Field Level 系统[19]、美国 John Deere 公司的 NEW IGradeTM 系统[20]。

针对现有水田整地设备存在的通用性差等问题，本文设计了一套水田复式整地机自动整地系统。在设计过程中，从三个维度进行优化：对整机结构重新布局，加强关键部件强度，提升其在复杂水田环境下的稳定性与耐用性；对液压系统进行油路优化与散热机制改进，有效提高系统工作效率与可靠性；对控制系统实施智能化升级，引入高精度传感器与先进算法，实现精准作业控制。最后，通过涵盖不同作业工况、土壤条件的多维度田间试验，充分验证了该系统的实用性。

[收稿日期] 2024－01－24
[第一作者] 李 乐(1995－)，男，湖北黄冈人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为智能农机控制。

1 整机结构和液压系统

1.1 整机结构

旋耕平地复式整地机选用湖北迪拿尔科技有限公司生产的 HF4900 型平地铲，配套 1GKN-250Z 型水田旋耕机。其中，1GKN-250Z 型水田旋耕机的旋耕幅宽 260 cm，耕深范围为 16～20 cm；HF4900 型平地铲的平地作业幅宽 490 cm，高程调节范围达 153 cm，刮土角度可在 34°～65°之间灵活调节。复式整地机组成如图 1 所示。



(a)6B-1104 型拖拉机



(b)1GKN-250Z 型旋耕机



(c)HF4900 平地铲



(d)集成控制器



(e)液压系统



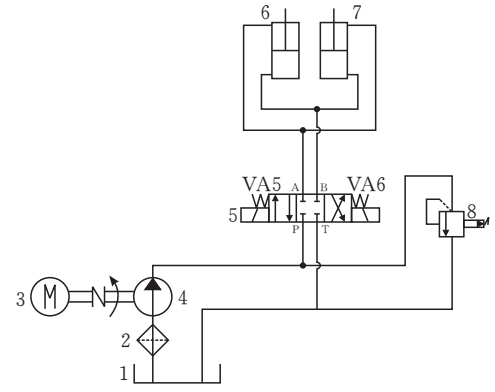
(f)姿态传感器

图 1 整机组成

1.2 液压系统

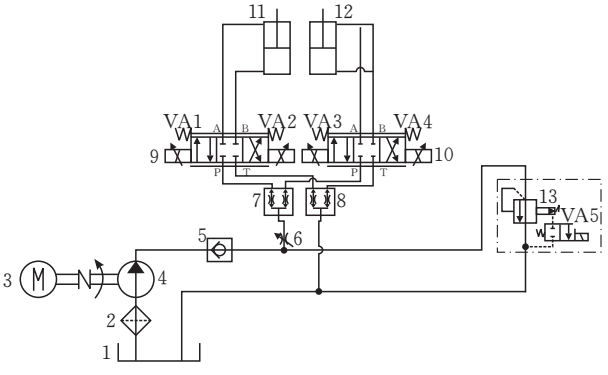
根据作业要求设计了液压原理图(图 2)。系统采用分流集流阀解决左右提升油缸的流量分配问题，但在实际作业过程中发现，油缸上升与下降调节速度存在差异，下降过程因较大惯性引起振动甚至超调。为解决该问题，在下降油路中增设单向节流阀，通过调节下降速度有效改善上述状况。此外，由于复式整地机自身重力大，加之耕深过大时会显著增加作业负载，导致拖拉机频繁出现熄火等现象[21]。为此，利用电磁溢流阀内部的二位二通电磁阀实现系统卸荷功能，这一举措不仅解决了拖拉机熄火问题，还能为系统提供稳定的工作压。

选取约翰迪尔 6B-1104 型拖拉机的左右提升油缸作为整地机姿态调节机构，在此基础上对其自带



1－油箱；2－过滤器；3－发动机；4－齿轮泵；5－普通换阀；6，7－整地机姿态调节油缸；8－溢流阀

(a)原拖拉机液压油路



1－油箱；2－过滤器；3－发动机；4－齿轮泵；5－单向阀；6－单向节流阀；7，8－分流集流阀；9，10－比例换向阀；11，12－整地姿态调节油缸；13－电磁溢流阀

(b)改装后液压油路

图 2 液压原理

液压系统开展优化设计。具体改装流程如下：1)拆装原拖拉机普通换向阀的回油口，将整地机液压系统与之并联；2)拆卸原拖拉机的提升油路，把进出油口连接至液压集成阀；3)使用端子将原回油口进行封堵。改装过程如图 3 所示。

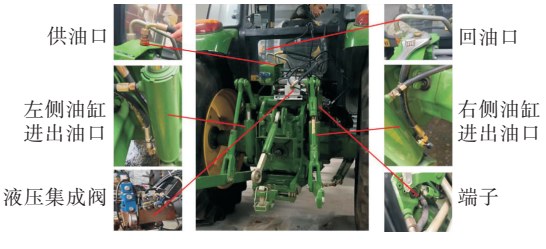


图 3 液压系统改装

2 整机控制模型建立

2.1 控制原理

以旋耕平地复式整地机为控制对象，融合传感技术实时监测复式整地机与拖拉机的姿态信息，并引入嵌入式实时操作系统，协同液压系统实现复式整地机高度与水平状态的同步调节。其控制原理如图 4 所示。具体工作流程为：作业人员通过控制面

板将目标耕深和目标角度阈值输入嵌入式集成检测系统，系统对输入的目标值进行分析处理后，输出相应电信号。该电信号驱动液压集成阀切换液压油路流向，调节流量，进而精准控制液压活塞的伸缩运动。液压活塞的伸缩带动悬挂装置运动，使其达到设定位置，最终完成复式整地机的姿态调节 。

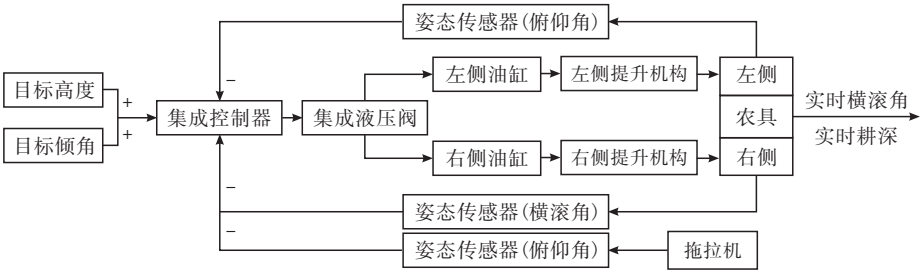


图 4　控制原理

2.2　复式整地机模型建立

2.2.1　耕深与俯仰角的模型建立　当拖拉机作业时，其俯仰姿态易受田间地势影响而发生变化，进而导致与之相连的整地机产生同步俯仰。为解决这一问题，提出双俯仰角监测耕深的策略[22]。该策略通过实时监测整地机的俯仰角 β 和拖拉机俯仰角 α，间接获取整地机的实时耕深数据。其运动规律如图 5 所示。具体而言，当拖拉机发生仰倾时，整地机绕着 C_0 做圆周运动，由初始位置 A_0 逆时针转动至 A_1，此时耕深变为 H_2。当机具抬起时，则绕着 B_0 点做圆周运动，由 A_0 逆时针转动至 A_2，耕深相应变为 H_1。

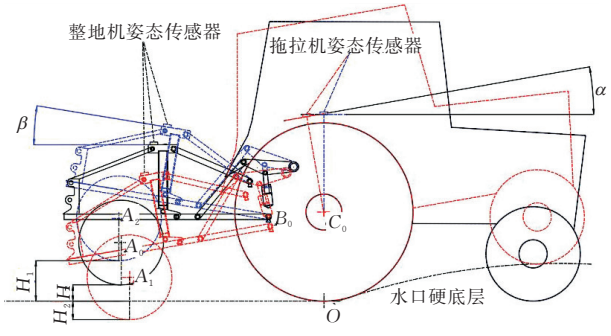


图 5　耕深与双俯仰角的运动规律

根据其运动规律，建立复式整地机的耕深 h 与俯仰角的数学模型(图 6)。

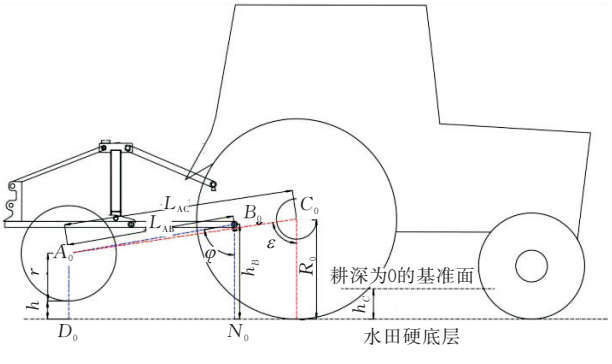


图 6　耕深与俯仰角的模型

由四边形 $A_0B_0N_0M_0$ 可得：

$$h = h_B - r - L_{AB}\cos(\varphi + \beta - \alpha) \tag{1}$$

由四边形 $A_0C_0OD_0$ 可得：

$$h = R_0 - r - L_{AC}\cos(\varepsilon - \alpha) \tag{2}$$

式中：r 为旋耕机铰刀盘半径的长度，mm；R_0 为拖拉机后轮胎半径的长度，mm；L_{AB} 为 AB 的长度，mm；L_{AC} 为 AC 的长度，mm；h_B 为铰接点 B_0 距离硬底层的高度，mm；h 为旋耕铰刀最底端距离水田硬底层的高度，mm；β 为复式整地机的俯仰角的角度，(°)，且仰角为正，俯角为负；φ 为夹角 $A_0C_0N_0$ 的角度，(°)。

结合式(1)和(2)，此时的耕深 h 与俯仰角 β、α 函数关系式：

$$h = R_0 - r - L_{AC}\cos(\varepsilon - \alpha) + h_B - r - L_{AB}\cos(\varphi + \beta - \alpha) \tag{3}$$

作业时以高于硬底层 200 mm 的高度作为耕深为 0 的基准面，代入 $h_c = 200$ mm、$R_0 = 520$ mm、$r = 250$ mm、$L_{AC} = 1213$ mm、$L_{AB} = 1098$、$\varepsilon = 81.44°$、$\varphi = 79.61°$，可得俯仰角与耕深之间的数学关系式：

$$h = 427 - 1213\cos(81.44 - \alpha) - 1098\cos(79.61 + \beta - \alpha) \tag{4}$$

2.2.2　耕深与横滚角的模型建立　在拖拉机田间作业过程中，其姿态变化不仅体现在俯仰维度受地势影响，水平姿态同样会因地形起伏、地面不平整等因素产生波动。为实现对复式整地机水平状态的精准监测与控制，提出横滚角监测水平姿态的策略。该策略以实时监测复式整地机的横滚角为核心，通过横滚角数据可直接反映整地机的实时水平状态，并在此基础上构建起水平横滚角与耕深之间的数学模型。

为便于进行数学推算与分析，将整地机各铰接处投影至行驶作业面。如图 7 所示，G_L、G_R 为下拉杆左右侧与机体铰接点，B_L、B_R 为旋耕铰刀左右端点。通过对这些关键点位在投影面上的几何关系分析，结合横滚角数据，能够更准确地解析整地机水平姿态变化对耕深的影响 。

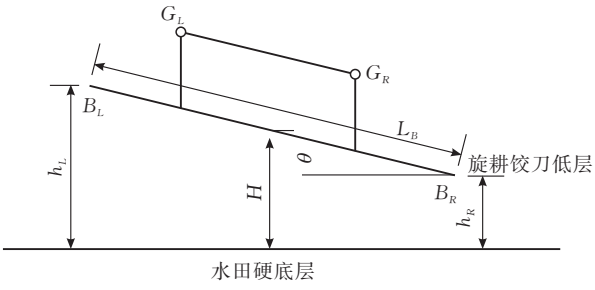


图 7 耕深与横滚角的模型

复式整地机左右侧耕深与其横滚角 θ 的关系：

$$h_L = H + \frac{1}{2}\sin\theta \cdot L_B \tag{5}$$

$$h_R = H - \frac{1}{2}\sin\theta \cdot L_B \tag{6}$$

式中：L_B 为 B_L、B_R 两点的距离，mm；h_L 为旋耕机铰刀左端耕深，mm；h_R 为旋耕机铰刀右端耕深，mm；H 为旋耕作业面距离硬底层的深度，mm；θ 为复式整地机横滚角的角度，(°)，且左高右低为正。

2.2.3 耕深与油缸总长度的模型建立 在作业过程中，由于控制系统需依据机具姿态对油缸进行实时调节，因此建立了如图 8 所示的耕深与油缸总长度的数学模型。为便于模型构建与分析，将复式整地机投影至左视平面内[23]，通过这种方式简化空间关系，从而更精准地确定耕深与油缸长度之间的数学关联。

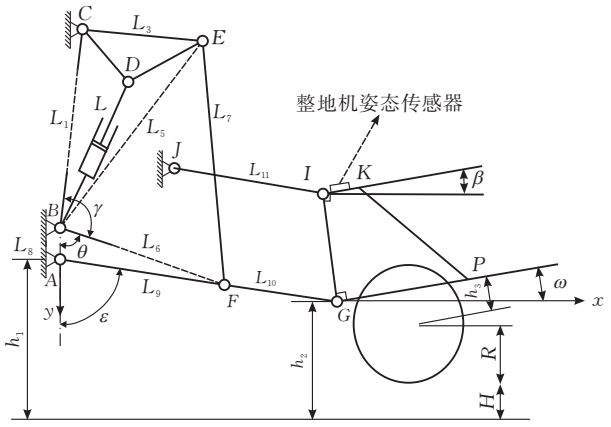


图 8 耕深与油缸总长度的数学模型

图 8 中：$BD(L)$ 为油缸，CDE 为提升臂，$EF(L_7)$ 为提升杆，$AFG(L_9、L_{10})$ 为下拉杆，$IJ(L_{11})$ 为上拉杆，$GIKP$ 为机具；L_1、L_2、L_3、L_4、L_5、L_6、L_8 分别为 BC、CD、CE、DE、BE、AB 的长度，mm；θ、α、ε、φ、γ 分别为夹角 $\angle ABF$、$\angle yCE$、$\angle FAy$、$\angle BCD$、$\angle CBF$ 的角度，(°)；h_1、h_2 分别为 A 点、G 点距离硬底层的高度，mm；H 为旋耕铰刀最低点到硬底层的高度，mm。

忽略拖拉机的姿态，悬挂机具左右侧耕深 H_L、H_R 与复式整地机的俯仰角 β 和横滚角 θ 的函数表达式：

$$H_L = h_1 - h_3 \cdot \cos\beta - R + \frac{1}{2}\sin\theta \cdot L_A - (L_9 + L_{10})$$

$$\cos\angle ABC - \arccos\frac{L_1^2 + L^2 + L_2^4 - 2L \cdot L_4\cos(360° - \arccos\dfrac{L_2^2 + L^2 - L_1^2}{2L_2 \cdot L} - \angle\mathrm{CDE}) - L_2^3}{2L_1 \cdot L_5} - \arccos\frac{L_2^5 + L_2^6 - L_2^7}{2L_5 \cdot L_6} + \arccos\frac{L_2^6 + L_2^9 - L_2^8}{2L_6 \cdot L_9} \tag{7}$$

$$H_R = h_1 - h_3 \cdot \cos\beta - R - \frac{1}{2}\sin\theta \cdot L_A - (L_9 + L_{10})$$

$$\cos\angle ABC - \arccos\frac{L_1^2 + L^2 + L_2^4 - 2L \cdot L_4\cos(360° - \arccos\dfrac{L_2^2 + L^2 - L_1^2}{2L_2 \cdot L} - \angle\mathrm{CDE}) - L_2^3}{2L_1 \cdot L_4} - \arccos\frac{L_2^5 + L_2^6 - L_2^7}{2L_5 \cdot L_6} + \arccos\frac{L_2^6 + L_2^9 - L_2^8}{2L_6 \cdot L_9} \tag{8}$$

式中：L、L_2、L_5、L_6、L_7、L_8、L_9、L_{10} 分别为 BD、BC、CD、BE、EF、AB、AF、FG 的长度，mm；θ、ε、γ、ω 分别为夹角 $\angle ABF$、$\angle yAF$、$\angle CBF$、$\angle xGP$ 的角度，(°)；β 为整地机俯仰角的角度，(°)；h_1 为 A 点距离硬底层的高度，mm；h_2 为 G 点距离硬底层的高度，mm；H 为旋耕铰刀最低点到硬底层的高度，mm；h_3 为旋耕铰刀中心到减速箱的距离，mm；R 为旋耕铰刀半径，mm。

结合式(5)和(8)可得悬挂装置左右侧提升油缸总长度 L_L、L_R 与机体姿态角函数表达式：

$$L_L = 3.1967\arccos\frac{1404 - 190 \cdot \cos\beta - 1213\cos(81.44 - \alpha) - 1098\cos(79.61 + \beta - \alpha) + 440\sin\theta}{798} + 228.7387 \tag{9}$$

$$L_R = 3.1967\arccos\frac{1404 - 190 \cdot \cos\beta - 1213\cos(81.44 - \alpha) - 1098\cos(79.61 + \beta - \alpha) - 440\sin\theta}{798} + 228.7387 \tag{10}$$

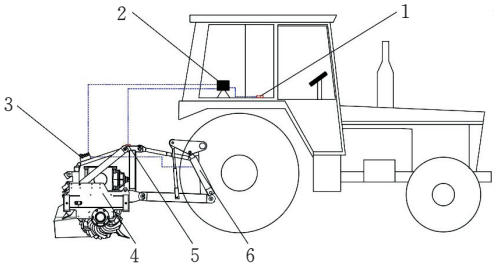
式中：β 为整地机俯仰角，(°)；α 为拖拉机俯仰角，(°)；θ 为整地机横滚角，(°)；L 为提升油缸总长度，mm；ε 为下拉杆与 y 轴夹角，(°)。

在实际田间作业场景中，将传感器实时采集的机具姿态数据分别代入式(9)和式(10)，可精确计算出左右提升油缸的实时总长度。同时，将相同的姿态数据代入式(4)，便能获取悬挂机具的实时耕深数值。通过构建悬挂装置的数学模型，建立起机具姿

态信息、提升油缸总长度及耕深三者之间的量化关系，从而实现三者数据的间接转化与相互推导，为控制系统精准调节油缸、保障作业精度提供数据支撑。

3　控制系统设计

基于双姿态检测的电液控制系统对传统操作与控制方式进行了革新。在操作层面，以集成控制箱替代传统机械手柄操作机构，用户不仅能通过触摸屏幕按键便捷地对复式整地机进行姿态调节，还可实时获取整地机的姿态反馈信息，在有效提升用户操作体验的同时，显著提高作业效率。液压控制方面，采用电磁比例换向阀替换原有的机械式分配器，借助 PWM 信号精准控制油缸伸缩，实现对复式整地机的精确监测与控制。该控制系统的结构如图 9 所示，主要包括：集成控制箱、液压集成阀、拖拉机姿态传感器、复式整地机姿态传感器、整地机姿态调节油缸。

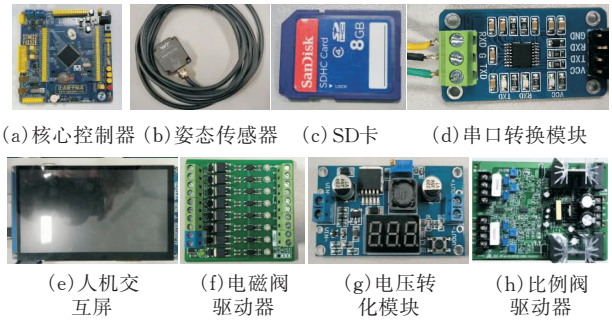


1—拖拉机姿态传感器；2—集成控制器；3—液压集成阀；
4—复式整地机；5—整地机姿态传感器；
6—整地机姿态调节油缸

图 9　基于双姿态检测的电液控制系统结构

3.1　系统硬件组成

控制系统硬件由 STM32F103ZET6 型核心控制器、SINDT02-232 型双轴姿态传感器、LM2596S 电压转换模块、PF-DC-10 型比例阀驱动器、TJC8048X370 型人机交互屏、SV-5A1R8P-N 型电磁阀驱动器、MicroSDHC 8G 型 SD 卡等组成。其硬件组成实物如图 10 所示。



(a)核心控制器　(b)姿态传感器　(c)SD卡　(d)串口转换模块

(e)人机交互屏　(f)电磁阀驱动器　(g)电压转化模块　(h)比例阀驱动器

图 10　硬件组成实物

3.2　控制系统软件设计

控制程序基于 RT-Thread 实时操作系统联合 STM32CubeMX 进行开发，采用线程化设计实现功能模块的解耦与并发处理。系统将不同功能封装为独立线程，通过配置线程优先级实现任务调度，并利用 RT-Thread 内核提供的信号量(semaphore)、互斥量(mutex)和事件集(event set)机制精确控制线程执行顺序，确保关键任务优先处理。线程间数据交换通过邮箱(mailbox)和消息队列(message queue)实现，保证数据传输的可靠性与实时性[24]。控制系统程序启动后，系统先进行内核对象、片上外设初始化，结束后线程让出 CPU 控制权。线程调度器会唤醒当前就绪队列中优先级最高的线程，从而完成 HMI 处理、作业标定、手动作业、自动作业等功能。如图 11 为软件系统的线程调度流程。

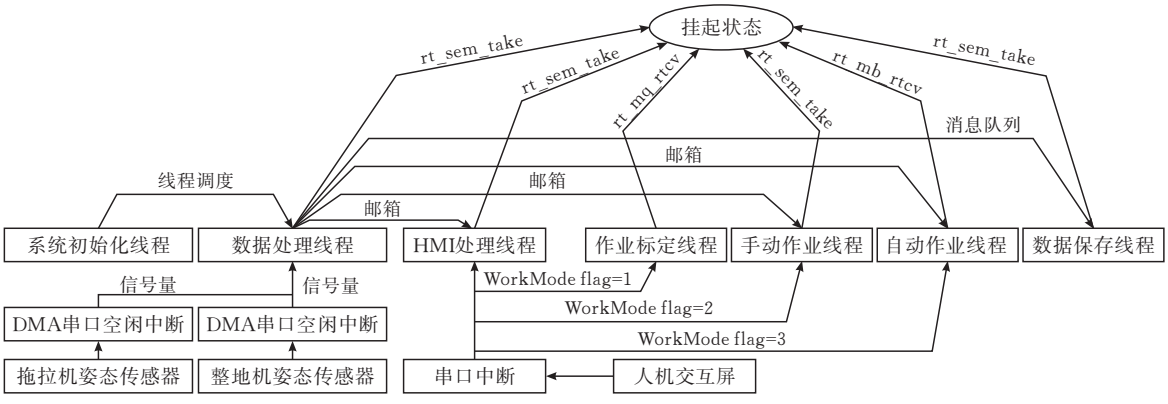


图 11　软件系统的线程调度流程

4　试验与结果分析

4.1　田间试验

复式整地机田间试验于 2023 年 8 — 9 月在鄂州市蒲团乡开展，试验场地选取一块面积为 30 m×30 m 的水稻田。为了保障后续初耕打浆、旋平整地作业的顺利进行，试验前对该田块进行放水浸泡处理。

4.2　试验结果与分析

采用网格式标点，将田块每隔 3 m 进行划分，即横向标记 10 个点，纵向标记 10 个点，共计 100 个测量点，用卷尺测量每个标记点处泥浆到水面的距

离作为平整度的数据。旋耕平地作业前后标记点处的整地数据如表 1 与表 2 所示。通过分析旋耕平地前后作业效果，评估了该整地机的稳定性与实用性。

表 1 耕作前标记点数据 cm

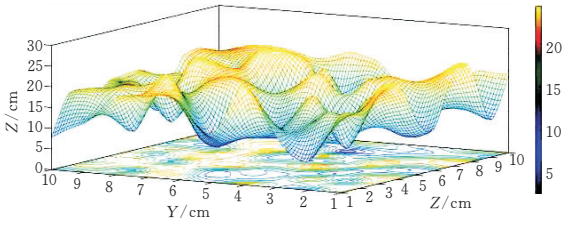
测量点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	18.8	18.5	22.8	22.8	12.5	10.3	22.6	21.8	9.1	18.9
2	7.0	17.8	7.9	18.2	11.7	9.5	18.3	18.2	11.1	19.0
3	12.1	10.6	20.0	8.2	10.3	20.4	20.1	12.1	9.5	13.0
4	23.7	11.8	9.5	11.8	22.6	11.7	11.8	8.6	12.6	9.8
5	11.7	8.8	11.2	10.7	17.8	11.3	21.0	3.1	12.3	19.0
6	18.6	9.4	7.7	19.8	18.5	8.6	11.1	20.3	6.1	21.2
7	19.5	23.8	17.8	19.2	19.5	19.8	23.9	23.1	18.3	19.0
8	18.4	9.4	20.0	9.5	22.8	18.8	11.3	19.3	18.4	20.8
9	11.8	18.8	18.8	18.1	10.6	18.6	10.2	11.5	18.2	20.9
10	7.8	17.6	12.4	17.8	18.8	18.3	12.3	19.4	20.7	18.9

表 2 耕作后标记点数据 cm

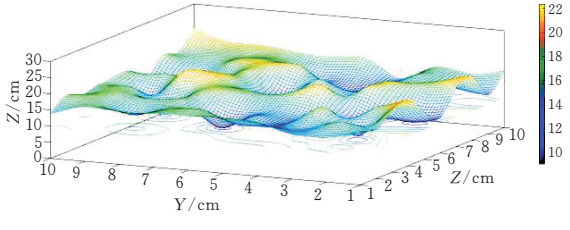
测量点序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15.9	15.2	19.4	20.4	14.4	11.0	18.3	19.7	13.6	15.6
2	13.8	16.7	10.3	17.0	12.1	10.4	17.0	17.0	16.4	16.8
3	13.9	13.9	18.3	12.4	13.1	18.6	18.4	14.4	12.4	12.2
4	16.6	13.2	12.4	13.4	20.3	12.1	13.2	12.6	12.4	17.6
5	17.1	12.9	13.7	14.3	16.7	11.8	17.1	18.6	13.9	17.3
6	16.8	16.6	9.1	16.2	16.5	10.8	11.6	18.7	11.9	17.6
7	16.5	16.2	16.7	17.7	17.9	18.2	18.3	17.8	17.2	18.9
8	16.4	13.1	16.3	11.4	20.5	17.5	12.8	12.9	17.0	19.0
9	16.9	16.7	17.4	16.9	11.2	17.3	11.0	17.9	16.9	17.7
10	13.9	17.5	15.6	16.7	17.4	17.1	12.5	12.1	17.5	22.3

为了更好地体现复式整地机的作业效果，利用 MATLAB 软件对耕作前后测量的数据进行插值处理，绘制成如图 12 所示的三维地势图，以便使整地机作业效果更加直观。

由图 12 可知，经过自动整地作业后，田面整体高差分布得到显著改善，田块边缘的凹陷与凸起程度明显削弱。



(a)整地前



(b)整地后

图 12 整地前后三维地势

结合图 13 所示的实际整地效果，依据作业效果评定指标对耕深数据进行测量与计算，具体分析结果如表 3 所示。试验数据显示：整地作业后最大耕深差由 20.8 cm 降至 13.2 cm，耕深差值小于 3 cm 的分布比例从 17%大幅提升至 62%，田面平整度指标由 5.1 cm 优化至 2.9 cm。以上数据表明，该复式整地机有效提升了水田平整度，作业效果良好。

表 3 整地数据结果

	最大耕深差/cm	耕深分布比例/%	标准偏差/cm
整地前	20.8	17	5.1
整地后	13.2	62	2.9



图 13 整地效果

5 结束语

1)根据复式整地机的高度和角度姿态调节工作原理，确定以拖拉机俯仰角和整地机俯仰角作为耕深参数。并以整地机横滚角作为关键水平参数，分析了悬挂装置各部件之间的几何关系，构建姿态检测模型，完成了姿态角、油缸总长度、耕深三者之间的相互转换。

2)分析了拖拉机液压系统以及悬挂装置，结合复式整地机姿态调节要求，设计了液压油路，完成了对复式整地机液压系统的改装。

3)以 STM32F103 单片机作为系统核心控制器，搭配双姿态传感器、HMI 串口屏等元件完成硬件平台的搭建。同时基于 RT-Thread 实时操作系统联合 STM32CubeMX 完成软件编程。

4)为验证该机结构以及田间性能，进行了田间整地试验。结果表明该复式整地机结构设计合理，控制方法稳定可靠，水田平整度得到有效改善。

[参 考 文 献]

[1] 赵润茂，胡炼，罗锡文，等. 基于时序的水田平地机俯仰角预测建模与试验[J]. 农业工程学报，2018，34(11)：34-39.

[2] 胡炼，罗锡文，林潮兴，等. 1PJ-4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报，2014，45(04)：146-151.

[3] 胡炼，殷延勃，杜攀，等. 水稻田激光平地技术研究与展望[J]. 中国稻米，2020，26(05)：16-18.

[4] 陈正，庄卫东. GNSS 平地机研究现状及趋势展望[J]. 南方农机，2021，52(07)：13-14.

[5] 赵祚喜，罗锡文，李庆，等.基于 MEMS 惯性传感器融合的水田激光平地机水平控制系统[J].农业工程学报，2008(06)：119-124.

[6] 于志成，王熙. 水田复式整地机自动调平装置的设计与研究[J]. 农机化研究，2017，39(08)：175-179.

[7] 胡炼，林潮兴，罗锡文，等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2015(08)：15-20.

[8] 丁为民，孙元昊，赵思琪，等. 犁旋一体机自动调平系统设计与试验[J]. 农业工程学报，2018，34(17)：25-31.

[9] 张盟，胡炼，可欣荣，等. 水田自走式喷雾机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农机化研究，2019，41(10)：45-51.

[10] 胡炼，杨伟伟，许奕，等.基于 GPS 技术的水田平地机的设计与试验[J].华南农业大学学报，2015，36(05)：130-134.

[11] 周浩，胡炼，罗锡文，等.旋耕机自动调平系统设计与试验[J].农业机械学报，2016，47(S1)：117-123.

[12] 万松，陈子林，展鹏程，等. 基于传感技术的水田旋耕机平地系统的设计与试验[J]. 华中农业大学学报，2016，35(04)：129-135.

[13] 杨青丰，尚业华，刘思雨，等. 激光平地机自动调平控制系统的研制[J]. 安徽农业科学，2017，45(34)：218-221.

[14] 梁冉冉，庄卫东. 基于双天线 GNSS 的精准平地控制系统试验研究[J]. 农机化研究，2020，42(04)：170-174.

[15] 周俊，许建康，王耀羲，等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报，2020，51(04)：38-43.

[16] LI Y，XU D，LI F，et al. Application of GPS technology in agricultural land levelling survey[J]. Nongye Gongcheng Xuebao(Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering)，2005，21(01)：66-70.

[17] HU L，YANG W W，HE J，et al. Roll angle estimation using low cost MEMS sensors for paddy field machine [J]. Computers and Electronics in Agriculture，2019，158：183-188.

[18] LEE J，YAMAZAKI M，OIDA A，et al. Field performance of proposed foresight tillage depth control system for rotary implements mounted on an agricultural tractor[J]. Journal of Terramechanics，2000，37(02)：99-111.

[19] ARYAL J P，MEHROTRA M B，JAT M L，et al. Impacts of laser land leveling in rice-wheat systems of the north-western indo-gangetic plains of India[J]. Food Security2015，7(03)：725-738.

[20] GÜRKAN İRSEL，M. Tahir Altinbalik. Adaptation of tilt adjustment and tracking force automation system on a laser-controlled land leveling machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2018，150：374-386.

[21] 侯明亮，毛恩荣，任显云. 激光平地机液压卸载回路及阀的研制[J]. 液压与气动，2005(06)：57-59.

[22] 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(08)：386-395.

[23] 赵国栋. 电动拖拉机电动悬挂装置设计与试验研究[D].北京：中国农业科学院，2019.

[24] 盛蔚，贺彪，高彤. 基于 RT-Thread 的无人机数据记录仪设计与实现[J]. 电子技术应用，2018，44(04)：10-13.

Design and Experimentation of Automatic Control System for Paddy Field Compound Soil Leveling Machine

LI Le，WANG Yanqing

(1 *Agricultural Machinery Engin.Research and Design Institute，Hubei Univ. of Tech.，Wuhan* 430068，*China*；
2 *Agricultural Equipment Intelligent Engin.Tech.Research Center of Hubei Province，Wuhan* 430068，*China*)

Abstract：In order to solve the problem of low degree of multi-attitude adjustment of traditional agricultural machinery，an automatic land preparation system for paddy field based on dual attitude sensor was designed. The attitude detection method of the compound soil preparation machine was determined，and the hydraulic oil circuit design was carried out. The system takes the STM32F103 microcontroller as the core controller，with dual attitude sensors，and realizes the multi-task software design based on the embedded real-time operating system RT-Thread，which realizes the synchronous adjustment of the depth and angle of the soil preparation machine. The experimental results show that the maximum tillage depth difference is reduced from 20.8cm to 13.2cm，the tillage depth distribution column less than 3cm is increased from 17% to 62%，and the flatness is increased from 5.09cm to 2.92cm，and the improved system effectively improves the flatness of paddy field.

Keywords：Automatic land preparation system for paddy fields；Dual Attitude Sensor；Synchronous adjustment；RT-Thread

[责任编校：张　众]