

ICS
CCS

团体标准

T/CAAMM XXXX—202X/T/NJ XXXX—202X

农业机械 无人驾驶协同系统架构规范

Specification for Unmanned Driving Collaborative System Architecture of
Agricultural Machinery

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国农业机械工业协会 发布

目 次

目 次	I
前 言	III
农业机械无人驾驶协同系统架构规范	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、缩略语	2
3.1 术语和定义	2
3.2 缩略语	3
4 系统组成	3
4.1 “数”：数据、模型、算法	4
4.2 “云”：云连接、云交互、云服务	4
4.3 “端”：传感器、农机装备、应用交互软件	4
5 各模块功能	4
5.1 “数”模块功能	5
5.2 “云”模块功能	6
5.3 “端”模块功能	8
6 技术指标要求	9
6.2 全域定位精度要求	10
6.3 电子地图技术要求	10
6.4 自动避障技术要求	11
6.5 农机装备循迹技术要求	11
6.6 数据安全要求	11
6.7 数据存储要求	11
6.8 可靠性要求	11

7 运行配置要求	11
7.1 “数”模块运行配置要求	11
7.2 “云”模块运行配置要求	12
7.3 “端”模块传感器和农机装备配置要求	12
7.4 传输环境要求	13
8 测试方法	13
8.1 测试场景	13
8.2 数据通信测试	13
8.3 功能测试方法	14
8.4 性能测试方法	14
8.5 可靠性测试	16

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的提出和发布单位不承担识别专利的责任。

本文件由中国农业机械工业协会提出。

本文件由中国农业机械工业协会归口。

本文件起草单位：深圳市现代农业装备研究院、广东省现代农业装备研究所、广州市健坤网络科技发展有限公司、华南农业大学、奥比中光科技集团股份有限公司、深圳本华科技有限公司、仲恺农业工程学院、山东省农业机械科学研究院。

本文件主要起草人：李翠霞、孟祥宝、钟林忆、陈贝章、郑立旺、谭俭辉、李传祥、张泽孜、潘明、杨飞宏、温翔宇、李明军、冯骁、许星、高欣、姚华平、孙永佳。

本文件为首次发布。

农业机械无人驾驶协同系统架构规范

1 范围

本文件规定了“数-云-端”协同农业机械无人驾驶系统各部件或子模块之间组织模式、运行环境要求、技术指标要求、功能要求以及测试要求，为智能驾驶系统的接口设计提供一种技术实现方案和标准化设计规范。

本文件适用于农业机械无人驾驶协同系统架构的设计、研制、测试和应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期的对应版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 39267 北斗卫星导航术语

GB/T 21398-2008 农林机械 电磁兼容性 试验方法和验收规则

GB/T 24648.1-2009 拖拉机可靠性考核

GB/T 24648.2-2009 工程农机产品可靠性考核 评定指标体系及故障分类通则

GB/T 25392-2010 农业工程电气和电子设备对环境条件的耐久试验

GB/T 35381.1-2017 农林拖拉机和机械 串行控制和通信数据网络 第1部分：数据通信通用标准

GB/T 36100-2018 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法

GB/T 37164-2018 自走式农业机械导航系统作业性能要求及评价方法

GB/T 39517.1-2020 农林拖拉机和机械 农用定位与导航系统测试规程 第1部分：卫星定位装置的动态测试

GB/T 39517.2-2020 农林拖拉机和机械 农用定位与导航系统测试规程 第2部分：在直线和水平运行状态下卫星自动导航系统的测试

T/NJ 1225-2021 拖拉机 无人驾驶系统 通用技术条件

T/CAAMM 12-2018 拖拉机北斗兼容车载终端系统 通用技术条件

T/CAAMM 13-2018 农业机械卫星导航自动驾驶系统前装 通用技术条件

T/CAAMM 14-2018 农业机械卫星导航自动驾驶系统后装 通用技术条件

CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范

CH/T 1019-2010 导航电子地图检验规范

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 39267 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

全域定位导航 Whole-Area positioning navigation

本文指基于多种定位技术融合，在卫星信号良好的空旷区域，或在室内、大棚、树林等卫星信号缺失的遮蔽区域，均可以实现定位导航。

3.1.2

“数-云-端”协同 Data-Cloud-Terminal Collaboration

“数”泛指数据、模型、算法，通过对多源异构数据进行处理与分析，提供计算、判断与决策支持；“云”泛指云连接、云交互、云服务，连接系统各类软硬件终端和模型算法，通过云端泛在资源管理、面向场景的使能技术服务化、融合应用建模与应用构造，提供广连接、广交互与广服务支持；“端”泛指传感器、农机装备、应用交互软件等软硬件终端，提供感知、测量与反馈支持。“数-云-端”协同指三者交互贯通，协作配合，构成一个系统化的整体。

3.1.3

路径规划 Path Plan

本文指按照一定的评价标准，寻找一条从起始状态到目标状态的最优或次优路径。

3.1.4

环境传感器 Environmental sensors

本文指农机无人驾驶系统中来感知环境特征的传感设备，常用的环境传感器有摄像头、激光雷达、超声波雷达等。

3.1.5

路面语义分割 Road semantic segmentation

本文指农机无人驾驶系统中一项计算机视觉算法功能，用于将行驶路面的图像像素或者激光点云按其语义类别进行分类，以实现无人驾驶系统对作业场景的精细化理解和分析。

3.1.6

栅格地图 Grid map

栅格地图是一种以灰度网格形式表示环境信息的地图，每个栅格可以通过存储不同灰度数值表示一个地图区域小单元。

3.1.7

矢量地图 Vector map

矢量地图是一种使用矢量图形表示地理信息的地图形式。矢量地图更注重地理特征的准确性和详细性，以点、线、面等几何元素来描述地理特征。

3.1.8

自适应切换 Adaptive switching

本文指农机无人驾驶系统根据场景的变化自动切换定位模式，以实现无场景差别的全域定位导航和稳定可靠的定位效果。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

RTK：实时动态测量（Real time kinematic）

IMU：惯性传感器（Inertial Measurement Unit）

LoRa：远距离无线电（Long Range Radio）

SLAM：即时定位与地图构建（Simultaneous Localization and Mapping）

MTBF：平均故障间隔时间（Mean Time Between Failure）

MTTFF：首次故障平均工作时间（Mean Time To First Failure）

4 系统组成

本标准提出的农业机械无人驾驶协同系统由“数据、模型、算法”（下称“数”）、“云链接、云交互、云服务”（下称“云”）、“传感器、农机装备、应用交互软件”（下称“端”）构成，数-云-端之间相互密切协作，实现精准定位、环境感知、作业任务管理、路径规划、状态监控等农业机械无人驾驶功能，其系统架构组成如图1所示。

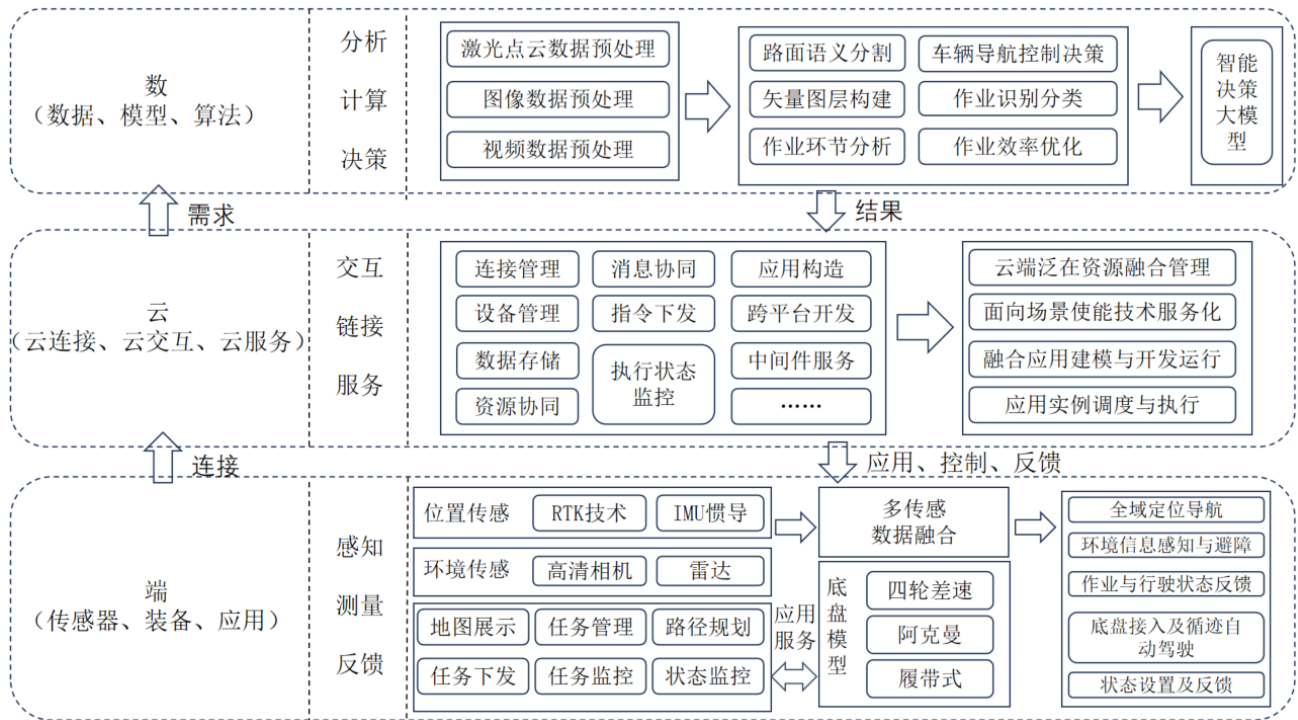


图 1 “数-云-端”系统架构图

4.1 “数”：数据、模型、算法

“数”为农机无人驾驶协同系统架构中的数据处理与分析挖掘模块，起到数据处理、分析、计算和决策等作用。该模块采用对应的模型和算法，对农机无人驾驶系统中可远程传感器采集的图像、视频、激光点云等多源异构感知数据进行实时处理与决策分析。

4.2 “云”：云连接、云交互、云服务

“云”为农机无人驾驶协同系统架构中协同“数”和“端”的桥梁，起到广连接、广交互、广服务各类终端及模型算法的作用。该模块在基于分布式存储、容器自动化编排、微服务架构与安全监控等技术下实现农机无人驾驶协同系统中的“端”和“数”的资源管理，“端”“数”间消息传递、应用构造等功能。

4.3 “端”：传感器、农机装备、应用交互软件

在农机无人驾驶协同系统架构中，传感器包括激光雷达、超声波雷达、高清相机、RTK、IMU 等，进行位置信息、农机作业环境信息、农机作业状态信息、农机位置信息等的感知和采集，并将采集的信息传递给“云”，“云”再传递给“数”进行处理和分析；农机装备由行走底盘和作业部件等构成，基于数-云端协同实现自主作业；应用交互软件包括农机无人驾驶协同系统应用软件，实现数据的可视化和人机交互操作。

5 各模块功能

5.1 “数”模块功能

本系统架构中，“数”模块功能包括：数据清洗与预处理、数据分析与建模、智能决策大模型等。

5.1.1 数据清洗和预处理

需要对建模数据进行清洗和预处理，确保数据的质量和可用性，为后续分析提供准确、干净的数据集。

（1）激光点云数据预处理

- a) 对点云数据进行清洗、滤波和降采样，去除噪声和冗余数据，实现点云数据平滑处理；
- b) 将点云数据进行网格化处理，统一建图时进行点云配准的尺度和坐标范围。

（2）图像数据预处理

- a) 采集图像训练集，对原始图像信息进行滤波、图像灰度形态分析和恢复处理，实现数据清洗和增强，获取清晰度高的图像信息；
- b) 能够根据场景需求定义图像裁剪尺寸，提高处理效率和场景适应性；
- c) 能够将图像颜色空间由 RGB 转换到 HSV，增加构建路面分割模型时对颜色变化的适应性；
- d) 能够对图像进行旋转、翻转、缩放，并结合语义分割要求对样本量少的类别进行增广，提高识别能力。

（3）视频数据预处理

- a) 分割视频镜头，能够根据视频中的场景变化，将视频分解成更小的片段；
- b) 提取关键帧，能够根据要求从视频中提取出代表性的帧，减少数据处理的复杂性；
- C) 提取特征，能够从关键帧中提取特定有用的信息，包括颜色、纹理、形状等信息。

5.1.2 数据分析与建模

需要对经过数据清洗和预处理后的数据，根据需要进行数据分析和建模，建立农机无人驾驶相关的算法和模型。

（1）路面语义分割

基于预处理后的图像数据、视频数据等，采用深度学习算法，构建路面分割模型，可对模型预测的结果进行颜色划分，区分出不同路面分割区域。

（2）矢量图层构建

对路面分割区域进行连通性分析和融合处理，并基于语义标签自动生成标准化矢量图层，包括：通行区、障碍区、种植区等，同时对生成的矢量图层赋予坐标信息，与激光雷达点云地图进行坐标配准，实现矢量图层与点云地图的坐标一致性对齐。

（3）作业环境分析

基于作业地块的矢量图层、土壤状况、作物种植分布等数据，规划出无人农机的最佳作业路径和作业方式。

（4）车辆导航控制决策

包括横向偏差控制、发动机启停控制、纵向速度控制、制动控制和传动比控制等控制决策，确保农机能在作业地块行驶中保持稳定性和准确性。

（5）作业识别分类

使用图像处理技术对作业地块中的作物进行识别和分类，使无人农机能够精确地进行作业。

（6）作业效率优化

通过分析历史作业数据，评估无人农机的工作效率，并通过优化算法对作业参数进行调整以提高作业效率。

（7）状态监测与故障诊断

通过分析无人农机的工作状态数据，利用预测性维护模型来预测设备潜在故障，减少停机时间。

5.1.3 智能决策大模型

整合上述数据分析和模型，构建形成智能化决策大模型，为无人农机在复杂多变的农业生产环境中提供自主作业决策支持。

5.2 “云”模块功能

本系统架构中，“云”模块功能包括：连接管理、设备管理、数据存储、资源协同、消息协同、指令下发、执行状态监控、应用构造、跨平台开发、中间件服务等。

5.2.1 连接管理

管理传感器、农机装备等与云平台之间的连接，确保数据传输的稳定性和可靠性。

5.2.2 设备管理

对接入的传感器、农机装备等进行管理，包括设备注册、状态监控和远程控制等。

5.2.3 数据存储

能够存储和管理终端传感器和农机装备产生的数据。

5.2.4 资源协同

整合云平台中心计算能力和分散的端边缘计算能力，使数据可以在云、边缘和端之间自由流通，可以满足农机作业对实时性和智能化处理的需求。

5.2.5 消息协同

a) 通过消息队列、主题和服务端订阅等功能来同步不同系统之间的数据，同时保证发送者和接收者之间的独立性；

b) 能够通过云端集中式训练模型，并将更新的模型推送到本地边缘节点，实现分布式运算。

5.2.6 指令下发

能够向终端设备发送控制指令，确保设备能够识别并执行来自云平台的指令。

5.2.7 执行状态监控

云平台下发指令后，终端设备能够及时将指令的执行结果返回给云平台平台，如果终端设备没有回应，平台会认为命令执行超时。

5.2.8 应用构造

支持农机无人驾驶物联网应用的快速开发和部署，支持模块化、微服务化的应用实例在云端根据功能需求进行编排，支持应用管理协同，确保云端和边缘节点上的应用能够高效管理和更新。

5.2.9 跨平台开发

提供跨平台的开发工具和服务，使得开发者能够高效地构建适用于多种终端设备的应用和服务。

5.2.10 中间件服务

提供地图搭载、装备注册、参数配置、状态监控、农机控制、作业管理、故障管理等中间件服务。

5.3 “端”模块功能

本系统架构中，“端”模块功能包括：传感器信息感知、边缘计算及农机自动驾驶作业控制、应用服务等。

5.3.1 传感器信息感知

需要配置多种传感器，包括激光雷达、超声波雷达、摄像头、RTK、IMU 等，满足全域定位导航和环境信息感知的需求。

5.3.2 边缘计算及农机自动驾驶作业控制

（1）全域定位导航

- a) 在各种遮蔽程度的作业场景都能提供精准位置信息；
- b) 农机在不同作业场景行驶过程中，能够根据卫星信号遮蔽情况自动切换定位模式，实现持续定位；
- c) 具备全天候定位能力。

（2）环境信息感知与避障

- a) 能够结合农机行驶速度，根据超声波探测到的障碍物距离实现自动停车；
- b) 能够结合数据处理与分析部件反馈的路面分割信息，修正农机行驶路线，实现在车行道居中行驶；
- c) 遇到大坑或障碍物时能够自动识别出路况异常，并给出告警信息。

（3）底盘接入及循迹自动驾驶

- a) 支持接入两轮差速、四轮差速、履带式的电控底盘；
- b) 支持油控底盘；
- c) 基于全域定位导航能力，控制农机按照云平台下发的作业路径实现前行、后退、转弯自动驾驶。

（4）状态设置及反馈

- a) 接收云平台下发的传感器参数、作业路径、底盘运动控制指令；
- b) 向云平台实时反馈传感器工作状态、作业执行状态、底盘运动状态。

5.3.3 应用服务

（1）地图展示

- a) 能够进行地图放大、缩小、平移等操作；

- b) 能够打点获取精确点坐标，计算矢量线段距离；
- c) 具备指定终端位置实时追踪和居中显示功能；
- d) 能够在地图上添加标记、注释或绘制图层，丰富地图信息。

(2) 任务管理

- a) 新增任务：用户可以通过云平台新增作业任务，填写任务名称、描述、执行时间等信息，以便更好地组织和计划任务。
- b) 修改任务：提供灵活的任务修改选项，允许用户调整任务参数、时间表或其他相关属性，确保任务能够适应动态变化的需求。
- c) 删除任务：用户可以删除不再需要的任务，以保持任务列表的清晰和整洁。
- d) 查询任务：可根据任务名称、执行时间进行任务查询，让用户能够快速找到特定条件下的任务，从而更高效地管理任务列表。

(3) 路径规划

- a) 用户可以通过图形化界面直观地规划作业路径，添加路径关键点、设定途经区域，以确保任务按照规划的路径执行；
- b) 支持智能作业路径规划，能否基于栅格地图和矢量图层进行最优行驶路径规划，降低终端资源消耗、提高作业效率。

(4) 任务下发

- a) 将作业任务和规划路径下发至智能驾驶终端；
- b) 具有任务离线下发机制，网络由不稳定或断连恢复到正常，能否把作业任务续传下发到终端。

(5) 任务监控

- a) 实时监控作业任务执行状态，包括任务已开始、任务进行中、任务暂停等状态，以确保用户能够追踪任务的执行进度；
- b) 任务完成后，系统自动生成详细任务报告，对任务执行时间、完成情况、异常事件等进行统计。

(6) 状态监控

- a) 实时监控农机当前位置、作业执行状态；
- b) 实时监控农机健康状况，包括液压油温、电池电量等信息；
- c) 实时监控智能驾驶终端上激光雷达、摄像头、超声波、RTK、IMU 传感器工作状态；
- d) 发现异常情况实时触发报警，以便及时采取措施防范潜在问题。

6 技术指标要求

6.2 全域定位精度要求

6.2.1 全天空场景定位精度

全天空场景下定位精度要求：

- a) 水平定位精度： $\leq 10\text{cm}$ （RMS）；
- b) 高程定位精度： $\leq 15\text{cm}$ （RMS）；
- c) 精度发散状态（RTK 浮动解）及时告警时间小于 3s；
- d) 综合定位可用性优于 99%。

6.2.2 半天空场景定位精度

半天空场景下定位精度要求：

- a) 水平定位精度： $\leq 15\text{cm}$ （RMS）；
- b) 高程定位精度： $\leq 20\text{cm}$ （RMS）；
- c) 精度发散状态（RTK 浮动解）及时告警时间小于 10s；
- d) 综合定位可用性优于 90%。

6.2.3 全遮挡场景定位精度

全遮挡场景下定位精度要求：

- a) 水平定位精度： $\leq 10\text{cm}$ （RMS）；
- b) 高程定位精度： $\leq 15\text{cm}$ （RMS）；
- c) 综合定位可用性优于 90%。

6.2.4 定位技术自适应切换

农机装备在行驶过程中遇到不同场景，应具有以下定位能力：

- a) 自动识别卫星信号的强弱或缺失，如果卫星信号变弱就自动切换到组合导航，如果卫星信号缺失就自动切换到激光定位，切换过程中保持水平 15cm、高程 20cm 定位精度；
- b) 实时向云平台反馈当前定位技术。

6.3 电子地图技术要求

云平台搭载并展示电子地图，采用数据处理与分析部件基于激光雷达点云地图转换的高精度栅格地图，也可导入外部制作的测绘无人机航拍栅格地图。本系统对电子地图有以下要求：

- a) 地图精度 10cm 以内，高程精度在 20cm 以内，满足农机装备自动驾驶所需的打点路径规划精度；
- b) 路面语义分割处理后得到的二维矢量图层精度在 20cm 以内，能够准确识别区分出建筑物、树木、水沟等地标。

6.4 自动避障技术要求

农机装备避障技术有以下要求：

- a) 超声波雷达能实时感知农机行驶过程中的障碍信息，遇到障碍物自动停止并发出告警提示；
- b) 感知到障碍时能够根据车速自动调节农机制停距离，感知性能要求参考 T/NJ 1225-2021 第 5 章。

6.5 农机装备循迹技术要求

农机装备循迹有以下技术要求：

- a) 在云平台电子地图上打点绘制出作业路径，或根据栅格地图及可通行区域矢量图层自动绘制出最佳作业路径，能够将路径的关键点坐标序列完整下发至智能驾驶终端；
- b) 农机装备能按照作业路径进行自动循迹行驶，真实行驶路径偏移量不超过 10cm。

6.6 数据安全要求

“数”、“云”、“端”进行数据交互时，应具有以下数据安全要求：

- a) “数”、“云”应具备有效的终端身份验证、数据加密和过滤机制，防止非授权用户防范或恶意注入攻击；
- b) “数”、“云”、“端”具有日志记录和运行过程监控机制，异常事件发生时应实时响应和报警，并根据日志信息进行故障分析。
- c) 传输安全说明：使用成熟的安全传输协议，保证传输的通道安全。

6.7 数据存储要求

数-云-端无人驾驶系统应满足以下数据存储要求：

- a) 存储介质满足农机无人驾驶数据大规模、高速、低延迟、高可靠性的特性；
- b) 存储策略采取数据备份、数据压缩、数据加密、数据归档等。

6.8 可靠性要求

数-云-端无人驾驶系统应满足以下可靠性要求：

- a) 无故障连续运行时间不低于 7*24 小时；
- b) 具备自动检测机制，能够在发生故障时自动修复或重新启动。

7 运行配置要求

7.1 “数”模块运行配置要求

在“数”模块中部署了对算力要求较高的智能算法，包括激光点云数据预处理、图像数据预处理法、激光点云建图、路面语义分割与矢量图层生成等。实现“数-云-端”无人驾驶协同系统的“数”模块应可

配置 TensorFlow 等业界常用的机器学习和深度学习框架，并满足一定的算力要求，具备系统所需的数据处理、分析、计算和决策所需的算力条件。

7.2 “云”模块运行配置要求

“云”模块对应云平台，通过云端泛在资源融合管理、面向场景使能技术服务化、融合应用建模与开发运行、应用实例调度与执行等，提供广连接、广交互与广服务。实现“数-云-端”无人驾驶协同系统的“云”模块应满足系统广连接、广交互与广服务所需的云资源和存储需求。

7.3 “端”模块传感器和农机装备配置要求

7.3.1 传感器配置要求

(1) 激光雷达配置参数要求如下：

- a) 测量距离 $\geq 70\text{m}$ ；
- b) 输出频率 10~20Hz 可调节（至少满足 10Hz、15Hz、20Hz 三档）；
- c) 水平视场角 $=360^\circ$ ；
- d) 测距精度 $< 3\text{cm}@10\text{m}$ ；
- e) 防水等级：IP67；
- f) 时间同步：支持 GPRMC、PPS 接入；

(2) 超声波雷达配置参数要求如下：

- a) 测距范围 0.30~5.0m；
- b) 测量精度要求在 $\pm 10\text{cm}$ 以内；
- c) 输出频率 $\geq 3\text{Hz}$ ；
- d) 防水等级：IP67；
- e) 接口：RS485/232 串口；
- f) 要求车载速度在 10km/h 时不发生漏检现象。

(3) 摄像头配置参数要求如下：

- a) 分辨率 $\geq 2000*2000$ ；
- b) 输出帧率 ≥ 14 ；
- c) 接口：USB3.0，支持至少一路 RS485 通信接口；
- d) 供电要求：10.8~26.4 VDC 或 PoE；
- e) 具备红外夜视功能。

(4) RTK 模块配置参数要求如下：

- a) 在开阔无遮挡的场景下水平定位精度 10cm，高程定位精度 15cm，CORS 站定位服务修正后水平定位精度 2.5cm，高程定位精度 5cm；
- b) 水平测速精度 0.03m/s；
- c) 定位时延：冷启动 $\leq 26\text{s}$ ，热启动 $\leq 2\text{s}$ ；
- d) 更新频率 $\geq 5\text{Hz}$ ；

e) 工作温度：-40℃ ~ +85℃。

(5) 惯性测量单元 (IMU) 配置参数要求如下：

- a) 数据输出频率 $\geq 200\text{Hz}$;
- b) 航向角精度 $< 1^\circ$ (自转 360°) ;
- c) 陀螺仪静止零漂 $< 1^\circ/\text{s}$;
- d) 具备数据稳定的指示输出，以便于与其他传感器进行时间同步;
- e) 防水等级：IP67;
- f) 接口：USB，数据供电一线通。

7.3.2 农机装备底盘配置要求

参照《GB/T 35381（所有部分）农林拖拉机和机械 串行控制和通信数据网络》标准中对电动底盘的要求，除此之外的参数要求如下：

- a) 电动底盘必须预留串行总线控制接口用于与自动驾驶控制器通信，具有 CAN 口和 RS485 接口;
- b) 其中 CAN 接口符合“ISO 11898-2”标准，双绞线通讯，传输速率：5Kbit/s~1Mbit/s;
- c) 其中 RS485 接口符合“EIA-485”标准，双绞线通讯，传输速率：4800Mbps~115200Mbps;
- d) 可通过串行通讯接口发送速度、转向角度等控制信号，并接收实时速度、转向角度等信息。

7.4 传输环境要求

数据传输应支持 LoRa、4G/5G 或 Wi-Fi 等通信模式。

8 测试方法

8.1 测试场景

对测试场景有以下要求：

- a) 全域定位测试场景选择三种卫星信号典型场景：全天空场景、半天空、室内机库或大棚全遮蔽场景;
- b) 测试场地 4G 或 5G 等通信信号良好，或自建 Wi-Fi 或 LoRa 等局域通信网络;
- c) 将传感器等正确安装适配在农机装备上，保证正常运行和通信状态正常。

8.2 数据通信测试

数据通信测试方法如下：

- a) 农机装备内部通信测试：按照 GB/T 35381 规定的内容执行;
- b) “端-云”远程通信测试：
 - 1) 通过加密和不加密传输，验证数据通信是否正常;
 - 2) 农机装备通过接入卫星授时模块在上报云的数据中打时间戳，通过云平台统计智能驾驶终端

主动上报数据，计算从农机装备上报到云平台接收到的时间间隔。

8.3 功能测试方法

8.3.1 全域定位导航功能测试

全域定位导航功能测试方法如下：

- a) 全天空场景、半天空场景的定位功能应按照 GB/T 39517.1-2020 和 GB/T 39517.2-2020 的规定执行测试；
- b) 全遮蔽场景下的定位功能应按照 GB/T 36100-2018 的规定执行测试；
- c) 农机装备在多场景行驶过程中应自动切换定位技术，保持厘米级定位精度。

8.3.2 环境信息感知功能测试

激光雷达感知环境信息测试方法：

- a) 采集的激光点云数据质量应该《CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范》中对点云密度、强度质量的判断标准进行；
- b) 预处理后的激光点云数据质量标准应该按照《CH/T 8024-2011 机载激光雷达数据获取技术规范》中对粗差率的判断标准进行。

8.3.3 构建电子地图及图层测试

栅格地图和矢量图层的数据采集正当性、制作生产资信、数据质量、应用功能的检测需按照《CH/T 1019-2010 导航电子地图检验规范》第 5、6、7 章的要求进行。

8.3.4 其他功能项测试

在系统满载条件下，对 7 的其他功能采用运行结果观察法逐项测试，测试结果应符合功能定义。

8.4 性能测试方法

性能测试项目及对应的要求、测试方法见表 2。

表 2 无人驾驶协同系统性能测试项目及方法

序号	性能测试项目	测试子项	指标要求对应章条号	测试方法对应章条
1	全域定位导航	全域定位导航-全天空	6.2.1	8.3.1
2		全域定位导航-半天空	6.2.2	8.3.1
3		全域定位导航-全遮蔽场景	6.2.3	8.3.1
4	自建电子地图	地图精度	6.3-a)	8.3.2
5	避障技术	避障精度	6.4-b)	8.3.3

6	终端循迹技术	循迹精度	6.5	8.3.4
---	--------	------	-----	-------

8.4.1 全域定位导航精度测试

全天空场景和半天空场景精度测试方法：按照 GB/T 39517.1 和 GB/T 39517.2 的规定执行测试。

全遮蔽场景定位精度测试方法：

a) 单点精度测试步骤及方法：

- 1) 在室外选择 4 个以上位置作为基准点，使用 RTK 测量出室外基准点的精准坐标；
- 2) 在室内区域均匀布局选择 10 个以上待测点；
- 3) 使用全站仪采用后方交会的方法计算出室内待测点的坐标作为真实参考值；
- 4) 将农机装备静止在室内待测点并启动定位功能，每个待测点统计 100 组系统解算坐标与其真实参考值的均方根误差，以此推算出室内待测点的定位精度。

b) 直线行驶精度测试步骤及方法：

- 1) 在室外选择 4 个以上位置作为基准点，使用 RTK 测量出室外基准点的精准坐标；
- 2) 在室内区域均匀布局选择 10 个以上待测点；
- 3) 使用全站仪采用后方交会的方法计算出室内待测点的坐标作为真实参考值；
- 4) 室内待测点两两之间确定多条参考直线，云平台下发参考直线的路径信息到农机装备，执行循迹行驶任务，每条参考直线记录 100 个系统定位数据，统计系统解算坐标到参考直线垂直距离的均方误差。

定位技术自适应切换精度测试步骤及方法：

- a) 选择测试场景，包含室外开阔区域和室内全遮蔽区域，两个区域中分别选择起点和终点；
- b) 通过示教模式人工控制农机从开阔场景的起点到全遮蔽场景内的终点行驶，将示教轨迹上传至云平台作为测试的真值轨迹；
- c) 将农机装备返回起点，执行云平台下发的真值轨迹。在场景切换的过程中，在云平台界面观察农机行驶轨迹与真值轨迹的一致性。
- d) 记录从室外到室内切换时产生的 100 个定位数据，利用最小二乘法拟合出行驶轨迹；
- e) 等间距采样 10 个点计算行驶轨迹与真值轨迹的均方误差；
- f) 重复 a)到 e)，测试多组数据后做均值处理。

8.4.2 建图精度测试

可视化体验按照《CH/T 1019-2010 导航电子地图检验规范》第 8 章的要求进行。

电子地图精度测试按照以下步骤和方法：

- a) 将数据处理与分析部件构建好的高精度电子地图导入云平台，并下发到农机装备；
- b) 在电子地图上均匀布局选择 10 个测试点，使用全站仪测量出坐标作为真值坐标；
- c) 每个测试点采集 100 组农机装备的解算坐标，以真值坐标为基准统计均方误差，精度误差需满足 6.3 a) 要求。

矢量图层绘制精度测试步骤和方法：

- a) 测试现场均匀布局选择 10 个点，用全站仪测量出坐标作为真值坐标；
- b) 在矢量图层中计算各分割区域几何中心到控制点的欧氏距离；
- c) 使用全站仪在现场各分割区域几何中心到控制点的距离作为真实距离；
- d) 统计上述欧式距离与真实距离的平均差作为精度误差，矢量图层绘制精度误差要求需满足 6.3 b) 要求。

8.4.3 避障精度测试

自动避障功能测试步骤和方法：

- a) 障碍物识别测试：
 - 1) 选择路径长度不小于 50m 的测试场地，在农机前行路径中均匀放置 10 个大小不一障碍物；
 - 2) 检测行驶过程中是否正确检测出障碍物，并做出 6.4 a) 相应的操作；
- b) 避障制动距离测试：
 - 1) 选择路径长度不小于 50m 的测试场地，在农机前行路径中均匀放置 10 个大小不一障碍物；
 - 2) 启动农机避障功能，并在行驶过程中调节农机分别以 5KM/h，10KM/h，15KM/h 三档速度沿着测试路线行驶；
 - 3) 分别统计农机无人系统在三种速度下识别障碍物后速度的变化与制动的距离。

8.4.4 终端循迹精度测试

循迹定位精度测试步骤和方法：

- a) 在云平台高精电子地图上打点规划作业路径，并下发至农机智能终端；
- b) 启动农机按照规划路径自动循迹行驶；
- c) 记录农机实际运行的定位和轨迹；
- d) 统计农机实际运行轨迹与规划路径的平均误差，误差计算方法参考 GB/T37164-2018 标准提出的导航精度评价方法计算误差，误差应满足 6.5 b) 要求。

8.5 可靠性测试

对无人驾驶协同系统进行 MTTF 测试和 MTBF 测试以评价系统的稳定性与可靠性，采用以下方法：

- a) MTTF 测试：按照 GB/T 24648.2-2009 规定的方法执行，测试系统是否满足 6.8 a) 可靠性要求；
- b) MTBF 测试：参考 T/CAAMM 13-2018 与 T/CAAMM 14—2018 中的可靠性测试方法并按照 GB/T 24648.1—2009 规定的可靠性测试方法执行；

无人驾驶协同系统平均单次修复时间测试计算见公式（1）

式中：

$$T = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

T——系统单次修复时间，单位为分（min）；

r——被试验农机无人作业系统在试验或使用时期内（包括磨合和性能试验期间）出现故障总次数；

n——试验总次数；

t_i ——第 i 次被试验农机无人驾驶协同系统单次修复时间，单位为分（min）。