

团 体 标 准

T/CAAMM 377—2025

拖拉机智能控制行走系统 技术规范

Tractor intelligent control walking system—Technical specification

（报批公示稿）

202x-xx-xx 发布

202x-xx-xx 实施

中国农业机械工业协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统架构	2
5 技术要求	3
6 试验方法	5

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》给出的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构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：江苏常发农业装备股份有限公司、苏州路路达北斗导航技术有限公司、江苏大学、常州华创航空科技有限公司、常州常发科技开发有限公司、江苏省农用动力机械检测中心有限公司。

本文件主要起草人：谢太林、徐庆武、钟海兵、郭华、朱杰、王建、匡兵、胡强、王敏峰、唐凌峰、查丽平、龚士刚。

本文件为首次发布。

拖拉机智能控制行走系统 技术规范

1 范围

本文件规定了拖拉机智能控制行走系统的系统架构、技术要求，描述了相应的试验方法。

本文件适用于拖拉机智能控制行走系统的设计、开发、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 30038-2013 道路车辆 电气电子设备防护等级（IP代码）

GB/T 38636-2020 信息安全技术 传输层密码协议（TLCP）

GB/T 42576-2023 北斗/全球卫星导航系统（GNSS）高精度片上系统（SoC）技术要求及测试方法

GB/T 43478-2023 拖拉机 自动辅助驾驶系统 通用技术规范

ISO 11783 农业和林业用拖拉机与机械——串行控制和通信数据网络（ISOBUS）

SAE J1939 商用车控制系统局域网通信网络

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

拖拉机智能控制行走系统 tractor intelligent control walking system

集成了现代传感技术、自动控制技术、人工智能、物联网和大数据等技术，通过感知环境、智能决策和精准执行，实现拖拉机动力换挡、动力换向、线控制动、线控离合、电控四驱等电子控制自动化、智能化管理以及农机农艺深度融合的综合性机电液一体化行走系统。

3.2

感知模块 perception module

由各类传感器及数据融合单元组成的系统，用于实时采集拖拉机自身状态参数与外部环境信息，并将其转换为可用的电信号。主要包括转速、压力、温度、角度、力等状态传感器，以及北斗/GNSS、雷达、摄像头、惯性测量单元（IMU）等环境感知传感器。

3.3

控制模块 control module

由硬件控制器（如VCU、TCU、BCU、HCU）及内置控制算法组成的系统，用于处理感知模块提供的信息，进行任务规划、行为决策并生成控制指令。核心功能包括路径规划、速度控制、障碍物避让及对各执行单元的协调控制。

3.4

执行模块 actuation module

由各类电控、液控执行器及驱动机构组成的系统，用于接收并执行控制模块发出的指令，直接驱动机械部件完成指定动作。用于实现动力换挡、动力换向、线控制动、线控离合、线控转向、电控四驱等功能。

3.5

交互模块 human-machine interaction module

用于实现操作人员与系统之间信息双向传递的硬件和软件组件的总称。提供系统状态显示、参数设置、操控输入、语音提示及远程控制等功能，是系统与用户交互的接口。

3.6

通信模块 communication module

实现系统内部各模块之间以及与外部设备、网络进行数据交换的组件和协议的总称。主要包括CAN总线、ISOBUS、J1939等内部总线通信，以及4G/5G、Wi-Fi、蓝牙、V2X等无线通信技术。

3.7

安全保障 safety guarantee

系统在检测到异常情况时，为保护设备和人员安全而自动触发的紧急措施集合。

3.8

多传感器融合 multi-sensor fusion

通过协同利用多个异类传感器（如惯性测量单元IMU、激光雷达、摄像头等）提供的观测信息，并采用自动化的算法（如卡尔曼滤波或粒子滤波等）进行优化综合处理，以生成比任何单一传感器更全面、更精确、更可靠的环境与状态感知，提升系统的精度与可靠性。

3.9

冗余设计 redundant design

在关键子系统（如感知、控制模块）中设置备份组件或通道的设计方法，旨在当主系统发生故障时，通过切换至备份系统以维持核心功能。

4 系统架构

4.1 通则

拖拉机智能控制行走系统架构见图1，其功能与架构组成：

a) 功能组成：应包括动力换挡、动力换向、线控制动、线控离合、线控转向、电控四驱等。

b) 架构组成：应包括感知模块、控制模块、执行模块、交互模块和通信模块。

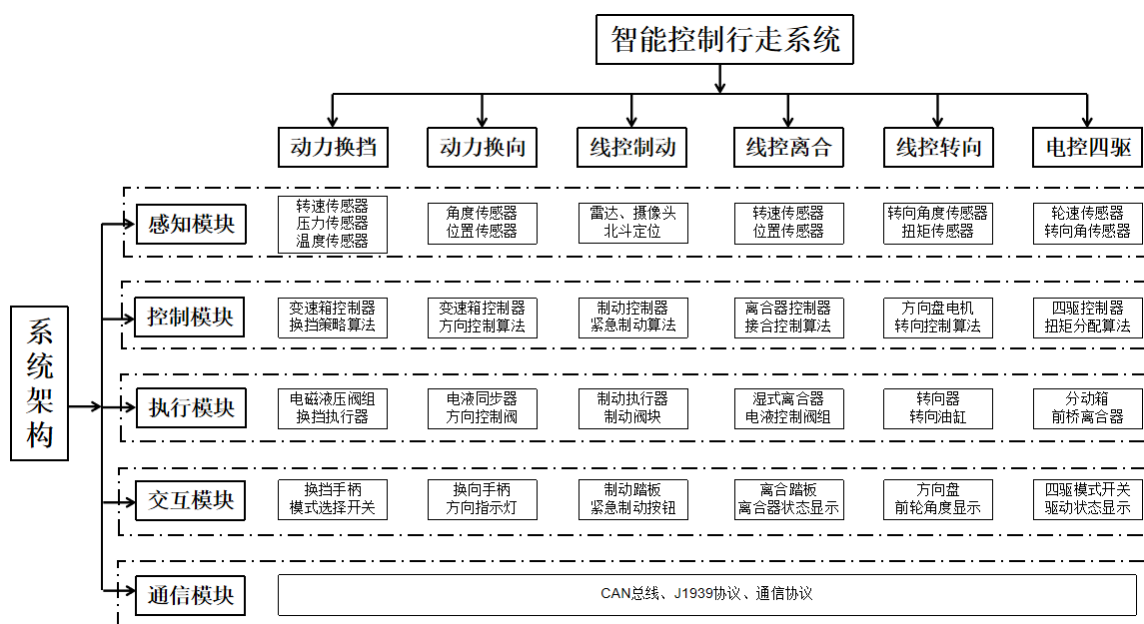


图1 智能控制行走系统架构示意图

5 技术要求

5.1 感知模块

5.1.1 传感器技术要求

5.1.1.1 北斗定位，定位精度应达到 $\pm 2\text{cm}$ （RTK模式），更新频率不低于 10Hz 。冷启动时间不大于 45s ，重捕获时间不大于 2s 。其通用技术规范需符合GB/T 43478-2023要求。

5.1.1.2 激光雷达，检测距离不小于 50m ，检测精度为 $\pm 5\text{cm}$ ，扫描频率不低于 10Hz 。角度分辨率不大于 0.1° ；抗干扰能力：在粉尘浓度不小于 $200\mu\text{g}/\text{m}^3$ 环境下，检测性能下降不大于 15% 。

5.1.1.3 摄像头，分辨率不低于 $1920\times 1080\text{P}$ ，帧率不低于 30fps 。夜视功能要求：照度不大于 0.1lux 时，有效识别距离不小于 8m ，噪点比不大于 5% 。动态范围不小于 120dB ，支持HDR模式。

5.1.1.4 惯性测量单元（IMU），用于检测拖拉机的姿态（俯仰、横滚、偏航），精度不低于 $\pm 0.2^\circ$ 。角速度范围 $\pm 300^\circ/\text{s}$ ，加速度范围 $\pm 8\text{g}$ ，带宽不小于 100Hz 。

5.1.1.5 基础传感器，应满足相应量程和精度要求：

- 1) 转速传感器：量程 $0\text{rpm}\sim 3000\text{rpm}$ ，精度 $\pm 1\%$ ；
- 2) 压力传感器：量程 $0\text{MPa}\sim 40\text{MPa}$ ，精度 $\pm 0.5\%$ ；
- 3) 温度传感器：量程 $-40^\circ\text{C}\sim 125^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

5.1.2 感知性能技术要求

5.1.2.1 多传感器融合要求，系统需支持至少两种定位方式，如北斗+视觉SLAM融合定位，定位精度提升至 $\pm 1\text{cm}$ （RTK模式），数据融合周期不大于 100ms 。

5.1.2.2 环境适应性，防护等级不低于IP67，其防护等级需符合GB/T 30038-2013要求。工作温度为 $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$ ，抗振动： $5\text{Hz}\sim 500\text{Hz}$ ， 3.5Grms 。

5.1.2.3 障碍物检测，系统应具备实时检测障碍物的能力，检测距离不小于 20m ，检测精度不低于 $\pm 10\text{cm}$ ，检测角度不小于 120° 。支持动态障碍物轨迹预测，如行人、牲畜，未来 1s 轨迹预测，采样间隔 100ms ，预测误差不大于 0.3m 。

静态障碍物检测响应时间不小于 100ms ，动态障碍物检测响应时间不小于 50ms 。

5.2 控制模块

5.2.1 硬件模块

5.2.1.1 处理器性能，采用多核处理器，最低算力32位四核CPU，主频不小于 1.8GHz ，浮点运算能力不小于 500MFLOPS ；实时操作系统（RTOS）任务切换延迟不大于 $50\mu\text{s}$ 。

5.2.1.2 控制器性能：

- 1) 变速箱控制器：控制周期不大于 10ms ，换挡决策不大于 20ms ；
- 2) 通用控制器：控制周期不大于 20ms ，指令响应不大于 50ms ；

5.2.2 软件算法模块

5.2.2.1 路径规划，支持A*算法、Dijkstra算法等，全局路径规划时间不大于 1s （50亩地块），局部重规划周期不大于 200ms 。路径跟踪误差：横向 $\pm 5\text{cm}$ ，航向 $\pm 1^\circ$ ；避障距离不小于 1m 。

5.2.2.2 速度控制，系统应具备速度控制功能，采用PID控制，能够根据作业条件自动调整行驶速度，速度控制精度不低于 $\pm 0.5\text{km/h}$ 。响应时间不大于 1s ，超调量不大于 3% 。

5.2.2.3 障碍物避让算法，支持动态窗口法（DWA），避障安全距离不小于 0.5m 。避障决策时间不大于 100ms ，动态障碍预测 3s 轨迹。

5.3 执行模块

5.3.1 行走系统控制

5.3.1.1 动力换挡，响应时间小于200ms，换挡平顺无冲击，换挡冲击度不大于 10 m/s^3 ，换挡成功率不小于99%。

5.3.1.2 动力换向，采用电液比例阀、湿式离合器、齿轮传动组成的电液控制传动系统，实现线控换向功能控制，支持负载、温度补偿策略，响应时间小于200ms。换向平稳性：冲击度不大于 8 m/s^3 ，负载补偿精度 $\pm 5\%$ 。

5.3.1.3 线控制动，具备紧急制动功能，制动响应时间不大于200ms。具备多级制动策略，缓刹阶段：减速度不大于 2 m/s^2 ，持续时间 $0.5\text{ s}\sim 1.5\text{ s}$ ；急刹阶段：最大减速度不小于 4 m/s^2 ，最大制动距离不大于3米，车速 10 km/h 时。

5.3.1.4 线控离合，响应时间小于200ms，接合平稳性：滑摩功不大于规定值，寿命不小于50万次。

5.3.1.5 线控转向，采用电液比例阀或电动助力转向系统，支持PID调节，响应时间小于200ms，转向角度精度 $\pm 1^\circ$ ，最大转向力矩不小于 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

5.3.1.6 电控四驱，切换响应时间小于500ms。

5.3.2 执行器性能

5.3.2.1 电磁液压阀组，响应时间小于50ms，寿命不小于100万次；

5.3.2.2 湿式离合器，接合平稳，滑摩功规定值不大于50J；

5.3.2.3 液压油缸，泄漏量不大于 0.1 mL/min ，耐久性试验后性能下降不大于5%；

5.4 交互模块

5.4.1 显示功能

5.4.1.1 显控屏，尺寸不小于7英寸，分辨率不低于 1024×600 ，支持触摸操作，触摸响应不大于50ms，亮度不小于 500 cd/m^2 。

5.4.1.2 实时显示，系统应具备实时显示作业状态、路径规划、故障报警等信息的能力，刷新频率不低于5Hz，信息显示准确率100%，显示延迟不大于100ms。

5.4.2 操控功能

5.4.2.1 方向盘，转向力矩 $5\text{ N}\cdot\text{m}\sim 20\text{ N}\cdot\text{m}$ ，回正性能良好。

5.4.2.2 换向手柄/换挡手柄，操作力 $10\text{ N}\sim 50\text{ N}$ ，档位清晰。

5.4.2.3 踏板机构，离合踏板、制动踏板行程 $100\text{ mm}\sim 200\text{ mm}$ 和力值 $5\text{ N}\sim 200\text{ N}$ 。

5.4.3 远程控制

5.4.3.1 远程监控，支持4G/5G网络远程监控，系统应支持远程控制，操作人员可以通过移动设备远程监控和控制拖拉机，远程控制延迟不超过300ms。数据传输速率不小于100kbps，连接可靠性不小于99.9%；

5.4.3.2 语音提示，支持多语言语音提示，音量可调，语音清晰度不低于90%，音量范围： $60\text{ dB}\sim 90\text{ dB}$ ，支持语言：中文、英文等。

5.5 通信模块

5.5.1 总线通信

5.5.1.1 CAN总线，用于系统内部通信，传输速率不低于250kbps，错误帧检测率不小于99.9%，总线负载率不大于40%，容错能力：单节点故障不影响系统。

5.5.1.2 通信协议，支持标准CAN报文协议，兼容ISOBUS标准，协议一致性100%，数据完整性：CRC校验。

5.5.2 无线通信

5.5.2.1 网络支持，支持Wi-Fi、蓝牙、4G/5G。

5.5.2.2 网络切换，4G/5G网络切换信号强度不大于-90dBm时触发切换，切换延迟不大于150ms。

5.5.2.3 V2X通信，延迟不大于150ms，定位精度±1m，支持多机编队通信，支持车辆数不小于10台。

5.5.3 网络安全

5.5.3.1 加密协议，支持国密算法SM2/SM3/SM4加密协议，符合GB/T 38636-2020要求。

5.5.3.2 数据安全，数据传输完整性校验，防篡改能力。

5.6 系统级技术要求

5.6.1 系统功能要求

5.6.1.1 系统自检要求，系统应具备完整的自检功能，上电后在30秒内完成所有关键模块的自检与初始化，并进入待命状态。任一关键模块初始化失败时，系统应锁定并告警，无法进入自动作业模式。

5.6.1.2 人机协同控制，系统应支持自动、手动、远程三种控制模式，并实现模式间的平滑切换。从自动模式切换至手动或远程模式的响应时间不大于1秒，切换过程应保证车辆运行平稳。

5.6.1.3 系统兼容性，系统应具备良好的兼容性：

1) 硬件兼容性：支持不同供应商的感知、控制、执行模块的即插即用，接口协议兼容性达到100%

2) 功能协同性：各子系统功能协调运行，无功能冲突，任务协同完成率不低于99.5%；各子系统间数据同步误差不大于10ms，数据一致性不低于99.9%

3) 协议标准化：完全兼容ISOBUS、J1939等标准协议，协议一致性100%。

5.6.2 系统性能要求

5.6.2.1 环境适应性，坡度环境：纵向坡度不大于15°，横向坡度不大于8°；路面环境：可在硬化路面、松软田地、泥泞路面等典型农田环境下稳定作业；温湿度环境：工作温度-40℃~85℃，相对湿度不大于95%。

5.6.2.2 作业效能指标，燃油效率较传统控制策略提升不小于10%，作业效率提升不小于15%，排放降低不小于5%；

5.6.2.3 系统响应性能，任务启动响应时间不大于3秒，安全策略响应时间不大于0.5秒，故障检测响应时间不大于100ms。

5.6.3 系统安全与可靠性要求

5.6.3.1 系统安全，系统应确保在故障情况下的运行安全：

1) 故障检测与隔离：故障检测准确率不低于98%，故障模块隔离时间不大于50ms；

2) 功能降级策略：支持关键功能的多级降级模式，确保系统在故障状态下仍具备基本安全运行能力，降级模式切换时间不大于100ms；

3) 安全状态维持：在任何单一故障情况下，系统应能维持或进入预定义的安全状态，状态维持成功率100%。

5.6.3.2 可靠性要求，平均无故障工作时间（MTBF）不小于2000h，可用性不小于99%，维护周期不小于500h。

6 试验方法

6.1 感知模块测试

6.1.1 传感器测试

6.1.1.1 北斗定位测试

在开阔场地测试RTK模式下的定位精度和更新频率，应符合GB/T 43478-2023的要求。测试设备：高精度基准站（精度 $\pm 1\text{cm}$ ）、RTK接收机、数据记录仪、秒表。测试步骤：

- 1) 在开阔场地设置标准测试路径，长度不小于100m，宽度不小于10m；
- 2) 拖拉机以 $5\text{km/h} \pm 0.5\text{km/h}$ 匀速直线行驶；
- 3) 同时记录基准站和被测系统定位数据，采样频率不小于10Hz；
- 4) 测试冷启动时间：从系统上电到首次有效定位的时间；
- 5) 测试重捕获时间：模拟信号中断30s后恢复的时间；
- 6) 重复测试10次，计算平均值和标准差。

测试结果应符合5.1.1.1条要求。

6.1.1.2 激光雷达测试

使用标准反射板测试检测距离和精度。测试设备：标准反射板（反射率10%、80%）、激光测距仪（精度 $\pm 1\text{cm}$ ）、转台、粉尘浓度测试仪。测试步骤：

- 1) 在10m、25m、50m距离分别放置标准反射板；
- 2) 雷达扫描反射板，记录检测距离和角度数据；
- 3) 在粉尘浓度 $200\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 10\%$ 环境下测试30分钟；
- 4) 测量性能下降比例；
- 5) 使用转台测试角度分辨率，转速 $1^\circ/\text{s}$ ；
- 6) 每个测试点重复5次。

测试结果应符合5.1.1.2条要求。

6.1.1.3 摄像头测试

在标准光照条件下测试，分辨率、帧率和动态范围应符合GB/T 30038-2013的要求。测试设备：标准分辨率测试卡、照度计、动态范围测试设备。测试步骤：

- 1) 在标准光照条件（500 lux）下测试分辨率；
- 2) 在暗室中，照度0.1 lux条件下测试夜视性能；
- 3) 使用HDR测试卡测试动态范围；
- 4) 记录有效识别距离和信噪比；
- 5) 测试IP67防护等级：按GB/T 30038~2013进行喷水试验。

测试结果应符合5.1.1.3条要求。

6.1.1.4 惯性测量单元（IMU）测试

使用转台测试姿态检测精度，应符合GB/T 42576-2023的要求。测试设备：三轴转台（精度 $\pm 0.01^\circ$ ）、振动台、数据采集系统。测试步骤：

- 1) 将IMU安装于转台，分别测试俯仰、横滚、偏航精度；
- 2) 角速度测试：在 $\pm 300^\circ/\text{s}$ 范围内分段测试；
- 3) 加速度测试：在 $\pm 8\text{g}$ 范围内分段测试；
- 4) 带宽测试：输入0.1Hz~100Hz正弦信号；
- 5) 重复测试10次，计算均值和标准差。

测试结果应符合5.1.1.4条要求。

6.1.1.5 基础传感器测试

测试设备：标准转速源、压力校准器、恒温槽、角度标定位、力标准机。测试步骤：

- 1) 转速传感器：在0rpm~3000rpm范围内选取10个测试点；

- 2) 压力传感器：在0MPa~40MPa范围内选取8个测试点；
- 3) 温度传感器：在-40℃~125℃范围内选取6个测试点；
- 4) 测试IP67防护等级；
- 5) 每个测试点重复3次。

测试结果应符合5.1.1.5条要求。

6.1.2 感知性能测试

6.1.2.1 多传感器融合测试

验证融合后定位精度和环境感知完整性，应符合GB/T 43478-2023的要求。测试设备：高精度基准站、视觉SLAM测试系统、数据同步记录设备。测试步骤：

- 1) 测试北斗+视觉SLAM融合定位精度；
- 2) 测量数据融合周期；
- 3) 验证环境感知完整性；
- 4) 测试单传感器失效时的性能；
- 5) 重复测试10次。

测试结果应符合5.1.2.1条要求。

6.1.2.2 环境适应性测试

测试设备：高低温试验箱、温度记录仪、振动试验台、IP67测试设备、性能测试系统。测试步骤：

- 1) 温度适应性测试：在-40℃和85℃环境下各保温4h，进行温度循环测试（10个循环）。
- 2) 防护等级测试：按GB/T 30038-2013进行防尘和防水试验，进行IP6X防尘试验，试验8h；进行IPX7防水试验：浸水30min，水深1m；
- 3) 振动适应性测试：按5Hz~500Hz，3.5 Grms进行随机振动测试，每个轴向测试8 h，测试过程中监控系统功能。

测试结果应符合5.1.2.2条要求。

6.1.2.3 障碍物检测测试

使用障碍物模拟器测试检测距离、精度和响应时间。测试设备：障碍物模拟器（静态立方体1m×1m×1m、动态圆柱体直径0.5m）、高精度计时器（分辨率1ms）、测距仪。测试步骤：

- 1) 在5m、10m、15m、20m距离放置静态障碍物；
- 2) 动态障碍物以1km/h、2km/h、3km/h速度移动；
- 3) 记录检测时间、距离精度、角度覆盖；
- 4) 测试轨迹预测功能，记录1秒内预测误差；
- 5) 每个测试条件重复3次。

测试结果应符合5.1.2.3条要求。

6.2 控制模块测试

6.2.1 硬件测试

6.2.1.1 处理器性能测试

使用性能测试工具验证算力和实时性。测试设备：示波器（带宽不小于100MHz）、逻辑分析仪、性能测试软件（Dhrystone、CoreMark）、高精度计时器。测试步骤：

- 1) 运行标准测试程序，测量Dhrystone MIPS和CoreMark分数；
- 2) 测试任务切换延迟：创建10个不同优先级任务；
- 3) 测量中断响应时间；

- 4) 测试浮点运算性能;
- 5) 连续运行24h测试稳定性。

测试结果应符合5.2.1.1条要求。

6.2.1.2 控制器性能测试

测试各控制器的控制周期和响应时间。测试设备：CANoe分析软件、故障注入设备、高精度计时器（分辨率1 μ s）。测试步骤：

- 1) 变速箱控制器：测试换挡决策时间；
- 2) 通用控制器：测试控制周期和指令响应时间；
- 3) 验证冗余切换功能。

测试结果应符合5.2.1.2条要求。

6.2.2 软件算法测试

6.2.2.1 路径规划测试

在模拟作业环境中测试规划时间和路径合理性。测试设备：高精度RTK定位系统（精度 ± 1 cm）、障碍物模拟装置、计时器、路径记录系统。测试步骤：

- 1) 设置50亩矩形地块作业任务；
- 2) 记录全局路径规划时间；
- 3) 动态引入障碍物测试重规划周期；
- 4) 测量路径跟踪误差（横向、航向）；
- 5) 验证避障距离；
- 6) 重复测试5次。

测试结果应符合5.2.2.1条要求。

6.2.2.2 速度控制测试

测试设备：速度传感器（精度 ± 0.1 km/h）、数据记录仪、负载模拟装置。测试步骤：

- 1) 设置阶跃速度信号（5km/h \rightarrow 8km/h）；
- 2) 记录系统响应曲线；
- 3) 计算超调量、调节时间、稳态误差；
- 4) 测试不同负载条件下的控制精度；
- 5) 重复测试10次。

测试结果应符合5.2.2.2条要求。

6.2.2.3 障碍避让算法测试

测试设备：动态障碍物模拟器、安全距离测量装置、决策时间测试系统。测试步骤：

- 1) 测试动态窗口法避障安全距离；
- 2) 测量避障决策时间；
- 3) 验证3秒轨迹预测准确性；
- 4) 测试不同速度下的避障效果。

测试结果应符合5.2.2.3条要求。

6.3 执行模块测试

6.3.1 行走系统测试

6.3.1.1 动力换挡测试

测试换挡响应时间和平顺性。测试设备：转速传感器、三轴加速度计、数据采集系统、换挡力测试装置。测试步骤：

- 1) 在不同油门开度（25%、50%、75%、100%）下进行换挡操作；
- 2) 记录换挡时间和冲击度；
- 3) 测试换挡成功率；
- 4) 连续换挡100次测试耐久性；
- 5) 测量换挡力。

测试结果应符合5.3.1.1条要求。

6.3.1.2 动力换向测试

测试设备：电液比例阀测试台、温度控制装置、负载模拟器。测试步骤：

- 1) 测试换向响应时间；
- 2) 测量换向冲击度；
- 3) 验证负载补偿精度；
- 4) 测试温度补偿策略。

测试结果应符合5.3.1.2条要求。

6.3.1.3 线控制动测试

测试制动距离和减速度曲线。测试设备：制动测试台、减速度计（精度 $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ ）、距离测量装置、多级制动控制器。测试步骤：

- 1) 在10km/h车速下触发紧急制动；
- 2) 记录制动距离和减速度曲线；
- 3) 测试多级制动策略（缓刹→急刹）；
- 4) 验证制动系统冗余；
- 5) 测试不同车速下的制动性能。

测试结果应符合5.3.1.3条要求。

6.3.1.4 线控离合测试

测试接合平稳性和响应时间。测试设备：转速传感器、扭矩传感器、滑摩功测试仪。测试步骤：

- 1) 测试离合器接合响应时间；
- 2) 测量滑摩功；
- 3) 验证接合平稳性；
- 4) 进行寿命测试。

测试结果应符合5.3.1.4条要求。

6.3.1.5 线控转向测试

测试转向精度和响应时间。测试设备：转向测试台、角度传感器、力矩传感器。测试步骤：

- 1) 测试转向响应时间和精度；
- 2) 测量转向力矩和回正性能；
- 3) 验证PID控制效果。

测试结果应符合5.3.1.5条要求。

6.3.1.6 电控四驱测试

测试切换响应时间和扭矩分配精度。测试设备：扭矩传感器、转速传感器、切换时间测试仪。测试步骤：

- 1) 测试四驱模式切换响应时间;
- 2) 验证前桥接合可靠性;
- 3) 测试扭矩分配精度。

测试结果应符合5.3.1.6条要求。

6.3.2 执行器性能测试

6.3.2.1 寿命测试

进行加速寿命试验验证执行器耐久性。测试设备：耐久性测试台、循环计数器、性能监测系统。测试步骤：

- 1) 电磁液压阀组：进行100万次循环测试，响应时间变化不大于10%;
- 2) 湿式离合器：进行50万次接合测试，滑摩功控制在50J以内;
- 3) 液压油缸：进行密封性测试，泄漏量不大于0.1mL/min。

测试结果应符合5.3.2条的要求。

6.3.2.2 性能测试

测试执行器在极限工况下的性能表现。测试设备：高低温试验箱、振动台、负载模拟器。测试步骤：

- 1) 测试执行器在极限工况下的性能表现;
- 2) 验证温度、振动等环境适应性。

测试结果应符合5.3.2条要求。

6.4 交互模块测试

6.4.1 显示功能测试

6.4.1.1 显控屏测试

测试显示效果和触摸响应。测试设备：亮度计、触摸响应测试仪、分辨率测试软件、环境试验箱。测试步骤：

- 1) 测试显示屏尺寸和分辨率;
- 2) 测量触摸响应时间;
- 3) 测试亮度均匀性;
- 4) 验证IP67防护等级;
- 5) 测试高低温环境下的显示性能。

测试结果应符合5.4.1.1条要求。

6.4.1.2 信息显示测试

验证信息显示的准确性和实时性。测试设备：高精度计时器、数据验证系统、显示延迟测试装置。测试步骤：

- 1) 测试信息刷新频率;
- 2) 验证显示信息准确性;
- 3) 测量显示延迟时间;
- 4) 测试多信息同时显示的稳定性。

测试结果应符合5.4.1.2条要求。

6.4.2 操控功能测试

6.4.2.1 操控器件测试

测试各操控器件的操作力和使用寿命。测试设备：力传感器、位移传感器、寿命测试机、人机工程评估系统。测试步骤：

- 1) 测试方向盘转向力矩和回正性能;
- 2) 测量手柄操作力和档位清晰度;
- 3) 测试踏板行程和操作力;
- 4) 进行按键寿命测试;
- 5) 评估人机工程舒适性。

测试结果应符合5.4.2条要求。

6.4.2.2 人机工程测试

评估操作舒适性和便利性。测试设备：人机工程评估系统、舒适度问卷。测试步骤：

- 1) 评估操作舒适性和便利性;
- 2) 记录操作员反馈;

测试结果应符合5.4.2条要求。

6.4.3 远程控制测试

6.4.3.1 远程监控测试

测试远程监控的实时性和准确性。测试设备：网络延迟测试仪、数据传输测试系统、可靠性测试平台。测试步骤：

- 1) 测试远程控制延迟时间;
- 2) 测量数据传输速率;
- 3) 验证连接可靠性;
- 4) 测试网络切换性能;
- 5) 模拟弱信号环境测试;

测试结果应符合5.4.3.1条要求。

6.4.3.2 语音提示测试

测试语音清晰度和可懂度。测试设备：声级计、语音清晰度测试系统、多语言测试素材。测试步骤：

- 1) 测试语音清晰度（采用汉语清晰度测试字表）;
- 2) 测量音量范围和可调性;
- 3) 验证多语言支持;
- 4) 测试噪声环境下的语音识别率。

测试结果应符合5.4.3.2条要求。

6.5 通信模块测试

6.5.1 总线通信测试

6.5.1.1 CAN总线测试

测试传输速率、错误检测率和负载率。测试设备：CAN总线分析仪、错误注入设备、负载测试系统。测试步骤：

- 1) 测试传输速率和稳定性;
- 2) 验证错误帧检测率;
- 3) 测量总线负载率;
- 4) 测试单节点故障容错能力;
- 5) 验证CRC校验功能。

测试结果应符合5.5.1.1条要求。

6.5.1.2 通信协议测试

验证通信协议符合性。测试设备：协议一致性测试系统、数据完整性验证工具。测试步骤：

- 1) 验证J1939协议一致性；
- 2) 测试ISOBUS兼容性；
- 3) 验证数据完整性；
- 4) 测试协议容错能力。

测试结果应符合5.5.1.2条要求。

6.5.2 无线通信测试

6.5.2.1 网络性能测试

测试网络切换性能和通信延迟。测试设备：网络分析仪、信号发生器、切换测试系统。测试步骤：

- 1) 测试Wi-Fi、蓝牙、4G/5G连接性能；
- 2) 测量网络切换延迟；
- 3) 验证切换触发信号强度；
- 4) 测试数据传输误码率；
- 5) 模拟移动场景测试。

测试结果应符合5.5.2.1和5.5.2.2条要求。

6.5.2.2 V2X通信测试

验证多机编队通信性能。测试设备：V2X测试系统、多节点通信平台、定位测试设备。测试步骤：

- 1) 测试通信延迟；
- 2) 验证定位精度；
- 3) 测试多机编队通信；
- 4) 验证支持车辆数量；
- 5) 测试抗干扰能力。

测试结果应符合5.5.2.3条要求。

6.5.3 网络安全测试

6.5.3.1 加密性能测试

验证加密协议的有效性。测试设备：密码算法测试平台、安全性能测试系统。测试步骤：

- 1) 验证SM2/SM3/SM4加密协议符合性；
- 2) 测试加密解密性能；
- 3) 验证密钥管理安全性；
- 4) 测试抗攻击能力。

测试结果应符合5.5.3.1条要求。

6.5.3.2 数据安全测试

测试系统抗攻击能力。测试设备：数据完整性测试系统、防篡改测试平台。测试步骤：

- 1) 测试数据传输完整性校验；
- 2) 验证防篡改能力；
- 3) 测试数据备份和恢复；
- 4) 验证访问控制安全性。

测试结果应符合5.5.3.2条要求。

6.6 系统级测试

6.6.1 系统功能测试

6.6.1.1 系统自检测测试

验证系统自检与初始化功能的完整性和时效性。测试设备：系统供电设备、计时器、故障注入工具
测试步骤：

- 1) 冷启动系统，记录从系统上电到显示“系统就绪”的时间；
- 2) 依次模拟GNSS、IMU、主控制器等关键模块故障；
- 3) 验证系统故障指示和运行状态拦截功能。

测试结果应符合5.6.1.1条要求。

6.6.1.2 人机协同测试

验证多模式切换的平顺性和响应性能。测试设备：车辆数据记录仪、加速度传感器、远程控制终端、高精度计时器。测试步骤：

- 1) 在自动作业过程中（车速5-8 km/h）进行人工接管；
- 2) 通过远程控制终端发送控制指令；
- 3) 记录模式切换响应时间和车辆纵向加速度变化。

测试结果应符合5.6.1.2条要求。

6.6.1.3 系统兼容性测试

验证系统兼容性能与各模块数据协调性能。测试设备：多种品牌硬件模块、不同版本软件、协议测试工具、数据同步测试系统。测试步骤：

- 1) 接入不同供应商的硬件模块，测试接口兼容性；
- 2) 安装不同版本软件，验证协同工作能力；
- 3) 执行复杂作业任务，测试功能协调性和数据同步精度；
- 4) 验证标准协议的一致性。

测试结果应符合5.6.1.3条要求。

6.6.2 系统性能测试

6.6.2.1 环境适应性测试

验证系统在不同田间环境下的作业适应能力。测试设备：倾斜测试平台、多种路面测试场、温湿度环境舱、性能监测系统。测试步骤：

- 1) 在倾斜平台测试纵向15°、横向8°坡度下的系统稳定性；
- 2) 在硬化路面、松软田地、泥泞路面测试系统通过性；
- 3) 在环境舱进行-40℃至85℃温度循环测试。

测试结果应符合5.6.2.1条要求。

6.6.2.2 作业效能测试

验证系统在燃油效率和作业效率方面的提升效果。测试设备：高精度油耗仪（精度±1%）、功率分析仪、标准测试循环、排放分析仪。测试步骤：

- 1) 设计标准作业测试循环（犁地、耙地、播种）；
- 2) 在相同条件下对比智能系统与传统人工操作；
- 3) 记录作业时间、燃油消耗量和排放指标；
- 4) 计算作业效率和燃油经济性；
- 5) 重复测试3次取平均值。

测试结果应符合5.6.2.2条要求。

6.6.2.3 响应性能测试

验证系统关键响应时间的符合性。测试设备：高精度计时器（分辨率1ms）、数据记录系统、故障注入设备。测试步骤：

- 1) 测量从操作员确认到车辆开始作业的响应时间；
- 2) 触发安全防护功能，记录系统响应时间；
- 3) 注入故障信号，测量故障检测和报警响应时间；

测试结果应符合5.6.2.3条要求。

6.6.3 系统安全与可靠性测试

6.6.3.1 系统安全测试

验证系统在故障状态下的安全保障能力。测试设备：故障注入系统、功能降级测试平台、安全状态监测设备。测试步骤：

- 1) 注入各类故障，测试故障检测准确率和隔离性能；
- 2) 验证系统功能降级策略的执行效果和切换时间；
- 3) 测试系统在故障状态下维持安全状态的能力；

测试结果应符合5.6.3.1条要求。

6.6.3.2 可靠性测试

验证系统可靠性指标的符合性。测试设备：综合测试平台、数据监控系统、故障记录装置。测试步骤：

- 1) 组织3台样机进行2000小时连续运行测试；
- 2) 模拟实际作业工况，记录所有系统故障事件；
- 3) 统计故障次数、类型、处理时间和维护周期；
- 4) 验证维护周期合理性。

测试结果应符合5.6.3.2条要求。
