

团 体 标 准

T/CAAMM xxxx—20xx

收割机与运粮车协同作业 技术规范

Technical Specifications for Coordinated Operations Between Combine

Harvesters and Grain Transport Vehicles

(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

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统组成	3
5 技术要求	3
6 协同卸粮作业方法	5
7 试验方法	6

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：河南科技大学、龙门实验室、第一拖拉机股份有限公司、山东理工大学、山西农业大学、中国农业机械化科学研究院集团有限公司、农业农村部南京农业机械化研究所。

本文件主要起草人：孙经纬、李倩文、赵凯旋、姬江涛、陈洪涛、王琳、刘卫想、陈焱楠、何永强、王宪良、张祥彩、姚艳春、全朋坤、张巍朋、陈凯康、于潇、王海渊、李明勇、王运东、丁天航。

本文件为首次发布。

收割机与运粮车协同作业 技术规范

1 范围

本文件规定了收割机与运粮车协同作业的术语和定义、系统组成、技术要求、作业方法和试验方法等内容。

本文件适用于智慧农场场景下无人驾驶联合收割机与运粮车之间的协同卸粮作业。其他收获机械与运输车辆的协同卸粮作业可参照本文件执行。

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不可缺少的条款。对于注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件；对于未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 10396-2006 农林拖拉机和机械、草坪和园艺动力机械 安全标志和危险图形 总则

GB/T 4208-2017 外壳防护等级（IP 代码）

GB/T 9480-2001 农林拖拉机和机械、草坪和园艺动力机械 使用说明书编写规则

GB/T 21398-2008 农林机械 电磁兼容性 试验方法和验收规则

GB/T 25110.1-2010 工业自动化系统与集成 工业应用中的分布式安装 第 1 部分：传感器和执行器

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 38874 农林拖拉机和机械 控制系统安全相关部件

GB/T 39571.2 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

T/CAAMM 306-2023 农业机械自主作业数字地图构建技术规范

T/NJ 1123 拖拉机 自动辅助驾驶系统 导航精度要求和试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

无人驾驶联合收割机 **autonomous combine harvester**

无需人工直接操控，依托定位导航、环境感知、任务规划与控制执行系统，实现谷物收获作业全过程自动化运行的联合收割机。

3.2

无人驾驶运粮车 **autonomous grain transport vehicle**

无需人工直接操控，利用定位导航、环境感知和智能决策等技术自主行驶，并可与无人驾驶联合收割机进行作业信息交互，按作业要求完成接粮、跟随、运输及卸载的农业物料转运车辆。

3.3

协同卸粮作业 cooperative grain unloading operation

无人驾驶联合收割机与运粮车通过通信、定位、路径规划等技术实现同步移动、自动对接及卸粮的协同作业过程。

3.4

卸粮点 grain discharge point

无人驾驶联合收割机出料口与运粮车粮箱接收面的预定卸粮位置点，可根据运粮车粮箱几何尺寸设置一个或多个位置点。

3.5

静态对接卸粮 static docking unloading

无人驾驶联合收割机在卸粮需求时停止作业并发送位置信息，运粮车依据该位置自主驶至指定卸粮区域，通过调整位置与航向，使出料口与粮箱接收面达到预定静止对接位置，从而完成卸粮作业。

3.6

动态对接卸粮 dynamic docking unloading

无人驾驶联合收割机在持续作业状态下保持行驶，并将实时位置信息发送给运粮车。运粮车依据收割机的位置和运动状态进行路径规划与速度匹配，在行驶中调整位置与航向，使出料口与粮箱接收面达到预定对接位置，完成卸粮作业。整个过程中，两车均保持正常行驶，无需停车。

3.7

协同卸粮作业偏差 deviation in cooperative unloading operation

卸粮过程中，无人驾驶联合收割机出料口中心与运粮车粮箱卸粮点在粮箱平面上的相对位置偏差，包括纵向和横向偏差。

3.8

横向偏差 lateral deviation

无人驾驶联合收割机卸粮筒出粮口中心垂直投影点相对运粮车粮箱中轴线在横向上（垂直于车辆行进方向）的偏差。

3.9

纵向偏差 longitudinal deviation

无人驾驶联合收割机卸粮筒出粮口中心垂直投影点相对运粮车粮箱指定卸粮点在车辆行进方向的偏差。

3.10

机间通信延时 inter-machine communication delay

无人驾驶联合收割机与无人驾驶运粮车进行通信时，数据从发送到接收所产生的延迟时间。

4 系统组成

协同卸粮作业系统由联合收割机卸粮子系统、运粮车接粮子系统和协同控制子系统组成。

4.1 收割机卸粮子系统

收割机卸粮子系统除联合收割本身必须具备的功能部件外，还应包括：

- a) 卸粮筒本体：包括螺旋输送机构、外壳及出料口，用于粮食输送；
- b) 卸粮筒伸缩机构：实现卸粮筒的伸出和收回；
- c) 卸粮筒回转机构：实现卸粮筒的水平回转；
- d) 卸粮筒俯仰机构：实现卸粮筒俯仰角度调整；
- e) 粮仓液位传感器：用于监测粮仓装载量；
- f) 卸粮流量传感器：用于监测卸粮流量；
- g) 卸粮筒位姿传感器：用于监测卸粮筒伸展长度、回转角度及俯仰角度；
- h) 卸粮控制器：用于控制卸粮筒各机构动作并调节卸粮流量。

4.2 运粮车接粮子系统

运粮车接粮子系统应包括：

- a) 粮箱：具有足够容积和强度的粮食接收容器；
- b) 粮仓液位传感器：用于监测粮仓装载量；

4.3 协同控制子系统

协同控制子系统应包括：

- a) 定位装置：联合收割机和运粮车均应配备，提供实时位置及姿态信息；
- b) 机间通信装置：用于实现联合收割机与运粮车之间的数据通信；
- d) 协同控制算法：用于计算卸粮筒最优姿态和运粮车最优位置，控制联合收割机卸粮筒到达指定卸粮点，并调节运粮车位置，使两车始终保持最佳卸粮对接位置完成作业；
- e) 机载终端：联合收割机和运粮车均应配备，用于显示两车作业及行驶状态，并可人为调整车辆作业及行驶参数。
- f) 远程显示与控制终端：用于远程显示联合收割机和运粮车作业及行驶状态，并可通过控制终端进行人工操控。

5 技术要求

5.1 一般要求

- 5.1.1 协同卸粮作业系统应符合本文件要求，并按照批准的技术文件进行设计与开发。
- 5.1.2 无人驾驶联合收割机和运粮车传感器的选用和安装应符合GB/T 25110.1-2010的规定。
- 5.1.3 无人驾驶联合收割机和运粮车应配备T/NJ 1123要求的导航定位系统。

- 5.1.4 无人驾驶联合收割机和运粮车通信模块应能够实时收发车辆状态信息。
- 5.1.5 无人驾驶联合收割机和运粮车系统电气及电子元器件质量应符合GB/T 5226.1-2019的相关要求。
- 5.1.6 无人驾驶联合收割机和运粮车系统电气线路应连接可靠，布置应避免摩擦、接触发热及与运动部件干涉。

5.2 安全要求

- 5.2.1 无人驾驶联合收割机和运粮车安全标志设计和使用应符合GB 10396-2006的规定。
- 5.2.2 无人驾驶联合收割机和运粮车使用说明书应符合GB/T 9480-2001的规定，并至少包括安全操作与维护保养措施及协同卸粮作业时远程监控人员配置。
- 5.2.3 无人驾驶联合收割机和运粮车在遇到障碍物或异常情况时，应具备自动停车功能。
- 5.2.4 协同卸粮作业系统应具备远程监控与控制功能，以便异常情况下或作业状态需调整时进行人为干预。
- 5.2.5 协同卸粮作业过程中，如车辆间通信中断，应在确保安全的情况下停止协同卸粮模式及当前卸粮作业。
- 5.2.6 协同卸粮作业系统的防护等级应满足以下要求：
 - a) 驾驶室内装置外壳防护等级应符合 GB/T 4208-2017 IP54;
 - b) 室外图像采集装置、机具识别装置等外壳防护等级应符合 GB/T 4208-2017 IP66;
 - c) 连接线和插接器防护等级应符合 GB/T 4208-2017 IP66。

5.3 功能要求

5.3.1 数据采集与传输

各传感器、控制执行机构及通信设备应能够与机载终端实时通信，用于采集联合收割机和运粮车的位置、姿态、速度及粮仓状态等关键信息。

5.3.2 导航定位

联合收割机和运粮车应具备高精度GNSS定位功能，定位精度应符合T/NJ 1123的规定。

5.3.3 数据处理

机载终端软件应能够对导航及作业信息进行处理，包括数据解析、参数设置、路径规划、相对位置计算及协同决策控制。

5.3.4 人机交互

机载终端应实时显示车辆位置信息及作业状态，并支持作业参数设置及模式切换。

5.3.5 机间无线通信

联合收割机和运粮车应保持稳定的机间无线通信，使双方实时获取对方位姿及作业路径信息。

5.3.6 远程无线通信

远程控制终端与联合收割机及运粮车应保持稳定的无线通信；远程控制终端应实时监控车辆作业状态，远程操作员应能通过远程控制终端调整协同卸粮作业状态。

5.3.7 跟随作业

运粮车应能够根据联合收割机速度、相对距离及航向角保持一定横纵向距离自动跟随，协同完成卸粮作业。

5.3.8 自动卸粮

联合收割机在卸粮过程中应能自动启动卸粮筒，运粮车根据收割机位置信息调整自身位置与航向，实现精准对接卸粮。

5.3.9 粮仓监测

车辆应能够实时监测粮仓装载状态。

5.4 性能要求

5.4.1 无人驾驶联合收割机和运粮车在协同卸粮作业中单车定位精度应符合 T/NJ 1123的规定。

5.4.2 协同卸粮作业中机间通信延时不超过100毫秒；远程通信延时不超过3秒。

5.4.3 无人驾驶联合收割机和运粮车导航系统作业性能指标应符合GB/T 37164-2018的规定。

5.4.4 协同卸粮作业偏差

a) 静态对接卸粮：联合收割机停车后进行卸粮，对接稳定后，协同卸粮横向偏差应 $\leq 10\text{ cm}$ ，纵向偏差应 $\leq 20\text{ cm}$ ；。

b) 动态对接卸粮：联合收割机和运粮车同步移动卸粮时，协同卸粮横向偏差应 $\leq 20\text{ cm}$ ，纵向偏差应 $\leq 30\text{ cm}$ 。

6 协同卸粮作业方法

协同卸粮作业基本流程包括：系统初始化、路径规划、跟随作业、自动卸粮、异常处理。

6.1 系统初始化

6.1.1 联合收割机和运粮车应分别完成导航定位系统初始化。

6.1.2 联合收割机和运粮车应建立可靠的机间无线通信连接。

6.1.3 联合收割机和运粮车应完成传感器系统自检。

6.1.4 远程监控系统应与联合收割机及运粮车建立稳定的无线通信连接。

6.2 路径规划

6.2.1 联合收割机应基于作业农田数字地图规划收获作业路径。

6.2.2 运粮车应根据联合收割机的作业路径、实时位置及相对位置要求规划跟随路径。

6.2.3 路径规划应综合考虑以下因素：

a) 农田边界及障碍物；

b) 卸粮作业安全距离；

c) 地头转弯半径。

6.3 跟随作业

6.3.1 运粮车应根据联合收割机的实时位置与姿态，动态调整速度与方向，保持规定的相对位置与姿态。

6.3.2 运粮车应实时监测与联合收割机的相对距离，并保持在安全范围内。

6.3.3 跟随作业时的协同卸粮作业偏差应满足5.4.4的要求。

6.4 自动卸粮

6.4.1 当联合收割机粮仓达到设定装载量时，应向运粮车发送卸粮请求。

6.4.2 运粮车确认卸粮请求后，应调整自身位置和姿态至卸粮对接位置。

- 6.4.3 联合收割机应自动开启卸粮筒，并调整卸粮筒角度与方向，对准运粮车粮箱接收位置。
- 6.4.4 动态对接卸粮时，联合收割机与运粮车应保持同步移动并保持相对位置稳定。
- 6.4.5 卸粮筒对接精度应满足联合收割机作业要求。
- 6.4.6 运粮车应实时监测自身粮仓装载状态，接近满载时应及时清空粮箱或通知联合收割机暂停卸粮。
- 6.4.7 卸粮完成后，联合收割机应自动关闭卸粮筒，运粮车应驶离卸粮作业区域。

6.5 异常处理

6.5.1 通信中断处理

- a) 机间通信中断时，两车应立即停止运动，以防碰撞；
- b) 远程通信中断时，系统可维持当前自主作业，但不得执行卸粮作业。

6.5.2 定位异常处理

当定位精度无法满足协同卸粮要求时，应自动中止协同卸粮作业。

6.5.3 障碍物检测处理

检测到障碍物时，应立即停止移动并发出警告；远程操作人员应介入确认和处理障碍物情况。

6.5.4 设备故障处理

当检测到关键设备故障时（如导航、通信、执行机构等），系统应立即停止作业并发出警告提示。

7 试验方法

7.1 试验条件

7.1.1 试验场地

试验场地应满足下列要求：

- a) 试验场地应为平整农田，具备待收获作物，且作物成熟度应满足正常收获作业要求；
- b) 试验场地长度不应小于 200 m，宽度不应小于 50 m；
- c) 定位装置接收天线的仰角应大于 10° ，且接收范围内应保持开阔无遮挡；行进方向不得存在树木、建筑物等可能影响卫星信号的高立面，以避免卫星信号遮挡；
- d) 试验现场不得启用可能造成同频、邻频或强辐射干扰的无线设备

7.1.2 系统设备要求

协同卸粮作业系统的设备安装应牢固可靠，各项性能指标应正常。无人驾驶联合收割机与运粮车的作业状态应符合使用说明书要求，并在达到稳定工作条件后方可开展试验。

7.1.3 环境条件

如无特殊规定，试验环境条件应满足以下要求：

- a) 作业能见度不低于 300 m；
- b) 相对湿度范围应为 10 %~85 %；
- c) 环境温度范围应为 0°C ~ 40°C 。

7.1.4 网络通信条件

试验现场的通信网络应确保无人驾驶联合收割机与运粮车之间，以及机载终端与远程监控平台之间的通信稳定且可靠。

7.2 试验仪器设备

7.2.1 试验设备精度要求

试验使用的仪器设备的性能指标应满足被测参数的精度要求。除非另有规定，试验设备的测量精度应：

- a) 优于被测技术指标一个数量级；
- b) 低于被测指标误差允许范围的 1/3。

7.2.2 仪器设备校准要求

用于试验的仪器和测量设备应通过具有资质的法定计量机构或授权实验室校准，并在有效校准周期内使用。超过校准有效期或存在损坏、性能异常的设备不得投入试验。

7.3 机间通信延时测量

7.3.1 测量方法

试验应在试验田内进行，并分别在车辆静止状态和稳定移动状态下测量机间通信延时。采用联合收割机与运粮车的无线通信模块进行测试，两车通信设备分别作为发送端与接收端。

如无特殊规定，采用时间戳法测量通信延时，具体如下：

- a) 联合收割机侧发送携带本地高精度时间戳的测试报文；
- b) 运粮车侧接收报文并记录本地时间戳；
- c) 试验前，两车时钟应通过 GNSS 时间或统一授时模块保持同步；
- d) 通信延时应为接收时间戳与发送时间戳之间的差值。

7.3.2 试验设置与数据采集

试验应按照下列工况进行：

- a) 不同报文发送频率：10 Hz、15 Hz、20 Hz；
- b) 静态状态下不同车辆间距：10 m、50 m、100 m；
- c) 动态状态下车辆保持稳定速度（速度值根据作业要求选取）。

每组试验应重复进行不少于 3 次，记录所有测量值并计算平均值，最终平均值应作为该试验条件下的机间通信延时结果。

7.4 协同卸粮作业偏差计算

7.4.1 静态对接卸粮偏差

静态对接卸粮条件下，应进行不少于 3 次协同卸粮试验，记录测量结果并计算平均值。

a) 横向偏差

测量方法如下：

- 1) 将激光笔固定在联合收割机卸粮筒出料口中心位置，使激光垂直向下投射至运粮车粮箱底面；
- 2) 人工测量该投射点至运粮车粮箱中轴线的距离，记为 d_i ；
- 3) 重复测量 3 次，取平均值，按式（1）计算。

$$\bar{d}_1 = \frac{d_{1i}}{N} \quad (1)$$

式中：

\bar{d}_1 —横向平均误差，单位为 cm；

d_{1i} —第 i 次作业时的横向误差，单位为 cm；

N —测试次数。

b) 纵向偏差

测量方法如下：

- 1) 将激光笔固定在联合收割机卸粮筒出料口中心位置，使激光垂直向下投射至运粮车粮箱底面；
- 2) 人工测量投射点至运粮车粮箱尾部的距离，记为 d_2 ；
- 3) 结合粮箱长度 d_0 ，计算每次纵向偏差；若存在多个卸粮点，则将参考距离改为卸粮点至粮箱尾部的距离 d'_0 ；
- 4) 重复测量 3 次，取纵向误差绝对值平均值，计算方法按式（2）进行，若存在多个卸粮点，则将 $d_0/2$ 替换 d'_0 。

$$\bar{d}_2 = \frac{\sum_{i=1}^N |d_{li} - d_0/2|}{N} \quad (2)$$

式中：

\bar{d}_2 ——纵向平均误差，cm；

d_{li} ——第 i 次作业时的纵向误差，单位为 cm；

d_0 ——运粮车粮箱长度，单位为 cm

d'_0 ——卸粮点距离粮箱尾部的距离，单位为 cm

N ——测试次数。

7.4.2 动态对接卸粮偏差

动态对接卸粮条件下，对卸粮筒出粮口中心位置垂直投影点与粮箱卸粮点进行实时位置测量。

测量方法如下：

- 1) 在联合收割机卸粮筒参考点和运粮车粮箱参考点分别安装 RTK-GNSS 位置传感器；
- 2) 对两节点天线位置偏移进行标定，确保测量点与实际卸粮参考点一致；
- 3) 同步两车时钟，以确保时间戳一致；
- 4) 采集动态条件下两点的实时位置坐标；
- 5) 按时间序列连续计算横向与纵向偏差，得到偏差时序曲线。

偏差计算如公式（3）和（4）。

横向偏差：

$$e_x(t) = |x_{hav}(t) - x_{ref}(t)| \quad (3)$$

纵向偏差：

$$e_y(t) = |y_{hav}(t) - y_{ref}(t)| \quad (4)$$

式中：

$e_x(t)$ ——时刻 t 的横向偏差，单位为 cm；

$x_{hav}(t)$ ——卸粮筒出粮口中心位置投影点的横向坐标；

$x_{ref}(t)$ ——粮箱卸粮点横向坐标；

$e_y(t)$ ——时刻 t 的纵向偏差，单位为 cm；

$y_{hav}(t)$ ——卸粮筒出粮口中心位置投影点的纵向坐标；

$y_{ref}(t)$ ——粮箱卸粮点纵向坐标；