

团 体 标 准

T/CAAMM 397—2026

收割机与田间粮食转运车协同作业 技术规范

Coordinated Operation Between Combine Harvesters and Field Grain Transfer
Vehicles—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 系统组成.....	3
5 技术要求.....	4
6 测试方法.....	7

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、陈燚楠、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。

收割机与田间粮食转运车协同作业 技术规范

1 范围

本文件规定了收割机与田间粮食转运车协同作业的术语和定义、系统组成、技术要求和测试方法。

本文件适用于稻麦无人驾驶联合收割机与无人驾驶田间粮食转运车之间的协同卸粮作业。其他收获机械与田间粮食转运车的协同卸粮作业参照执行。

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必不可少的条款。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/T 4208 外壳防护等级（IP 代码）

GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件

GB/T 9480 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 10396 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 16754 机械安全 急停功能 设计原则

GB/T 25110.1 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 46270 农业机械北斗自动驾驶系统

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**

依托定位导航、环境感知、路径规划与控制执行系统，实现谷物收获作业全过程无人化运行的联合收割机。

注：以下简称“联合收割机”。

3.2

无人驾驶田间粮食转运车 **autonomous field grain transfer vehicle**

依托定位导航与智能控制，在田间收获作业环境下实现自主行驶，并可与联合收割机进行作业信息交互，按作业要求完成接粮、跟随、运输及卸粮的农业物料转运车辆。

注：以下简称“运粮车”。

3.3

协同卸粮作业 cooperative grain unloading operation

联合收割机与运粮车通过通信、定位、路径规划等技术实现跟随、自动对接、卸粮的协同作业过程。

3.4

卸粮点 grain unloading point

联合收割机卸粮筒出粮口与运粮车粮仓接收面的预定卸粮位置点，根据运粮车粮仓尺寸可设置一个或多个位置点。

3.5

静态对接卸粮 static docking unloading

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行驶至指定区域，通过调整位置与航向，使联合收割机卸粮筒出粮口与运粮车粮仓接收面达到预定静止对接位置，完成卸粮作业。

3.6

动态对接卸粮 dynamic docking unloading

联合收割机在持续作业状态下，将实时位置信息发送给运粮车。运粮车依据联合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，使联合收割机卸粮筒出粮口与运粮车粮仓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，无需静止。

3.7

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

在协同卸粮作业中，联合收割机卸粮筒出粮口中心与运粮车粮仓接收面中心之间的相对位置偏差值，包括纵向偏差和横向偏差。

3.8

横向偏差 lateral deviation

联合收割机卸粮筒出粮口中心垂直投影点相对运粮车指定卸粮点在横向上（垂直于收割行进方向）的偏差。

3.9

纵向偏差 longitudinal deviation

联合收割机卸粮筒出粮口中心垂直投影点相对运粮车指定卸粮点在收割行进方向的偏差。

3.10

机间通信延时 inter-machine communication delay

联合收割机与运粮车进行通信时，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、无人驾驶田间粮食转运车接粮子系统和协同控制子系统组成。

4.1 联合收割机卸粮子系统

联合收割机卸粮子系统除本身应具备的功能部件外，还包括下列部件：

- a) 卸粮筒本体：包括螺旋输送机构、外壳及出粮口，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) 粮仓料位传感器：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

运粮车接粮子系统包括：

- a) 粮仓：具有足够容积和强度的粮食接收容器；
- b) 粮仓料位传感器：用于监测粮仓装载量；
- c) 粮仓导流装置：用于疏散粮食不均匀堆积。

4.3 协同控制子系统

协同控制子系统包括：

- 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；
- c) 协同控制装置：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；
- d) 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，并可人为调整作业及行驶参数；
- e) 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，按照批准的技术文件进行设计与开发。

5.1.2 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的规定。

5.1.3 联合收割机和运粮车导航定位系统的作业性能应符合GB/T 46270的规定。

5.1.4 联合收割机和运粮车通信模块应实时收发车辆状态信息。

5.1.5 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的相关要求。

5.1.6 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，并采取必要的防护措施。

5.2 安全要求

5.2.1 联合收割机和运粮车安全标志设计和使用应符合GB 10396的规定。

5.2.2 联合收割机和运粮车使用说明书中应包含安全操作规程和协同卸粮作业时远程监控人员配置要求。维护保养相关内容应符合GB/T 9480的规定。

5.2.3 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。远程监控应能实时查看联合收割机和运粮车的运行状态、作业进度及关键参数。

5.2.4 根据协同卸粮作业系统各设备安装位置所面临的粉尘、淋水、冲洗等环境条件，外壳防护等级应满足以下要求：

a) 驾驶室内装置（包括但不限于控制终端、显示屏、操作面板、通信设备等）外壳防护等级应符合 GB/T 4208 中 IP54 的规定；

b) 室外图像采集装置、机具识别装置等外壳防护等级宜不低于 GB/T 4208 中 IP65 的规定，镜头部分可适当放宽但应采取有效防尘防水措施；

c) 连接线和插接器防护等级应符合 GB/T 4208 中 IP65 的规定，且安装位置应避免直接受高压水枪冲击。

5.2.5 联合收割机和运粮车应设置紧急停机装置，紧急停机功能的设计应符合 GB/T 16754 的规定。紧急停机装置应符合以下要求：

a) 本地紧急停机装置应设置在操作人员易于触及的位置；远程紧急停机功能应在远程监控终端的操作界面中设置显著且不易误触发的虚拟急停按钮。紧急停机装置（含本地和远程）应采用红色标识，本地按钮应为蘑菇头式设计并具有自锁功能；

b) 触发紧急停机后，应立即发出切断作业动力指令并施加可控减速制动；制动减速度不应超过系统设计限值，避免失控；卸粮筒的紧急收回可与行走制动并行执行；

c) 紧急停机装置的复位只能通过手动操作完成，复位后不应自动重新启动任何作业功能。

5.2.6 协同卸粮作业中的异常处理遵循“停车优先、人工确认恢复”原则，禁止系统自动重启，具体安全处置要求如下：

a) 通信中断处理, 机间通信中断时, 两车应按预设安全策略执行减速停车; 停车后进入“安全等待”模式, 发出本地及远程声光报警; 通信恢复后, 系统禁止自动恢复作业, 须经远程操作人员手动确认并重新完成初始化后方可重启;

b) 障碍物检测与响应, 若协同卸粮过程中遇障, 除紧急制动外, 须同步执行卸粮筒紧急收回程序, 以避免卸粮筒与障碍物或运粮车发生碰撞。待确认卸粮筒收回至安全位置且远程操作人员通过图像确认障碍物已清除后, 方可远程解锁恢复行驶;

c) 关键设备故障处理, 执行机构(转向、制动、卸粮筒驱动)、主控制器或安全急停电路发生故障时, 系统应立即切断行走及作业动力, 并切换至制动安全状态, 同时推送故障代码至远程终端。

5.3 功能要求

5.3.1 作业准备与系统初始化

系统启动时, 应按以下顺序完成初始化, 任意环节失败则禁止进入后续作业:

- a) 联合收割机和运粮车分别完成导航定位系统初始化, 获取初始位姿信息;
- b) 联合收割机和运粮车应建立可靠的机间无线通信连接, 并确认通信链路正常;
- c) 联合收割机和运粮车分别完成传感器自检(含粮仓料位、障碍物感知、执行机构状态), 确认无故障;
- d) 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, 并完成远程急停功能有效性测试。

5.3.2 路径规划与跟随行驶

- a) 联合收割机基于农田数字地图及边界规划全局收获路径; 运粮车根据收割机路径、实时位置及地头转弯半径, 规划安全跟随路径;
- b) 跟随过程中, 运粮车应根据联合收割机的速度、航向角及相对距离, 自动动态调整自身速度与转向, 保持横纵向相对位置。

5.3.3 卸粮请求与自动对接

- a) 联合收割机实时监测粮仓装载量, 当装载量达到满仓阈值的 80% 时发出卸粮预提醒, 达到 95% 时自动向运粮车发送卸粮请求;
- b) 运粮车确认请求后, 自动调整至卸粮对接位, 对接过程中联合收割机保持匀速直线行驶(动态对接)或静止(静态对接);
- c) 联合收割机确认运粮车到位后, 自动展开卸粮筒, 调整角度对准运粮车粮箱接收区域。对接完成后, 两车相对位置偏差应满足性能指标要求;
- d) 高速(v_3 , 按5.4.1表1注的定义)时禁止执行动态对接卸粮。若高速状态下触发卸粮需求, 联合收割机应自动减速至 v_2 及以下速度后方可执行动态对接。

5.3.4 卸粮执行与驶离

a) 联合收割机自动启动卸粮搅龙开启卸粮，卸粮过程中两车保持相对位置不变（静态）或同步移动（动态）；

b) 运粮车实时监测自身粮仓装载量，当装载量达到额定容量的 90% 时，立即向收割机发送“满仓预警”指令；

c) 联合收割机收到满仓预警或达到预设卸粮量后，自动关闭卸粮筒闸门并停止搅龙，卸粮筒完全收回后向运粮车发送脱离指令；

d) 运粮车收到脱离指令后，驶离卸粮区域，前往转运点。

5.4 性能要求

5.4.1 机间通信延时

协同卸粮作业中，机间通信延时宜按表1规定的速度分级执行。当设备条件允许时，建议统一按最严指标（ v_3 级）要求执行，以提高系统鲁棒性。

表 1 通信延时要求

序号	收割作业速度	性能参数	单位	指标要求
1	v_1	机间通信延时	s	≤ 0.2
2	v_2	机间通信延时	s	≤ 0.15
3	v_3	机间通信延时	s	≤ 0.1
注： v_1 为低速， $v_1 \leq 3\text{km/h}$ ； v_2 为中速， $3\text{km/h} < v_2 \leq 5\text{km/h}$ ； v_3 为高速， $5\text{km/h} < v_3 \leq 8\text{km/h}$ 。				

5.4.2 协同卸粮作业偏差

协同卸粮作业各模式下的相对位置偏差应符合表 2 的规定。

表 2 协同卸粮作业性能要求

序号	类别	收割作业速度	性能参数	单位	指标要求
1	静态对接卸粮	—	横向偏差	cm	≤10
2			纵向偏差	cm	≤20
3	动态对接卸粮	v ₁	横向偏差	cm	≤15
4			纵向偏差	cm	≤25
5		v ₂	横向偏差	cm	≤20
6			纵向偏差	cm	≤30
7		v ₃	横向偏差	cm	—
8			纵向偏差	cm	—
注 1: v ₁ 为低速, v ₁ ≤3km/h; v ₂ 为中速, 3km/h<v ₂ ≤5km/h; v ₃ 为高速, 5km/h<v ₃ ≤8km/h。					
注 2: v ₃ 速度下禁止执行动态对接卸粮, 需减速至 v ₂ 及以下速度后方可执行。					
注 3: 静态对接卸粮时联合收割机处于静止状态, 无作业速度分级。					

5.4.3 粮仓装载量监测精度

联合收割机和运粮车应实时监测装载状态，监测内容与精度应符合以下要求：

a) 联合收割机粮仓装载量（以体积百分比或质量表示），应具备满仓报警功能，装载量测量误差不大于粮仓满仓容量的 $\pm 5\%$ ，满仓报警触发阈值误差不大于设定阈值的 $\pm 3\%$ ；

b) 运粮车粮仓装载量（以体积百分比或质量表示），应具备满仓报警功能，装载量测量误差不大于粮仓额定容量的 $\pm 5\%$ ，满仓报警触发阈值误差不大于设定阈值的 $\pm 3\%$ 。

6 测试方法

6.1 测试条件

6.1.1 作业场地

作业场地应满足下列要求：

- a) 作业场地应为平整农田，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) 作业场地长度不应小于 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；行进方向不应存在树木、建筑物等高大障碍物，以避免遮挡或反射卫星信号；
- d) 测试现场不应启用可能造成同频、邻频或强辐射干扰的无线设备。

6.1.2 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。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测试。

6.1.3 环境条件

如无特殊规定，测试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 ~ 45°C 。

6.1.4 作业速度条件

动态对接卸粮偏差测试仅需在 v_1 和 v_2 速度等级下进行， v_3 等级仅测试通信延时，速度等级划分见表 2 的注 1；每个速度等级应分别进行不少于 3 次有效测试，取平均值作为该速度等级下的测试结果。

6.2 仪器设备

6.2.1 设备精度要求

测试使用的仪器设备性能指标应满足被测参数的精度要求。除非另有规定，设备的测量精度应优于被测技术指标一个数量级。

6.2.2 仪器设备校准要求

用于测试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、性能异常的设备不应投入测试。

6.3 功能要求验证

采用目测、观察或操作验证等方式，对第 5 章中适用于定性验证的功能要求（包括但不限于 5.1、5.2、5.3 中规定的功能）逐条检查并记录结果。

6.4 性能要求验证

6.4.1 机间通信延时

6.4.1.1 测量方法

测试应在试验田内进行，并分别在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) 测试前，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。

6.4.1.2 测试设置与数据采集

测试应按照下列工况进行：

- a) 不同报文发送频率：20 Hz、50 Hz、100 Hz；
- b) 静态状态下不同联合收割机和运粮车间距：10 m、50 m、100 m；
- c) 动态状态下联合收割机分别在 v_1 、 v_2 、 v_3 三个速度等级下保持稳定行驶，每个速度等级下分别进行测试。

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

6.4.2 协同卸粮作业偏差

6.4.2.1 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) 将激光笔安装在联合收割机卸粮筒出粮口外壁固定位置，使激光垂直向下投射至运粮车粮仓底面，测量并记录激光笔安装点相对于出粮口中心的横向偏移量 Δ ；
- 2) 人工测量该投射点至运粮车卸粮点的横向距离（垂直于收割行进方向） d_1' ，横向偏差 $d_1 = d_1' \pm \Delta$ （根据激光笔安装方向确定加减号）；
- 3) 重复测量 5 次，取平均值，按式（1）计算。

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

式中：

$\bar{d}_1$ —横向偏差，单位为厘米（cm）；

d_{1i} —第 i 次作业时的 d_1 ，单位为厘米（cm）；

N —测试次数。

b) 纵向偏差

测量方法如下：

1) 将激光笔安装在联合收割机卸粮筒出粮口外壁固定位置，使激光垂直向下投射至运粮车粮仓底面，测量并记录激光笔安装点相对于出粮口中心的纵向偏移量 λ ；

2) 人工测量投射点至运粮车粮仓尾部的距离 d_2' ，纵向偏差 $d_2 = d_2' \pm \lambda$ （根据激光笔安装方向确定加减号）；

3) 重复测量 5 次，取平均值，按式（2）计算；若存在多个卸粮点，测量卸粮点至运粮车粮仓尾部的距离 d_0' ，将 $d_0/2$ 替换为 d_0' 。

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

式中：

$\bar{d}_2$ —纵向偏差，单位为厘米（cm）；

d_{2i} —第 i 次作业时的 d_2 ，单位为厘米（cm）；

d_0 —运粮车粮仓长度，单位为厘米（cm）

d_0' —卸粮点距离运粮车粮仓尾部的距离，单位为厘米（cm）

N —测试次数。

6.4.2.2 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仓参考点分别安装 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）。

动态横向偏差：

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

动态纵向偏差:

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

式中:

$e_x(t)$ —时刻 t 的横向偏差, 单位为厘米 (cm);

$x_{hav}(t)$ —卸粮筒出粮口中心位置投影点的横向坐标;

$x_{ref}(t)$ —卸粮点横向坐标;

$e_y(t)$ —时刻 t 的纵向偏差, 单位为厘米 (cm);

$y_{hav}(t)$ —卸粮筒出粮口中心位置投影点的纵向坐标;

$y_{ref}(t)$ —卸粮点纵向坐标。

6.4.3 粮仓监测精度

a) 装载量测量误差计算: 采用地磅称量整车差值法标定实际装载量。联合收割机或运粮车空载时, 整车驶上地磅称量空车质量 m_0 (单位为 kg); 装载作业后再次称量整车质量 m_1 (单位为 kg), 实际装载量 $V_p = m_1 - m_0$ (单位为 kg)。对比同一时刻机载终端显示的装载量值 V_s (单位为 kg), 按式 (5) 计算测量误差。测试重复进行不少于 3 次, 取各次测量误差绝对值最大值作为最终结果。

$$E = \left| \frac{V_s - V_p}{V_f} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中:

E —装载量测量误差, %;

V_s —机载终端显示装载量, 单位为千克 (kg);

V_p —地磅称量的实际装载量, 单位为千克 (kg);

V_f —粮仓满仓容量或粮仓额定容量, 单位为千克 (kg)。

b) 满仓报警阈值误差验证: 向粮仓内分步加入已知质量的标定物料, 逐步逼近设定的报警阈值点, 记录系统触发报警时的实际累计加载量。每步加载后稳定不少于 5 s, 待机载终端显示值稳定后继续下一步; 重复测试 3 次, 以各次触发报警时的实际装载量与设定阈值的偏差绝对值最大值作为报警触发阈值误差, 验证结果是否符合 5.4.3 中 a) 和 b) 的规定。