

ICS 65.060.99

CCS B 93

团 体 标 准

T/CAAMM 400—2026

钉齿滚筒脱粒装置 脱粒力 试验方法

Spike-tooth cylinder threshing device—Threshing force—Test method

（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 试验原理	2
5 试验条件与设备	2
6 标定与校准	4
7 试验方法	5
8 判定规则	8
9 试验报告	8

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：龙门实验室、河南科技大学、郑州中联收获机械有限公司、河南巨隆科技有限公司、国创农业装备质量检验检测技术（洛阳）有限公司、洛阳福格森机械装备有限公司。

本文件主要起草人：王升升、郭浩、吴千、金鑫、贺智涛、杜哲、解文东、刘浩、赵越云、李保忠、华广田、曹军、陈中瀚、王冰倩、赵帅祥。

本文件为首次发布。

钉齿滚筒脱粒装置 脱粒力 试验方法

1 范围

本文件规定了钉齿滚筒脱粒装置 脱粒力 试验方法的术语和定义、试验原理、试验设备与条件、标定与校准、试验方法、判定规则和试验报告等内容。

本文件适用于钉齿滚筒脱粒装置脱粒力的试验，其他齿杆类滚筒脱粒装置可参照使用。

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 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 5262 农业机械 试验条件测定方法的一般规定

GB/T 5667 农业机械 生产试验方法

GB/T 5982 脱粒机 试验方法

GB/T 6979.2 收获机械 联合收割机及功能部件 第2部分：在词汇中定义的性能和特征评价

GB/T 8097 收获机械 联合收割机 测试程序和性能评价

GB/T 9239.11 机械振动 转子平衡 第11部分：刚性转子的平衡方法和允差

3 术语和定义

下列术语定义适用于本文件。

3.1 钉齿滚筒脱粒装置 spike-tooth cylinder threshing device

通过旋转滚筒上的钉齿对作物（如谷物、豆类等）进行冲击、挤压和搓擦，使籽粒与植株分离的机械装置。

3.2 脱粒力 threshing force

钉齿滚筒脱粒过程中，由钉齿与作物相互作用产生并由本文件规定的测量和换算方法获取的测点等效载荷，单位为牛顿（N）。

3.3 测点 measuring point

布置传感元件并输出力信号的钉齿齿杆末端或等效结构位置。

3.4 标定系数 calibration coefficient

将传感器输出（电压/应变/数字量）换算为脱粒力（总载荷）的比例系数或函数关系。

3.5 稳态段 steady-state segment

在试验工况（转速、喂入量等）满足稳定判据的条件下，用于统计计算脱粒力指标的有效数据时间段。

3.6 特征频率 characteristic frequency

由滚筒转速和测点每转有效受载次数确定，并经预试验频谱分析确认的脱粒力信号主要重复频率。

3.7 异常信号 abnormal signal

由传感器断线、短路、采集饱和、通信中断、电磁干扰、线缆甩动或机械非正常碰撞等原因产生，且与实际脱粒载荷变化不一致的非物理信号。

3.8 变异系数 coefficient of variation

稳态段内脱粒力数据的相对离散程度，用稳态段脱粒力的标准差与其平均值之比的百分数表示。

4 试验原理

脱粒过程中，钉齿与作物接触产生的冲击、挤压和搓擦载荷使测点结构产生弹性变形，传感元件将该变形转换为电信号。经信号调理和数据采集后，按照标定关系将传感器输出信号换算为测点处等效脱粒力，形成由各采样时刻的脱粒力值按时间顺序排列的脱粒力序列。扣除空载基线后，在滚筒转速和喂入量满足稳态判据的有效数据段内，计算脱粒力平均值、峰值、标准差和变异系数，用于表征脱粒力水平及其波动特性。

5 试验设备与条件

5.1 钉齿滚筒

5.1.1 钉齿滚筒应具备可调转速功能，能够覆盖被测滚筒的试验转速范围；

5.1.2 滚筒总成在试验前应进行平衡校核。传感器、引线、防护件或配重安装后改变滚筒质量分布时，应重新进行平衡校核。刚性滚筒的平衡方法和允差应按GB/T 9239.11执行，并在试验报告中注明采用的平衡品质等级和允许剩余不平衡量。

5.1.3 转速控制稳定性：稳态段内转速波动应不超过设定值的 $\pm 5\%$ ；

5.1.4 滚筒安装应牢固，旋转部件应设置防护罩，满足安全要求；

5.1.5 应具备可控喂入装置或供料方式，能够在规定喂入量下连续、均匀地供给试样。

5.2 传感与测量系统

5.2.1 传感器量程：应不小于预计最大脱粒力峰值的 1.5 倍；

5.2.2 综合测量误差（包括传感器、信号调理和数据采集）：应不大于 $\pm 2\%FS$ ；

5.2.3 过载能力：应不小于 $120\%FS$ ；

5.2.4 温漂：在规定试验温度范围内，测量系统温漂应不大于±1%FS。

5.3 传感器安装与防护

5.3.1 测点应布置在钉齿根部或齿杆固定端能够反映主要脱粒载荷的主应变区域，并避开焊趾、圆角、孔边及截面突变部位。传感元件敏感栅中心与上述边界的距离不应小于敏感栅长度的1.5倍。测点相对于钉齿根部基准面的轴向位置、周向位置和安装方向应以尺寸或示意图表示，重复安装定位误差不应超过±1 mm。

5.3.2 测点位置应通过结构分析或静载预试验确定。在最大标定载荷下，测量结构应处于弹性变形范围，传感器输出宜位于其有效量程的20%~80%。

5.3.3 采用应变测量时，应采用成对粘贴以实现温度补偿；粘贴、固化、引线固定应符合应变测试工艺要求。

5.3.4 引线应采取防甩动、防磨损措施；传感元件及接线处应采用灌胶、热缩管密封等方式处理，其防护等级应不低于GB/T 4208规定的IP67。

5.3.5 传感系统安装完成后，应进行电阻/绝缘/零点检查，确认无短路、断路与明显漂移。

5.4 数据采集系统

5.4.1 脱粒力信号的采样频率应根据试验指标、测量系统有效带宽以及需要保留的脱粒力信号有效频带确定。采样频率应满足下式，并应为测量系统频率响应和抗混叠措施留有必要裕量。

$$f_s \geq 2f_h$$

式中： f_s 为脱粒力信号采样频率，单位为赫兹（Hz）；

f_h 为需要保留的脱粒力信号最高有效频率，单位为赫兹（Hz）。

测点特征频率的理论估计值可按下式计算：

$$f_c = \frac{n \cdot m}{60}$$

式中： n 为滚筒转速（r/min）；

m 为测点随滚筒旋转一周时的理论有效受载次数。

f_c 为测点特征频率的理论估计值，单位为赫兹（Hz）。

特征频率的理论估计值应结合最高试验转速和代表性加载工况下的预试验频谱分析结果进行确认。特征频率可作为识别周期性载荷成分和初步设置采样参数的参考，不应直接作为脱粒力信号最高有效频率。

脱粒力信号最高有效频率应结合预试验的时域波形、频谱分析结果以及测量系统频率响应确定。当脱粒力峰值为主要试验指标时，应通过提高采样频率进行对比试验，确认所选采样频率能够有效获取脱粒力峰值。采样频率、确定方法和验证结果应在试验报告中注明。

5.4.2 数据采集系统应采取与采样频率相匹配的抗混叠措施，使进入模数转换器的、频率高于采样频率二分之一的信号成分得到有效衰减。

抗混叠措施可由传感器或信号调理器的带宽限制、数据采集设备内置的抗混叠功能或外接模拟低通滤波器实现。抗混叠措施的通带应覆盖需要保留的脱粒力信号有效频带。

采样后的数字滤波不应作为唯一的抗混叠措施。抗混叠方式、有效带宽及主要参数应在试验报告中注明。

5.4.3 模数转换器（A/D）的输入量程和分辨率应与传感器输出范围及预期最大脱粒力相匹配，分辨率应不低于16位。

5.4.4 脱粒力和滚筒转速等信号宜采用同一采集时钟同步采集。采用不同采集设备时，应使用统一硬件触发信号或统一时间标记，并在试验前对各采集通道的时间偏差进行校核。各信号之间的时间对齐误差不应大于最低采样频率通道的一个采样周期。同步方式及时间对齐误差应在试验报告中注明。

5.4.5 应具备数据存储与导出功能。

5.5 环境条件

5.5.1 室内试验环境温度宜为 5℃～35℃。

5.5.2 应避免强电磁干扰；必要时采取屏蔽与单点接地。

5.5.3 在每一目标转速下，应按 7.2 进行空载运行和空载信号检查。空载等效力信号标准差不应大于 1%FS，且不应出现由滚筒不平衡、机架松动、线缆甩动或机械碰撞引起的周期性异常峰值。出现异常时，应检查滚筒平衡、台架紧固和隔振措施，处理合格后方可开展加载试验。必要时，可在滚筒轴承座或传感器支撑部位布置加速度传感器辅助诊断。

5.6 作物试样

5.6.1 水稻、小麦试样的籽粒目标含水率应根据试验目的和被测装置适用工况在试验方案中规定，实测含水率与目标值的偏差不应超过 ±2 个百分点；同一工况各次重复试验之间的含水率差不应超过 1 个百分点。

5.6.2 其他作物试样的含水率范围及允许偏差应在试验方案中规定。作物含水率的测定应按GB/T 5262和GB/T 5982的有关规定进行。

5.6.3 同批试样应在洁净场地均匀铺开，采用交叉翻拌方式混合不少于 3 次，再采用四分法或多点随机取样法分取各次试验所需试样。混合后应从上层、中层、下层及不同平面位置不少于 5 点取样测定含水率，各取样点含水率极差不应超过 2 个百分点；超过时应重新混合或调湿。

5.6.4 经调湿处理的试样应密封静置不少于 4h，使水分充分平衡。试验过程中试样含水率变化超过规定允许偏差时，应重新测定并记录。

5.7 试验工况

5.7.1 应规定滚筒转速 n (r/min)，记录设定值和实测值，并给出允差（应±5%）。

5.7.2 应规定喂入量 q (kg/s)，稳态段内实测喂入量平均值与设定值的相对偏差不应超过±5%。

5.7.3 若涉及凹板间隙、包角等结构参数，应记录其设定值。

5.7.4 每一工况重复试验次数不应少于 3 次。

6 标定与校准

6.1 标定原则

6.1.1 标定载荷应覆盖预期工作力范围。标定点宜设置为预期最大工作力的0%、20%、40%、60%、80%和100%；当低载荷区测量精度较为重要时，应增加10%标定点。

- 6.1.2 标定应包含加载和卸载过程，加载与卸载应采用相同载荷点，用于评估回程误差。
- 6.1.3 标定应在试验前进行。出现下列任一情况时，应复核零点及不少于两个标定点：
 - a) 连续试验时间超过4 h；
 - b) 环境温度变化超过5 ℃；
 - c) 传感器、引线或测量结构重新安装；
 - d) 滚筒发生碰撞、堵塞或明显冲击；
 - e) 采集系统断电或重新启动；
 - f) 零点漂移超过1%FS。

复核点示值与原标定值的偏差超过2%FS时，应重新标定，并评估复核前试验数据的有效性。

6.2 静态标定方法

- 6.2.1 在测点结构上施加已知载荷（砝码、标准力传感器、杠杆加载等）。
- 6.2.2 每个载荷点保持 5s~10s，记录输出稳定值。
- 6.2.3 每个载荷点重复不少于3次（标定数据表见表A.2）。
- 6.2.4 采用线性拟合或分段拟合建立标定关系（拟合结果见表A.3）

$$F = K \cdot S + b \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：F 为施加的已知载荷，单位为牛顿（N）；
K 为标定系数，单位为（N/V）；
S 为传感器输出电压，单位为伏特（V）；
b 为常量零点偏移，单位为牛顿（N）。

6.3 标定有效性判据

- 6.3.1 线性拟合决定系数 R^2 应不小于 0.95。
- 6.3.2 最大残差占满量程比例应不大于 2% FS。
- 6.3.3 回程误差应不大于 2% FS。
- 6.3.4 零点漂移：空载状态下 1 min 内漂移宜不超过 1%FS。若不满足判据，应检查粘贴工艺/桥路平衡/接线屏蔽/安装刚度等，并重新标定。

7 试验方法

7.1 试验前准备

- 7.1.1 检查滚筒、传感器、引线、防护罩安装牢固。
- 7.1.2 开启采集系统，完成桥路平衡/零点清零。
- 7.1.3 记录环境温度与湿度。
- 7.1.4 确认标定系数或标定曲线已加载至数据处理程序，并核对传感器、测点和采集通道编号（见表A.1）。

7.2 空载运行

7.2.1 在设定转速下空载运行 30 s~60 s，并连续采集空载力信号、滚筒转速信号和必要的辅助振动信号。

7.2.2 检查空载信号噪声、零点漂移、采集饱和和周期性异常峰值，并按 5.5.3 进行判定。

7.2.3 空载信号异常时，应排查机械碰撞、滚筒不平衡、台架松动、线缆甩动和电气干扰，处理后重新进行空载运行。

7.3 数据采集

7.3.1 按设定喂入量供料。

7.3.2 从喂入物料开始计时，剔除过渡段（应10 s~20 s，或直到转速与喂入量满足稳态判据）。

稳态判据应同时满足：

a) 滚筒转速波动不超过设定值的±5%；

b) 喂入量波动不超过设定值的±5%；

c) 上述状态持续时间≥20 s。

稳态段从满足上述条件起始时刻开始截取。试验方法按GB/T 5262、GB/T 5982中的有关规定进行。

7.3.3 稳态段时长不应少于 20 s，同步记录转速与喂入量，若出现堵塞、断料、明显转速跌落等情况，应标记并重新试验。

7.3.4 停止喂入物料，空载运行 10 s~20 s 后停机；保存原始数据与试验记录。

7.4 信号处理

7.4.1 以空载基线均值作为零点，进行偏置扣除。

a) 采样时长，在试验正式开始前，使脱粒装置在目标试验转速下空载稳定运行30 s~60 s，并连续采集空载力信号；

b) 计算方法

对有效采样区间内的空载力序列：

$$\{B_j\}_{j=1}^M \quad (M = f_s \cdot T) \dots\dots\dots (2)$$

式中：

B_j ——空载运行时采集的力信号序列，单位为牛顿（N）；

J ——空载采样点序号， $j = 1, 2, \dots, M$ ；

M ——总采样点数；

T ——有效采样时长，单位为秒（s）；

f_s ——采样频率，单位为赫兹（Hz）。

以剔除后序列的算数平均值作为空载基线零点：

$$B_0 = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M B_j \dots\dots\dots (3)$$

式中：

B_0 ——空载基线的算数平均值，作为零点基准；

M' ——剔除异常值后的有效采样点数。

偏置扣除：

$$\{F_i\}_{i=1}^N \dots\dots\dots (4)$$

$$F'_i = F_i - B_0 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$\{F_i\}$ ——试验过程中采集的脱粒力序列；

F'_i ——扣除空载基线零点后的脱粒力序列，单位为牛顿（N）。

宜使用二阶巴特沃斯低通滤波器。截止频率应不高于齿通过频率的3倍，并在报告中注明滤波参数；对断线、饱和、突跳等非物理信号段进行剔除或重测。

7.4.2 指标计算

稳态段内共有 $N = f_s \cdot T$ 个采样点，脱粒力序列为 F_i ($i=1,2\cdots N$)

$$\overline{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \dots\dots\dots (6)$$

脱粒力峰值：

$$F_{\max} = \max F_i \dots\dots\dots (7)$$

当信号存在正、负双向载荷时，应采用最大绝对值作为峰值，并在试验报告中说明。

脱粒力标准差：

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \overline{F})^2} \dots\dots\dots (8)$$

变异系数：

$$CV = \frac{\sigma_F}{\overline{F}} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

式中：

N ——采样点总数；

f_s ——采样频率，单位为赫兹（Hz）；

T ——稳态段有效时长，单位为秒（s）；

F_i ——第 i 个采样点的脱粒力值，单位为牛顿（N）；

$\overline{F}$ ——脱粒力平均值，单位为牛顿（N）；

$F_{\max}$ ——脱粒力峰值，单位为牛顿（N）；

σ_F ——稳态段脱粒力的标准差；

CV ——变异系数，单位为百分数（%）。

8 判定规则

8.1 数据有效性判定

出现下列任一情况，该次试验数据应判为无效并重测：

- a) 采集信号出现饱和、断线或明显漂移（超出 1%FS/min）；
- b) 稳态段内滚筒实测转速超出设定值 $\pm 5\%$ 的连续时间超过 1 s，或累计超限时间超过稳态段有效时长的 5%；
- c) 发生堵塞、断料、明显异常降速或机械非正常碰撞；
- d) 传感器防护失效，泥水、粉尘或碰撞对信号产生明显影响；
- e) 有效稳态段时长少于 20 s。

8.2 重复性要求

同一工况下，3 次有效试验的平均值变异系数应小于10%，否则，应检查物料喂入稳定性、试样均匀性、安装形式、滤波系数与稳态段截取的一致性后，重新试验。试验方法按GB/T 5667中的相关规定执行。

9 试验报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 试验依据；
- b) 被测脱粒装置信息：滚筒结构、钉齿数量与布置、关键尺寸、凹板配置；
- c) 测点信息：测点数量、位置描述、安装方式、传感器型号与量程；
- d) 采集系统：采样频率、分辨率、滤波参数、同步方式；
- e) 标定信息：标定方法、标定曲线/系数、 R^2 、残差、日期；
- f) 试样信息：作物种类/品种、含水率、试样预处理；
- g) 工况参数：转速、喂入量、持续时间、重复次数；
- h) 数据处理：稳态段截取规则、异常剔除规则；
- i) 结果：脱粒力平均值、峰值与变异系数的单次与重复统计；
- j) 异常情况与说明（堵塞、断料、剧烈波动等）。

按GB/T 8097中的有关规定进行试验记录，格式参见附录B。

附录A

标定记录表

(资料性附录)

A.1 标定基本信息

标定日期		环境温度/湿度	
传感器/测点编号		加载方向	
标定方法	砝码 ☐ 杠杆加载 ☐ 标准力传感器 ☐	标定范围	____ N~ ____ N
采集系统		采样频率	____ Hz
复核条件		备注	

A.2 标定数据

载荷点序号	标准载荷/N	加载或卸载	输出值 1	输出值 2	输出值 3	平均值
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

A.3 拟合结果

拟合模型		标定系数 K	
零点偏移 b		决定系数 R ²	
最大残差	____ N (____ %FS)	回程误差	____ %FS
零点漂移	____ %FS/min	是否合格	是 ☐ 否 ☐
复核结果		处理说明	

附录B

试验记录表

(资料性附录)

项目	内容
试验日期/地点	
试验依据	
被测装置型号	
滚筒结构及钉齿布置	
测点编号及位置	
传感器型号/量程	
滚筒平衡品质等级	
作物种类/品种	
目标含水率/%	
实测含水率/%	
试样质量/kg	
转速设定/实测 (r/min)	
喂入量设定/实测 (kg/s)	
凹板间隙及其他结构参数	
采样频率/Hz	
模数转换器分辨率/位	
同步方式/时间对齐误差	
滤波器类型/阶次/截止频率	
稳态段截取方式及有效时长	
试验次数	
结果 (平均值、峰值、标准差、CV)	
异常情况处理	