

# 团 体 标 准

T/CAAMMxxxx—202X

## 增程式电动拖拉机 第3部分：试验方法

Range-extended electric tractor Part 3: Test methods

（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 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 试验通则 .....	2
5 整机状态、电气安全与控制安全试验 .....	4
6 增程式综合电力系统试验 .....	6
7 电驱动系统与能量回馈试验 .....	8
8 整机动力与作业性能试验 .....	9
9 四轮四转架构专项试验 .....	11
10 变结构、作业接口与农机适应性试验 .....	13
11 续航、持续作业、可靠性与环境适应性试验 .....	14
12 数据处理、结果判定与试验报告 .....	16
附录 .....	17

# 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：青岛农业大学、山东骏玛道机械有限公司、山东东汽农业装备有限公司、山东时风（集团）有限责任公司。

本文件主要起草人：王宝超、朱文博、李富安、华震、崔章旭、杲明川、张玉栋、王一深、徐海港。

本文件为首次发布。



# 增程式电动拖拉机 第3部分：试验方法

## 1 范围

本文件规定了增程式电动拖拉机试验的通则、整机状态核验、电气安全与控制安全、增程式综合电力系统、电驱动系统、传统架构整车动力与作业性能、四轮四转架构专项功能、变结构功能、作业接口、持续作业、可靠性、数据处理和试验报告要求。

本文件适用于底层采用电力驱动，且由动力电池与燃料发电系统单独或联合供电的轮式增程式电动拖拉机。

本文件覆盖两类典型结构：一是传统架构增程式电动拖拉机，即采用集中驱动、机械传动、常规桥式转向或常规拖拉机总体布置的机型；二是新型四轮四转架构增程式电动拖拉机，即四轮独立驱动、四轮独立转向，并可实现四轮转向、蟹行、原地转向、行进中车身姿态调整等功能的机型。

仅由动力电池供电、仅由燃料发电系统供电，或具有轮距调节、离地间隙调节、分布式电力接口等功能的电动农业作业平台，可参照执行。

## 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。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 1.1 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

GB/T 3871（所有部分） 农业拖拉机 试验规程

GB/T 15370（所有部分） 农业拖拉机 通用技术条件

GB 18384 电动汽车安全要求

GB/T 18488.1 电动汽车用驱动电机系统 第1部分：技术条件

GB/T 18488.2 电动汽车用驱动电机系统 第2部分：试验方法

GB/T 19596 电动汽车术语

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

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 24644 农林拖拉机和机械 落物防护结构 试验方法和性能要求

JB/T 7734 拖拉机防泥水密封性试验方法

QC/T 1086 电动汽车用增程器技术条件

T/CAAMM 210.1/T/NJ 1352.1 增程式电动拖拉机 第1部分：术语

T/CAAMM 210.2/T/NJ 1352.2 增程式电动拖拉机 第2部分：技术要求

## 3 术语和定义

T/CAAMM 210.1/T/NJ 1352.1 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

#### **增程式电动拖拉机 range-extended electric tractor**

采用电机作为驱动动力源，由动力电池系统和燃料发电系统单独或联合供电的电动拖拉机。

### 3.2

#### **四轮四转架构增程式电动拖拉机 four-wheel drive and four-wheel steering range-extended electric tractor**

四个车轮均具有独立或可独立控制的驱动、制动和转向能力，通过车辆控制器协调轮角、轮速、轮矩、制动和作业动力，并由增程式综合电力系统供能的增程式电动拖拉机。

### 3.3

#### **试验构型 test configuration**

试验时样机的轮距、离地间隙、配重、轮胎、机具、转向模式、供电模式和控制参数等共同形成的整机状态。

### 3.4

#### **供电模式 power supply mode**

增程式电动拖拉机的电能供给状态，包括纯电动工作模式、纯增程器供电模式和混合供电模式。

### 3.5

#### **四轮四转模式 four-wheel drive and four-wheel steering mode**

四轮四转架构样机通过四轮轮角和四轮驱动/制动协同实现的行走模式，包括直行、前轮转向、四轮转向、蟹行、原地转向、横移和行进中车身姿态调整等。

## **4 试验通则**

应根据样机结构型式、功率等级、供电模式、作业接口、声明功能和第2部分技术要求确定试验项目。未声明的功能不作为强制试验项目，但应在试验报告中注明“不适用”。试验项目适用性见表1。

表 1 试验项目适用性

试验类别	传统架构	四轮四转架构	说明
整机状态、质量尺寸、结构核验	适用	适用	记录样机参数、动力系统、供电系统、接口、配重和试验构型
电气安全与控制安全试验	适用	适用	包括绝缘、等电位、放电、互锁、急停、故障保护
增程式综合电力系统试验	适用	适用	包括增程器输出、SOC 维持、模式切换、并联均流、热平衡
电驱动系统试验	适用	适用	集中驱动测主驱电机；四轮四转测各轮驱动单元和整车合成输出
牵引、PTO、液压、作业性能试验	适用	适用	按拖拉机作业特征和声明接口开展
四轮角度、轮速、轮矩协调试验	不适用	适用	评价四轮独立驱动独立转向控制能力
蟹行、原地转向、行进中车身姿态调整试验	不适用	适用	仅对具备相应模式的样机开展
轮距、离地间隙、锁止机构试验	选做	选做	仅对具备可变结构功能的样机开展
可靠性、持续作业和环境适应性试验	适用	适用	四轮四转样机应增加模式循环和轮边单元热循环

#### 4.2 试验环境与场地

- a) 除另有规定外，环境温度宜为 5℃~40℃，相对湿度宜不大于 90%；
- b) 室外试验风速宜不大于 5 m/s；需评价低温、高温或雨淋适应性时，按规定环境条件另行设置；
- c) 道路行驶、制动、转向和四轮四转专项试验应在封闭、平整、附着条件稳定的场地进行；
- d) 田间作业试验应记录土壤类型、含水率、坚实度、作业深度、作业幅宽、作业机具和场地坡度；
- e) 原地转向、蟹行、横移和行进中车身姿态调整试验应设置足够安全距离，并配备远程急停和现场警戒。

#### 4.3 试验样机状态

- a) 样机应完成制造商规定的装配、磨合、维护、润滑、紧固、充电、加燃料、软件配置和安全检查；
- b) 动力电池、增程器、驱动电机、转向执行机构、制动系统、液压系统、PTO、电力接口和通信接口应工作正常；
- c) 动力电池 SOC、燃料储量、轮胎气压、配重、机具和试验构型应满足试验项目要求；
- d) 四轮四转架构样机应完成车轮零位标定、车轮编号确认、转角方向确认、驱动方向确认、控制模式确认和急停功能确认；
- e) 试验过程中不得改变影响试验结果的控制参数；确需调整时，应重新进行试验准备并在报告中说明。

#### 4.4 测量仪器与精度

测量仪器应在有效检定或校准周期内。各试验项目所用测量仪器及精度或分辨率要求宜符合表 2 的规定；采用其他测量仪器时，其测量精度不应低于相应试验项目的要求。

表 2 测量仪器与精度要求

测量项目	推荐测量装置	精度或分辨率要求
电压、电流、功率	功率分析仪、电压采集模块、电流传感器	误差不大于 $\pm 1.0\%$ ，关键供电试验宜不大于 $\pm 0.5\%$
燃料消耗	质量流量计、燃油消耗仪、电子天平	误差不大于 $\pm 1.0\%$
车速、位置、轨迹	RTK-GNSS、惯导组合导航、光电测速装置	车速误差不大于 $\pm 0.05$ m/s；轨迹误差宜不大于 $\pm 50$ mm
牵引力、制动力	拉力传感器、测力销、加载车	误差不大于 $\pm 1.0\%$
扭矩、转速	扭矩转速传感器、测功机、编码器	扭矩误差不大于 $\pm 1.0\%$ ；转速误差不大于 $\pm 0.5\%$
轮角、转向角	角度编码器、转角传感器	误差不大于 $\pm 0.5^\circ$
温度	热电偶、热电阻、红外测温装置	误差不大于 $\pm 2$ °C
时间	数据采集系统、计时装置	分辨率不低于 0.1 s；动态响应项目采样频率不低于 100 Hz
绝缘电阻、等电位连接	绝缘电阻测试仪、毫欧计	满足 B 级电压系统检测要求

#### 4.5 数据采集与同步

应同步采集电压、电流、功率、SOC、燃料消耗、转速、转矩、牵引力、车速、位置、航向角、横摆角速度、轮角、轮速、轮矩、温度、控制模式、故障码和报警状态。稳态性能试验采样频率宜不低于 10 Hz；动态响应、模式切换和四轮四转控制试验采样频率宜不低于 100 Hz。

#### 4.6 试验安全

涉及 B 级电压系统、动力电池、燃料、增程器运转、电机高速旋转、牵引加载和田间作业的试验，应编制安全操作规程。试验现场应配备绝缘防护用品、消防器材、轮挡、急停装置和警戒区域。四轮四转专项试验应设置监护人员，必要时采用遥控或半自动试验方式。

### 5 整机状态、电气安全与控制安全试验

#### 5.1 整机参数与结构核验

核验内容应包括整机尺寸、轴距、轮距、离地间隙、整备质量、最大允许质量、轴荷分配、轮胎规



格、配重、牵引装置、悬挂装置、PTO、液压输出、电力输出、通信接口、动力电池、增程器、驱动电机、控制器和散热系统。

四轮四转架构样机还应记录四个车轮中心坐标、转向角范围、转向角零位、驱动单元编号、转向执行器编号、轮速/轮角传感器编号、轮矩控制方式和车辆坐标系定义。

## 5.2 高压标识、防护与接插件检查

检查动力电池、直流母线、驱动控制器、增程器发电机、AC-DC 变换器、DC-DC 变换器、电力输出接口、充电接口和高压线束的警示标识、机械防护、固定状态和防误触结构。对四轮四转样机，还应检查轮边驱动/转向模块及其随动线束是否存在拉拽、磨损和干涉风险。

## 5.3 绝缘电阻试验

断开外部负载并确认系统处于安全状态后，分别测量动力电池、直流母线、驱动控制器、驱动电机、增程器发电机、功率变换装置和外部电力接口对电平台的绝缘电阻。测量电压应与最高工作电压相适应。

绝缘电阻结果宜折算为单位工作电压绝缘电阻，按式（1）表示：

$$R_U = \frac{R_i}{U_{max}} \quad (1)$$

式中：

$R_U$  ——单位工作电压绝缘电阻， $\Omega/V$ ；

$R_i$  ——实测绝缘电阻， $\Omega$ ；

$U_{max}$  ——最高工作电压， $V$ 。

## 5.4 等电位连接试验

测量动力电池箱体、电机壳体、控制器壳体、增程器壳体、电力接口壳体、驾驶区可触及金属件、车架和轮边模块壳体之间的连接电阻。测点应去除油漆或氧化层，保证可靠接触。

## 5.5 主动放电与被动放电试验

使高压系统处于工作电压状态，触发正常下电、急停下电和故障下电，记录直流母线电压从初始值下降至安全电压阈值的时间。具备主动放电和被动放电功能的，应分别进行试验。

## 5.6 高压互锁、急停与安全降级试验

通过互锁回路模拟、故障注入或制造商提供的测试接口，模拟维修开关断开、充电口打开、高压接插件松脱、急停按钮触发、BMS 限功率、绝缘下降、控制器通信中断等状态，记录报警、降功率、断电、制动和恢复条件。

四轮四转架构应增加单轮转向执行器故障、单轮驱动控制器故障、轮角偏差过大、轮速信号异常、整车控制器与轮边控制器通信异常等故障安全试验。

## 6 增程式综合电力系统试验

### 6.1 一般要求

增程式综合电力系统试验用于评价增程器、动力电池、功率变换器、直流或交流母线、能量管理控制器以及多源供电协调能力。试验可在整机状态下进行，也可在综合电力系统台架上进行。台架试验结果用于整机评价时，应说明台架边界条件与整车安装条件的差异。

### 6.2 增程器起动与停机试验

在冷机、热机、低 SOC 自动起动和手动起动等工况下，发出增程器起动指令，记录起动时间、起动成功率、起动电流、母线电压波动、首次稳定输出时间、噪声、振动和故障报警。停机试验应记录停机指令至输出功率降为零的时间、冷却延时、母线电压变化和再次起动条件。每种工况不少于 3 次。

### 6.3 增程器稳态输出功率试验

将增程器连接至可调电负载或整车等效负载，在 25%、50%、75%、100% 额定发电功率以及最大连续功率点运行。每个工况稳定后记录不少于 5 min 的数据，包括发动机转速、发电机转速、输出电压、输出电流、输出功率、燃料消耗、冷却液温度、油温、排气温度和故障报警。

直流侧输出电功率按式（2）计算：

$$P_{RE} = \frac{U_{dc} I_{RE}}{1000} \quad (1)$$

式中：

$P_{RE}$  ——增程器直流侧输出电功率，kW；

$U_{dc}$  ——直流母线电压，V；

$I_{RE}$  ——增程器直流侧输出电流，A。

### 6.4 增程器供电效率试验

在规定稳态功率点测量增程器输出电能和燃料输入能量。采用质量法测量燃料消耗时，应记录燃料低位发热量。

增程器供电效率按式（3）计算：

$$\eta_{RE} = \frac{E_{RE}}{E_f} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{ER} = \frac{\int U_{dc} I_{RE} dt}{3.6 \times 10^6} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{m_f H_u}{3.6} \quad (4)$$

式中:

$\eta_{re}$ ——增程器供电效率, %;

$E_{RE}$ ——增程器输出电能,  $kW \cdot h$ ;

$E_f$ ——燃料输入能量,  $kW \cdot h$ ;

$P_{dc}$ ——增程器直流侧输出电功率,  $kW$ ;

$t$ ——试验时间,  $h$ ;

$m_f$ ——燃料消耗质量,  $kg$ ;

$H_u$ ——燃料低位发热量,  $MJ / kg$ 。

## 6.5 负载阶跃与母线稳定性试验

在增程器稳定输出 50%额定功率时, 向上阶跃至 75%和 100%额定功率; 在 100%额定功率时, 向下阶跃至 50%和 25%额定功率。记录输出功率响应时间、母线电压最大波动、转速恢复时间和保护动作。

母线电压波动率按式 (6) 计算:

$$\delta_U = \frac{\max |U_{dc}(t) - U_0|}{U_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$\delta_U$ ——母线电压波动率, %;

$U_{max}$ ——阶跃过程中母线电压最大值,  $V$ ;

$U_{min}$ ——阶跃过程中母线电压最小值,  $V$ ;

$U_N$ ——母线额定电压或标称工作电压,  $V$ 。

## 6.6 SOC 维持能力试验

将样机置于混合供电模式, 在轻载、中载和重载代表性工况下连续运行不少于 1 h。试验开始 SOC 宜处于能量管理目标区间中值。记录 SOC、增程器功率、动力电池功率、整车负载功率、燃料消耗和关键部件温度。

SOC 维持偏差按式 (7) 计算:

$$\Delta SOC = SOC_{end} - SOC_{start} \quad (6)$$

式中:

$\Delta SOC$ ——SOC 维持偏差, %;

$SOC_{end}$ ——试验结束时荷电状态, %;

$SOC_{start}$ ——试验开始时荷电状态, %。

## 6.7 供电模式切换试验

在空载、稳态负载和动态负载下, 分别进行纯电动工作模式、纯增程器供电模式和混合供电模式之间的切换。记录切换触发条件、切换时间、母线电压波动、牵引功率波动、作业功率波动、SOC 变化和驾驶员可感知冲击。

## 6.8 多源并联均流试验

对于多动力电池包、多增程器或多变换器并联供电系统，应在 25%、50%、75%、100%总负载功率下记录各电源单元电流、功率和温度。

第  $i$  个电源单元均流偏差按式（8）计算：

$$\varepsilon_i = \frac{|I_i - k_i I_\Sigma|}{\max(k_i I_\Sigma, I_{\min})} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

$I_i$ ——第  $i$  个电源单元输出电流；

$I_\Sigma$ ——总输出电流；

$k_i$ ——按额定功率确定的分担系数；

$I_{\min}$ ——最小电流基准。

## 6.9 热平衡试验

在增程器最大连续输出、混合供电重载作业或制造商声明的最不利热工况下连续运行，直至关键温度变化率在 30 min 内不大于 2℃或达到技术文件规定的稳定判据。记录动力电池、电机、电机控制器、增程器、发电机、整流器、DC-DC、冷却液进出口、散热器进出风温度。

## 7 电驱动系统与能量回馈试验

### 7.1 试验对象

集中驱动型样机应测量主驱电机及控制器；分置驱动型样机应测量各驱动电机及控制器；四轮四转架构应测量四个轮边/轮毂驱动单元以及整车合成输出。

### 7.2 额定功率、峰值功率和持续功率试验

在规定冷却条件和供电电压下，通过测功机、底盘测功机、牵引加载车或轮边加载装置测量驱动系统输出能力。额定功率应按制造商声明的连续工况确定，峰值功率应按第 2 部分规定的持续时间或技术文件声明时间确定。

机械输出功率按式（9）计算：

$$P_m = \frac{T_n}{9550} \quad (8)$$

式中：

$P_m$ ——机械功率，kW；

$T$ ——转矩，N·m；

$n$ ——转速，r/min。

### 7.3 转矩响应和转速响应试验

在驱动系统处于使能状态且负载设备可吸收目标功率的条件下，输入阶跃转矩或阶跃转速指令，记录指令值、实际值、电流、电压、响应时间和超调量。四轮四转架构应记录各轮响应时间差。

### 7.4 控制精度试验

在 25%、50%、75%、100%额定转矩或转速点，分别保持不少于 30 s，记录指令值与实际值。控制误差按式（10）计算：

$$e_x = \frac{|x_a - x_c|}{\max(|x_c|, x_{min})} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

$x$  可为转矩、转速、轮速或轮矩；

$x_a$  为实际值； $x_c$  为指令值；

$x_{min}$  为最小计算基准。

### 7.5 电驱动系统效率试验

在规定转速和转矩网格点测量输入电功率和输出机械功率。电驱动系统效率按式（11）计算：

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

$P_e$ ——驱动系统输入电功率，kW。

### 7.6 再生制动与能耗制动试验

在规定车速或轮速下，分别施加轻度、中度和较大制动指令，记录机械制动、再生制动和能耗制动的参与状态、回馈电流、母线电压、动力电池充电功率、制动距离和制动稳定性。

当动力电池 SOC 高、温度低或 BMS 限制充电时，应检查系统是否降低回馈功率并由机械制动或能耗制动补偿。四轮四转架构应检查各轮制动转矩分配是否造成非期望偏航。

## 8 整机动力与作业性能试验

### 8.1 行驶加速与最高速度试验

在平直硬质道路上，使样机由静止加速至规定车速或最高稳定车速，记录加速时间、车速、驱动功率、增程器功率、电池功率、SOC 和故障报警。往返方向各不少于 2 次，取有效结果平均值。

### 8.2 牵引性能试验

通过牵引加载车、测力车或牵引测力装置施加负载，记录牵引力、车速、滑转率、驱动功率、电池

功率、增程器功率和燃料消耗。牵引功率按式（12）计算：

$$P_{db} = \frac{F_{db} v}{1000} \quad (11)$$

式中：

$P_{db}$ ——牵引功率，kW；

$F_{db}$ ——牵引力，N；

$v$ ——实际车速，m/s。

滑转率按式（13）计算：

$$s = \frac{(v_o - v)}{v_o} \times 100\% \quad (12)$$

式中：

$s$ ——滑转率，%；

$v_t$ ——由驱动轮角速度换算得到的理论车速，m/s；

$v$ ——实际车速，m/s。

### 8.3 PTO 输出性能试验

具备机械 PTO 的样机，应在 PTO 测功机上测量额定转速下输出转矩、输出功率、转速稳定性、能耗和温升。具备电 PTO 或外部电力输出接口的样机，应接入可调电负载，测量输出电压、电流、功率、频率、电压波动、过载保护和持续输出能力。

### 8.4 液压输出性能试验

将液压输出接口连接至液压加载装置，测量额定压力、额定流量、最大压力、压力波动、油温和驱动电机/泵控制状态。液压功率按式（14）计算：

$$P_h = \frac{p q}{60} \quad (13)$$

式中：

$P_h$ ——液压功率，kW；

$p$ ——压力，MPa；

$q$ ——流量，L/min。

### 8.5 制动、坡道和驻车试验

按规定初速度进行行车制动、驻车制动、坡道起步、坡道停车和下坡低速行驶试验。记录制动距离、减速度、踏板力、回馈功率、母线电压、后溜距离和故障报警。

### 8.6 典型田间作业试验

选择耕整地、旋耕、播种、植保、运输或机具驱动作业等典型任务。记录作业幅宽、作业深度、作

业速度、有效作业面积、机具参数、土壤条件、整机能耗、燃料消耗、SOC 变化、故障停机次数和作业质量指标。田间作业效率按式（15）计算：

$$W = \frac{A}{t} \quad (14)$$

式中：

$W$ ——作业效率， $\text{hm}^2/\text{h}$ ；

$A$ ——有效作业面积， $\text{hm}^2$ ；

$t$ ——有效作业时间， $\text{h}$ 。

## 9 四轮四转架构专项试验

### 9.1 一般要求

四轮四转专项试验应在封闭、平整、附着条件一致的场地进行。试验前应确认车辆坐标系、车轮编号、轮角正方向、轮速正方向、轮矩正方向和各模式进入条件。试验过程中应同步记录四轮目标角、实际角、目标速度、实际轮速、目标轮矩、实际轮矩、车辆轨迹、航向角、横摆角速度和控制模式。

### 9.2 车轮转向角标定与控制精度试验

分别向  $FL$ 、 $FR$ 、 $RL$ 、 $RR$  车轮输入-最大转角、 $-45^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、最大转角等指令，待稳定后记录实际角度。每个角度保持不少于 3s，重复不少于 3 次。

第  $i$  个车轮转角误差按式（16）计算：

$$e_{\delta i} = \delta_{ai} - \delta_{ci} \quad (15)$$

式中：

$e_{\delta i}$ ——第  $i$  个车轮转角误差；

$\delta_{ai}$ ——第  $i$  个车轮实际转角；

$\delta_{ci}$ ——第  $i$  个车轮目标/指令转角。

### 9.3 四轮转向同步响应试验

在静止和低速行驶状态下，分别输入四轮同向、前后轮反向、原地转向组合等阶跃指令，记录四轮角度响应曲线。同步时间差按式（17）计算：

$$\Delta t_{\delta} = \max(t_i) - \min(t_i) \quad (16)$$

式中：

$\Delta t_{\delta}$ ——四轮转向同步时间差；

$t_i$ ——第  $i$  个车轮达到目标转角的响应时间。

### 9.4 低速直线保持试验

在 0.5 km/h、2 km/h、5 km/h 等低速点直线行驶不少于 20 m，记录车体轨迹、航向角、横向偏差、四轮转角和轮速。评价直线保持能力和零位控制稳定性。

### 9.5 四轮协同转向圆周试验

设定目标转弯半径  $R$  和车速  $v$ ，以四轮转向模式匀速圆周行驶不少于一周。按附录 B 计算理论轮角和轮速，记录实际轮角、轮速、轨迹和航向角。转弯半径误差按式（18）计算：

$$e_R = \frac{R_a - R_c}{R_c} \times 100\% \quad (17)$$

式中：

$e_R$ ——转弯半径误差；

$R_a$ ——实际转弯半径；

$R_c$ ——目标转弯半径。

### 9.6 四轮协同转向圆周试验

设定四轮同向转角，在低速下完成左蟹行和右蟹行，每次行驶不少于 20 m。记录目标蟹行角、实际运动方向、车体航向、横向位移、轨迹偏差、四轮转角和轮速。蟹行过程中车体航向不应发生非期望持续偏转。

### 9.7 原地转向试验

在原地转向模式下，使车辆绕几何中心或声明旋转中心完成  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $360^\circ$  旋转。记录四轮转角、轮速、轮矩、轨迹、航向角、完成时间和旋转中心漂移。旋转中心漂移按式（19）计算：

$$d_c = \max \sqrt{(x_c(t) - x_{c0})^2 + (y_c(t) - y_{c0})^2} \quad (18)$$

式中：

$d_c$ ——旋转中心最大漂移量；

$(x_c(t), y_c(t))$ ——车辆旋转过程中某时刻的实际旋转中心坐标；

$(x_{c0}, y_{c0})$ ——理论/初始旋转中心坐标。

### 9.8 行进中车身姿态调整试验

对声明具备在保持全局前进方向条件下改变车身航向角，或具备边行进边旋转功能的样机，应开展行进中车身姿态调整试验。设定全局目标前进方向、目标车速和目标航向角变化率，使车辆完成不小于  $90^\circ$  的航向角调整；声明可连续旋转的，应进行  $360^\circ$  试验。记录车辆几何中心轨迹、全局速度方向、车身航向角、四轮转角、四轮轮速、四轮驱动/制动转矩和控制模式。

全局前进方向保持误差按式（20）计算：

$$e_\theta = \max |atan2(v_y, v_x) - \theta_g| \quad (19)$$



式中：

$e_{\theta}$ ——全局前进方向保持误差；

$v_x$ 、 $v_y$ ——车辆几何中心全局速度分量；

$\theta_g$ ——设定全局前进方向角。

## 9.9 模式切换试验

在静止、低速直行和低速转弯状态下，分别进行前轮转向、四轮转向、蟹行、原地转向和行进中姿态调整等模式之间的切换。记录切换指令、实际切换时间、四轮转角过渡曲线、轮速过渡曲线、车辆横摆角速度和故障报警。

模式切换过程中不应出现转角突变、驱动力方向突变、车辆非预期加速或无法制动等危险现象。若控制策略采用先降速再切换，应记录降速阈值和切换完成条件。

## 9.10 轮速与轮矩协调试验

在直线、圆周、蟹行、原地转向和行进中姿态调整模式下，记录理论轮速、实际轮速、目标轮矩和实际轮矩。轮速协调误差按式（21）计算：

$$e_{vi} = \frac{|v_{ai} - v_{ci}|}{\max(|v_{ci}|, v_{min})} \times 100\% \quad (20)$$

式中：

$v_{ai}$ ——第  $i$  个车轮实际切向速度；

$v_{ci}$ ——第  $i$  个车轮理论切向速度；

$v_{min}$ ——为避免低速除零设置的最小速度基准。

轮矩协调试验应检查同向驱动、对角反向驱动、左右差动驱动和制动能量回馈等工况下的实际转矩分配。

## 9.11 四轮四转故障安全试验

在安全速度下，模拟单个转向执行器无法达到目标角度、单个轮速传感器失效、单个驱动控制器失效、轮角传感器漂移、通信中断和急停触发等故障。

记录故障发生时间、报警时间、降级模式、限制车速、轮角回正策略、驱动切断或制动动作以及车辆最终状态。

对具备冗余定位或冗余角度传感器的系统，应验证主备信号切换过程和故障诊断一致性。

## 10 变结构、作业接口与农机适应性试验

### 10.1 作业机具接口试验

检查悬挂装置、牵引装置、PTO、液压接口、电力接口和总线接口与机具连接的机械、电气和通信适配性。对电力接口，应测量输出电压、电流、功率、过载保护、带载插拔保护和防水防尘状态。对总

线接口，应验证机具识别、状态上传、控制指令和故障报警。

## 10.2 变轮距试验（适用时）

对具备轮距调节功能的样机，分别调整至最小轮距、标准轮距、最大轮距和典型中间轮距，记录目标轮距、实测轮距、调节时间、锁止状态、重复定位偏差以及是否存在卡滞、冲击、管线拉拽或结构干涉。

## 10.3 升降与离地间隙调节试验（适用时）

对具备离地间隙调节功能的样机，分别调整至最低、标准和最高位置，记录参考点高度、调节时间、重复定位偏差、锁止状态、动作平稳性和异常情况。

## 10.4 变结构锁止与互锁试验（适用时）

在轮距或离地间隙调节过程中发出行驶、转向或作业指令，检查系统是否限制相关动作；在机构未锁止或状态异常时发出行驶或作业指令，检查是否报警并进入安全限制。加载后检查锁止机构是否出现滑移、松动、裂纹、永久变形或功能异常。

## 10.5 变结构承载性能试验

对具备轮距调节、离地间隙调节或轮边可调结构的样机，应在标准构型、最大轮距构型、最小轮距构型、最高离地间隙构型和最低离地间隙构型下进行承载性能试验。试验时按照产品技术文件规定的加载位置和加载方向施加载荷，记录加载载荷、变形量、残余变形量、锁止状态和结构状态。试验后，变结构机构、支撑立柱、轮边安装结构、锁止机构和连接件不应出现裂纹、明显永久变形、松动、锁止失效或功能异常。

## 10.6 农田通过性与机具适应性试验

选择代表性垄距、作物行距、地头转弯空间、田间道路和机具配置，检查样机通过性、行距适应性、地头转弯能力、机具升降协调性、线束和液压管路布置安全性。四轮四转样机应记录采用蟹行、原地转向或小半径四轮转向对地头空间和作物避让的影响。

# 11 续航、持续作业、可靠性与环境适应性试验

## 11.1 行驶续航试验

在封闭道路或转鼓台架上，按规定车速或工况持续行驶，直至燃料耗尽、SOC 达到保护阈值、无法维持规定工况或出现保护停机。记录行驶时间、里程、SOC、燃料消耗、增程器启停、母线电压和关键温度。

## 11.2 作业续航与续荷时间试验

在典型牵引作业、PTO 作业或液压作业负载下连续运行，记录从作业开始到不能继续满足规定负载或触发能量保护的时间。若试验允许补充燃料但不允许外接充电，应记录补充次数、补充时间和补充后续作业时间。

## 11.3 综合能耗试验

综合能耗试验应覆盖道路行驶和典型田间作业。试验前后记录 SOC、外接充电电能、动力电池净输出电能、燃料消耗、增程器输出电能、回馈电能、作业量和里程。单位作业面积电耗按式（22）计算：

$$e_A = \frac{E_b}{A} \quad (21)$$

式中：

$e_A$ ——单位作业面积电耗；

$E_b$ ——净输出电能或电池消耗电能；

$A$ ——作业面积。

单位作业面积燃料消耗按式（23）计算：

$$f_A = \frac{m_f}{A} \quad (22)$$

式中：

$f_A$ ——单位作业面积燃料消耗；

$m_f$ ——燃料消耗量；

$A$ ——作业面积。

## 11.4 可靠性试验

可靠性试验可采用台架循环、试验场循环和田间作业循环相结合的方式进行。试验循环应覆盖行驶、牵引、PTO、液压、增程器启停、电池充放电、制动回馈、供电模式切换和热循环。

四轮四转架构应增加转向执行器往复动作、轮边驱动单元热循环、蟹行/原地转向/四轮转向模式循环和控制总线负载循环。

## 11.5 防泥水密封性与清洗适应性试验

按适用标准或制造商声明的防护等级，对动力电池箱、电机控制器、轮边驱动/转向模块、电力接口、通信接口和传感器开展防泥水、雨淋或清洗适应性试验。试验后进行绝缘、电气功能、通信、转向和驱动功能检查。

## 11.6 低温、高温和高湿适应性试验

在制造商声明的环境条件下热浸后，进行上电、驱动使能、增程器起动、低速行驶、供电模式切换

和作业动力输出试验。记录起动成功率、预热或冷却策略、限功率状态、SOC、母线电压和故障报警。

## 12 数据处理、结果判定与试验报告

### 12.1 数据处理

试验数据应采用统一单位制。稳态工况应计算平均值、最大值、最小值和标准偏差；动态工况应计算响应时间、超调量、稳态误差、恢复时间和最大波动。对异常数据进行剔除时，应说明剔除规则和原因。

### 12.2 结果判定

试验结果应按本文件规定的方法给出。是否合格应依据《增程式电动拖拉机 第2部分：技术要求》、产品技术文件或试验委托方确认的判定准则进行。对本文件未规定限值的项目，应作为性能记录或型式对比数据。

### 12.3 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

- a) 样机名称、型号、编号、结构型式、主要技术参数、关键部件型号和控制软件版本；
- b) 试验依据、试验项目、试验地点、试验日期、试验人员和试验目的；
- c) 试验环境、道路或田间条件、机具配置、配重、轮胎状态、SOC和燃料状态；
- d) 试验仪器、精度、校准状态、数据采样频率和数据同步方法；
- e) 试验步骤、工况、原始记录、计算方法、曲线、轨迹图和试验结果；
- f) 电气安全、供电模式切换、SOC变化、母线电压、增程器功率、动力电池功率和燃料消耗记录；
- g) 传统架构样机的牵引、PTO、液压、制动、坡道和田间作业结果；
- h) 四轮四转样机的轮角、轮速、轮矩、轨迹、模式切换、原地转向、蟹行和故障安全结果；
- i) 可选变结构样机的轮距、离地间隙、锁止状态、互锁状态和结构异常；
- j) 异常情况、故障码、停机维护记录、偏离本文件的说明和结论性意见。

附录

附录 A

（资料性）  
试验项目适用性与记录表

A. 1 样机基本信息记录表

项目	记录内容
样机型号、编号	
制造单位	
结构型式	传统架构/四轮四转架构/其他
动力电池型号、额定电压、容量	
增程器型号、额定功率、燃料类型	
驱动电机及控制器型号	
转向执行器型号（四轮四转适用）	
控制软件版本/参数版本	
轮胎规格、胎压、配重	
作业机具型号及参数	
试验构型	轮距、离地间隙、转向模式、供电模式

A. 2 增程式综合电力系统记录表

时间	供电模式	SOC/%	Udc/V	电池功率 /kW	增程器功率 /kW	燃料消耗 /kg	关键温度 /℃	备注

A. 3 四轮四转专项记录表

时间	模式	车速	航向角	FL 角/速/矩	FR 角/速/矩	RL 角/速/矩	RR 角/速/矩	故障码

附录 B

（规范性）  
四轮四转运动参数计算方法

B. 1 车辆坐标系

以车辆几何中心为原点，车辆纵向前方为 X 轴正方向，车辆左侧为 Y 轴正方向，Z 轴向上。设车辆几何中心速度为  $v=[v_x, v_y]^T$ ，横摆角速度为  $\omega$ ，第 i 个车轮中心坐标为  $r_i=[x_i, y_i]^T$ 。

## B.2 车轮中心速度

第  $i$  个车轮中心速度按式 (B.1) 计算:

$$\mathbf{v}_i = [\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y]^T + \omega [-y_i, x_i]^T \quad (\text{B.1})$$

式中:

- $\mathbf{v}_i$ ——第  $i$  个车轮在车辆坐标系下的速度向量, m/s;
- $\mathbf{v}_x$ ——车辆几何中心沿 X 轴方向的速度分量, m/s;
- $\mathbf{v}_y$ ——车辆几何中心沿 Y 轴方向的速度分量, m/s;
- $\omega$ ——车辆绕 Z 轴的横摆角速度, rad/s;
- $x_i$ ——第  $i$  个车轮中心相对于车辆几何中心的 X 轴坐标, m;
- $y_i$ ——第  $i$  个车轮中心相对于车辆几何中心的 Y 轴坐标, m;
- $T$ ——矩阵转置符号;
- $i$ ——车轮编号,  $i=1,2,3,4$ 。

## B.3 车轮转向角

第  $i$  个车轮理论转向角按式 (B.2) 计算:

$$\delta_i = \text{atan2}(\mathbf{v}_{i,y}, \mathbf{v}_{i,x}) \quad (\text{B.2})$$

式中:

- $\delta_i$ ——第  $i$  个车轮的目标转向角, rad;
- $\mathbf{v}_{i,y}$ ——第  $i$  个车轮速度向量在车辆坐标系 Y 轴方向的分量, m/s;
- $\mathbf{v}_{i,x}$ ——第  $i$  个车轮速度向量在车辆坐标系 X 轴方向的分量, m/s;
- $\text{atan2}(x)$ ——反正切函数, 用于根据速度分量确定车轮速度方向所在象限。

## B.4 车轮切向速度

第  $i$  个车轮理论切向速度按式 (B.3) 计算:

$$u_i = \sqrt{(\mathbf{v}_x - \dot{x}_i)^2 + (\mathbf{v}_y - \dot{y}_i)^2} \quad (\text{B.3})$$

式中:

- $u_i$ ——第  $i$  个车轮的目标线速度, m/s;
  - $\mathbf{v}_{ix}$ ——第  $i$  个车轮速度向量在车辆坐标系 X 轴方向的分量, m/s;
  - $\mathbf{v}_{iy}$ ——第  $i$  个车轮速度向量在车辆坐标系 Y 轴方向的分量, m/s。
- 若采用轮胎滚动半径  $r_w$ , 理论轮速按式 (B.4) 计算:

$$n_i = \frac{60u_i}{2\pi r_w} \quad (\text{B,4})$$

式中:

$n_i$ ——第  $i$  个车轮的目标转速, r/min;

$u_i$ ——第  $i$  个车轮的目标线速度, m/s;

$r_w$ ——车轮滚动半径, m;

$\pi$ ——圆周率。

## B.5 原地转向

原地转向时  $v_x=0$ 、 $v_y=0$ , 各车轮中心速度为  $\mathbf{v}_i = \omega[-y_i, x_i]^T$ , 车轮速度方向与车轮中心至旋转中心的连线垂直。

式中:

$\mathbf{v}_i$ ——原地转向时第  $i$  个车轮中心在车辆坐标系下的速度向量, m/s;

$\omega$ ——车辆绕 Z 轴的横摆角速度, rad/s;

$x_i$ ——第  $i$  个车轮中心相对于车辆几何中心的 X 轴坐标, m;

$y_i$ ——第  $i$  个车轮中心相对于车辆几何中心的 Y 轴坐标, m;

$T$ ——矩阵转置符号。

## B.6 蟹行

蟹行时  $\omega=0$ , 四个车轮理论转向角相同,  $\delta_i = \text{atan2}(v_{i,y}, v_{i,x})$ , 车身航向角保持不变。

式中:

$\delta_i$ ——原地转向时第  $i$  个车轮的目标转向角, rad;

$v_{i,y}$ ——第  $i$  个车轮中心速度向量在车辆坐标系 Y 轴方向的分量, m/s;

$v_{i,x}$ ——第  $i$  个车轮中心速度向量在车辆坐标系 X 轴方向的分量, m/s。

## B.7 行进中车身姿态调整

若要求车辆几何中心保持全局速度方向  $\theta_g$ , 同时车身航向角  $\psi$  变化, 则应将全局速度转换至车辆坐标系后代入式 (B,5):

$$[v_x, v_y]^T = R(-\psi)[v_g \cos \theta_g, v_g \sin \theta_g]^T \quad (\text{B,5})$$

式中:

$v_x$ ——车辆坐标系下沿 X 轴方向的速度分量, m/s;

$v_y$ ——车辆坐标系下沿 Y 轴方向的速度分量, m/s;

$R(-\psi)$ ——由全局坐标系转换至车辆坐标系的旋转矩阵;

$\psi$ ——车辆车身航向角, rad;

$v_g$ ——全局坐标系下的目标行驶速度，m/s；  
 $\theta_g$ ——全局坐标系下的目标行驶方向角，rad；  
 $T$ ——矩阵转置符号。

## 附录 C

（资料性）

### 综合能耗折算方法

#### C.1 能源边界

增程式电动拖拉机能耗应区分燃料输入能量、增程器输出电能、动力电池净输出电能、外接充电电能、再生回馈电能和有用输出功。

#### C.2 动力电池净输出电能

动力电池净输出电能按式（C.1）计算：

$$E_b = \frac{\int U_b I_b dt}{3.6 \times 10^6} \quad (C,1)$$

式中：

$E_b$ ——试验过程中电池输出电能，kW·h；

$U_b$ ——电池端电压，V；

$I_b$ ——电池输出电流，A；

$t$ ——试验时间，s。

#### C.3 等效燃料消耗

如需将外接补电折算为等效燃料消耗，可按式（C.2）计算：

$$m_{eq} = m_f + \frac{3.6 E_{ch}}{H_u} \quad (C,2)$$

式中：

$m_{eq}$ ——等效燃料消耗，kg；

$m_f$ ——试验燃料消耗，kg；

$E_{ch}$ ——恢复 SOC 所需外接充电电能，kW·h；

$H_u$ ——燃料低位发热量，MJ/kg。

#### C.4 单位作业量综合能耗



单位作业量综合能耗可按作业面积、运输质量距离或牵引输出功进行归一化表达。报告中应说明归一化边界和折算依据。

---