

棚锂双电设施农业履带拖拉机设计研究

闫惊雷^{1,2} 谢斌^{1,2} 赵子豪^{1,2} 宋正河^{1,2} 温昌凯^{1,2} 牛泽众^{1,2}
徐长洲^{1,2} 王英锋³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 北京 100083;
3. 中科滕森(山东)智能装备有限公司, 潍坊 262100)

摘要: 针对现有设施电动农机存在与茄果种植垄作参数适配性不足及长续航能力较差等问题,设计一种棚锂双电履带拖拉机。基于作业需求设计了整机关键部件,提出以动力电池和棚电为核心的双电系统电气架构,并制定了相应的电源切换控制策略。利用 RecurDyn 软件建立了履带拖拉机虚拟样机模型,对其直线行驶与转向工况动力学特性进行仿真分析。样机性能试验结果表明,预充系统可在 410 ms 内将直流母线电压提升至预期值,在动力电池与棚电切换过程最大电压波动率为 9.8%,切换时间为 700 ms,整机高压系统对地绝缘阻值均大于 30 M Ω ,整体表现出良好的电气稳定性与运行安全性。在典型设施土壤条件下,动力电池模式和棚电模式平均偏驶率分别为 4.8% 和 5.1%,最小转向半径为 1 168.5 mm;在旋耕作业工况下,动力输出(PTO)电机转速波动率最大为 5.9%,平均转速为 541 r/min,均满足国家标准。设施场景实地测试结果表明,棚电模式整机工作损耗率高于动力电池模式 5.2 个百分点。棚锂双电源拖拉机在持续作业能力和转场机动性等方面具有互补性,为设施农业动力装备提供一种良好的解决方案。

关键词: 棚锂双电;履带拖拉机;纯电动;设施农业

中图分类号: S219.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)06-0390-11

OSID:



Design and Research of Grid and Battery Dual-source Powered Crawler Tractor for Protected Agriculture

YAN Jinglei^{1,2} XIE Bin^{1,2} ZHAO Zihao^{1,2} SONG Zhenghe^{1,2} WEN Changkai^{1,2}
NIU Zezhong^{1,2} XU Changzhou^{1,2} WANG Yingfeng³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Beijing 100083, China

3. Tesun(Shandong) Intelligent Equipment Co., Ltd., Weifang 262100, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient adaptability to ridge-planting parameters and limited endurance in existing electric agricultural machinery, a dual-power crawler tractor was designed. Based on operational requirements, the key components were designed and matched. An electronic architecture centered on a dual-power system, consisting of a power battery and greenhouse grid power was proposed, along with a corresponding power switching control strategy. The crawler tractor's virtual prototype model was established by using RecurDyn software, and dynamic characteristic simulations were conducted for its straight-line driving and steering conditions. The performance testing of the prototype showed that the pre-charging system can raise the DC bus voltage to the expected value within 410 ms. During the switching process between the power battery and greenhouse grid power, the maximum voltage fluctuation rate was 9.8%, with switching time of 700 ms. The insulation resistance of the entire high-voltage system to ground was greater than 30 M Ω , demonstrating good electrical stability and operational safety. Under typical greenhouse soil conditions, the average deviation rates during straight-line travel were 4.8% in power battery mode and 5.1% in greenhouse grid power mode, with minimum turning radius of

收稿日期: 2025-09-10 修回日期: 2025-09-24

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2023CXGC010715)

作者简介: 闫惊雷(2001—),男,硕士生,主要从事电动拖拉机设计与控制研究,E-mail: jingleiyan0530@163.com

通信作者: 谢斌(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农机装备数字化设计与智能控制研究,E-mail: xiebincau@126.com

1 168.5 mm。Under rotary tillage conditions, the maximum speed fluctuation rate of the power take-off (PTO) motor was 5.9%, and the average speed of the PTO shaft was 541 r/min, both meeting national standards. Field tests in the facility showed that the overall energy loss rate in greenhouse grid power mode was 5.2 percentage points higher than that in power battery mode. The dual-power tractor exhibited complementary advantages in continuous operation capability and mobility, providing an effective solution for power equipment in protected agriculture.

Key words: greenhouse-lithium dual electric; crawler tractor; pure electric; facility agriculture

0 引言

在设施农业领域,蔬菜种植正朝规模化方向发展。然而,传统燃油动力机械在密闭的设施作业环境中存在污染严重的显著弊端^[1-2]。同时,设施电动农机领域又普遍面临垄作参数农机-农艺适配性不足以及单电源系统的续航能力差、充电效率低双重困境。因此,亟需开发一种针对特定设施农业垄作场景的电动农业机械^[3-4]。

双电源驱动是实现设施农业拖拉机性能要求的关键技术之一。相关研究主要聚焦于动力复合与电源复合2种技术路线。李旭光^[5]采用带传动机构,设计了一种交流与直流电机动力耦合的双电源拖拉机,但其方案仅适用于小功率农机;汪珍珍等^[6]延续该交/直流电机耦合思路,将耦合机构改进为结合套齿轮,提高了动力适应性,可满足大马力拖拉机的功率需求,但整机附属设备需配备2套独立的交、直流供电系统,显著增加了系统复杂度,且难以支撑长时间大功率作业。王宝超等^[7]设计了一种增程式电动履带机;文献[8-13]分别提出氢燃料电池、超级电容等与动力电池并联的电气架构,在电源复合方面进行了有益探索,引入区别于动力电池的第2种电源且有效地应用于整车驱动与作业,提升了能量利用效率。然而,其多源动力架构与动力电池复合的能源如增程器、燃料电池或超级电容等仍需车载部署,导致整机质量和空间占用率显著增加。此外上述方案中,复合能源补给模式与设施农业中常见的棚电供电体系并不匹配,因此在该场景下的应用可行性受到严重制约。

履带拖拉机具有牵引附着性能好、转向半径小等优点,在空间受限的设施环境适应性更强^[14]。基于上述分析,本文设计一种棚锂双电履带拖拉机。采用三相交流棚电与车载动力电池并联电气架构并制定电源切换策略;同时摒弃机械变速箱结构,采用更适合履带拖拉机的轮边驱动形式,提升传动效率。对关键部件进行设计与匹配选型,并基于动力学仿真,分析整机在不同工况动力学特性。最终完成整机试制、设施农业系统搭建,并在设施环境中对双电特性与整机特性进行试验,验证履带拖拉机的稳定

性与可靠性。

1 棚锂双电履带拖拉机整体设计方案

1.1 主要设计需求

目前,北方设施农业生产多以垄作蔬菜种植为主,所以在履带拖拉机设计过程中需要严格参考适合蔬菜栽培种植的垄体结构^[15],本文以山东地区茄果类种植为参考,根据相关农艺要求,垄面宽度为1 100 mm,垄底宽度为1 200 mm,垄高为150 mm,同时为了方便机具的耕种管收,垄间保留300 mm宽的行走通道。为确保履带拖拉机在作业过程中不破坏垄体与蔬菜,并保留必要的控制裕量,设计需满足左右履带间最小距离应大于1 200 mm、履带宽度应小于300 mm和最小离地间隙应大于300 mm。

1.2 整机结构

本文设计的棚锂双电履带拖拉机结构如图1所示,双电系统布置于车架前端,其中动力电池固定于车架正上方,整流模块(AC/DC)和直流电转换模块(DC/DC)布置在电池上方,两侧驱动电机分别固定在左右履带侧板上与车身相配合,独立PTO电机通过减速机构与车身通过螺栓进行固定。

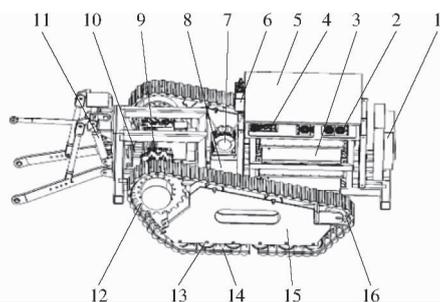


图1 整机结构示意图

Fig. 1 Diagram of complete machine structure

1. 水冷系统 2. AC/DC 3. 动力电池 4. DC/DC 5. 整机控制箱
6. 功率分配单元 7. 驱动液压泵电机 8. 液压油箱 9. 行走驱动电机
10. PTO电机 11. 液压悬挂系统 12. 驱动轮
13. 承重轮 14. 履带 15. 履带板 16. 张紧轮

1.3 跟随式供电系统结构

在棚电模式下,履带拖拉机需在设施场景内执行全域拖线作业,要求供电系统线缆能够全程随动覆盖,并在拖线过程中维持适当的张紧度与跟随范围,以确保跟随平稳、高压接头连接可靠,避免因拉

力过大导致松脱,保障作业安全。综合考虑建筑尺寸、整机结构设计及经济性等因素,本文设计一套被动跟随式供电系统,其结构如图2所示。

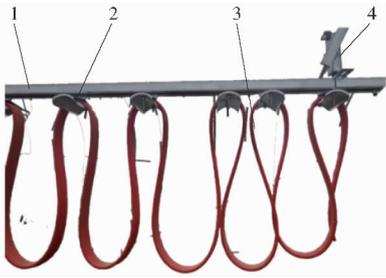


图2 跟随式供电系统结构图

Fig. 2 Diagram of follow-up power supply system

1. 滑轨 2. 滑车 3. 线缆 4. 吊架

被动跟随式供电系统主要由滑轨、吊架、滑车和线缆构成。当履带拖拉机处于棚电模式时,整机移动将牵引滑车沿滑轨移动,借助中间滑车的被动响应实现线缆自适应收放,从而持续为整车提供电力支持。当切换至动力电池模式时,线缆可依靠势能与人工辅助实现快速收回,便于模式转换与设备收纳。根据整机高度和AC/DC模块位置,确定滑轨离地面固定高度为2 m。

1.4 履带拖拉机关键技术参数

与轮式拖拉机相比,履带式具有通过性更好、稳定性更高等优点,其中轮齿式履带结构简洁,便于加工制造,啮合可靠性高,不易受泥沙或石块干扰^[16],故采用轮齿式履带行走装置,并进行相关结构设计。相关计算式为

$$D = \frac{t_0}{\sin \frac{180^\circ}{Z}} \quad (1)$$

$$D_k = (0.7 \sim 0.9) D \quad (2)$$

$$b = (0.9 \sim 1.1) \times 209 \sqrt[3]{M \times 10^{-3}} \quad (3)$$

$$\frac{L_0}{B} = 1.15 \sim 1.39 \quad (4)$$

$$\text{其中 } t_0 = (15 \sim 17.5) \sqrt[4]{M} \quad (5)$$

式中 t_0 ——履带拖拉机履带节距, mm

b ——履带宽度, mm

M ——整机质量,取 1 500 kg

D ——驱动轮节圆直径, mm

D_k ——导向轮直径, mm

Z ——驱动轮齿数,取 17

B ——履带拖拉机轨距, mm

L_0 ——履带接地长度, mm

结合履带拖拉机设计需求参数,最终确定轨距 B 为 1 470 mm,可计算得履带接地长度,在消除履带干涉前提下,取履带接地长度 L_0 为 1 600 mm,计算

可得节距 t_0 为 90 mm,履带宽度 b 为 230 mm,驱动轮节圆直径 D 为 360 mm,导向轮直径 D_k 为 180 mm。拖拉机关键技术性能参数如表 1 所示。

表 1 履带拖拉机关键技术性能参数

Tab. 1 Key technical parameters of crawler tractor

参数	数值/方式
整机质量/kg	1 500
整机尺寸/(mm × mm × mm)	2 320 × 1 700 × 1 200
作业速度/(km · h ⁻¹)	0 ~ 10
履带宽度/mm	230
履带接地长度/mm	1 600
轨距/mm	1 470
最小离地间隙/mm	340
整机功率/kW	50
转向方式	差速转向

2 行走作业系统设计

本文设计的履带拖拉机与传统拖拉机存在结构性差异,驱动装置与动力输出装置(PTO)采用动力解耦设计,二者分别由独立的动力源驱动。在系统设计选型过程,需对驱动单元与 PTO 单元进行独立的动力参数计算与匹配优化。

2.1 电驱动系统选型设计

驱动电机需要满足履带拖拉机在不同工况最大扭矩及最大速度需求,此外转向动力也由驱动电机提供,选用驱动电机同样需要满足转向工况左右驱动轮的转速转矩需求。

当履带拖拉机用于驱动时,犁耕是负荷最大工况,整机速度较低,且由于地势平坦,忽略爬坡、风阻功率和加速功率。所受阻力为拖拉机本身行走阻力和犁耕作业阻力之和^[17],犁耕作业功率为

$$P_1 = \frac{(F_f + F_T)V}{3.6\eta_m} \quad (6)$$

$$\text{其中 } F_f = \mu mg \quad (7)$$

$$F_T = (1.1 \sim 1.2) z_1 b_1 h_k k \quad (8)$$

式中 F_f ——地面运行阻力, N

F_T ——额定牵引力, N

V ——犁耕作业速度, m/s

μ ——运行阻力系数

m ——整机质量, kg

z_1 ——犁铧数

b_1 ——单犁铧宽度, cm

h_k ——犁耕耕深, cm

k ——土壤对犁比阻, N/cm²

η_m ——电机效率

当拖拉机转向运动时,最大转向功率为

$$P_2 = \frac{F_q r n_e}{9550 \eta_m} \quad (9)$$

其中 $F_q = \frac{1}{2} G f + \frac{M_\mu}{B}$ (10)

$$M_\mu = 2 \left(\int_0^{L_0/2+x_0} \frac{\mu_1 G x}{2L_0} dx + \int_0^{L_0/2-x_0} \frac{\mu_1 G x}{2L_0} dx \right) \quad (11)$$

式中 F_q ——驱动轮最大驱动力, N

r ——驱动轮节圆半径, m

n_e ——驱动轮转速, r/min

G ——车体质量力, N

f ——履带滚动阻力系数

M_μ ——总转向阻力矩, N·m

μ_1 ——转向阻力系数

x_0 ——车辆转向轴线移动距离, mm

整机采用双侧独立电驱动的驱动模式, 考虑机组作业复杂工况和电机波动特性, 需额外增加 10% ~ 20% 储备功率, 因此驱动电机额定功率为

$$P_e = (1.1 \sim 1.2) \max \{0.5 P_1, P_2\} \quad (12)$$

此外, 电机最大转矩、最高转速需满足

$$T_{\max} \geq \frac{(F_f + F_T) r}{2q \eta_m} \quad (13)$$

$$n_{\max} \geq \frac{30 v_{\max} q}{\pi r} \quad (14)$$

式中 v_{\max} ——拖拉机最高行驶速度, km/h

q ——减速机减速比

综合功率、转矩、转速需求, 选用 2 台额定功率为 15 kW 永磁同步电机用于驱动转向, 匹配减速比为 30 行星减速机, 构建持续功率 30 kW 电驱动系统, 电机技术参数如表 2 所示。

表 2 驱动电机技术性能参数

Tab. 2 Technical parameters of drive motor

参数	数值
额定功率/kW	15
额定转矩/(N·m)	62.3
峰值扭矩/(N·m)	160
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 300
峰值扭矩/(r·min ⁻¹)	4 500
效率/%	90

2.2 PTO 电机选型设计

设施农业中, 履带拖拉机能够用到 PTO 动力作业环节主要有旋耕起垄、对靶喷雾等, 其中旋耕起垄作业是 PTO 负荷最大工况, 旋耕起垄作业所需功率 P_f 为

$$P_f = 0.1 K_\lambda d V_m B_1 \quad (15)$$

式中 K_λ ——旋耕比阻, N/cm²

d ——旋耕耕深, cm

V_m ——旋耕作业速度, m/s

B_1 ——耕幅, cm

考虑到旋耕作业时地面复杂状态以及电机波动, 需要额外增加 10% ~ 20% 储备功率, 因此 PTO 电机额定功率 P_{e1} 为

$$P_{e1} = (1.1 \sim 1.2) P_f \quad (16)$$

标准 PTO 转速有 540、1 000 r/min, PTO 电机及配套减速机应满足上述要求^[17], 选用 1 台额定功率为 20 kW 电机, 匹配减速比为 3 减速机, PTO 电机技术参数如表 3 所示。

表 3 PTO 电机技术性能参数

Tab. 3 Technical parameters of PTO motor

参数	数值
额定功率/kW	20
额定转矩/(N·m)	127
峰值扭矩/(N·m)	200
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
峰值扭矩/(r·min ⁻¹)	3 000
效率/%	90

2.3 动力电池选型设计

综合动力电池技术成熟度、经济性等要求, 选用磷酸铁锂电池, 根据电机工作电压、作业时最大功率及作业时长确定动力电池容量为

$$C_b = \frac{1000}{U_m h_e \eta_{mc}} \left(\frac{P_2}{\eta_{mc}} + P_0 \right) \quad (17)$$

式中 C_b ——动力电池容量, A·h

U_m ——电机母线电压, V

h_e ——锂电池放电深度

η_{mc} ——电机控制器和电动机效率乘积

P_0 ——电机以外其他电器的功率, kW

综合计算, 选用额定电压为 540 V, 额定容量 63 A·h 动力电池, 总能量为 34 kW·h。

3 履带拖拉机棚锂双电系统设计

3.1 双电动力结构设计

3.1.1 动力总成架构

双电履带拖拉机能源系统采用多源异构动力总成架构^[18-21], 其拓扑结构如图 3 所示, 主要由磷酸铁锂动力电池、设施电网接入模块(棚电)、三相全桥主动整流模块(AC/DC)以及隔离式直流电转换模块(DC/DC)组成。

系统构建双输入多输出的直流母线并联架构, AC/DC 将 380 V 交流棚电转换为 540 V 直流电后与动力电池所输出 540 V 直流电并联构成整机直流母线。

能量分配系统采用分层供电策略, 540 V 高压

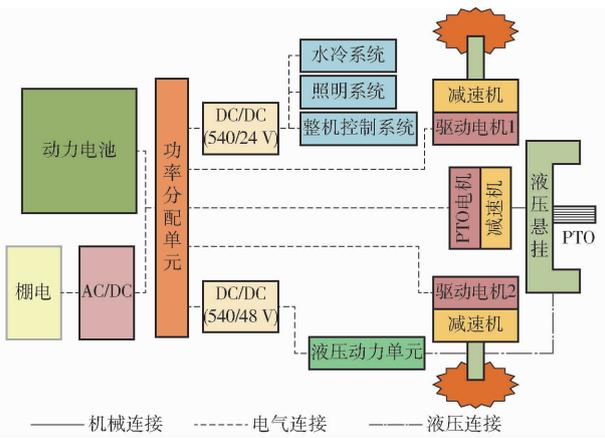


图3 双电履带拖拉机动力总成架构

Fig. 3 Energy assembly structure of dual power crawler

母线层分别通过电机支路和转换支路为驱动电机及DC/DC提供电能。高压转换支路经2路DC/DC分别转换成中电压层48V和低电压层24V,分别为整机液压系统负载供电和整机控制系统、水冷系统、照明系统等供电。

3.1.2 双电系统预充设计

为防止高压上电过程,瞬态电流冲击过大造成电器元件损坏,对双电高压系统设计有预充保护模块^[22]。

当AC/DC模块或动力电池激活供电时,控制系统将预充继电器置于闭合状态,通过接入预充电阻构建预充回路对母线电容进行渐进式能量注入。预充阶段实时监测母线电压上升梯度,当检测值达到95%标称电压时触发主继电器切换;切换阶段采用延迟切换法保证母线电压输出始终存在,具体执行流程如图4所示。

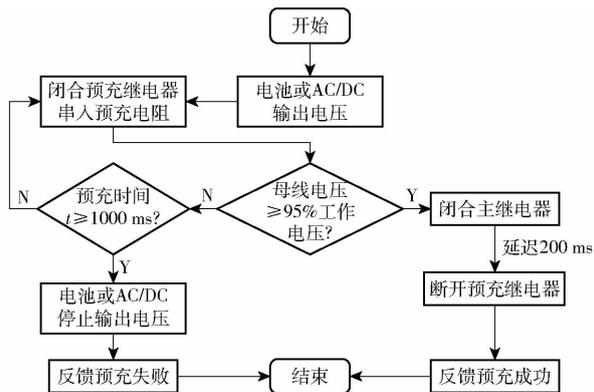


图4 高压预充系统执行流程

Fig. 4 High pressure precharge system flowchart

预充电阻选型直接影响预充回路性能,原因是预充回路本质上是典型RC一阶电路,其零状态响应方程为

$$U_c = U_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\mu}}) \quad (18)$$

$$\text{其中} \quad \mu = RC \quad (19)$$

式中 U_c ——预充时母线电压,V
 U_{\max} ——母线最大电压,V
 μ ——时间常数
 C ——母线电容,取1000 μf
 R ——预充电阻, Ω

当母线电压检测值达到95%标称电压时触发主继电器切换,由此得到预充时母线电压为

$$U_c = 0.95 U_{\max} \quad (20)$$

由式(18)~(20)可知,电阻 R 与电容 C 共同决定了电路时间常数 μ ,而 μ 直接制约着预充电容电压上升速率^[23]。设计预充时间 $100 \text{ ms} \leq t \leq 500 \text{ ms}$,由式(18)~(20)计算得预充电阻阻值 $34 \Omega \leq R \leq 167 \Omega$,选用预充电阻为100 Ω 。

3.2 双电系统供电切换控制策略设计

3.2.1 棚电切换动力电池供电策略

当履带拖拉机处于转场作业或遭遇AC/DC转换模块输入/输出异常时,系统可通过自动或远程控制模式实现从棚电至动力电池的供电切换,控制流程如图5所示。

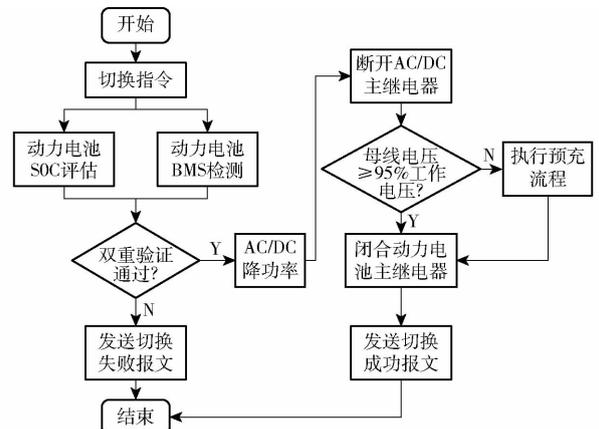


图5 棚电切换动力电池执行流程图

Fig. 5 Grid power-to-battery transfer flowchart

切换控制器通过CAN总线获取切换指令后,向整机主控单元提交包含指令接收确认、AC/DC故障代码在内的切换信息。系统同步执行电池荷电状态(SOC)评估与电池管理系统(BMS)健康度检测,在双重验证通过后执行切换程序。主控单元首先向AC/DC模块下达功率递减指令,待响应后发送停机指令并切断AC/DC主继电器。基于实时母线电压监测数据,切换控制器选择电池预充电模式或直连模式完成电能重构,最终由切换控制器向主控单元发送供电模式转换完成信号。

3.2.2 动力电池切换棚电供电策略

在动力电池出现电量临界($\text{SOC} \leq 20\%$)、系统故障或需执行持续性设施作业时,系统可自动或远程控制切换至棚电供电模式,控制流程如图6所示。

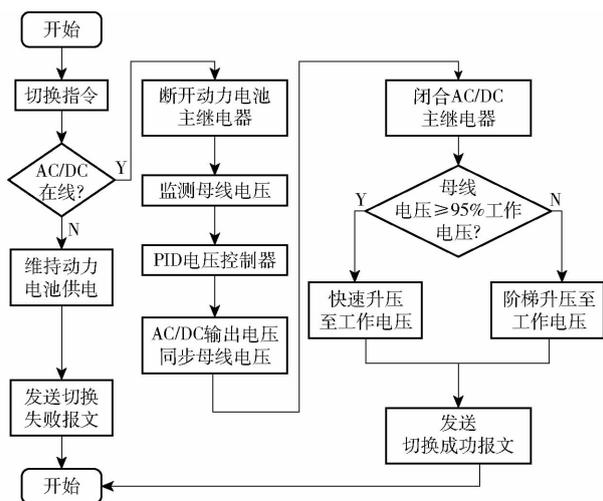


图6 动力电池切换棚电执行流程图

Fig. 6 Battery-to-grid power transfer flowchart

切换控制器向主控单元传输包含切换指令接收、低电量告警及故障代码的切换信息，并切断电池主接触器。系统同步监测 AC/DC 模块在线状态与母线电压参数，采用 PID 电压控制器控制 AC/DC 输出电压，使其与当前母线电压值跟随同步，通过软启动方式闭合 AC/DC 主继电器以抑制浪涌电流。供电重构完成，切换控制器向主控单元发送棚电供电模式确认信号。

4 履带拖拉机动力学仿真

为验证所设计履带拖拉机的空间布置合理性以及在运行工况抗倾覆性能和作业性能，并指导结构布局优化设计，降低后续因设计迭代产生的成本与周期，在样机试制前基于 RecurDyn 构建虚拟样机和动力学模型，对整机设计与作业工况进行仿真验证，为样机实地测试具备良好运行稳定性奠定基础。

4.1 地面仿真模型建立

设施场景中，地面的宏观尺度可近似为平面，但在微尺度下受土壤颗粒分布不均、有机质差异和耕作压实等因素影响，呈现一定的空间非均匀性起伏。为精确仿真此类随机地形特征，采用谐波叠加法构建地面函数，通过叠加多组具有特定振幅、频率和随机相位正弦函数生成地面高度场参数。

各频率分量振幅分布由功率谱密度函数约束，其表达式为

$$G_d(n) = G_d(n_0) \left(\frac{n_c}{n_0} \right)^{-w} \quad (21)$$

式中 n_c ——空间频率， m^{-1}

w ——频率指数，取 2

n_0 ——参考空间频率，取 $0.1 m^{-1}$

由此得到地面不平度函数为

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^m (\sqrt{2G_d(n_k)} \Delta n \sin(2\pi n_k \sqrt{x^2 + y^2} + \phi_k)) \quad (22)$$

其中 $\Delta n = \frac{n_{max} - n_{min}}{m}$ (23)

$$n_k = n_{min} + \Delta n(\lambda - 0.5) \quad (24)$$

式中 m ——频率分量总数

λ ——计数量

n_{max}, n_{min} ——最大、最小空间频率， m^{-1}

ϕ_k ——随机相位角，rad

根据式 (21) ~ (24)，参考设施农业用地路面等级，生成地面谐波曲线如图 7 所示。

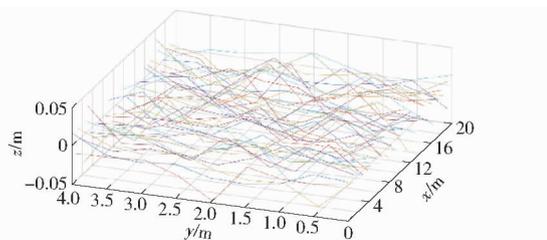


图7 设施农业用地路面谐波曲线

Fig. 7 Harmonic curves of greenhouse pavement

考虑地面履带接触作用，根据贝克公式

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (25)$$

式中 p ——履带拖拉机对地压强，kPa

k_c ——土壤内聚力变形模量， kN/m^{n+1}

k_ϕ ——土壤内摩擦变形模量， kN/m^{n+2}

z ——土壤沉陷量，m

n ——土壤变形指数

履带在接触地面剪切应力与位移关系为

$$\tau = (c + p \tan \varphi) (1 - e^{-\frac{D_j}{k_s}}) \quad (26)$$

式中 τ ——剪切应力，kPa

c ——土壤粘聚力，kPa

φ ——土壤内摩擦角，($^\circ$)

D_j ——剪切位移，m

k_s ——水平剪切变形模量，m

设施农业场景中土壤多为砂壤土，通过土壤取样和测试^[24]获得土壤参数，如表 4 所示。

表 4 砂壤土地面土壤参数

Tab. 4 Soil parameters of loam pavement

参数	数值
内聚力变形模量/($kN \cdot m^{-(n+1)}$)	41.9
内摩擦变形模量/($kN \cdot m^{-(n+2)}$)	12.1
变形指数	0.7
粘聚力/kPa	1.7
内摩擦角/($^\circ$)	29
剪切变形模量/m	0.025

4.2 直线行驶动力学仿真

为验证履带系统动力学性能,在 RecurDyn 中建立履带拖拉机虚拟样机。基于 TrackLM 工具包,构建履带、支重轮与驱动轮等核心组件,并与其他功能部件集成,形成完整的履带动力学仿真系统,如图 8 所示。

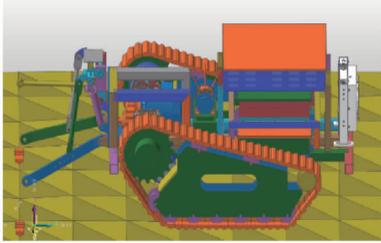


图 8 履带多体动力学仿真模型

Fig. 8 Dynamics simulation model of crawler tractor

为验证履带拖拉机直线行驶性能,参考拖拉机作业经典速度,在预设标准地面上开展 3 组不同速度的对照仿真试验。为模拟驱动电机瞬态过程,定义左右驱动轮角速度函数 $\omega_v(t)$ 为分段加速激励,计算式为

$$\omega_v(t) = \text{STEP}(\text{Time}, 0, 0, 1, \Omega_v) \quad (27)$$

其中

$$\Omega_v = \begin{cases} 70 & (v = 1 \text{ km/h}) \\ 175 & (v = 2.5 \text{ km/h}) \\ 350 & (v = 5 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (28)$$

式中 Ω_v ——前进目标角速度, $(^\circ)/\text{s}$

v ——履带拖拉机行驶速度, km/h

该函数表征驱动轮在 t 为 $0 \sim 1 \text{ s}$ 区间内从静止匀加速至目标角速度 Ω_v ,并在 t 大于 1 s 后维持匀速。分别记录履带拖拉机重心横向偏移量及纵向位移变化,结果如图 9、10 所示。

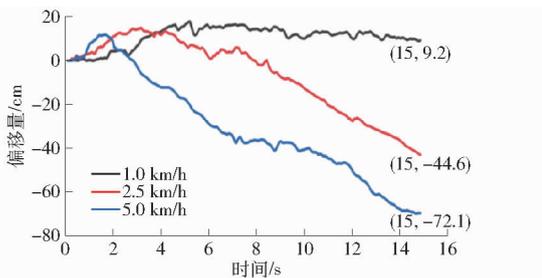


图 9 横向偏移量变化曲线

Fig. 9 Variation curves of lateral displacement

由图 9、10 可知,行驶速度为 1 km/h 时,拖拉机 15 s 内行驶位移为 6.5 m ,横向偏移量为 9.2 cm ;行驶速度为 2.5 km/h 时,拖拉机 15 s 内行驶位移为 12.3 m ,横向偏移量为 -44.6 cm ;行驶速度为 5 km/h 时,拖拉机 15 s 内行驶位移为 24.20 m ,横向偏移量为 -72.1 cm 。

偏驶率 p_1 计算式为

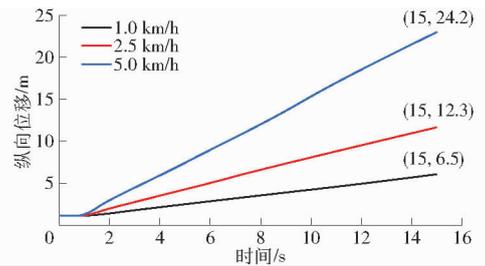


图 10 纵向位移变化曲线

Fig. 10 Variation curves of longitudinal displacement

$$p_1 = \frac{s}{l} \times 100\% \quad (29)$$

式中 s ——横向偏移量, cm

l ——拖拉机行驶纵向位移, cm

当拖拉机行驶速度为 1 、 2.5 、 5 km/h 时,偏驶率分别为 1.42% 、 3.63% 、 2.98% ,均满足履带拖拉机作业要求,表明所设计的履带拖拉机具有良好的直线行驶性能。

4.3 履带拖拉机转向性能仿真

履带拖拉机通过两侧驱动轮转速差实现转向,为评估整机转向动态特性,参考经典原地转向工况,通过定义左右驱动轮的驱动函数模拟电机反向旋转的物理现象,表达式为

$$\omega_z(t) = \text{STEP}(\text{Time}, 0, 0, 1, \Omega_z) \quad (30)$$

式中 Ω_z ——转向目标角速度, $(^\circ)/\text{s}$,取 $\pm 70(^\circ)/\text{s}$

拖拉机重心位置变化能够很好地反应履带拖拉机转向性能,若重心偏移过大,转向就会出现侧滑等不稳定现象^[25],为精确量化转向半径,选取双侧履带接地几何中心点以及最外侧接地特征点作为关键标记点,仿真得到关键点的运动轨迹结果如图 11 所示。

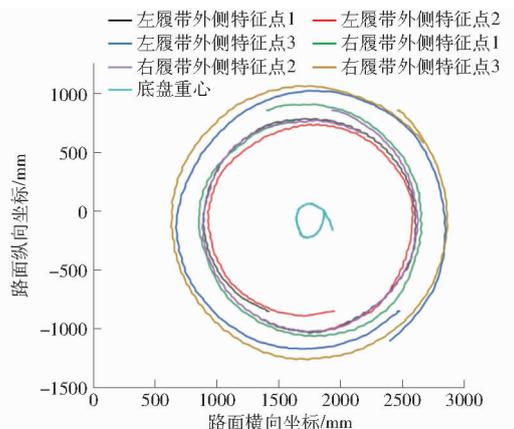


图 11 拖拉机原地转向运动轨迹

Fig. 11 Tractor steering path diagram

由图 11 可知,履带拖拉机在做经典原地转向时,其重心最大偏移量为 234 mm ,转弯轨迹近似圆形,轨迹圆最大半径为 1157 mm ,最小转弯半径为 240 mm ,表明所设计履带拖拉机可满足转向空间要求。

转向角速度稳定性也是衡量履带拖拉机转向性能的关键指标,图 12 为履带拖拉机原地转向时转向角速度变化曲线。

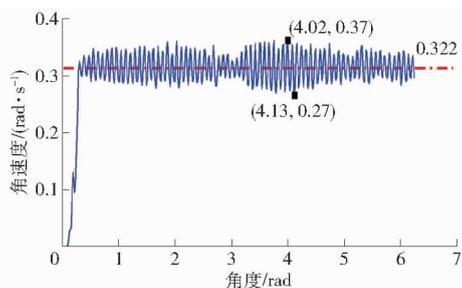


图 12 拖拉机转向角速度变化曲线

Fig. 12 Tractor steering angular velocity curve

由图 12 可知,在原地转向时,在忽略 0 ~ 0.3 s 内启动瞬态数据后,履带拖拉机转向角速度平均值为 0.322 rad/s,与期望值 0.35 rad/s 相对误差为 5.7%,仿真得到最大转向角速度为 0.37 rad/s,最小转向角速度为 0.27 rad/s,转向角速度波动率为 28%,试验结果表明,所设计履带拖拉机具备良好的转向稳定性。

基于 RecurDyn 多体动力学仿真结果表明,本文所设计的履带拖拉机在典型作业工况下动力学特性表现良好,各项性能指标均满足设计要求,并且具有优异的抗倾覆稳定性,充分验证了整体设计合理性与可靠性。

5 整机性能试验与结果分析

为验证所设计的驱动系统构型方案、棚锂双电系统合理性以及样机试制加工效果,结合拖拉机在设施农业场景不同作业工况,利用所试制的样机进行性能试验研究。

5.1 样机试制

棚锂双电设施农业履带拖拉机样机如图 13 所示,整机尺寸 2 320 mm × 1 700 mm × 1 200 mm,整机质量为 1 500 kg,其尺寸和作业幅宽满足设施农业垄作茄果种植基本条件。



图 13 履带拖拉机样机

Fig. 13 Shape and structure of trial prototype

5.2 性能试验

试验场地为设施农业垄作场景,根据前期双电设施农业履带拖拉机设计目标,分别对电性能、直线

行驶性能、转向性能以及作业效率等指标进行测试。

5.2.1 电性能试验

为验证所设计整机预充回路以及切换策略的合理性与安全性,对样机进行上电与双电源切换测试,图 14 为拖拉机母线预充过程动态响应曲线。

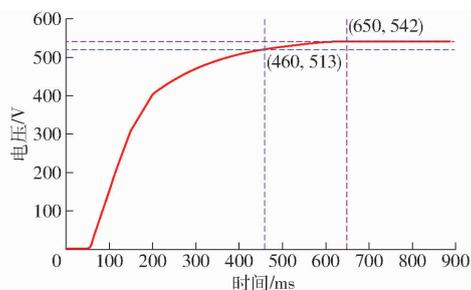


图 14 母线预充电电压动态响应曲线

Fig. 14 DC bus precharge voltage curve

由图 14 可知,在 50 ms 处,主负继电器与预充继电器闭合后,母线电压从 0 V 开始逐渐上升,上升速率逐渐降低,在测试开始 460 ms 左右电压达到 513 V,结束预充流程,预充周期为 410 ms,与设计参数大致相同,表明所设计预充电路满足设计与使用要求。

图 15 为双电源切换过程中整机母线电压动态响应曲线。

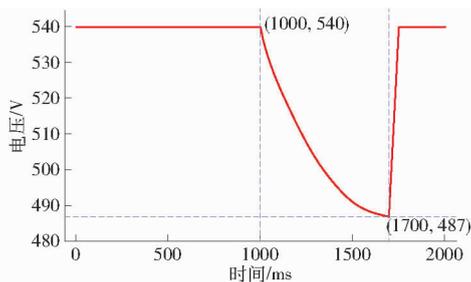


图 15 母线电压动态响应曲线

Fig. 15 Bus-voltage dynamic-response curve

由图 15 可知,切换指令第 1 000 毫秒发出后,动力电池主接触器断开,母线电压开始下降。受母线电容的缓冲效应影响,电压呈缓慢下降趋势,并于 1 700 ms 达到最低值 487 V。随后 AC/DC 主继电器闭合,电压恢复至额定值 540 V。整个切换过程持续时间为 700 ms,最大电压波动率为 9.8%。棚电切换至动力电池过程和动力电池切换至棚电响应曲线大致相同,试验结果验证了双电履带拖拉机具备良好的快速切换能力与运行安全性。

绝缘电阻是高压系统与整车地(电位参考点)之间的电阻值,是衡量整机高压系统安全性的重要参数,为验证所设计拖拉机的电性能安全性,使用绝缘电阻仪分别测量 AC/DC 三相电输入端,直流正负输出端以及动力电池输出端对整车地(底盘)之间的绝缘阻值,测试结果如表 5 所示。

表5 高压系统绝缘阻值

Tab.5 High-voltage system insulation resistance

端口	MΩ						
	AC/DC			动力电池		输出端	
	输入端		输出端	正	负		
	A	B	C			正	负
阻值	45	57	63	99	99	33	49

由表5可知,整车高压系统输入输出端对电压参考点整车地绝缘阻值均大于30 MΩ,根据GB 18384—2020《电动汽车安全要求》^[26],要求绝缘阻值不低于0.1 MΩ,本文所设计棚锂双电系统在安全性上满足上述要求。

5.2.2 整机作业性能试验

(1) 直线行驶性能试验

双电履带拖拉机使用动力电池供电与棚电供电2种供电方式。

在不同供电模式下,电源输出稳定性和持续供电能力存在差异,可能会对履带拖拉机的行驶稳定性产生影响。在典型设施农业土壤环境中为评估履带拖拉机动力电池供电模式与棚电供电模式的行驶稳定性,操控样机在设施农业垄作土壤区进行直线行驶性能试验,试验过程如图16所示。



图16 履带拖拉机直线行驶性能测试

Fig.16 Crawler tractor straight-line test

在平行于预设行驶方向上标记一条基准直线,设定目标速度1.0、2.5、5.0 km/h 直线行驶25 m,测量样机行驶的偏移位移并计算平均偏差和偏驶率,试验结果如表6所示。

表6 履带拖拉机直线行驶率试验结果

Tab.6 Test results of tractor yaw rate

供电模式	行驶速度/ (km·h ⁻¹)	偏移量/ mm	平均偏 移量/mm	偏驶率/ %	平均偏 驶率/%
动力电池	1.0	1 196		4.8	
	2.5	1 165	1 206	4.7	4.8
	5.0	1 256		5.0	
棚电	1.0	1 213		4.9	
	2.5	1 321	1 274	5.3	5.1
	5.0	1 289		5.2	

由表6可知,样机在动力电池供电和棚电供电模式平均偏驶率为4.8%和5.1%,均小于国家标准

6%,与动力学仿真结果误差在可接受范围内,呈现出总体一致性,验证了动力学模型准确性以及所设计履带拖拉机拥有良好的直线行驶性能。

(2) 转向性能试验

样机静止,控制履带拖拉机两侧履带逆向匀速稳定运转,操控样机进行原地转向,直到地面出现完整的摩擦轨迹,测量并记录最小转向圆半径以验证样机转向灵活性^[27]。试验结果如图17所示。



图17 履带拖拉机转向性能测试

Fig.17 Crawler tractor maneuverability test

根据GB/T 3871.5—2006《转向圆和通过圆直径》测量辙迹迹圆的三等分周长点间距离,计算转向直径。按照转动方向分为2组,每组重复3次试验^[27],试验结果如表7所示。

表7 履带拖拉机最小转向试验结果

Tab.7 Test results of minimum steering radius

of crawler tractor

旋转方向	序号	转向直径/mm	平均转向半径/mm
左转	1	2 367	1 168.5
	2	2 348	
	3	2 297	
右转	1	2 418	1 198.5
	2	2 398	
	3	2 374	

由表7可知,整机转向圆轨迹最小半径为1 168.5 mm,不仅与设计理论值1 100 mm高度吻合而且与动力学仿真结果相一致,表明所设计样机转向机动性良好,既满足设施农业垄作土壤作业需求,又达到设计指标要求。

(3) PTO 性能试验

为测试所设计履带拖拉机动力输出单元(PTO)的性能,设计旋耕起垄作业的田间试验,设置旋耕深度为15 cm,旋耕幅宽为160 cm,同时控制两侧驱动电机使履带拖拉机以旋耕作业速度2 km/h作业,动力输出轴输出转速为标准540 r/min,控制PTO电机转速为1 620 r/min,采集PTO电机转速转矩,如图18所示。

由图18可知,在旋耕起垄作业中,PTO电机平均转速为1 623 r/min,最高转速为1 698 r/min,转速最大波动率为5.9%,PTO轴平均转速为541 r/min,

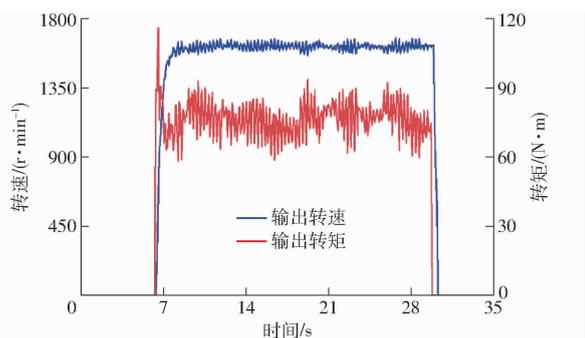


图 18 PTO 电机转速转矩曲线

Fig. 18 PTO motor speed-torque curves

输出转矩在启动瞬间大幅上升,在 1 s 后保持稳定,稳定输出转矩约为 $77.4 \text{ N}\cdot\text{m}$,表明其具有良好的 PTO 性能。

5.2.3 双电运行效能试验

为对比棚电模式与动力电池模式整车运行效能,设计等速对比试验,控制履带拖拉机在 2 种供电模式下均以恒定速度 2.5 km/h 行进,并同步采集系统关键电气参数。其中,动力电池模式采集电池输出的直流电压与电流,棚电模式则通过 AC/DC 采集其直流输出侧电压、电流以及交流输入侧三相电压与电流,计算其效率,结果如图 19 所示。

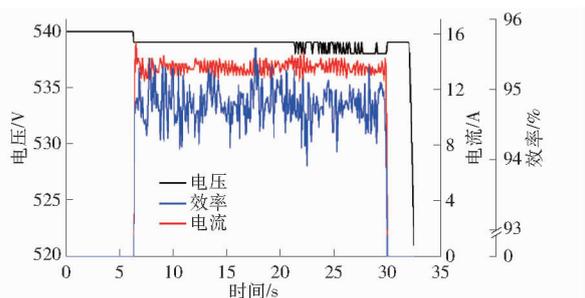


图 19 母线电压电流动态曲线

Fig. 19 DC bus voltage/current dynamic curves

由图 19 可知,2 种模式传递至整车驱动系统直流输出电气参数(电压、电流)基本一致,棚电模式下直流电压输出电压平均值为 536.8 V ,输出电流有效值约为 13.9 A ,负载可获得一致的功率供给。然而,AC/DC 转换环节存在一定能量损耗,测得其平均转换效率为 94.8% ,能耗相较动力电池模式高 5.2 个百分点。表明在提供相同输出能量的前提下,棚电模式需从电网汲取更多电能,其系统能耗相

对更高。

综合来看,棚电模式虽存在能量转换损耗但可实现稳定持续供电,且损耗量较小经济性较高,动力电池在这方面与棚电显著互补,验证本文所设计的棚锂双电履带拖拉机在设施农业场景下具有良好的适应性。

6 结论

(1) 针对设施农业垄作场景专用电动化农业机械适配性不足、续航性能差等问题,基于茄果类农作物种植的具体要求,提出一种以动力电池和棚电为核心的双电源架构方案,对双电设施农业履带拖拉机的行走系统、PTO 系统、跟随式供电系统、母线预充系统和切换系统等关键部件进行设计和匹配选型。

(2) 通过对棚锂双电履带拖拉机 RecurDyn 动力学仿真,验证所设计履带拖拉机偏驶率最高为 3.36% ,直线行驶性能良好;转向过程灵活,转向角速度稳定,角速度最大波动率为 28% ,转向性能良好;结构与空间布局合理,防倾覆性能良好。

(3) 棚锂双电系统母线电压在 410 ms 内由 0 V 升至 513 V (额定电压的 95%),预充性能良好,双电切换过程中最大电压波动率为 9.8% ,切换时间为 700 ms ,表现出良好的切换速度和切换安全性;高压系统对整车地绝缘电阻阻值均超过 $30 \text{ M}\Omega$,具有良好的高压绝缘安全性能。

(4) 整机实地测试表明,履带拖拉机直线行驶性能较好,在动力电池模式和棚电模式下,平均偏驶率为 4.8% 和 5.1% ,满足相关标准要求;转向机动性能良好,最小转向半径为 1168.5 mm ,满足设施农业场景对转向性能的需求;旋耕作业中,PTO 电机的最大转速波动率为 5.9% ,输出转矩约为 $77.4 \text{ N}\cdot\text{m}$,PTO 轴平均转速为 541 r/min ,整机表现出良好的作业性能。

(5) 实地测试结果表明,棚电模式工作损耗率较动力电池模式高 5.2 个百分点,但可以实现长时间作业,棚锂双电拖拉机通过 2 种模式互补,有效兼顾了持续作业能力与转场机动性,为设施农业提供了较好的装备解决方案。

参 考 文 献

- [1] 欧阳安,崔涛,林立. 智能农机装备产业现状及发展建议[J]. 科技导报,2022,40(11):55-66.
OUYANG An, CUI Tao, LIN Li. Development status and countermeasures of intelligent agricultural machinery equipment industry[J]. Science & Technology Review,2022,40(11):55-66. (in Chinese)
- [2] 刘浩鲁,沈成,胡良龙,等. 电动农业装备研究进展与发展趋势[J]. 农业工程学报,2024,40(23):39-51.
LIU Haolu, SHEN Cheng, HU Lianglong, et al. Research progress and development trend of electric agricultural equipments [J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(23):39-51. (in Chinese)
- [3] 赵剡水,杨为民. 农业拖拉机技术发展观察[J]. 农业机械学报,2010,41(6):42-48.

- ZHAO Yanshui, YANG Weimin. Technological development of agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 42–48. (in Chinese)
- [4] 管春松, 胡桢, 陈永生, 等. 大棚用小型电动拖拉机研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 67–69, 76.
- GUAN Chunsong, HU Hui, CHEN Yongsheng, et al. Study on small electric tractors for greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2): 67–69, 76. (in Chinese)
- [5] 李旭光. 大棚双电源电动拖拉机的研制与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LI Xuguang. Development and testing of a dual-power electric tractor for greenhouses[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [6] 汪珍珍, 周俊, 袁立存, 等. 一种双电源双电机温室电动拖拉机动力耦合驱动装置: CN108407590B[P]. 2021–05–14.
- [7] 王宝超, 乔明睿, 初香港, 等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431–439.
- WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431–439. (in Chinese)
- [8] 孙闫. 基于超级电容辅能的纯电动拖拉机能量管理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- SUN Yan. Research on energy management of pure electric tractor based on super capacitor auxiliary energy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [9] NATCHIMUTHU S, CHINNUSAMY M, MARK A P. Experimental investigation of PV based modified SEPIC converter fed hybrid electric vehicle (PV–HEV)[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2020, 48(6): 980–996.
- [10] WASEEM M, AMIR M, LAKSHMI G S, et al. Fuel cell-based hybrid electric vehicles: an integrated review of current status, key challenges, recommended policies, and future prospects[J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2023, 2(6): 100121.
- [11] DAS H S, TAN C W, YATIM A H M. Fuel cell hybrid electric vehicles: a review on power conditioning units and topologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 76: 268–291.
- [12] 李利桥, 冉国伟, 高宗余, 等. 纯电动拖拉机复合供电系统自适应能量管理与容量配置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 82–91.
- LI Liqiao, RAN Guowei, GAO Zongyu, et al. Adaptive energy management and capacity configuration for electric tractor power supply system[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 82–91. (in Chinese)
- [13] 李利桥, 陈江春, 刘伟, 等. 基于深度强化学习的氢燃料电池电动拖拉机能量管理策略[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7): 691–700.
- LI Liqiao, CHEN Jiangchun, LIU Wei, et al. Deep reinforcement learning energy management strategy for hydrogen fuel cell electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(7): 691–700. (in Chinese)
- [14] 孙景彬, 曾令坤, 应婧, 等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 202–220.
- SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 202–220. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 种植塑料大棚工程技术规范: GB/T 51057—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [16] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358–369.
- SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358–369. (in Chinese)
- [17] 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [18] MOCERA F, MARTINI V, SOMÀ A. Comparative analysis of hybrid electric architectures for specialized agricultural tractors[J]. Energies, 2022, 15(5): 1944.
- [19] VOGT H H, DE MELO R R, DAHER S, et al. Electric tractor system for family farming: increased autonomy and economic feasibility for an energy transition[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102744.
- [20] 刘孟楠, 李书苑, 徐立友, 等. 拖拉机双向耦合电驱动系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 423–431, 449.
- LIU Mengnan, LI Shuyuan, XU Liyou, et al. Design and performance analysis of tractor bidirectional coupling electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 423–431, 449. (in Chinese)
- [21] 李同辉, 谢斌, 宋正河, 等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 379–388.
- LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 379–388. (in Chinese)
- [22] 杨涵. 电动汽车电池管理系统的功能安全设计与开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- YANG Han. Functional safety design and development of battery management system for electric vehicles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023. (in Chinese)
- [23] 刘永昌, 龚元明. 动力电池预充设计及温升特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(6): 111–114.
- LIU Yongchang, GONG Yuanming. Design of power battery precharge and research on temperature rise characteristics[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(6): 111–114. (in Chinese)
- [24] YUE J, LI T, FENG H, et al. Enhancing field soil moisture content monitoring using laboratory-based soil spectral measurements and radiative transfer models[J]. Agriculture Communications, 2024, 2(4): 100060.
- [25] 杜小强, 宁晨, 杨振华, 等. 跨式油茶果收获机履带底盘行走液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 139–147.
- DU Xiaoqiang, NING Chen, YANG Zhenhua, et al. Design and experiment of hydraulic system for crawler chassis of straddle type *Camellia oleifera* fruit harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 139–147. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车安全要求: GB 18384—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [27] 王元杰, 刘永成, 杨福增, 等. 大棚微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23–29.
- WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23–29. (in Chinese)