doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.001

混合动力拖拉机关键技术研究综述

温昌凯[1,2]　赵子豪[1]　谢　斌[1,2]　相姝楠[3]　杜岳峰[1,2]　武秀恒[1,2]　彭　鹏[3]　宋正河[1,2]

(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.农业农村部农业机械化总站,北京 100122)

摘要:节能减排是智能农机装备提质增效、转型升级的关键。混合动力拖拉机是全球新能源农机装备产业发展的重点机型,也是加快推动中国农机向高端化、智能化、绿色化转型的关键技术路径。近年来,国内外结合本地农业生产特点,以市场需求为导向,持续催生、迭代新技术和新产品,并通过多场景、多层次的示范及应用,逐步形成完整的技术研发与应用体系,加速推动产品成熟推广。本文在概述混合动力拖拉机发展历程与发展特点的基础上,从设计开发、动力控制、智能化和试验验证 4 方面归纳分析了该领域关键技术的发展现状,着重分析了国内外机型的技术差异,并指出了制约领域发展的关键问题。最后,在政策引导与技术创新协同的大背景下,从人工智能、大数据等新兴技术赋能农业现代化的角度,展望了混合动力拖拉机产业的发展方向,并提出其在整机优化设计、协同优化控制、专用性能测试装备、智能作业管控等方面的未来发展趋势。

关键词:混合动力拖拉机;关键技术;智能控制;试验验证

中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0001-23　　**OSID**:

Review of Key Technologies in Hybrid Tractor

WEN Changkai[1,2]　ZHAO Zihao[1]　XIE Bin[1,2]　XIANG Shunan[3]　DU Yuefeng[1,2]
WU Xiuheng[1,2]　PENG Peng[3]　SONG Zhenghe[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*
3. *China Agricultural Mechanization Center*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100122, *China*)

Abstract: Energy saving and emission reduction is the key to improve quality and efficiency, transformation and upgrading of intelligent agricultural machinery and equipment. Hybrid tractor is the key model for the development of the global new energy agricultural machinery and equipment industry, and it is also the key technology path to accelerate the transformation of Chinese agricultural machinery to high-end, intelligent and green. In recent years, domestic and foreign combined with local agricultural production characteristics, market demand-oriented, continued to spawn, iterative new technology and new products, and through multi-scene, multi-level demonstration and application, a complete technology research and development and application system was gradually formed, which accelerated the promotion of product maturity. On the basis of outlining the development history and development characteristics of hybrid tractors, the development status of key technologies in this field was summarized and analyzed from four aspects: design and development, power control, intelligence and test verification, which focused on analyzing the technological differences between domestic and foreign models, and the key issues restricting the development of the field were pointed out. Finally, under the background of policy guidance and technological innovation synergy, it looked forward to the development direction of the hybrid tractor industry from the perspective of agricultural modernization empowered by artificial intelligence, big data and other emerging technologies, and puted forward its future development trend in the optimized design of the whole machine, collaborative optimization and control, special performance test equipment, intelligent operation control and other aspects.

Key words: hybrid tractor; key technologies; intelligent control; experimental validation

收稿日期:2025-09-09　修回日期:2025-09-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD2001302)和国家自然科学基金项目(32301719、52472462)

作者简介:温昌凯(1994—),男,副教授,博士,主要从事新能源农机装备智能化研究,E-mail:changkai.wen@cau.edu.cn

通信作者:宋正河(1973—),男,教授,博士,主要从事农机装备试验验证方法与技术研究,E-mail:songzhenghe@cau.edu.cn

0 引言

在全球“双碳”战略与可持续发展深入实施背景下,农业领域的绿色化转型进程也在加快推进[1]。2025 年中央一号文件、《加快建设农业强国规划(2024—2035 年)》等政策文件均重点提出,要推动国产农机向高端化、智能化、绿色化方向升级。当前,我国农业机械化率与农机总动力虽逐年上升,但仍存在单一柴油动力主导、手动机械换挡为主、自动化智能化程度低的问题[2-3]。同时,国内针对高端智能动力换挡和液压无级变速拖拉机的研发相对滞后,纯电动拖拉机也因连续重载续航能力不足而难以大规模推广应用。在此背景下,混合动力拖拉机为行业转型升级提供了新的可行路径。

混合动力拖拉机是指采用两种或两种以上动力源共同驱动的机型,其主流路线为基于柴油机和电机的油电混合驱动方式。混合动力拖拉机以电驱辅助和智能控制为突破点,可有效绕开国外在高性能发动机、动力换挡变速箱、精密液压阀件等方面的技术壁垒,“换道”实现无级变速、能量管理、系统线控、无人驾驶等先进功能,可显著提高作业效率与作业质量,并降低作业成本。并且,得益于电动汽车产业相对完备的共性技术优势,能够为整机关键部件提供有效解决方案。目前,我国混合动力拖拉机具备了一定的应用验证基础。江苏、安徽等省份陆续推出系列购置与应用补贴,鼓励将性能稳定可靠的产品逐步推向市场。近年来,涌现出较多关于混合动力拖拉机的新路线、新思路与新方法,但是尚缺少系统性梳理。

因此,本文系统解析混合动力拖拉机领域的技术发展态势,在调研国内外研究成果和产业实践的基础上,详细梳理和总结混合动力拖拉机的设计开发、动力控制、智能化以及性能试验 4 项关键技术的原理、特点以及研究应用现状,并对目前面临问题及未来发展趋势加以分析和展望,以期为我国混合动力拖拉机技术革新提供参考。

1 混合动力拖拉机设计开发技术

混合动力拖拉机设计开发技术是指面向平原大田、丘陵山地、果园茶园等典型作业场景[4],以满足拖拉机作业效率、牵引性能、PTO 输出、空间尺寸等要求为目标,重点围绕整机驱动构型设计、驱动传动部件参数匹配、关键部件专用化开发以及农机具电动化等关键技术开展系统性研究与开发工作。

1.1 整机驱动构型

混合动力拖拉机整机驱动构型的研究分为 3 个阶段:概念引入、适应性验证和产业化落地。21 世纪初,为解决传统柴油拖拉机能耗大、排放严重的问题,受道路车辆发展启发,国内外开始尝试将混动技术应用于拖拉机,该阶段以驱动构型的可行性验证为主[5-6]。2015 年前后,随着动力电池、电机等核心部件性能提升,研究重点从可行性转向场景适配性,形成了一系列满足不同作业场景需求的差异化整机构型技术路线。例如,文献[7-10]从成本、节能效果、结构紧凑等角度,探讨了串联、并联驱动构型在果园和家庭农场的适用性。近年来,混动拖拉机构型研究进入产业化落地前的实车测试阶段,行业聚焦实际作业场景和用户作业需求,开展多轮整机性能优化与试验验证,加快混动技术从原型样机至产品落地应用的转换[11]。

根据发动机、发电机与电动机的联合工作方式,混合动力拖拉机的驱动构型方案分串联式、并联式和混联式 3 类。

1.1.1 串联式混合动力拖拉机

串联式混合动力拖拉机是指发动机与整机牵引动力解耦,全部的牵引动力由电动机提供,发动机、发电机和动力电池作为能源系统为电动机供能的机型。PTO 动力既可由发动机提供,也可由电动机独立提供。目前,根据动力电池容量差异与动力系统工作方式的不同,串联式混合动力拖拉机可分为增程型和一般型 2 类。

增程型混合动力拖拉机以动力电池为主能源,增程器为辅助能源。整机通常采用纯电驱动模式;当 SOC 低于设定值时,增程器启动,既为动力电池补电,又为电动机供能。相关学者将该构型拓扑出多种传动方案,主要包括单电机提供整机驱动力和 PTO 动力[12]、轮边电机提供整机驱动力与独立电机提供 PTO 动力等多种形式[13]。其中,四轮边电机驱动增程式构型如图 1 所示。增程型混合动力拖拉机可解决单一电池能源难以满足大功率拖拉机长时间作业的问题,是当前电池储能技术无法满足纯电

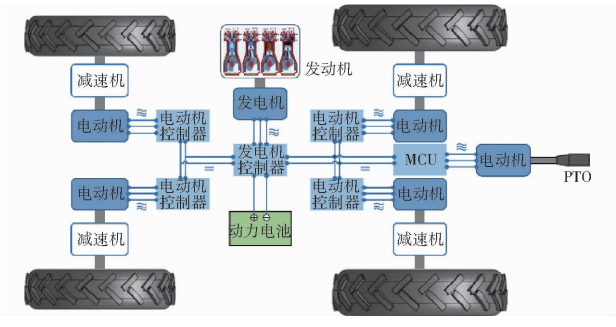


图 1 增程式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 1 Schematic of range extended hybrid tractor configuration

动拖拉机长时作业需求背景下典型的混动拖拉机构型方案，在实现整机连续长时作业时动力电池容量可下降 60% 以上[14]。

一般串联型混合动力拖拉机以发动机-发电机组为主能源，动力电池为辅助能源，其设计思路是发电功率和作业负载功率相对平衡，局部负载变化引起的电能需求依靠动力电池及时补电或放电来缓冲。其驱动构型方案如图 2 所示。一般串联型系统的部件组成与增程式系统相同，技术特征差异体现在：在能源部分，整机通常配置高放电倍率、小容量的动力电池；在动力部分，牵引动力由电动机提供，PTO 一般由发动机机械传动直驱，发动机与作业负载未完全解耦。此外，由于发动机-发电机组产生的电能足够驱动拖拉机完成农业生产作业，整机可不配置动力电池。例如，白俄罗斯 Minsk 拖拉机厂在 2009 年推出的 Belarus－3023 拖拉机、瑞士 Rigitrac Traktorenbau AG 公司在 2011 年推出的 Rigitrac EWD120 拖拉机以及德国 Fendt 公司在 2019 年推出的 X concept series 拖拉机[15－16]。

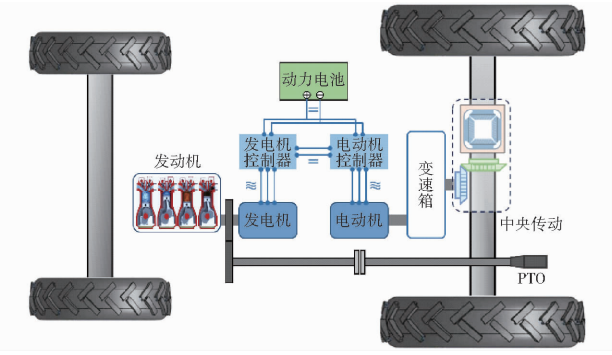


图 2　一般串联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 2　Schematic of general serial hybrid tractor configuration

因此，串联式混合动力拖拉机优势可归纳为：简化了传动系统的复杂度，分布式驱动构型更是取消了桥式结构；发动机与作业负载解耦，可长期工作在高效区，提升整机能量利用率；整机电驱化，提升精准作业能力。其缺点为：发动机能量二次转换效率损失严重，重载工况下整机输出功率受限；动力系统体积、质量偏大，成本高。

1.1.2　并联式混合动力拖拉机

并联式混合动力拖拉机是指通过动力耦合装置并行连接发动机和电动机，双动力源的机械动力耦合后共同驱动车轮或 PTO。该驱动构型技术特点为：至少配置一个储能装置（锂电池、超级电容等），为电动机供电；配备动力耦合装置以实现发动机和电动机的机械动力耦合或分离；拖拉机起步、轻载作业时电动机单独驱动整机行走，中、高负载作业时电动机负责调优发动机的工作区间；在少数特定工况下拖拉机制动减速时可实现能量回收，例如南方相对碎片化小水田的旋耕打浆作业。

目前，混动拖拉机并联式驱动构型可分为转矩耦合型、转速耦合型和牵引力耦合型 3 类，均可实现发动机单独驱动、电动机单独驱动和双动力源耦合驱动 3 种驱动模式。

混动拖拉机转矩耦合方案如图 3 所示。该方案通常将离合器作为动力耦合装置，在保证离合器两侧输入转速相等时，叠加发动机和电动机的输出转矩[17]。凭借电动机峰值转矩储备优势和转矩快速调节特性，整机可输出强劲、高频响动力，适用于负载频繁变化的作业场景。

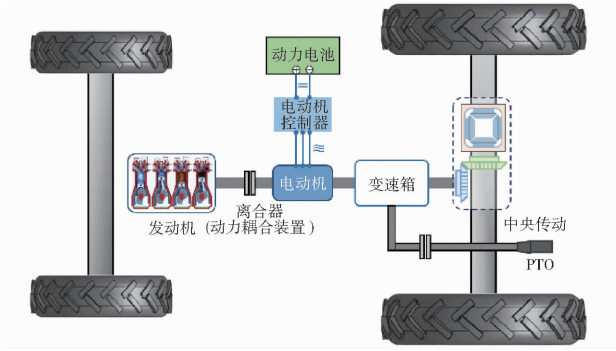


图 3　转矩耦合并联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 3　Schematic of torque coupled parallel hybrid tractor configuration

混动拖拉机转速耦合方案如图 4 所示。该方案将行星齿轮机构作为动力耦合装置，通过调节电动机的输出转速，既可调优发动机的运行转速以降低油耗，又可实现整机无级变速作业，适用于播种、移栽等对作业速度精度要求较高的工况[18]。

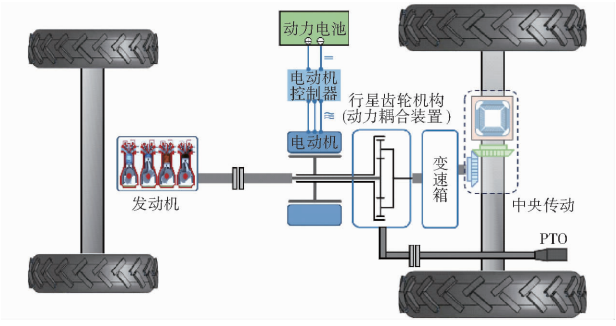


图 4　转速耦合并联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 4　Schematic of speed coupled parallel hybrid tractor configuration

混动拖拉机牵引力耦合方案是一种新型并联式构型，如图 5 所示。该方案兼具分布式驱动和混合动力驱动双重特点。不同于传统分动箱式机械四驱，其前桥和后桥由发动机或电动机分布式驱动，桥间动力通过驱动轮与地面的相互作用实现耦合，适用于地势起伏大、附着率低的作业场景[19]。

综上所述，并联式混合动力拖拉机的优势为：发

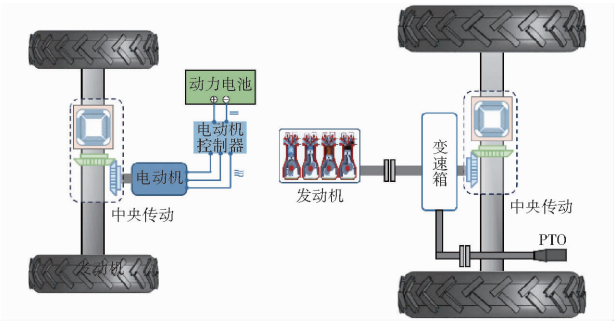


图 5 牵引力耦合并联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 5 Schematic of traction-coupled hybrid tractor configuration

动机功率减小,且在高效区的工作时长占比提升,能效水平提高;依托电动机高频响、易调控的优势,整机负载动态响应能力提升;简化了传动系统的复杂度。但也存在一定缺点:需要大容量电池,研制成本高;控制系统复杂度高。

1.1.3 混联式混合动力拖拉机

混联式混合动力拖拉机兼具串联和并联构型的优势,可最大限度提高整机的作业效率和能效水平。其技术特点包括:需配置 1 台发动机、1 台发电机以及 1 台电动机,其中发电机可在发动机启动阶段切换为电动机模式运行;可根据作业工况灵活切换至纯电、串联、并联及串-并联等多种工作模式。目前,混联式驱动构型包括串并联型和功率分流型 2 类。图 6、7 分别为功率分流型拖拉机和串并联型拖拉机的驱动构型方案,其分别以转矩耦合型、转速耦合型构型为基础,通过增设一套与发动机机械连接的发电机系统,使整机具备串联模式工作能力。

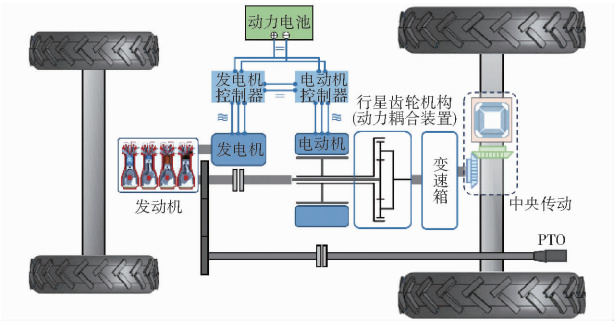


图 6 功率分流混联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 6 Schematic of power split hybrid tractor configuration

针对功率分流型构型,张凯等[20]为解决功率循环导致动力系统分流效率下降的问题,基于杠杆拓扑法优化设计了一种功率分流型驱动构型,可实现动力系统多模式平稳运转,犁耕和旋耕工况下的油耗分别降低 5.45% 和 5.38%。王智海[21]通过分析动力系统分流特性,设计了一种基于复合齿轮的复合分流式功率分流驱动构型,并明确了动力系统在不同运行状态下的功率分布特点。针对串并联型构型,窦海石等[22]设计了一种双流耦合串并联型拖拉机,可实现纯电、混合驱动、PTO 分流与 PTO 耦合 4 种驱动模式,整机动力性指标值高于参考值,且油耗降低了 7.2%。因此,通过科学合理的控制策略,可使混联式混合动力拖拉机的动力性和经济性达到更高水平。但是,该机型也存在工作模式多、电力系统复杂、成本高等问题,需要更复杂且精确的控制系统,开发难度较高。

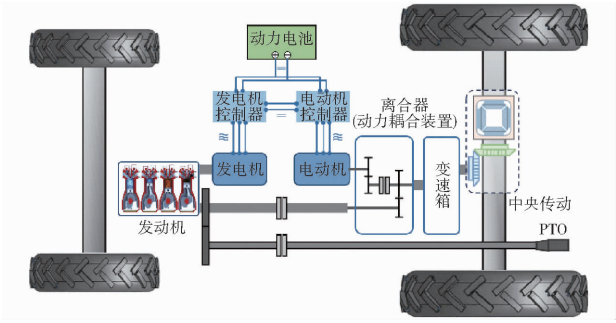


图 7 串并联混联式混合动力拖拉机构型示意图

Fig. 7 Schematic of series-parallel hybrid tractor configuration

由表 1 的对比可知,各类混合动力拖拉机驱动构型的优点与缺点并存,在实际应用中需根据具体作业工况与性能需求进行选择。

图 8 展示了国内外典型的混合动力拖拉机产品。分析可知,在产业发展方面,国外研发起步早,并且面向规模化、智能化、精准化作业的需求,结合本地农业生产特点,不断迭代新兴技术应用样机、升级智能控制技术,主推驱动构型类型全、功率覆盖范围大、场景应用广的产品,并多次获国际创新奖项。相比之下,国内混合动力拖拉机虽研发起步晚,但发展迅速、成效显著,目前已经初步形成面向大田作业场景、以串联式和混联式为主的技术体系和产品系列。

1.2 动力系统参数设计

混合动力拖拉机系统参数设计是指基于拖拉机的驱动构型、功率要求和作业特性,精确匹配动力系统核心部件的物理参数与性能指标,以满足整机空间尺寸、作业续航、动力性、经济性等要求。目前,混合动力拖拉机动力系统参数设计研究包括混合度设计和参数匹配与优化 2 部分。

1.2.1 混合度设计

混合度是衡量混合动力系统电动力与发动机动力比例的关键指标,表征电动部分在整机作业时的参与程度,其量化参数称为混合度因子(Hybridization factor,HF)。

混合度因子最早出现在道路车辆领域,BOLVASHENKOV 等[23]采用电动机额定功率与发动机额定功率的比值来量化电动汽车的混合度。但是,该方法一方面无法建立明确的车辆混合度等级;

表 1　混合动力拖拉机构型与特点对比

Tab. 1　Configuration and characteristics comparison of hybrid tractors

驱动构型		构型特点	典型产品	国家及推出时间	优点	缺点
串联式	增程型	发动机与牵引负载和 PTO 负载解耦 动力电池容量大，整机一般为纯电驱动模式 动力电池为主能源、增程器为辅能源	未见相关产品报道，文献[12－14]对该构型开展了研究		无级变速作业；发动机与作业负载解耦；传动系统复杂度降低	能量二次转换效率损失，动力系统体积质量偏大
	一般型	发动机与牵引负载解耦，PTO 可选独立驱动 动力电池容量小，用于作业功率削峰填谷 发动机-发电机组为主能源、动力电池为辅能源	Fendt X concept series	德国（2019）		
			东方红 HB2204	中国（2022）		
并联式	转矩耦合型	一般选用离合器为动力耦合装置 整机转矩响应迅速，适用于高幅时变负载场景	Antonio Carraro SRX Hybrid	意大利（2018）	无级变速作业；发动机功率需求降低，能够长时运行在高效区；负载动态响应能力良好；传动系统复杂度降低	依赖大容量电池，研制成本高；控制系统复杂度较高
	转速耦合型	一般选用行星齿轮机构为动力耦合装置 通过调节电动机，调优发动机的运行区间 整机无级变速传动，且作业速度控制精度高	未见相关产品报道，文献[18]对该构型开展了研究			
	牵引力耦合型	依靠驱动轮与土壤互作实现动力耦合 前后桥分布式驱动，适用于复杂地势作业场景	Landini Rex 4 Electra	意大利（2020）		
混联式	串并联型	基于转矩耦合型系统增设一套发电系统	未见相关产品报道，文献[22]对该构型开展了研究		无级变速作业；可实现串联/并联/混联等驱动模式，最大限度提高整机能效水平	电力系统复杂；整机研制成本高；控制系统开发难度较大
	功率分流型	基于转速耦合型系统增设一套发电系统	John Deere 8R 410 Hybrid	美国（2019）		
			山东临工 T3204－7E	中国（2024）		



(a) 白俄罗斯MinskBelarus-3023拖拉机（串联-无储能装置，2009年）　(b) 德国Fendt公司X concept series拖拉机（串联-无储能装置，2019年）　(c) 洛阳一拖东方红HB2204型拖拉机（一般串联型，2022年）

(d) 广西柳工LT3504-CE型拖拉机（一般串联型，2023年）　(e) 意大利Antonio Carraro SRX Hybrid（并联-转矩耦合型，2018年）　(f) 意大利Landini Rex4 Electra型拖拉机（并联-牵引力耦合型，2020年）

(g) 美国John Deere 8R 410 Hybrid（混联-功率分流型，2024年）　(h) 山东临工T3204-7E 型拖拉机（混联-功率分流型，2024年）　(i) 新疆华戎HGC3804型拖拉机（混联-功率分流型，2024年）

图 8　混合动力拖拉机相关产品

Fig. 8　Hybrid tractor related products

另一方面，串联式混合动力车辆的牵引功率完全由电动机提供，该方法将其等同于纯电动车辆，与实际情况矛盾。SOMÁ[24]改进了该量化方法，新的 HF 定义公式为

$$H = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{CM}} \tag{1}$$

式中 P_{EM}——电动机额定功率,kW

P_{CM}——发动机额定功率,kW

H 的取值范围为 0 ~ 1,0 表示纯燃油驱动,1 表示纯电驱动。同时该研究将混合度分为 3 个等级:全混合动力($0.5 < H < 0.7$)、轻度混合动力($0.25 < H < 0.5$)、微混合动力($0 < H < 0.1$)。

与道路车辆不同,混合动力拖拉机混合度计算需兼顾整机驱动和 PTO 动力输出,并且不同的整机工作模式下提供动力的动力源与其参与程度不尽相同。因此,SOMÁ 等[25]通过引入动态权重系数 k,以精确表征整机实际作业时的动力分配情况,HF 的定义式改进为

$$HF_{WM} = kHF_{Drive} + (1 - k)HF_{Load} \tag{2}$$

式中,HF_{Drive}为采用式(1)计算的牵引行驶部分的混合度因子;HF_{Load}为采用式(1)计算得出的 PTO 部分的混合度因子;k 为 0 ~ 1 之间的系数,其值根据特定工作循环中牵引行驶功率占总输出功率的比例动态调整,在无工作循环信息时一般假设为 0.5。

式(2)虽然考虑了拖拉机的工作特性,但是未考虑对整机电动化水平影响较大的动力电池、发电机等部件关键参数。为了进一步精确描述混合动力拖拉机的混合度,MOCERA 等[26]提出了改进版的 HF 定义公式

$$HF^{*}_{WM} = kHF^{*}_{Drive} + (1 - k)HF^{*}_{Load} \tag{3}$$

其中

$$HF^{*}_{Drive} = HF^{*}_{Load} = \left[\frac{P_{EM,\mathrm{net}}P_{BP}}{(P_{EM,\mathrm{net}} + P_{CM,\mathrm{net}})(P_{BP} + P_{eg})}\right]^{1 - \frac{\eta_{EL}C_{BP}}{\eta_{EL}C_{BP} + \eta_{ICE}C_{ICE}}} \tag{4}$$

式中 HF^{*}_{Drive}、HF^{*}_{Load}——新定义的牵引行驶部分的混合度因子

$P_{EM,\mathrm{net}}$、$P_{CM,\mathrm{net}}$——电动机和发动机传动至半轴和 PTO 轴的功率,kW

P_{BP}——动力电池输出的额定功率,kW

P_{eg}——发电机额定功率,kW

C_{BP}——动力电池容量,kW·h

C_{ICE}——燃油箱能量,kW·h

η_{EL}——电路平均效率

η_{ICE}——发动机平均效率

在混合度应用方面,魏明亮等[27]对 P2 架构并联式混动拖拉机的研究表明,混合度与电动机额定功率和动力电池总容量参数呈正相关。ZHU 等[28]运用式(1)的混合度计算方法,结合运输、播种等低负荷作业数据,设计了 25% 混合度的机电液复合混联式混合动力拖拉机动力系统。仝一锟[29]将混合动力拖拉机分为弱混、轻混、中混和强混 4 类,通过合理设计混合度及部件功率,开发了一种高效并联式动力系统。

1.2.2 参数匹配与优化

参数匹配与优化是混合度目标落地的具体手段,通过量化整机作业性能需求,优化确定动力系统关键部件的设计参数。相关学者主要围绕参数匹配与参数优化两方面开展研究。

(1)关键部件参数匹配

关键部件参数匹配是指通过合理匹配发动机、电机、动力电池等部件功能参数,保障整机牵引性能、PTO 性能以及经济性能等要求。

目前,参数匹配方法主要有两种:①基于传统拖拉机性能指标与评价体系的方法。例如,徐立友等[30]以东方红 1804 型拖拉机的牵引性能为参考,匹配设计了串联混合动力驱动系的电动机功率、发动机/发电机功率与挡位数,降低了 2.64% 的平均等效燃油消耗。刘亚楠等[31]与邓晓亭等[18]提出了涵盖牵引性能、爬坡度、平均电耗等动力性与经济性的评价指标,设计了混合动力系统的主要零部件参数,实现最高节能 24% 的效益。该方法具有设计流程成熟、目标明确且易于验证的优势,但是存在对混合动力系统多动力源耦合、动态工作点优化等新特性考量不足的问题。②基于实测作业负载数据的方法。例如,MOCERA 等[32]基于碎木、喷雾与耙地作业的实测负载确定了动力源功率范围,并结合作业负载特性,匹配了发动机、电机及电池组参数,可节省 49% ~63% 的燃油。该方法从作业需求出发,能够实现部件参数与真实工况高度匹配,但整机不同作业环节的通用性受限。

(2)关键部件参数优化

关键部件参数优化是指从设定的整机目标性能出发,在可行范围内寻找最优的部件参数组合的计算过程。ESTEVEZ 等[33]基于果园作业场景,提出了一种双循环优化设计架构,外循环采用穷举搜索算法,筛选发动机/发电机功率及传动比等参数的可行组合,内循环为能量控制策略优化,所提方法较传统方案的全生命周期成本和 CO_2 排放量分别降低了 9% 和 20%。WEN 等[34]提出了一种基于粒子群与动态规划算法的双层协同优化方法,以优化双电机动力耦合驱动系统参数,参数优化后整机在犁耕、旋耕与道路运输作业时耗电量分别减少 23.76%、9.15% 和 13.98%。李贤哲等[35]以驱动系统能量损失最小为优化目标,提出了一种基于多岛遗传算法的轮边驱动传动比优化方法,平均犁耕效率提高 0.38%,能耗降低 7.53%。

上述方法多以整机能耗和部件成本最小化为优

化目标，缺少对整机及部件空间约束的考量，给整机紧凑化布局与环境适用性带来了挑战，部分学者针对这一问题开展研究。文献[36－37]结合果园、葡萄园空间狭窄特点，设计了小型化柴油机和电动机并联的驱动构型方案，提出了一种考虑等效转矩的电机额定转矩设计方法，将电动机堆叠长度由 243.75 mm 减至 65 mm。周润东等[38]为减小串联式混合动力分动箱的体积，在满足其结构、强度、刚度的约束下，建立了总中心距和齿轮总体积最小化的目标函数，优化后的齿轮总体积减小了 2.9%。

1.3　关键部件专用化

混合动力拖拉机的关键部件包括电机、储能装置、发动机等，其专用化是指紧密结合农业作业载荷高幅值易瞬变、环境复杂多变、功能需求多元等特点，进行针对性开发。

1.3.1　电机

电机是混合动力拖拉机动力系统的核心驱动和发电单元，其性能直接影响整机可靠性、作业效率和作业质量。

目前，混合动力拖拉机常用电机的类型以交流感应、永磁同步、开关磁阻为主。交流感应电机成本低、维护便捷且可靠耐用，短时过载转矩可达额定值的 3 倍，适用于连续重载作业工况。但是，其在高功率运行区间的功率因数较低，为保证整机能量利用率，需选择功率和体积更大的产品，不适用于成本和空间敏感型的拖拉机。永磁同步电机具有体积小、重量轻、噪声低、转矩脉动小、低速大转矩以及运行效率高等优势，并且得益于价格低的优势，成为当前混合动力拖拉机主流应用产品。但是永磁体性能受温度影响较大，使用过程中的退磁现象也会导致作业效率和可靠性下降。开关磁阻电机是一种新型的交流调速电机，与永磁同步电机相比，其在高速时具有更高的转矩和效率，且价格低、可靠性高，但是低速时存在效率偏低、高振动和高转矩脉动问题，需要更复杂的控制算法来解决。

混合动力拖拉机适用电机的机械结构需满足：能承受高频随机振动；重量、尺寸和体积小；适配发动机和变速箱的物理接口；低噪声运转。技术性能需实现：低速大扭矩动力输出；宽转速范围调速；高运行效率；快速动力响应；高效散热；高防护等级，适应农田多尘、潮湿的环境。为实现上述性能要求，研究人员从结构优化和控制优化两方面开展了电机技术在拖拉机领域应用研究。

（1）电机结构优化

结构优化是指通过改变气隙宽度、槽口宽度、冷却水道结构等电机结构参数，以提升电机转矩密度、运行效率等性能。

陈高丽[39]为降低拖拉机驱动电机的热损失并提高驱动效率，提出了一种基于改进非支配排序遗传算法的无刷直流电机多目标优化设计方法，驱动系统总效率的最大值和额定值分别提高了 2% 和 1.4%。刘田奇等[40]针对现有拖拉机驱动电机的温升过高问题，优化了电机的螺旋水道冷却结构，并设置了 60°偏转角的涡流发生器，提高了电机的流体换热率，同等条件下最高温度降低 1.5℃。张凯[41]基于园艺拖拉机的作业工况与牵引工况特点，提出了一种具有高功率/转矩密度、高效率等潜在性能优势的内置式永磁电机结构，并研究了基于多工况多目标的电机优化设计方法，功率密度 4.2 kW/kg，较通用电机提高 15% ~20%。

（2）电机控制优化

控制优化是指通过改进电机的控制架构与控制策略，提升电机动态响应、能效、稳定性及作业环境适应性等性能。

杜怿等[42]提出了基于自抗扰控制和跟踪微分器的双凸极变极永磁电机变极策略，在实现电机平滑变极的同时，可同步匹配拖拉机田间作业和转场运输的高效运行行驶速度需求，变极过程转矩波动可下降 11.8%。吴雨泽等[43]针对用作 PTO 电机的变漏磁永磁电机，提出了一种复杂扰动补偿控制策略，作业参数变化和负载突变时，转速震荡平均下降 60.0%，调节时间减少 13.4%。张凯等[44]针对农机重载工况下永磁电机机械式转子传感器可靠性差的问题，提出了一种基于模糊滑模观测器和模糊锁相环的无传感器电机控制方法，提高了转速和转子位置的估计精度，比无模糊控制器时的转速误差振幅减少 27.2%。WANG 等[45]提出了一种永磁同步电机温度补偿矢量控制策略，可降低拖拉机犁耕作业时的速度和滑移率平均相对误差，整机牵引效率提高了 23.33%。

在产业层面，电机的设计制造技术取得了一定突破。轴向磁通电机突破传统径向结构设计的限制，轴向空间缩短 50%，适配拖拉机紧凑布局需求。在同等功率要求下，其质量可减轻 50%，高效区面积超 90%，转矩密度和功率密度提升，目前成功应用于部分高端产品，一定程度优化了动力系统性能。然而，目前多数混合动力拖拉机产品仍采用市场通用的电动机和发电机产品，专用电机产品仍较为缺乏。

1.3.2　储能装置

储能装置是混合动力拖拉机的核心能源部件，起整机电能存储、功率调节和能效提升的作用，主要

包括锂电池、超级电容和燃料电池等[46]，不同装置的工作特性如表 2 所示。

表 2 常见储能装置的工作特性

Tab. 2 Working characteristics of common energy storage devices

参数	三元锂电池	磷酸铁锂电池	超级电容	燃料电池
功率密度/(W·kg^{-1})	3 000	2 000	10^5	2 000
能量密度/(W·h·kg^{-1})	250	160	9	800
循环次数	3 000	5 000	10^6	7 000
工作温度/℃	-20 ~ 60	-20 ~ 60	-40 ~ 70	-20 ~ 80

锂电池具备均衡的比能量和比功率优势。是目前混合动力拖拉机储能装置的首选方案。但是，其存在 3 方面缺点：可靠性不足且安全隐患大，拖拉机作业时振动、灰尘与温差较大，对电池系统的安全性要求较高，一旦热失控起火，会造成设备损毁、农田火灾甚至威胁农民生命安全；能量密度提升受限，电池组的质量和体积偏大，给整机设计布局带来较大的挑战；寿命较短，长时高功率输出加速了电池容量衰退速率。

因此，为缓解上述问题，相关学者从动力电池设计与控制、组合电源系统两方面展开研究。在动力电池设计与控制方面，王旭等[47]通过考虑电池组 SOC、温度与单体压差对电池使用寿命的影响，优化了功率跟随控制策略，最终混合动力拖拉机电池容量衰退缓减率降低了 14% ~25%。薛占坡等[48-50]面向实际应用，针对某款混合动力拖拉机的能源系统，围绕整机功能、能量管理、电气安全和结构可靠性，设计了三元锂电池总成，研发了高压配电系统及低温冷启动控制方法。

在组合电源系统方面，李万敏等[51]结合超级电容比功率大、工作温度范围宽等优势，提出了一种基于超级电容和蓄电池组合的混合动力拖拉机储能系统，用于解决频繁瞬时峰值大电流充放电引起蓄电池低效及寿命缩减的问题。GORJIAN 等[52]解析太阳能电池系统可用于混合动力拖拉机，通过适配光伏模块、与电池系统协同储能及功率输出，燃油消耗降低 15% ~20%。

综上，通过优化电芯材料、电池包结构和控制策略，可提高锂电池在混合动力拖拉机上的应用性能。未来，固态电池的快速发展将为整机性能提升提供新的可能。

1.3.3 混动专用发动机

混动专用发动机是伴随混合动力技术发展催生的新技术。在农机领域，该技术又称窄域高效发动机，是专为农机混合动力系统优化设计的动力装置。其技术核心是突破传统发动机作为整机唯一动力源的设计局限，一方面改进发动机结构，另一方面通过发动机与电机协同控制，规避发动机的低效工况，重点提升目标转速和负荷区间的热效率，助力实现动力系统整体能效提升。

目前，在农机领域尚未见关于混动专用发动机的公开研究文献，但已有相关企业成功推出了自主研发的混动专用发动机产品。如图 9 所示，2020 年意大利菲亚特动力科技公司在 Conexpo 上推出搭载电子飞轮的 FPT F28 混合动力发动机，适用于农业机械。其结构紧凑化设计，通过与电动机协同工作，可额外提供 20 kW 的持续功率，兼顾高动力与低油耗。广西玉柴公司研发的拖拉机增程器用 YCK16 发动机，采用飞轮集成式电机方案，具备结构紧凑、体积小、重量轻、发电效率高等特点，最高发电效率达 4.43 kW·h/L。2024 年，东风康明斯公司面向混合动力农机领域，推出了 4 款发动机产品：B3.9、B5.9、B6.7 及 QSM15。该系列产品针对农机作业中的颠簸工况、高散热需求等进行了优化升级，排量覆盖 3.9 ~15 L，功率覆盖 97 ~563 kW。



图 9 FPT F28 混合动力发动机

Fig. 9 FPT F28 hybrid engine

1.3.4 其他部件

除上述部件外，行业也在积极研发专用变速箱、智能控制器等部件。例如，2024 年，浙江海天推出 E-CVT2604 混合动力拖拉机无级变速箱，可适配 190 ~220 kW(260 ~300 马力)拖拉机。为充分发挥 DV3504 混合动力拖拉机搭载的 MIDD 混动系统性能，中联重科开发了 0 ~40 km/h 区间无级变速箱[53]。广西柳工构建了动力域集中控制架构，并应用于 LT3504-CE 机型，实现了柴油机与电动机的智能协同[54]。LUO 等[55]针对现有电动拖拉机依赖分布式微控制器或 PLC，存在的通信冗余、计算性能弱等问题，开发了集成式高性能控制器及配套的分层实时操作系统，复杂协同方程求解时间平均 46 ms、协同任务通信延迟低至 83 μs，相关共性技术为混合动力拖拉机控制器的设计提供了参考。

部件专用化开发，通过针对性的性能优化与功能适配，为充分发挥混合动力系统及整机性能提供了重要支撑，未来会持续成为产品升级研究的重点。

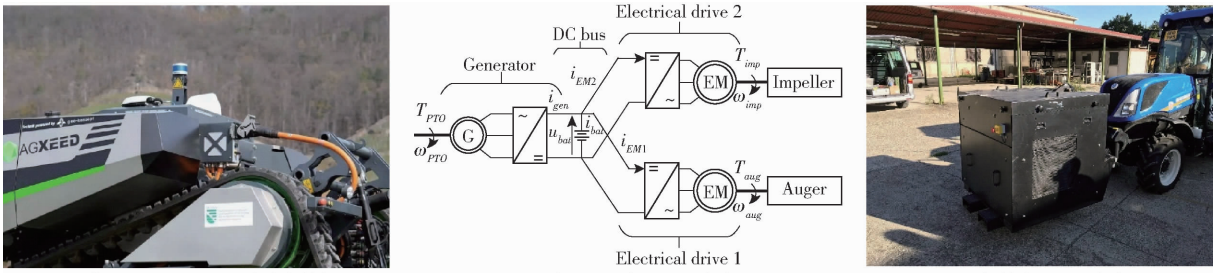
1.4　农机具电动化

农机具电动化是指依托混合动力拖拉机“电力平台”的功能，利用电力驱动替代传统机械 PTO 或液压动力输出，实现机具各项作业功能的技术。该技术凭借便捷、低噪声、高效率等优势，已成为电动农业装备的重要发展方向[56]。

电动农机具的电气系统包括通信控制系统、电力供应系统 2 个模块。通信控制系统一般由传感器、主控器、数据采集控制器、电机控制器等部分组成，基于 CAN 总线、串口等通信方式，实现农机具作业状态监测与控制[57]。农机具的电力供应系统分高压电力和低压电力 2 部分，高压电力一般设计为低于 480 V 的交流电或 800 V 直流电，为高功率电动机供电；低压电力一般为 3 ~48 V 直流电，为小型分布式用电设备供电，如传感器、电子控制单元等。

混合动力拖拉机为电动农机具提供电力的方法包括：①在拖拉机侧设计电力输出接口（Electric power take off，ePTO），将发动机-发电机组和动力电池的电能引至农机具。②为农机具配备发电机，由拖拉机的 PTO 轴驱动发电。③通过拖拉机三点悬挂系统挂接便携式发电机，并利用 PTO 轴驱动发电，再经由电缆将电力输送至农机具。

针对第 1 种方法，2015 年，农业工业电子基金会（AEF）率先推出了拖拉机的 ePTO 功能样机，兼具数据和功率传输功能，可输送 700 V 直流电或 480 V 交流电[58]。2024 年，AEF 的合作公司 HARTING 改进了 ePTO，提升直流电压至 800 V，创新集成了断路、联锁、机载以太网等功能，并应用于 AgBot 5 混合动力拖拉机，如图 10a 所示。近年来，国内也颁布了 ePTO 技术要求团体标准，明确要求直流电压不超过 750 V，直流电流不超过 250 A[59]。针对第 2 种方法，VU 等[60]设计了一种串联式混合动力吹雪拖拉机，作业机具工作原理如图 10b 所示，吹雪机具配置 1 个发电机和 2 个电动机，其中发电机由后置机械 PTO 驱动发电，为驱动叶轮和螺旋钻的 2 个电动机供电，吹雪作业燃油消耗减少 33.4%。针对第 3 种方法，VARANI 等[61]针对传统拖拉机电功率不足以驱动电动农机具的问题，设计了由前 PTO 驱动并安装在前三点悬挂的外部发电机装置，如图 10c 所示，喷雾和除草作业燃油消耗分别降低 33.3% 和 29.8%。



(a) 配备ePTO的AgBot 5混合动力拖拉机　(b) 农机具配备发电机方案　(c) 便携式发电机方案

图 10　农机具电动化方案

Fig. 10　Programme for motorization of agricultural machinery

2　混合动力拖拉机动力控制技术

混合动力拖拉机动力控制技术是指为提高整机能量效率与作业性能，根据作业工况变化和实际作业负载，协同控制动力部件输出功率与动力传动路径的方法。现有混合动力拖拉机动力控制研究以驱动控制和能量管理为主。

2.1　驱动控制

混合动力拖拉机驱动控制是通过协调控制发动机、发电机、电动机及变速器的工作状态，一方面实现整机无级变速作业，另一方面改善整机在复杂作业工况下的作业性能。

2.1.1　无级变速作业技术

在传统拖拉机中，无级变速传动是指在不改变发动机转速的前提下，通过连续调整传动系统输入轴与输出轴的传动比，实现整机动力不间断调速的技术。在混合动力拖拉机领域，该技术进一步扩展为整机作业速度的平稳连续控制。目前主流技术路线包括集中电驱式无级变速系统、分布电驱式无级变速系统以及电驱机械耦合式无级变速系统 3 种，其技术特点和典型产品如表 3 和图 11 所示。

2.1.2　动力协调控制技术

混合动力拖拉机动力协调控制技术是通过合理匹配发动机、发电机、电动机的输出动力以及变速器的挡位，提升整机动力性、经济性和稳定性的方法。

WANG 等[65]考虑混合动力拖拉机农田地形适应性，提出了一种以作业油耗和牵引效率为优化目标的分布式混合动力拖拉机驱动控制策略，最高牵

表 3 混合动力拖拉机无级变速技术对比

Tab. 3 Comparison of continuously variable transmission technology for hybrid tractors

类型	技术方案特点	优点	缺点	典型产品
集中电驱式无级变速系统	利用电动机宽转速范围无级调速特性,配合智能电控有级换挡装置,实现整机全速度区间无级变速作业	结构简单,传动效率高,易于调控	挡位衔接需精细调校、作业性能依赖单一驱动电机	广西玉柴 IE-POWER[62]
分布电驱式无级变速系统	采用轮边电机搭配减速器或轮毂电机,利用电动机宽转速范围无级调速特性,实现整机全速度区间无级变速作业	驱动轮转速/转矩差异控制,整机空间布局灵活	控制系统复杂、电动机峰值转矩与峰值转速要求高	STEYR Konzept 轮毂电驱系统[63]
电驱机械耦合式无级变速系统	以“发电机-电动机”替代 HMCVT 的“泵-马达”,通过调节电机转速,优化发动机工况并实现无级变速	速度控制精准、可优化发动机工作点、驱动模式切换	系统集成复杂,制造成本高,整机能量二次转换	John Deere eAutoPower[64]



(a) 玉柴IE-POWER集中电驱式无级变速动力系统　(b) STEYR Konzept轮毂电驱无级变速动力系统　(c) John Deere eAutoPower电驱机械耦合式无级变速动力系统

图 11 混合动力拖拉机无级变速系统典型产品

Fig. 11 Typical products of hybrid tractor CVT system

引效率由 80.82% 提升至 87.42%。ZHU 等[66]以混联式混合动力拖拉机纯电模式向转速耦合模式切换过程为研究对象,提出了一种“离合器油压模糊控制 + 电机转矩补偿”策略,冲击由 26.181 m/s^3 降至 7.08 m/s^3,速度偏差降低约 92.6%,模式切换时间由 1.345 s 减至 0.35 s。RADRIZZANI 等[67]针对发动机内置的转速控制器无法满足并联式混合动力拖拉机作业速度控制要求的问题,提出了协调考虑电池 SOC 与速度跟踪精度的等效燃油消耗最小化策略,实现作业速度均方根误差减少 0.68%、燃油节省 14%。窦海石等[68]针对大功率混联式混合动力拖拉机作业时载荷突变导致发动机输出扭矩剧烈波动的问题,基于 Haar 小波分解方法,提出了基于功率预测的发动机和电动机转矩分配策略,发动机的转矩波动减小 35.0%。DERE[69]设计了并联混合动力拖拉机分层控制架构,上层控制器可根据实时作业工况选择与切换驱动模式,下层为可协调控制整机车速、发动机转速以及电机转矩的 3 个 PI 控制器。

综上,混合动力拖拉机驱动控制技术的特点为:①注重采用电动机调优发动机的运行状态,如平抑发动机转矩波动、维持发动机持续高效运行、补偿发动机的动力惯性延迟等。②注重动力源和传动系统联合控制。③侧重从动力传动角度提升作业性能,热管理对整机作业性能的影响尚未得到充分研究。

2.2 能量管理

混合动力拖拉机能量管理策略可分为 3 种,如图 12 所示。第 1 种为基于规则的能量管理策略,根据实验数据、工程经验或专家知识等,人为制定混合动力系统在不同运行状态和作业工况下的功率分配方式和工作模式切换条件,使发动机、发电机和电动机运行在高效区间。第 2 种为基于优化的能量管理策略,以混合动力拖拉机性能最优化为目标,构建关于动力性、经济性、排放水平等指标的成本函数,采用数学分析方法,在动态约束条件下求解最小化成本函数的控制量动作序列。第 3 种为基于工况自适应的能量管理策略,通过实时辨识或预测负载工况和机组运行状态,动态优化目标或关键参数,实现整机能量智能在线控制。

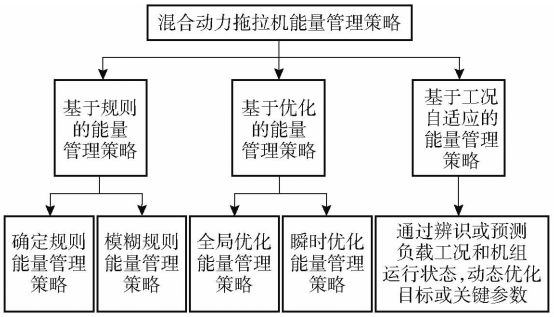


图 12 混合动力拖拉机能量管理策略分类

Fig. 12 Classification of energy management strategies for hybrid tractors

2.2.1 基于规则的能量管理策略

基于规则的能量管理策略可根据规则是否模糊,分为确定规则和模糊规则 2 种。

(1)确定规则能量管理策略

确定规则能量管理策略通常基于发动机万有特性经济区、电机高效驱动区间与电池最佳荷电状态，结合整机作业车速、功率需求和电池 SOC，制定动力源启停与功率分配逻辑。该策略旨在通过预定义的规则，优化各动力源的工作点，提升整机作业经济性。典型控制方法包括恒温器控制策略、功率跟随控制策略等。

早期研究主要关注策略的功能实现。赵心等[70]在产品设计阶段，提出了基于功率需求和电池 SOC 的逻辑门限式能量管理策略，为整机节能提供了基础方案。JIA 等[71]对比了串联混合动力拖拉机中恒温器与功率跟随策略的性能，发现在犁耕作业中，恒温器策略油耗高于 3.57%，但 PM 排放降低 21%。

为进一步提升策略性能，王萌等[72]提出了基于约束比例的功率跟随控制策略，通过动态约束发动机功率并将其限制在高效区运行，使等效油耗较传统功率跟随和恒温器策略分别降低 8.96% 和 14.56%。尹必峰等[73-74]则从发电系统效率出发，制定了基于发电需求的发动机最优工作曲线及切换逻辑，实现综合油耗降低 5.57%。

近期研究趋向系统化与精细化。例如，AI 等[75]依据动力部件响应特性差异，将系统解耦为快慢子系统：慢子系统采用 Artstein 变换处理时滞，快子系统以最小母线电流为目标，通过双层 PI 控制器实时协调转矩分配，在保障作业稳定性的同时降低了电池使用频率与电流波动。为解决经典的确定规则策略缺乏工况适应性的问题，李妍颖等[76]采用非线性规划遗传算法对恒温器策略的关键参数进行优化，取得了油耗降低 29.25% 的显著效果。

综上，确定性规则能量管理策略具有逻辑简单、易于实现、实时性强的优势，是最早应用于混合动力拖拉机的一类控制方法。然而，该策略通常采用固定参数，难以适应拖拉机动态变化的作业工况，导致整机无法持续运行于最优能效区间。

(2)模糊规则能量管理策略

与确定规则策略不同，模糊规则能量管理策略首先将作业车速、功率需求、电池 SOC 等输入参数模糊化处理，并根据经济性目标，构建基于模糊逻辑的控制规则，最终通过推理与解模糊过程实现对动力系统的实时调控。

王春光[77]针对并联式混合动力系统多参数耦合带来的整机能量管理复杂性问题，以需求转矩和电池 SOC 为输入，构建了基于模糊逻辑的发动机与电动机功率分配控制策略，提高了整机动力性和燃油经济性。方树平等[78]则面向串联式混合动力拖拉机，以整机需求功率和电池 SOC 为输入，实现了发动机功率的精确控制，较恒温器和功率跟随策略的燃油经济性分别提高 4.16% 和 8.10%。

针对特定作业场景，QUATTROMINI 等[79]聚焦果园作业工况，开发了以负载功率和 SOC 偏差为输入、电池输出功率为控制量的专用模糊策略。试验结果表明，该策略在不同作业任务中的 SOC 与目标值偏差不超过 ±2%，平均节油率为 1.5%，最优节油率达 4.2%。

现有研究表明，模糊规则能量管理策略在处理混合动力拖拉机多变量、非线性、时变等复杂特性问题方面展现出良好的适应性。但是，该策略的控制效果依赖于隶属度函数和规则集的精度，缺乏最优性。并且随着输入和输出量的增多，规则集的制定也变得更加困难。

2.2.2　基于优化的能量管理策略

基于优化的能量管理策略可根据作业工况信息完整度和优化时间尺度，分为全局优化和瞬时优化 2 类。

(1)全局优化能量管理策略

全局优化能量管理策略是在作业工况信息已知的前提下，将控制问题离散化为多阶段决策问题，再通过动态规划(Dynamic programming，DP)、庞特里亚金最小值原理(Pontryagin minimum principle，PMP)、遗传算法(Genetic algorithm，GA)等算法求解全局最优控制序列。

当前研究主要聚焦于通过算法对比与实验验证来评估不同算法的节能性能表现。缪皓楠等[80]基于 DP 算法，在犁耕工况下较功率跟随策略油耗降低 6.3%。汪珍珍等[81]建立了增程式混合动力拖拉机的 DP 能量管理模型，仿真和台架试验的油耗误差为 1.77%，表明模型具有较高的精度。针对串联式驱动构型，JIA 等[82]对比研究了 DP、PMP 和直接法 3 种策略，结果表明，3 种策略均能有效协调柴油机与电池功率，且较功率跟随策略的燃油经济性提升约 3.08%。针对并联式驱动构型，张俊江等[83]以等效燃油消耗量最小为目标，提出了基于 PMP 的节能控制策略，在旋耕和犁耕作业中分别降低油耗 10.44% 和 11.20%。ZHOU 等[84]同样采用 PMP 算法，聚焦发电机组和电池的能量分配，较恒温器和功率跟随策略的油耗分别降低 32.91% 和 26.10%。针对混联式驱动构型，ZHANG 等[85]以等效燃油消耗最小化为目标，提出了一种基于贝尔曼最小值 DP 算法的能量管理策略，较功率跟随策略的等效节油率提高 26.87%。

综上,混合动力拖拉机的全局优化能量管理策略在作业工况信息已知的前提下,可最大限度地降低整机能耗。但是该策略的应用难点体现在:获知拖拉机全局作业工况信息较难;全局优化策略计算量大、计算时间长,实车在线应用受到限制。

(2)瞬时优化能量管理策略

瞬时优化能量管理策略通常以当前或未来数个单位时间内的燃油消耗最小化为优化目标,在有限计算资源下实现在线优化控制。

相关学者从算法融合、控制结构创新和功能集成等角度,提升系统能效。杨萌等[86]融合猴群优化算法与等效燃油消耗最小策略(Equivalent consumption minimization strategy,ECMS),实现了较传统 ECMS 策略 5% 的节油效果。为解决犁耕作业中牵引阻力时变导致的能耗问题,朱明杰等[87]提出了 ECMS 与动态约束双层优化策略,较固定等效因子的 ECMS 策略可减少 10.47% 的燃油消耗。BARTHEL 等[88]开发了融合优化与启发式方法的能量管理策略,通过整合负载点偏移、再生制动和电池辅助动力功能,并引入 SOC 监控机制,使整机燃油效率提升 4.7%。ZHANG 等[89]以并联式机型等效燃油消耗最小为目标,建立了以电动机和柴油机转矩为控制变量、动力电池 SOC 为状态变量的瞬时优化节能控制策略,旋耕和犁耕工况下燃油消耗分别降低 4.7% 和 6.31%。

瞬时优化能量管理策略可以实现整机能量消耗的局部最优。但是一系列局部最优决策的叠加并不能实现全局最优,并且随着模型精度、控制周期以及代价函数复杂度的提升,计算负荷会显著增加。

2.2.3 基于工况自适应的能量管理策略

近年来,随着人工智能和大数据技术的快速发展,基于工况自适应的能量管理策略成为提升混合动力拖拉机能效的重要研究方向。

VARLESE 等[90]提出了一种基于特征筛选与深度学习的功率预测方法,通过最大相关性准则选取 23 个特征参数,并构建双层长短期记忆网络与 7 层卷积神经网络模型,100 kW 拖拉机在 6 s 内的预测功率均方根误差为 7 kW,60 s 内误差为 9 kW。南祥等[91]采用径向基神经网络预测视界长度需求功率序列,并结合 DP 算法实现能量管理,较规则策略的油耗节省 5.18%。闫祥海等[92]针对整机作业末期电能过剩的问题,通过动态估算剩余作业面积需求能量,并将其与电池剩余电量对比,适时切换至纯电驱动模式,等效燃油消耗下降了 8.78%。朱镇等[93]提出了一种融合拖拉机工况信息预测与 SOC 反馈信息的自适应 ECMS 方法,在犁耕工况中油耗较固定等效因子 ECMS 和仅 SOC 反馈策略分别降低 6.30% 和 2.55%。DOU 等[94]基于径向基神经网络预测未来 30 s 的旋耕功率需求,提出了一种面向燃油和电能消耗最优的 PMP 控制策略,并利用离线 GA 对等效因子进行优化,较传统规则策略的等效燃油消耗降低 8.4%。FENG 等[95]提出了一种融合自适应三次指数负载预测的 PMP 策略,较功率跟随策略的燃油消耗降低 9.42%。

基于工况自适应的能量管理策略可与作业工况实际负载实现合理匹配,其本质是源于对已知工况信息的学习与优化,面对训练数据以外的工况稳定性较低。若要实现更广泛的工况覆盖,数据规模、模型复杂度及算力需求将呈指数级增长。

表 4 针对所提混合动力拖拉机能量管理策略,分别描述了其优点及缺点。

表 4 能量管理控制策略对比分析

Tab.4 Comparative analysis of energy management control strategies

策略类型	优点	缺点
确定规则策略	逻辑简单,易于实现,实时性强,算力要求低	实际作业工况适应性低,无法实现最佳燃油消耗
模糊规则策略	适用于多变量、非线性时变系统,无需精确数学模型	缺乏最优性;输入、输出变量增多时规则设计复杂
全局优化策略	在已知工况下可实现全局最优,能效提升显著	依赖完整先验工况信息;计算量大、耗时长,难以在线应用
瞬时优化策略	在线优化,计算量相对较小,可实现局部最优,实时性强	无法保证全局最优;计算负荷随模型复杂度增加
工况自适应策略	作业工况匹配度高,节能效果显著,适合复杂多变作业环境	依赖训练数据,在未知工况中稳定性差;广泛覆盖工况需大量数据与高算力

3 混合动力拖拉机智能化技术

混合动力拖拉机的智能化技术旨在通过深度融合多源感知、信息融合、智能通信、人工智能决策与自动控制等前沿技术,构建集环境感知与智能监管于一体的综合技术体系。

3.1 环境感知技术

环境感知技术是指利用多源传感器获取作业环境信息。混合动力拖拉机主要用于农业生产的“耕”和“种”环节,其环境感知技术主要用于检测农田地块边界及田间障碍物。

(1)农田边界感知

农田地块的边界感知主要是检测农机所需耕种地的边缘界限,生成起始行、转向点与结束行,为自

主导航系统提供关键空间信息，对混合动力拖拉机自动驾驶作业区域的精确划定具有重要意义。农田边界数据获取方式主要包括基于全球卫星导航系统(Global navigation satellite system，GNSS)高精度定位检测、基于无人机遥感信息检测和基于车载视觉感知检测[96]。近年来，GNSS 的精度和实时性得到了显著提升，已成为农田边界感知的主要手段[97]。基于无人机遥感信息检测和基于车载视觉感知检测由于受复杂地形或光照变化影响，其技术发展仍处于研究阶段。为解决该技术瓶颈，相关学者采取不同改进措施[98]。WU 等[99]基于无人机采集的农田多光谱影像数据，构建深度学习模型并结合 0.5 m 空间分辨率与红边、近红外等敏感波段信息，实现对农田地块的高精度自动提取，分割准确率为 95.9%。张岩等[100]提出融合单目相机与毫米波雷达的田埂检测方法，采用支持向量机对颜色与纹理特征进行判别融合，实现田埂边界像素级分割，分割准确率超 95%。

尽管多模态融合与深度神经网络已在农田边界提取精度与鲁棒性上显示出优势，但在维持高检测精度的前提下，平衡实时性与硬件算力限制依然是该领域亟待突破的核心瓶颈。

(2)障碍物感知

在农田地块边界已被准确感知的前提下，障碍物感知构成混合动力拖拉机自动驾驶安全作业的核心基础。常用感知方法包括视觉感知和多传感器融合感知。

基于视觉的障碍物感知技术是指利用图像采集设备，结合计算机视觉与人工智能算法，实现对图像或视频中障碍物的识别、定位与跟踪。XU 等[101]提出了一种基于全景图像与 Lucas－Kanade 光流算法的动态障碍物识别方法，整体检测准确率为 82.93%。ZHANG 等[102]设计了一套基于双目相机和改进 YOLO v8 模型的障碍物感知系统，能够在 10 m 内实现障碍物的精准感知，且 5 类障碍物的定位精度相对误差为 2.26%。SKOCZEŃ 等[103]提出了基于 RGB－D 相机的障碍物检测与建图系统，将图像信息与深度数据相融合以感知实际障碍物，在多光照真实场景中检测准确率达 95.2%。视觉感知方法为障碍物感知提供了有效手段。但是农田环境中的光照变化、尘土干扰等因素限制了视觉传感器的感知鲁棒性与识别性能。为解决上述问题，研究者尝试采用多传感器融合感知方案。SUVEI 等[104]提出了一种基于激光雷达与立体视觉的先验信息融合方法，试验表明该方法对农田中的障碍物检测 F1 值均高于 0.93。LV 等[105]提出一种基于毫米波雷达与相机信息融合的障碍物检测方法，通过全局最近邻算法进行数据关联，融合输出目标的朝向、速度与类别信息，检测准确率可达 95.19%。YAO 等[106]提出了一种融合激光雷达与相机的多传感器障碍物检测方法，其中视觉模块采用 PPM－Unet 网络实现对低矮小型障碍物的语义分割，有效弥补了激光雷达检测盲区。KRAGH 等[107]提出一种基于条件随机场的多模态障碍物感知方法，融合视觉与激光雷达信息。试验结果表明，相较单一传感器方案，该方法可降低检测误差并提升鲁棒性。

多传感器融合感知方法通过信息冗余和互补，增强了感知系统的可靠性和准确性，但同时存在成本高、长时工作稳定性低等问题。

3.2　智能监管技术

智能监管技术是指利用机载传感器、控制单元和 GNSS 等方式实时获取混合动力拖拉机和农机具的作业信息，借助 4G/5G、卫星通信、无线局域网等通信技术，将信息实时传输至监管平台，实现整机智能监测与管理。目前，智能监管技术可分为机载监管与远程监管两类。

在机载监管方面，马若飞等[108]提出了一种基于数据融合的耕深检测模型，采用自适应迭代扩展卡尔曼滤波算法，有效提高了耕深检测系统的稳定性与精度，均方根误差为 1.08 cm。王宏伟等[109]设计了一种基于 NI C－DAQ 控制器的拖拉机工况参数采集与监测系统，覆盖发动机、车轮/车桥、悬挂系统及机具等子系统，通过多通道信号调理与同步采样实现关键参数的高可靠采集，并通过车载终端实现实时监测与数据管理。李贺等[110]开发拖拉机深松作业关键作业参数远程监测系统，能够对耕作深度、阻力、速度与面积等核心作业参数进行实时采集和远程监测。

在远程监管方面，安麒麟等[111]提出一种基于 TMAInet 模型的农机具工况监测方法，借助 5G 通信模块将监测结果连同时间戳与地理位置等数据实时回传至监管平台，实现作业过程的在线感知与可追溯记录。YIN 等[112]设计了一种基于边缘计算与物联网架构的深松作业智能监控平台，在边缘侧实现关键参数的实时采集与预处理，并通过物联网将数据传至平台，能够实现深松参数自动监测、作业量统计、作业质量与效率评估以及作业过程管理，耕作深度检测误差小于 1.2 cm，深松面积检测误差小于 1%。LUO 等[113]提出了一种拖拉机耕作深度监测方法，并构建拖拉机运行远程监控系统，通过机载终端实时整合耕作深度数据、位置信息、作业速度与作

业状态等关键数据,并借助 4G 无线网络将信息传输至服务平台,实现对拖拉机作业状态的全面监控与远程管理。

对于混合动力拖拉机,有利于实现智能化的原因包括:驱动、制动、转向等系统线控化设计,为实现自动驾驶提供硬件基础;电池可为传感器、控制器、通信模块等部件供应充足稳定电力,避免因发动机怠速或熄火而导致的智能系统断电风险;整机运行产生大量数据,为控制策略训练和优化提供丰富的数据样本,提升整机的自适应作业能力。

表 5 列举了国内外智能混合动力拖拉机产品。可知,国外企业面向无人化、智能化、数据监管化及互联协同化等需求,基于高精度定位导航、多模态感知、边云协同与高速通信等技术,开发了相关智能产品。经过多年发展,国内部分混合动力拖拉机产品已具备自动驾驶、环境感知和远程监管等功能,但仍处于功能叠加型智能阶段,尚不能支撑混合动力拖拉机全程无人化生产作业。

表 5 智能化混合动力拖拉机(机器人)产品

Tab.5 Intelligent hybrid tractor (robot) products

产品	智能化功能
Combined Powers 无人混合动力拖拉机(德国,KRONE 与 KEMKEN)	搭载相机与 LiDAR,能够提供 360°环境感知;具备自动驾驶技术,并配套远程监控与数据记录分析
AgBot T2 混合动力农业机器人(荷兰,AgXeed)	搭载 LiDAR、超声波和雷达传感器,并结合 RTK-GNSS 定位实现 360°环境感知;支持自动驾驶、远程管理、数据储存与分析等功能
Prospr 混合动力农业车辆(新西兰,Robotics Plus)	集成多相机与 LiDAR,能够实现 360°障碍物检测与避让;具备多机协同控制、远程监管功能
8R 系列混合动力拖拉机(美国,John Deere)	具备自动转弯、全局路径规划和自动驾驶功能;支持无线同步作业、地图与设备数据,实现远程可视化与任务管理
DV3504 混合动力拖拉机(中国,中联重科)	配套辅助驾驶系统,支持高精度卫星导航与自动路径规划;装配前后置相机用于监视环境与保障作业安全
LT3504-CE 混合动力拖拉机(中国,广西柳工)	集成自动导航系统,能够实现路径跟踪与直线作业

4 混合动力拖拉机试验验证技术

混合动力拖拉机的试验验证技术是指通过半实物仿真、试验台架以及试验场试验的方法,开展包括传动效率、可靠性、耐久性等方面的性能试验研究,测试对象主要包括工作部件、混合动力总成以及拖拉机整机 3 类。

4.1 工作部件性能试验

当前,混合动力拖拉机的工作部件性能试验主要针对动力系统关键部件和整机工作装置两部分展开。前者包括电机、电池、发动机-发电机组与动力耦合装置;后者包括电液悬挂、动力输出轴和液压动力输出。表 6 归纳了上述部件的主要试验项目及对应试验方法。

表 6 关键部件性能试验

Tab.6 Key component performance test

部件类型	测试部件	主要试验项目	试验方法	文献序号
动力系统关键部件	电机	转速特性、转矩特性、转矩密度、运行效率与永磁体损耗等	磁粉制动器/测功机台架试验	[42,114-115]
	电池	容量衰退率、高压安全性	dSPACE 半实物仿真、电源系统台架试验、田间耕地测试	[47-48]
	发动机-发电机组	电力输出稳定性与动态响应能力	可变负载电阻台架试验	[116]
	动力耦合装置	传动性能、动态响应性能	磁粉制动器台架试验	[117-118]
整机工作装置	电液悬挂	提升力、提升行程与可靠性	三点悬挂电液加载台架试验	[119-121]
	动力输出轴	可靠性与耐久性	拖拉机传动系动态加载试验	[122]
	液压动力输出	液压压力、流量与最大有效液压输出功率	多路液压输出功率试验	[123-124]

分析可知,动力系统关键部件性能试验侧重于效率、动态响应和可靠性等指标,并采用台架、半实物仿真与田间试验结合的方法进行验证;整机工作装置更注重实际作业可靠性与耐久性,一般通过电液加载系统、动态加载试验台等模拟真实工况,以评估其在复杂作业环境下的综合性能。

4.2 动力总成性能试验

动力总成性能试验主要采用台架试验方法,通

过加载装置复现田间作业工况，综合运用动力总成控制、负载模拟、试验数据处理和结果评价 4 项关键技术[125]，测试动力总成在不同模拟负载输入下的综合性能。

文献[126]针对现有混合动力总成试验装置通用性不足、模拟加载精度低、控制策略测试条件复杂且难度大等问题，提出一种混合动力拖拉机综合试验装置与多驱动模式测试方法。汪珍珍等[127]基于测控系统通信模块化和控制策略模块化的设计思想，搭建了串联式混合电动拖拉机快速原型试验平台，并在纯电动和混合动力模式下进行了旋耕作业试验，当旋耕负载转矩变化时，转速变化的最大相对误差约为 2.037%。窦海石等[128]搭建了柴油机和电机双流耦合动力系统试验台，并通过台架试验模拟了拖拉机旋耕与犁耕负载，验证了双流耦合动力系统多功率流输出的可行性。雷意[129]从驾驶员、电源、发动机、轮毂电机、模拟加载以及数据采集 6 个模块出发，设计了串联式混合动力拖拉机的加载试验台，并进行了道路运输、犁耕和突加载荷 3 种典型工况的模拟加载试验。徐立友等[130]针对单一试验系统难以适配电动拖拉机“三电”系统及复杂动力架构的测试需求的问题，采用模块化设计方法，开发了集成能源系统模块和动力系统模块的综合试验系统，测试误差与前期仿真设计误差小于 10%。

综上，现有研究已通过模块化设计、高精度负载模拟和多工况复现等技术，提升了动力总成试验的适用性与测试精度，强化了复杂控制策略的验证能力。

4.3　整机装备性能试验

整机性能试验主要围绕牵引性能、可靠性、疲劳性及耐久性展开，采用的试验方法包括试验台架测试与试验场测试。

如图 13a 所示，林恒矗等[131]利用轮耦合试验台，通过路面信息模拟试验方法，等效模拟了拖拉机试验场颠簸试验。所测数据与真实颠簸试验场景相比，目标测点的加速度最大值偏差小于 0.7 g，座椅三轴加速度的加权均方根偏差为 0.28 g。如图 13b 所示，WEN 等[132]提出一种适用于室内可靠性加载试验台的拖拉机耐久性加速结构试验设计方法，并基于四轮转鼓试验台开展试验，加速系数达到 12.6，损伤相对误差的平均值为 14.56%。如图 13c 所示，贾方等[133]设计了一种基于电驱动系统的农业车辆牵引负荷车，并实现被试车辆牵引性能多参数监测与全面评估；如图 13d 所示，赵静慧等[134-135]针对现有牵引性能预测模型通用性差、预测精度低等问题，提出新型通用牵引性能预测模型，并通过田间牵引试验，验证了最大牵引力、滑转率和滚动阻力的预测有效性。WANG 等[136]开发了一种动态载荷加载平台，可实现 PTO 功率、牵引功率和悬挂提升多项加载试验。以 PTO 测试为例，加载最大延时为 0.8 s，最大超调量为 9.81%，最大误差为 4.78%，载荷谱相关系数为 0.997 0，拟合优度为 18.94 N·m。



(a) 轮耦合试验台　(b) 转鼓试验台　(c) 电驱动牵引负荷车　(d) 田间实地牵引试验

图 13　拖拉机整机级性能试验技术

Fig. 13　Tractor whole machine level performance test technology

综上，当前整机性能试验方法已从传统单一静态加载向动态模拟与多参数综合评估方向发展，通过构建贴近实际工况的试验台架与载荷谱，提升了试验结果的准确性与工程适用性。

5　展望

受益于政策与技术共同激励，混合动力拖拉机历经设计开发、动力控制、智能化及性能试验等关键技术环节的探索攻关，实现了阶段性技术突破。面向未来，随着 5G、人工智能、大数据等新兴技术持续赋能农业现代化，混合动力拖拉机在提升整机作业性能的同时，也将加速从孤立作业装备升级为“智慧农业”体系中的关键智能节点。相关研究主要从以下几方面开展：

(1)基于大数据的整机优化设计技术

在未来农场中，通过采集不同驱动构型的混合动力拖拉机在典型作业场景(如大田、丘陵、果园等)中全环节、多工况下的作业数据，构建覆盖牵引效率、能量消耗、作业质量等多维度的场景-性能大数据体系，为实现驱动构型高效拓扑优化、关键设计参数高效迭代及控制策略参数智能寻优提供重要支撑，从而形成基于海量数据反馈优化的高效闭环设计方法。

(2)热管理与能量管理协同优化控制技术

高效作业，不仅指燃油或电量消耗最优，更是指在有限农时内实现作业质量与作业效率最大化。当前，热管理问题，特别是重载工况下的过热故障停

机,成为制约整机连续可靠作业的关键瓶颈。未来研究需致力于开发智能化的热管理与能量管理协同调控策略,通过引入机器学习和深度学习算法技术,超前预测动态作业载荷特性;同时探索整机多热源耦合系统的热负荷生成机理,构建以热安全为边界、系统能效最优为目标的实时协同控制方法,保障混合动力拖拉机在复杂工况下持续高效作业。

(3)混合动力拖拉机智能作业与监管技术

当前,高分辨率多模态传感器、边云协同感知和深度学习等前沿技术的快速发展,为在复杂农田环境中实现低成本、稳定可靠的感知奠定了基础。未来研究应围绕动态决策控制、多目标优化、强化学习和群体协同等智能方法,提升混合动力拖拉机在非结构化场景中的自主作业能力;同时,构建融合物联网和数字孪生的智能监管平台,实现全生命周期下的作业调度、设备健康管理与远程运维管理,推动混合动力拖拉机向智能化与无人化深度发展。

(4)加快研发与应用混动专用关键部件

关键部件专用化涉及作业工况专用化、安全专用化与结构专用化等多方面,是提升混合动力拖拉机性能的重要支撑。目前,针对电池、电机、发动机、变速箱等部件的专用化研发虽取得一定成效,但仍处于初期阶段,距离实现成熟、可靠且具备成本优势的规模化应用仍有较大差距。因此,亟需加快研制新型高性能专用部件,并融合智能控制与系统协同技术,推动形成标准化、模块化的专用部件技术体系。

(5)混合动力拖拉机专用性能测试装备

混合动力拖拉机在技术架构与性能需求上与传统拖拉机存在根本性差异,其新增了“三电”系统与多动力源、多模式协同工作机制,对性能测试验证环节提出了更高的要求。因此,需要围绕安全性、动力性、经济性以及动力输出性能,构建集动力总成智能控制、负载高频响精准模拟、性能数据实时测量与测试性能智能分析于一体的综合性专用测试装备。

混合动力拖拉机作为拖拉机绿色转型的重要方向,为农业现代化提供了新路径。随着相关政策持续完善与核心技术突破,混合动力拖拉机的规模化应用将显著提升农业生产的经济效益和环境效益,成为推动农业绿色发展与智能化变革的重要力量。

参 考 文 献

[1] 景晨辉,郑宗明,侯宏娟,等. 考虑农机电能替代的生物质耦合太阳能农村能源系统规划[J]. 农业机械学报,2025,56(5):560 – 568.
JING Chenhui, ZHENG Zongming, HOU Hongjuan, et al. Planning of rural energy system integrating biomass and solar energy with electrification of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(5): 560 – 568. (in Chinese)

[2] 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)

[3] WEN C, REN W, ZHU Q, et al. Reducing operation emissions and improving work efficiency using a pure electric wheel drive tractor[J]. Engineering, 2024, 37: 230 – 245.

[4] TRONCON D, ALBERTI L. Case of study of the electrification of a tractor: electric motor performance requirements and design [J]. Energies, 2020, 13(9): 2197.

[5] 史立新, 朱思洪, 聂信天. 基于串联混合动力系统的拖拉机传动参数设计[J]. 江西农业学报, 2010,22(2):115 – 117.
SHI Lixin, ZHU Sihong, NIE Xintian. Design of tractor transmission parameters based on series hybrid power system[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010,22(2):115 – 117. (in Chinese)

[6] SCOLARO E, ALBERTI L, BARATER D. Electric drives for hybrid electric agricultural tractors[C]//2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). IEEE, 2021: 331 – 336.

[7] TRONCON D, ALBERTI L, MATTETTI M. A feasibility study for agriculture tractors electrification: duty cycles simulation and consumption comparison[C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 2019: 1 – 6.

[8] MOCERA F, SOMÁ A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications[J]. Energies, 2020, 13(12): 3055.

[9] VOGT H H, ALBIERO D, SCHMUELLING B. Electric tractor propelled by renewable energy for small-scale family farming[C]// 2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). IEEE, 2018: 1 – 4.

[10] MOCERA F, MARTINI V, SOMÁ A. Comparative analysis of hybrid electric architectures for specialized agricultural tractors [J]. Energies, 2022, 15(5): 1944.

[11] 东方. 东方红 HB2204 型混合动力拖拉机商品化上市[J]. 当代农机, 2023(11):17.

[12] 赵静慧, 徐立友, 刘恩泽, 等. 增程式电动拖拉机驱动系统设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(11):236 – 240.
ZHAO Jinghui, XU Liyou, LIU Enze, et al. Design of drive system for extended-range electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 236 – 240. (in Chinese)

[13] 鲁植雄，侯辛奋，邓晓亭. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计匹配与牵引试验[J]. 南京农业大学学报，2017，40(5)：928－935.
LU Zhixiong，HOU Xinfen，DENG Xiaoting. Matching design and traction tests for driving system of series hybrid electric tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2017，40(5)：928－935.（in Chinese）

[14] 刘孟楠，雷生辉，赵静慧，等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 1)：348－364.
LIU Mengnan，LEI Shenghui，ZHAO Jinghui，et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp. 1)：348－364.（in Chinese）

[15] FLORENTSEV S，IZOSIMOV D，MAKAROV L，et al. Complete traction electric equipment sets of electro-mechanical drive trains for tractors[C]// 2010 IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering（SIBIRCON）. IEEE，2010：611－616.

[16] 晓琳. Agritechnica 2011 创新奖介绍与评析[J]. 农业工程，2012，2(2)：1－12.
XIAO Lin. Introduce and comment of "Agritechnica 2011 Innovation Award[J]. Agricultural Engineering，2012，2(2)：1－12.（in Chinese）

[17] 周志立，倪倩，徐立友. 并联混合动力拖拉机传动系参数设计及性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2016，37(6)：9－15，4－5.
ZHOU Zhili，NI Qian，XU Liyou. Design and performance analysis of parallel hybrid electric tractor transmission parameters[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science)，2016，37(6)：9－15，4－5.(in Chinese)

[18] 邓晓亭，朱思洪，高辉松，等. 混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J]. 农业机械学报，2012，43(8)：24－31，36.
DENG Xiaoting，ZHU Sihong，GAO Huisong，et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2012，43(8)：24－31，36.（in Chinese）

[19] 李金凤，张学敏，宋正河，等. 基于 TRIZ 理论的分布式混合动力拖拉机动力系统设计与验证[J]. 吉林大学学报(工学版)，2025，55(1)：366－381.
LI Jinfeng，ZHANG Xuemin，SONG Zhenghe，et al. Design and experiment of distributed hybrid electric tractor powertrain system based on TRIZ theory[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)，2025，55(1)：366－381.（in Chinese）

[20] 张凯，鲁植雄，王琳，等. 基于杠杆拓扑法的混合动力拖拉机 ECVT 构型设计与节能控制[J]. 农业机械学报，2024，155(12)：505－518，538.
ZHANG Kai，LU Zhixiong，WANG Lin，et al. ECVT configuration design and energy-saving contrpl of hybrid traetor based on lever topology method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，155(12)：505－518，538.（in Chinese）

[21] 王智海. 混联式拖拉机功率分流负载特性的研究[J]. 河北农机，2023(23)：1－3.
WANG Zhihai. Research on power split load characteristics of parallel-series tractor[J]. Hebei Agricultural Machinery，2023(23)：1－3.（in Chinese）

[22] 窦海石，王卓兵，张幽彤. 双流耦合拖拉机设计及动力系统参数校核[J]. 拖拉机与农用运输车，2025，52(3)：26－29.
DOU Haishi，WANG Zhuobing，ZHANG Youtong. Design of dual-stream coupled tractor andverification of power system parameters[J]. Tractor & Farm Transporter，2025，52(3)：26－29.（in Chinese）

[23] BOLVASHENKOV I，HERZOG H G，ENGSTLE A. Factor of hybridization as a design parameter for hybrid vehicles[C]// International Symposium on Power Electronics，Electrical Drives，Automation and Motion. IEEE，2006：926－929.

[24] SOMÁ A. Trends and hybridization factor for heavy-duty working vehicles[M]// Hybrid Electric Vehicles，Rijeka，Croatia：IntechOpen，2017：3－32.

[25] SOMÁ A，BRUZZESE F，MOCERA F，et al. Hybridization factor and performance of hybrid electric telehandler vehicle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2016，52(6)：5130－5138.

[26] MOCERA F，SOMÁ A，MARTELLI S，et al. Trends and future perspective of electrification in agricultural tractor-implement applications[J]. Energies，2023，16(18)：6601.

[27] 魏明亮，席德翔，董东升，等. P2 构架混合动力拖拉机动力系统设计及参数匹配计算研究[J]. 拖拉机与农用运输车，2023，50(5)：39－41，46.
WEI Mingliang，XI Dexiang，DONG Dongsheng，et al. Research on power system design and parameter matching calculation of P2 hybrid tractor[J]. Tractor & Farm Transporter，2023，50(5)：39－41，46.（in Chinese）

[28] ZHU Z，LAI L，SUN X，et al. Design and analysis of a novel mechanic-electronic-hydraulic powertrain system for agriculture tractors[J]. IEEE Access，2021，9：153811－153823.

[29] 仝一锟. 混合动力拖拉机动力系统优化匹配研究[D]. 洛阳：河南科技大学，2023.
TONG Yikun. Research on the optimization and matching of the hybrid tractor power system[D]. Luoyang：Henan University of Science and Technology，2023.（in Chinese）

[30] 徐立友，刘孟楠，周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系设计[J]. 农业工程学报，2014，30(9)：11－18.
XU Liyou，LIU Mengnan，ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor[J]. Transactions of the

CSAE, 2014, 30(9): 11 - 18. (in Chinese)
[31] 刘亚楠, 邓晓亭, 张文瀚, 等. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计理论和方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(2):49 - 54.
LIU Ya'nan, DENG Xiaoting, ZHANG Wenhan, et al. Design theory and method research on tandem hybrid tractor drive system [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018, 56(2): 49 - 54. (in Chinese)
[32] MOCERA F, MARTINI V. Numerical performance investigation of a hybrid eCVT specialized agricultural tractor[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2438.
[33] ESTEVEZ M A P, FRIGOLA J M, LLOBET J A, et al. Optimal design of a series hybrid powertrain for an agricultural tractor [J]. Energy Conversion and Management: X, 2024, 24: 100789.
[34] WEN C, ZHANG S, XIE B, et al. Design and verification innovative approach of dual-motor power coupling drive systems for electric tractors[J]. Energy, 2022, 247: 123538.
[35] 李贤哲, 张明柱, 刘孟楠, 等. 基于多岛遗传算法的电动拖拉机分布式驱动系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3):401 - 411.
LI Xianzhe, ZHANG Mingzhu, LIU Mengnan, et al. Optimized design and validation of distributed drive system for electric tractor based on multi-island genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 401 - 411. (in Chinese)
[36] TRONCON D, ALBERTI L. Case of study of the electrification of a tractor: electric motor performance requirements and design [J]. Energies, 2020, 13(9): 2197.
[37] MOCERA F, SOMÁ A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications[J]. Energies, 2020, 13(12): 3055.
[38] 周润东, 鲁植雄, 邓晓亭, 等. 串联式混合动力拖拉机分动箱的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(1):107 - 112.
ZHOU Rundong, LU Zhixiong, DENG Xiaoting, et al. Design and test of the gearbox in the tandem hybrid power tractor [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences Edition), 2020, 46(1): 107 - 112. (in Chinese)
[39] 陈高丽. 电动拖拉机驱动电机的多目标优化及试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(10):250 - 255.
CHEN Gaoli. Multi-objective optimization and experimental research on drive motor of electric tractor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10):250 - 255. (in Chinese)
[40] 刘田奇, 汪伟, 张擎鸣, 等. 拖拉机驱动电机的冷却水道优化及温度场仿真[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3):175 - 181.
LIU Tianqi, WANG Wei, ZHANG Qingming, et al. Optimization of cooling channels and temperature field simulation for tractor-driven electric motor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025,46(3):175 - 181. (in Chinese)
[41] 张凯. 电动拖拉机内置式永磁驱动电机设计、优化及控制研究[D]. 镇江: 江苏大学,2023.
ZHANG Kai. Research on design, optimization and control of interior permanent magnet driving motor for electric tractor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)
[42] 杜怿, 孙旭, 孙延东, 等. 电动拖拉机 PC - DSPM 电机电子变极策略与分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8):44 - 53.
DU Yi, SUN Xu, SUN Yandong, et al. Electronic pole-changing strategy and analysis for PC - DSPM motor in electric tractors [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8):44 - 53. (in Chinese)
[43] 吴雨泽, 朱孝勇, 张丽, 等. 电动拖拉机 PTO 系统下 VLF - PM 电机复杂扰动补偿控制策略[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23):92 - 103.
WU Yuze, ZHU Xiaoyong, ZHANG Li, et al. Compensation control strategy for complex disturbance in VLF - PM motor of electric tractors with PTO system[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23):92 - 103. (in Chinese)
[44] 张凯, 全力, 晋世博. 电动拖拉机永磁电机模糊滑模无传感器控制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9):431 - 438.
ZHANG Kai, QUAN Li, JIN Shibo. Sensorless control of permanent magnet motor for electric tractor based on fuzzy sliding mode observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9):431 - 438. (in Chinese)
[45] WANG Q, WANG X, WANG W, et al. Plowing drag-adaptive operation control method based on motor temperature compensation for electric tractor[J]. Journal of Terramechanics, 2024, 112: 69 - 79.
[46] SCOLARO E, BELIGOJ M, ESTEVEZ M P, et al. Electrification of agricultural machinery: a review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164520 - 164541.
[47] 王旭, 汪珍珍, 周俊. 计及电池寿命衰减的串联式混合动力拖拉机控制策略研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2023, 38(3):529 - 536.
WANG Xu, WANG Zhenzhen, ZHOU Jun. Study on control strategy of tandem hybrid tractor considering battery life decay [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 38 (3):529 - 536. (in Chinese)
[48] 薛占坡, 赵心, 王炜, 等. 混合动力拖拉机动力电池系统设计[J]. 拖拉机与农用运输车,2023,50(4):50 - 54, 77.
XUE Zhanpo, ZHAO Xin, WANG Wei, et al. Design of a hybrid power tractor battery system [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(4):50 - 54, 77. (in Chinese)
[49] 薛占坡, 刘孟楠, 赵心, 等. 新型混合动力拖拉机高压配电系统设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(6):50 - 52.

XUE Zhanpo, LIU Mengnan, ZHAO Xin, et al. Design of high voltage distribution system for new hybrid power tractor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(6):50 – 52. (in Chinese)

[50] 薛占坡, 赵心, 王伟, 等. 新型混合动力拖拉机启动控制开发[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(5):42 – 46.
XUE Zhanpo, ZHAO Xin, WANG Wei, et al. Low temperature start control design of a new hybrid tractor [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(5):42 – 46. (in Chinese)

[51] 李万敏, 王彦, 朱有地, 等. 基于超级电容和蓄电池组合电源的混合动力拖拉机动力控制系统研究[J]. 农业机械, 2019(1):101 – 106.

[52] GORJIAN S, EBADI H, TROMMSDORFF M, et al. The advent of modern solar-powered electric agricultural machinery: a solution for sustainable farm operations[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126030.

[53] 韩海波. 中联农机“智改数转”迈高端[J]. 农机质量与监督,2025(4):35 – 36,38.

[54] 金娟. 2025 新疆农机博览会观察:混合动力燃爆全场技术创新引领变革[N]. 中国农机化导报, 2025 – 06 – 05(5).

[55] LUO Z, ZHU Q, LIU M, et al. Quality and efficiency of a brain-smart electric tractor unit operation control mechanism: instant information interaction and collaborative task management[J]. Engineering, 2025,52:217 – 228.

[56] 柳琪. 农机电动化要统筹考虑主机与农机具[J]. 农机市场, 2025(6): 16.

[57] RAHE F, RESCH R. Electrification of agricultural machinery from the perspective of an implement manufacturer[R]. SAE Technical Paper, 2017.

[58] MOREDA G P, MUÑOZ-GARCÍA M A, BARREIRO P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery—a review[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 115: 117 – 131.

[59] 中国农业机械学会. 电动拖拉机电动力输出接口:T/NJ 1177—2020[S]. 北京: 中国农业机械学会, 2020.

[60] VU N L, MESSIER P, NGUYỄN B H, et al. Energy-optimization design and management strategy for hybrid electric non-road mobile machinery: a case study of snowblower[J]. Energy, 2023, 284: 129249.

[61] VARANI M, MATTETTI M, MOLARI G. Performance evaluation of electrically driven agricultural implements powered by an external generator[J]. Agronomy, 2021, 11(8): 1447.

[62] 赵玲玲. 玉柴 IE – POWER 电驱系统赋能农机装备加速升级[N]. 中国汽车报,2025 – 03 – 31(028).

[63] 付饶. 聚焦全球农业关注区域发展——Agritechnica 2019 在德国汉诺威举行[J]. 农机市场,2019(11):58 – 60.

[64] 蔚文刚. 能源转型背景下的凯斯纽荷兰动力升级实践与优势[J]. 农机质量与监督, 2025(6):14 – 16.

[65] WANG S, WU X, ZHAO X, et al. An integrated control strategy for reducing equivalent fuel consumption and improving traction efficiency of a distributed hybrid electric tractor considering farmland terrain adaptability[J]. Energy, 2025, 334: 137560.

[66] ZHU Z, SHENG J, ZHANG H, et al. Optimization of mode-switching quality of hybrid tractor equipped with HMCVT[J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 6288.

[67] RADRIZZANI S, PANZANI G, SAVARESI S M. Simultaneous energy management and speed control in a hybrid tractor with experimental validation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2024, 32(4): 1285 – 1297.

[68] 窦海石, 魏洪乾, 艾强, 等. 双流耦合构型混合动力拖拉机旋耕工况控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 393 – 400.
DOU Haishi, WEI Hongqian, AI Qiang, et al. Control strategy for rotary tillage condition of hybrid electric tractor with coupled-split dynamic configuration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):393 – 400. (in Chinese)

[69] DERE B R R. Parallel hybrid electric vehicle powertrain modeling and control for John Deere – 9370 R tractor[D]. University of Illinois Chicago, 2017.

[70] 赵心, 薛占坡, 王炜, 等. 混合动力拖拉机动力电池能量管理系统[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023(6):73 – 76.
ZHAO Xin, XUE Zhanpo, WANG Wei, et al. Design of a hybrid power tractor power battery system [J]. Tractor & Farm Transporter, 2023(6):73 – 76. (in Chinese)

[71] JIA C, QIAO W, QU L. Modeling and control of hybrid electric vehicles: a case study for agricultural tractors[C]// 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). IEEE, 2018: 1 – 6.

[72] 王萌,闫祥海,吴依伟,等. 基于约束比例功率跟随策略的混合动力拖拉机多工况节能优化控制研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2025,6(3):35 – 44.
WANG Meng, YAN Xianghai, WU Yiwei, et al. Research on energy-saving optimization control of multi-working conditions for hybrid electric tractors based on a constrained proportional power-following strategy [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025,6(3):35 – 44. (in Chinese)

[73] 尹必峰. 基于规则的串联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[J]. 农机质量与监督, 2025(6): 10 – 12.
YIN Bifeng. Research on rule-based energy management strategy for series hybrid tractor [J]. Agricultural Machinery Quality & Supervision, 2025(6):10 – 12. (in Chinese)

[74] 尹必峰, 恽龙, 解玄, 等. 串联混合动力拖拉机能量管理及动态协调控制策略[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(5): 250 – 260, 2.
YIN Bifeng, YUN Long, XIE Xuan, et al. Energy management and dynamic coordination control strategy for series hybrid

tractors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(5):250 - 260, 2. (in Chinese)

[75] AI Q, WEI H, ZHAI Y, et al. An integrated control strategy of parallel-series hybrid electric powertrain systems for agricultural tractors[J]. Renewable Energy, 2025,253: 123647.

[76] 李妍颖, 刘孟楠, 徐立友, 等. 基于非线性规划遗传算法的混合动力拖拉机控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(2):166 - 172.
LI Yanying, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Control strategy of series hybrid tractor based on nonlinear program genetic algorithm[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2023, 44(2):166 - 172. (in Chinese)

[77] 王春光. 并联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[D]. 洛阳: 河南科技大学,2014.
WANG Chunguang. Research on energy management strategy of parallel hybrid tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[78] 方树平, 周志立, 徐立友. 串联式混合动力拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 61 - 66, 8.
FANG Shuping, ZHOU Zhili, XU Liyou. Energy management strategy of series hybrid tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 61 - 66, 8. (in Chinese)

[79] QUATTROMINI N F, FERRANTE S, NUZZO S, et al. Fuzzy logic-based energy management strategy for a hybrid specialized tractor[C]//2025 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). IEEE, 2025: 1 - 6.

[80] 缪皓楠, 尹必峰, 黄幼林, 等. 基于动态规划算法的串联式混合动力拖拉机犁耕工况能量管理研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10):147 - 153.
MIAO Haonan, YIN Bifeng, HUANG Youlin, et al. Research on power system design and energy management of series-connected hybrid tractor based on dynamic programming algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10):147 - 153. (in Chinese)

[81] 汪珍珍, 周俊, 王旭. 增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4):428 - 438.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, WANG Xu. Research on energy management model for extended-range electrie rotary-tilling tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 428 - 438. (in Chinese)

[82] JIA C, QIAO W, QU L. Numerical methods for optimal control of hybrid electric agricultural tractors[C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 2019.

[83] 张俊江, 冯港辉, 徐立友, 等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机节能控制[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5):396 - 406.
ZHANG Junjiang, FENG Ganghui, XU Liyou, et al. Energy-saving control of hybrid tractor based on pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):396 - 406. (in Chinese)

[84] ZHOU R, WANG L, DENG X, et al. Research on energy distribution strategy of tandem hybrid tractor based on the pontryagin minimum principle[J]. Agriculture, 2024, 14(3): 440.

[85] ZHANG K, DENG X, LU Z, et al. Research on the energy management strategy of a hybrid tractor OS - ECVT based on a dynamic programming algorithm[J]. Agriculture, 2024, 14(9):1658.

[86] 杨萌, 王琳, 邓晓亭, 等. 基于 MA - ECMS 的串联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(5):69 - 78.
YANG Meng, WANG Lin, DENG Xiaoting, et al. Study on energy management strategy of series hybrid tractor based on MA - ECMS[J]. Tractor & Farm Transporter, 2024, 51(5):69 - 78. (in Chinese)

[87] 朱明杰, 武秀恒, 宋正河, 等. 基于双层优化的分布式混合动力拖拉机能量管理策略[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(3): 1 - 10.
ZHU Mingjie, WU Xiuheng, SONG Zhenghe, et al. Distributed hybrid electric tractor energy management strategy based on dual-layer optimization[J]. Journal of Intelligent Agricultural Equipment, 2025, 6(3): 1 - 10. (in Chinese)

[88] BARTHEL J, GRGES D, BELL M, et al. Energy management for hybrid electric tractors combining load point shifting, regeneration and boost[C]//2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). IEEE, 2014: 1 - 6.

[89] ZHANG J, FENG G, XU L, et al. Energy-saving control of hybrid tractors based on instantaneous optimization[J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(2): 27.

[90] VARLESE C, KONRAD J, VOLF T, et al. Predictive power demand for energy management of hybrid electric tractors[J]. Smart Agricultural Technology, 2025,11: 101026.

[91] 南祥, 洪达, 缪浩楠, 等. 基于短时工况预测的混动拖拉机能量管理策略研究[J]. 内燃机与配件, 2024(21):1 - 4.
NAN Xiang, HONG Da, MIAO Haonan, et al. Research on energy management strategy of hybrid tractor based on short time working condition prediction[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2024(21):1 - 4. (in Chinese)

[92] 闫祥海, 闫宇翔, 张俊江, 等. 基于自适应阈值优化的插电并联式混合动力拖拉机节能控制研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9):147 - 152.
YAN Xianghai, YAN Yuxiang, ZHANG Junjiang, et al. Research on energy-saving control of plug-in parallel hybrid tractor based on adaptive threshold optimization[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9):147 - 152. (in Chinese)

[93] 朱镇,曾令新,林勇刚,等. 融合工况预测的混合动力拖拉机自适应能量管理策略[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(12):201 – 210.
ZHU Zhen, ZENG Lingxin, LIN Yonggang, et al. Adaptive energy management strategy for hybrid tractors based on condition prediction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(12):201 – 210. (in Chinese)

[94] DOU H, WEI H, ZHANG Y, et al. Configuration design and optimal energy management for coupled-split powertrain tractor [J]. Machines, 2022, 10(12): 1175.

[95] FENG G, ZHANG J, YAN X, et al. Research on energy-saving control of agricultural hybrid tractors integrating working condition prediction[J]. Plos One, 2024, 19(3): e0299658.

[96] XU H, LI S, JI Y, et al. Dynamic obstacle detection based on panoramic vision in the moving state of agricultural machineries [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106104.

[97] 郑明雪, 罗治情, 陈娉婷, 等. 基于改进 Mean Shift 的无人机农业应用遥感影像地块边界提取[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(23):153 – 156.
ZHENG Mingxue, LUO Zhiqing, CHEN Pinting, et al. Farmland bound. ary extraction from UAV remote sensing images for agricultural applications based on improved Mean Shift[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(23):153 – 156. (in Chinese)

[98] 罗锡文, 谷秀艳, 胡炼, 等. 大田无人化智慧农场农田边界识别技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2):1 – 18.
LUO Xiwen, GU Xiuyan, HU Lian, et al. Research status and outlook of farmland boundary recognition technology in large-scale unmanned smart farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):1 – 18. (in Chinese)

[99] WU S, SU Y, LU X, et al. Extraction and mapping of cropland parcels in typical regions of southern China using unmanned aerial vehicle multispectral images and deep learning[J]. Drones, 2023, 7(5): 285.

[100] 张岩, 潘胜权, 解印山, 等. 相机与毫米波雷达融合检测农机前方田埂[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15):169 – 178.
ZHANG Yan, PAN Shengquan, JIE Yinshan, et al. Detection of ridge in front of agricultural machinery by fusion of camera and millimeter wave radar[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15): 169 – 178. (in Chinese)

[101] XU H, LI S, JI Y, et al. Dynamic obstacle detection based on panoramic vision in the moving state of agricultural machineries[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106104.

[102] ZHANG Y, TIAN K, HUANG J, et al. Field obstacle detection and location method based on binocular vision[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1493.

[103] SKOCZEŃ M, OCHMAN M, SPYRA K, et al. Obstacle detection system for agricultural mobile robot application using RGB – D cameras[J]. Sensors, 2021, 21(16): 5292.

[104] SUVEI S D, HAARSLEV F, BODENHAGEN L, et al. Stereo and LiDAR fusion based detection of humans and other obstacles in farming scenarios[C]// VISIGRAPP,2018, 4: 166 – 173.

[105] LV P, WANG B, CHENG F, et al. Multi-objective association detection of farmland obstacles based on information fusion of millimeter wave radar and camera[J]. Sensors, 2022, 23(1): 230.

[106] YAO X, ZHANG B, WANG X, et al. Adaptive navigation for robots in unstructured agricultural environments using stable feature localization and multi-sensor obstacle detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 234: 110302.

[107] KRAGH M, UNDERWOOD J. Multimodal obstacle detection in unstructured environments with conditional random fields [J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(1): 53 – 72.

[108] 马若飞, 伟利国, 赵博,等. 基于多传感器数据融合的旋耕耕深检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 52 – 64.
MA Ruofei, WEI Liguo, ZHAO Bo, et al. Rotary tillage depth detection based on multi-sensor data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 52 – 64. (in Chinese)

[109] 王宏伟, 温昌凯, 刘孟楠, 等. 拖拉机作业工况参数检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 409 – 416.
WANG Hongwei, WEN Changkai, LIU Mengnan, et al. Tractor operating condition parameter testing system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2):409 – 416. (in Chinese)

[110] 李贺, 杨俊茹, 李瑞川, 等. 拖拉机深松作业关键作业参数远程监测系统研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 240 – 247.
LI He, YANG Junru, LI Runchuan, et al. Research on remote monitoring system for key operating parameters of tractor tilage operation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 240 – 247. (in Chinese)

[111] 安麒麟, 汪凤珠, 刘阳春, 等. 基于轻量级 RepVIT 的农机具工况识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2025,56(2): 187 – 194, 205.
AN Qilin, WANG Fengzhu, LIU Yangchun, et al. Lightweight repvit-based working condition recognition method for agricultural implements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 187 – 194, 205. (in Chinese)

[112] YIN Y, ZHAO C, ZHANG Y, et al. Development and application of subsoiling monitoring system based on edge computing

using IoT architecture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 106976.

[113] LUO C, CHEN J, GUO S, et al. Development and application of a remote monitoring system for agricultural machinery operation in conservation tillage[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1460.

[114] 艾强,魏洪乾,赵文强,等. 面向退磁的永磁同步电机转矩补偿控制[J]. 微特电机, 2025, 53(5): 52 - 60.
AI Qiang, WEI Hongqian, ZHAO Wenqiang, et al. Demagnetization oriented torque compensation control of permanent magnet synchronous motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(5): 52 - 60. (in Chinese)

[115] 韩建刚,张琳琳,陈俊杰,等. 电动拖拉机驱动电机试验台测控系统的设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2020, 47(5): 34 - 38.
HAN Jian'gang, ZHANG Linlin, CHEN Junjie, et al. Design of measurement and control system of test platform for electric tractor drive motor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2020, 47(5): 34 - 38. (in Chinese)

[116] WANG B, LV Y, CHU X, et al. Design and experimental testing of extended-range power supply system for 15 horsepower electric tractor[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1551.

[117] 赵子豪,谢斌,温昌凯,等. 电动拖拉机双电机驱动系统模式切换瞬态特性与控制方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(4): 532 - 542.
ZHAO Zihao, XIE Bin, WEN Changkai, et al. Transient characteristics and control methods of mode switching in electric tractor dual motor drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 532 - 542. (in Chinese)

[118] 邓晓亭,朱思洪,钱忠祥,等. 混合动力拖拉机动力耦合装置的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 29 - 34.
DENG Xiaoting, ZHU Sihong, QIAN Zhongxiang, et al. Research and development on power coupling device of hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 29 - 34. (in Chinese)

[119] 宗建华,王玲,吕东晓,等. 拖拉机三点悬挂电液加载系统研究与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 242 - 248.
ZONG Jianhua, WANG Ling, LÜ Dongxiao, et al. Research and experiment on electro-hydraulic loading system for tractor three-point hitch[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(2): 242 - 248. (in Chinese)

[120] SUN X, SONG Y, WANG Y, et al. Design and test of a tractor electro-hydraulic-suspension tillage-depth and loading-control system test bench [J]. Agriculture, 2023, 13(10): 1884.

[121] 丛茜,马博帅,李凯,等. 拖拉机液压悬挂装置检测加载试验台设计及仿真分析[J]. 液压与气动, 2020(8): 1 - 6.
CONG Qian, MA Boshuai, LI Kai, et al. Design and simulation analysis of tractor hydraulic hitch detection loading test stand [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(8): 1 - 6. (in Chinese)

[122] 闫祥海,周志立,贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 74 - 81.
YAN Xianghai, ZHOU Zhili, JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor power take-off [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 74 - 81. (in Chinese)

[123] 马美莲,张琳琳,刘琨,等. 拖拉机多路液压输出功率试验台测控技术研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2013,40(6): 14 - 15.
MA Meilian, ZHANG Linlin, LIU Kun, et al. Study on testing and controlling technology of test bed for tractor multiple hydraulic output[J]. Tractor & Farm Transporter, 2013, 40(6): 14 - 15. (in Chinese)

[124] 邱韶峰,张延杰,吴爱兵,等. 移动式液压加载型拖拉机动力输出轴试验装置设计[J]. 中国农机化学报,2021, 42(10): 132 - 138, 179.
QIU Shaofeng, ZHANG Yanjie, WU Aibing, et al. Design of movable hydraulic loading tractor power take-off test device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 132 - 138, 179. (in Chinese)

[125] 陶倩文,闫祥海,仝一锟,等. 拖拉机室内台架试验技术现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 121 - 128.
TAO Qianwen, YAN Xianghai, TONG Yikun, et al. Current situation and prospect of tractor indoor bench test technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 121 - 128. (in Chinese)

[126] 第一拖拉机股份有限公司. 混合动力拖拉机综合试验装置及拖拉机多模式测试方法: 202210582000.1 [P]. 2022 - 08 - 19.

[127] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 412 - 420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412 - 420. (in Chinese)

[128] 窦海石,艾强,张幽彤. 拖拉机双流耦合动力系统试验台输出特性研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2025, 52(4): 15 - 17.
DOU Haishi, AI Qiang, ZHANG Youtong. Research on output characteristics of tractor dual flow coupled power system test stand[J]. Tractor & Farm Transporter, 2025, 52(4): 15 - 17. (in Chinese)

[129] 雷意. 串联式柴电混合动力拖拉机加载试验台的设计与试验[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
LEI Yi. Design and test of loading platform for a series of diesel electric hybrid tractor[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[130] 徐立友,赵一荣,赵学平,等.电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(1):355 - 363.
XU Liyou, ZHAO Yirong, ZHAO Xueping, et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 355 - 363. (in Chinese)

[131] 林恒矗,郭志强,杨坤,等. 轮耦合试验台在拖拉机整机标准化试验中的应用与实践[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(3): 59 - 66.
LIN Hengchu, GUO Zhiqiang, YANG Kun, et al. Application and practice of the wheel-coupled test rig in standardized tractor full-vehicle testing[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(3): 59 - 66. (in Chinese)

[132] WEN Changkai, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench[J]. Biosystems Engineering, 2021, 205: 1 - 26.

[133] 贾方,侯宇豪,韩建刚,等.基于电驱动系统的农业车辆牵引负荷车设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(8):394 - 401,410.
JIA Fang, HOU Yuhao, HAN Jiangang, et al. Design and test of agricultural vehicle traction load vehicle based on electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 394 - 401, 410. (in Chinese)

[134] 赵静慧,赵腾龙,徐立友,等. 基于 APSO 算法的拖拉机牵引性能预测通用模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 519 - 529.
ZHAO Jinghui, ZHAO Tenglong, XU Liyou, et al. General model building and experiment on traction performance prediction based on APSO algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 519 - 529. (in Chinese)

[135] 赵静慧,刘孟楠,徐立友,等. 四轮驱动拖拉机牵引性能预测模型建立与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 439 - 447.
ZHAO Jinghui, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Prediction model and experiment on tractive performance of four-wheel drive tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 439 - 447. (in Chinese)

[136] WANG Y, WANG L, WANG S, et al. Loading method for tractor rotary tillage load spectrum based on extreme load retention resampling[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2025, 18(4): 128 - 138.