doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.002

拖拉机新型动力传动系统关键技术研究综述

赵思夏[1,2]　李贤哲[1,2]　闫祥海[1,2]　张俊江[1,2]　吴依伟[1,2]　徐立友[1,2]
(1.河南科技大学车辆与交通工程学院,洛阳 471003;2.智能农业动力装备全国重点实验室,洛阳 471000)

摘要:拖拉机作为实现农业现代化与高效生产的核心动力装备,其技术发展水平直接关系到农业生产的效率、成本与可持续性,产业正加速向高端化、智能化、绿色化方向演进,而新型动力传动技术则成为这一变革中最为关键与活跃的创新领域。本文从新型传动理论研究、关键技术开发与国内外产业化应用 3 个维度,对国内外拖拉机新型动力传动技术的研究现状进行全面综述。研究聚焦于动力换挡传动、液压机械无级变速传动、纯电驱动系统、油电混合动力、氢能混合动力和甲烷混合动力的多元化技术路线。深入剖析了动力传动系统的基本结构、工作原理与性能特征,结合国内外典型拖拉机产品,分析了关键技术发展现状,以及实际应用成效与产品化路径。归纳并总结了当前新型动力传动关键技术亟待突破的瓶颈问题,主要包括电池容量和充电速率、控制精度和稳定性、电驱动系统环境适应性、多能量源能量管理、新型能源制备与存储等问题。最后,展望了未来拖拉机新型动力传动系统的发展趋势,提出在全局能量高效利用、全场景自适应适配以及模块化多功能拓展三大方向深度融合。

关键词:拖拉机;动力传动系统;纯电驱动系统;油电混合动力;氢能混合动力;甲烷混合动力
中图分类号:S219　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0024-17　　**OSID**:

Review of Research on Key Technologies for New Power Transmission Systems in Tractors

ZHAO Sixia[1,2]　LI Xianzhe[1,2]　YAN Xianghai[1,2]　ZHANG Junjiang[1,2]　WU Yiwei[1,2]　XU Liyou[1,2]
(1. *College of Vehicle and Traffic Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*
2. *National Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Luoyang* 471000, *China*)

Abstract: The tractor serving as the core power equipment for achieving agricultural modernization and efficient production, has a technological development level that directly influences the efficiency, cost, and sustainability of agricultural operations. The industry is rapidly evolving toward high-end, intelligent, and green directions, with new power transmission technologies becoming the most critical and dynamic area of innovation in this transformation. A comprehensive review of the current research status of new power transmission technologies for tractors, both domestically and internationally was provided, which systematically addressed the field from three dimensions: theoretical research on new transmission systems, development of key technologies, and industrial applications. It was focused on diverse technical pathways, including power shift transmission, hydro-mechanical continuously variable transmission, pure electric drive systems, as well as diesel-electric hybrid, hydrogen hybrid, and methane hybrid power systems. It delved into the basic structure, working principles, and performance characteristics of these power transmission systems, and the development status of key technologies was analyzed by examining typical tractor products from China and other countries, along with their practical application outcomes and productization paths. The critical bottleneck issues that needed to be overcome in current new power transmission technologies were generalized and summarized, primarily including battery capacity and charging rates, control precision and stability, environmental adaptability of electric drive systems, multi-energy source management, and the production and storage of new energy sources.

收稿日期:2025-09-12　修回日期:2025-09-22
基金项目:国家自然科学基金项目(52572495)、国家重点研发计划项目(2022YFD2001203)、智能农业动力装备全国重点实验室开放课题(SKLIAPE202508)、河南省自然科学基金青年基金项目(252300420515)、河南省高等学校重点科研项目(25B460001)、中原科技创新领军人才支持计划项目(244200510043)和河南省高校科技创新团队支持计划项目(24IRTSTHN029)
作者简介:赵思夏(1992—),男,讲师,博士,主要从事车辆传动理论与控制技术研究,E-mail:zhao_sixia@haust.edu.cn
通信作者:徐立友(1974—),男,教授,博士,主要从事车辆传动理论与控制技术研究,E-mail:xlyou@haust.edu.cn

Finally, it outlined future development trends for new power transmission systems in tractors, proposing deep integration in three major directions: global energy efficiency utilization, full-scenario self-adaptive compatibility, and modular multi-functional expansion.

Key words: tractor; power transmission systems; pure electric drive system; diesel-electric hybrid power; hydrogen-electric hybrid power; methane-electric hybrid power

0　引言

拖拉机产业高质量发展将是农业现代化的基础，新型高效动力传动技术的研究成为推动农机装备产业高质量发展的关键[1-4]。发展拖拉机新型动力传动技术符合国家“碳达峰、碳中和”战略需求，符合“中国制造 2025”及“十四五”全国农业机械化发展规划等国家政策导向[5-8]。

动力传动系统是拖拉机动力传递核心部件，传统机械式变速器无法有效应对田间因挂接不同农具而产生的连续负荷变化，降低了拖拉机作业经济性、动力性和舒适性，为克服这些不足并提高作业效率与质量，现代拖拉机正向多种新型动力传动技术发展，新型动力传动系统从根本上突破传统传动系统的技术瓶颈，通过程序化判断当前工况并自主换挡或调速调矩，实现对外部负载和阻力的及时适应，从而保证整机作业性能，具有重要的工程与应用价值。近年来，涌现出较多关于新型动力传动系统拖拉机的新路线、新思路与新方法，但是尚缺少系统性梳理。

本研究以系统解析新型动力传动技术发展态势为目标，重点聚焦于动力换挡传动、液压机械无级变速传动、纯电驱动系统、油电混合动力、氢能混合动力和甲烷混合动力的多元化技术路线。深入分析新型动力传动系统的基本结构、工作原理与性能特征，结合国内外典型拖拉机产品，分析关键技术发展现状，以及实际应用成效与产品化路径。总结归纳当前新型动力传动关键技术亟待突破的瓶颈问题，展望未来拖拉机动力传动系统的发展趋势，为拖拉机新型动力传动系统的研究提供参考。

1　拖拉机新型动力传动技术研究现状

拖拉机新型动力传动系统核心在于融合两种或以上不同类型的能量源，并通过功率转换装置协同输出。该系统突破了传统单一机械路径的局限，实现了功率的多源输入、耦合调配与按需输出，从而在保证牵引性能的同时，显著提升了能源利用效率与工况适应性。表 1 总结了新型动力传动系统的具体分类、结构特点、优缺点及部分适配机型。

表 1　新型动力传动系统对比

Tab. 1　Comparison of new power transmission systems

类型	构成	优点	缺点	适配机型
动力换挡传动系统	齿轮传动机构、换挡执行单元、液压控制系统、电子控制系统	换挡无动力中断；重载工况平顺性好；操作方便、适应性强	结构与维护复杂；控制策略难度大；重量与体积较大	Deutz－Fahr L 720/Valtra N 和 T 系列
液压机械无级变速传动系统	机械变速机构、变量泵-定量马达机构、动力分流/汇流行星齿轮机构、电子控制驱动系统	无级调速；机械传动高效；变速范围宽	结构复杂；控制难度大；液压系统效率较低	东方红 LW3204/LW2304、雷沃 P7000
纯电驱动传动系统	电源系统、驱动系统与作业装置，单电机、双电机独立、双电机耦合、轮边电机分布驱动等形式	零排放；能量效率高；控制灵活；适应性强	电池容量限制续航；充电速度较慢；部分构型动力协调性差	黄海金马 YL254ET、ET1004－W、CA504ET、e100 Vario
油电混合动力传动系统	发动机与电机组合，串联、并联、混联构型	续航长；效率高；排放低；无级变速	系统复杂；控制难度大；成本高	东方红 HB2204、柳工 HE2604、Minsk Belarus－3023/3523
氢能混合动力传动系统	氢燃料电池为主能源，配蓄电池/超级电容，FC＋B、FC＋SC、FC＋B＋SC 构型	零排放；氢能能量密度高；续航潜力大	储氢技术不成熟；成本较高；基础设施不足	Kubota 氢动力概念拖拉机、STEYR FCTRAC、芬特氢燃料电池拖拉机、ET504－H
甲烷混合动力传动系统	甲烷发动机为主动力，电力驱动辅助，串联、并联、混联构型	排放较低；燃料可再生；经济性较好	燃料制备难度大；存储困难；能量密度较低	纽荷兰 T6 系列、AUGA M1

1.1　动力换挡传动系统

1.1.1　结构特点及工作原理

动力换挡传动（Power-shift transmission, PST）是将机械、液压、电子控制及测试技术集成的机电液一体化系统，广泛应用于大功率拖拉机。其机械部分采用定轴轮系或周转轮系（部分动力换挡多用定

轴轮系,全动力换挡常结合周转和定轴轮系),通过 TCU 采集驾驶员意图信号、作业模式开关、换挡手柄位置及农机具状态信号,按照换挡和油门匹配策略发出控制指令,驱动液压执行机构完成换挡离合器的分离与接合,实现带载荷、动力不中断的自动换挡,工作原理图如图 1 所示。

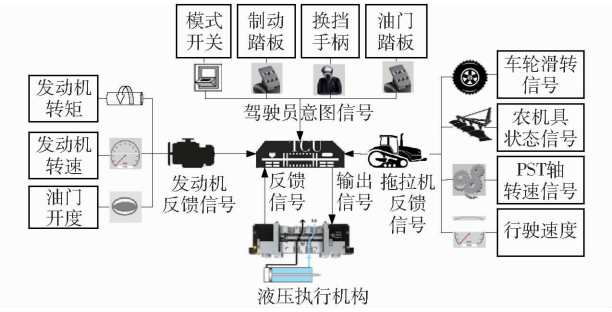


图 1 PST 工作原理图

Fig. 1 Operating principle of PST

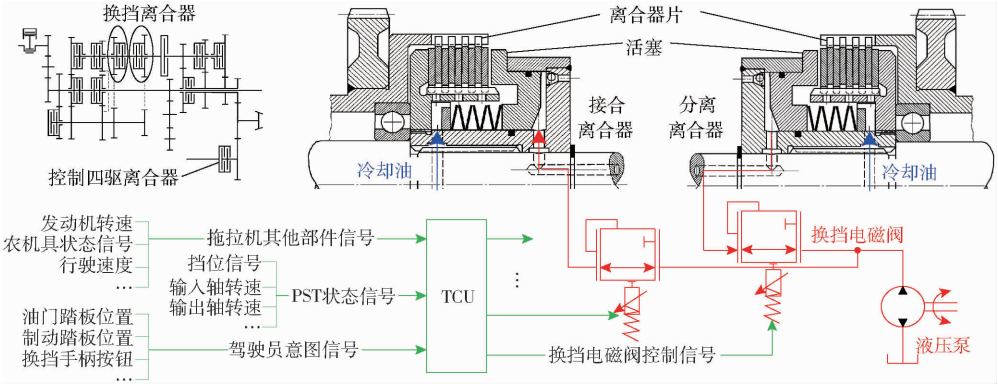


图 2 传动控制原理图

Fig. 2 Principles of drive control

德国 DLG、日本 IAM、COTTEC 等,按照 OECD、国际和国家标准对拖拉机性能进行认证。多家单位(国家拖拉机质量监督检验中心、南京农业大学、河南科技大学等)开发了以电封闭内循环驱动加载为核心的台架,可在室内精确重现田间载荷[11]。与涡流、液压或机械加载相比,电机加载更易控制、响应快且能量回收率高。

朱思洪等[12]利用拖拉机传动系试验台架对 ZF 公司 T7336 型变速器进行了多种工况下液压系统动态特性试验,分析了液压系统压力和流量在换挡过程中的变化规律。席志强等[13]利用传动系试验台架模拟发动机载荷和田间载荷,如图 3 所示,该试验台架基于交流变频多机驱动与加载的功率回馈试验系统,实现对驱动/加载电机、被试对象模块化编程控制,验证了 PST 换挡控制策略仿真研究结果的正确性。

1.1.3 国内外典型产品

国外,动力换挡拖拉机是国际市场的主流大功率拖拉机产品,如意大利 Landini 公司的 Legend 系列,荷兰 Ford 公司的 30 系列,Case 公司的 CX 系列、Maxxum 系列、Magnum 系列,Same 公司的 Silver 系列等。



图 3 传动试验台架

Fig. 3 Transmission test bench

在国内,中国一拖集团与国外合作,研发了东方红 LZ、LA、LF 等系列大型动力换挡拖拉机,使我国在动力换挡拖拉机上实现了突破。相关产品如图 4 所示[14]。

1.1.2 关键技术研究现状

(1)动力换挡控制技术

动力换挡控制技术目标是实现平顺、快速、可靠换挡,最大限度降低冲击和能量消耗。刘畅[9]在传统双参数的基础上提出多参数智能换挡控制策略,在缩减换挡时间和换挡顿挫感的同时,将燃油经济性作为指标对换挡控制策略进行了优化。席志强等[10]以动力换挡变速器输出转速变化幅值为指标,优化了换挡重叠时间与离合器接合油压,通过仿真验证了换挡过程中离合器部分控制策略的有效性,控制原理如图 2 所示。

(2)系统测试与试验技术

国内外众多机构投入大量研究,采用先进试验方法提高试验效率与精度。国际领先企业如 John Deere、CNH、AVL、FIAT,以及测试机构美国 NTTL、

1.2 液压机械无级变速传动系统

1.2.1 结构特点与工作原理

液压机械无级变速器(Hydro-mechanical continuously variable transmission, HMCVT)由机械变速机构、变量泵-定量马达液压无级变速系、动力



图 4　PST 拖拉机产品

Fig. 4　PST tractor products

分流/汇流的行星齿轮机构及电子控制驱动系统组成。发动机动力通过两路传输：一部分经机械多挡变速器传入差动轮系太阳轮，另一部分经齿轮变速后由变量泵转为液压能再由定量马达转回机械能并传入齿圈，二者在差动轮系合成由行星架输出。通过在机械传动保障高效的同时利用液压传动实现无级调速，HMCVT 可在一定范围内实现连续变速；若需更宽变速范围，则由离合器/制动器换挡或改变传动路径，形成多段连续变速。传动原理如图 5 所示。

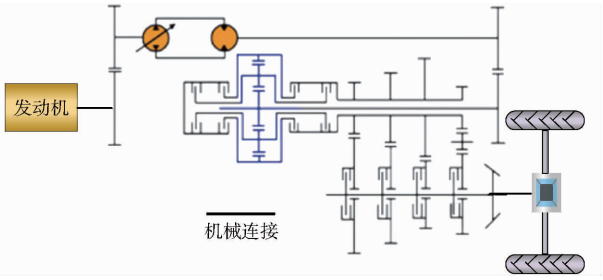


图 5　HMCVT 传动原理图

Fig. 5　Schematic diagram of HMCVT

1.2.2　关键技术研究现状

（1）结构方案拓扑优化技术

HMCVT 结构方案拓扑优化技术主要用于分析行星齿轮系的输入输出特性，优先选择结构简单且传动效率高的行星机构，并进行与发动机传动系统的匹配分析。不同功率流动方向下行星轮系转化机构受力如图 6 所示。

徐立友等[15]结合拖拉机作业工况，设计了新型多段式 HMCVT 传动方案，并在各模式下讨论了变速器匹配机理和匹配实现方式，针对配备该变速器的东方红 1302R 拖拉机进行换段条件、转矩特性、效率特性和转矩特性分析。倪向东等[16]建立了

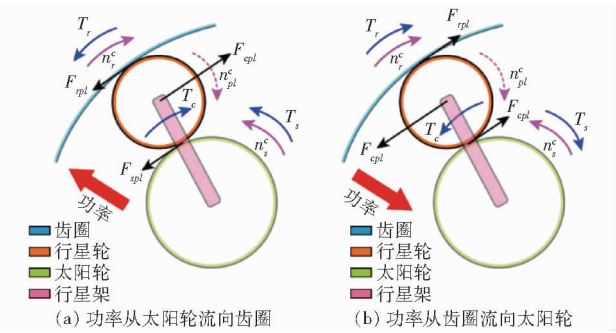


图 6　不同功率流动方向下的行星排转化机构受力分析

Fig. 6　Force analysis of planetary gear conversion mechanism under different power flow directions

HMCVT 各区段有级变速的等比连续方程，提出传动系统参数设计准则，在传动结构方案和传动性能分析上提供了可靠的理论基础。ZHU 等[17]设计了一种在原有 HMCVT 传动基础上添加电机动力传动的传动方式，制定了相应的速比控制策略和混合动力系统能量管理策略，分别对犁耕、收获和运输 3 种工况下的变速器效率和油耗等进行分析，实现新传动方式的理论和试验的可行性。

（2）无级调速控制技术

研究 HMCVT 中机械路换段条件，液压分流路的油液粘度、工作容积和输出轴负载惯量等对系统调速时的影响，确定其调速特性。魏超等[18]以等差式 HMCVT 为研究对象，着重分析了等差式变速器组成原理，推论出速比关系表达式，提出换段条件，并试验验证了变速器工作的速比跟踪控制方法可行性，当跟踪阶跃速比时不存在稳态误差，跟踪斜坡速比时存在稳态误差。杨超杰等[19]提出了基于双模糊 PID 算法的 HMCVT 恒转速输出控制方法，更好解决 HMCVT 在遇到阶跃负载时输出转速波动量大、调整时间长的问题。

（3）换段过程控制技术

换段品质对 HMCVT 运作至关重要，一定程度上决定换段是否稳定、少冲击等。王光明等[20]通过仿真与试验结合，归纳影响 HMCVT 换段品质的 3 个要素为工况因素、设计因素与可控因素，研究了换段品质影响因素之间的关系并获得换段参数间的最佳匹配关系。对于换段控制策略方面，朱镇等[21]提出融合变速器输出轴的速度降幅度、最大冲击度和换挡所需时间作为评价指标，采用极差法分析影响因素的主次、预测最佳的控制方案，通过数学分析和仿真验证了该方案可有效提升变速器器换挡品质。郭占正等[22]针对 HMCVT 传动特性，采用换段期间段间重叠结合的方法实现动力连续换段，将动力连续换段过程划分 4 个阶段，经过理论与实验台架仿真分析，实现了动力传递连续无中断，虚拟样机结构

如图 7 所示。

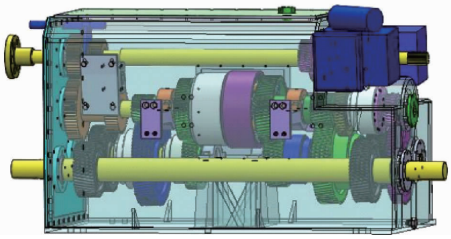


图 7 HMCVT 虚拟样机

Fig. 7 HMCVT virtual prototype

1.2.3 国内外典型产品

国外,德国的 ZF 与 Fendt 等先进农机企业推出了一系列采用无级传动技术的拖拉机产品,并获得广泛应用。ZF 与 Fendt 各自生产的 HMCVT 已被装配到 Deutz－Fahr、JCB、Steyr 等企业生产的拖拉机上。

在国内,中国一拖集团自主研发了东方红 LW3204 和 LW2304 两款配备 HMCVT 的重型轮式拖拉机;潍柴动力则开发了大功率无级传动拖拉机雷沃 P7000 及雷沃阿波斯 P2404－7V,相关产品如图 8 所示。



(a) 东方红LW3204 (b) 雷沃阿波斯P2404-7V

(c) Deuta-Fahr X720 (d) JCB

图 8 HMCVT 应用相关产品

Fig. 8 Product diagrams related to HMCVT application

1.3 纯电驱动传动系统

1.3.1 结构特点与工作原理

纯电驱动系统由电源系统、驱动系统与作业装置组成,设计可采用单电机、双电机或多电机等多种形式,结构特点对比如表 2 所示。

表 2 纯电驱动传动系统结构特点

Tab. 2 Structure characteristics of pure electric drive transmission system

纯电驱动类型	结构特点	优点	缺点
单电机驱动	单电机通过机械传动装置将动力传递至驱动轮和 PTO	驱动轮和 PTO 达到额定功率;控制策略简单;动力性能好	PTO 与驱动电机刚性连接,无法独立输出旋转动力;PTO 仅同步转速,作业适应性差
双电机独立驱动	驱动轮和 PTO 由独立电机驱动,两条独立功率流	PTO 独立输出旋转动力;PTO 可调速;田间作业适应性好	驱动轮和 PTO 无法单独输出额定功率;动力协调性差
双电机耦合驱动	PTO 由主电机驱动,辅助电机与主电机功率耦合后传递至驱动轮	PTO 按标准转速工作;驱动轮无级调速	PTO 无法输出额定功率;调速依赖变速器
分布式驱动	轮边电机安装在前后桥或半轴,配行星齿轮减速机构,线控供电	前后桥/四轮独立驱动;PTO 独立驱动;参数可控,适应性强	系统复杂;成本高

(1)单电机驱动

单电机驱动式电动拖拉机由机械传动装置将驱动电机输出的机械功率依次传递至驱动轮和动力输出轴 PTO,如图 9 所示。现有单电机驱动拖拉机优势为驱动轮输出牵引动力和 PTO 输出旋转动力能够达到拖拉机额定功率,控制策略制定较为容易,动力性能较好。局限性在于,PTO 与驱动电机之间采用刚性连接,与驱动轮之间存在机械耦合关系,拖拉机难以独立输出旋转动力,而且 PTO 仅能以同步式转速工作,农机具跟随车速变化无法进行调节,田间作业适应能力较差。

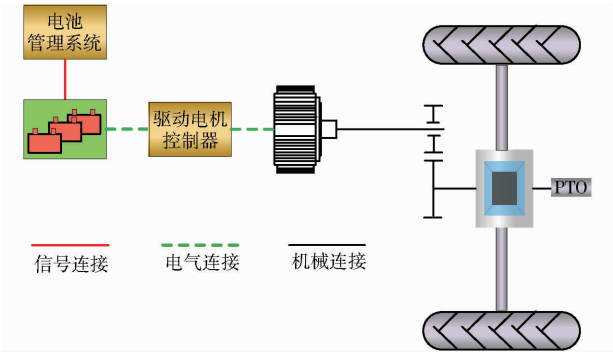


图 9 单电机驱动原理图

Fig. 9 Single-motor drive schematic

(2)双电机独立驱动

双电机独立驱动式电动拖拉机驱动轮和 PTO 由独立的电机驱动,根据工况需求独立调速,如图 10 所示。该方案存在 2 条独立功率流:动力电池组→DC/DC 转换器→驱动电机控制器→驱动电机→传动机构→驱动轮,输出牵引力;动力电池组→DC/DC 转换器→PTO 电机控制器→PTO 电机→动力输出轴,输出旋转动力。现有双电机独立驱动拖拉机优势为:由于驱动电机和 PTO 电机控制过程相互独立,能够实现 PTO 独立输出旋转动力,且可以通过电机调速控制使 PTO 转速在同步式转速和标

准转速之间切换，田间作业适应性较好。局限性在于，由于驱动电机和 PTO 电机二者额定功率之和等于拖拉机额定功率，因此，驱动轮和 PTO 无法单独输出拖拉机额定功率，动力协调性较差。

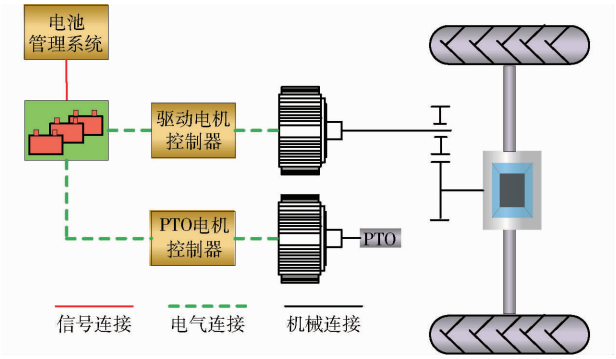


图 10　双电机独立驱动原理图

Fig. 10　Dual-motor independent drive schematic

（3）双电机耦合驱动

双电机耦合驱动式电动拖拉机动力输出轴 PTO 由主电机驱动，辅助电机与主电机功率通过机械耦合装置耦合后传递至驱动轮，能够使驱动轮输出额定牵引功率，而 PTO 无法输出额定功率，如图 11 所示。匹配农机具进行作业时，主电机转速能够保持在 540 r/min 和 1 000 r/min 附近，PTO 能够按照国家标准转速工作，驱动轮处无级调速的能力与 PTO 输出最大功率接近整机额定功率的程度具有一定的反比关系。由于耦合后功率的转速较稳定，整机调速过程需要依靠变速器。

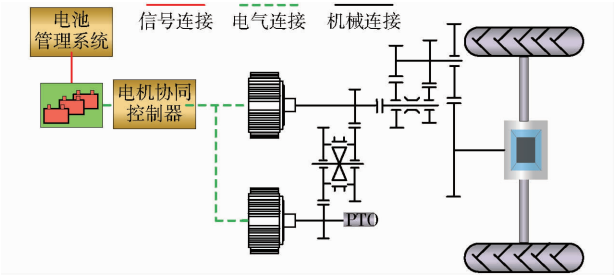


图 11　双电机耦合驱动原理图

Fig. 11　Dual-motor coupled drive schematic

（4）轮边电机分布式驱动

轮边电机分布式驱动结构特点在于前后桥或 4 个半轴上安装驱动电机，在电机与轮毂之间配备行星齿轮减速机构，并由动力电池利用线控方式向驱动电机和 PTO 电机供电，实现拖拉机前后桥独立驱动、四轮独立驱动和 PTO 独立驱动，如图 12 所示。轮边电机分布式驱动主要优势在于，前后轴驱动电机与 PTO 驱动电机重要参数精确可知且独立可控，能够满足田间随机载荷自适应性和多种农机具匹配拓展性。

1.3.2　关键技术研究现状

（1）电驱动系统控制技术

驱动电机控制的目的是为电动机提供准确的转

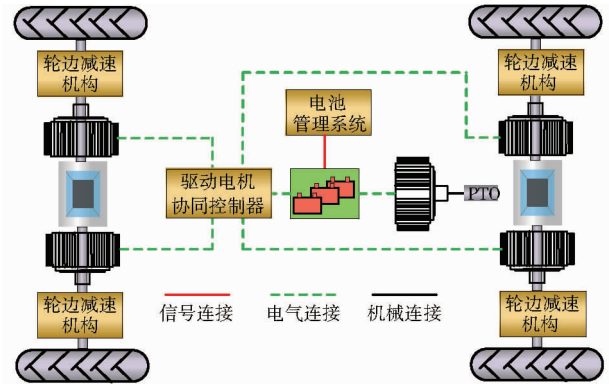


图 12　轮边电机分布式驱动原理图

Fig. 12　Wheel-mounted motor distributed drive schematic

矩和转速控制信号，控制电机输出，满足拖拉机作业的驱动力和作业速度。驱动电机控制器通常具有 2 种基本控制策略：直接转矩控制和直接转速控制，如图 13 所示。在基础控制策略的基础上，国内外研究者进行了深入研究。徐立友等[23]提出了应用于四轮驱动电动拖拉机的驱动系统转矩分配控制策略，改善了牵引性能。BAEK 等[24]对电动全轮驱动拖拉机牵引性能进行开发和评估。刘孟楠等[25]结合犁耕和旋耕工况下波动载荷的时频特性，基于小波算法提出了采用超级电容平滑蓄电池放电峰值功率

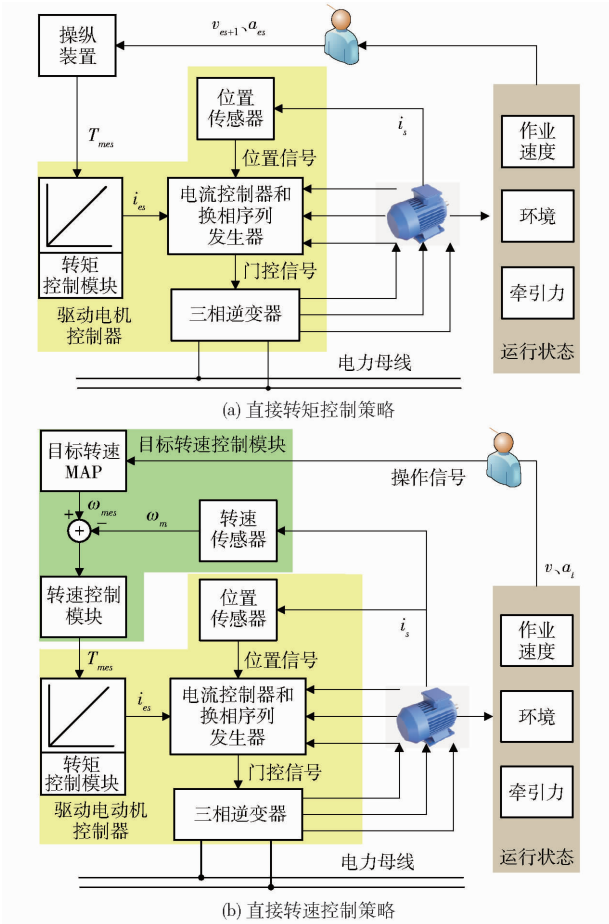


图 13　电机基本控制策略原理图

Fig. 13　Basic control strategy schematic of electric motor

的电动拖拉机能量管理策略。李银平等[26]针对纯电动拖拉机能量利用率低、续航里程短的问题,设计了一种超级电容和蓄电池复合的纯电动拖拉机动力电源系统,提出了基于动态规划的能量管理策略。

(2)系统仿真测试与试验技术

电驱动拖拉机领域对于新技术的应用较多、系统集成度更高,需要对能源系统、驱动系统、整机系统、控制系统等测试,以满足主要研究和开发环节需求。国内外学者针对控制器、部件及总成台架试验等进行了研究。赵思夏等[27]对不同底盘布置方案对电动拖拉机牵引性能和动态性能的影响进行了仿真分析,如图 14 所示。YOO 等[28]对整机最大功率、充电状态、续航里程、最高车速等进行了仿真分析,验证了驱动系统设计方法。汪珍珍等[29]开发了电动拖拉机快速原型平台测控系统并通过试验测试了平台性能。陈黎卿等[30]搭建了用于电动拖拉机驱动电动机加载测试的试验台架,开展了驱动系统性能试验。



图 14 纯电驱动拖拉机动力系统性能试验台架

Fig. 14 Pure electric drive tractor power system performance test bench

1.3.3 国内外典型产品

国外,Fendt 开发了具备前后双 PTO 接口 e100 Vario 系列纯电动拖拉机,主要用于牧草作业;Monarch 推出了基于双电机动力系统的 MK-V 系列电动拖拉机,具备较好的经济性[31];John Deere 开发了配备锂离子电池,能持续作业 4 h 或 55 km 的拖拉机 SESAM,并在 2019 年升级为采用电缆供电,全自主运行,有导航系统、避障系统、转弯系统等的 Gridcon 拖拉机。

在国内,江苏悦达公司成功研制出采用双电机工作模式的黄海金马 YL254ET 电动拖拉机;国家农机装备创新中心自主研发的国内首台大功率轮边驱动型无人驾驶电动拖拉机 ET1004-W,填补了相关领域技术空白;中联重科则推出了轮边电机差速转向,具备 1 h 快速充电功能的 CA504ET 电动拖拉机,有效解决了电动农机续航补能效率问题,在新能源技术应用、设施园艺场景应用等方面已达到国际先进水平。相关产品如图 15 所示。

1.4 油电混合动力传动系统

1.4.1 结构特点与工作原理

由于现有电池技术制约,现有纯电动拖拉机难以实现长时间重负荷作业,采用混合动力技术可以较好解决该问题,依据混合动力的构型方式可分为串联式、并联式和混联式,结构特点如表 3 所示。



图 15 纯电驱拖拉机产品

Fig. 15 Pure electric tractor products

表 3 油电混合动力传动系统结构特点

Tab. 3 Structural characteristics of diesel-electric hybrid power transmission system

系统结构	结构特点	优点	缺点
串联式	电机唯一驱动	无级变速作业 工作稳定 排放较小	能量二次转换损失大 体积质量偏大
并联式	发动机、电机独立驱动或协同驱动	无级变速作业 功率较小 系统效率较高	依赖大容量电池,成本高 控制系统复杂度较高
混联式	发动机独立驱动,电机独立驱动,发动机-电机,电机-电机协同驱动	无级变速作业 适应性强 传动效率高	电力系统复杂,成本高 控制系统开发难度大

(1)串联式混合动力

串联式混合动力拖拉机驱动系统方案如图 16 所示,由发动机、蓄电池、电动机、发电机、变速器和减速器等组成。其工作原理为发动机带动发电机发电,发出的电力经过电力转换器根据电动机负载情况实现动力电池和电动机的功率分配,电动机将电能转化为机械能经变速器驱动车轮行驶。相较于纯电动拖拉机,串联式拖拉机因为存在多次能量转换,所以能量使用效率较低,但优点在于在保证作业面积的同时,串联式混合动力拖拉机能够大幅降低蓄电池容量达到 60% 以下,降低了整车成本,便于

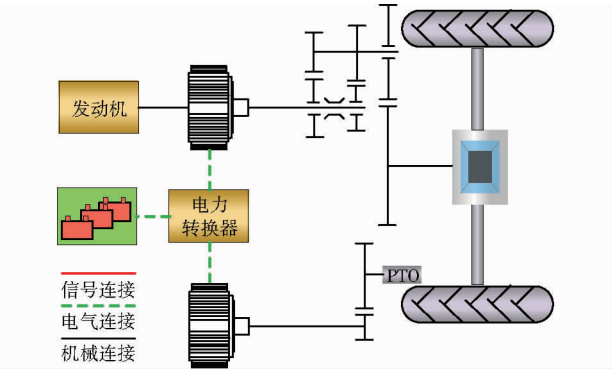


图 16　串联式混合动力拖拉机动力系统方案

Fig. 16　Serial hybrid tractor powertrain scheme

布置，能够有效省去发动机与驱动轮间的机械连接，发动机可以长时间保持在最佳工作区间高效工作。

（2）并联式混合动力

并联式混合动力驱动系统方案如图 17 所示，由发动机、动力电池、电动机、耦合装置、变速器和减速器等组成。工作时动力一路由发动机经耦合器、变速器至车轮，一路由电动机经耦合器、变速器至车轮，两路动力可以独立驱动，也可耦合驱动；PTO 既可以通过发动机带动，也可以通过变速器带动作业。其优点在于采用了机械直连，能量转换较少，可以有效地提高能源利用效率；电机由于有驱动和发电两种工作模式，可以实现更多模式的组合。

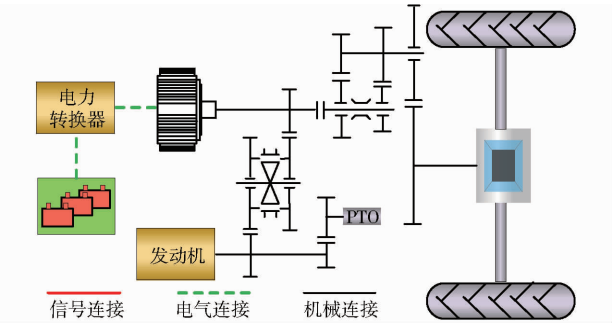


图 17　并联式混合动力拖拉机动力系统方案

Fig. 17　Parallel hybrid tractor powertrain scheme

（3）混联式混合动力

混联式混合动力系统组成如图 18 所示，主要由发动机、动力电池、电动机、发电机、耦合器、变速器和减速器组成。混联式混合动力拖拉机能够实现串联式或并联式的工作模式。与串联式结构相比，混联式增加了机械连接使得其发动机可以拥有并联形式的连接驱动，能够直接将动力传输到驱动轮。与并联式结构相比，混联式发动机可以直接与发电机相连使得其能够直接进行发电，将电能传输至蓄电池中。这种形式的拖拉机能够更加高效地传递动力，但由于其结构相较串联式和并联式较为复杂，所以设计、控制难度较高。

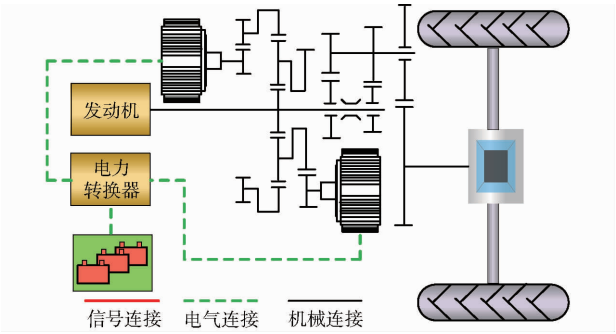


图 18　混联式混合动力拖拉机动力系统方案

Fig. 18　Combined hybrid tractor powertrain scheme

1.4.2　关键技术研究现状

（1）参数设计及匹配技术

赵静慧等[32]设计了采用柴油发电形式的增程式串联混合动力拖拉机，基于增程式电动拖拉机特点进行了参数设计，与传统的燃油拖拉机相比，经济型提高了 5.37%。鲁植雄等[33]设计了一种串联式混合动力拖拉机的驱动系统方案，并搭建试验台进行测试，验证参数设计的合理性。周志立等[34]基于拖拉机犁耕作业特点提出了并联式混合动力拖拉机的参数设计方法，有效改善了拖拉机机械传动效率及牵引功率特性，提升了牵引特性，减少了挡位数量，精简了操作结构。LEE 等[35]基于混合动力驱动系统的主要部件特点，开发了一种并联混合动力拖拉机，在较高挡位、高工作负荷下功率输出和燃油效率更优。黄思源[36]通过分析混合动力系统结构、工作模式和优缺点，结合混合动力拖拉机作业工况，提出一种机电复合传动方案，其变速范围、换挡平顺性方面得到了改善。中国一拖[37]对 160 kW 混合动力拖拉机进行了参数设计，并实现了样机试制，实现了 0 ~ 40 km/h 无级变速行驶，具备从事农场深耕、深松、联合整地等田间作业的功能。

（2）能量管理技术

针对纯电动拖拉机续驶里程不足的问题，徐立友等[38]设计了燃料电池/蓄电池混合动力电动拖拉机动力系统，制定了一种基于模糊控制的能量管理策略，该控制策略能够在满足整车动力性的基础上提高经济性，燃料电池和动力电池输出电功率稳定。针对拖拉机多工况作业时复杂能量源分配问题，周润东[39]提出了基于庞特里亚金极小值原理的串联式混合动力拖拉机能量分配策略，动力电池组与轮毂电机的峰值功率损耗明显降低，燃油经济性显著改善。针对旋耕作业能量使用效率低的问题，DOU 等[40]提出一种旋耕作业模式下的需求功率预测算法，提高了混合动力拖拉机作业面积，改善了拖拉机燃油经济性。

（3）驱动系统控制技术

针对混合动力拖拉机作业精度差及能量消耗大

的问题,徐立友等[41]提出了兼顾轨迹跟踪精确性和作业过程经济性的分层协同控制策略,上层采用模型预测控制算法,以减小路径的纵向和横向跟踪偏差为目标,下层以发动机燃油消耗率和变速器传动效率为优化目标,通过预测拖拉机速度和实时犁耕阻力作为关键变量,实现上下层动态联系的驱动系统一体化精准控制。针对混合动力拖拉机作业工况复杂、动力匹配不佳和自适应性差等特点,时辉[42]通过研究分析不同混合动力系统组成结构和工作原理,设计了一种适合于拖拉机的双轴并联式混合动力拖拉机动力系统,提出了 HET 动力系统理想驱动特性场,制定了 HET 动力系统 3 种工作模式下的协调匹配控制方法及其实现方法。

1.4.3 国内外典型产品

国外,结合作业载荷特点对混合动力技术展开探索,Minsk 推出了 Belarus-3023/3523 系列串联式混合动力系统,作业性能较同规格动力换挡系统提升较大[43]。STEYR Konzept 系统适用于轻型或大功率的拖拉机,相比较燃油拖拉机能够节约 8% 的油耗,最高速度提升 25%,驾驶体验和性能达到新的水平[44]。

国内,一拖股份自主研发了三元复联式混动系统 TX4H,开发了国内首台混动拖拉机 HB2204,完成 1 200 h 可靠性试验。柳工集团发布的 HE2604 采用油电混合动力,具有低油耗、大扭矩、节能减排的特点,还采用电控双挡无极变速、电控液压输出和电控提升器,操作轻便。相关产品如图 19 所示。



(a) 东方红HB2204 (b) 柳工集团HE2604

(c) Minsk Belarus-3023 (d) STEYR Konzept

图 19 混合动力拖拉机产品

Fig. 19 Hybrid electric tractor products

1.5 氢能混合动力传动系统

1.5.1 结构特点与工作原理

氢燃料电池(Fuel cell stack, FC)作为混合动力系统的主要能源,通过单向 DC/DC 变换器与整车高压母线连接,提供稳定的直流母线电压;辅以二次电源动力电池(Battery, B)、超级电容(Supercapacitor, SC)或两者同时来满足瞬态功率需求、储能和平衡负载波动。根据不同组合形式,氢能混合动力传动系统结构与特点如表 4 所示。

表 4 氢能混合动力传动系统结构与特点

Tab. 4 Structure and characteristics of hydrogen hybrid powertrain systems

系统结构	结构特点	优点	缺点
FC + B	燃料电池经单向 DC/DC 与母线连接,蓄电池直接并联	燃料电池高效区运行时间长 峰值功率共同承担 能量利用率高	实时响应能力较弱 燃料电池负载波动大 蓄电池寿命衰减较快
FC + SC	超级电容替代蓄电池,响应速度快	满足瞬态功率需求 动力响应快 循环寿命长	能量密度低,无法长时间储能 燃料电池负载波动较大
FC + B + SC	燃料电池为主,蓄电池和超级电容协同	兼顾续航和瞬态响应 减小燃料电池负载波动 系统适应性强	硬件结构复杂 能量管策略制定难度大 系统成本高

(1)氢燃料电池/蓄电池动力系统

FC + B 是当前最常见的氢燃料电池车用动力构型[45-47]。因燃料电池输出特性较软、电堆电压较低,需经单向 DC/DC 与母线连接,蓄电池电压可与母线相同且电压稳定,通常直接并联[48-50]。其优势在于蓄电池可延长燃料电池在高效区运行时间,峰值功率由两者共同承担,低功率时燃料电池为蓄电池充电,且蓄电池可吸收制动能量,提高整车能量利用率[51];蓄电池削峰填谷,减少变载频次,延长燃料电池寿命[52]。缺陷在于制动能量全部由蓄电池吸收会加速其衰减,但拖拉机作业中制动较少,可不考虑制动能量回收,如图 20 所示。

(2)氢燃料电池/超级电容动力系统

FC + SC 构型以超级电容替代蓄电池[53-55]。超级电容响应速度快、功率密度高,能迅速满足整车的瞬时功率需求,从而改善动力响应并提升车辆的动力性能。在高频充放电条件下,超级电容也具有较长的循环寿命[56-57],使其适合承担频繁的短时功率波动。缺点在于超级电容的能量密度较低,不能长期储存大量能量,因而在中低频或持续功率需求下

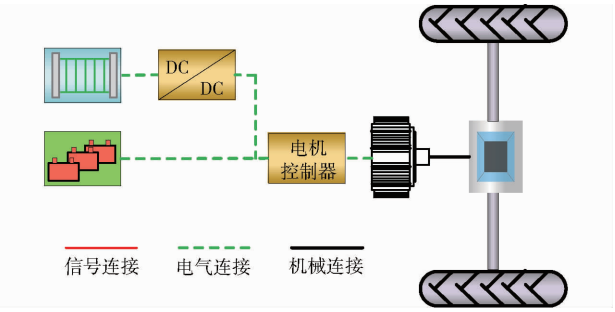


图 20　氢燃料电池/蓄电池混合动力原理图

Fig. 20　Hydrogen fuel cell/battery hybrid power schematic

仍需依赖燃料电池输出，增加燃料电池参与能量供给的频率与累积负载变化，不利于燃料电池的使用寿命[58]，如图 21 所示。

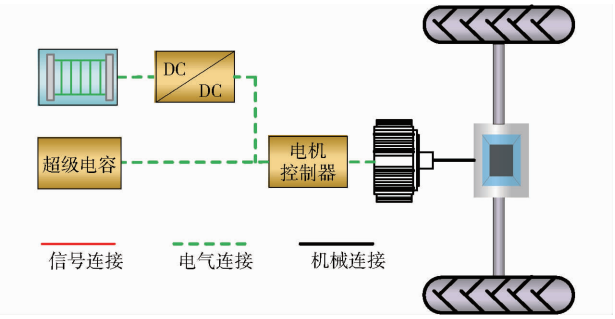


图 21　氢燃料电池/超级电容混合动力原理图

Fig. 21　Hydrogen fuel cell/supercapacitor hybrid power schematic

(3)氢燃料电池/蓄电池/超级电容动力系统

FC + B + SC 构型中，氢燃料电池为主能量源，动力电池与超级电容作为协同的辅助电源[59-61]。蓄电池具备较高的能量密度，适合提供持续能量，但其充放电电流受限，因而在回收制动能量或应对短时大功率需求时受限[62-63]，降低制动能量回收效率并影响瞬态动力性能。超级电容则适合承担短时、高频的充放电任务，从而补偿蓄电池在瞬态功率输出方面的不足。将二者与燃料电池结合可以同时兼顾续航能力和瞬态响应性，减小燃料电池的变载与启停次数，提高系统整体性能；但相应地，系统硬件和控制策略变得更复杂，动力匹配与能量管理的设计难度和实现成本显著增加，如图 22 所示。

1.5.2　关键技术研究现状

1.5.2.1　能量优化管理技术

能量管理策略是新能源拖拉机整车控制系统研发的核心，主要解决的是形如“A + B = C”的问题，通过合理分配各个能量源的输出功率，在满足整车需求功率的前提下，最大程度降低能源消耗。如图 23 所示，能量管理策略可以分为 3 类：基于规则、基于优化和基于学习。

(1)基于规则的能量管理策略

基于规则的能量管理策略以系统的状态为判断

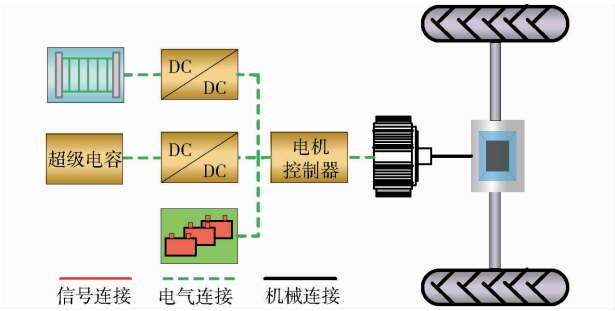


图 22　氢燃料电池/蓄电池/超级电容混合动力原理图

Fig. 22　Hydrogen fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power schematic

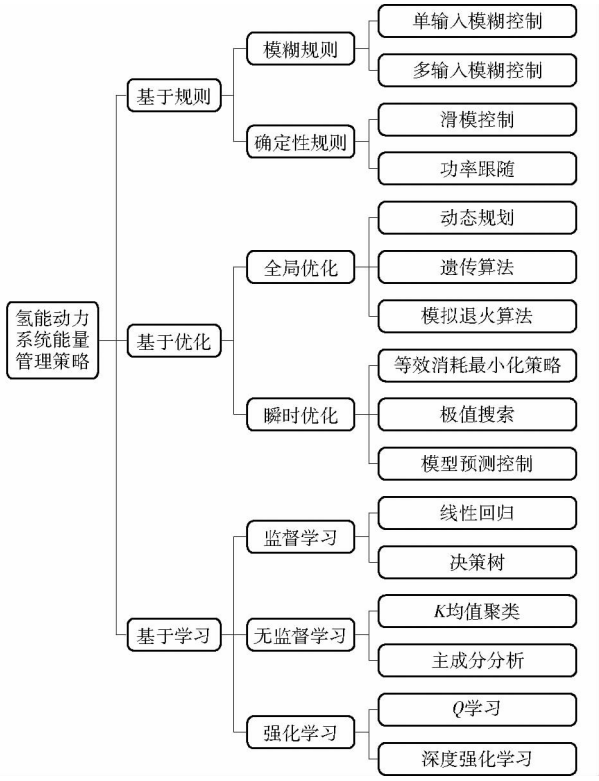


图 23　燃料电池动力系统能量管理策略分类

Fig. 23　Classification of energy management strategies for fuel cell power systems

依据，通过提前制定好的规则完成整车能量流的分配。规则制定基于工程师的经验或者实验标定，在实际应用中不需要感知车辆的运行工况。该策略具有鲁棒性和实时性强的优点，但对减缓燃料电池寿命衰减和降低整车氢耗方面效果有限，主要分为模糊规则和确定性规则。确定性规则即通过设定门限值为系统划分出若干工作模式，比如恒温器式、功率跟随式。相比于确定性规则，基于模糊逻辑的策略对于处理多参数、时变性、非线性的能量管理问题更具优势。

LEI 等[64]提出了一种基于最终状态约束的多维动态规划算法方法，通过高低频功率分配将氢气消耗控制在动态规划法基准的 95.2% 水平，有效改善了关键部件的工况与寿命；王成继[65]设计了基于

规则的功率跟随式控制策略,与同类传统燃油拖拉机对比,燃油经济性提高 21.8%;YANG 等[66]提出了一种将恒温控制策略、功率跟随式策略和模糊逻辑控制策略相结合的能量管理策略,并采用禁忌搜索算法,提高了整机经济性。MARTINI 等[67]提出了参考速度控制策略,并将转换器的当前参考命令使用功率请求函数进行评估,与传统拖拉机相比,碳排放量有效减少。

(2)基于优化的能量管理策略

基于优化的能量管理策略将能量分配问题表述为带有不等式约束的数学优化问题,通过最小化目标函数生成控制序列,以延缓电源衰退并提高能量利用率。按实现范围可分为全局优化和瞬时优化两类。前者基于整体行驶工况求解全局最优解,常用方法有动态规划、遗传算法、随机控制和模拟退火等。优点是结果靠近全局最优;缺点是需预知或准确预测全局工况、计算量大,难以实时应用,通常用于离线求解并作为基准或辅助策略改进。后者仅在当前或短期未来时域内追求最优,计算量小且不依赖全局工况信息,更适合实时控制,常见方法包括等效能耗最小化、模型预测控制等。

LI 等[68]将多种群遗传算法应用于 FC + B 构型,与功率跟随式能量管理策略对比分析,结果表明在犁耕工况和运输工况下,SOC 波动均减小,运行结束时,剩余 SOC 分别高出 11.22%、6.1%,理论氢燃料消耗量分别降低约 26.49%、36.21%。LI 等[69]针对燃料电池分布式驱动电动拖拉机,设计了一种基于自适应多分辨率分析理论的驱动功率分配策略,有效实现各能源之间解耦,在犁耕和运输条件下,等效氢消耗分别降低了 35.6% 和 43.89%。

(3)基于学习的能量管理策略

基于学习的能量管理策略通过数据驱动方法解决复杂非线性优化问题。按学习方式可分为监督学习、无监督学习和强化学习。监督/无监督主要用于分类、回归或聚类,常作为辅助;而强化学习因能在与环境交互中直接学得“状态→动作”的映射,适合控制与优化问题,因而成为混合动力系统能量分配的研究热点。

为了降低计算成本和提高燃料电池效率,SUN 等[70]提出了基于强化学习的等效消耗最小化策略,该策略利用强化学习算法得到了基于实验数据的功率分配方案,仿真结果表明,与现有的学习算法和优化方法相比,该策略能够获得较高的计算效率、较低的燃料电池功率波动和较高的氢气利用效率;为了进一步提高整车的氢气利用效率,LIU 等[71]提出了一种基于强化学习的在线递推能量管理策略,该策略通过对学习率、折扣因子、遗忘因子和余弦相似度变化率等重要参数的分析,从而优化了策略的在线更新能力,仿真和实验结果验证了所提策略的有效性和经济性,与基于规则的控制策略对比表明,所开发的策略性能优越,在长距离行驶时能耗显著降低;基于强化学习策略的计算强度大,为了减少计算量,LIU 等[72]提出了一种基于规则学习的能量管理策略,该策略利用庞特里亚金最小原则离线推导出燃料电池功率的最优控制顺序和动力电池在行驶过程中的充电状态轨迹,并使用 K - means 算法将最优解分层聚类到简化的数据集中,利用重复增量剪枝算法对潜在规则进行学习和分类,仿真结果表明,该策略计算强度较小,具有在线应用的可行性。

综上,改进并融合基于优化的方法以提高实时性、鲁棒性与工程可实现性,是拖拉机能量管理长期发展的重点方向。

1.5.2.2 储氢技术

目前主流的储氢技术分为高压气态储氢和低温液态储氢,其中高压气态储氢技术在国内外得到广泛使用,低温液态储氢技术在国外拥有较大发展,国内只有部分民航领域有小范围使用。催化剂、气体扩散层 GDL 等关键零部件或材料处在研究与小规模生产阶段,批量化产品的可靠性、耐久性还需要长期验证,主要技术为国外公司所掌握。中山大洋电机股份有限公司、思科涡旋科技(杭州)有限公司、上海汉钟精机股份有限公司等国内企业,均处于氢气循环泵的产品研发验证阶段,部分公司已实现小批量产品供货。碳纸、碳布是制备 GDL 的关键材料,基础材料是碳纤维;我国碳纤维研制从 20 世纪 80 年代中期才开始,目前尚处于小规模生产阶段,生产的碳纤维很难同时满足电堆对于低电阻、高渗透性、机械强度大等的要求,与国外高性能碳纤维材料相比仍有较大差距。上海河森电气公司、上海济平新能源科技公司均有小批量的碳纸生产能力。我国已将碳纤维列为重点支持的战略性新兴产业,在产业政策扶持下相关技术有望加速发展[73]。

1.5.3 国内外典型产品

国外,日本久保田公司展示的氢动力无人驾驶拖拉机,集成了氢燃料电池系统与自动驾驶功能,实现快速加油、高功率输出和零二氧化碳排放。奥地利斯泰尔公司与维也纳工业大学联合开发的 STEYR FCTRAC 拖拉机配备 14 kW·h 高压电池和 400 V 电气系统,可以产生 95 kW 的功率,替代了柴油发动机。德国芬特公司的氢燃料电池拖拉机基于芬特 700 系列,结合氢燃料电池与 25 kW·h 电池,为 100 kW 电动机提供动力,并驱动传动系统、液压泵

和动力输出轴。

在国内，国家农机装备创新中心与清华大学天津高端装备研究院等机构研制的 ET504－H 氢燃料电动拖拉机，采用氢燃料电池与锂电池的混合动力系统，搭载 5G 技术，实现无人化作业和实时环境感知，适用于平原和丘陵地带的农业生产。相关技术产品如图 24 所示。



(a) Kubota氢动力概念拖拉机　(b) STEYR FCTRAC

(c) H2Agrar项目原型机　(d) ET504-H

图 24　氢能混合动力拖拉机产品

Fig. 24　Hydrogen fuel cell hybrid tractor product

1.6　甲烷混合动力传动系统

1.6.1　结构特点与工作原理

甲烷混合动力系统以甲烷发动机作为主要动力来源，电力驱动系统充当辅助动力源作为补充和调节以及包括串联、并联、混联的智能耦合方案，以串联式甲烷混合动力传动系统为例，如图 25 所示。储气罐为双层真空绝热储气罐，可存储液态甲烷作为燃料储备并向甲烷发动机提供燃料来源。驱动系统中发动机与发电机机械连接，为单向动力源；电池组通过电耦合器与电动机电气连接，为双向动力源。整机可满足 3 种工作模式，分别为纯电驱动模式、纯发动机驱动模式、混合驱动模式。

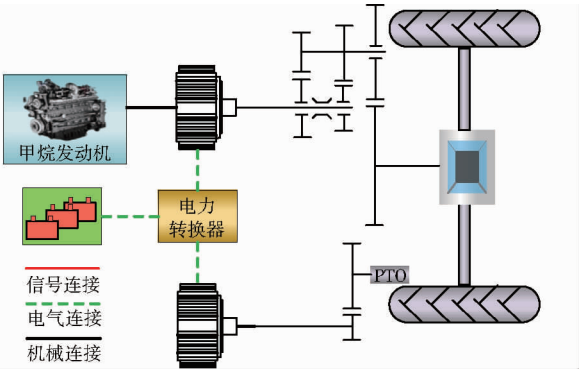


图 25　甲烷动力传动系统原理图

Fig. 25　Methane power transmission system schematic

1.6.2　关键技术研究现状

(1)甲烷发动机技术

甲烷作为燃料具有高辛烷值、较低碳含量和更清洁的燃烧特性，但其燃烧特性和燃料形态对发动机设计、控制与耐久性提出了特殊要求。

凯斯纽荷兰工业集团在天然气动力车辆领域长期居于市场领先地位。纽荷兰推出的新款甲烷动力概念拖拉机，搭载专用甲烷发动机，最大功率达 132.3 kW，最大扭矩为 740 N·m，还采用菲亚特动力科技于 1995 年首次推出的化学计量燃烧技术。该技术已广泛应用于其全线天然气发动机产品，实现了更低的排放与更高的能效。2023 年，凯斯纽荷兰发布全球首款液化天然气拖拉机纽荷兰 T7 LNG 型，相较于此前 T6 型号，T7 凭借液化天然气的高能量密度，将续航里程提升 1 倍以上，燃料容量增加 4 倍，改善了整机作业的水平[74]。

(2)燃料制备技术

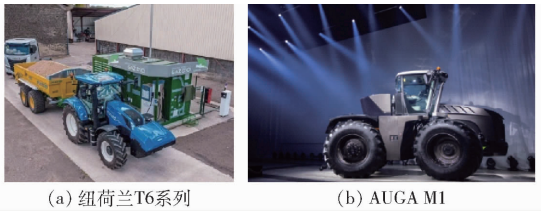
在甲烷燃料制备方面，通过对沼气进行净化处理，去除二氧化碳、硫化氢等杂质，再经提纯、压缩与液化等多道工序，最终制得可供使用的生物甲烷燃料。

我国已在沼气能源领域进行了一定探索，但目前行业整体仍以传统发酵技术为主，尚有提升空间。周淑霞[75]研究了沼气液化制取生物质 LNG 的关键技术，通过净化工艺去除二氧化碳、硫化氢等杂质，再经提纯、压缩与液化处理，最终获得生物甲烷燃料。国外，纽荷兰于 2009 年提出“能源独立农场”系统，实现了从农田残余物、作物废弃物到天然气，再到电力的资源转化路径。作为该系统的核心装备，T6 甲烷动力拖拉机首台样机于 2019 年在 Agritechnica 展会亮相，标志着甲烷燃料技术在农业机械领域的应用迈入新阶段。

1.6.3　国内外典型产品

国外，拖拉机甲烷混合动力传动系统已从概念阶段进入商业化应用。纽荷兰的 T6 系列已实现量产并在欧洲市场占据 12% 份额[76]，减排效果达 45% 以上。AUGA M1 采用创新生物甲烷-电力混合系统，续航能力突破 12 h。

国内，甲烷混合动力传动系统拖拉机的发展尚处于起步阶段，中国企业如柳工、潍柴雷沃等也积极布局此技术路线[77]。相关技术产品如图 26 所示。



(a) 纽荷兰T6系列　(b) AUGA M1

图 26　甲烷混合动力拖拉机产品

Fig. 26　Methane hybrid power products

2　新型动力传动技术发展难点

(1)电池容量和充电速率问题

电池是新能源拖拉机的核心部件，电池容量直

接影响拖拉机的续航里程,电池充电速率则会影响到拖拉机的工作效率。农业作业对“时效性”要求极高,电动拖拉机的电池容量需要足够大,才能保证电动拖拉机能够在较长时间进行连续作业,无需频繁充电。电池充电慢将导致单日作业量不足,可能无法在最佳农时内完成全部任务,最终造成作物减产或品质下降,直接对农户经济收益造成损失。

(2)控制精度和稳定性问题

当前,拖拉机新型技术的控制技术仍处于不成熟的阶段,控制系统的稳定性和自适应能力不足。在复杂多变的田间作业中,控制系统对负载突变、路面起伏等工况的感知和响应不够精准,导致动力输出出现顿挫或延迟,影响作业质量。控制系统在持续重载、温变剧烈的工况下易出现数据漂移或逻辑故障。此外,在面对农村地区复杂的电网波动、电磁干扰时,控制模块的抗干扰能力不足,引发传感器误报、执行器执行错误动作,轻则影响作业质量,重则导致设备故障停机。

(3)电驱动系统环境适应性问题

传统电机设计与农业极端作业工况之间存在适应性的矛盾。在持续重载耕作工况下,永磁同步电机虽然具备高功率的密度优势,但却面临着不可逆退磁风险,当电机温度因散热不足超过居里点时,磁通量衰减将直接导致扭矩输出能力下降。更为严峻的是,电机构造对田间恶劣环境的适应性不足,粉尘侵入会加剧轴承磨损与绝缘老化,土壤中的金属杂质吸附在永磁体表面可能引发局部短路。

(4)多能量源能量管理问题

目前的能量调度和控制策略尚未达到优化效率的水平,导致能量的利用率低,能源浪费较大。尽管新型传动系统在理论上能够提升能量利用效率,但在复杂多变的农田作业环境有很大不足。精确的能量需求难以预测,导致能量分配策略难以优化,造成能量浪费或动力不足。能量回收技术,如再生制动,在低速、频繁启停的农田作业中效果有限,且受限于土壤条件和作业模式。此外,现有的能量管理策略智能化程度不高,难以根据实时工况和作业需求进行动态调整,导致整体能量利用效率提升有限。

(5)新型能源制备与存储问题

在氢能与甲烷等清洁能源应用于农业机械的过程中,其制备效率、储运安全性和经济性仍存在诸多挑战。氢气方面,电解水制氢依赖大量清洁电力,能耗较高;生物质制氢则受限于原料收集困难和转化效率低。高压储氢体积能量密度有限,影响续航能力,氢脆效应会对储氢罐和管路材料的耐久性构成威胁,在振动大、负荷重的农机作业环境中尤为突出。甲烷方面,生物质原料规模化连续生产受制于季节性与地域性差异。压缩甲烷储压高但能量密度较低,限制了拖拉机单次作业时长,同时农机工况严苛,对其储存系统的密封性与安全性要求更高。

3 新型动力传动技术发展展望

未来,拖拉机新型动力传动技术将沿着智能化、绿色化与全场景适配发展。结合农业作业场景的区域差异性与能源资源的空间分布特征,动力换挡传动系统具有传动效率高、承载能力强、换挡平顺等优势,仍是当前 100 kW 以上大功率拖拉机的主流构型,适用于规模化农场的高速转场、重载牵引及深松整地等高强度作业。液压机械无级变速系统凭借其无级调速、牵引力连续可调及作业平顺性优异等特点,特别适用于复杂地形下的精耕细作作业。纯电驱动系统应充分发挥我国在动力电池产业链与制造规模上的全球优势,优先在电网基础设施完善、作业周期集中的平原及城郊区域推广应用,重点服务于中小型拖拉机在果园管理、设施农业及短时高强度作业等场景。油电混合动力系统融合了柴油机高能量密度与电驱动系统高响应性的双重优势,在电网覆盖薄弱、作业周期长的边远农区具备显著应用价值,可作为能源转型过渡阶段的重要技术补充。在零碳能源方面,氢能混合动力系统虽在理论上具备零排放、快速加注和长续航优势,但受限于当前绿氢制备成本高、储运安全性挑战大及加氢基础设施匮乏等现实约束,现阶段宜聚焦关键技术攻关与在可再生能源富集区的前瞻性试点。甲烷混合动力系统可有效利用畜禽粪便、秸秆等农业废弃物制取生物燃气,在畜牧养殖密集区构建绿色产业链闭环,具备良好的区域示范潜力。

综上所述,拖拉机动力传动技术发展应遵循近期以纯电驱动与先进机械传动并重、中期推进油电混合协同优化、远期布局氢能与生物燃气等多元零碳路径的梯次演进战略,通过材料创新、控制升级、系统集成与能源适配的深度融合,实现技术先进性、经济可行性与农业适用性的有机统一,全面支撑农业机械向绿色化、智能化、可持续化新阶段转型升级。

参 考 文 献

[1] 徐立友,张俊江,闫祥海,等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023,54(9):1 – 12.

XU Liyou, ZHANG Junjiang, YAN Xianghai, et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(9):1 - 12. (in Chinese)

[2] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(5):1 - 18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):1 - 18. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1 - 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(8):1 - 18. (in Chinese)

[5] 杨普,赵远洋,李一鸣,等. 基于多源信息融合的农业空地一体化研究综述[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):185 - 196.
YANG Pu, ZHAO Yuanyang, LI Yiming,et al. Review of research on integration of agricultural air-ground integration based on multi-source information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):185 - 196. (in Chinese)

[6] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021 - 10 - 24)[2025 - 09 - 10]. http://www.gov.cn/zhengce/2021 - 10/24/content_5644613.htm.

[7] 农业农村部印发《"十四五"全国农业机械化发展规划》[EB/OL]. (2022 - 01 - 06)[2025 - 09 - 10]. http://www.gov.cn/xinwen/2022 - 01/06/content_5666673.htm.

[8] 刘孟楠. 电动拖拉机设计理论及控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
LIU Mengnan. Study on design theory and control strategy of electric tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)

[9] 刘畅. 电动客车四挡 AMT 换挡控制策略优化[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
LIU Chang. Optimization of shifting strategy for electric buses equipped with 4 - AMT[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[10] 席志强,周志立, 张明柱, 等. 拖拉机动力换挡变速器换挡特性与控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11):350 - 357.
XI Zhiqiang, ZHOU Zhili, ZHANG Mingzhu, et al. Shift characteristics and control strategy of powershift transmission on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):350 - 357. (in Chinese)

[11] 岳明明. 大功率拖拉机传动系试验技术研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2014, 41(1): 11 - 14, 18.
YUE Mingming. Testing technology research on transmission system of large power tractor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2014, 41(1): 11 - 14, 18. (in Chinese)

[12] 朱思洪, 朱星星, 邓晓亭, 等. 拖拉机动力换挡变速箱液压系统动态特性试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 133 - 138.
ZHU Sihong, ZHU Xingxing, DENG Xiaoting, et al. Research on dynamic characteristics of hydraulic system of power shift transmission in tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(5): 133 - 138. (in Chinese)

[13] 席志强. 拖拉机动力换挡变速器控制系统研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
XI Zhiqiang. Study on control system of tractor power shift transmission[J]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2016. (in Chinese)

[14] YIN Xiang, LU Boyou. Development of tractor slippage virtual test system [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 310 - 315.

[15] 徐立友, 周志立, 彭巧励,等. 多段式液压机械无级变速器方案设计与特性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(21): 2641 - 2645.
XU Liyou, ZHOU Zhili, PENG Qiaoli, et al. Drive scheme design and characteristic analysis of multi-range hydro-mechanical CVT[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(21): 2641 - 2645. (in Chinese)

[16] 倪向东, 朱思洪, 欧阳大业, 等. 拖拉机液压机械无级变速器速比匹配设计与实验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 15 - 20.
NI Xiangdong, ZHU Sihong, OUYANG Daye, et al. Design and experiment of hydro-mechanical CVT speed ratio for tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 15 - 20. (in Chinese)

[17] ZHU Z, YANG Y, WANG D, et al. Energy saving performance of agricultural tractor equipped with mechanic-electronic-hydraulic powertrain system[J]. Agriculture, 2022, 12(3): 436.

[18] 魏超, 胡纪滨, 荆崇波, 等. HMT 变速器速比跟踪控制对发动机转速的调节规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 455 - 459.
WEI Chao, HU Jibin, JING Congbo, et al. Research of engine speed governing rule based on the speed ratio follow-up control

of hydro-mechanical transmission[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(5): 455 – 459. (in Chinese)
[19] 杨超杰,曹付义,冯琦,等. 基于双模糊 PID 算法的 HMCVT 恒转速输出控制[J]. 现代制造工程, 2021(10): 96 – 100, 153.
YANG Chaojie, CAO Fuyi, FENG Qi, et al. HMCVT constant speed output control based on double fuzzy PID algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(10): 96 – 100,153. (in Chinese)
[20] 王光明, 张晓辉, 朱思洪, 等. 拖拉机液压功率分流无级变速器换段规律研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 7 – 15.
WANG Guangming, ZHNAG Xiaohui, ZHU Sihong, et al. Shift performance of tractor hydraulic power-split continuously variable transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 7 – 15. (in Chinese)
[21] 朱镇, 高翔, 潘道远, 等. 液压机械无级变速器换挡控制策略研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(4): 527 – 534.
ZHU Zhen, GAO Xiang, PAN Daoyuan, et al. A shifting control strategy for hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(4): 527 – 534. (in Chinese)
[22] 郭占正, 徐立友, 孙冬梅, 等. 液压机械无级变速器动力连续换段过程建模与仿真[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 435 – 442.
GUO Zhanzheng, XU Liyou, SUN Dongmei, et al. Modeling and simulation of continuous power shift process of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 435 – 442. (in Chinese)
[23] 徐立友, 张俊江, 刘孟楠. 增程式四轮驱动电动拖拉机转矩分配策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 80 – 85,8.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, LIU Mengnan. Torque distribution strategy of extended range electric tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 38(3): 80 – 85,8. (in Chinese)
[24] BAEK S Y, BAEK S M, JEON H H, et al. Traction performance evaluation of the electric all-wheel-drive tractor[J]. Sensors, 2022, 22(3): 785.
[25] 刘孟楠, 周志立, 徐立友, 等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 358 – 366.
LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 358 – 366. (in Chinese)
[26] 李银平,刘立,靳添絮,等. 基于动态规划的电动拖拉机动力电源能量控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 403 – 410.
LI Yinping, LIU Li, JIN Tianxu, et al. Energy control strategy of electric tractor power supply based on dynamic programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 403 – 410. (in Chinese)
[27] 赵思夏, 刘孟楠, 徐立友. 电动拖拉机底盘多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 492 – 498.
ZHAO Sixia, LIU Mengnan, XU Liyou. Optimization design of electric tractor chassis based on multiple performance objectives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp. 1): 492 – 498. (in Chinese)
[28] YOO I, KIM B. A study of driving simulation considering the various working modes of electric tractor[J]. The Korea Academia Industrial Cooperation Society, 2013, 14(11): 5357 – 5365.
[29] 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. Optimization design of electric tractor chassis based on multiple performance objectives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412 – 420. (in Chinese)
[30] 陈黎卿, 詹庆峰, 王韦韦, 等. 纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 388 – 394.
CHEN Liqing, ZHAN Qingfeng, WANG Weiwei, et al. Design and experiment of electric drive system for pure electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 388 – 394. (in Chinese)
[31] Monarch's revolutionary fully electric, autonomous MK – V tractors now available commercially[EB/OL]. [2025 – 09 – 10]. https://www.agdaily.com/technology/fully-electric-autonomous-monarch-tractor-mk-v-available-commercially.
[32] 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 for drive system of extended-range electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 236 – 240. (in Chinese)
[33] 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)
[34] 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)
[35] LEE D H, KIM Y J, CHOI C H, et al. Development of a parallel hybrid system for agricultural tractors[J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2017, 62(1): 137 – 144.
[36] 黄思源. 拖拉机机电复合动力传动系统特性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019: 69 – 70.
HUANG Siyuan. Study on the characteristics of tractor electromechanical composite power transmission system[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019: 69 – 70. (in Chinese)
[37] 中国一拖首台 220 马力混合动力拖拉机成功下线[EB/OL]. (2022 – 07 – 29) [2025 – 09 – 10]. https://www.sinomach.com.cn/xwzx/zgsdt/2022_qydt/202207/t20220729_405865.html.
[38] 徐立友, 刘恩泽, 刘孟楠,等. 燃料电池/蓄电池混合动力电动拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 80 – 86,9.
XU Liyou, LU Enze, LU Mengnan, et al. Energy management strategy of fuel cell and storage battery hybrid electric tractor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 40(2): 80 – 86,9. (in Chinese)
[39] 周润东. 不同工况下串联式混合动力拖拉机能量分配策略研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 45 – 66.
ZHOU Rundong. Study on energy distribution strategy of tandem hybrid tractor under different working conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020: 45 – 66. (in Chinese)
[40] 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.
[41] 徐立友, 陶源,张俊江,等.考虑轨迹跟踪性能与经济性的无人驾驶 HMCVT 拖拉机分层协同控制策略研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):61 – 72,123.
XU Liyou, TAO Yuan, ZHANG Junjiang, et al. Hierarchical cooperative control strategy of unmanned HMCVT tractor considering trajectory tracking performance and economy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):61 – 72,123. (in Chinese)
[42] 时辉. 混合动力拖拉机动力系统设计研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014: 69 – 72.
SHI Hui. The design and research of het's power system[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014: 69 – 72. (in Chinese)
[43] RENIUS K T. Fundamentals of tractor design[M]. Springer,2020.
[44] Tractor of the future STEYR Konzept launched at Agritechnica 2019[EB/OL]. (2018 – 03 – 16) [2025 – 09 – 10]. https://highways.today/2019/11/13/steyr-konzept-agritechnica-2019.
[45] XU L, LI J, HUA J, et al. Adaptive supervisory control strategy of a fuel cell/battery-powered city bus[J]. Journal of Power Sources, 2009,194(1):360 – 368.
[46] 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)
[47] ZENG T, ZHANG C, HAO D, et al. Data-driven approach for short-term power demand prediction of fuel cell hybrid vehicles [J]. Energy, 2020,208:118319.
[48] LI X, XU L, LIU M, et al. Research on torque cooperative control of distributed drive system for fuel cell electric tractor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108811.
[49] BI H, WANG P, CHE Y. A capacitor clamped h-type boost dc-dc converter with wide voltage-gain range for fuel cell vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019,68(1):276 – 290.
[50] LI X, ZHANG M, YAN X, et al. Real-time estimation of barycenter position for fuel cell distributed drive electric tractor based on derived UKF[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(10): 2661 – 2685.
[51] VICHARD L, STEINER N Y, ZERHOUNI N, et al. Hybrid fuel cell system degradation modeling methods: a comprehensive review[J]. Journal of Power Sources, 2021,506:230071.
[52] SOLANO J, HISSEL D, PERA M. Fail-safe power for hybrid electric vehicles: implementing a selfsustained global energy management system[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018,13(2):34 – 39.
[53] 陈会翠, 裴普成. 质子交换膜(PEM)燃料电池变载过程动态模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014,54(10): 1298 – 1303.
CHEN Huicui, PEI Pucheng. Dynamic model of a proton exchange membrane (PEM) fuel cell during load changes[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2014,54(10):1298 – 1303. (in Chinese)
[54] 李奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LI Qi. Research on modeling and control of proton exchange membrane fuel cell system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
[55] 张立炎, 全书海. 燃料电池系统建模与优化控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

[56] EHSANI M, GAO Y, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

[57] 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.

[58] FANG L, QIN S, XU G, et al. Simultaneous optimization for hybrid electric vehicle parameters based on multi-objective genetic algorithms[J]. Energies, 2011, 4(3): 532 - 544.

[59] 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)

[60] POTTS J C, GIDDENS T D, YADAV S B, et al. The development and optimization of train operation in multiple interstations with multi-population genetic aevaluation of an improved genetic algorithm based on migration and artificial selection[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(1): 73 - 86.

[61] LI X, LIU M, HU C, et al. Parameters collaborative optimization design and innovation verification approach for fuel cell distributed drive electric tractor[J]. Energy, 2024, 292: 130485.

[62] CARIGNANO M G, COSTACASTELL R, RODA V, et al. Energy management strategy for fuel cellsupercapacitor hybrid vehicles based on prediction of energy demand [J]. Journal of Power Sources, 2018, 360: 419 - 433.

[63] RUAN J, WALKER P D, ZHANG N, et al. An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle [J]. Energy, 2017, 140: 291 - 306.

[64] LEI S, LI Y, LIU M, et al. Hierarchical energy management and energy saving potential analysis for fuel cell hybrid electric tractors[J]. Energies, 2025, 18(2): 247.

[65] 王成继. 燃料电池拖拉机动力系统设计与研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
WANG Chengji. Design and research of power system of fuel cell tractor[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[66] YANG H, SUN Y, XIA C, et al. Research on energy management strategy of fuel cell electric tractor based on multi-algorithm fusion and optimization[J]. Energies, 2022, 15(17):6389.

[67] MARTINI V, MOCERA F, SOMÀ A. Numerical investigation of a fuel cell-powered agricultural tractor[J]. Energies,2022, 15(23):8818.

[68] LI Y, LIU M, WANG Y, et al. Energy management optimization and validation of a hydrogen fuel cell-powered agricultural tractor based on hierarchical dynamic programming[J]. IEEE Access, 2024, 12: 21382 - 21401.

[69] LI X, ZHANG M, YAN X, et al. Power allocation strategy for fuel cell distributed drive electric tractor based on adaptive multi-resolution analysis theory[J]. Energy, 2023, 284: 129350.

[70] SUN H, FU Z, TAO F, et al. Data-driven reinforcement-learning-based hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2020,455:227964.

[71] LIU S, WU Z, CHEN X, et al. Deep reinforcement learning-based energy management strategy for hybrid electric agriculture tractor[C]//2023 5th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP). IEEE, 2023: 1095 - 1098.

[72] LIU M, LI Y, XU L, et al. General modeling and energy management optimization for the fuel cell electric tractor with mechanical shunt type[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108178.

[73] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 162 - 171.
LIU Yingdu, GUO Hongxia, OUYANG Xiaoping. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 162 - 171. (in Chinese)

[74] IT 之家. 全球首款液化天然气拖拉机发布:最大 270 马力, 燃料来自牲畜粪[EB/OL]. (2023 - 02 - 15)[2025 - 09 - 10]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1757909961461343883&wfr=spider&for=pc.

[75] 周淑霞. 沼气液化制取生物质 LNG 关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
ZHOU Shuxia. Research on key technologies on liquefed production of biomass LNG from biogas[D]. Ji'nan: Shandong University,2021. (in Chinese)

[76] 关群. 纽荷兰 T6 甲烷动力拖拉机亮相德国[J]. 农机市场,2019(12):54 - 55.

[77] 李明生,鄢玉林,谢守勇,等. 甲烷动力拖拉机研究现状及发展展望[J]. 中国农机装备, 2023(8):42 - 46.
LI Mingsheng, YAN Yulin, XIE Shouyong, et al. Research status and development prospect of methane-powered tractor[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(8):42 - 46. (in Chinese)