

电动拖拉机发展历程与研究现状综述

刘孟楠^{1,2} 雷生辉^{2,3} 赵静慧^{2,3} 孟志军^{2,4} 赵春江^{2,4} 徐立友^{2,3}

(1. 中国一拖集团有限公司, 洛阳 471039; 2. 拖拉机动力系统国家重点实验室, 洛阳 471039;

3. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 4. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 电动拖拉机作为农业节能减排的重要工具,也是未来农机装备产品的发展和转型方向之一,国内外进行了大量技术与产品尝试。从电动拖拉机技术角度入手,对电动拖拉机发展的各个阶段及其典型产品进行了梳理,总结了各发展阶段的技术特点与影响电动拖拉机技术发展的主要因素。基于国内外现有研究成果,对电动拖拉机研究的方案与设计技术、控制技术、仿真与试验技术的研究现状进行了分析,总结了各方向现有研究成果的特点。结合发展经历与研究现状,对未来电动拖拉机产品与技术的发展方向进行了展望。

关键词: 电动拖拉机; 发展历程; 研究现状; 技术展望

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0348-17

Review of Development Process and Research Status of Electric Tractors

LIU Mengnan^{1,2} LEI Shenghui^{2,3} ZHAO Jinghui^{2,3} MENG Zhijun^{2,4} ZHAO Chunjiang^{2,4} XU Liyou^{2,3}

(1. YTO Group Corporation, Luoyang 471039, China

2. State Key Laboratory of Power System of Tractor, Luoyang 471039, China

3. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

4. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: As an important tool for agricultural energy conservation and emission reduction, electric tractors are also one of the development and transformation directions of agricultural machinery equipment products in the future. A lot of technical research and product trials have been carried out at home and abroad. Starting with the concept of electric tractor technology, the stages of electric tractor technology development and its typical products are sorted out, and the technical characteristics of each stage of development and the main factors affecting the development of electric tractor technology are summarized. The development of battery technology directly affected the power supply mode and watt level as well as the change of the energy system model of electric tractors. The energy density and the cost of use were the main factors that affected the tractor's pure electrification. Compared with automobiles, tractors had higher load rates during plowing and rotary tillage. At present, the energy density level that can be achieved by battery products had a certain gap in supporting electric tractors in heavy farmland operations effectively and independently. The development of low-power pure electric dedicated plant protection models or the use of multiple energy systems on larger-power tractors was in line with the current state of battery technology and can provide common technical reserves for the realization of pure electric tractors in the future. Based on the existing research results at home and abroad, the current research status of the scheme and design, control technology, simulation and test technology of electric tractor research is analyzed, and the characteristics of existing research results in various directions are summarized. It is necessary to continue to form and improve the theoretical system of electric tractors in the future, so as to gradually achieve universal and standardized electric tractor whole machine and implements, agronomy, energy system, new energy generation and rural energy storage technology and application technology

收稿日期: 2022-06-23 修回日期: 2022-08-04
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1312300)和农业农村部:轻量化实用动力底盘及转运装备研发与产业化项目(NK2022160100)
作者简介: 刘孟楠(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事农机新型动力系统与智能控制技术研究,E-mail: liumengnan27@163.com
通信作者: 赵春江(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事智能农机装备与农业信息化技术研究,E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

matching and collaborative control. Combined with technologies such as Internet of Things, intelligent control and automatic driving to improve the intelligence level of electric tractors, the research results can provide reference for the development of related technologies.

Key words: electric tractors; development process; research status; technology expectation

0 引言

现代农业新型生产业态和新型生产模式的发展,对生产效率、环境保护、绿色节能等方面提出了更高要求^[1-3]。拖拉机作为农业生产中主要的动力源,传统拖拉机对柴油消耗量较大,产生的尾气对环境造成严重的影响,在温室大棚等密闭空间作业时,其排放的废气直接对工作人员和农作物的健康产生影响^[4-5]。随着人们生活品质的逐渐提升,绿色生态农业、庭院种植农业、设施园艺农业等非传统农业生产环境对绿色农机具动力的需求越来越迫切,农机产业新的发展理念向着电动化、绿色化和智能化方向发展^[6]。近年来,新能源技术的快速发展和电动拖拉机的研究开发为开发环保绿色型农机产品提供了新途径^[7]。

电动拖拉机是指由电力驱动的拖拉机,包含能源系统、驱动系统、整机系统,其中能源系统为电动拖拉机工作提供电功率,主要由蓄电池组组成,可以通过增程器、燃料电池或超级电容器作为辅助能源改善放电性能,电功率流方向由 DC-DC 转换器控制。驱动系统由驱动电动机、传动系统和行走装置组成,为整机行驶和牵引提供机械功率。整机系统是在能源系统和驱动系统的基础上,包含了 PTO、机身、悬挂装置等其他部分的电动拖拉机整体,用于实现电动拖拉机驱动、提升农机具以及转向和制动等^[8]。

本文回顾电动拖拉机发展的各个阶段技术特点及其典型产品,阐述电动拖拉机方案与设计技术、控制技术和仿真与试验技术的研究现状,分析各技术方向现有研究成果的特点,提出未来电动拖拉机产品与技术的发展方向和和建议。

1 电动拖拉机发展历程

电动拖拉机最早出现在 20 世纪初,电动拖拉机的发展历程可以划分为 3 个阶段。

1.1 早期阶段

早期发展阶段是 20 世纪 70 年代以前,该阶段电动拖拉机的主要特点是:①由于电池技术的限制,早期电动拖拉机主要依靠电轨的方式提供能源,作业范围受限。②受限于当时农机工业的总体水平,早期电动拖拉机结构较为简单,多数采用手扶式结

构,部分采用轮式和履带式结构。

1912 年,电动拖拉机最早由德国 Siemens 公司生产,额定功率为 36.8 kW,依靠电轨供电,采用轮式结构,用于驱动旋耕机作业,之后又推出了二代电动拖拉机,额定功率为 2.9 kW,采用手扶式结构,用于割草、播种等轻载作业^[9]。1937 年,苏联在 ЦТ3-60 型拖拉机基础上创制了第一台履带型电动拖拉机,额定功率 48 kW,电压 500 V^[10]。1941 年,瑞士 Gründer 公司研制了 2~5 kW 的手扶式电动拖拉机,由 Boveri 型电动机驱动,可以实现更换 2 至 3 种不同配套农具,进行多种作业^[11]。1945 年,德国 Horstmann 公司推出了 3~6 kW 手扶电动拖拉机,机身前后两侧配有单铧犁和把手,可双向工作^[12]。1948 年,苏联在 GT3-HATÿ 型拖拉机的基础上创制了 ÷T-5 型电动履带拖拉机,采用额定电压为 1 000 V 的高速电动机,节省了制造成本;之后,在 ЦТ3-2 型和 ЦТ-54 型轮式拖拉机的基础上创制了 ДТ-36HATÿ 型和 XT3-15 型电动轮式拖拉机。1960 年,哈尔滨松江拖拉机厂成功试制了我国首台电动拖拉机电牛 28,电动机功率为 28 kW,额定电压为 1 100 V,不具备 PTO 输出功能;同年,又研制出了轮式电牛 33 和履带式电牛 55 两款电动拖拉机,电缆长度达到 450 m 以上^[13]。早期电动拖拉机作业需要配套电线杆支撑电缆,耕作过程中需要移动电线杆,后来采用架设电轨的方法提高了应用的便捷性,电动拖拉机的作业范围受到电轨架设范围限制,过长的电缆会增加电力传输的损耗, Siemens-Schuckert 公司发明了用于快速更换电轨的挂钩和移动电站,提出了中继供电模式,一定程度上改善了电动拖拉机的作业范围^[14]。相关产品如图 1 所示。

1.2 中期阶段

从 20 世纪 70 年代起至 21 世纪初,电动拖拉机经历了中期发展阶段,该阶段的主要特点是:①随着蓄电池技术的发展,电动拖拉机的供能方式由电轨形式转化为车载电池,增加了电动拖拉机的作业范围和实用性。②受限于铅酸电池能量密度和当时电子控制技术水平,中期阶段的电动拖拉机功率较小,连续作业能力较弱,不具备农田重负荷作业能力,主要从事割草、园艺等家庭轻型作业。

20 世纪 70 年代初,美国通用电气公司生产了 Elec-Trak 系列电动拖拉机,由铅酸电池驱动永磁

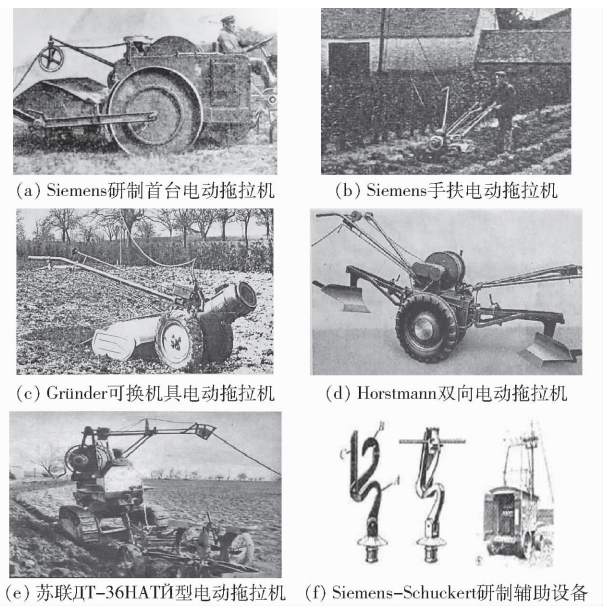


图 1 早期电动拖拉机相关产品

Fig. 1 Electric tractor product in early development period

直流无刷电动机,额定功率范围为 5.9 ~ 11 kW,控制器由继电器和电阻器组成,主要用于草坪修剪,可以满足家庭轻度劳作的需要。同时期,美国 New Idea 公司和 Wheel Horse 公司相继研发了 EGT80 型和 E-81 型等电动拖拉机机型^[15-16]。20 世纪 80 年代,美国 Allis-Chalmers 公司利用燃料电池技术开发了 14.7 kW 电动拖拉机产品,能源系统由 1 008 节单体电池组成,通过调节并联燃料电池的数量控制拖拉机行驶速度。20 世纪 90 年代以后,伴随着电力电子及控制技术的发展,小型化、易操作和多功能等特点的电动拖拉机应运而生。美国通用电气公司推出了 e-ATV 系列电动拖拉机,该机型配备密封铅酸电池,其额定功率范围为 4.8 ~ 6.2 kW,拖拉机由直接安装在后桥的直流驱动电机驱动,通过电磁调速实现无级变速^[17]。加拿大 Electric Tractor 公司生产的 Electric Ox 系列电动拖拉机,额定功率范围为 4 ~ 5.8 kW,由 6 组铅酸电池组成能源系统,驱动轮和机具分别由独立的电动机驱动,采用变速器、电子差速器等传动,具有制动能量再生功能,用于割草、清扫等作业^[18]。相关产品如图 2 所示。

1.3 当前阶段

21 世纪初至今,受能源形势影响,新能源技术快速发展,电动拖拉机发展呈现 4 条技术路线,分别是:①继续发展小型化的专用机型,使用先进的集成电力电子技术,通过提高电动拖拉机的轻便性和转向灵敏性提高产品的性能。②利用增程式电驱技术,通过燃油发电机组或燃料电池等辅助能源增加电动拖拉机的额定功率和续航里程,提高电动拖拉机对大功率农田作业的适应性,并逐



图 2 中期电动拖拉机相关产品

Fig. 2 Electric tractor product in medium-term development period

步降低混合度,向较大功率纯电动拖拉机发展。③利用新能源方面的前沿技术,由小型化的专用产品向一般用途电动拖拉机发展,逐步增加整机的额定功率与续航时间。④利用智能算法、环境感知、导航定位和路径规划等技术,电动拖拉机逐渐向智能化、无人化方向发展。

2009 年,白俄罗斯明斯克公司推出了搭载柴油发电机组增程器的 Belarus-3023 型电驱动拖拉机,额定功率达到 225 kW,与其相同功率的动力换挡拖拉机相比,在燃油消耗和作业效率方面均有提升^[19]。同年,New Holland 公司研制了搭载 NH₂ 型燃料电池电驱动拖拉机,额定功率达到 100 kW,由氢燃料电池发电驱动整机工作^[20]。2013 年,美国 Cub Cadet 公司推出的 RZT 系列电动拖拉机,可连续工作 1 h,采用轮边电机差速转向的方式,实现了零半径转向功能^[21]。2014 年,中国一拖集团有限公司开发了东方红 ET1400 型电动拖拉机,额定功率 14 kW,采用高能量密度的磷酸铁锂电池组,重负荷连续作业时间可达 2 h。2017 年,美国 John Deere 公司推出了 SESAM 型电动拖拉机,额定功率为 260 kW,可以实现近 2 h 重负荷作业或近 4 h 一般作业续航时间^[22]。同年,德国 Fendt 公司开发了 e100 Vario 型电动拖拉机,额定功率为 100 kW,采用锂离子电池,额定容量为 100 kW·h,该机型具有外接兼容电源插口,可以为配套农具供电^[23]。2018 年,国家农机装备协同创新中心创制了无人驾驶电动拖拉机概念样机——超级拖拉机 I 号,通过了农田作业试验^[24]。2019 年,瑞典的 Husqvarna 公司推出的零半径转向骑乘式电动拖拉机,整机额定功率

2 kW, 采用前置式机具降低轴距, 续航性能满足庭院作业要求^[25]。同年, 美国 John Deere 公司发布了 Joker 型无人驾驶电动拖拉机, 整机没有驾驶舱, 总功率为 500 kW, 可实现无人或遥控作业^[26]。2020 年, 日本久保田公司推出了一款纯电动和自动驾驶的概念拖拉机 Kubota X, 该产品采用了锂离子电池和太阳能组合, 4 个电动履带式驱动轮可以独立控制, 同时还可以通过改变拖拉机高度适应牵引力和植物高度变化^[27-28]。2020 年, 美国 Monarch Tractor 公司开发了一种全电动自动拖拉机传动系统, 能够提供 30 kW 的持续输出功率和 50 kW 的短时峰值功率, 同时还具有野外发电机、全地形车和无人驾驶等功能^[29]。2021 年, 江苏悦达智能农业装备有限公司成功研制了黄海金马 YL254ET 型电动拖拉机, 以磷酸铁锂电池为动力源, 采用双电机工作模式, 可满足不同机具作业速度要求^[30]。2021 年, 国家重点研发计划项目“智能电动拖拉机开发”(2016YFD0701000)项目组研发了 SF350E、SF250E 两款一般用途电动拖拉机, 连续作业时间达到 6 h, 大幅提升了整机续航能力与实用性。2021 年, 山东超星智能科技有限公司推出一款锂电无人驾驶拖拉机, 具备无人作业、协同作业等智能化功能^[31]。2021 年, 中国科学院智能农业机械装备工程实验室研发的鸿鹄 T150 型超级拖拉机, 最高可达 147 kW, 支持快速换电^[32]。相关产品如图 3 所示。



图3 当前阶段电动拖拉机相关产品

Fig.3 Electric tractor product in current development period

2 电动拖拉机技术研究现状

根据近年国内外学者研究内容划分, 电动拖拉机技术研究主要集中在方案与设计方法、控制技术、仿真与试验技术 3 方面。

2.1 方案与设计技术

对现有文献中提出的电动拖拉机结构方案分类, 如图 4 所示。按能源系统中是否有增程器, 划分为纯电动拖拉机和增程式电动拖拉机。按照行走装置结构的差异分为手扶式电动拖拉机、履带式电动拖拉机和轮式电动拖拉机。按照功率分流的物理形式和整机包含的电动机数量分为机械分流的单电动机电动拖拉机和电力分流的双电动机电动拖拉机; 其中, 单电动机电动拖拉机由驱动电动机提供作业全部机械功率, 双电动机电动拖拉机由驱动电动机提供用于行驶和牵引的驱动功率, 由 PTO 电动机提供驱动农机具的功率。

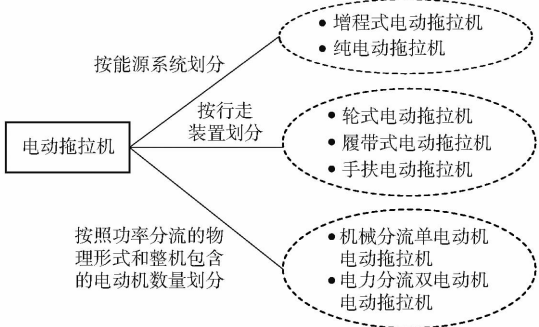


图4 现有电动拖拉机分类

Fig.4 Classification of electric tractor structure in current period

2.1.1 增程式电动拖拉机

增程式电动拖拉机能源系统由增程器和蓄电池组构成, 增程器通常具有的形式为柴油发电增程器、燃料电池增程器等。相较纯电动拖拉机, 增程器的功率经过多次能量转化用于作业, 能量使用效率较低; 续航性相同时, 增程式电动拖拉机蓄电池组容量下降 60% 以上, 成本较低, 整机便于布置。增程式电动拖拉机可作为传统拖拉机向纯电动拖拉机转变的过渡方案, 用于解决电池成本、功率和能量密度产生的应用问题。赵静慧等^[33]设计了采用柴油发电式增程器的增程式电动拖拉机结构方案, 如图 5 所示。该增程式电动拖拉机具有两种工作模式, 当蓄电池组荷电状态高于控制阈值时, 增程器关闭; 当蓄电池组荷电状态低于控制阈值时, 启动增程器, 为蓄电池组充电, 增加整机续航时间。整机由驱动电动机驱动, 动力输出轴由变速器中间轴引出, PTO 转速随车速变化, 仿真结果表明, 对比传统拖拉机, 燃油消耗率提高 34.4% 以上。VOGT 等^[34]利用车载光

伏系统吸收太阳能作为增程器,设计了用于家庭农场的小型增程式电动拖拉机,全周期内经济成本较好。

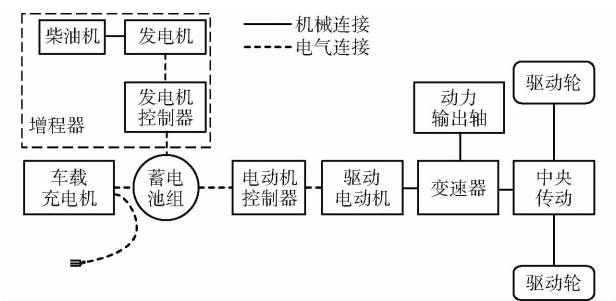


图 5 增程式电动拖拉机结构方案

Fig. 5 Structure scheme of extended range electric tractor

2.1.2 纯电动拖拉机

单电机式电动拖拉机由机械装置将驱动电动机输出的机械功率分别传递至驱动轮和 PTO。

相关研究成果在结构形式和设计方法上具有一定差异。高辉松等^[35-36]设计的单电动机电动拖拉机,驱动电动机与变速器之间采用了带传动形式,避免了过载对驱动电动机产生的影响。周志立等^[37]和方树平等^[38-40]在单电动机电动拖拉机基本结构基础上,提出了驱动系统的参数计算方法,进行了牵引性能分析。陈黎卿等^[41]针对丘陵山区耕播工况特点提出了驱动系统参数设计方法。SEO 等^[42]通过有限元法和等效磁路模型提出了单电动机电动拖拉机永磁同步电机参数设计方法,对 26.8 kW 单电机电动拖拉机进行了实例设计。张宇等^[43-44]设计的单电动机电动拖拉机取消了离合器和变速箱,采用开关磁阻电动机,PTO 由中央传动大锥齿轮轴引出。相关结构方案如图 6 所示。

现有单电动机电动拖拉机的优点为驱动轮输出牵引动力和 PTO 输出旋转动力可以达到拖拉机额定功率,动力性较好。局限性为:① PTO 与驱动电动机刚性连接,与驱动轮机机械耦合,拖拉机难以独立输出旋转动力。② PTO 仅能以同步式转速工作,导致农机具转速跟随车速变化,无法进行调节,适应不同农艺要求的能力较差。

双电机式电动拖拉机的驱动轮和 PTO 由独立的电动机驱动,可以根据工况需要独立调速。徐立友等^[45]提出了双电动机独立驱动式电动拖拉机结构和设计方法。该方案存在两条独立的功率流:①蓄电池组→DC-DC 转换器→电力母线→驱动电动机控制器→驱动电动机→中央传动,输出牵引动力。②蓄电池组→DC-DC 转换器→PTO 电动机控制器→PTO 电动机→分动器,由分动器输出旋转动力并分动至分置式液压系统,输出提升动力。该方案的优点为:①可以实现 PTO 独立输出旋转动力。

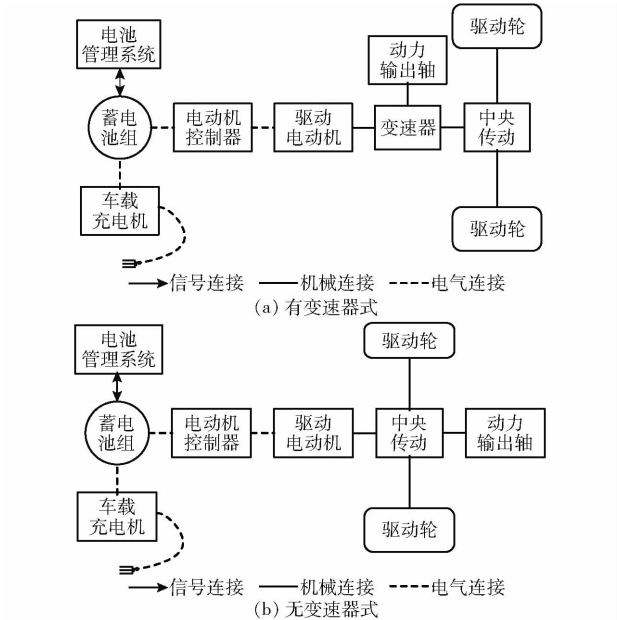


图 6 单电动机电动拖拉机结构方案
Fig. 6 Structure scheme of electric tractor with single motor

②由于驱动电动机和 PTO 电动机控制过程相互独立,可以通过电动机调速控制使 PTO 处的转速在跟随式转速和标准转速之间切换,农艺适应性较好。局限性为:驱动电动机和 PTO 电动机二者额定功率之和等于拖拉机额定功率,驱动轮和 PTO 无法单独输出拖拉机额定功率,动力性较差。陈燕呢和李同辉等^[46-47]提出了具有一定功率耦合功能的双电机电动拖拉机驱动系统。该结构中,PTO 由主电动机驱动,辅助电动机与主电动机功率通过机械装置耦合后传递至驱动轮,可使驱动轮输出额定功率,PTO 无法输出额定功率。该结构改善了牵引作业时的动力性。匹配农机具作业时,主电动机转速保持在 540 r/min 或 1 000 r/min 附近,PTO 可按照标准转速工作;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,整机调速过程主要依靠变速器。相关结构方案如图 7 所示。

徐立友等^[48]设计了具有双电动机功率耦合和解耦切换功能的功率汇流变速器传动总成,通过改变切换同步器的状态,实现了双电动机独立驱动和耦合牵引两种作业模式。徐立友等^[49-51]在此基础上设计了同时实现双电机功率耦合至驱动轮或 PTO 的功率分汇流变速器传动总成装置,具有双电动机独立驱动、耦合牵引和耦合驱动农机具 3 种作业模式。李书苑等^[52]设计了多种基于行星齿轮机构的双电动力耦合结构方案,基于 Simulation X 搭建了动力耦合装置的仿真模型,通过对比各方案运动学仿真结果,优选出了最终动力耦合装置传动方案。

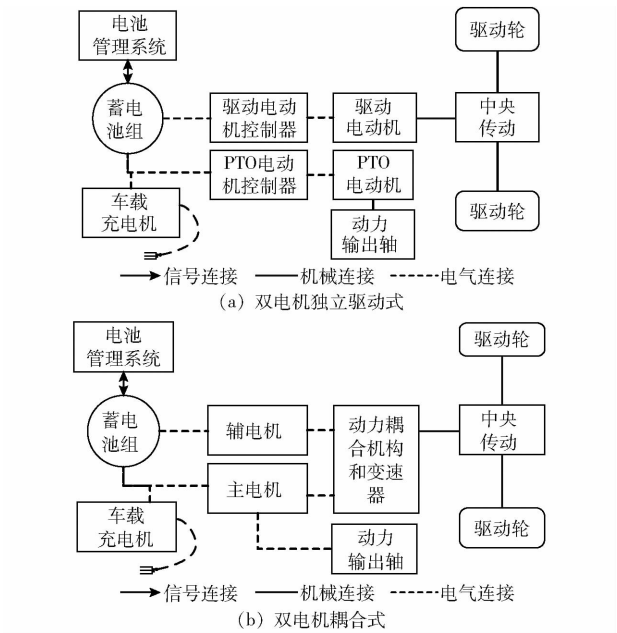


图 7 双电动机电动拖拉机结构方案

Fig. 7 Structure scheme of electric tractor with double motor

典型双电机拖拉机变速器结构示意图如图 8 所示。

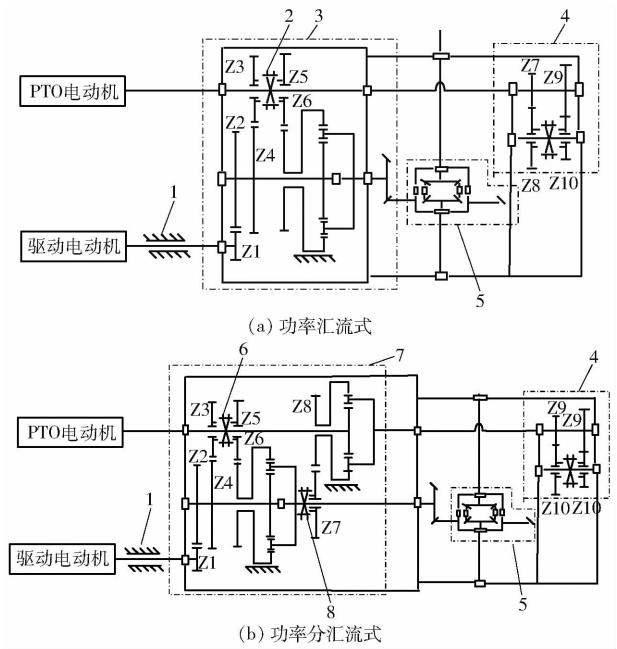


图 8 典型双电机传动系统结构示意图

Fig. 8 Typical double-motor drive system structure diagram
1. 驱动电动机端制动器 2. 切换同步器 3. 单向功率耦合系统
4. PTO 变速器 5. 中央传动 6. 切换同步器 I 7. 双向功率耦合系统 8. 切换同步器 II

2.1.3 其他类型电动拖拉机

现有研究成果中还包含对于轮边电动机式和履带式等特殊行走方式的电动拖拉机设计。KAZUAKI 等^[53]设计了一种轮边电动机驱动式电动拖拉机,整机系统采用电力耦合,由 PTO 电动机驱动中置或后置式农机具,通过控制系统进行差速控

制。TIGUE 等^[54]设计了履带式电动拖拉机,整机由驱动电动机提供功率,可采用电池组或柴油发电机组供电,具有在传统履带拖拉机上快速改装的特点。杨增福团队^[55-58]提出了微型遥控履带式电动拖拉机的设计方法,进行了参数计算,开发了物理样机。管春松等^[59-60]也对电动履带拖拉机设计方法进行了研究。HUBERTUS 等^[61]设计了手扶式纯电动拖拉机,该机型在机罩位置装配光伏发电设备,具有增程功能,采用具有双向动力输出功能的驱动电动机连接驱动轮与小型旋耕机,可根据工况需要与单轴车身组成骑乘式电动拖拉机。史俊龙等^[62]提出了一种手扶式电动拖拉机驱动系统方案,分别针对牵引作业和旋耕作业工况需求,对传动系统参数进行了设计。其他类型电动拖拉机结构如图 9 所示。

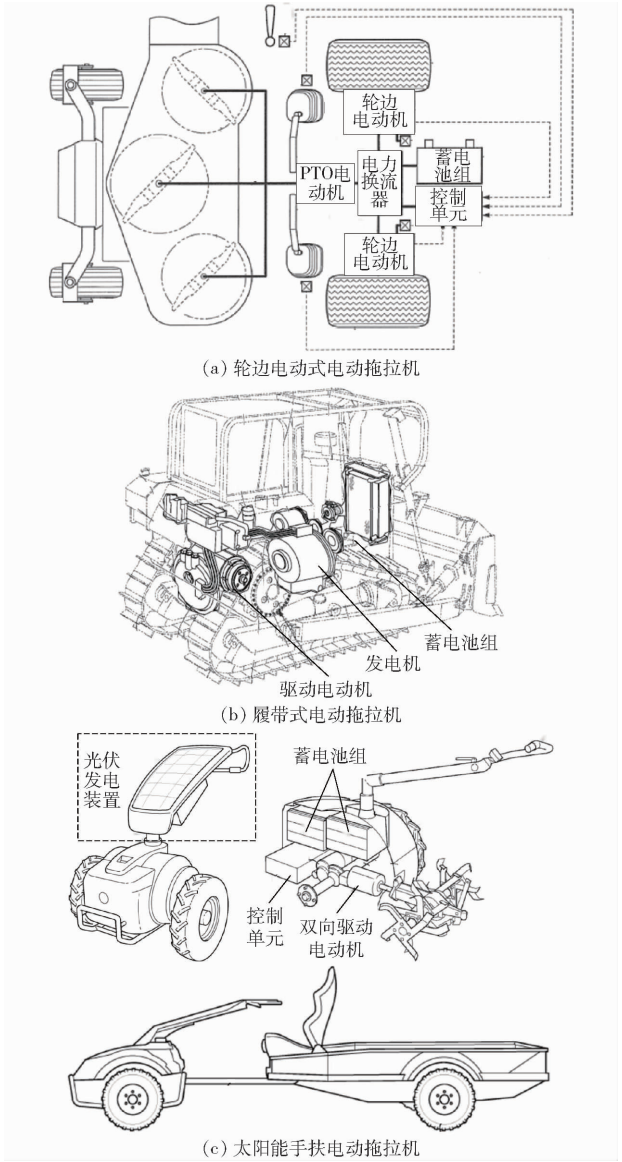


图 9 其他类型电动拖拉机结构

Fig. 9 Other types of electric tractor structure

电动拖拉机设计研究成果提出了较多设计方案,对于工程开发过程提供了参考。总结现有技术

方案,可以得出:①从整机工作原理角度,纯电动拖拉机的结构主要为机械分流的单电动机电动拖拉机和电力分流的双电动机电动拖拉机。②相关研究成果提出的设计方案独立性较强,涉及结构原理和结构设计方法的内容较少,缺乏结构差异对整机功能性影响的对照性分析。③部分研究成果中提出的结构方案、设计方法、数学模型等专用性较强,一般性和通用性特点不明显。④主要针对驱动系统设计,对于电动拖拉机能源系统、工作装置等整机系统的原理和设计方法研究内容较少。

2.2 控制技术

电动拖拉机以机组形式进行作业,作业工况种类繁多,需考虑驱动系统和整机系统同时工作带来的能量管理和协同控制问题,控制系统设计的合理性影响整机的农艺适应性及作业质量。现有电动拖拉机控制技术研究成果主要集中在能量管理策略、驱动系统控制策略和通信系统设计等方面。

2.2.1 能量管理技术

能量管理对电动拖拉机的性能影响较大,对于纯电动拖拉机,通过对蓄电池组充放电过程有效控制,可使放电过程满足不同工况对电功率的需求,尽可能地提高电池的使用寿命^[63-66]。对于增程式电动拖拉机,通过控制增程器运行状态和时间,可有效降低增程产生的燃油消耗^[67-69]。

现阶段,对电动汽车蓄电池的能量管理研究较为集中。对具有复杂田间作业特点的拖拉机而言,其能量管理更为复杂,电动拖拉机相关的能量管理研究文献较少。对于纯电动拖拉机,刘孟楠等^[70]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的电动拖拉机能量管理策略。夏长高等^[71-73]采用模糊算法制定规则,提出了优化蓄电池放电过程的电动拖拉机能源系统模糊控制策略。对于增程式电动拖拉机,XU等^[74]通过对增程式电动汽车的恒温 and 定点能量管理策略进行改进,提出了一种以预估耕作面积为控制变量的增程式电动拖拉机荷电状态阈值调整能量管理策略,使增程器根据耕作面积和作业功率消耗自动改变启动控制阈值,提高了整机对于动力电池的利用效率,降低了燃油消耗。TRITSCHLER等^[63]以改善能源系统中燃料电池的电能利用效率为目标,通过数学建模模拟推算的方法,提出了优化燃料电池运行状态的电动拖拉机能量管理策略。李银平等^[75]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,利用 Matlab/Simulink 建模对控制策略进行仿真。黄天乐

等^[76]使用 Matlab/Simulink 软件搭建了双电机构型电动拖拉机能量管理系统的仿真模型。刘静等^[73]提出一种基于锂离子电池和超级电容的双电源电动拖拉机,并对拖拉机在犁耕作业工况的能量管理控制策略进行了研究。

电动拖拉机能量管理策略研究现状特点为:①被控对象的能量系统除蓄电池组外,具有其他辅助能源装置,如超级电容、燃料电池、增程器。②能量管理的方法为控制蓄电池组与辅助能源之间的功率分配过程,从而改善蓄电池组的放电性能或辅助能源的燃料消耗情况。③提出的能量管理策略独立于电动拖拉机整机控制框架之外,缺乏在整机控制中实现方法的研究。

2.2.2 驱动系统控制技术

驱动系统控制策略的主要目的为通过控制驱动电动机、PTO 电动机、变速器的工作状态,改善电动拖拉机在不同复杂工况下的作业性能^[77-78]。

LIU 等^[79]以驱动电动机能量利用效率最高为目标,通过推断驾驶意图和目标转矩,基于粒子群算法提出了电动拖拉机驱动系统经济性控制策略。徐立友等^[80]基于拖拉机犁耕作业的轴荷波动特点,基于模糊逻辑算法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,该研究推断目标转矩作为控制变量,以前、后轮边电动机的转矩分配因数作为控制信号,可将驱动轮滑转率控制在特征滑转率以内,改善了牵引性能。ROMING 等^[81]对轮边电动机式电动拖拉机进行研究,采用 MAP 控制的方法提出了驱动系统牵引和差速转向控制策略,改善了牵引作业时因受力不均产生的双边驱动轮转速差异情况。张建舟^[82]基于模糊 PID 方法设计了电动拖拉机驱动电动机控制策略,并针对大电流放电过程设计了相应控制方法,进行了仿真分析。谢斌等^[83]基于 myRIO 系统提出了一种电动拖拉机驱动系统控制器硬件架构方法,运用 LabVIEW/FPGA 编写了 ARM 控制流程图和 I/O 驱动程序,测试结果较好。CHEN 等^[84]以提高驱动电动机直接转矩控制的响应特性为目标,提出了基于转速双闭环 PID 控制和电流内环 PWM 控制的驱动电动机控制策略。武仲斌等^[85]针对电动拖拉机田间巡航作业工况,采用期望转矩修正目标转矩的方法提出了驱动电动机波动转矩抑制控制策略,改善了巡航作业时的平顺性。SUNUSI 等^[86]研究了一种有效且可行的方法来估算与最大牵引力和低土壤扰动相对应的最佳滑移率。采用稳健的积分滑模控制方案将滑移率调节在保证高牵引力的最佳估计值,并通过仿真和现场试验验证了所提出的系统是有效的。房秋悦等^[87]针

对拖拉机的典型作业工况,提出了电动拖拉机作业时的转矩控制策略。BAEK 等^[88]设计、开发和评估了基于动力传动和电气系统的电动全轮驱动拖拉机的牵引性能。通过对电动四轮驱动拖拉机的作业性能和牵引性能的分析,与传统拖拉机的比较,为拖拉机电力驱动系统的改进提供了方向。

电动拖拉机驱动系统控制策略研究现状特点为:①主要集中在驱动电动机控制,类型有驱动电动机能量使用效率优化控制、轮边电动机的差速和转矩分配控制和驱动电动机动态响应控制。②控制方法主要是在电动机直接转矩控制基础上,结合拖拉机工况和载荷特点控制期望转矩信号,实现控制目标。③MAP 控制、模糊 PID、智能算法等现代车辆控制技术得到了应用。④驱动电动机控制过程较独立,缺少对传动系统控制的研究。

2.2.3 通信技术

通信系统用于实现整机控制框架内各通信节点之间收发信息,通信协议是通信系统执行的内在规则,其类型由通信总线决定。目前电动拖拉机以 CAN 总线为主进行通信。根据 CAN 总线的标准协议制定通信协议,常用的标准协议有 ISO 11783、SAEJ 1939、ISO 11898 等。CAN 总线通信的负载率等通信效果主要由通信系统的拓扑结构决定,常用的拓扑结构有总线型、星型、环型、树型结构^[89]。

目前,电动拖拉机通信协议的研究成果主要集中在国内。陈燕呢等^[90]基于 ISO 11783 标准协议设计了双电动机电动拖拉机通信系统,通过定义网络节点设计了树型拓扑结构;设计了报文标识符,制定了 CAN 总线网络通讯协议。徐立友等^[91]根据双电动机电动拖拉机的结构和控制特点,划分了 CAN 通信网络节点,定义了各节点功能;采用图论原理对各拓扑结构进行了建模,对比了总线每秒总信息量和节点每秒信息量,并选择高低速双总线结构设计了电动拖拉机通信网络拓扑结构。电动拖拉机 CAN 总线拓扑结构如图 10 所示。

LIU 等^[92]基于 ISO 11783 协议设计了一种分布式动力电动拖拉机的 CAN 通信网络系统。通过 dSPACE 仿真平台和 CANoe 软件对通信系统的硬件功能和通信效果进行测试。测试结果表明,所设计的 CAN 总线网络系统的通信效果良好,总线负载率约为 12%。

电动拖拉机通信研究现状特点为:①研究内容主要包含拓扑结构设计和通信协议制定。②已有研究成果采用的标准协议为主要用于拖拉机、收获机等农业机械的 ISO 11783 协议或主要用于重型车辆或电动车辆的 SAE J1939 协议。③总线型拓扑结构

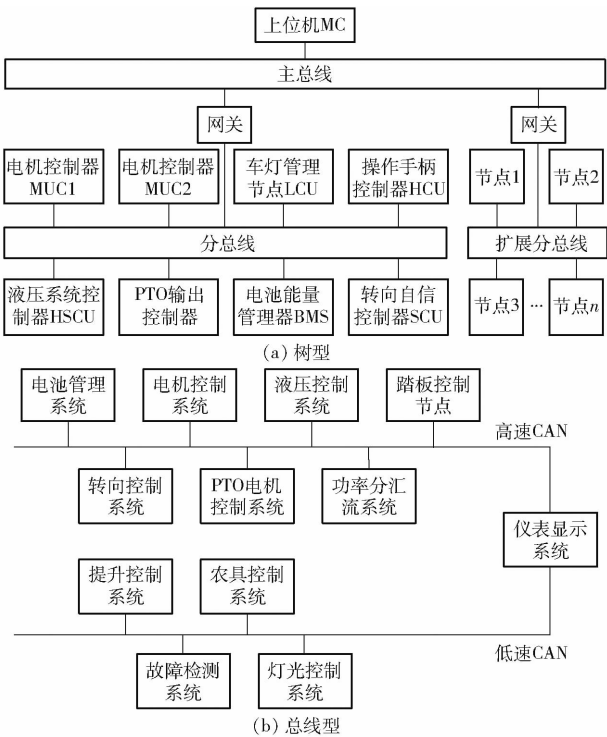


图 10 电动拖拉机 CAN 总线拓扑结构

Fig. 10 Electric tractor CAN network with bus structure

可以满足电动拖拉机通信需要,具有结构简单、可靠性高的优点。

综上,目前电动拖拉机控制技术的研究主要是对控制策略进行研究,提出的驱动电动机控制策略较多,针对电动拖拉机变速器的控制研究较少。各研究成果独立性较强,需要对整机系统控制方法,特别是 PTO 和工作装置的控制策略进行研究,在整机系统框架内分析各种控制方法之间的相互作用关系和整机控制效果。

2.3 仿真与试验技术

仿真与试验技术是用于车辆技术研究与开发过程中的主要验证方法。其中车辆仿真技术主要是在产品开发的前期或中期,通过建立数学模型进行时域内闭环数据计算的方法对车辆性能进行预测和分析。试验技术主要包括台架试验、底盘试验和道路试验,是产品开发中后期性能测试的主要手段。

2.3.1 仿真技术

现有研究成果进行电动拖拉机性能仿真时采用的软件工具有 Matlab/Simulink、ADVISOR、AVL - Cruise、SimulationX、Carsim、RecurDyn^[93-94]。车辆仿真过程根据数据流方向分为后向仿真与前向仿真两种^[95]。后向型仿真以工况载荷作为数据输入,经过整机仿真模型计算后与控制策略形成数据闭环,仿真过程较简单。后向型仿真软件有 Matlab/Simulink、ADVISOR。前向型仿真以驾驶员模型为输入,与控制策略、整机仿真模型和工况形成数据闭

环,更加接近车辆真实运行状态。前向型仿真软件包含 AVL - Cruise、Carsim 等。

Matlab/Simulink 是进行物理系统仿真的通用平台,需要根据仿真对象的数学模型搭建模块化的仿真模型,适用范围较广,缺点为搭建整机仿真建模过程繁琐,工作量大,适合对部件或控制策略进行仿真^[96]。梁延会等^[97]利用该软件建立了履带式电动拖拉机的驱动系统仿真模型,进行了牵引性能仿真分析。丁月华等^[98]利用该软件建立了电动拖拉机驱动电动机仿真模型,对以额定电压直接启动的工况进行了动态特性仿真。刘静等^[99]利用该软件建立双能源旋耕作业仿真模型,并对单一能源和双能源 2 种模式下锂离子电池的荷电状态、工作电流以及功率分配进行了仿真分析。

ADVISOR 是在 Simulink 环境下开发的半开源型整机仿真软件,包含的传动系统模块、发动机模块、热效应模块、通信模块等子模块之间通过 Workspace 实现数据动态交互^[100]。优点为简化了整机仿真建模过程,保留了对仿真对象数学模型的修改功能。缺点为该软件 2004 年后更新缓慢,新型仿真技术和功能不足;难以对各子模块之间的通讯关系直接定义,无法用于控制器硬件在环测试^[101]。高辉松等^[102-103]基于 ADVISOR 2002,通过修改顶层模块,添加牵引功率计算模块,较早开发了电动拖拉机仿真平台,进行了仿真分析。王成继^[104]利用 ADVISOR 和 Simulink 仿真软件对燃料电池拖拉机开展了仿真工况二次开发和建模仿真。曾恒等^[105]对轮毂电机驱动的电动拖拉机进行了三维设计及样机研制,并开展了电动拖拉机整车性能试验及基于 ADVISOR 2002 软件的仿真分析。

AVL - Cruise 是目前车辆研发领域常用的整机仿真软件,具有多种仿真功能和数据流模式,开发过程较简单,软件更新速率较快,仿真精度较高,缺点是无法对各部件模块的内置数学模型进行修改^[106-107]。刘孟楠等^[108]基于该软件开发了增程式电动拖拉机整机仿真模型,进行了牵引性能仿真,评估了仿真结果的可信度;后续基于等效模型法,开发了增程式电动拖拉机旋耕机组仿真模型,设定旋耕工况进行了仿真分析。XU 等^[74]在此基础上仿真分析了提出的增程式电动拖拉机能量管理策略控制效果。AVL - Cruise 具有多种与其他仿真软件的数据接口,可以实现联合仿真,扩大了应用范畴。张俊江等^[109]利用 Matlab 建立了电动拖拉机转矩控制策略仿真模型,在基于 AVL - Cruise 建立的四轮驱动电动拖拉机整机仿真模型上进行了联合仿真,分析了

控制结果。徐立友等^[110]利用该方法,建立了电动拖拉机能量管理策略模型在环仿真平台,对提出的燃料电池型增程式电动拖拉机能量管理进行了仿真分析。相关基于 AVL - Cruise 的电动拖拉机仿真模型如图 11 所示。

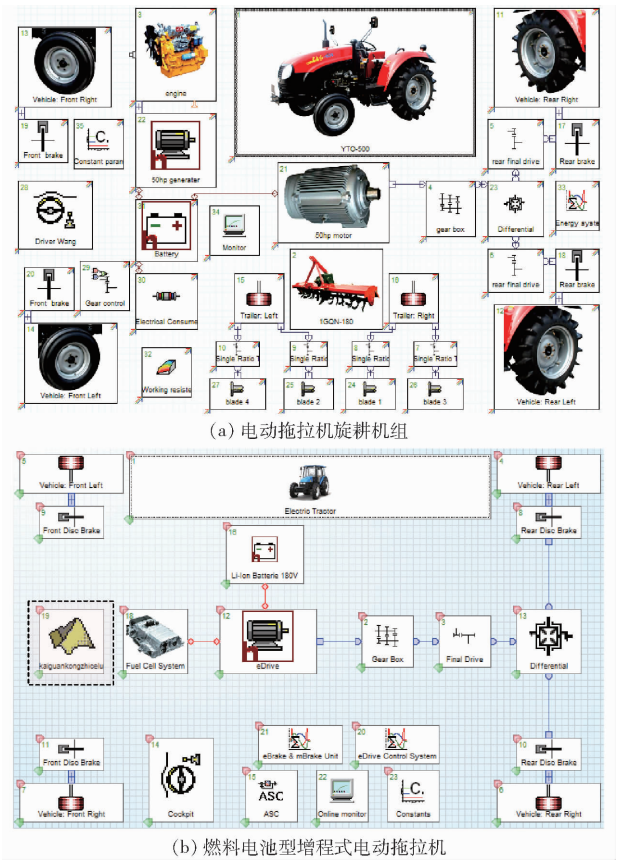


图 11 基于 AVL - Cruise 的电动拖拉机仿真模型

Fig. 11 Simulation model of electric tractor based on AVL - Cruise

Carsim 是主要用于车辆转向稳定性、制动性和平顺性等动态特性仿真的软件,应用较为广泛,与其他常用性能仿真软件具有数据接口,可以进行联合仿真。赵思夏等^[111]利用该平台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,验证了提出的分置式电动拖拉机底盘方案的有效性。YOO 等^[112]采用 Simulink 和 Carsim 联合仿真的方法建立了电动拖拉机整机仿真模型,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。

相关研究采用三维实体建模和虚拟样机技术对电动拖拉机整机的底盘和传动系统进行了仿真建模。VOLPATO 等^[113]利用三维实体建模的方法对电动拖拉机轴荷分布进行了可行性分析。张洋^[114]建立了双电动机独立驱动式电动拖拉机传动系统虚拟样机模型,进行了动力学仿真。赵思夏^[115]基于 SolidWorks 对电动拖拉机底盘进行了虚拟布置,仿

真分析了电池组布置方案对轴荷的影响。董兴凯^[116]基于 ADAMS 建立了电动拖拉机功率分汇流变速器传动总成虚拟样机模型,根据仿真结果优化了传动系统参数,改善了动态响应性能。刘孟楠^[117]基于 ADAMS 搭建耦合装置的虚拟样机模型并基于 ANSYS Workbench 建立耦合装置的有限元模型进行运动学仿真和模态分析。

2.3.2 测试及试验技术

电动拖拉机开发过程的前期主要通过仿真验证设计及控制策略的可行性。随着开发进程的推进,需要开展相应的测试和试验进行调试和标定。根据各种试验技术所处开发阶段的先后顺序,电动拖拉机开发过程需要经过控制器硬件在环测试、部件及总成台架试验、底盘试验和道路牵引试验^[118]。

控制器硬件在环测试(Hardware in the loop, HIL)是在虚拟环境下测试控制器效果的方法。过程为将受控对象的部件或整机仿真模型载入 HIL 设备,根据整机通信协议进行配置后与控制器形成通信闭环,启动运行后,控制器根据 HIL 设备提供的控制变量发出信号,对仿真模型进行控制。相比控制策略模型在环仿真,HIL 测试可以实现对控制器硬件设计和软件执行过程测试、调试和标定。目前常用的 HIL 设备为 dSPACE 和 ETAS,二者在数据格式、软件兼容性上存在一些差异^[119]。

武仲斌等^[87]基于 Matlab/Simulink 建立了电动拖拉机仿真模型,采用 dSPACE 对提出的驱动电动机巡航作业转矩控制策略进行了 HIL 测试。陈燕呢^[46]在此基础上,对开发的双电动机耦合式电动拖拉机驱动系统控制器进行了 HIL 测试,验证了控制效果,如图 12 所示。

王通^[120]基于 dsPACE-1007 开发了双电机独立驱动式电动拖拉机 HIL 测试平台,对开发的双电动机协同控制器进行了测试。LIU 等^[121]提出了一种具有协同动力输出轴(PTO)和驱动系统的双电机独立驱动电动拖拉机的控制策略,搭建了基于 dSPACE/DS1007 的硬件在环测试平台,用于测试协同控制器的功能。XIE 等^[122]提出了一种双电机电动拖拉机驱动系统,搭建了带有仪器系统和物理系统的 HIL 测试平台,通过 HIL 测试验证了驱动系统的功率性能和效率。

台架试验技术对电动拖拉机的部件匹配、总成测试、系统标定和整机性能分析等具有重要作用。利用部件或总成台架试验结果与整机之间的机电关系,可于产品开发中前期准确预测整机性能,有效提高了设计开发过程的品质与效率^[123]。高辉松等^[124-125]提出了纯电动拖拉机试验台设计方法,开

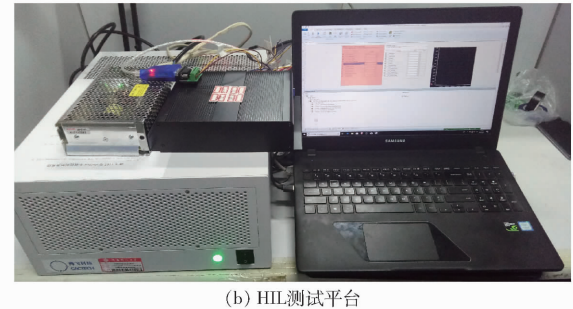
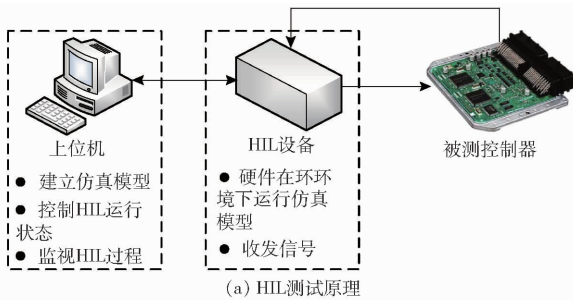


图 12 电动拖拉机 HIL 测试

Fig. 12 HIL test of electric tractor

发了基于 LabVIEW 的电动拖拉机测控系统。谢斌等^[126]开发了电动拖拉机驱动系统试验台架,对开发的电动拖拉机双轮驱动系统进行了总成试验分析。高辉松等^[35]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。徐立友等^[127]开发了用于能源和驱动系统测试的电动拖拉机综合试验台架,具有电源模拟、自动测控、CAN 总线通信功能,可在样机开发的前期各阶段开展不同类型的台架试验。徐立友等^[128]开发了电动拖拉机多性能测试系统,可以实现电动拖拉机动力和能源系统的性能测试以及车辆性能分析,如图 13 所示。汪珍珍等^[129]提出一种测控系统通信和控制策略模块化的设计方法,搭建了电动拖拉机快速原型试验平台。

目前关于电动拖拉机底盘试验和道路牵引试验的研究和应用未见报道。底盘试验和牵引试验是整机级的试验方法,用于测试拖拉机的牵引性能,加载位置分别为驱动轮和牵引铰接点,受电动化影响较小,采用传统拖拉机的底盘测功机和负荷车可实现电动拖拉机的底盘试验和牵引试验^[130-131]。

综上,现阶段电动拖拉机相关仿真与试验技术的特点为:①相较传统拖拉机仿真和试验,电动拖拉机领域对于新技术的应用较多。②相关技术应用广泛,可以实现对能源系统、驱动系统、整机系统、控制系统等的测试,满足主要研究和开发环节需求。

3 总结与展望

(1)电动拖拉机作为农业节能减排的重要工具,也是未来农机装备产品的发展和转型方向之一,

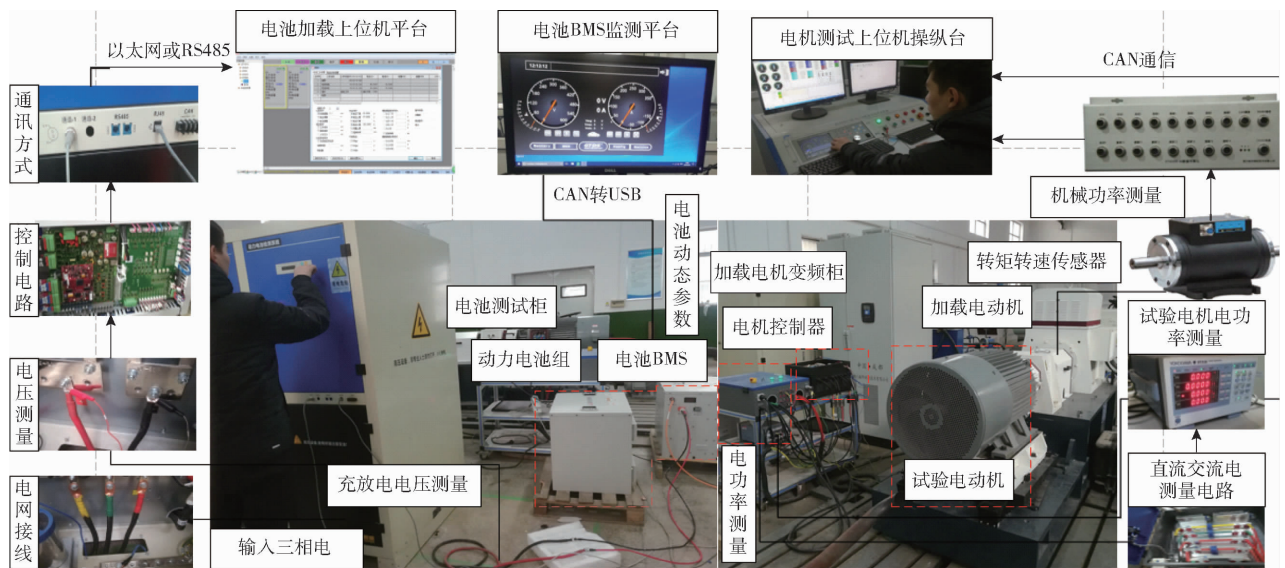


图 13 综合试验系统平台实物图

Fig. 13 Physical drawing of test platform

国内外进行了大量技术研究与产品尝试。我国关于电动拖拉机的研究成果较多,但主要集中在理论研究层面,相关产品较国外先进机型在关键技术与实用性上存在一定差距。目前,我国对电动拖拉机新产品的研发已列入国家重点研发计划,拟定了电动拖拉机开发的技术路线,这些项目的实施将攻克电动拖拉机的一系列关键技术,缩短与国际先进技术的差距,推动电动拖拉机新产品研发,为新能源农机装备产品的发展奠定基础。

(2)通过分析电动拖拉机技术的发展历程,总结了各发展时期的技术特点,可以得出,蓄电池技术的发展直接影响了电动拖拉机供电方式、功率以及能源系统模式的变化,其能量密度与使用成本是影响拖拉机实现纯电动化的主要因素。相较汽车,拖拉机犁耕、旋耕作业时的负荷率较高,目前蓄电池产

品能够达到的能量密度水平较有效独立支持电动拖拉机从事农田重负荷作业存在一定差距。开发小功率段的纯电动专用植保类机型或在较大功率拖拉机上采用多种能源组成的混合动力系统符合当前阶段的蓄电池技术现状,可为未来纯电动拖拉机的实现提供共性技术储备。

(3)基于现有研究成果,对目前电动拖拉机研究的方案与设计、控制技术、仿真与试验技术现状进行了分析,得出了目前各研究方向的主要特点。未来,还需继续形成并完善电动拖拉机理论体系,逐步实现通用化与标准化;在整机与农机具、农艺的匹配与协同控制,能源系统、新能源发电与农村电力储能结合技术等方面研究电动拖拉机的应用技术;并结合物联网、智能控制、自动驾驶等技术,提高电动拖拉机研究的智能化水平。

参 考 文 献

[1] 曹志平. 生态农业未来的发展方向[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 29-38.
CAO Zhiping. Future orientation of ecological agriculture[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 29-38. (in Chinese)

[2] 张敏, 王秀峰, 崔秀敏. 温室大棚对健康影响的研究进展[J]. 环境与健康, 2013, 30(2): 185-187.
ZHANG Min, WANG Xiufeng, CUI Xiumin. Greenhouse environment and health effects: a review of recent studies[J]. Journal of Environment and Health, 2013, 30(2): 185-187. (in Chinese)

[3] ABULFOTUH F. Energy efficiency and renewable technologies, the way to sustainable energy future[J]. Desalination, 2007, 209(1): 275-282.

[4] 张睿, 高焕文. 中国农业机械化柴油消耗趋势分析与节能的战略措施[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 280-284.
ZHANG Rui, GAO Huanwen. Analysis of trend of diesel oil consumption of agricultural mechanization and energy-saving strategic measures in China[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 280-284. (in Chinese)

[5] 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机的排放特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 42-48.
FU Mingliang, DING Yan, YIN Hang, et al. Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 42-48. (in Chinese)

[6] 张铁民, 闫国琦, 温利利, 等. 我国电动力农业机械发展现状与趋势[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 236-240.
ZHANG Tiemin, YAN Guoqi, WEN Lili, et al. Current situation and development of electric agricultural machinery in China

[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 236–240. (in Chinese)

[7] UEKA Y, YAMASHITA J, SATO K, et al. Study on the development of the electric tractor: specifications and traveling and tilling performance of a prototype tractor[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(4): 160–164.

[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: 13–35.
LIU Mengnan. Study on design theory and control strategy of electric tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020: 13–35. (in Chinese)

[9] Bungartz. nl. Siemens tiller tractors[EB/OL]. <http://www.bungartz.nl/Siem4mod.html>, 2016–07–16/2022–06–23.

[10] Bungartz. nl. Electric powered machinery-other makes[EB/OL]. <http://www.bungartz.nl/hist-elektra.html>, 2017–08–09/2022–06–23.

[11] 高辉松, 朱思洪, 吕宝占. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(6): 4–7.
GAO Huisong, ZHU Sihong, LÜ Baozhan. Development of electric tractors and key techniques[J]. Tractor and Farm Transporter, 2007, 34(6): 4–7. (in Chinese)

[12] Bungartz. nl. Siemens and Bungartz electric powered machinery[EB/OL]. <https://www.bungartz.nl/elektra.html>, 2016–07–16/2022–06–23.

[13] 东北农学院农机系汽车与拖拉机教研组. “电牛-33”和“电牛-55”电动拖拉机[J]. 东北农学院学报, 1960(3): 1–11.
Automobile and Tractor Teaching and Research Group, Department of Agricultural Machinery, Northeast Agricultural University. “electric cattle-33” and “electric cattle-55” electric tractors[J]. Journal of Northeast Agricultural College, 1960(3): 1–11. (in Chinese)

[14] Elec-Trak garden tractor news. My Elec-Traks[EB/OL]. <https://myelec-traks.com>, 2019–02–20/2022–06–23.

[15] Elec-Trak garden tractor news. The new idea EGT 80/80HD tractor[EB/OL]. <https://www.myelec-traks.com/EGT80.html>, 2019–03–02/2022–06–23.

[16] Elec-Trak garden tractor news. The wheel horse E–81[EB/OL]. <https://myelec-traks.com/E81.html>, 2019–02–21/2022–06–23.

[17] D&D motor systems, Inc. US electric ATV maker hopes to tap farmers market[EB/OL]. <http://www.ddmotorsystems.com/ATV-UtilityVehicleMotors.php>, 2014–07–17/2022–06–23.

[18] Electric tractor, Inc. OX2 indisputable advantages[EB/OL]. <http://www.electricttractor.com/all-electric>, 2019–03–11/2022–06–23.

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

[20] “Fuel Cells Bulletin” Editorial Department. New Holland’s NH2 fuel cell powered tractor to enter service[J]. Fuel Cells Bulletin, 2012(1): 3–4.

[21] vNext Technologies, Inc. Cub Cadet RZT zero-turn riders oem parts[EB/OL]. https://www.cubparts.com/oemparts/c/cub_cadet_zero_turn_riders_rzt/parts, 2019–04–15/2022–06–23.

[22] Gizmag PTY, Ltd. John Deere’s electric tractor: a vision of zero emissions farming[EB/OL]. <https://newatlas.com/john-deere-electric-tractor-sesam/46812>, 2019–03–16/2022–06–23.

[23] Electricvehicles, Inc. Huge electric tractor-Fendt E100 Vario electric tractor[EB/OL]. <https://electricvehicles.in/huge-electric-tractor-fendt-e100/>, 2019–03–13/2022–06–23.

[24] 杨柯, 张丹枫, 王鹏, 等. 无人驾驶电动拖拉机制动控制系统设计[J]. 农业开发与装备, 2019(5): 114–116.
YANG Ke, ZHANG Danfeng, WANG Peng, et al. Design for brake control system of driverless electric tractors [J]. Agricultural Development and Equipments, 2019(5): 114–116. (in Chinese)

[25] Husqvarna AB. Residential & commercial zero turn mowers[EB/OL]. <https://www.husqvarna.com/us/products/zero-turn-mowers>, 2019–04–15/2022–06–23.

[26] RENÉ K. John Deere: ‘We believe in electric tractors. 100%’[EB/OL]. <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/john-deere-we-believe-in-electric-tractors-100/>, 2020–03–12/2022–06–23.

[27] BEN C. Kubota unveils radical autonomous electric tractor in Japan[EB/OL]. <https://newatlas.com/automotive>, 2020–06–12/2022–06–23.

[28] 日本経済新聞. クボタ、電動トラクター商用化 3 年後めど [EB/OL]. <https://www.nikkei.com/article/DGXMZ054410960V10C.html>, 2020–10–25/2022–06–23.

[29] World’s first fully electric tractor could outclass all rivals[EB/OL]. <https://interestingengineering.com/worlds-first-fully-electric-tractor-could-outclass-all-rivals>, 2021–09–03/2022–06–23.

[30] 悦达黄海金马精彩亮相 2021 中国国际农机展 [EB/OL]. http://kfq.yancheng.gov.cn/art/2021/11/3/art_20321_3755940.html, 2021–11–03/2022–06–23.

[31] 酷! 超星智能新能源无人驾驶拖拉机首次亮相中国农机展 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714868460068086355&wfr=spider&for=pc>, 2021–10–28/2022–06–23.

[32] 山西农谷: 无人驾驶超级拖拉机即将实现量产 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=>

- 1718878190708313187&wfr=spider&for=pc, 2021-12-11/2022-06-23.
- [33] 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)
- [34] VOGT H H, ALBIERO D, SCHMUELLING B. Electric tractor propelled by renewable energy for small-scale family farming [C] // 2018 13th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies. MonteCarlo, Monaco: IEEE, 2018:1-4.
- [35] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 140-145.
GAO Huisong, ZHU Sihong. Study on design theory and method research for driving line of electric tractors[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(1): 140-145. (in Chinese)
- [36] 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 52-57.
GAO Huisong. Study on driving system of electric tractors[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 52-57. (in Chinese)
- [37] 周志立, 夏先文, 徐立友. 电动拖拉机驱动系统设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 78-81.
ZHOU Zhili, XIA Xianwen, XU Liyou. Design for drive system of electric tractors[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2015, 36(5): 78-81. (in Chinese)
- [38] 方树平, 王宁宁, 易克传, 等. 纯电动拖拉机动力系统设计及性能分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 80-84.
FANG Shuping, WANG Ningning, YI Kechuan, et al. Design and performance analysis of power system for pure electric tractors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 80-84. (in Chinese)
- [39] 方树平, 王宁宁, 徐立友. 纯电动拖拉机与传统燃油拖拉机性能对比分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 241-246.
FANG Shuping, WANG Ningning, XU Liyou. Performance comparison between pure electric tractor and conventional fuel tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 241-246. (in Chinese)
- [40] 方树平, 王宁宁, 易克传, 等. 基于 CRUISE 的纯电动拖拉机作业性能研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(1): 20-25.
FANG Shuping, WANG Ningning, YI Kechuan, et al. Research on operation performance of pure electric tractor based on the CRUISE[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 33(1): 20-25. (in Chinese)
- [41] 陈黎卿, 詹庆峰, 王伟伟, 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)
- [42] SEO J M, KIM Y K, JUNG I S. Permanent magnet synchronous motor for electric tractor of 35 horsepower[C] // 5th IEEE Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition (ECCE) Asia DownUnder Conference. Melbourne: IEEE, 2013: 560-565.
- [43] 张宇, 李志伟, 王臻, 等. 基于 SRM 的电动拖拉机驱动系统设计与仿真[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(7): 69-76.
ZHANG Yu, LI Zhiwei, WANG Can, et al. Design and simulation of driving system for electric tractor based on the SRM[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(7): 69-76. (in Chinese)
- [44] 张宇. 小型电动拖拉机开关磁阻及多电机驱动与供电系统研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018: 20-36.
ZHANG Yu. Research on switched reluctance and multi-motor drive and power supply system of small electric tractor[D]. Jingzhong: Shanxi Agricultural University, 2018: 20-36. (in Chinese)
- [45] 徐立友, 张洋, 刘孟楠. 拖拉机传动特性研究现状[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 224-230.
XU Liyou, ZHANG Yang, LIU Mengnan. Research status of the tractor transmission performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 224-230. (in Chinese)
- [46] 陈燕呢. 电动拖拉机动力系统设计与驱动控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 21-50.
CHEN Yanni. Research on dynamical system design and driving control method of electric tractor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018: 21-50. (in Chinese)
- [47] 李同辉, 谢斌, 宋正河, 等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 379-388.
LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 379-388. (in Chinese)
- [48] 徐立友, 赵思夏, 刘孟楠, 等. 一种智能电动拖拉机及其底盘的布局方法: 201710736612[P]. 2017-12-16.
- [49] 徐立友, 董兴凯, 刘孟楠, 等. 双电机电动拖拉机功率分汇流装置: 201810291353[P]. 2018-07-24.
- [50] 徐立友, 董兴凯, 刘孟楠, 等. 一种双电机电动拖拉机动力传动装置: 201810031559[P]. 2018-06-12.
- [51] 徐立友, 董兴凯, 刘孟楠, 等. 一种基于电力母线的电动拖拉机功率分汇流装置: 201810292271[P]. 2018-09-18.
- [52] 李书苑, 刘孟楠, 徐立友. 电动拖拉机动力耦合装置设计与选型[J]. 机械传动, 2021, 45(5): 75-82.
LI Shuyuan, LIU Mengnan, XU Liyou. Design and selection of power coupling device for electric tractor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(5): 75-82. (in Chinese)
- [53] KAZUAKI M, HIROKAZU I, YASUHIRO M. Electric travelling vehicle and grass mower: 18175560[P]. 2019-04-17.

- [54] TIGUE J D, BUATTE V M, BAUMANN J M, et al. Electric drive retrofit kit; 0096563A1[P]. 2016-07-01.
- [55] 王元杰, 刘永成, 杨福增, 等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 23-29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractors for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23-29. (in Chinese)
- [56] 李旭光. 温室双电源电动拖拉机的研制与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 11-19.
LI Xuguang. Development and test of dual-power electric tractor for greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 11-19. (in Chinese)
- [57] 卢毅, 杨福增, 刘永成, 等. 微型电动拖拉机的研究与设计[J]. 机械设计, 2013, 30(3): 82-85.
LU Yi, YANG Fuzeng, LIU Yongcheng, et al. Research and design of miniature electric tractor[J]. Machine Design, 2013, 30(3): 82-85. (in Chinese)
- [58] 卢毅. 温室电动拖拉机主要部件的研究与设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 15-26.
LU Yi. The research and design of mental parts of electric tractors for greenhouse[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012: 15-26. (in Chinese)
- [59] 管春松, 胡桢, 陈永生, 等. 温室用小型电动拖拉机研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 67-69.
GUAN Chunsong, HU Hui, CHEN Yongsheng, et al. Study on small electric tractors for greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(2): 67-69. (in Chinese)
- [60] 崔志超, 管春松, 陈永生, 等. 温室用小型多功能电动履带式作业平台设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 48-57.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, CHEN Yongsheng, et al. Design of small multi-functional electric crawler platform for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 48-57. (in Chinese)
- [61] HUBERTUS J J, WOUTER M J. Electrically driven single-axle tractor; 222374A1[P]. 2017-12-28.
- [62] 史俊龙, 朱思洪, 高辉松, 等. 微型电动拖拉机驱动系统设计[J]. 拖拉机与农用运输车, 2012, 39(1): 47-49.
SHI Junlong, ZHU Sihong, GAO Huisong, et al. Design of driving system of miniature electric tractor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2012, 39(1): 47-49. (in Chinese)
- [63] TRITSCHLER P J, BACHA S, RULLIERE E, et al. Energy management strategies for an embedded fuel cell system on agricultural vehicles[C]//Proceeding of XIX International Conference on Electrical Machines, Rome ICEM, 2010: 4175-4189.
- [64] LARMINIE J, LOWRY J. Electric vehicle technology explained[M]. John Wiley & Sons Ltd., 2003: 85-91.
- [65] SIKHA G, POPOV B N. Performance optimization of a battery-capacitor hybrid system[J]. Journal of Power Sources, 2004, 134(1): 130-138.
- [66] ZHANG X, MI C C, MASRUR A, et al. Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(2): 1533-1543.
- [67] HANNAN M A, AZIDIN F A, MOHAMED A. Hybrid electric vehicles and their challenges: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 135-150.
- [68] GARCÍA P, TORREGLOSA J P, FERNÁNDEZ L, et al. Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(12): 4791-4804.
- [69] SHABBIER W, EVANGELOU S A. Real-time control strategy to maximize hybrid electric vehicle powertrain efficiency[J]. Applied Energy, 2014, 135(2): 512-522.
- [70] 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)
- [71] 夏长高, 孙闫, 周雯雯. 双电源电动拖拉机能量管理仿真研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 234-240.
XIA Changgao, SUN Yan, ZHOU Wenwen. Study on energy management of double power electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 234-240. (in Chinese)
- [72] 孙闫. 基于超级电容辅能的纯电动拖拉机能量管理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018: 22-38.
SUN Yan. Study on energy management of pure electric tractor based on super capacitor auxiliary[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018: 22-38. (in Chinese)
- [73] 刘静, 夏长高, 孙闫. 双能源电动拖拉机能量管理策略[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 115-121.
LIU Jing, XIA Changgao, SUN Yan. Energy management strategy of double energy electric tractor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 115-121. (in Chinese)
- [74] XU Liyou, ZHANG Junjiang, LIU Mengnan, et al. Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5): 35-44.
- [75] 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)
- [76] 黄天乐, 陈树人, 施爱平, 等. 双电机功率分流纯电动拖拉机能量管理策略[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 246–250.
HUANG Tianle, CHEN Shuren, SHI Aiping, et al. Dual motor power split flow pure electric tractor energy management strategy[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 246–250. (in Chinese)
- [77] LIAO Z L, HUANG S R, MA X J, et al. Study on modeling and control strategy for electric drive motor of tracked vehicles [J]. Journal of China Ordnance, 2012, 8(2): 65–69.
- [78] ZHANG X, MI C. Vehicle power management: modelling, control and optimization[M]. London: Springer, 2011: 124–126.
- [79] LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili. Design of a load torque based control strategy for improving electric tractor motor energy conversion efficiency[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(5): 1–14.
- [80] 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.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, LIU Mengnan. Torque distribution strategy of extended four-wheel drive electric tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 38(3): 80–85. (in Chinese)
- [81] ROMING B E, VAIDYA J, RINHOLM B G, et al. Differential steering and traction control for electrically propelled mower: 0295545A1[P]. 2007–12–27.
- [82] 张建舟. 电动拖拉机远程监控系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017: 15–32.
ZHANG Jianzhou. Research on remote monitoring system for electric tractor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017: 15–32. (in Chinese)
- [83] 谢斌, 张超, 毛恩荣, 等. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 55–62.
XIE Bing, ZHANG Chao, MAO Enrong, et al. Motor controller design and indoor experiment for electric tractor based on myRIO[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 55–62. (in Chinese)
- [84] CHEN Yanni, XIE Bin, MAO Enrong. Electric tractor motor drive control based on FPGA[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 271–276.
- [85] 武仲斌, 谢斌, 迟瑞娟, 等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 88–98.
WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving torque management model for electric tractor in field cruise condition [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 88–98. (in Chinese)
- [86] SUNUSI I I, ZHOU J, SUN C Y. Development of online adaptive traction control for electric robotic tractors[J]. Energies, 2021, 14(12): 3394.
- [87] 房秋悦, 施爱平, 陈安焱, 等. 电动拖拉机驱动转矩控制策略研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(11): 243–248.
FANG Qiuyue, SHI Aiping, CHEN Anyan, et al. Research on driving torque control strategy of electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 243–248. (in Chinese)
- [88] 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.
- [89] 闫祥海, 周志立, 徐立友, 等. 拖拉机 CAN 通信技术与试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 71–75.
YAN Xianghai, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Research and test of tractor CAN communication technology[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 37(4): 71–75. (in Chinese)
- [90] 陈燕呢, 谢斌, 刘柯, 等. 电动拖拉机 CAN 总线通信网络系统设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 233–238.
CHEN Yanni, XIE Bin, LIU Ke, et al. Design of CAN bus communication network system on electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 233–238. (in Chinese)
- [91] 徐立友, 徐海龙, 刘孟楠, 等. 一种具有两路 CAN 总线的电动拖拉机及通讯装置: 201720440806[P]. 2017–12–08.
- [92] LIU Mengnan, HAN Bing, XU Liyou, et al. CAN bus network design of bifurcated power electric tractor[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2021, 14(4): 2306–2315.
- [93] 邹渊, 孙逢春, 王军, 等. 电动汽车用仿真软件技术发展研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(7): 761–764.
ZOU Yuan, SUN Fengchun, WANG Jun, et al. Study on simulation software development of electric vehicle[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(7): 761–764. (in Chinese)
- [94] 李贤哲, 刘孟楠, 徐立友, 等. 拖拉机串联式液力机械复合传动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 406–413.
LI Xianzhe, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Design and test of tractor serial hydraulic and mechanical hybrid transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 406–413. (in Chinese)
- [95] 张翔, 钱立军, 张炳力, 等. 电动汽车仿真软件进展[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1621–1623.
ZHANG Xiang, QIAN Lijun, ZHANG Bingli, et al. State-of-the-art of the electric vehicles simulation software[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1621–1623. (in Chinese)
- [96] DEAN C, DONALD L, RONALD C. System dynamics modeling and simulation of mechatronic systems[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006: 20–50.
- [97] 梁延会, 夏长高. 设施大棚履带式电动拖拉机动力学性能分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(1): 55–58.

- LIANG Yanhui, XIA Changgao. Analysis of dynamic performance of tracked electric tractor in facility shed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 55–58. (in Chinese)
- [98] 丁月华, 毛鹏军, 张松泓, 等. 电动拖拉机驱动电机建模与仿真[J]. 拖拉机与农用运输车, 2015, 42(6): 25–27. DING Yuehua, MAO Pengjun, ZHANG Songhong, et al. Modeling and simulation of electric tractor drive motor[J]. Tractor & Farm Transporter, 2015, 42(6): 25–27. (in Chinese)
- [99] 刘静, 孙闫. 设施大棚履带电动拖拉机能量管理仿真研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(5): 211–213, 246. LIU Jing, SUN Yan. Study on the energy management simulation of a crawler electric tractor for facility greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 211–213, 246. (in Chinese)
- [100] 曾小华, 王庆年, 李骏, 等. 基于 ADVISOR2002 的混合动力汽车控制策略模块开发[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 394–396. ZENG Xiaohua, WANG Qingnian, LI Jun, et al. The development of hev control strategy module based on ADVISOR2002 software[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 394–396. (in Chinese)
- [101] 曾小华, 宫维钧. ADVISOR2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 8–24.
- [102] 高辉松, 张莹, 朱思洪. 基于 ADVISOR 的电动拖拉机仿真系统开发与应用[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2): 282–285. GAO Huisong, ZHANG Ying, ZHU Sihong. Development and application of electric tractor simulation system based on ADVISOR[J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 282–285. (in Chinese)
- [103] 高辉松, 朱思洪. 基于 ADVISOR 的电动拖拉机驱动系统仿真[J]. 机械设计, 2008, 25(10): 28–32. GAO Huisong, ZHU Sihong. Simulation of electric tractor drive system based on ADVISOR[J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(10): 28–32. (in Chinese)
- [104] 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: 42–55. WANG Chengji. Design and research of power system of fuel cell tractor[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020: 42–55. (in Chinese)
- [105] 曾恒, 杨自栋, 雷良育, 等. 基于轮毂电机驱动的电动拖拉机总体设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 246–253. ZENG Heng, YANG Zidong, LEI Liangyu, et al. Based on hub motor drive electric tractor general design and experiment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10): 246–253. (in Chinese)
- [106] 王保华, 罗永革. 基于 CRUISE 的汽车建模与仿真[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2005, 19(2): 5–8. WANG Baohua, LUO Yongge. Simulation and modeling of vehicle based on CRUISE software[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2005, 19(2): 5–8. (in Chinese)
- [107] 王庆年, 于永涛, 曾小华, 等. 基于 CRUISE 软件的混合动力汽车正向仿真平台的开发[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(6): 1413–1419. WANG Qingnian, YU Yongtao, ZENG Xiaohua, et al. Development of forward-looking simulation platform for hybrid electric vehicle based on software CRUISE[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(6): 1413–1419. (in Chinese)
- [108] 刘孟楠, 徐立友, 周志立, 等. 增程式电动拖拉机及其旋耕机组仿真平台开发[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3): 413–419. LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili, et al. Development of extended-range electric tractor and simulation platform for rotary tiller[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(3): 413–419. (in Chinese)
- [109] 张俊江. 增程式电动拖拉机控制策略研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017: 35–45. ZHANG Junjiang. Research on control strategy of range extending electric tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017: 35–45. (in Chinese)
- [110] 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. XU Liyou, LIU Enze, LIU Mengnan, et al. Fuel cell / battery hybrid electric tractor energy management strategy[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 40(2): 80–86. (in Chinese)
- [111] 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): 492–498. ZHAO Sixia, LIU Mengnan, XU Liyou. Multi-objective optimization design of electric tractor chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 492–498. (in Chinese)
- [112] 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.
- [113] VOLPATO C E S, DE PAULA V R, BARBOSA J A, et al. Evaluation of the operational viability of the use of electricity as a source of power in agricultural tractors[C] // Proceeding of 2016 ASABE Annual International Meeting. Orlando, Florida, USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016: 1–7.
- [114] 张洋. 双电机结构的电动拖拉机传动特性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017: 9–18. ZHANG Yang. Research on transmission characteristics of electric tractor with double motor structure[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017: 9–18. (in Chinese)
- [115] 赵思夏. 电动拖拉机底盘设计及性能分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018: 40–45.

- ZHAO Sixia. Electric tractor chassis design and performance analysis[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018: 40–45. (in Chinese)
- [116] 董兴凯. 基于虚拟样机技术的双电机电动拖拉机功率分汇流装置设计[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019: 9–18.
- DONG Xingkai. Design of power dividing and converging device for dual-motor electric tractor based on virtual prototyping technology[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019: 9–18. (in Chinese)
- [117] 刘孟楠, 李书苑, 徐立友, 等. 拖拉机双向耦合电驱动系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 423–431, 449.
- LIU Mengnan, LI Shuyuan, XU Liyou, et al. Design and performance analysis of tractor bidirectional coupling electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 423–431, 449. (in Chinese)
- [118] 张舟云, 贡俊. 国家新能源出版工程-新能源汽车电动机技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 285–293.
- [119] 朱军. 国家新能源出版工程-新能源汽车动力系统控制原理及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013: 212–219.
- [120] 王通. 双电机独立驱动式电动拖拉机整机控制器设计[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019: 40–52.
- WANG Tong. Controller design of dual-motor independently driven electric tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019: 40–52. (in Chinese)
- [121] LIU Mengnan, WEI Chuiquan, XU Liyou. Development of cooperative controller for dual-motor independent drive electric tractor[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1–12.
- [122] XIE Bin, WANG Shuai, WU Xiuheng, et al. Design and hardware-in-the-loop test of a coupled drive system for electric tractor[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 165–185.
- [123] 陶倩文, 闫祥海, 全一锟, 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 status and prospect of tractor indoor bench test technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 121–128. (in Chinese)
- [124] 高辉松, 王珊珊, 朱思洪. 电动拖拉机驱动力与传动效率特性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 40–43.
- GAO Huisong, WANG Shanshan, ZHU Sihong. Test of driving force and transmission efficiency of electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 40–43. (in Chinese)
- [125] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机试验台开发[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6): 160–164.
- GAO Huisong, ZHU Sihong. Development of electric tractor test bench[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2014, 37(6): 160–164. (in Chinese)
- [126] 谢斌, 张超, 陈硕, 等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 8–13.
- XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Research on transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 8–13. (in Chinese)
- [127] 徐立友, 赵学平, 刘孟楠, 等. 一种双电机电动拖拉机试验台及其试验控制方法: 201810330644[P]. 2018–07–17.
- [128] 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)
- [129] 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)
- [130] ARJHARN W, KOIKE M, TAKIGAWA T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (Part 1)—energy consumption and drawbar pull performance[J]. Journal of JSAM, 2001, 63(3): 130–137.
- [131] ARJHARN W, KOIKE M, TAKIGAWA T, et al. Preliminary Study on the applicability of an electric tractor (Part 2)—effect of battery allocation on the tractive performance[J]. Journal of JSAM, 2001, 63(5): 92–99.