

农业装备电动化技术研究综述

徐立友^{1,2} 张俊江^{1,2} 闫祥海^{1,2} 赵思夏^{1,2} 吴依伟^{1,2} 刘孟楠^{2,3}

(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 471039;
3. 中国一拖集团有限公司, 洛阳 471039)

摘要: 随着电力电子和储能技术的发展, 动力装备电动化已成为全球车辆发展的重要方向, 在新能源汽车领域已得到成功应用, 我国率先形成了完整的产业基础。目前, 全球电动农业装备处于起步阶段, 多以理论研究为主, 尚无批量化生产的电动农业装备产品, 发展电动农业装备具有产业优势。本文简要分析了电动农业装备关键部件及软件平台, 重点综述了国内外电动拖拉机、电动微耕机、电动移栽机、电动果园作业机、电动播种机研究现状, 并对电动农业装备与传统农业装备进行了性能对比, 得出了不同农业装备的优缺点, 为农业装备的应用场景分析提供了支撑。针对不同农业装备的农艺特点和电动化关键部件特点阐述了不同形式农业装备的应用场景。结合当前电动车辆发展状况及农业装备作业特点对不同电动农业装备发展瓶颈进行了分析, 为电动农业装备的发展指明了方向, 可为我国电动农业装备的发展提供参考。

关键词: 农业装备; 电动化; 应用场景; 综述

中图分类号: S219; S22

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)09-0001-12

OSID:



Review of Research for Agricultural Equipment Electrification Technology

XU Liyou^{1,2} ZHANG Junjiang^{1,2} YAN Xianghai^{1,2} ZHAO Sixia^{1,2} WU Yiwei^{1,2} LIU Mengnan^{2,3}

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

2. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China

3. YTO Group Corporation, Luoyang 471039, China)

Abstract: With the development of power electronics and energy storage technology, electrification of power equipment has become an important direction of global vehicle development. It has been successfully applied in the field of new energy vehicles, and has taken the lead in establishing a complete industrial foundation in China. At present, the global electric agricultural equipment is in its infancy, mostly based on theoretical research, and there is no mass-produced electric agricultural equipment product. The development of electric agricultural equipment has industrial advantages. The key components and software platforms of electric agricultural equipment were briefly analyzed, and a comprehensive review of the research status of electric tractors, electric micro-tillers, electric transplanters, electric orchard machines, and electric seeders at home and abroad were focused on. The performance comparison of electric agricultural equipment and traditional agricultural equipment was carried out, and the advantages and disadvantages of different agricultural equipment were obtained. It can provide support for the application scenario analysis of agricultural equipment. According to the agronomic characteristics of different agricultural equipment and the characteristics of key components of electrification, the application scenarios of different forms of agricultural equipment were expounded. Combined with the current development status of electric vehicles and the operation characteristics of agricultural equipment, the bottlenecks of the development of different electric agricultural equipment were analyzed, and the direction for the development of electric agricultural equipment was pointed out. It was hoped that the research result can serve as a valuable reference for the development of electric agricultural machinery in China.

Key words: agricultural equipment; electrification; application scenarios; review

收稿日期: 2023-07-01 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001203)和智能农业动力装备全国重点实验室开放项目(SKT2022001、SKLIAPE2023006)

作者简介: 徐立友(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆传动理论与控制技术研究,E-mail: xlyou@haust.edu.cn

0 引言

农业新业态、农业生产新模式对生态、节能、环保提出了更高的要求。以拖拉机为代表的农机动力装备是农业生产的最主要动力来源,传统农机动力系统消耗了大量柴油,排放废气产生了严重的大气污染。农业装备在温室大棚内作业时,排放的废气严重影响工作人员和农作物的健康。设施农业、生态农业、庭院农业等特殊农业生产环境对绿色农机具动力的需求越来越迫切,高效环保农业装备产品已成为全球农机科技创新的主攻方向。

传统农业机械结构相对复杂,体积较大,难以适应复杂工作环境,作业中产生大量有害物质及噪声,降低了农业装备的环境友好性。电动农业装备以电气代替大量机械机构,体积较小,能够适应复杂的工作环境,作业中对环境影响较小,驾驶员保护性高^[1];由电机取代了发动机,工作噪声小,污染少,因而农业装备电动化是未来农业生产机械绿色化转型升级的重要发展方向。

目前,我国的电动农业装备仍处于萌芽阶段,关于电动农业装备的研究主要停留在理论研究阶段,随着电力电子、能量储存等技术的发展,动力装备电动化已率先在新能源汽车领域取得成功,我国在电动化方向拥有完备的产业基础,发展电动农业装备具有先发优势。

本文综述国内外农业装备电动化技术发展现状及电动农业装备发展瓶颈与趋势,结合农业装备作业环境特点,阐述现有国内外电动拖拉机、电动微耕机、电动移栽机、电动果园作业机、电动播种机等农业装备的研究现状,进行电动化农业装备与传统农业装备性能对比。针对不同农业装备的农艺特点和电动化关键部件特性,分析不同电动农业装备发展瓶颈与趋势,以期为我国电动农业装备的发展提供借鉴。

1 农业装备电动化研究现状

1.1 电动农业装备关键部件及软件平台分析

1.1.1 电池

电池技术是农业装备电动化技术的核心之一。其发展进程极大影响电动农业装备的产业化。目前,常用的电池主要有铅酸电池、镍氢电池和锂电池。铅酸电池是一种传统的电池类型,具有过压容忍值较高、自放电速率低、价格低、稳态的工作状况良好,并且维护成本相对较低^[2]等优点。但铅酸电池能量密度较低、循环寿命较短,含有大量重金属铅,环境友好性差^[3]。

镍氢电池具有容量高、功率大和安全性能好等优点。相对于铅酸电池,氢镍电池比能量和比功率均提高了数倍,对环境的污染较小。但也存在低温容量下降、自放电率增加、价格相对较高^[4-5]的缺陷。

锂电池是目前应用最为广泛的电池之一。与铅酸电池和氢镍电池相比,锂电池具有更高的单体电池工作电压,电池组对单体一致性要求较低,提高了使用寿命;锂离子电池无记忆效应,电压范围宽、寿命长、环保,充放电对电池的容量影响较小。但其成本仍相对较高^[6-7]。

农业装备通常需要良好的动力响应、长使用寿命、低维护成本和环保,锂电池在电动农业装备领域更具优势;电动农业装备需要具备较高的机动性和灵活性,锂电池具有体积小、重量轻的优点,可更好地适应农业生产的需要^[7]。尽管锂电池优势明显,但电动农业装备工作环境恶劣、工况复杂多变,亟待开发高能量密度和高安全性的电池。

1.1.2 电机

电机是农业装备电动化技术的核心部件之一。常见的电机有直流电机、开关磁阻电机、交流电机和永磁同步电机。直流电机作为农业装备电动化技术发展历程中最早应用的电机类型之一,具有结构简单、控制方便、转速范围广、技术成熟和生产成本低等优点。但直流电机可靠性低、设备维护困难^[8]。随着电机技术的不断发展,直流电机正在逐渐被其他更加先进的电机所取代。

开关磁阻电机具有结构简单、成本较低、可靠性高等优点,转子上没有绕组,在高速运转的场合表现良好。但该电机定子和转子均为双凸极结构,磁链与转矩对转子位置角和相电流之间呈现强烈的非线性关系,导致电机的转矩脉动较大,同时也会引起电机振动和噪声等问题^[9-10]。

交流电机由于其成本低廉、结构简单以及维护保养较为便利等优点,受到越来越多的关注。同时,借助先进的拓扑设计和精准的控制策略,现代交流电机已能够达到与直流电机相当甚至更好的性能。但交流电机也存在电控系统复杂、起动转矩较小等缺点^[11]。

永磁同步电机采用永磁体励磁,具有功率密度高、响应速度快、能耗低、调速性能好和效率高等优点。但存在磁场质量要求较高,易受短路故障影响等问题^[12-13]。

农用电机需具备高能效、快速响应、轻量化、易维护、鲁棒性强等特点,永磁同步电机在这些方面具有较明显的优势。这些特点使得其能够满足电动农

业装备驱动系统对可靠性和稳定性的需求。然而,农业专用电机仍然缺乏,需要进一步开发适合农业装备特点的低速大扭矩电机。

1.1.3 软件平台

农业电动化是当前农业技术发展的趋势,而软件平台则是在这个过程中不可或缺的工具之一。目前,广泛应用于农业装备的仿真软件平台主要有 Matlab/Simulink、ADVISOR、AVL CRUISE、ModeFRONTIER 等。

Matlab/Simulink 是进行物理系统仿真的通用平台,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。但存在建模过程繁琐,工作量大的缺点,适合对部件或控制策略进行仿真。商高高等^[14]利用 Matlab/Simulink 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。

ADVISOR 是在 Simulink 环境下开发的半开源型整机仿真软件,包含的相关子模块之间通过 Workspace 实现数据动态交互。但该软件在 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。王成继^[15]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。

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。但存在部件二次开发困难的缺点。刘孟楠等^[16]基于 AVL CRUISE 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,开发了增程式电动拖拉机旋耕机组仿真模型。

ModeFRONTIER 主要用于车辆多目标优化,应用较为广泛。赵思夏等^[17]对电动拖拉机的动力电池布置进行了优化并基于 ModeFRONTIER 仿真平台对电动拖拉机牵引机组性能仿真分析,验证了分置式电动拖拉机底盘方案的有效性。

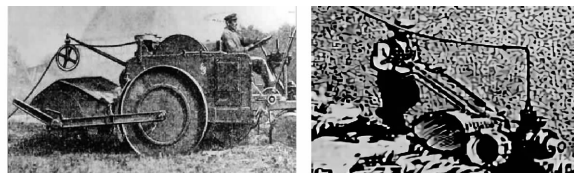
1.2 电动拖拉机

1.2.1 电动拖拉机发展现状

针对传统拖拉机污染高、效率低、噪声大等问题,国内外的高校和企业对电动拖拉机开展了一系列的研究^[18-26]。最早的电动拖拉机可以追溯到 20 世纪初,电动拖拉机的发展历程可以划分为 3 个阶段^[27]。

20 世纪 70 年代以前是电动拖拉机的早期发展阶段。最早的电动拖拉机是由德国 Siemens 公司于 1912 年生产的用于旋耕作业的 36.8 kW 电动拖拉机(图 1a),依靠电缆供电,工作范围受到电缆长度

的限制,采用轮式结构,此后 Siemens 公司又推出了二代 2.9 kW 的电动拖拉机(图 1b),采用手扶式结构,用于割草、播种等轻负荷作业^[28]。哈尔滨松江拖拉机厂于 1960 年成功试制了我国首台电动拖拉机——电牛 28,其拥有 28 kW 电机功率和 1 100 V 的额定电压,不具备 PTO 输出功能;该厂同年研制出轮式电牛 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^[29]。



(a) Siemens 首台电动拖拉机

(b) Siemens 手扶电动拖拉机

图 1 早期电动拖拉机

Fig. 1 Electric tractors in early development period

20 世纪 70 年代至 21 世纪初是电动拖拉机的中期发展阶段。美国通用电气公司(GE)于 20 世纪 70 年代设计了 Elec-Trak 系列电动拖拉机(图 2a),该系列拖拉机由永磁直流无刷电机驱动并配备了 6 组铅酸电池,采用继电器和电阻器组成控制器^[30]。美国 Gorilla Vehicles 公司于 20 世纪 90 年代设计的 e-ATV 系列电动拖拉机(图 2b),具有 3 或 4 个密封铅酸电池,额定功率范围 4.8 ~ 6.2 kW,可实现无级变速,最高行驶速度可达 27 ~ 30 km/h,单次充电续航里程为 48 ~ 56 km^[31]。



(a) Elec-Trak 电动拖拉机

(b) Gorilla e-ATV 电动拖拉机

图 2 中期电动拖拉机

Fig. 2 Electric tractors in medium-term development period

21 世纪初至今电动拖拉机高速发展。纽荷兰推出了 NH2 氢燃料电池拖拉机,可驱动一台 78 kW 的电动机型(图 3a),为全世界第一辆以氢燃料电池为动力的拖拉机^[32]。2020 年,国家农机装备创新中心牵头发起、清华大学天津高端装备研究院与河南洛阳先进制造产业研发基地联合研制了氢燃料电池电动拖拉机 ET504-H(图 3b),是中国首台基于 5G、以氢燃料电池为动力的无人驾驶电动拖拉机^[33]。

综上所述,早期发展阶段的电动拖拉机主要靠电轨的方式提供能源,作业范围较小,并且结构较为简单,大多采用手扶式结构。中期发展阶段的电动拖拉机采用车载电池供电,实用性得到提升;由于功率较小,只适用于负荷较低的作业工况。当前阶段

(a) NH₂氢燃料电池拖拉机

(b) ET504-H型电动拖拉机

图3 当前阶段电动拖拉机

Fig.3 Electric tractors in current development period

主要通过混合动力技术提高电动拖拉机的动力性和续航能力以适应负荷率较大的工况。同时,智能网联、智能驾驶等技术的深入研究,推动电动拖拉机向智能化方向发展^[27]。

1.2.2 控制技术发展现状

针对电动拖拉机作业环境复杂,对适应性、稳定性以及续航能力要求高等问题,国内外专家学者通过对控制技术进行研究,来满足电动拖拉机作业要求。

(1) 能量管理

能量管理策略对电动拖拉机的性能具有重要影响,对纯电拖拉机而言,通过对蓄电池充放电过程有效控制,使动力系统满足不同工况下拖拉机的功率需求,极大地提高了电池的使用寿命。对于混合动力拖拉机,由于具备至少两个动力源,需要通过合理的能量管理策略实现不同动力源之间的功率分配,提高拖拉机的动力性与经济性。

工况复杂的拖拉机,其能量管理策略要求更高,已知相关的研究文献较少^[27]。李同辉等^[34]针对双电机多模动力耦合驱动系统,提出了一种基于随机动态规划+极值搜索算法的实时自适应能量管理策略,有效地提高了纯电动拖拉机的续航能力。张俊江等^[35]针对并联式柴电混合动力拖拉机,提出了基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略,有效降低了拖拉机的等效燃油消耗量。XU等^[36]针对增程式电动拖拉机动力电池能量利用不充分的问题,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,提高了动力电池的能量利用效率,降低了燃油消耗。SUN等^[37]针对传统拖拉机排放高、纯电动拖拉机续航能力不足等问题,开发了一种以燃料电池为主要能源,动力电池为辅助能源的新型拖拉机动力总成系统模型,提出了一种基于规则的能量管理策略,有效降低燃料电池的性能衰退,提高电动拖拉机的续航能力。WANG等^[38]提出了一种双电机电动拖拉机协同优化能量管理策略,提升了拖拉机在不同工况下的工作效率和平稳性。JIA等^[39]设计了一种串联混合动力电动拖拉机模型,针对拖拉机工况较为复杂的问

题,提出了两种基于基准规则的电源管理策略,即恒温器和功率跟随控制,有效降低了氮氧化物和一氧化碳的排放。窦海石等^[40]利用图论原理设计出满足全功率范围作业需求的两种动力系统耦合分流构型,提出了基于马尔科夫决策的能量管理策略,提高了拖拉机的燃油经济性。ZHANG等^[41]针对配备无级变速器(CVT)的混合动力拖拉机,提出了一种基于动态规划的全局最优能量管理策略,有效地提高了拖拉机的燃油经济性。

(2) 驱动系统控制

驱动系统控制通过对电机、PTO电机、变速器的工作状态进行控制,使电动拖拉机在不同工况下保持良好的作业性能^[27]。

LIU等^[42]为了提高电动拖拉机电机的转换效率,提出了一种基于粒子群算法的负载转矩控制策略。YU等^[43]针对单电机拖拉机在不同耕作方式下动力性较差、作业效果不佳等问题,利用粒子群优化算法和模糊控制规则,提出了一种电动拖拉机扭矩分配策略,有效提高了拖拉机动力性和电池放电的平稳性。MELO等^[44]设计了一种基于PI的电动拖拉机滑转控制策略,提高了电动拖拉机的牵引效率和稳定性,减少了能量消耗。CHEN等^[45]提出了一种基于转速双闭环PID和电流内环PWM的驱动电机控制策略,验证了电动拖拉机电机驱动控制系统的有效性。SUNUSI等^[46]针对拖拉机驱动轮滑转率过大引起驱动力下降的问题,提出了一种驱动轮滑转估计及控制方法,通过仿真和试验验证了有效性。ZHANG等^[47]针对轮式拖拉机牵引能效低、耕作时车轮滑移较大等问题,结合行驶速度和滑移率,提出了一种基于主动转矩分布的联合控制方法,并将其应用于电动拖拉机,有效地提高了拖拉机的稳定性和经济性。

综上所述,在电动拖拉机能量管理方面,对混合动力拖拉机能量管理的研究较多。主要是通过分配蓄电池组与辅助能源之间的功率来提高拖拉机的动力性和经济性,但大部分研究都没有考虑到整机控制架构,缺少在整机控制中实现方法的研究。在电动拖拉机驱动系统控制方面,大部分集中在对驱动电机效率优化、差速与转矩分配等的研究,缺少对传动系统控制的研究,控制方法主要是根据具体工况和载荷特点对电机转矩进行控制。

1.3 电动微耕机

国外对微耕机的研究起步较早,技术相对成熟,一般采用1.5~6.0 kW的汽油机、柴油机或电机作为动力源,可以连接多种机具以完成不同作业^[48]。

20 世纪 60 年代以前,国外研发的电动微耕机均采用电网供电,随后采用蓄电池供电的电动微耕机陆续出现。

1941 年,瑞士 Grunder 公司研制了一台电动耕地拖拉机(图 4a),该拖拉机是由 Boveri 电机驱动,可以更换农具实现多种作业,如将旋耕机换成铧式犁等^[49]。1945 年,德国 Bungartz 公司研发了一款配有变速箱的电动微耕机(图 4b),微耕机运行时有两种速度,分别是 1.3 km/h 和 5 km/h^[50]。20 世纪 60 年代后期,电动农业装备均通过电缆进行供电,限制了作业范围,增加了电力损耗^[50]。受使用场景及成本的限制,该类农业装备应用较少。20 世纪 70 年代,美国 GE 公司研制了一款铅酸蓄电池供电的 6 kW 永磁无刷电机微耕机,主要用于修剪草坪,也可通过更换农具满足不同的作业要求。1995 年,意大利农业机械研究所研制了一台以蓄电池为供能装置的电动微耕机(图 4c),该机采用直流电机驱动,两组 12 V 的蓄电池进行供电,续航时间最长可达 90 min^[49]。日本的 IKOMA 等^[51]提出了一种具有独立驱动轮的电动微耕机(图 4d),每个驱动轮和耕作部件由一个独立的电机驱动,解决了传统微耕机很难在一条直线上耕作的问题。

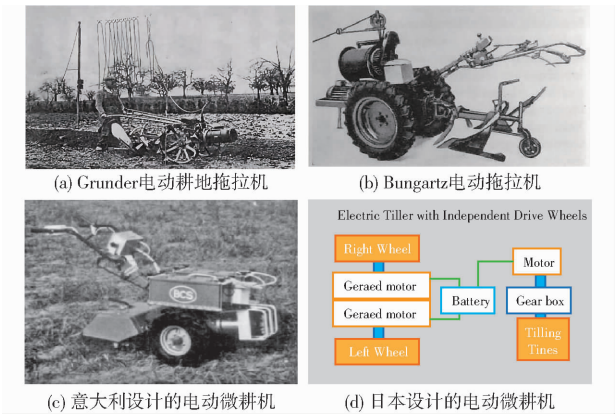


图 4 国外电动微耕机

Fig.4 Foreign electric micro-tiller

从国外电动微耕机的发展历程可以看出,电动微耕机与电动拖拉机取电方式基本相同,都是通过公用电网供电或蓄电池供电,其整体结构是根据传统燃油微耕机改造而来,将动力系统的燃油机替换为公用电网供电或蓄电池供电,减少排放,降低了噪声与振动。

针对国内设施农业机械化水平较低,棚内作业仍以人力为主,劳动强度大,工作环境差,已有的设施农业机械普遍是以燃油机作为动力,对设施环境造成严重污染等问题,我国研究人员开展了一系列以电机为动力源的微耕机研究(图 5a)。李达等^[52]设计了一款小型电动微耕机,其动力系统功率为

2.2 kW,体积小,重量轻,便于转向和移动,但其转速较低,需要安装松土铲才能完成正常作业。高辉松等^[53]研发了一套温室大棚用供取电系统,设计了电动微耕机的结构形式及传动参数(图 5b),对电机及变频调速系统进行了试验,结果表明所研制电动微耕机安全性能等指标符合相关标准规定,且具有低噪声、零污染的特点。刘学林等^[54]设计了一款适用于温室作业的基于轮毂电机的电动微耕机(图 5c),通过轮毂电机直接驱动轮胎或旋耕刀,省去中间传动装置(减速器、行走箱等),传动效率高,整体结构简化。赵润华等^[55]研制了一种电动微耕机(图 5d),该机器能够实现快、慢两挡换挡工作,适于不同硬度的土地,设有转向离合器,能够实现微耕机轻松转向,操作方便。黄伟玲等^[56]设计了一种电动微耕机,该机通过控制变频电机,克服起动困难、速度调整不方便等缺点,有效提高了生产率,具有使用寿命长、制造成本低以及节能环保等特点。HUANG 等^[57]针对传统微耕机振动较大的问题,开发了一种锂电池供电的无刷直流电机驱动微耕机,对机架结构进行了优化设计,提高了电动微耕机的操纵舒适性。NIU 等^[58]研制了一种采用锂电池供电的直流无刷电机驱动微型舵柄,具有慢速、中速和快速 3 个挡位。LIN 等^[59]针对传统微耕机安全性较差的问题,设计了一种适用于复杂温室环境的超宽带电动微耕机定位系统,有效提高了电动微耕机定位系统的稳定性,减小了定位误差,实现了微耕机无人化。

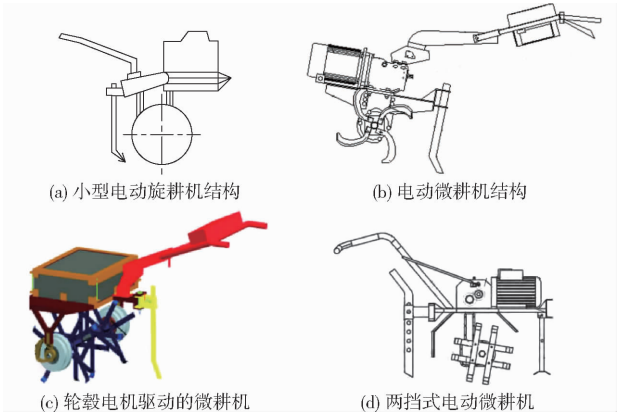


图 5 国内电动微耕机相关研究成果

Fig.5 Domestic electric micro-tiller related research achievements

传统微耕机一般用内燃机作为动力源,在空间密闭的温室大棚工作过程中排放大量废气,影响驾驶员的身体健康。电动微耕机采用电机驱动,振动小、噪声低,使用电机作为动力源具有无污染、零排放、能源利用率高等优点。传统微耕机与电动微耕机性能对比如表 1 所示。

表 1 传统微耕机与电动微耕机对比

Tab.1 Comparison between traditional micro-tiller and electric micro-tiller

类型	应用场景	优点	缺点
传统微耕机	小面积耕地、大棚	便于加注燃料、续航时间长	排放污染物、振动较剧烈
电动微耕机	小面积耕地、草坪、大棚	环保、无污染、更换农具实现多种作业、操作灵活、振动较轻	由电网供电的受到电缆限制操作繁琐、连续工作时间短、需要及时充电

综上所述,微耕机电动化是研究的前沿热点和行业发展趋势。电动微耕机可应用于温室大棚、果园等环保性要求较高及充电方便的场所,还适合于轻负荷作业的丘陵、山地地区。

1.4 电动移栽机

电动移栽机使用电机作为动力源,相较于传统燃油动力,具有更低的能耗和环保特性,符合现代社会对于节能减排、环保和可持续发展的要求。发展电动移栽机在提高农业生产效率、保护环境等方面具有重要意义。

JIN 等^[60] 设计了番茄盆栽幼苗自动移栽机(图 6a),采用分析图解法研究了番茄盆栽苗成功采摘的受力条件,并结合番茄幼苗的物理特性参数确定了该机器的关键参数,提高了移栽时的摘苗率,同时降低了移栽时的漏苗率。RAHUL 等^[61] 设计了一种二自由度并联机械臂蔬菜纸盆苗移栽机(图 6b),平均移植时间为 2.25 s,峰值功耗为 20.47 W,有效减小了功率消耗。WEN 等^[62] 设计了一种牵引式双排全自动移栽机(图 6c),详细设计了触摸屏-可编程控制器(TS-PLC)控制系统、配电系统、气动系统和机械传动系统,经过旱地的测试表明,当种植频率为 80 株/(min·行)时,插秧合格率为 92.08%,漏栽率为 3.61%,补种率为 2.92%,倒伏率为 0.42%,埋苗率为 0.28%,露塞率为 0.42%,伤苗率为 0.28%。KHADATKAR 等^[63] 设计了插拔秧苗机器人插秧机

(图 6d),包括 3 个系统:机器人启动、采苗机制(SPM)、车辆移动系统(VMS),经初步试验结果表明,30 日龄辣椒苗成活率为 95.1%,漏苗率为 7.6%,插秧成功率为 90.3%。



图 6 电动移栽机相关研究成果

Fig.6 Research achievements related to electric transplanter

相较于燃油动力移栽机,电动移栽机有以下优点:①环保节能:电动移栽机无废气排放,能够有效保护环境和驾驶员健康,能量利用率高。②维护成本低:电动移栽机不需要更换机油和空气滤网等易损件,维护成本较低,而且电机的使用寿命长,减少了更换和维修的频率。③易于操控:与燃油动力移栽机相比,电动移栽机通常采用简单直观的操纵系统,上手操作简单,学习成本低。④运行平稳:电动移栽机的电机运行平稳,无需担心马达熄火的情况出现。⑤适应性强:电动移栽机可根据作业环境和作业需求进行定制,具有很好的适应性。

电机代替燃油动力移栽机的缺点:①电池容量和续航里程限制了电动移栽机的使用时间。②充电时间和充电设施的建设不完善,影响了电动移栽机的使用效率。③电动移栽机造价相对较高,且维护电气系统的要求更高。④重量分布和平衡需要重新设计,以确保移栽机在工作时稳定性和安全性。

传统移栽机与电动移栽机对比如表 2 所示。

表 2 传统移栽机与电动移栽机对比

Tab.2 Comparison between traditional transplanter and electric transplanter

类型	能量来源	应用场景	优点	缺点
传统移栽机	化石燃料	丘陵山地、温室等	承载力强、续航里程长、加油快	污染环境、噪声大、维护成本高
番茄盆栽苗自动移栽机	电能	丘陵山地	操作简便,移栽效率高	插秧频率高时效率明显下降
搬运蔬菜纸盆苗移栽机	电能	温室	重量轻、操作简便、噪声和振动小、精度高	对机械臂连杆的刚度、制造部件的精度和驱动执行器的精度要求高
牵引式双排全自动移栽机	电能	平地或山脊	全自动移栽,发电机和锂电池都能为控制系统和电气元件提供电力	需要牵引工作,易出现漏播情况
插拔秧苗机器人插秧机	电能	棚架或棚网内	对根茎损害小	成本高,对车速要求高

综上所述,传统的手动或机械式移栽机在作业过程中需要大量人工操作,并且精度较低,容易造成植物受损或死亡。电动移栽机具备更高的自主性和精度控制能力,可以通过配置不同的传感器和工具适应不同的植物种类、环境条件和作业需求,实现全自动化操作。

1.5 电动果园作业机

针对丘陵山地地貌坡度陡峭、山路曲折迂回、弯曲处密集等特点,丘陵山地中单户种植规模小、集中管理困难、引进机械装备经济成本较高、收益较慢、较成熟的果园作业机械装备对丘陵山区适应性差、果园种植农艺较落后、不利于机械的进入等问题,国内外的学者对丘陵山地果园中的电动作业机械进行了研究。

果园植保机械动力来源多为柴油或汽油,作业危险系数较高,维护成本较高。张健等^[64]设计了电动遥控履带式喷药车(图7a),试验结果表明所设计的电动履带式喷药车可完成30°斜坡爬坡,与传统差速转向履带式车相比较,电动履带式喷药车速度控制更精准,遥控作业更灵活,具有较高的实用性和推广价值。荣喃喃等^[65]针对作业危险系数较高的喷药作业研制了一款微型自走式电动果园弥雾机(图7b),采用后桥电驱动系统,搭载风送式二次弥雾系统,利用远程遥控技术,无需果农进入园地,即可完成药物喷洒作业,整机传动效率达85%。TRONCON等^[66]对果园专业农用混合动力传动系统部件性能进行了分析,考虑尺寸约束和过载能力等要求,对电机进行了优化设计,设计的混合动力传动系统尺寸更小,生产成本更低(图7c)。易远飞等^[67]针对山地果园复杂的作业环境,设计一种轻简电动履带运输车(图7d),具有遥控和手动控制两种控制方式,能够原地差速转向,越障能力强,满足山地果园的运输要求。刘岳等^[68]设计了一种采用电机为动力源的蜗轮蜗杆双路传动链传动系统(图7e),通过设计的实验平台验证了可行性,该系

统机械效率高,为山地果园蓄电池驱动的单轨运输机的研究提供了参考。刘丽星等^[69]针对丘陵地区果品采摘、果树修剪等作业效率低的问题,研发了一种集采摘、运输、修剪于一体的小型果园电动作业平台(图7f),结构简单、操作方便,该平台性能稳定,续航能力强,可在0°~10°坡地果园进行高空农事作业,满足果园作业农艺要求。

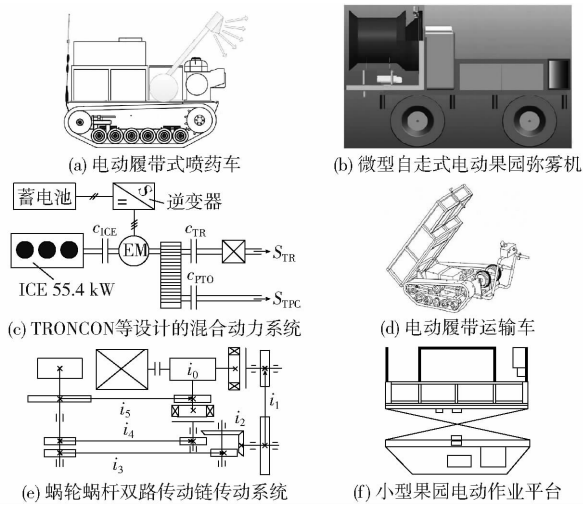


图7 电动果园作业机相关研究成果

Fig.7 Research achievements related to electric orchard machines

电动果园作业机一般采用电机驱动,由电气代替大量的机械传动,机械传动系统相对简单,能够缩小果园作业机的尺寸,电机工作过程消耗电能,工作过程中噪声相对较小,几乎不会释放污染物。但受到电池等技术的限制,电动果园作业机的续航相对较短。而传统果园作业机一般有离合器、变速机构、差速器等机构,相对复杂,由发动机驱动,发动机在工作的过程中会排放大量的一氧化碳、碳氧化合物、氮氧化合物和颗粒状物质,在空间密闭的温室大棚或生长茂密不透风的果园中,进行药物喷洒或树木修剪等作业,缺少远程控制驾驶的功能,作业危险系数较高,维护成本较高。具体对比情况如表3所示。

表3 传统果园作业机与电动果园作业机对比

Tab.3 Comparison between traditional orchard machines and electric orchard machines						
类型	环保性	噪声	经济性	部件复杂程度	续航	应用场景
传统果园作业机	环保性差	发动机作业过程噪声大	燃油价格较贵,经济性较差	有离合器、变速机构、差速机构等机构,结构相对复杂	较长	空间空旷、透气性相对较好的园林
电动果园作业机	几乎不释放污染物,环保性好	电机作业过程噪声小	电能较便宜,经济性好	由电传动代替机械传动,结构简单	较短	空间密闭的温室大棚或生长茂密不透风的果园中进行药物喷洒或树木修剪等作业

综上所述,目前国内针对山地电动果园作业机械主要包括剪枝机、运输机、施肥机、弥雾机等机械,

电动果园作业机相对于传统果园作业机的优势明显,体型小、污染小、噪声低,更适合于丘陵山地作

业,但我国的地貌广泛,土壤的特性也各有差别,缺少适用于具体地貌、具体地区、具体作业需求的专用电动果园作业机,因此需要针对不同地区、不同丘陵山地地貌,不同作业需求,研发适合的电动果园作业机。

1.6 电动播种机

传统播种机普遍采用燃油发动机作为动力,使用过程中会产生大量的有害气体,存在播种速度慢、作业质量不稳定、播种过程监控难等问题^[70]。电动播种机具有播种精度高、种子损伤率较低和环保节能等优势,国内外对电动播种机的研发已经取得了较多成果。

2016 年,矢崎公司生产的 SYV - M 系列电动播种机(图 8a),电机驱动,没有污染废气排放,播种作业更加省力^[71]。SUN 等^[72]设计了一种 2BDE - 2 型电动播种机(图 8b),该机可一次性完成开沟、精少量排种、覆土和镇压等播种作业,可解决谷子在丘陵和山区栽培难、工作量大等问题。JIN 等^[73]设计了小型蔬菜种子电动播种机,使用纤维传感器技术监测播种情况,提升了播种精度。曹慧鹏^[74]研制一款 2ZBF - 2 型自走式电动小型播种机(图 8c),通过升级为电动自走播种机,减少环境污染,更适宜丘陵的

播种作业。2019 年在中国国际农机展上北京德邦大为科技股份有限公司发布的电驱云技术高性能免耕精量播种机(图 8d),是国内首台集成 FOC(矢量控制)电驱精量免耕播种施肥、作业信息感知传感、播种智能监测以及末端控制于一体的电驱智能精量播种机^[75]。电动播种机相关研究成果如图 8 所示。

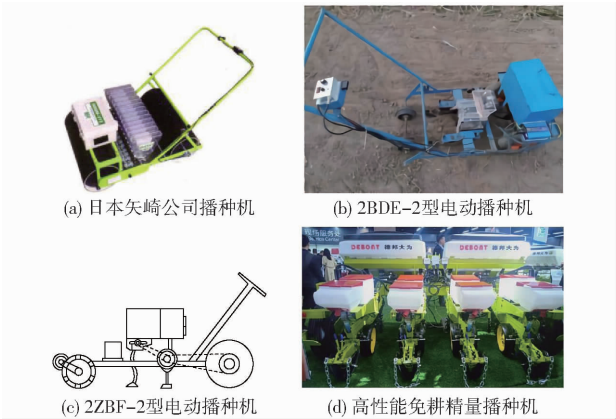


图 8 电动播种机相关研究成果

Fig.8 Research achievements related to electric seeder

与传统播种机相比,电动播种机具有噪声小、播种精度高、操作简单、维护方便等优点,但仍存在续航时间短、受天气影响较大等缺点。传统播种机与电动播种机对比如表 4 所示。

表 4 传统播种机与电动播种机对比

Tab.4 Comparison between traditional seeder and electric seeder

类型	驱动方式	应用场景	优点	缺点
传统播种机	内燃机	农田	动力性好、结构较为简单	排放高、播种精度低、种子损伤大
SYV - M 系列电动播种机	电机驱动	温室大棚、施肥	电力驱动、节能环保、低噪声、排放低、播种精度高、种子损伤低	续航时间短
MATRIX 1200/1800 型播种机	电机驱动	温室大棚、施肥	电力驱动、节能环保、低噪声、播种精度高、种子损伤低	续航时间短
电动蔬菜播种机	电机驱动	温室大棚	电力驱动、节能环保、低噪声、播种精度高、种子损伤低	作业效率低、依赖激光信号进行直线行走
2ZBF - 2 型自走式电动小型播种机	电机驱动	丘陵山区	电力驱动、节能环保、实现精量播种、播种精度高、种子损伤低	充电时间长、续航时间短
电驱云技术高性能免耕精量播种机	电机驱动	丘陵、温室大棚、施肥	电力驱动、节能环保、无噪声、播种精度高、种子损伤低	续航时间短、结构复杂、控制技术要求高、成本高

综上所述,目前国内外正向电动播种机方向过渡。电动播种机体积小,以电作为能源且控制精度较高,可满足于丘陵、温室大棚等应用场景。

2 电动农业装备发展瓶颈

电动车辆在传统燃油车辆产业链的基础上,在上游增加了电池、电机、电控系统等部件,在下游增加了充电设施、电池回收等产业。近年来,随着国家政策的支持和各项关键技术的突破,电动车辆产业迎来了快速发展。目前,电池的使用寿命、安全性和

续航能力是电动车辆行业急需解决的重要难题,充电基础设施不完善的问题也影响了电动车辆的推广^[76]。

与乘用车及其他商用车辆不同,大部分农业装备的使用时间较为集中,为了满足农业生产的作业环境、作业时间和农艺的要求,农业装备往往需要具备优越的适应性、可靠性和续航能力等性能^[77]。

(1) 适应性

与传统农业装备不同,电动农业装备均采用蓄电池作为整机关键部件,虽然在效率方面有较大提

升,但是蓄电池在高温、严寒等极端环境下适应性较差,极端的温度不仅会严重影响其性能,甚至还可能引发安全问题。

(2)可靠性

农业生产条件较为恶劣,电动农业装备结构较为复杂,因此对控制系统的要求较高。目前电动农业装备仍处于起步阶段,样机未经市场化检验,亟待攻克可靠性关键技术。

(3)续航能力

受制于电池技术的影响,无论是在能量密度还是在充电速度方面,目前的蓄电池都难以独立满足高负荷率工况的作业要求,因此纯电动系统仅用于轻负荷作业,尚无法用于中、重负荷作业。

(4)充电基础设施

大部分农业装备的使用频率较低且使用时间较为集中,农业生产的主要地区往往是在乡村等交通不便的地区,因此充电基础设施普及难度较大,同时充电设施的维护也是一大难题。

3 展望

(1)改进电池技术

电池是制约电动农业装备发展的核心组件,通过研发新型电池材料,改进电池的内部结构和离子传输路径,优化电极材料和电解质的组合和导电性能,可有效提高能量密度和加快充电速度;引入电池

管理系统进行实时监测和控制,提高电池的安全性和使用寿命。

(2)提高智能化和自动化水平

农业作业环境复杂多变,对电动作业装备的智能化和自动化提出更高要求,利用传感器和数据分析技术,实现农田作物的精准测量;采用自动驾驶技术,实现农田作业的自主导航和智能路径规划。

(3)提升电动农业装备的可靠性

通过设计合理的电路和系统布局,对设备或系统进行监测、分析和判断,识别设备或系统中存在的故障原因和位置,进行可靠性测试和验证,突破电磁兼容技术、故障诊断技术、试验验证技术,可以有效减少故障发生的概率,提高农业装备的稳定性。

(4)提升节能效果

优化装备的结构和布局,采用高强度轻质材料,减轻装备的整体重量,降低能源消耗;采用瞬时优化、动态规划等能量管理策略提升电动农业装备的能量转化效率,可有效提升装备节能效果和减少环境污染,提高装备的环境友好性。

(5)加大农村充电基础设施建设

建立电动农业装备充电基础设施需要综合考虑充电站建设、太阳能充电系统、智能充电管理系统、政策支持和资金投入等因素。通过政府引导和多方合作,可以逐步建立农村充电基础设施,促进电动农业装备的可持续发展和推广应用。

参 考 文 献

[1] LAGNELOV O, LARSSON G, LARSOLLE A, et al. Life cycle assessment of autonomous electric field tractors in Swedish agriculture[J]. Sustainability, 2021, 13(20): 11285.

[2] 李宵波,张盼盼,何亚鹏,等. 铅酸电池负极添加剂的研究进展[J]. 材料导报,2020,34(5):5039-5047.

LI Xiaobo, ZHANG Panpan, HE Yapeng, et al. Research progress in negative additives for lead-acid batteries[J]. Materials Reports, 2020,34(5):5039-5047. (in Chinese)

[3] DANIELL W E, TUNG L V, WALLACE R M, et al. Childhood lead exposure from battery recycling in Vietnam[J]. Biomed Research International, 2015(9): 1-10.

[4] CHEN X, YANG Z, WANG L, et al. Synthesis of rose-like ZnAl-LDH and its application in zinc-nickel secondary battery[J]. Nanotechnology,2018, 30(1):015602.

[5] RONG Y, YANG Z, DENG L, et al. ZnO@Ag microspheres used as the anodic materials of superior alkaline rechargeable Zn-Ni batteries[J]. Ceram. Int., 2020, 46(10):16908-16917.

[6] HONG J, WANG Z, LIU P. Voltage fault precaution and safety management of lithium-ion batteries based on entropy for electric vehicles[J]. Energy Procedia,2016,104:44-49.

[7] ZHANG J, ZHANG L, SUN F, et al. An overview on thermal safety issues of lithium-ion batteries for electric vehicle application[J]. IEEE Access,2018,6:23848-23863.

[8] 温传新,王培欣,花为. 电动汽车驱动系统的研究现状与发展趋势[J]. 微电机,2019,52(10):103-109.

WEN Chuanxin, WANG Peixin, HUA Wei. Driving technology of electric vehicles: current developments and future prospects[J]. Micromotors,2019,52(10):103-109. (in Chinese)

[9] HUSIN Z A, SULAIMAN E, KHAN F, et al. Design study and performance analysis of 12S-14P field excitation flux switching motor for hybrid electric vehicle[C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2015: 070115.

[10] ZHAI L, SUN T, WANG J. Electronic stability control based on motor driving and braking torque distribution for a four in-wheel motor drive electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4726-4739.

[11] WIDMER J D, MARTIN R, KIMIABEIGI M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets[J]. Sustainable

Materials and Technologies, 2015, 3: 7 – 13.

- [12] CRIDER J M, SUDHOFF S D. An inner rotor fluxmodulated permanent magnet synchronous machine for low-speed high-torque applications[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 1247 – 1254.
- [13] ZHANG T, XU Z, GERADA C, et al. A nonlinear extended state observer for sensorless IPMSM drives with optimized gains [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1485 – 1494.
- [14] 商高高, 张建舟, 张家俊. 履带式电动拖拉机驱动系统控制策略的研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(11): 32 – 38.
SHANG Gaogao, ZHANG Jianzhou, ZHANG Jiajun. Research on control strategy of tracked electric tractor drive system[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2017, 31(11): 32 – 38. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 徐立友, 刘孟楠, 周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 11 – 18.
XU Liyou, LIU Mengnan, ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(9): 11 – 18. (in Chinese)
- [19] 汪珍珍, 周俊, 王旭. 增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 428 – 438.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, WANG Xu. Research on energy management model for extended-range electric rotary-tilling tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 428 – 438. (in Chinese)
- [20] 王宝超, 乔明睿, 初香港, 等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431 – 439.
WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431 – 439. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 中国一拖. 中国一拖混合动力拖拉机下线, 2023 年投放市场[J]. 农业机械, 2022(8): 27.
- [23] MAO Y, WU Y, YAN X, et al. Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica[J]. Plos One, 2022, 17(11): e0276231.
- [24] 朱镇, 赖龙辉, 王登峰, 等. 油电混合动力液压式拖拉机动力系统节能性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 52 – 60.
ZHU Zhen, LAI Longhui, WANG Dengfeng, et al. Energy saving characteristics of the mechanical hydraulic tractor power system with oil electric hybrid power[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 52 – 60. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] 杨晋强, 陈凤, 郑恩来, 等. 基于磁-热双向耦合的电动拖拉机轮边电机电磁性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 73 – 82.
YANG Jinqiang, CHEN Feng, ZHENG Enlai, et al. Electromagnetic performance analysis and structural optimization of the wheel-side motors for electric tractors based on magneto-thermal bidirectional coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 73 – 82. (in Chinese)
- [27] 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)
- [28] Siemens tiller tractors[EB/OL]. (2016-07-16) [2023-06-04]. <http://www.bungartz.nl/Siem4mod.html>.
- [29] 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 College. “Electric cattle-33” and “electric cattle-55” electric tractors[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 1960(3): 1 – 11. (in Chinese)
- [30] Elec-trak garden tractor news. My elec-traks[EB/OL]. [2023-06-04]. <https://myelec-traks.com>.
- [31] D&D motor systems, Inc. US electric ATV maker hopes to tap farmers market[EB/OL]. (2014-07-17) [2023-06-04]. <http://www.ddmotorsystems.com/ATV-UtilityVehicleMotors.php>.
- [32] 朱凤芹. 纽荷兰“氢动力”燃料拖拉机技术获 SIMA 创新金奖[N]. 中国农机化导报, 2009-02-23(002).
- [33] 陶建华. 中国一拖发布全国首款 5G + 氢燃料电动拖拉机[J]. 当代农机, 2020(7): 29.
TAO Jianhua. YTO released China's first 5G + hydrogen fuel electric tractor[J]. Contemporary Farm Machinery, 2020(7):

29. (in Chinese)
- [34] 李同辉, 谢斌, 王东青, 等. 双电机驱动电动拖拉机实时自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 530–543.
LI Tonghui, XIE Bin, WANG Dongqing, et al. Real-time adaptive energy management strategy for dual-motor-driven electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.2): 530–543. (in Chinese)
- [35] 张俊江, 冯港辉, 徐立友, 等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机节能控制[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 396–406.
ZHANG Junjiang, FENG Ganghui, XU Liyou, et al. Energy-saving control of hybrid tractor based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 396–406. (in Chinese)
- [36] XU L, ZHANG J, LIU M, et al. Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2017, 10(5): 35–44.
- [37] SUN Y, XIA C, HAN J. Research on energy management of fuel-cell electric tractor based on quadratic utility function[J]. Journal of Energy Engineering, 2023, 149(1): 04022044.
- [38] WANG S, WU X, ZHAO X, et al. Co-optimization energy management strategy for a novel dual-motor drive system of electric tractor considering efficiency and stability[J]. Energy, 2023, 281: 128074.
- [39] JIA C, QIAO W, QU L. Modeling and control of hybrid electric vehicles; a case study for agricultural tractors[C]//2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE, 2018: 1–6.
- [40] 窦海石, 张幽彤, 艾强, 等. 面向耦合分流动力构型的拖拉机犁耕工况控制策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 41–49.
DOU Haishi, ZHANG Youtong, AI Qiang, et al. Control strategy for hybrid tractor plow conditions oriented to coupled-split dynamic configuration[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 41–49. (in Chinese)
- [41] ZHANG J, FENG G, LIU M, et al. Research on global optimal energy management strategy of agricultural hybrid tractor equipped with CVT[J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(5): 127.
- [42] LIU M, XU L, ZHOU Z. Design of a load torque based control strategy for improving electric tractor motor energy conversion efficiency[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 2548967.
- [43] YU Y, HAO S, GUO S, et al. Motor torque distribution strategy for different tillage modes of agricultural electric tractors[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1373.
- [44] MELO R R, TOFOLI F L, DAHER S, et al. Wheel slip control applied to an electric tractor for improving tractive efficiency and reducing energy consumption[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4527.
- [45] CHEN Y, XIE B, MAO E. Electric tractor motor drive control based on FPGA[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 271–276.
- [46] SUNUSI I I, ZHOU J, SUN C, et al. Development of online adaptive traction control for electric robotic tractors[J]. Energies, 2021, 14(12): 3394.
- [47] ZHANG S, WEN C, REN W, et al. A joint control method considering travel speed and slip for reducing energy consumption of rear wheel independent drive electric tractor in ploughing[J]. Energy, 2023, 263: 126008.
- [48] 朱留宪, 杨玲, 杨明金, 等. 我国微型耕耘机的技术现状及发展[J]. 农机化研究, 2011, 33(7): 236–239.
ZHU Liuxian, YANG Ling, YANG Mingjin, et al. Technical status and development trend of the mini-tiller in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(7): 236–239. (in Chinese)
- [49] BODRIAL L, FIALA M. Design and testing of an electric-powered walking tractor[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 60(1): 57–62.
- [50] KIRSCH D. History of the electric automobile: battery-only powered cars[J]. Technology and Culture, 1995, 3: 710–712.
- [51] IKOMA H, YOSHIHARA K, KATO W, et al. Straight driving control for electric tiller considering human driving input[C]//IECON 2015–41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2015: 004935–004940.
- [52] 李达, 朱德清, 吕长义. 棚室耕整机具的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1999, 30(2): 144–146.
LI Da, ZHU Deqing, LÜ Changyi. The development of a greenhouse cultivator[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1999, 30(2): 144–146. (in Chinese)
- [53] 高辉松, 朱思洪, 史俊龙, 等. 温室大棚用电动微耕机研制[J]. 机械设计, 2012, 29(11): 83–87.
GAO Huisong, ZHU Sihong, SHI Junlong, et al. Development of electric micro-farming machines for greenhouses[J]. Mechanical Design, 2012, 29(11): 83–87. (in Chinese)
- [54] 刘学林, 王晶, 高辉松. 基于轮毂电机驱动的电动微耕机机架设计与分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(14): 6557–6560.
LIU Xuelin, WANG Jing, GAO Huisong. Design and analysis of electric micro-farming machine frame based on the in-wheel motor[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(14): 6557–6560. (in Chinese)
- [55] 赵润华, 吴彦强, 刘中正, 等. 温室电动微耕机的设计[J]. 山东农业科学, 2015, 47(2): 129–131.
ZHAO Runhua, WU Yanqiang, LIU Zhongzheng, et al. Design of electric micro rotary tiller[J]. Shandong Agricultural Science, 2015, 47(2): 129–131. (in Chinese)

- [56] 黄伟玲, 王忠锋. 面向赣南山区应用特色的微耕机设计与研究[J]. 南方农机, 2015, 46(3): 42–44.
HUANG Weiling, WANG Zhongfeng. Design and research of micro-cultivator for application characteristics in Gannan mountainous area[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 42–44. (in Chinese)
- [57] HUANG G, WANG H, LIANG X. Vibration analysis on the rack of electric mini-tiller[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2218(1): 012068.
- [58] NIU P, CHEN J, ZHAO J, et al. Analysis and evaluation of vibration characteristics of a new type of electric mini-tiller based on vibration test[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(5): 106–110.
- [59] LIN Y, CHEN Q, ZHANG H, et al. Design and test of a positioning system for a greenhouse electric micro-tiller based on ultra-wideband[J]. Mechanical Sciences, 2022, 13(1): 225–237.
- [60] JIN X, ZHAO K, JI J, et al. Design and experiment of automatic transplanting device for potted tomato seedlings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(3): 1045–1054.
- [61] RAHUL K, RAHEMAN H, PARADKAR V. Design and development of a 5R 2DOF parallel robot arm for handling paper pot seedlings in a vegetable transplanter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105014.
- [62] WEN Y, ZHANG J, TIAN J, et al. Design of a traction double-row fully automatic transplanter for vegetable plug seedlings[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106017.
- [63] KHADATKAR A, PANDIRWAR A P, PARADKAR V. Design, development and application of a compact robotic transplanter with automatic seedling picking mechanism for plug-type seedlings[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 1883.
- [64] 张健, 秦庆国, 张智刚, 等. 电动遥控履带式果园喷药车的设计[J]. 农机化研究, 2020, 42(3): 249–253.
ZHANG Jian, QIN Qingguo, ZHANG Zhigang, et al. Design of electric radio-controlled caterpillar spraying vehicle for orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(3): 249–253. (in Chinese)
- [65] 荣喃喃, 王冉冉, 郭鹏军, 等. 微型自走式电动果园弥雾机的研制与试验[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 92–95.
RONG Nannan, WANG Ranran, GUO Pengjun, et al. Design and experiment of the micro self-propelled electric sprayer in orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 92–95. (in Chinese)
- [66] TRONCON D, ALBERTI L. Case of study of the electrification of a tractor: electric motor performance requirements and design[J]. Energies, 2020, 13(9): 2197.
- [67] 易远飞, 李震, 陈珊, 等. 轻筒电动履带运输车的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(9): 226–232.
YI Yuanfei, LI Zhen, CHEN Shan, et al. Design and test of light electric crawler transport[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(9): 226–232. (in Chinese)
- [68] 刘岳, 李震, 洪添胜, 等. 山地果园蓄电池驱动单轨运输机传动系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 34–40.
LIU Yue, LI Zhen, HONG Tiansheng, et al. Design of drive system for battery-drive monorail transporter for mountainous orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 34–40. (in Chinese)
- [69] 刘丽星, 刘洪杰, 裴晓康, 等. 小型果园电动作业平台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(7): 90–94.
LIU Lixing, LIU Hongjie, PEI Xiaokang, et al. Design and test of electric operation platform for small orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(7): 90–94. (in Chinese)
- [70] CHEN J, ZHANG H, PAN F, et al. Control system of a motor-driven precision no-tillage maize planter based on the CANopen protocol[J]. Agriculture, 2022, 12(7): 932.
- [71] 矢崎 SYV 电动式小粒种子播种机[J]. 现代农机, 2016, 131(3): 44.
- [72] SUN D, CUI Q, ZHANG Y, et al. Performance test of the 2BDE–2 type millet fine and small-amount electric seeder[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 60(1): 129–136.
- [73] JIN X, LI Q, ZHAO K, et al. Development and test of an electric precision seeder for small-size vegetable seeds[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(2): 75–81.
- [74] 曹慧鹏. 2ZBF–2 型自走式电动多功能小型播种机的设计与研制[J]. 当代农机, 2016(10): 66–67.
CAO Huipeng. Design and development of 2ZBF–2 self-propelled electric multifunctional small seeder[J]. Contemporary Farm Machinery, 2016(10): 66–67. (in Chinese)
- [75] 李社潮. 德邦大为电驱云技术高性能电驱云技能免耕精量播种机[EB/OL]. [2023–06–04]. https://www.sohu.com/a/352049327_175192.
- [76] MAGALHAES R O, ASSUNCAO M V, SANTOS J P M, et al. Review on applications of electric vehicles in the countryside[J]. Ciência Rural, 2017, 47: e20161076.
- [77] CABAN J, VRABEL J, ŠARKAN B, et al. Analysis of the market of electric tractors in agricultural production[C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 244: 03005.