

赵国栋,管春松,高庆生,等. 电动拖拉机发展现状与趋势[J]. 江苏农业科学,2018,46(22):24-28.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.005

电动拖拉机发展现状与趋势

赵国栋,管春松,高庆生,杨雅婷,陈永生,崔志超

(农业部南京农业机械化研究所,江苏南京 210014)

摘要:传统燃油拖拉机作业时会有产生大量尾气、振动、噪音污染等问题,不适合密闭的温室大棚环境作业,电动能源清洁高效、节能降本、控制灵活等优点,使得以电能为动力的电动拖拉机应运而生,并已逐渐成为未来拖拉机的发展趋势之一。为此,回顾电动拖拉机的发展历程,并对目前国内外电动拖拉机研究现状进行总结;进一步分析电动拖拉机的电池与能量分配技术、传动与转向技术、悬挂技术与控制方法、自动导航及系统仿真等关键技术,以及这些技术的发展现状与存在的问题;最后提出电动拖拉机的发展趋势与建议,以期为今后电动拖拉机的研究及其发展提供借鉴意义。

关键词:电动拖拉机;助力转向;电动悬挂;自动导航;系统仿真;传动系统;结构原理

中图分类号: TP271+.4;S219.0

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2018)22-0024-05

随着电机学、微电子技术、自动导航等现代技术的发展和能量密度储能设备的研发以及机械制造业的日趋成熟,电动车辆不断出现并普及。此类高新技术的发展有助于将电动汽车的成果应用到农业机械上,并为农用电动拖拉机的研发提供理论依据和技术支撑。以电能为利用形式的新能源取代石油等一次能源是未来能源的发展趋势。电动拖拉机能有效解决传统燃油拖拉机噪音大、效率低、尾气排放污染环境等问题^[1],而且电动拖拉机具有灵活的功率控制能力,传动机构多用电机控制,能进一步简化整机结构。目前,国内对电动拖拉机的研究仍处于起步阶段而且多集中在基础研究方面。本文从技术角度对国内外电动拖拉机的发展历程,电池、传动、转向及悬挂等关键部件及系统进行分析,以期为今后电动拖拉机的研究和发展提供参考。

1 国内外电动拖拉机研究现状

1.1 国外研究现状

纵观电动拖拉机 100 多年的发展历程,电动拖拉机的发展主要分为 2 个阶段:第 1 阶段是从 19 世纪 80 年代末到 20 世纪 70 年代,这一阶段主要由电网提供电源,在这一阶段德国、瑞典、前苏联等国家对电动拖拉机进行了开发研制:1912 年西门子股份公司研制出一种用于驱动旋耕机的电动拖拉机;1941 年瑞典研制出一款可换耕具的多用途电动拖拉机;1949 年前苏联研制出一台 37 kW 的新型电动拖拉机。这一阶段的电动拖拉机大多都通过长长的导线与电网相连接,受电缆长度影响,其工作效率较低。第 2 阶段是从 20 世纪 70

年代至今,是由车载电池提供能源。20 世纪 70 年代美国通用电气公司率先使用蓄电池和永磁无刷电机作为动力源,研制出 Elec-Trak 系列电动拖拉机^[2],这也是现代电动拖拉机发展的开端。自 20 世纪 90 年代开始,随着能量存储装置和控制技术的迅速发展,电动拖拉机也有了长足发展。美国 Gorilla Vehicle 公司率先研制出一台可以实现无极变速以及智能控制的电动拖拉机^[3]。2011 年,日本井关农机株式会社研制出一台可用于旋耕和除草作业的电动拖拉机^[4]。2012 年日本爱媛大学研制出一台可用于温室大棚工作的小型电动拖拉机,该电动拖拉机具有无尾气排放、噪音小等优点。2017 年法国 SIMA 展,John Deere 公司发布了世界首款纯电动拖拉机——可持续能源供应农业机械(sustainable energy supply for agricultural machines,简称 SESAM)。该电动拖拉机可持续作业 4 h,由于是电力驱动整个传动系统,所以结构简单,降低了传输环节的功率损失。

1.2 国内研究现状

我国电动拖拉机起步晚,从 2007 年开始南京农业大学的高辉松博士团队研发出 6 档的四轮电动拖拉机,并不断对其进行优化完善,提出驱动系统设计的相关理论和计算方法并对驱动系统进行仿真研究^[5]。2012 年西北农林科技大学王元杰团队以铅蓄电池为动力源、直流串励电动机为动力机研制出一款温室遥控电动拖拉机,进行整机试验并提出电池能量分配理论^[6]。2017 年中国农业大学陈燕呢等以小型电动拖拉机为研究对象,进行控制器局域网络(controller area network,简称 CAN)总线通信网络结构设计,并对网络节点进行功能定义,为我国电动拖拉机领域智能化的研究提供了参考^[7]。综上所述,国内外对电动拖拉机的理论研究及样机研制已经取得了一些成果,目前已经向自动化、智能化方向发展。

2 电动拖拉机发展的关键技术

2.1 电池与能量分配技术

电池作为纯电动拖拉机唯一的能量源,其性能的优劣直

收稿日期:2017-07-10

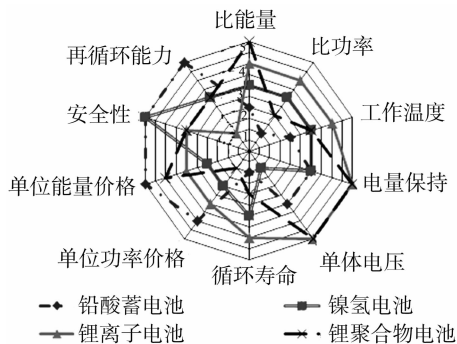
基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0701000);中国农业科学院基本科研业务费专项(编号:S201714)。

作者简介:赵国栋(1992—),男,山西平遥人,硕士研究生,主要从事设施农业机械研究。E-mail:820792181@qq.com。

通信作者:管春松,博士,助理研究员,主要从事设施农业机械研究。

E-mail:cs.guan@163.com。

接决定了电动拖拉机动力性、经济性、安全性的好坏。因此,对纯电动拖拉机电池进行研究具有重要意义。目前广泛应用于市场的动力电池主要有铅酸蓄电池、镍氢电池、锂离子电池、锂聚合物电池,4 种电池在比能量、安全性、成本等方面的比较如图 1 所示。



锂离子电池作为新一代的化学电源,具有比能量大、质量轻、无污染、充放电短等优点但其缺点也非常明显,主要集中在再循环能力方面。目前,新电池技术的研发也主要集中在锂离子电池技术方面的突破。德国 DBM Energy 公司研制的 KOLIBRI 锂聚合物电池组比能量可达 $340 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$,可提供 55 kW 的功率;美国 SionPower 公司的产品,比能量可达 $350 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ ^[8]。就电动拖拉机作业要求可以选择锂离子电池和超级电容器搭配,得到新型的锂超级电容器提供动力电源,这种电池安全性能好、比能量高、节能环保,适合作为电动拖拉机的动力来源。

锂超级电容器组数量 n 根据连续作业时间和牵引电机的最大功率这 2 个参数确定^[9]。

$$n = \max(n_1, n_2) \quad (1)$$

式中: n_1 为牵引电机峰值功率所需锂电池数量; n_2 为整机连续作业时间所需锂电池数量。

$$n_1 \geq \frac{P_{N\max}}{P_{b\max} \eta_{mc}} \quad (2)$$

式中: $P_{N\max}$ 为牵引电机峰值功率; $P_{b\max}$ 为单个锂电池所能提供的最大功率; η_{mc} 为牵引电机及控制器整体效率。

$$n_2 \geq \frac{T_{\min} P_N}{w} \quad (3)$$

式中: T_{\min} 为整机连续作业时间; P_N 为牵引电机的额定功率; w 为单个锂电池所能释放的电能。

电动拖拉机使用的动力电池有高功率密度、高能量密度、节能环保等要求,所以须要对电池进行行之有效的能量分配管理。电池能量管理主要包括估算电池组的荷电状态 (state of charge, 简称 SOC)、动力电池组状态采集、均衡控制热管理等。能量管理控制器通过综合分析锂电池组驱动牵引电机和提升电机等各个动力部件的运行特性及效率特性,优化动力系统效率,实现总体效率最大。整车能量系统对电源的需求功率为 $P_{\text{req}}(t)$,电源系统允许输出功率为 $P_{\text{ess}}(t)$,由锂电池提供功率 $P_{\text{li}}(t)$ 和超级电容提供功率 $P_{\text{uc}}(t)$ 组成,即有:

$$P_{\text{req}}(t) = P_{\text{ess}}(t) = P_{\text{li}}(t) + P_{\text{uc}}(t) \quad (4)$$

定义电池功率分配因子 K ,则有^[10]:

$$K = P_{\text{li}}(t) / P_{\text{uc}}(t) \quad (5)$$

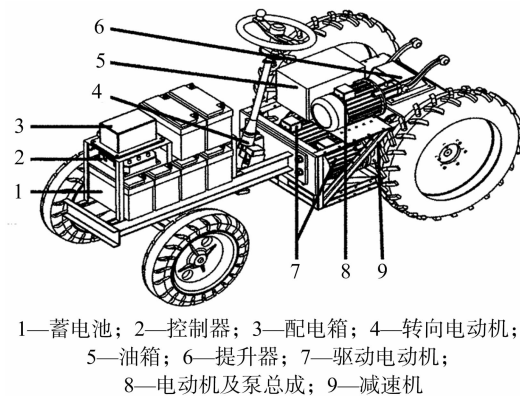
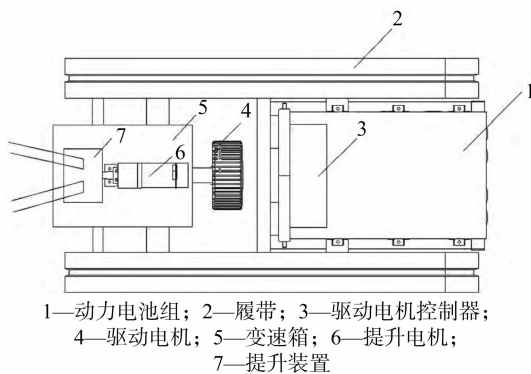
能量管理控制器的目标为

$$\begin{cases} \min F(X) \\ \text{s. t. } g_i(X) > 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

式中: $F(X)$ 为目标函数,表示锂电池综合耗电量; $g_i(X)$ 为约束条件,表示电动拖拉机必须满足的最高行走速度、最快工作速度、持续工作时间、加速性能等。

2.2 传动系统

传动是电动拖拉机底盘的重要组成部分,其作用是根据电动拖拉机作业需求的不同,将电动拖拉机的动力转变为一定的转速和相应的转矩,其性能将直接影响电动拖拉机整车的动力性、舒适性和经济性。杨立昆等通过对车辆传动系统之间的探索,指出其内在变化规律,并提出传动系统的未来发展趋势^[11]。江苏大学商高等针对履带式电动拖拉机传动系统进行优化和匹配,最终确定总机布置示意图如图 2 所示^[12]。中国农业大学谢斌等对双轮驱动电动拖拉机传动性能进行研究,提出如图 3 所示的总体结构方案,并对其进行性能测试、理论计算和试验验证^[13]。



传动系统由离合器、中央传动机构、变速箱及最终传动等构成。由于电动拖拉机须要与农机具配套完成田间作业,因此对拖拉机传动特性可以结合传动快速性、换挡性能、平顺性和传动效率等 4 个方面综合进行分析^[14]。

2.2.1 稳定时间反映传动的快速性,也就是动力在传动系统各部件之间的传递时间:

$$t = \int dt = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{a} dv. \quad (7)$$

式中: t 为稳定时间; v 为行驶速度; v_1 为起始速度; v_2 为终止

速度; a 为加速度。

2.2.2 拖拉机换挡过程中对传动系统会有较大冲击,减少传动元件的使用寿命。冲击度为拖拉机纵向加速度的变化率,排除了因道路条件产生的颠簸等的影响,可以真实体现传动系统的寿命。

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} \quad (8)$$

式中: j 为冲击度。

2.2.3 传动平顺性体现了动力从电动机在各级传递系统中的传递良好性,是换挡品质的良好体现,快捷、平稳、无冲击的换挡品质可以提高整机舒适性并且是元件使用寿命的重要保证。

2.2.4 传动系统的效率损失主要由主减速和变速器产生,可以通过传动系统输入端和输出端功率的比值计算得出:

$$\eta_c = \frac{P_w}{P_e} \quad (9)$$

式中: η_c 为传动效率; P_w 、 P_e 分别为输出端和输入端功率。

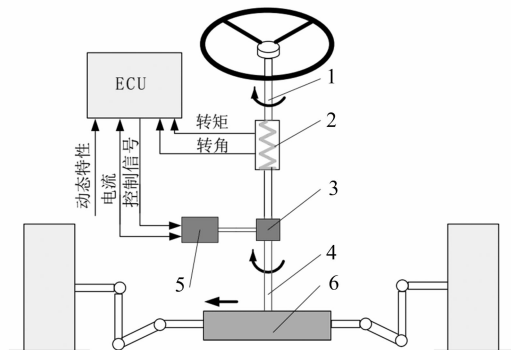
传动效率不高是制约电动车辆发展的重要因素之一,传动效率的提高是电动拖拉机传动系统发展的趋势和目标。未来会更多关注于整个传动链的研发,在保证传动安全性和可靠性的同时使各个传动部件更好地配合以降低传动损失。

2.3 助力转向技术

转向系统作为人车交互系统,其性能的好坏直接影响电动拖拉机的行驶安全性和操作稳定性。转向系统从传统的纯机械式转向系统到动力转向系统再到主动转向系统、差速助力转向系统,转向性能已经从解决驾驶员的疲劳驾驶发展到如今的智能辅助驾驶。

电动助力转向系统(electric power steering system,简称EPS)是一种直接依靠电机提供辅助扭矩的动力转向系统,通过控制电机电流的大小和方向,来调节拖拉机助力的大小和转向,同时满足电动拖拉机低速转向轻便性和高速路感的要求。按照电机安装位置的不同可分为管柱式助力转向系统、齿条式助力转向系统和齿轮式电动助力转向系统。图4为常见的管柱式助力转向系统结构原理图^[15],其工作原理为在转向输入轴端通过转矩、转角传感器检测其转矩和转角,电子控制单元(electronic control unit,简称ECU)结合车速、加速度等拖拉机动态特性发出控制信号控制其电机电流的大小,经过减速机构放大,通过转向输出轴作用到转向器上,实现助力转向。与传统液压助力转向系统相比,EPS助力响应较快、节能环保而且具有较高的稳定性和安全性。

在电动助力转向系统设计中,路感特性的研究是其技术的主要方面。路感一般是指驾驶员转动方向盘时,须要克服的阻力矩,是由回正力与摩擦力产生的阻力矩组成。由回正力矩产生的路感信息可以准确反映整车的运行状态与路面信息。路感的评价指标^[16]为(1)轻便性:指驾驶员的劳动强度,评价标准是执行机构中转向轮的做功与驾驶员操作方向盘实际做功之比,其比值越大越好。(2)真实度:车辆状态与路面状况反映的准确性,评价标准是轮胎转向驱动力矩与模拟路感的比值,比值越小路感越清新。(3)转矩刚度:驾驶过程中,驾驶员感觉到的转向刚度,评价标准可用转矩曲线梯度-



1—转向输入轴;2—转矩传感器;3—减速机构;
4—转向输入轴;5—电动机;6—齿轮齿条转向器

图4 电动助力转向系统结构原理图^[15]

方向盘转角来衡量。(4)平稳性:方向盘反作用力变化平稳的程度,评价标准是转向盘有无冲击与抖动。(5)回正性:驾驶员脱离方向盘后,方向盘在反力矩的作用下的回正性能,评价标准可用回正的响应时间、超调量等来衡量。

随着汽车技术在拖拉机等农用车辆上的不断发展和应用,拖拉机转向系统发展趋势为在保证转向轻便性能的基础上,制定合适的控制策略使驾驶员获得更加舒适的转向感觉,通过主动转向干预,有效提高拖拉机的操作稳定性和主动安全,除此之外,助力转向系统也不断向智能化和集成化的方向发展。

2.4 电动悬挂系统及控制方法

用电动提升和控制农机具的整套装置为电动悬挂装置。电动悬挂装置是利用发动机提供动力,提升并维持农具处于各种不同位置的悬挂装置。悬挂式可以改变拖拉机的受力状态,有利于改善拖拉机的牵引性能。主要用来操作农机具的升降,连接和牵引农机具,控制农机具的耕作深度或提升高度,改善附着性能。

由于液压系统可以获得较大的转矩和力以及具有方便等特点,在传统的悬挂系统中广泛采用液压悬挂系统来实现农机具挂接作业,但随着科学技术的发展液压系统的弊端逐渐显现:悬挂装置效率低、故障多、结构复杂以及制造和使用成本高等^[17],所以从能源节省、作业质量提高等角度研究新型的电动悬挂装置势在必行。

江苏大学蔡高奎团队研制出一种拖拉机后悬挂提升装置,如图5所示^[18]。该样机包括提升电机、减速装置、提升装置、力位角度传感器等;农户通过控制面板上的按钮发出指令,命令通过相应的控制算法计算输出信号,控制直流电机的运转,动力依次经过一级齿轮减速机构、二级蜗轮蜗杆减速机构传递给提升臂,从而驱动上拉杆、提升杆、下拉杆,调节农机具的升降,满足耕深、牵引力等的要求。该电动提升装置安装有力位角度传感器可间接测量耕深,耕深变化时,经过提升控制器分析处理传感器采集的相关数据后,自动调节农具的提升和下降,以实现耕深调节一致。

耕深调节研究是电动悬挂控制研究中不可缺少的一部分。传统的耕深调节方法有高度调节法、位调节法、力调节法以及由这些常规耕深调节方法复合而来的综合调节法,此外,近年来还出现了扭矩调节法、压力调节法和滑转率调节法等新型农具调节方法,但这些方法一般只作为辅助的耕深控制

方法,需要与常规的耕深调节方法结合起来使用^[19]。电动悬挂系统除了使用力位综合调节方法对拖拉机进行耕深研究外,还可以基于滑转率对拖拉机耕深调节系统进行研究。

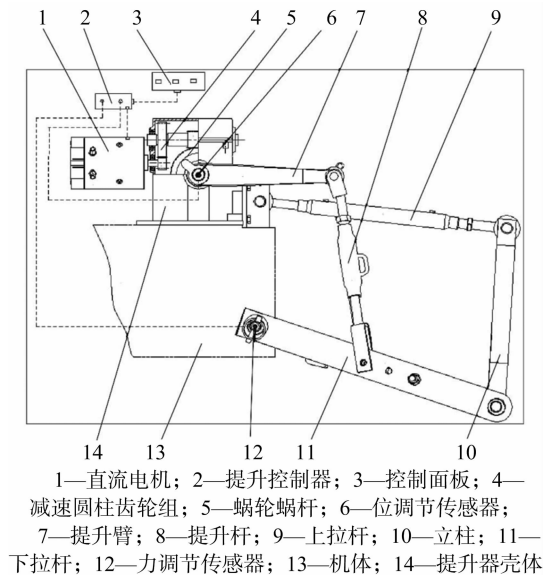


图5 电动提升悬挂系统设计方案^[18]

由于经典的比例 - 积分 - 微分 (proportion, integral, differential, 简称 PID) 控制系统具有结构简单、鲁棒性强、易于调整等优点,所以其普遍应用在控制系统中,拖拉机悬挂控制系统广泛采用 PID 控制算法。罗锡文等设计出反馈比例 - 积分 (proportion, integral, 简称 PI) 算法与双阈值斜坡启动相结合的电动机控制方法,用于拖拉机悬挂系统的操作控制^[20]。随着控制理论的不断深入,出现了遗传算法、模糊控制等智能算法,智能算法的出现为解决复杂工程问题提供了方法。在拖拉机进行田间作业时,由于受到的阻力实时变化、工作环境复杂、悬挂受力不确定等因素,导致拖拉机悬挂系统精确数学模型很难建立传统的控制算法,会影响其稳定性和控制精度。模糊控制可以克服非线性因素的影响,而且其在拖拉机悬挂系统中算法简单,容易实现。虽然智能算法为复杂问题的解决提供了方法,但是提高了系统设计的难度。如果将经典的控制算法与现代智能算法相综合,如模糊 PID 综合控制算法,既具有经典 PID 控制的适应性好、简单方便等特点,又具有模糊控制适应非线性系统、智能性的特点。将模糊 PID 控制算法应用到悬挂系统中不失为一种很好的方法^[21]。

2.5 自动驾驶技术

农业机械自动驾驶技术是现代农机装备和精准农业技术体系中的一项关键技术。近年来农用车辆路径跟踪控制技术受到了国内外科研人员的广泛关注,该技术主要利用全球定位系统(global position system, 简称 GPS) 技术实现农用车辆位置的高精度测量。拖拉机自动驾驶的关键技术包括利用传感器精确定位和选用合适的算法进行导航控制。目前,导航定位传感器主要用于施肥、喷药等的机器视觉导航技术,包括 GPS 定位系统、航空推算传感器、惯性导航系统、激光导航、多传感器融合技术等。由于拖拉机的运动是一个多输入、多输出、强耦合、非线性的变量系统,因此拖拉机自动驾驶导航系统包括转向控制和速度控制。拖拉机导航控制包括路径跟踪

控制和转向操作控制 2 个部分。常见的路径控制方法有线性模型、最优控制、PID 控制、神经网络以及纯追踪模型等。线性模型基于最小二乘导航路径拟合算法,算法简单但鲁棒性差、无法消除稳态误差;最优控制可获得最优控制参数,但对曲线追踪的适应性差而且需要精确的动力学及运动学模型;PID 控制是最常见的一种控制算法,鲁棒性强而且算法简单,但是参数优化困难;神经网络对非线性运动特性适应性强,但需要大量的验证样本对。由于拖拉机作业时一般以较低的恒定速度运行,建立如图 6 所示的拖拉机运动学模型。其中, S 为目标路径; θ 为拖拉机航向偏差; α 为拖拉机前轮转角; l 为拖拉机航向上点 B 距离拖拉机前轴中心点的距离; ξ_p 为点 B 到路径的偏差; L 为拖拉机轴距; v 为拖拉机后轴中心点速度; d 为拖拉机后轴中心点到路径的横向偏差。根据图 6 所示的拖拉机运动学模型可得到拖拉机运动学方程^[22]:

$$\begin{cases} \dot{d} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{l} \tan \alpha \\ \dot{\alpha} = \mu \end{cases} \quad (10)$$

式中: μ 为前轮转角加速度。

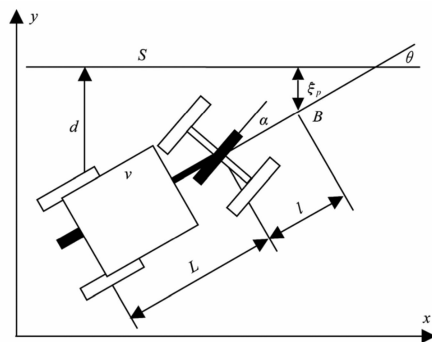


图6 拖拉机运动学模型^[22]

近年来,随着精准农业、智能农业的发展,在拖拉机自动驾驶技术中引入先进的物联网技术已经成为现代农机导航技术发展的重要趋势之一。建立在以电子编码和电子标签为基础的农机物联网技术,在拖拉机自动驾驶技术方面应解决 3 个层面的物联:一是拖拉机与农机具之间的物联,二是监控中心与拖拉机之间的远程物联,三是拖拉机自动驾驶单部件功能的车载物联^[23]。

在拖拉机自动驾驶技术约 80 年的发展历程中,国内外在算法设计、导航系统开发方面取得了显著的成果,已经初步具备了实时、跟踪直线路径行驶的能力。但是由于农田作业环境复杂等问题,自动驾驶作业精度不高,而且国内农用车辆自动驾驶技术还普遍存在成本高、推广难的问题,拖拉机自动驾驶技术依然有很大的提升优化空间。

2.6 系统仿真技术

随着建模理论算法和计算机技术的迅速发展,出现了大批虚拟样机仿真软件,目前仿真技术已经在车辆设计中得到普遍应用,用于电动车辆系统仿真的软件有 V - ELPH、EASY5、ADVISOR、ADAMS、Matlab/Simulink 等。目前,专门用于电动拖拉机的仿真软件技术还处于起步阶段,对其整车性能仿真多基于软件的二次开发^[24]。电动拖拉机整车性能

仿真作为样车开发的重要手段,不仅可以匹配不同参数的结构方案还可以快速预测车辆性能。南京农业大学的高辉松等对 ADVISOR 软件进行二次开发,建立电动拖拉机控制策略和牵引整车模型,应用仿真系统进行仿真研究,为样车的研发提供详细的设计参数^[25]。除了整车性能仿真外,拖拉机各关键部件如动力转向系统、电池能量管理策略、电动悬挂系统、自动驾驶等技术都须要借助系统仿真在设计初始阶段分析系统特性,优化匹配各部件参数。目前,广泛基于 AMESim 或 Matlab 软件对拖拉机转向系统建模仿真并分析其动态特性;基于 ADVISOR 纯电动汽车仿真平台二次开发,将电池能量分配控制策略仿真模型嵌入电动拖拉机整车仿真模型中;利用 Matlab/Simulink 对拖拉机自动驾驶系统追踪模型进行仿真建模,分析其稳定性和灵敏性;基于 ADAMS/view 建立拖拉机电动悬挂系统悬挂装置的仿真模型,并对其进行仿真分析,对悬挂机构关键点参数进行优化。与一般电动车辆相比,电动拖拉机作业功能复杂,如能开发出专门用于电动拖拉机系统的仿真软件,对今后电动拖拉机的开发设计有更重要的辅助作用。

3 电动拖拉机存在的问题及发展趋势

电动拖拉机经过 100 多年的发展,其性能有了很大的改善,应用范围也进一步拓宽,但是对电动拖拉机整体的研究比较盲目而且缺少田间应用及作业规律方面的研究;电机适应性不够,难以满足复杂的田间作业要求;能量电池问题依然是制约电动拖拉机发展的重要因素。

电动拖拉机发展趋势进一步体现在:(1)研发新型电机,利用多电机控制技术,简化电动拖拉机机械传动和联动机构,减轻拖拉机整体质量。(2)研发高效节能低成本电池及电池控制策略研究依然是电动拖拉机的主要研究内容,本研究提到的锂超级电容电池为电动拖拉机电池选型提供了很好的选择。(3)研发基于 CAN 总线电动拖拉机整车控制系统,CAN 总线具有高可靠、高性能、易开发、低成本等优点,目前 CAN 总线仅局限于电动拖拉机单个部件的应用,基于 CAN 总线整车控制系统尚未形成,因此 CAN 总线研发也将成为电动拖拉机发展的主要趋势之一。(4)无级变速传动(continuously variable transmission,简称 CVT)是电动拖拉机的绝佳搭配,可以精确实现自动驾驶、定速巡航、自动全功率控制等现代智能电动拖拉机发展需求^[26]。将 CVT 技术应用于电动拖拉机并对其进行技术突破将是电动拖拉机的主要发展趋势之一。(5)无人驾驶技术将在未来得到进一步发展,使其在拖拉机等农用车辆上得到进一步应用。电动拖拉机无人驾驶技术也是未来的主要发展趋势之一。

4 结论

虽然电动拖拉机目前仍处于起步阶段,而且在短期内也不可能广泛取代传统的燃油拖拉机,但是随着移动互联网、云计算、大数据、物联网等先进技术与现代制造业的结合,以农业物联网和智能农机装备为特征的精细农业系统成为研究重点,拖拉机作为智能农机装备和农业生产信息化网络的重要应用,必将取得长足发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Arjham W, Koike M, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (Part 1) [J]. Journal of JSAM, 2001, 63(3): 130-137.
- [3] Arjham W, Koike M, Takigawa T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (Part 2) [J]. Journal of JSAM, 2001, 63(5): 92-99.
- [4] 向德功. 日本开发出小型电动拖拉机[J]. 种业导刊, 2012(7): 10.
- [5] 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 严 辉, 李庚银, 赵 磊, 等. 电动汽车充电站监控系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 15-19.
- [9] 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): 68-70.
- [10] 侯秋梦, 龚国庆, 汪 峰, 等. 基于加速度控制的复合电源能量管理策略[J]. 北京信息科技大学学报, 2017, 32(2): 60-65.
- [11] 杨立昆, 李和言, 马 彪. 车辆传动系统分类与演变规律研究[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(8): 42-46.
- [12] 商高高, 夏 勇. 履带式电动拖拉机传动系统的匹配及优化[J]. 农机化研究, 2015(9): 250-253.
- [13] 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): 8-10.
- [14] 徐立友, 张 扬, 刘梦楠, 等. 拖拉机传动特性研究现状[J]. 农机化研究, 2017, 12(12): 224-227.
- [15] 赵万忠, 徐晓宏, 赵 婷, 等. 新型汽车动力转向技术发展综述[J]. 汽车工程学报, 2012, 2(6): 393-396.
- [16] 鲁植雄, 刁永秀, 龚佳慧, 等. 轮式拖拉机线控液压转向系统路感特性与评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 57-59.
- [17] 蔡高奎. 电动拖拉机电动悬挂系统的设计与分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [18] 蔡高奎, 夏长高. 电动拖拉机电动悬挂系统的设计与性能仿真[J]. 农机化研究, 2015(1): 140-143.
- [19] 彭怀江. 电动拖拉机电动悬挂系统耕深控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [20] 罗锡文, 单鹏飞, 张智刚, 等. 基于推杆电动机的拖拉机液压悬挂控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 1-5.
- [21] 吕 威, 郭孔辉, 张建伟. 电动助力转向综合前馈和模糊 PID 反馈的电流控制算法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 11-14.
- [22] 刘 沛, 陈 军, 张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 196-198.
- [23] 胡静涛, 高 雷, 白小平, 等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 3-5.
- [24] 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.
- [25] 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): 283-285.
- [26] 王建军. 拖拉机 CVT 技术的发展与思考[J]. 拖拉机与农用运输车, 2017, 44(1): 3-6.