

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001

农业拖拉机关键技术发展现状与展望

谢斌 武仲斌 毛恩荣

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 拖拉机作为农业装备的核心,其技术发展水平体现着国家农业机械化程度和农业现代化发展水平。近年来,拖拉机在广泛应用新技术的同时,不断涌现出新结构和新产品,技术含量不断提高,产品性能持续增强。本文分析了当前国内外拖拉机产品的技术发展情况,以及农业拖拉机实现自动化、智能化和信息化的紧迫性和必要性;归纳了拖拉机在发动机排放控制、新能源应用、动力换挡、无级变速、悬浮前桥、驾驶室、电液悬挂、电子控制、总线网络以及整机信息化等关键技术方面的最新研究进展,结合产品应用阐明了各系统相关技术的基本原理和特点;最后,纵观拖拉机技术发展历程,结合我国国情,对农业拖拉机技术的未来发展方向进行了总结和展望,提出在互联网高速发展的时代,云计算、大数据、物联网开始与农机装备制造相结合,集高效、节能、环保、智能为一体的精准农业系统代表了未来农业生产的新型模式,智能拖拉机作为精准农业系统中的重要节点,其智能感知、智能决策、高效驱动以及远程管控技术将成为技术发展的未来方向。

关键词: 农业; 拖拉机; 关键技术; 信息化; 智能化

中图分类号: S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)08-0001-17

Development and Prospect of Key Technologies on Agricultural Tractor

XIE Bin WU Zhongbin MAO Enrong

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: As the core equipment of agricultural machinery, the tractors are rapidly becoming of increasing importance to agriculture. The technical advance of tractor products reflects the degree of national agricultural mechanization and the level of agricultural modernization. In recent years, novel structures and devices have been emerging on tractors, of which the technical level is constantly improved, and the overall performance keeps enhancing with the extensive application of various new technologies. Based on the analysis of the tractor development world-widely, the urgency and necessity of tractors to achieve automation, intelligentization and informatization were proposed. The latest researches on agricultural tractors in engine emission controlling, new energy altering, power shifting, continuously variable driving, front axle suspending, cab comforting, hitch electrohydraulic controlling, bus networking and system informatization were summarized. Meanwhile, the basic principles and characteristics of related technologies of each system were expounded combining with the application of specific products. Considering the national situation, the development direction of tractor technology was prospected with a historical and in-depth review of its development process. The precision agricultural system, which integrated high efficiency, energy saving, environmental protection and intelligence, benefiting from the rapid developing technologies of cloud computing, big data and internet of things, was thought to be a new model of future agriculture. Accordingly, intelligent perception and decision, efficient driving and remote controlling of intelligent tractors, which played an important role in the precision agriculture, were speculated to be the new bright spot and direction of tractor technology development in the future.

Key words: agriculture; tractor; key technology; informationization; intelligence

收稿日期: 2018-06-29 修回日期: 2018-07-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701001)

作者简介: 谢斌(1973—),男,副教授,博士,主要从事农业装备智能化、电液控制、车辆电控研究, E-mail: xiebincau@126.com

0 引言

随着我国城市化进程的加快,大量农村劳动力发生转移,发展以现代化农业生产机械为主体的智能化、规模化的生产模式成为当务之急;同时,能源紧缺、环境污染形势严峻,导致现代农业生产对低/零排放、少/无污染、低噪声的绿色动力农机的需求愈来愈迫切。在这样的新形势和新背景下,我国提出了《中国制造2025》实施纲要^[1-2],智能农机装备被列为重点发展的十大领域之一;在“十三五”科技发展规划中^[3],农业机械的现代化、智能化和规模化也被列入重点研发计划之中。

作为最主要的农业动力机械,农业拖拉机所面临的作业种类包括牵引、悬挂并驱动各种配套农具,完成耕、耙、播、收等多种农田作业、运输作业和固定场地作业,作业环境复杂、作业种类繁多、作业负载多变。因此,拖拉机的技术发展水平在很大程度上体现着一个国家的农业现代化程度和农业机械化发展水平,世界农业强国均将拖拉机作为农机工业的核心。

农业拖拉机是一种移动式农业动力机械,按照功率大小不同^[4],其可分为小型(小于等于22 kW)、中型(22~74 kW)、大型(74~147 kW)以及重型拖拉机(大于等于147 kW)。近年来,围绕“高效、智能、环保和信息集成”4个方面,农业拖拉机在动力、传动、行走、液压、悬挂、驾驶舒适性、物联网及综合服务/管理平台等多个领域都取得了长足发展。在动力系统方面,国外柴油机排放法规已全面进入第IV阶段,单纯依靠机内净化已不能满足日益严格的排放要求,辅以各种机外尾气后处理方案的组合型排放控制系统开始出现在国外各大主流机型上。而国内则正处在国III阶段,主要通过机内净化和油品的改善来应对排放要求^[5-9]。此外,动力系统开始尝试探索高比能量动力蓄电池、甲烷等新型动力技术,有部分采用动力电池的机型甚至已进入小规模量产,如Fendt e100 Vario, John Deere SESAM等^[10-11];传动系统方面的进步主要体现在动力负载换挡和CVT无级变速传动技术的进一步普及上,尤其是无级变速传动技术,不仅是农业拖拉机变速传动系统发展的必经阶段,更是实现拖拉机整机电液一体化、智能化、自动化的关键技术,在提高拖拉机自动化水平、整机动力性、经济性和舒适性、简化驾驶操纵程序和减轻劳动强度等多方面具有重要意义^[12-14];行走转向系统主要围绕轮胎胎压控制、橡胶履带/半履带式行走机构展开研究,以进一步减小接地比压及滑转损失,提高牵引效率和整机通过

性^[15-19];在液压动力输出方面,多点高精度输出、负载传感压力补偿等技术大大提高了液压辅助系统的安全性、操控性、适用性和经济性^[20-21];而对于液压悬挂系统,电控提升悬挂已基本成为国内外大中功率拖拉机的标准配置,且大多同时配有前液压输出、前悬挂和前动力输出,大大方便了农机具的挂接和日益增加的各类农机具的配套应用^[22-23];在驾驶舒适性方面,人机工程设计理念体现的越来越充分,除采用主、被动悬架以减少振动外,悬浮驾驶室、悬浮座椅、360°驾驶室增视系统、人机交互触摸显示屏等人性化设计成为改善整机舒适性的的重要方面^[24-27];此外,随着互联网技术的迅猛发展,集农业信息感知、数据传输、云平台管控于一体的农业物联网技术逐渐成为研究热点^[28-33],这标志着以模型驱动业务、设备管理设备、人-设备-农场无缝连接的全新模式成为未来农业机械发展的趋势。

本文在分析国内外农业拖拉机技术概况的基础上,阐述归纳拖拉机在动力系统、传动系统、液压系统、电控系统以及整机信息化方面的最新研究进展,分析各系统相关技术的基本工作原理、特点及典型应用,并在此基础上,结合我国国情,展望农业拖拉机未来发展趋势,以期为我国拖拉机技术革新提供参考。

1 拖拉机动力系统研究进展

柴油机因热效率高、能量利用率好、动力性强等,被广泛应用在各种农业动力机械上,据统计^[34],柴油机占到各种农业动力机械动力源的95%以上。采用先进技术的柴油机,升功率可达到30~50 kW/L,扭矩储备系数可达到1.35以上,最低油耗可达到198 g/(kW·h),标定功率油耗可达到204 g/(kW·h)。

1.1 柴油机排放法规实施情况

柴油机因其固有的燃烧方式而导致排放物中有较高含量的颗粒物(PM)和氮氧化物(NO_x)等污染物。当前,国际上参照的农业机械排放法规主要以欧盟体系和美国体系为主,两种体系的排放限值均依据功率来划分档次,不同功率挡次的发动机排放限值、实施日期不同。表1、2分别给出了两种体系下一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)的限值,有时给出NO_x和HC排放之和的限值。其中,欧盟体系采用Stage I, Stage II, Stage III A, Stage III B, Stage IV和最新的Stage V来划分不同的排放阶段^[35-36];而美国则采用Tier I~Tier III、Tier iIV和Tier IV来划分不同的排放阶段^[7-8],显然,大功率发动机排放限值较严,而小功率发动机的排放限值较松,这与发动机的实

际排放状况和技术水平一致,比较科学合理。同时,由法规实施进度可以看出,欧盟目前的农业机械排放控制的实施阶段是 Stage IV,而美国也已进入 Tier IV 阶段。由指标限制值可以看出,第 III 阶段主要以降低颗粒物(PM)排放为主,而第 IV 阶段则主要以大幅度降低氮氧化物(NO_x)排放为主。

中国、日本、印度及俄罗斯等国家都有各自的排放法规体系,表 3 给出了中国农业机械在各个阶段

的排放法规限值以及实施历程,其分为第 I、II、III 和 IV 共 4 个阶段,相关排放法规主要有 GB 20891—2007《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国 I、II 阶段)》^[37]和 GB 20891—2014《非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第 III、IV 阶段)》^[38],从表 3 中可以看出,中国农业机械工业目前正全面处于“国 III”时代,而第 IV 阶段标准的实施日期尚未确定。

表 1 欧盟农业机械排放法规各阶段的限值及实施历程($\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}$ 和($\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM}$)

Tab.1 EU agricultural machinery emission regulations at various stages of limits and implementation

| | | $(\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}, (\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM})$ | | | | | | | | | | | | | | | g/(kW·h) | | | |
|-----------|--|--|-------------------------------|------|-------------------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|----------|------|--|--|
| 功率 P/kW | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | | |
| [19,37] | | 8.0/1.5/5.5/0.8 ^{II} | | | | | | (7.5)/5.5/0.6 ^{III A} | | | | | | | | | | | | |
| [37,56] | | 9.2/1.3/6.5/0.85 ^I | | | 7.0/1.3/5.0/0.4 ^{II} | | | (4.7)/5.0/0.4 ^{III A} | | | | | (4.7)/5.0/0.025 ^{III B} | | | | | | | |
| [56,75] | | 9.2/1.3/5/0.7 I | | | 6.0/1.0/5.0/0.3 ^{II} | | | (4.0)/5.0/0.4 ^{III A} | | | | | 3.3/0.19/5.0/0.025 ^{III B} | | | 0.4/0.19/5.0/0.025 ^{IV} | | | | |
| [75,130] | | 9.2/1.3/5/0.7 I | | | 6.0/1.0/5.0/0.3 ^{II} | | | (4.0)/5.0/0.3 ^{III A} | | | | | 3.3/0.19/5.0/0.025 ^{III B} | | | 0.4/0.19/5.0/0.025 ^{IV} | | | | |
| [130,560] | | - | 6.0/1.0/3.5/0.2 ^{II} | | | | (4.0)/3.5/0.2 ^{III A} | | | | | 2.0/0.19/3.5/0.025 ^{III B} | | | 0.4/0.19/3.5/0.025 ^{IV} | | | | | |

注: I 表示 Stage I 限值, II 表示 Stage II 限值, III A 表示 Stage III A 限值, III B 表示 Stage III B 限值, IV 表示 Stage IV 限值。

表 2 美国农业机械排放法规各阶段的限值及实施历程($\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}$ 和($\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM}$)

Tab.2 US agricultural machinery emission regulations at various stages of limits and implementation

| | | $(\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}, (\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM})$ | | | | | | | | | | | | | | | g/(kW·h) | | | | | | |
|-----------|--|--|-----------------------------|------|------------------------------|------|------------------------------|--------------------------------|------|------|------|----------------------------------|---------------------------------|------|---------------------------------|----------------------------------|----------|------|----------------------------------|--|--|--|--|
| 功率 P/kW | | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | | | | | |
| [0,8] | | (10.5)/8.0/1.0 ^I | | | (7.5)/8.0/0.8 ^{II} | | | | | | | | | | | (7.5)/8.0/0.4 ^{IV} | | | | | | | |
| [8,19] | | (9.5)/6.6/0.8 ^I | | | (7.5)/6.6/0.8 ^{II} | | | | | | | | | | | (7.5)/6.6/0.4 ^{IV} | | | | | | | |
| [19,37] | | (9.5)/5.5/0.8 ^I | | | (7.5)/5.5/0.6 ^{II} | | | (7.5)/5.5/0.3 ^{iIV} | | | | | (4.7)/5.5/0.03 ^{IV} | | | | | | | | | | |
| [37,56] | | 9.2(NO_x) ^I | | | (7.5)/5.0/0.4 ^{II} | | | (4.7)/5.0/0.3 ^{iIV-a} | | | | | (4.7)/5.0/0.03 ^{IV} | | | | | | | | | | |
| [56,75] | | 9.2(NO_x) ^I | | | (6.6)/5.0/0.3 ^{II} | | | (4.7)/5.0/0.4 ^{III} | | | | | 3.4/0.19/5.0/0.02 ^{IV} | | | 0.4/0.19/5.0/0.02 ^{IV} | | | | | | | |
| [75,130] | | 9.2(NO_x) ^I | | | (6.6)/5.0/0.3 ^{II} | | | (4.0)/5.0/0.3 ^{III} | | | | | 3.4/0.19/5.0/0.02 ^{IV} | | | 0.4/0.19/5.0/0.02 ^{IV} | | | | | | | |
| [130,225] | | - | (6.6)/3.5/0.2 ^{II} | | | | (4.0)/3.5/0.2 ^{III} | | | | | 2.0/0.19/3.5/0.02 ^{iIV} | | | 0.4/0.19/3.5/0.02 ^{IV} | | | | | | | | |
| [225,450] | | (6.4)/3.5/0.2 ^{II} | | | (4.0)/3.5/0.2 ^{III} | | | | | | | | | | | 2.0/0.19/3.5/0.02 ^{iIV} | | | 0.4/0.19/3.5/0.02 ^{IV} | | | | |
| [450,560] | | (6.6)/3.5/0.2 ^{II} | | | (4.0)/3.5/0.2 ^{III} | | | | | | | | | | | 2.0/0.19/3.5/0.02 ^{iIV} | | | 0.4/0.19/3.5/0.02 ^{IV} | | | | |
| [560,∞) | | 9.2/1.3/11.4/0.54 ^{II} | | | (6.4)/3.5/0.2 ^{II} | | | | | | | | | | | 3.5/0.40/3.5/0.1 ^{iIV} | | | 3.5/0.19/3.5/0.04 ^{iIV} | | | | |

注: I 表示 Tier I 限值, II 表示 Tier II 限值, III 表示 Tier III 限值, iIV 表示 Tier iIV 限值, IV 表示 Tier IV 限值, a 表示“如果制造商产品从 2012 年起达到 0.03 g/(kW·h) 的 PM 标准,则此处限值为 0.4 g/(kW·h)”。

表 3 中国农业机械排放法规各阶段的限值及实施历程($\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}$ 和($\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM}$)

Tab.3 China agricultural machinery emission regulations at various stages of limits and implementation

| | | $(\text{NO}_x/\text{HC}/\text{CO}/\text{PM}, (\text{NO}_x + \text{HC})/\text{CO}/\text{PM})$ | | | | | | | | | | | g/(kW·h) | | | |
|-----------|--|--|------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------------------------------|--|----------------------------------|--|
| 功率 P/kW | | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | ... | ... | | | |
| [0,8] | | (18.4)/12.3/- ^I | | (10.5)/8.0/1.0 ^{II} | | | | | | | | | | | | |
| [8,18] | | (18.4)/12.3/- ^I | | (9.5)/6.6/0.8 ^{II} | | | | | | | | | (7.5)/5.5/0.6 ^{III} | | (7.5)/5.5/0.6 ^{IV} | |
| [18,37] | | 10.8/2.1/8.4/1.0 ^I | | 8.0/1.5/5.5/0.8 ^{II} | | | | | | | | | | | | |
| [37,56] | | 9.2/1.3/6.5/0.85 ^I | | 7.0/1.3/5.0/0.4 ^{II} | | | | | | | | | (4.7)/5.0/0.4 ^{III} | | (4.7)/5.0/0.025 ^{IV} | |
| [56,75] | | 9.2/1.3/6.5/0.85 ^I | | 7.0/1.3/5.0/0.4 ^{II} | | | | | | | | | (4.7)/5.0/0.4 ^{III} | | (4.7)/5.0/0.025 ^{IV} | |
| [75,130] | | 9.2/1.3/5.0/0.7 ^I | | 6.0/1.0/5.0/0.3 ^{II} | | | | | | | | | (4.7)/3.5/0.2 ^{III} | | 3.3/0.19/5.0/0.25 ^{IV} | |
| [130,560] | | 9.2/1.3/5.0/0.54 ^I | | 6.0/1.0/3.5/0.2 ^{II} | | | | | | | | | (4.0)/3.5/0.2 ^{III} | | 2.0/0.19/3.5/0.025 ^{IV} | |
| [560,∞) | | - | | - | | | | | | | | | (6.4)/3.5/0.2 ^{III} | | 3.5/0.4/3.5/0.1 ^{IV} | |

注: I 表示第 I 阶段限值, II 表示第 II 阶段限值, III 表示第 III 阶段限值, IV 表示第 IV 阶段限值。

1.2 柴油机排放控制技术

降低农业机械污染排放技术路线主要有有机内净

化技术、机外排气后处理技术以及二者的组合技术^[39-43]。其中,机内净化措施一般包括电控共轨、

增压中冷、废气再循环(EGR)等,而机外后处理技术则有氧化催化转化(DOC)、颗粒捕捉(DPF)、选择性催化还原(SCR)等。随着农业机械排放法规的日益严格,需将各项单一技术路线组合起来,以满足各国不同阶段的排放限值法规要求。

(1) 燃油共轨直喷与四气门技术

燃油共轨直喷是将燃油压力的产生与喷射过程完全分离的一种供油方式^[44-45],其特点是喷油压力的建立与喷油过程无关,喷油压力、喷油过程和喷油持续期不受柴油机负荷和转速的影响,且喷油定时与喷油计量可独立控制,可自由地调整每个汽缸的喷油量和喷油起始点。而“二进二排”四气门结构,既可提高充气效率,同时由于喷油嘴居中布置,使多孔油束均匀分布,为燃油和空气的良好混合创造了条件,这些因素的协调配合,使得混合气的形成质量(品质)大大提高,有效降低了碳烟颗粒、HC和NO_x的排放,提高了热效率。

(2) 电控喷射技术

电控喷射技术是目前国外降低柴油机排放的重要措施之一^[44-45],其可实现高压喷射(120~200 MPa),喷射压力可比一般直列泵系统高出一倍,最高甚至达到200 MPa,这使得燃油喷雾液滴进一步细化,与空气的接触面积增大,从而促进燃油与空气的充分混合,一定程度上减少了燃烧过程PM的生成。此外,电控喷射还有诸多优点,如喷射压力独立于发动机转速,有利于改善发动机低速、低负荷时的扭矩特性;可实现预喷射,喷油速率、形状可调节,喷油定时和喷油量可自由选定,从而使燃烧过程得以优化,发动机油耗、烟度、噪声和排放等性能指标得到明显改善。

(3) 增压中冷技术

采用涡轮增压增加柴油机的空气量,可提高燃烧的过量空气因数,是降低大负荷工况排气烟度、PM排放量以及燃油消耗的有效措施,但是增压会导致气压缩后期气缸温度的提升,缸内最高燃烧温度上升,造成NO_x生成量增加^[46]。通常,采用增压加中冷的方法,即将新鲜空气通过增压器中段冷却,再冲入气缸,这样可使增压空气温度下降到50℃以下,进而使气缸压缩行程后期工作循环温度下降,减少NO_x生成量^[47],故目前重型车用柴油机普遍采用增压中冷型,有助于低排放而且燃油经济性良好。此外,涡轮前排气旁通阀的应用,不仅能降低PM和CO排放,还可改善涡轮增压柴油机的瞬态性能和低速扭矩。

(4) 废气再循环(EGR)技术

EGR技术是将柴油机少量废气送回进气系统,

如图1所示,以降低混合气氧浓度、提高惰性气体量,从而降低缸内混合气燃烧速度及燃烧温度,最终达到抑制NO_x生成^[46]的目的。值得注意的是,EGR在降低NO_x生成量的同时,PM生成量会增加^[48]。

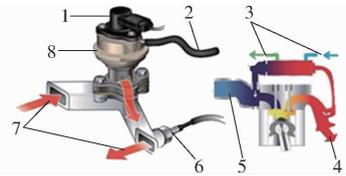


图1 废气再循环示意图

Fig. 1 EGR structure diagram

1. 传感器 2. 真空软管 3. 冷却液 4. 排气 5. 进气 6. 温度传感器 7. 引入燃烧室的部分废气 8. EGR 阀

(5) 氧化催化转化技术(DOC)

DOC是农业机械最常用的排气后处理催化器之一,如图2所示,其可将农业机械柴油机排气成分中的CO、HC和NO氧化,释放热量,提高排气温度,并通过氧化PM中的可溶性有机物(POC)去除部分PM^[49]。为使净化效果最佳,在采用DOC技术时,一般要求柴油燃料的含硫量较低,并要保证柴油机运行工况、催化剂及载体、DOC形状以及入口温度等保持正常。目前,DOC已被广泛应用在农业机械上,以满足最新排放法规要求。

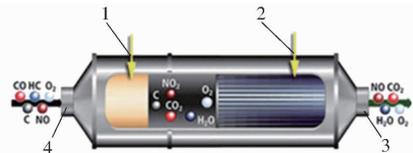


图2 氧化催化转化示意图

Fig. 2 DOC structure diagram

1. DOC 氧化催化 2. POC 微粒氧化催化 3. DOC 出口 4. DOC 入口

(6) 颗粒捕集技术(DPF)

DPF是净化柴油机颗粒物(PM)排放最关键的后处理装置,并已得到广泛研究和应用^[50-51],其一般结构如图3所示。当排气通过DPF时,先由DPF的滤芯捕集PM,其滤芯材料主要有陶瓷基、金属基和复合基3大类。其中,陶瓷基过滤材料应用范围最广。基于不同的材料特性,过滤器类型有壁流式蜂窝陶瓷过滤体、泡沫式过滤体、金属丝网过滤体、陶瓷纤维过滤体和直流式过滤体等,其中,壁流式蜂窝陶瓷过滤体应用范围最广,它通过扩散、拦截、惯性碰撞和重力沉降4种机理对PM进行捕集,其典型结构和捕集机理如图4所示。据研究,DPF对PM综合捕集效率在90%以上^[52]。

(7) 选择性催化还原技术(SCR)

SCR是针对柴油车尾气排放中NO_x的一项处理工艺,即在氧浓度高出NO_x浓度2个数量级以上

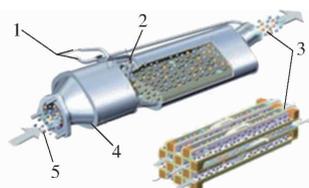


图 3 颗粒捕集结构示意图

Fig. 3 DPF structure diagram

- 1. 压力传感器
- 2. 温度传感器
- 3. DPF 过滤的尾气
- 4. 壳体
- 5. 尾气

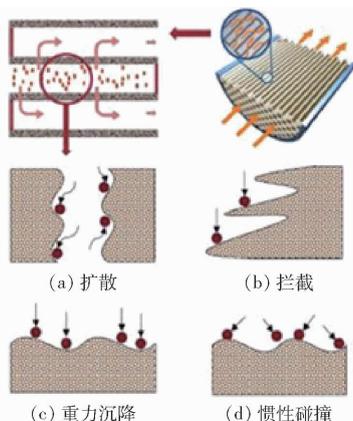


图 4 DPF 典型结构及 PM 搜集机理示意图

Fig. 4 DPF typical structure and PM capture mechanism diagram

时,高选择性地优先把尾气中的 NO_x 还原成 N_2 和 H_2O 。催化剂有贵金属和非贵金属两类,而还原剂一般有 NH_3 、 HC 以及 H_2 等,其中, NH_3 -SCR 应用范围最广^[53]。由于 NH_3 是一种具有强烈刺激性气味的的气体,不便于直接应用于 SCR 催化器,且不便于储存运输,故在实际应用时往往以尿素溶液的方式向排气管中喷射,以供反应之需^[54]。SCR 系统的一般结构形式如图 5 所示。该技术也被广泛应用于柴油机尾气后处理,通过优化喷油和燃烧过程,尽量在机内控制微粒 PM 的产生,而后在机外对富氧条件下形成的氮氧化物(NO_x)进行选择性催化还原,既节能、又减排。

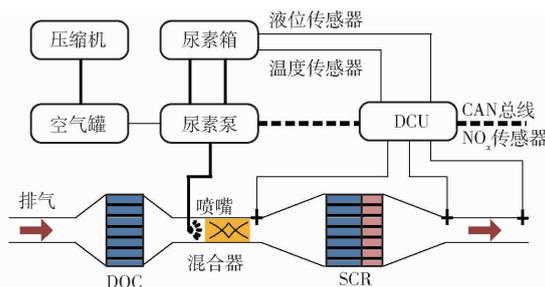


图 5 SCR 系统一般结构

Fig. 5 General structure of SCR system

(8) 排放控制的组合路线

排放控制的组合路线是指将机内净化技术和机外排气后处理技术中的两种或多种单项控制手段进行合理组合,实现更为理想的排放效果,以满足日益严格的农业机械排放法规。较为典型的组合路线为“DOC + POC/DPF + SCR”,如美国约翰·迪尔公司采用的整体集成式排放控制系统 JDPS (John Deere power system),即采用“DOC + DPF + SCR”路线,可满足美国 Tier IV/欧盟 Stage IV 标准;德国道依茨公司也推出了各型号农业机械柴油机在欧盟 Stage IV 阶段的排放控制系统,其中,只有 TCD3.6 系列采用“DOC + 颗粒氧化催化(POC) + SCR”路线,之后的系列已全部采用“DOC + 颗粒捕捉(DPF) + SCR”。中国目前农业机械排放控制尚处于国 III 阶段,仅通过油品技术和机内净化技术即可满足排放限值要求,表 4 给出了玉柴动力机械有限公司(玉柴)和一拖(洛阳)柴油机有限公司(洛拖)在国 III 阶段各个功率段采用的典型排放控制组合路线^[55-56]。

1.3 发动机辅助节能技术

(1) 低转速发动机

对于传统拖拉机用柴油发动机,其额定转速一般在 2 200 ~ 2 500 r/min,而低转速发动机是指额定转速明显低于传统发动机额定转速的新型发动机。以芬特 Fendt 1000 Vario 配置的排量为 12.4 L 的低速发动机为例,其外特性如图 6 所示,额定转速从传

表 4 玉柴和洛拖满足农业机械国 III 排放标准的组合技术路线

Tab. 4 Combined technology routes of Yuchai and Luotuo engines to meet China III emission standard of agricultural machinery

| 排量/L | 玉柴 | | 洛拖 | |
|-------|-----------|-------------------|----------|-----------------------|
| | 功率/kW | 技术路线 | 功率/kW | 技术路线 |
| 2 ~ 3 | 37 ~ 50 | 增压 + EGR + 机械泵 | < 37 | 自吸 + 机械泵 + 电控水冷 EGR |
| | 33 ~ 36 | 自吸 + EGR + 机械泵 | | 自吸 + 电控单体泵 |
| 3 ~ 4 | 49 ~ 74 | 增压 + EGR + 机械泵 | 37 ~ 75 | 增压中冷 + 机械泵 + 电控水冷 EGR |
| | 40 ~ 50 | 自吸 + EGR + 机械泵 | | 自吸/增压中冷 + 电控单体泵/共轨 |
| 4 ~ 5 | 74 ~ 120 | 增压中冷 + EGR + 电控共轨 | 75 ~ 130 | 增压中冷 + 机械泵 + 电控水冷 EGR |
| | 56 ~ 74 | 增压 + EGR + 机械泵/共轨 | | 增压中冷 + 电控单体泵 |
| 6 ~ 7 | 130 ~ 180 | 增压中冷 + 电控共轨 | 130 | 增压中冷 + 机械泵 + 电控水冷 EGR |
| > 8 | 160 ~ 350 | 增压中冷 + 电控共轨 | | 增压中冷 + 电控单体泵 |

统的 2 200 r/min 降至 1 700 r/min, 正常工作转速范围为 650 ~ 1 700 r/min。低速发动机具有诸多优势, 就经济性而言, 低速发动机的低油耗区域较传统发动机面积更大, 且与之匹配的传动系统的机械损耗因转动速度的降低而随之下降, 传动系统效率得以提升。此外, 由于转速的降低, 发动机拥有更大的储备转矩且噪声低, 振动小, 变速箱挡位数变少, 同时, 由于活塞运行的线速度、曲轴连杆系、齿轮系和皮带系的运动速度相应降低, 改善了发动机的可靠性。

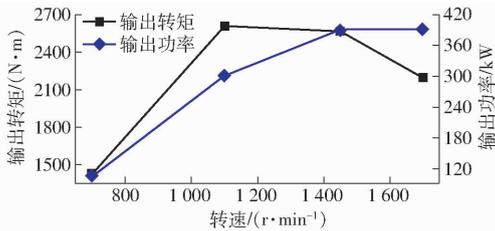


图6 芬特 1000 Vario 型低速发动机外特性

Fig. 6 Fendt 1000 Vario low-speed engine external characteristics

(2) 电控硅油风扇

电控硅油风扇, 属于硅油离合器型式的冷却风扇, 但其与传统的开关型硅油离合器风扇不同, 电控硅油风扇的离合器开度可由电子控制单元 (ECU) 进行精确控制, 即 ECU 采集发动机转速、散热器水温、风扇转速等信号, 经综合处理后, 计算出相应的目标转速, 并输出脉冲指令到风扇的电磁线圈, 实时调节风扇离合器开度, 以使风扇实际转速达到目标转速, 这种调节方式相比于传统冷却方式更加精准、迅速, 因而也能更好地适应复杂工况下整机对风量及噪声特性要求的变化^[57]。

(3) 液压驱动式冷却风扇

液压驱动式冷却风扇的工作原理是, 发动机冷却风扇由柱塞式液压泵和液压马达独立驱动, ECU 根据系统温度实时调节液压泵的排量, 从而实现对系统温度的自动连续控制^[58], 因此, 液压驱动式冷却风扇同样具有良好的散热性能, 且可有效降低风扇的运转噪声, 但缺点是结构复杂, 成本较高。表 5 给出了几种冷却系统的综合性能对比情况^[59]。随着农业拖拉机节能环保要求的不断提高, 冷却风扇的驱动方式必将由传统驱动方式向着更加智能、环

表 5 发动机冷却风扇性能对比

Tab. 5 Performance comparison of engine cooling fans

| 类型 | 精度 | 调整性能 | 冲击度 | 风扇转速 | 成本 |
|-----------|----|------|-----|------|----|
| 开关型硅油离合器式 | 一般 | 二速 | 柔性 | 有滑差 | 低 |
| 液压驱动式 | 好 | 无级 | 有冲击 | 同步 | 高 |
| 电控硅油离合器式 | 最好 | 无级 | 柔性 | 有滑差 | 中 |

保、节能的驱动方式发展。

1.4 新能源技术

(1) 纯电动拖拉机

现代农机装备是现代农业的重要支撑。现代农业新业态、农业生产新模式对生态、节能、环保提出了越来越高的要求。当前, 设施农业、生态农业、庭院农业等特殊农业生产环境对零排放、无污染、低噪声的绿色动力农机具需求越来越迫切, 高效智能环保农业动力机械已成为全球农机科技创新的主攻方向。电动拖拉机作为零排放、无污染、低噪声的绿色动力机械, 作业时噪声小, 驾驶员工作环境舒适, 特别适用于温室大棚、庭院维护、草坪修剪等作业场所, 因而将成为现代农业拖拉机进一步发展的的重要途径之一, 同时它也代表了农业机械领域新能源技术的发展方向。

20 世纪 70 年代, 美国 General Electric 公司推出了 Elec - Trak 系列电动拖拉机^[60] (图 7a), 由 6 组铅酸电池供电, 采用永磁无刷直流电机, 功率范围 6 ~ 11 kW。美国 Allis - Chalmers 公司推出的电动拖拉机采用燃料电池, 共有 1 008 块, 功率为 14.7 kW。美国 Gorilla Vehicles 公司生产的 e - ATV 系列电动拖拉机, 由 3 ~ 4 个 8 V/125 A·h 的阀控铅酸电池供电, 由直接安装在后桥上的直流牵引电动机进行驱动, 不需要离合器, 由智能控制器完成控制, 实现无级变速。加拿大 Electric Tractor 公司生产的 Electric Ox2 电动拖拉机 (图 7b), 其由 6 组深放电铅酸电池供电, 采用了独特设计的双电机/齿轮箱机构、电子差速器等先进设备, 具有制动能量回收功能。Hossein Mousazadeh (2011) 研发了太阳能辅助插电式电动拖拉机 (SAPHT)。2017 年 2 月, 美国 John Deere 公司在法国农牧业展览会上推出纯电动拖拉机 SESAM (图 7c), 功率 264 kW, 可持续作业 4 h, 配备两组可提供 130 kW·h 的锂离子电池组, 其中一组为行走供电, 另一组为 PTO 供电, 必要时可将两块电池连接使用, 提供更大功率。2017 年 9 月, 芬特 Fendt 公司在汉诺威国际农机展展出了 e100 Vario 电动拖拉机 (图 7d), 搭载容量 100 kW·h 的 650 V 锂离子电池, 输出功率为 50 kW, 可持续作业 5 h, 充电 80% 只需 40 min。

我国对电动拖拉机的研究相对较晚, 进入 21 世纪后, 随着电控、新能源和电机等相关技术的快速发展, 南京农业大学、河南科技大学、西北农林科技大学、中国农业大学、江苏大学等院校从不同角度开展了电动拖拉机研究, 取得了初步研究成果^[61-66]。如江苏大学开展了履带式单电机驱动的电动拖拉机控制策略研究。南京农业大学基于小型四轮拖拉机设



图 7 纯电动拖拉机

Fig. 7 Pure electric tractors

计了单电机驱动拖拉机,并研究了驱动控制策略。中国农业大学开发了单电机驱动的电动拖拉机样机,基于 myRIO 开发了驱动控制器。西北农林科技大学、中国一拖集团有限公司、天津拖拉机厂等开发了电动拖拉机样机。

综合国内外电动拖拉机研发情况,当前,全球用于田间作业的电动拖拉机产品还不够成熟,国内多数处于样机试制阶段,国外也仅有小批量生产。不考虑动力电池和电机对电动拖拉机发展的限制,电动拖拉机本身也还存在很多科学技术难题亟待解决,如电动拖拉机工作特性与电机外特性匹配设计、动力系统参数匹配与控制,整机能量管理及控制、整机功率优化匹配等,都有待进一步深入研究。

(2) 生物甲烷动力拖拉机

生物甲烷是一种用生物气制造提取出的高热值甲烷,是一种完全可再生,并且随时可用的低碳型替代燃料。在农业生产活动中,采用生物甲烷替代传统化石燃料的理念和宗旨在于提供未来农场能够完全能源独立、满足自身甚至当地社区的所有燃料和能源需求的可持续解决方案。

在农场中,农场经营者是生物甲烷生产原料和生产空间的天然拥有者,因而,生物甲烷特别适合农业机械在农场中使用。生物甲烷可用专门种植的能量作物混合物生产,也可以通过液体及固体形式的植物或食品废料生成,如图 8 所示。该原料可从田地里收割或在农场、其他来源(如食品厂、超市、饭馆和餐厅)进行收集,喂入沼气池。在沼气池无空气条件下,材料被加热并随着其被细菌消化,开始生物分解,这一过程类似堆肥堆。在持续约 60 d 的两阶段发酵过程中,其释放出生物气体,包括生物甲烷。生物气体最终被提纯以生产出燃料级生物甲烷,之后可为拖拉机等农业机械提供动力。不仅如

此,生物甲烷还可以燃烧发电,满足农场建筑物和其他生产企业的用电需求,若能源充足,它还可被输入天然气管道以满足民用需求,或以电能的形式送入国家电网,形成一个真正良性的循环。



图 8 农场生物废料

Fig. 8 Farm biological waste

凯斯纽荷兰工业集团是天然气动力车辆的倡导者,图 9 是其旗下的纽荷兰公司开发出的甲烷动力概念拖拉机,其所用生物甲烷燃料可完全由农场的生物废料产生、提取,提纯后的甲烷燃料被储存在位于拖拉机前部左右两侧、造型流畅的两个气罐内,一次充气即可为拖拉机进行全天农场作业提供充足的动力。同时,拖拉机使用单一喷嘴,加注燃料时的操作、时间消耗与传统柴油拖拉机相近,但可节省燃料 25%,污染排放量下降 80%,是一项极有前景的新能源技术。



图 9 甲烷动力拖拉机

Fig. 9 Methane powered tractor

2 拖拉机变速传动技术发展现状

2.1 发展历程

在世界范围内的拖拉机发展历程中,拖拉机变速传动技术的变革大致经历了滑动齿轮换挡、啮合套和同步器换挡、区域动力换挡、全动力换挡以及机械液压双流无级变速传动几个阶段,其中,滑动齿轮换挡阶段结束于 20 世纪 50 年代末;至 70 年代时,啮合套和同步器换挡方式已经发展成熟,但其最大的不足在于作业过程中换挡时的动力中断问题,这使得拖拉机的作业效率大打折扣;为此,出现了采用换挡离合器摩擦传动的动力换挡变速箱,一开始是双速动力换挡,如 1969 年福特的 Dual Power 变速箱和 1972 年约翰迪尔的 Quad Range 变速箱,接着是 3 速、4 速以及 6 速区域型动力换挡,如 ZF 公司的 T7200 和 T7300 变速传动系,到 20 世纪 90 年代时,区域动力换挡传动系发展成熟,传动系的进一步发

展方向是全动力换挡变速箱和机械液压双流传动(HM-CVT)的传动系;目前,全动力换挡技术以及无级变速传动技术已经成熟,但其核心基本被Fendt、ZF、STEYR、John Deere等少数几大国外企业垄断^[67-68]。

2.2 配置情况

从不同功率段的配置情况来看,40 kW 以内的小功率拖拉机受成本控制约束,多采用同步器换挡,部分机型有时还会采用静液压驱动方式;40~70 kW 功率段附近的部分中等功率拖拉机已经开始配置机械液压无级变速器(HM-CVT),如Fendt的300 Vario系列,但同步器换挡方式仍然是该功率段内变速器的主要形式;对于70~265 kW 范围内的大

中功率拖拉机,带有动力换向的动力换挡变速器和机械液压无级变速器具有非常好的性价比,因而是该功率段内变速箱的主流配置,其中,动力换挡变速箱由于结构复杂成本高,更倾向于被140 kW 以上的机型选用,且其功率适用范围已不断扩展至735 kW,如Massey Ferguson 6455型和John Deere 6330型等机型,而在70~265 kW 的大中功率段内,随着液压传动效率的提升,机械液压无级变速器在近年来获得了更为普遍的应用,如ZF公司的S-matic、Eccom 1~5覆盖了73.5~257 kW 的功率段,而Fendt公司的300~900 Vario系列则覆盖了59~265 kW^[67]。表6为国际农机企业主流拖拉机产品HM-CVT的应用情况。

表6 国际农机企业主流拖拉机产品 CVT 应用情况

Tab. 6 Application of CVT in mainstream tractor of international agricultural machinery enterprises

| 企业名称 | 合作企业 | 技术型号 | 应用功率段/kW | 应用机型 |
|-------------|-------|-------------|----------|--|
| New Holland | ZF/自研 | S-matic | 132~183 | Auto-Command |
| CASE | ZF/自研 | S-matic | 103~183 | CVX |
| John Deere | ZF/自研 | S-matic/IVT | 91~253 | Autopower(IVT) |
| AGCO | 自研 | Fendt Vario | 99~287 | Fendt 全系列、Massey Ferguson/Valtra 等部分型号 |
| JCB | AGCO | Fendt Vario | 206 | Fastrac 8000 |
| CLAAS | ZF/自研 | Eccom | 132~385 | Xerion 全系列/Axion/CMatic |

2.3 技术特点

2.3.1 动力换挡

动力换挡变速箱主要由机械传动系统、液压控制系统和电子控制系统3部分组成。与传统手动换挡变速箱不同,动力换挡变速箱的换挡操作通过换挡离合器实现,换挡离合器的结合与分离由液压系统驱动,而液压系统则受变速箱控制单元控制,如图10所示。

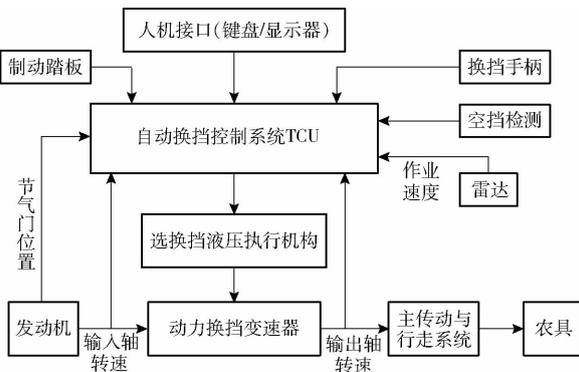


图10 动力换挡自动变速器工作原理图

Fig. 10 Working principle diagram of power shift automatic transmission

国外动力换挡技术已经成熟,国内动力换挡技术路线有3类^[69]:①与国外合作研发自己的动力换挡箱。②直接配套进口ZF拖拉机底盘。③利用国内资源研发适配的半动力换挡箱。在研发、生产过

程中遇到的困难主要体现在对机械、电控、液压基础研究不足、关键零部件制造工艺水平落后、离合器总成等核心部件配套体系不完备以及检测手段欠缺等方面。

2.3.2 无级变速传动

无级变速是车辆理想的传动形式,它可根据路面状况和发动机工作状态,连续改变传动比,使发动机始终在最佳工作点/最佳工作线附近工作,改善整机燃油经济性、降低噪声,同时,无换挡阶跃现象,减少了换挡冲击,提高了整机的驾驶舒适性^[70-71]。无级变速传动分为机械式、电动式、流体式3种类型。

以金属带式无级变速器为代表的机械式无级传动形式,受其结构限制,所能传递的功率和调速范围有限,目前尚难在大功率拖拉机中取得应用^[72]。

电动式无级传动系统由发电机、控制系统和牵引电动机组成^[72]。电传动采用电动轮驱动技术,动力源与驱动电机之间通过软电缆相连,摆脱了传动系统在设计空间上的束缚,使得整车布置非常灵活,更利于轴向载荷的合理分配。它具有传递功率范围大、容易控制、传动效率较高等优点,但因其自身质量较大、成本高,且通常将电机、制动器等零部件集成于电动轮中,因此与同规格的普通车轮相比质量增加较多,车辆非簧载质量增加,行驶平顺性和乘坐舒适性下降。故此类型的传动系统仅在矿用自卸

车、大型铲运机械及轮式装载机上使用。

流体式无级变速又可分为液力机械式、静液式和液压机械式 3 种类型^[72]。液力机械和静液传动形式因传动效率低以及液压元件功率限制的缘故,在拖拉机上的应用并不广泛,少数中小功率的机型有时会采用静液传动,如 New Holland 公司的 Versatile 200 系列,日本 Kubota 公司的 L 系列(功率在 8.6 ~ 14.9 kW 之间),意大利 Fiat 公司的 20 系列、77 系列拖拉机等。

液压机械无级变速器(HM-CVT)兼顾了机械传动的高效率和静液压传动的平稳、冲击小的特点,并且只需要使用常见机械变速机构和普通液压元件就可以实现高效率、大功率的无级传动。HM-CVT 通常由机械变速机构、泵-马达液压无级变速系统、动力分流和汇流行星齿轮机构、电子控制装置及驱动系统等构成^[70-72],如图 11 所示。从发动机输出的功率分为机械和液压双路向驱动桥传递,机械传动通常由行星排和多级齿轮传递(如 John Deere 公司 Auto Power),或者由多级行星排(ZF 公司的 S-Matic, Eccom)组成,而液压传动则采用变量泵和变量马达调速。在液压传动的输出端液压能和机械能重新汇集,输入驱动桥。

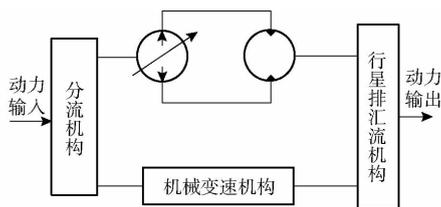


图 11 液压机械无级变速器原理图

Fig. 11 HM-CVT schematic diagram

目前, HM-CVT 无级变速传动技术基本被 Fendt、ZF、Steyr、John Deere 等少数几大国外企业垄断,国内基本处在理论分析和试验研究阶段。其中,北京理工大学开发了一种等差式 HM-CVT 变速箱,可实现 1 个纯液压段和 2 个液压机械段的双向等差无级传动,西安理工大学、河南科技大学、南京农业大学、燕山大学等相继在 HM-CVT 的传动特性、排量伺服系统、换段品质、控制方法、控制系统动态特性等方面进行了一定的研究^[68-71],但小范围内的局部突破并不能满足行业的整体需求,因此,继续加大对 HM-CVT 技术的研究力度,对提高我国农业生产整体水平有着重要的现实意义。

3 悬浮前桥及驾驶室的发展

3.1 悬浮前桥

悬浮前桥是指在刚性前桥的基础上加装带有自动水平协调控制装置和悬架刚性闭锁装置的悬浮机

构,悬浮结构由悬浮油缸及悬浮杆件共同构成的连杆机构组成,其基本功能仍然是连接前轮、通过摆动轴来分担拖拉机前部重量,并辅助拖拉机完成直行或转弯的驾驶需求,与刚性前桥不同之处在于,悬浮前桥可通过悬浮油缸的伸缩动作达到拖拉机缓冲、减振的效果^[73-74]。

近年来,拖拉机速度不断提升,绝大多数机型的最高车速已达 50 km/h, JCB 的 8250Fastrac 机型甚至已突破 70 km/h,为满足弹性高速行驶与刚性低速作业两方面的要求,不少大中型拖拉机开始采用液压空气悬浮式弹性前桥,如 Fendt 的 Farmer 400 系列,以及 Favorit 500/700/800/900 系列均采用该类型前桥,而 CLAAS 的 ARES836RZ 机型上采用的悬浮式前桥,其功能得以进一步延伸,除缓冲、减振外,还可通过增加悬浮行程以短时增加离地间隙,提高整机通过性^[67]。就其结构类型而言,常见的悬浮结构主要是两种^[74-75],即双摆臂独立轮式悬浮前桥(图 12)和油缸中置整体式悬浮前桥(图 13),其中,独立轮式悬浮前桥的桥体被分为 3 段结构,与整体式悬浮前桥相比,其主要的优点是左右两侧车轮可分别独立悬浮控制,但此种前桥的整体刚性较差,对吨位较大的机型不太适用,并且,前桥轮距会随着悬浮行程的改变而产生不同程度的变化,且其液压控制系统也相对复杂,因而多被中小功率拖拉机所采用。



图 12 双摆臂独立轮式悬浮前桥

Fig. 12 Front axle with double pendulum independent suspension

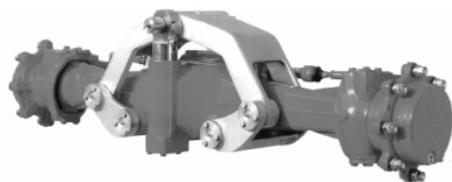


图 13 油缸中置整体式悬浮前桥

Fig. 13 Front axle with middle single suspended cylinder

3.2 驾驶室

在拖拉机各部件中,驾驶室发展最为完善,驾驶室技术的发展主要集中在安全性、舒适性和操控性 3 方面,从最初用来遮风挡雨的简易型驾驶室发展到现在安全舒适的综合型驾驶室,人机工程设计理念体现的越来越明显^[67]。主要表现为:

(1) 驾驶室采用框架式结构,符合防倾翻保护系统(ROPS)要求,在拖拉机发生倾翻时保证有容

身空间和逃生通道,安全性好^[76]。

(2)驾驶室内部的布置精益求精,从地板、座椅、内饰、各种杆件、按键、显示器等的布置,到色彩搭配,无不考虑驾驶员操作的舒适性与方便性,如图14所示,其从俯视的角度展示了 Deutz - Fahr 驾驶室 MaxVison 内部的整体布置情形。

(3)座椅和驾驶室均设置被动或主动减振悬架,且悬浮座椅最大旋转角度可达 40° ,驾驶室悬浮行程达 ± 40 mm,极大地改善了驾乘舒适性。

(4)噪声低,驾驶室内噪声最低到 69 dB,静音效果好。

(5)驾驶操控区大量采用电子控制,常用手柄和按钮按功能分区集中布置,高端机型采用带多功能扶手的座椅,驾驶操作更便捷。

(6)配置驾驶员增视系统,即通过拖拉机上设置的照相机及图形处理系统显示拖拉机周围 360° 范围图像,增大驾驶员视野,提高驾驶安全性,典型的增视系统有 John Deere 的 360° 3D camera 系统以及 Deutz - Fahr 的 Driver Extended Eyes 系统。



图14 道依茨 Fahr 的驾驶室 MaxVison

Fig. 14 Deutz - Fahr pilothouse MaxVison

4 拖拉机液压技术的发展

拖拉机液压系统最初只是简单应用在后悬挂系统的提升部分,随着拖拉机智能化、自动化、机电液一体化程度的不断提升,液压技术已经逐渐扩展到了负载换挡、液压输出、离合器、差速锁以及前悬挂等各个部件,成为现代拖拉机的主要特征之一。

电控液压悬挂是拖拉机液压悬挂系统的一种形式,它是电控技术与液压技术综合发展的结果,其可以实现悬挂系统的位置调节、牵引力调节、力位综合调节等。目前,电液悬挂在大中功率拖拉机上的应用非常普遍,带动力换向、动力换挡以及 CVT 的机型几乎全部采用电液悬挂,机械换挡机型则部分采用。就电液悬挂的功能而言,绝大多数系统至少可实现位置调节、牵引力调节以及力位综合调节^[77-80],部分电液悬挂系统在提升力位调节的基础上,可在整机控制系统的管理下与其他系统联合动作,实现复合功能,比如,为避免拖拉机在重载作业

时因驱动轮过度滑转而导致的土体破坏、轮胎磨损以及驱动能量浪费等,可通过对电液悬挂系统的耕深进行主动控制,改善驱动轮的滑转情况,使拖拉机在田间作业时保持最佳状态,即滑转率控制^[81];在拖拉机悬挂农具转移时,可通过对电液悬挂系统的主动控制,实现整机减振,以提高整机行驶速度和安全性,即主动减振控制;拖拉机在作业过程中,当驱动轮上的垂直载荷不足时,可通过主动调节提升油缸的压力,使由地轮承受的一部分农具重量转移到驱动轮上,从而提高驱动轮的附着性能,即压力控制。

拖拉机动力负载换挡技术的进步和完善,很大程度上得益于电控液压技术的不断发展。在拖拉机行进过程中,可通过控制带有湿式摩擦片的离合器的结合与分离,实现拖拉机在带载情况下的换挡或换向,而离合器的结合与分离一般通过调节液压缸的活塞行程实现,显然,工况、负载、挡位不同时,由电磁阀控制的压力重叠时间、离合器的压紧力也不同,随着电控、液压技术的进步,多挡位条件下的挡位选择和换挡操纵、变负载条件下的换挡冲击、振动等曾长期地困扰设计人员的问题,目前均已得到解决。

从液压输出来看,液压系统的技术规格有了较大的提高^[68],主要表现在:系统流量从 30 L/min 增加到 150 L/min;系统压力从起初的 10 MPa 提高到 18 MPa,而到目前,多数已突破 20 MPa;液压输出路数明显增多,从最初只能满足基本需求的 1 或 2 路,发展为目前的 6~8 路;大、中功率拖拉机普遍采用轴向柱塞变量泵闭心负载传感液压系统,相比于最初的定量开系统、以及后来发展出的变量压力反馈闭心系统,其可根据负载大小按需提供液压功率,节能效果好,同时,由于用电比例阀控制、检测和传感,使安全性和精度均得到了提高。

5 拖拉机电控及信息化技术的发展

5.1 电子控制技术

目前拖拉机技术在机械、液压领域已趋完善,产品的升级和换代主要体现在电子控制和信息化技术的革新和应用上,因此,拖拉机电子控制技术和信息化技术的应用程度直接反映了拖拉机整机的智能化、自动化水平。近年来,在国外一些高端拖拉机产品上出现的典型电控系统有芬特(Fendt)公司开发的智能胎压调节系统(Vario Grip Pro),约翰迪尔(John Deere)公司开发的自学习地头管理系统(iTec AutoLearn)以及配重快速匹配系统(EZ-ballast),道依茨(Deutz)公司开发的驾驶员增视系统(Driver

Extended Eyes)等,上述系统均是在原有发动机及底盘基础上升级而成的驾驶辅助系统,其高度依赖电子控制、通信等现代技术,并逐渐成为现代拖拉机升级换代的重要方面。

(1) 智能胎压调节系统

拖拉机在田间作业时,为保护土壤,提高抓地力,应适当降低胎压,以增加土壤与轮胎之间的接触面积,减少对土壤的压实;在道路运输时,则应适当升高胎压,以减小阻力,获得更大的速度和更好的节油性能。智能胎压调节系统即可根据实际需求调整轮胎气压,在不同工况下设定不同的胎压。智能胎压调节系统一般由中央处理器、负载传感器、压力传感器、温度传感器、空气压缩机和压力调节阀等组成,并集成在轮辋上。正确胎压可以将土壤压实程度降低 10% 以上,从而提高 5% 的作物产量。目前,该系统可支持连接局域网、农场主机及智能胎压应用程序。

图 15 是由 Fendt 公司开发的智能胎压调节系统(Vario Grip Pro),其由安装在正常轮胎内部的一个特制高压内胎进行蓄能,并通过转接头快速地改变外层大轮胎的胎压,据有关数据显示,其能在 30 s 内将胎压从 0.08 MPa 调节到 0.18 MPa,而对发动机转速无任何影响。胎压的调整可通过胎压辅助调节助手完成,调节助手集成在驾驶室的显示屏内,其可根据整车质量及行驶速度计算出最优的轮胎压力供驾驶员选择,也可根据胎压给出最优的整车质量及行驶速度。驾驶员仅需点一下屏幕确认,即使在行进中胎压调节系统也可在数秒内调好胎压。



图 15 芬特公司的胎压调节系统 Vario Grip Pro

Fig. 15 Fendt tire pressure regulating system Vario Grip Pro

(2) 驾驶员增视系统

为增大驾驶员视野,提高驾驶安全性,采用数码摄像技术和实时图像处理技术,对拖拉机驾驶室周围 360° 环境进行成像显示,即拖拉机驾驶员增视系统。道依茨(Deutz)、约翰迪尔以及芬特等都有各自的增视系统,图 16 为道依茨的 Driver Extended Eyes,其可探测拖拉机后方 7 m 范围内的区域,并以点云的形式将区域中的障碍物和拖拉机的相对位置呈现给驾驶员。系统还会自动规划最优的避障路径,辅助驾驶员进行避障,这对于缺乏操作经验的驾驶员在操纵大型机器时具有重要意义,同时,也是未

来迈向自动驾驶的关键一步。



图 16 道依茨公司的驾驶员增视系统 Driver Extended Eyes

Fig. 16 Deutz driver vision expansion system Driver Extended Eyes

(3) 自学习地头管理系统

拖拉机在地头转向过程中,很多时候需要进行升降机具、开关 PTO、切换挡位等各种重复性操作,为提高拖拉机作业效率,减轻驾驶员劳动强度,拖拉机自学习地头管理系统会根据驾驶员实际操作情况合理建议驾驶员进行自动地头转向操作,图 17 为约翰迪尔的 iTec AutoLearn,这是一种自学习功能,也是未来实现拖拉机智能化的关键一步。



图 17 约翰迪尔的自学习地头管理系统 iTec AutoLearn

Fig. 17 John Deere self-learning headland management system iTec AutoLearn

(4) 配重快速匹配系统

现代大功率拖拉机为适应不同的作业环境、作业种类,往往需要改变拖拉机配重,传统的方式是只使用一种配重,且安装拆卸也费时费力,很多时候由于配重不能兼顾各种作业工况而极易造成拖拉机整机质量过大、牵引力不足,导致油耗上升。John Deere 开发的 EZ-ballast 系统如图 18 所示,其在拖拉机底盘下设置了电液控制的挂接机构,当拖拉机驶过配重块时,由液压系统驱动的挂接机构可快速实现配重的更换,同时,由于配重块经过优化设计,在保证整机离地间隙的同时,前后桥载荷比例基本不变。

从现有产品来看,目前拖拉机上的电子控制技术已贯穿发动机、底盘、驾驶室、电液悬挂以及导航控制等各个方面,由于各控制系统均有独立的 ECU 作为各自的控制单元,因而随着电控技术应用领域的不断拓宽,传统点对点的通信方式已很难适应现代拖拉机对于多节点控制系统的需求。CAN 总线是一种多主总线,可解决众多电子单元之间的数据交换和共享问题,自应用以来,因其线路简单、实时



图 18 约翰迪尔的配重快速匹配系统 EZ-ballast

Fig. 18 John Deere quick-fit ballast weight

system EZ-ballast

性好、抗干扰能力强、可靠性高,已逐渐成为现代拖拉机控制系统实现多节点通信的首选方案。目前,国际农机企业一般采用 ISO11783 标准化通信协议作为数据交换的接口,国内针对农林拖拉机和相关机械设备,也制定了相应的通信标准协议,即 GB/T 35381,其内容与 ISO11783 基本相同,适合我国拖拉机作设计参考。显然,随着现代拖拉机智能化、信息化进程的不断推进,发展以标准化通信协议为核心的分布式 CAN 网络通信控制技术至关重要。

5.2 拖拉机信息化与智能农机

拖拉机信息化是指培养、发展以智能拖拉机为代表的新兴生产力和生产模式,并使之应用于农业生产的过程,这里的智能拖拉机一般应具备信息感知、信息获取、信息传递、信息处理以及信息利用的能力。随着互联网、大数据、云计算、人工智能以及全球定位等新兴前沿技术的推进,拖拉机信息化控制技术开始向自动化、智能化方向发展。

拖拉机的自动化和智能化包含内容广泛,从目前发展情况来看,至少应包括拖拉机定位与导航、动态路径规划、机器视觉和远程监控等,其中牵涉到大量的工程技术学科,包括导航、图像、模型与策略、执行器以及数据链等^[82]。

自动导航和定位技术是拖拉机信息化和智能化的重要组成部分,在现代精准农业中有着广阔的应用和发展前景。拖拉机自动导航系统的关键技术主要包括导航感知、控制决策以及车轮转向控制执行3个方面,其中,导航感知是指通过 GPS、北斗定位系统、机器视觉、惯性导航单元以及多传感器融合的组合方式实现对拖拉机的精准定位;导航控制决策是指基于传感器信息,采用合适的智能控制算法,如 PID、模糊控制以及智能神经网络等,根据拖拉机实际行驶路径和预定义路径之间的偏差,对拖拉机转向车轮在下一时刻的目标偏转角进行实时决策,以确保拖拉机能按照预先规划好的路径行驶;车轮转向控制系统是拖拉机导航控制的执行部分,通常采用电机、液压马达等作为主要执行元件。国外导航技术已经成熟,许多大型农机企业和导航测绘公司联合推出各自的自动导航产品,如 John Deere 的

Green Star 卫星导航系统、CASE 的 AFS Accu Guide GPS 自动导航系统、美国天宝(Trimble)公司的 Auto Pilot 自动导航驾驶系统以及日本拓普康(Topcon)公司的 System 150 精准级农业导航及自动驾驶系统。国内在“十一五”期间才开始投入大量的人力物力进行研究,其中,以中国农业大学、华南农业大学、西北农林科技大学为代表,开展了对农业机械的自动化改造、定位系统设计以及控制算法的研究,也逐渐形成了部分导航产品,如国内首套完全拥有自主知识产权的“惠农”北斗导航农机自动驾驶系统,由北京合众思壮公司联合众多高校及中国一拖集团有限公司共同研发而成,较好地实现了拖拉机的自动转向^[83]。但总体来说,国内农业导航系统的通用性仍然较差^[84-87],有待进一步发展。

自动导航在拖拉机上已有应用,而融合了动态路径规划、机器视觉、整机控制等内容的无人驾驶技术使得拖拉机在信息化的道路上更进一步。无人驾驶和自动导航最大的区别在于是否能够进行动态路径规划,以及是否能够动态识别障碍物并进行主动避障^[88]。凯斯(CASE)于 2016 年 9 月发布了无人驾驶概念拖拉机,如图 19 所示,其在现有 CASE/Magnum 机型的基础上,融合了整机控制、激光雷达探距、机器视觉、远程视频传输、监测以及遥控等技术,真正实现了拖拉机无人自动化作业。一拖集团也于 2016 年 10 月在中国国际农机展览会上展示了国内首台真正意义上的无人驾驶拖拉机 LF954-C,其搭载的信息和控制系统同样包括自动转向系统、整机控制系统、毫米波雷达测量系统、双目摄像视觉识别系统等,结合北斗高精度定位技术,可实现规定区域内自动路径规划及导航、自动换向、自动刹车和发动机转速的自动控制、农具的自动控制、障碍物的主动避让和远程控制等功能。



图 19 凯斯无人驾驶概念拖拉机

Fig. 19 CASE autonomous concept tractor

远程监控管理也是拖拉机信息化的方向之一,典型的远程监控管理系统一般由机载终端、通信网络和监控管理调度中心3部分组成^[88],其中,机载终端分别通过 CAN 总线和 GPS 获取拖拉机工作状态信息和地理位置信息并进行上传;通信网路负责将机载终端收集到的作业数据和定位信息实时传送

到监控管理中心的网络服务器,且一般采用 GPRS、CDMA 等无线通信方式进行数据传输;监控管理中心主要由中心服务器和调度单元组成,其中,中心服务器建有专门的本地拖拉机作业数据库,调度单元通过 Internet 网络与中心服务器的数据库连接,以实时接收中心服务器发来的数据,一方面,可实现诸如拖拉机分布位置查询、作业数据采集与分析、作业远程监控报警、数据查询与记录回放以及远程检测与诊断等功能,另一方面,调度单元还可根据拖拉机位置和作业情况进行实时调度,并将调度结果经由中心服务器和 GPRS 网络传送到相应的拖拉机车载终端,实现对拖拉机的合理调度。比较典型的远程监控管理系统有 John Deere 的 JD LINK 系统、AGCO 的 Fuse 系统(图 20)、美国天宝(Trimble)公司的“网络农场系统”以及拓普康(Topcon)公司远程资产管理系统,其均融合了全球卫星定位、无线移动通讯、远程控制及物联网等前沿技术,最大程度地降低了农机设备的冗余投入,使农机作业能力与作业需求合理匹配,在提高生产效率的同时,降低了整体运营成本。



图 20 爱科的精准农业系统 Fuse

Fig. 20 AGCO precision agriculture Fuse

6 结论与展望

纵观农业拖拉机技术的发展历程,在经历了动力、传动、液压、电控以及机电一体化等技术的大规模突破后,拖拉机本体的技术革新在 20 世纪末已趋完善,在此之后,整机的升级换代主要体现在部件的局部创新和细节完善上。

进入 21 世纪,互联网技术发展迅猛,在短短 20 年的时间内,互联网技术已经渗透到包括传统行业在内的各行各业内,尤其是自 2015 年我国提出“互联网+”行动计划以后,移动互联网、云计算、大数据、物联网等先进技术开始与现代制造业相结合,一种以信息化为特征的新生态的国家发展战略开始形成,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,同时,它也代表了我国农业生产方式的未来发展方向。拖拉机作为智能农机装备和农业生产信息化网络的一个重要节点,必将在以下方面获得长足发展:

(1) 高效作业

未来的高效作业,并不仅仅是拖拉机自身作业效率的提升,更是指整个农业生产系统的高效运行。拖拉机作为庞大农业物联网系统中的一个生产终端,一方面,与生产企业(或相关服务机构)相联通,可实现对拖拉机作业状态的实时监控,一旦设备发生异常,则可及时采取应对措施,同时,各种作业数据被上传至相应的服务器,经综合处理后,分类入库,对拖拉机的维护、故障预测以及同类产品的前期设计、后期升级换代均有极其重要的参考价值;另一方面,拖拉机与目标用户联网,可随时响应用户的使用要求,按需分配机具类型、设备数量以及功率级别等,以最少的投入达到最佳的经济效益和环境效益,实现有限农业资源的最优分配和高效利用,确保整个农业生产系统运行的高效性。

(2) 节能环保

为应对农业机械化规模的不断扩大可能造成的石油短缺、环境污染问题,国家对柴油机排放法规的要求必将越来越严格,预计国 IV 排放法规将会在 2~3 年内推出,因而,各种机内净化、机外尾气处理技术及其组合方案会在拖拉机上得到更广泛的应用,以最大限度地降低整机排放;同时,以高比能量动力电池、生物甲烷等新型替代能源为动力的新能源技术将与传统动力并行发展,以求在新的能源领域获得技术突破,实现机组作业时的零排放、无污染、低噪声和高效率,从根本上解决农业机械化过程中面临的节能减排问题。

(3) 信息化与智能化

随着电子技术、信息技术在农业生产中应用范围的不断扩大和全球精细农业系统的兴起,以及我国“互联网+”、“中国制造 2025”和“人工智能 2.0”阶段的到来,拖拉机机组的信息化和智能化将得到更大的发展空间,而拖拉机智能感知和机器学习技术、智能决策与导航控制技术、智能动力驱动技术以及大数据和物联网云平台管控技术,作为拖拉机智能化的共性关键技术,将成为未来拖拉机技术发展的新亮点和新方向。

参 考 文 献

- 1 周济. 智能制造—“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU Ji. Intelligent manufacturing: the main attack direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese)
- 2 李金华. 德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(5): 71-79.

- LI Jinhua. Comparison and enlightenment between “Industrial 4.0 in Germany” and “Made in China 2025”[J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition)*, 2015, 15(5): 71–79. (in Chinese)
- 3 王川,孙坦. 大数据驱动下的农业信息科技创新与服务——中国农业科学院农业信息研究所“十三五”发展规划[J]. *数字图书馆论坛*, 2016(11): 34–39.
- WANG Chuan, SUN Tan. The innovation and service of agricultural information technology driven by big data: development plan in 13th five-year of Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences[J]. *Digital Library Forum*, 2016(11): 34–39. (in Chinese)
- 4 JB/T 11320—2013 拖拉机 功率分类及型谱[S]. 2013.
- 5 白海,孟利清,何超,等. 非道路用柴油机实现国Ⅲ排放的技术路线研究[J]. *中国农机化学报*, 2015, 36(6): 193–196.
- BAI Hai, MENG Liqing, HE Chao, et al. Study on technical routes to achieve standards of emission stage Ⅲ for non-road diesel engine[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36(6): 193–196. (in Chinese)
- 6 United States Environmental Protection Agency. 40 CFR Part 89-Control of emissions from new and in-use nonroad compression-ignition engines [EB/OL]. (2012-01-18) [2017-11-05]. <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=e88cb19f8ede701c7af6c1e51d1639c6&mc=true&node=pt40.20.89&rgn=div5>.
- 7 United States Environmental Protection Agency. 40 CFR Part 1039 -Control of emissions from new and in-use non road compression-ignition engines [EB/OL]. (2014-08-08) [2017-11-22]. <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=e88cb19f8ede701c7af6c1e51d1639c6&mc=true&node=pt40.33.1039&rgn=div5>.
- 8 WILLEMS F, FOSTER D. Integrated powertrain control to meet future CO₂ and Euro-6 emissions targets for a diesel hybrid with SCR-deNO(x) system[C] // 2009 American Control Conference, 2009: 3944–3949.
- 9 FIEBIG M, WIARTALLA A, Holderbaum B, et al. Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions[J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2014, 9(1): 1–18.
- 10 MOREDA G P, MUÑOZ-GARCÍA M A, BARREIRO P. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery[J]. *Energy Conversion & Management*, 2016, 115: 117–131.
- 11 李继春. 现代农业装备的发展特点[J]. *农业机械*, 2016(9): 113–115.
- LI Jichun. Development characteristics of modern agricultural equipment[J]. *Farm Machinery*, 2016(9): 113–115. (in Chinese)
- 12 LI Chengjun, KE Meicong, WU Youyu. Research and implementation of tractor power shift clutch control system[C] // The 4th International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering, 2017: 1–5.
- 13 RAIKWAR S, TEWARI V K, RAO M S, et al. Simulation of components of a power shuttle transmission system for an agricultural tractor[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 114: 114–124.
- 14 TANELLI M, PANZANI G, SAVARESI S M, et al. Transmission control for power-shift agricultural tractors: design and end-of-line automatic tuning[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(1): 285–297.
- 15 白学峰,杨浩勇,常江雪. 履带拖拉机发展现状分析与发展建议思考[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2017, 44(6): 1–4.
- BAI Xuefeng, YANG Haoyong, CHANG Jiangxue. Present situation analysis and development suggestion of crawler tractor [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2017, 44(6): 1–4. (in Chinese)
- 16 史金钟. 轮式拖拉机与履带拖拉机差异浅议[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2018, 45(1): 1–5.
- SHI Jinzhong. Discussion on difference between wheeled tractor and dual track crawler tractor[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2018, 45(1): 1–5. (in Chinese)
- 17 罗锡文. 对发展丘陵山区农业机械化的思考[J]. *农机科技推广*, 2011(2): 17–20.
- LUO Xiwen. Thoughts on developing agricultural mechanization in hilly and mountainous areas [J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2011(2): 17–20. (in Chinese)
- 18 孟祥政,邢俊文,王亮. 三角形橡胶履带车轮式越野车通过性研究[J]. *机械工程师*, 2012(11): 16–18.
- MENG Xiangzheng, XING Junwen, WANG Liang. Study on the transmissivity of triangular rubber track wheel type off-road vehicle[J]. *Mechanical Engineer*, 2012(11): 16–18. (in Chinese)
- 19 李军,李灏,宁俊帅. 履带车辆松软路面通过性分析[J]. *农业装备与车辆工程*, 2010(5): 3–6.
- LI Jun, LI Hao, NING Junshuai. Analysis of the mobility of tracked vehicle on soft soil[J]. *Agriculture Equipment & Vehicle Engineering*, 2010(5): 3–6. (in Chinese)
- 20 BORGHI M, ZARDIN B, PINTORE F, et al. Energy savings in the hydraulic circuit of agricultural tractors [J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 352–361.
- 21 BORODANI P, COLOMBO D, FORESTELLO M, et al. Robust control of a new electro-hydraulic pump for agricultural tractors [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 2266–2271.
- 22 DU Qiaolian, CHEN Xuhui. Design on control system for electro-hydraulic hitch equipment of tractor[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 945–949: 1513–1516.
- 23 KUMAR R, RAHEMAN H. Design and development of a variable hitching system for improving stability of tractor trailer combination[J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2015, 8(3): 187–194.
- 24 ZEHSAZ M, SADEGHI M H, ETTEFAGH M M, et al. Tractor cabin’s passive suspension parameters optimization via experimental and numerical methods[J]. *Journal of Terramechanics*, 2011, 48(6): 439–450.
- 25 张广庆,朱思洪,宋庆德,等. 基于 ADAMS 的铰接轮式重型拖拉机振动特性分析[J]. *机械设计*, 2012, 29(6): 69–73.
- ZHANG Guangqing, ZHU Sihong, SONG Qingde, et al. Research on vibration characteristics of articulated wheel heavy tractor based on ADAMS [J]. *Journal of Machine Design*, 2012, 29(6): 69–73. (in Chinese)
- 26 李科,朱思洪,聂信天,等. 驾驶室悬架参数对拖拉机振动特性影响的研究[J]. *机械设计*, 2015, 32(5): 71–77.
- LI Ke, ZHU Sihong, NIE Xintian, et al. Influence of suspension parameters of cab on vibration characteristics of tractor [J]. *Journal of Machine Design*, 2015, 32(5): 71–77. (in Chinese)
- 27 SOLOMON U, PADMANABHAN C. Hydro-gas suspension system for a tracked vehicle: modeling and analysis[J]. *Journal of*

- Terramechanics, 2011, 48(2): 125 - 137.
- 28 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222 - 230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140735&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035.
- GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural internet of things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222 - 230. (in Chinese)
- 29 赵春江. 物联网技术在农业领域的应用[Z]. <http://www.wlwiot.com/Article/zcddetail5407.htm>.
- 30 李道亮. 农业物联网导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- 31 ABBASI A Z, ISLAM N, SHAIKH Z A, et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture[J]. Computer Standards & Interfaces, 2011, 36(2): 263 - 270.
- 32 何勇, 聂鹏程, 刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216 - 226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131035&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035.
- HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of internet of things in agriculture and sensing instrument[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 216 - 226. (in Chinese)
- 33 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1 - 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001.
- LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1 - 20. (in Chinese)
- 34 谭丕强, 王德源, 楼狄明, 等. 农业机械污染排放控制技术的现状与展望[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 1 - 14.
- TAN Piqiang, WANG Deyuan, LOU Diming, et al. Progress of control technologies on exhaust emissions for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 1 - 14. (in Chinese)
- 35 The European Parliament and the Council. Directive 97/68/EC of The European Parliament and the Council of 16 December 1997 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery [J]. Official Journal of the European Communities, 1997, L59: 1 - 85.
- 36 The European Parliament and the Council. Directive 2004/26/EC of The European Parliament and the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery [J]. Official Journal of the European Communities, 2004, L146: 1 - 107.
- 37 GB 20891—2007 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国 I、II 阶段) [S]. 2007.
- 38 GB 20891—2014 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法(中国第 III、IV 阶段) [S]. 2014.
- 39 徐家龙, 藤泽英也. 柴油机电控喷油技术[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- 40 王尚勇, 杨青. 柴油机电子控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 38 - 50.
- 41 周家美, 王开佃, 沈涛, 等. 轮式拖拉机排放第三阶段总体设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(1): 85 - 88.
- ZHOU Jiamei, WANG Kaidian, SHEN Tao, et al. Overall design of china III emission of wheeled tractor [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2016, 54(1): 85 - 88. (in Chinese)
- 42 胡乃涛, 李志国, 张学敏. 国内外非道路车辆排放研究进展[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 242 - 245.
- HU Naitao, LI Zhiguo, ZHANG Xuemin. Research progress of non-road vehicle emission at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 242 - 245. (in Chinese)
- 43 陈希颖, 居钰生, 张庆, 等. 非道路移动机械用柴油机中国第三阶段排放标准关键技术研究[J]. 现代车用动力, 2015(3): 1 - 6.
- CHEN Xiyang, JU Yusheng, ZHANG Qing, et al. Key technologies for non-road diesel engine to meet national stage 3 emissions regulation [J]. Modern Vehicle Power, 2015(3): 1 - 6. (in Chinese)
- 44 徐峰, 李君略, 仵建涛, 等. 农用柴油机排放标准升级对农机行业的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(30): 354 - 356.
- XU Feng, LI Junlue, WU Jiantao, et al. The impact of agricultural diesel engine emission standards on agricultural machinery industry [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(30): 354 - 356. (in Chinese)
- 45 倪计民, 刘越, 石秀勇, 等. 可变喷嘴涡轮增压及废气再循环系统改善柴油机排放性能[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 82 - 88.
- NI Jimin, LIU Yue, SHI Xiuyong, et al. Variable nozzle turbine combined with Venturi exhaust gas recirculation system improving emission performance of diesel engines [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 82 - 88. (in Chinese)
- 46 王文勤, 侯全会, 蔡鸿伟. 四缸增压柴油机进气冷却系统的设计与试验[J]. 内燃机与配件, 2017(7): 6 - 8.
- WANG Wenqin, HOU Quanhui, CAI Hongwei. Design and experimental research about four-cylinder turbocharged diesel engine inlet air cooling system [J]. Internal Combustion Engine and Accessories, 2017(7): 6 - 8. (in Chinese)
- 47 PANDEY S, DIWAN P, SAHOO P K, et al. The effect of exhaust gas recirculation and premixed fuel ratio on combustion and emissions in a partial homogeneous charge compression ignition-direct injection engine fueled with bioethanol and diesel [J]. Biofuels, 2015, 6(5 - 6): 357 - 367.
- 48 RUSSELL A, EPLING W S. Diesel oxidation catalysts [J]. Catalysis Reviews, 2011, 53(4): 337 - 423.
- 49 SWANSON J, WATTS W, KITTELSON D, et al. Filtration efficiency and pressure drop of miniature diesel particulate filters [J]. Aerosol Science & Technology, 2013, 47(4): 452 - 461.
- 50 CHEN T, WU Z, GONG J, et al. Numerical simulation of diesel particulate filter regeneration considering ash deposit [J]. Flow Turbulence & Combustion, 2016, 97(3): 1 - 16.
- 51 BASU S, HENRICHSEN M, TANDON P, et al. Filtration efficiency and pressure drop performance of ceramic partial wall flow

- diesel particulate filters[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2013, 6(3): 877-893.
- 52 SONG X, JOHNSON J H, NABER J D. A review of the literature of selective catalytic reduction catalysts integrated into diesel particulate filters[J]. International Journal of Engine Research, 2015, 16(6): 738-749.
- 53 辛喆,王顺喜,张寅,等. Urea-SCR 催化器压力损失及其对柴油机性能的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(8):169-173.
- XIN Zhe, WANG Shunxi, ZHANG Yin, et al. Pressure loss of urea-SCR converter and its influence on diesel engine performance[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):169-173. (in Chinese)
- 54 彭天权. 非道路用发动机国Ⅲ排放技术分析和应对策略[J]. 建设机械技术与管理,2013(5):29-31.
- PENG Tianquan. Technical analysis and coping strategies of off-road engine national III emission standards[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2013(5): 29-31. (in Chinese)
- 55 张真. 浅谈农机国三升级技术路线[J]. 农机市场,2015(4):31-32.
- ZHANG Zhen. A brief talk on the upgrading technology route of agricultural machinery to meet China III emission standard[J]. Agricultural Machinery Market, 2015(4): 31-32. (in Chinese)
- 56 杨春丽,邹兴辉,张宗焕,等. 电控硅油风扇节油效果分析与验证[J]. 汽车实用技术,2018(1):134-136.
- YANG Chunli, ZOU Xinghui, ZHANG Zonghuan, et al. Analysis and verification of fuel efficiency of electric control silicone oil fan[J]. Automobile Applied Technology, 2018(1): 134-136. (in Chinese)
- 57 吴海荣. 发动机液压无级调速冷却风扇技术分析[J]. 农业装备与车辆工程,2008(11):28-30.
- WU Hairong. Analysis on engine hydraulic stepless speed regulation cooling fan [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2008(11): 28-30. (in Chinese)
- 58 周龙刚,孟祥龙,李伟,等. 发动机冷却风扇驱动方式对比[J]. 内燃机与动力装置,2013,30(1):55-57.
- ZHOU Longgang, MENG Xianglong, LI Wei, et al. Comparison analysis on methods driving engine cooling fan[J]. I. C. E& Powerplant, 2013, 30(1): 55-57. (in Chinese)
- 59 FISHER R M. Designing for safety in elec-trak garden tractor[J]. Agricultural Engineering, 1970,51(10):589-592.
- 60 商高高,张家俊. 电动拖拉机驱动控制策略开发[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):149-153.
- SHANG Gaogao, ZHANG Jiajun. Development of electric tractor powertrain control strategy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 149-153. (in Chinese)
- 61 邓晓荣,朱思洪,高辉松,等. 混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):21-31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.005.
- DENG Xiaorong, ZHU Sihong, GAO Huisong, et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 21-31. (in Chinese)
- 62 谢斌,张超,陈硕,等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):9-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150602&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.002.
- XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 9-13. (in Chinese)
- 63 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 Bin, 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)
- 64 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/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):358-366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180247&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.047.
- LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 358-366. (in Chinese)
- 65 CHEN Yanni, XIE Bin, MAO Enrong. Electric tractor motor drive control based on FPGA[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(16): 271-276.
- 66 赵剡水,杨为民. 农业拖拉机技术发展观察[J]. 农业机械学报,2010,41(6):42-48.
- ZHAO Yanshui, YANG Weimin. Technological development of agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 42-48. (in Chinese)
- 67 吴清分,凌桐森. 欧美大中型拖拉机近期技术结构概况[J]. 拖拉机与农用运输车,2002,29(5):31-40.
- WU Qingfen, LING Tongsen. Recent technical structure of large and medium-sized tractor in Europe and America[J]. Tractor & Farm Transporter, 2002,29(5): 31-40. (in Chinese)
- 68 席志强,周志立. 拖拉机自动变速器应用现状与技术分析[J]. 机械传动,2015,39(6):187-195.
- XI Zhiqiang, ZHOU Zhili. Application status and technical analysis of automatic transmission on tractor [J]. Journal of Mechanical, 2015, 39(6): 187-195. (in Chinese)
- 69 高辉松,朱思洪,贺亮,等. 拖拉机动力换挡变速箱和无级变速箱发展现状与趋势[J]. 机械传动,2012,36(8):119-123.
- GAO Huisong, ZHU Sihong, HE Liang, et al. Development and trend of power shift transmission[J]. Journal of Mechanical, 2012, 36(8): 119-123. (in Chinese)
- 70 席志强,周志立,张明柱,等. 拖拉机动力换挡变速器换挡特性与控制策略研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):350-357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161147&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.047.
- XI Zhiqiang, ZHOU Zhili, ZHANG Mingzhu, et al. Shift characteristics and control strategy of powershift transmission on tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 350-357. (in Chinese)

- 71 徐立友. 拖拉机液压机械无级变速器特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- 72 郑啸洲,孙伟. 液压机械连续无级传动研究概述[J]. 机械工程师, 2017(7):37-39.
ZHENG Xiaozhou, SUN Wei. Review on research of hydro-mechanical continuously variable transmission[J]. Mechanical Engineer, 2017(7):37-39. (in Chinese)
- 73 周迅,岳艳艳,李勇. 拖拉机悬浮式前驱动桥的应用研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011,38(2):13-16.
ZHOU Xun, YUE Yanyan, LI Yong. Application research of tractor suspended front axle[J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(2):13-16. (in Chinese)
- 74 裴雷,丁正龙,陈成,等. 基于 ADAMS 的大型拖拉机双横臂独立悬架设计与分析[J]. 机械设计, 2012, 29(11):53-56.
PEI Lei, DING Zhenglong, CHEN Cheng, et al. Design and analysis of double wishbone independent suspension for large-scale tractor based on ADAMS[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(11):53-56. (in Chinese)
- 75 李建启. 国内拖拉机关键技术发展现状[J]. 拖拉机与农用运输车, 2018, 45(2):1-5.
LI Jianqi. Development status of domestic tractor key technology[J]. Tractor & Farm Transporter, 2018, 45(2):1-5. (in Chinese)
- 76 李旦阳. 某型拖拉机驾驶室安全性分析[J]. 青岛:青岛大学, 2017.
- 77 李瑞川,郭坤,杨俊茹,等. 大功率拖拉机电液提升专用力传感器磁路设计与仿真[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(8):358-367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170843&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.043.
LI Ruichuan, GUO Kun, YANG Junru, et al. Magnetic circuit design and simulation of draft sensor in electro-hydraulic lifting mechanism of high-power tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):358-367. (in Chinese)
- 78 李明生,叶进,谢斌,等. 拖拉机液压底盘液控比例流量阀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(4):397-403. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180447&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.047.
LI Mingsheng, YE Jin, XIE Bin, et al. Design and test of hydraulic proportional flow valve for hydraulic chassis in tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):397-403. (in Chinese)
- 79 尹修杰. 拖拉机作业机组电液耕深控制方法的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2007.
- 80 张硕,杜岳峰,朱忠祥,等. 后轮驱动大功率拖拉机牵引力-滑转率联合自动控制方法[J]. 农业工程学报, 2016,32(12):47-53.
ZHANG Shuo, DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, et al. Integrated control method of traction & slip ratio for rear-driving high-power tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(12):47-53. (in Chinese)
- 81 董胜,袁朝辉,谷超,等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. 农业工程学报, 2017,33(8):1-11.
DONG Sheng, YUAN Zhaohui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8):1-11. (in Chinese)
- 82 刘进一. 基于速度自适应的拖拉机自动驾驶控制系统研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- 83 贾全,张小超,苑严伟,等. 拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(4):36-44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180404&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.004.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):36-44. (in Chinese)
- 84 王卓,刘知祥,白晓平,等. 拖拉机定速巡航系统纵向加速度跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(1):21-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180102&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.002.
WANG Zhuo, LIU Zhixiang, BAI Xiaoping, et al. Longitudinal acceleration tracking control of tractor cruise system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):21-28. (in Chinese)
- 85 张闻宇,丁幼春,王磊,等. 拖拉机自动驾驶摩擦轮式转向驱动系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(6):32-40. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170604&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.004.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Lei, et al. Design and experiment on automatic steering control system of friction drive for tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):32-40. (in Chinese)
- 86 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动驾驶系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(2):11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170202&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):11-19. (in Chinese)
- 87 宋春月. 无人驾驶拖拉机控制系统设计研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2015.
- 88 王少农,庄卫东,王熙. 农业机械远程监控管理信息系统研究[J]. 农机化研究, 2015,37(6):264-268.
WANG Shaonong, ZHUANG Weidong, WANG Xi. Research on agricultural machinery remote control management system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6):264-268. (in Chinese)