doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.001

农业机械底盘技术研究现状与展望

王韦韦[1,2]　陈黎卿[1,3]　杨　洋[1,2]　刘立超[1,2]

(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036;2.安徽省智能农机装备工程实验室,合肥 230036;
3.合肥综合性国家科学中心人工智能研究院,合肥 230036)

摘要:农业机械底盘是移动式农业动力机械的重要组成部分,其技术发展反映了农业现代化程度和智能化发展水平。本文从传动系统、行驶系统、转向系统、制动系统、底盘遥控等方面阐述了国内外农业机械底盘技术的发展现状,着重归纳了四轮驱动、无级变速、轮距可调、空气悬架、悬浮车桥、线控转向、制动防滑等新技术在农业机械底盘上应用的进展,并结合不同应用环境阐明了农业机械底盘各系统相关技术的基本原理和特点,最后根据我国农业机械底盘技术研究与应用需求,从加强基础理论研究和关键零部件性能优化、提升底盘平台化与轻量化设计水平、实现底盘智能化控制与信息化管理等方面对农业机械底盘未来研究方向进行了展望。

关键词:农业机械;底盘;平台化;智能化

中图分类号:S232.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0001-15　　**OSID**:

Development and Prospect of Agricultural Machinery Chassis Technology

WANG Weiwei[1,2]　CHEN Liqing[1,3]　YANG Yang[1,2]　LIU Lichao[1,2]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Institute of Artificial Intelligence*, *Hefei Comprehensive National Science Center*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: Agricultural machinery chassis is an important part of agricultural equipment, and its technological development reflects the degree of mechanization and intelligent development of agricultural equipment. Based on the analysis of the agricultural machinery chassis technology development worldwidely, the chassis of transmission system, driving system, steering system, braking system and chassis remote controlling were proposed. The latest researches on agricultural machinery chassis in four-wheel drive, continuously variable transmission, adjustable wheelbase, air suspension and suspension drive axle, steer-by-wire, braking and anti-skid were summarized. Meanwhile, the basic principles and characteristics of the relevant technologies of each system were expounded combining with the agricultural machinery chassis of different application environments. Finally, considering the research progress and application demand of agricultural machinery chassis technology in China, the future research emphasis and development direction were as following aspects: strengthening basic theoretical research and key parts performance optimization, enhancing chassis platform and lightweight design, and realizing chassis intelligent control and information management.

Key words: agricultural machinery; chassis; platformization; intelligence

0　引言

我国农机生产和拥有量居世界首位,2018 年农机总动力达到 10.04 亿千瓦,总量近 2 亿台,其中拖拉机保有量 2 240 万台、联合收获机 206 万台,截止 2019 年综合机械化率为 69%。随着工业化和城镇化的加速发展,社会老龄化加剧、人工劳动成本不断增加,发展以现代化、工厂化农业为主体的生产模式成为当务之急。在新形势与背景下,《中国制造 2025》实施纲要把智能农机装备列为重点发展的十

收稿日期:2021-03-18　修回日期:2021-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52005008)和安徽省高校协同创新项目(GXXT-2020-011)

作者简介:王韦韦(1989—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备研究,E-mail:wangww0618@163.com

通信作者:陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail:lqchen@ahau.edu.cn

大领域之一[1-2];在“十四五”科技发展规划中,工厂化农业关键技术与智能农机装备也被列为重点研发计划。

底盘总成是移动式农业动力机械的重要组成部分,其性能直接影响整机的作业质量和效率。底盘支撑、安装驱动系统及各部件的总成,并接受驱动系统的动力,使农业装备在各种复杂环境下运动,不仅要在耕、播、管、收等生产环节正常行驶,而且通用底盘上还要安装其他功能性机构,从而实现苗木移栽、林果采收、产品分级、根茎切割等功能。因此,农业机械底盘技术发展水平是体现农业现代化和智能化程度的重要标志,世界农业装备强国均将底盘作为智能农机装备研究发展的核心。

底盘是集传动、行走、液压、转向、制动、机-电-液集成控制等技术于一体的动力机械移动平台[3],可以稳定、高效、可靠地承载、牵引、外挂其他功能性农机具,从而完成农业生产任务。近年来,国内外学者从“高效、智能、环保”等角度出发,在四轮驱动、动力换挡、无级变速、轮距可调、空气悬架、悬浮车桥、线控转向、制动防滑、底盘遥控等方面取得了创新性成果,对提升农业装备底盘作业性能具有重要意义。本文从传动系统、行驶系统、转向系统、制动系统及底盘遥控技术等方面阐述国内外农业机械底盘技术的发展现状,结合不同应用环境下的农机底盘需求来分析各系统相关技术的特点、基本原理及典型应用,在此基础上,结合我国国情对农业机械底盘技术的未来发展方向进行展望,为智能农机装备底盘设计提供参考。

1 农业机械底盘传动系统

1.1 布置方案

农业机械底盘传动系统布置形式按驱动类型可分为机械式、液力式和电力式[4]。机械式传动系统是指由发动机提供动力,依次经过离合器、变速箱、驱动桥、半轴,最后传递至车轮,主要适用于农用拖拉机、收获机等底盘传动系统布置方案;液力式传动系统是以液体作为传动介质,循环流动的动能或压能变化来传递或转换能量,主要适用于高地隙植保机、水田插秧机等底盘传动系统布置方案;电力式传动系统是指将电动机输出的动力传递至传动轴或驱动桥,或多轮毂电机直接驱动,目前中国一拖集团有限公司的超级无人拖拉机 1 号、农业采摘机器人等装备底盘均采用电力式传动系统布置方案,图 1 所示为不同驱动类型的农机装备。

1.1.1 机械式驱动

机械式四轮驱动具有良好的越障性、牵引性、坡地稳定性,广泛适用于山区农机底盘传动系统布置方案,常见的机械式四轮驱动主要包括:全时四轮驱动、分时四轮驱动和适时四轮驱动。陈黎卿团队[5-7]为了提高四轮驱动底盘动力性和行驶稳定性,提出一种基于前后轴转速差及车轮滑转率实时观测的轴间扭矩分配控制策略。张京等[8]针对农用轮式机器人转向方式单一、难以适应田间地头转向等问题,设计了一种四轮独立驱动转向农用轮式机器人。QUAN 等[9]基于扩展阿克曼转向原理设计了一种适用于作物行间行驶的四轮驱动移动式农用信息获取机器人。李勇等[10]通过对四轮驱动拖拉机牵引效率的分析,提出了影响四轮驱动拖拉机牵引效率的关键因素。


(a) 内燃机驱动履带收获机 (b) 液压驱动拖拉机底盘
(c) 四轮驱动农业机器人 (d) 电力驱动拖拉机底盘

图 1 不同驱动形式的农业装备

Fig. 1 Different drive forms of agricultural equipment

1.1.2 液力式驱动

静液压驱动底盘具有轻量化、功率密度高、无级变速、转向灵活性强等特点。英国国立农机研究所于 1956 年成功研制第一台液压驱动的农用拖拉机,20 世纪 70 年代,欧美市场在自走式联合收获机上普及了静液压驱动系统。近年来,全液压底盘驱动技术在国外先进高地隙植保机、高速插秧机、收获机上得到大范围应用,并融合电子、信息等先进技术,使其性能得到大幅度提高[11-12]。张华等[13]为满足复杂农林环境下植保喷雾作业需求,提出了一种全液压驱动的柔性智能化喷雾机底盘。WANG 等[14]针对用液压动力分流式无级变速拖拉机在启动时换挡质量不佳,基于换挡质量的指令时间、离合器压力控制指令电压等参数提出了一种利用解映射得到控制参数的匹配规律。综合文献[15-16]可知,静液压驱动底盘利于实现自动化、智能化控制和远程操纵,满足对当代农业机械自动化、智能化的要求,具有广阔的市场前景。

1.1.3 电力式驱动

电力式驱动底盘具有低能耗、无污染、噪声低、

传动效率高等显著特点，符合新能源背景下电动农机驱动底盘传动系统布置方案，目前电力式驱动主要包括：传统集中式驱动（直接替换内燃机）、分布式驱动（直联式电驱动车桥）、轮边或轮毂电机驱动，采用铅酸蓄电池供电和永磁无刷电机作动力源[17]。YUKO 等[18]设计了一款功率 10 kW 纯电动拖拉机，与等功率内燃机驱动的拖拉机作业能耗对比试验，田间行走和耕作所需的能源消耗可减少约 70%。李同辉等[19]提出了一种纯电动拖拉机的双电机多模动力耦合驱动系统，实现多种驱动模式协调控制，提高整机驱动效率。刘路等[20]为了适应烟草植保行农艺要求，设计了一款四轮轮毂电机驱动的植保机移动平台。为满足复杂的田间作业需求，电机的适用性、电池的续航里程、专用的电力式驱动控制系统是未来电动农业机械底盘的研究重点。

1.2　离合器

离合器在农用机械传动系统中是直接与驱动系统相连接的部件，其功用是保证底盘平稳起步，减轻轮齿间的冲击以及限制传动系统过载。根据传递动力的方式分为摩擦式离合器、液力离合器等[21]。摩擦式离合器可分为单作用式和双作用式，其中双作用摩擦式离合器将动力同时传递至变速箱和动力输出装置（PTO），主要适用于中小型拖拉机、收获机传动系统中，典型的有独立操纵和联动操纵的双作用摩擦式离合器[22]。液力离合器通过施加压力使得湿式摩擦片与片中间的油液挤出接合得很紧而传递扭矩，其中多片湿式离合器广泛用于对平稳性要求较高的自动变速器和无级变速器。廖湘平等[23]为了解决液粘调速离合器摩擦副偏磨问题，提出了一种新型双活塞结构液粘调速离合器；傅生辉等[24]针对大功率拖拉机动力换挡过程中湿式离合器充油压力实际值与理想值之间存在偏差的问题，提出了一种基于紧格式动态线性化的离合器压力无模型自适应预测控制（Model free adaptive predictive control，MFAPC）算法，以实现离合器油缸压力的跟随控制。

1.3　动力换挡技术及变速箱

变速箱是农业动力机械传动系统的核心部件之一，直接影响整机的动力性、经济性、平顺性和舒适性。20 世纪 80 年代，动力换挡变速箱开始在拖拉机、收获机动力传动系统中得到应用[25-26]。目前，国外大部分拖拉机厂商都提供带有动力换挡变速装置的拖拉机，如意大利兰蒂尼（Landini）公司的 Legend 系列，荷兰 Ford 公司的 30 系列，法国雷诺公司的 175 - 74T2 系列，Caterpillar 公司的 Challenger65 系列，美国 Case 公司的 CX 系列、Magnum 系列，意大利 Same 公司的 Silver 系列等[27-29]。与国外相比，国内的动力换挡技术比较落后，早期应用于工程机械上，目前，中国一拖集团、福田雷沃重工、山东常林、五征集团、常州东风和江苏常发等农机制造企业开展了拖拉机动力换挡技术的研究，并已有部分产品进入农机市场[30-31]。

目前农业机械底盘用变速器主要有以下几种类型：动力换挡自动变速箱（Power shift transmission，PST）、液力机械式自动变速箱（Automatic transmission，AT）、电控机械式自动变速箱（Automated mechanical transmission，AMT）、液压机械式无级自动变速箱（Hydro-mechanical continuously variable transmission，HMCVT）和静液压无级自动变速箱（Hydraulic static transmission，HST）[32-33]。表 1 列举了国内外典型农用变速箱的种类、工作原理、特点及机型应用情况。

动力换挡控制策略是自动变速箱的核心技术之一，随着智能化控制技术的不断进步，动力换挡控制策略也将朝着智能化方向发展，以油门踏板开度、发动机转速和负载需求来确定最优挡位，以适应当前的作业状态[34-38]。同时，提高电液系统可靠性也是未来动力换挡智能控制的研究方向。

1.4　轮距可调式驱动桥

目前驱动桥分两大类：轮边行星减速结构的驱动桥，主要适用于平原、旱地等环境下的农机底盘；龙门式驱动桥，为非行星减速的双极减速车桥，主要适用于园艺、水田等工作环境下的农机底盘[39-40]。为了满足不同农作物种植行距的农艺要求，能够实现动力底盘轮距根据作物行距自适应调整，具有轮距可调功能的驱动车桥成为研究热点，轮距可调式驱动桥插入底盘横梁中，轮距调节油缸的活塞端通过油缸连接销铰接到底盘横梁上焊接的油缸固定耳，轮距调节油缸的活塞杆端通过螺栓连接到驱动桥横管底端的螺纹孔上，当调节油缸伸缩时，驱动桥横管就能在底盘横梁内滑动，从而实现底盘的轮距调节功能[41]。刘平义等[42]针对农用底盘轮距随农作物行距变化而适应性调整的技术需求，基于轮距调整联动转向原理，设计一种轮距可调式转向驱动桥，有效提高了农用底盘在田间作业的适应性。刘宏新等[43]以轻量化和高通过性为目标，设计了一种适用于水田自走式驱动底盘的铝制转向驱动桥。

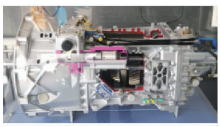
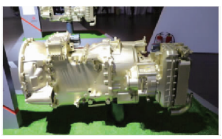
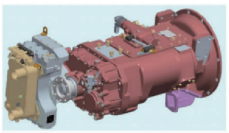
2　农业机械底盘行驶系统

2.1　底盘调平系统

调平系统主要应用于丘陵山区、果园等农业机械底盘，根据底盘的倾斜程度计算出调节量，并通过液压缸、悬架或轮距进行车身全向调平来适用作业

表 1 农业机械底盘用典型变速箱工作原理、特点及应用车型

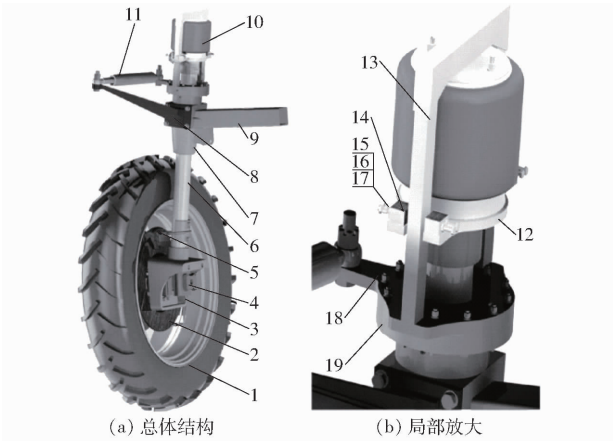
Tab. 1 Working principle, characteristics and application of gearbox for agricultural machinery chassis

变速箱类型	实物图	工作原理	特点及应用车型
手动变速箱		由输入轴、中间轴、输出轴、挡位啮合齿轮以及换挡拨叉、同步器等组成，通过手动换挡实现定传动比的动力传递	传动比调控范围有限，传输效率高、结构简单，制造成本低；东方红 LX754、雷沃 1004 系列拖拉机
动力换挡自动变速箱(PST)		由机械传动系统、液压控制系统和电子控制系统组成，通过电液压操纵机构实现换挡控制	传动效率高、传递扭矩大、制造成本高；东方红 LF2204、Eimco - 105 型、凯斯 600 系列拖拉机
液力机械式自动变速箱(AT)		由液力变矩器、辅助变速器与自动换挡控制系统组成，通过液体动量矩的变化改变转矩，对外部负载具有较好的自动调节能力	起步平稳、换挡品质高、低速时效率低；芬特 Farmer 611LSA 和 613LSA 型、凯斯 800 系列拖拉机
电控机械式自动变速箱(AMT)		在手动变速器基础上通过电子技术、计算机控制技术、传感器技术、信息处理技术等加装变速器控制单元，通过电控设备简化复杂的手工操作	结构简单、成本低、油耗低；换挡时有动力中断；克拉斯 ARES 系列拖拉机、纽荷兰 T2104/T1804 拖拉机
液压机械式无级自动变速箱(HMCVT)		通过液压传动与机械传动实现无级变速，自动适应负载的变化，满足大功率拖拉机的传动要求	无级变速、变速范围大、制造成本高；麦赛福格森 MF8700 系列拖拉机
静液压无级自动变速箱(HST)		通过液体介质的压力来进行动力的传递，由液压泵、液压马达组成闭式传动系统	无级变速、变速平稳；约翰迪尔 4000 系列大型自走式收获机、麦赛福格森“全收系列”T5 联合收获机、凯斯 A8000 甘蔗收获机

地形。国外农机底盘调平系统主要围绕降低重心、控制车体等方向发展[44-45]。美国约翰迪尔公司研发了适用于坡地作业的联合收获机调平系统，通过控制供油回路通断的方式，实现车体调平[46]。HOEHN 等[47]研究了一种应用于耕作机具的调平系统，可实时调节耕作机具与地面的高度，有利于保持恒定的土壤切削深度。国内主要围绕果园升降平台、农机具全向调平控制系统、丘陵山地拖拉机调平系统研究较多，齐文超等[48]提出基于平行四杆机构和双车架机构的车身横/纵向调平方案，设计了一种基于双闭环 PID 算法的全向调平丘陵山地拖拉机。金诚谦等[49]采用铰链五杆机构，结合电液控制技术，设计一种履带式联合收获机全向调平底盘及其电液控制系统，实现底盘横/纵向倾斜调整。

2.2 空气悬架

悬架按照弹性元件的类型可分为螺旋弹簧悬架、空气弹簧悬架和油气弹簧悬架。图 2 所示为独立式立轴空气弹簧悬架系统总成；目前，国外大部分喷雾机制造企业都提供带有四轮独立式空气悬架系统的高地隙植保机，如 John Deere、HAGIE、AGCO、AgriFac 等自走式喷雾机企业[50-51]。与国外相比，



(a) 总体结构 (b) 局部放大

图 2 独立式立轴空气悬架系统总成

Fig. 2 Independent strut type air suspension system

1. 车轮 2. 制动盘 3. 马达保护壳体 4. 行走液压马达 5. 制动钳 6. 立轴 7. 轮距滑柱支撑 8. 转向油缸支撑臂 9. 轮距调节滑柱 10. 空气弹簧 11. 转向油缸 12. 弹簧底部支撑 13. 弹簧导向架 14. 尼龙摩擦阻尼块 15、16、17. 高强螺栓组件 18. 转向臂 19. 定位环

国内现代农装公司的 ZWG - 3000A、五征集团的 ZWP4 - 2000 高地隙自走式喷雾机悬架系统都采用独立式空气弹簧，中小机型悬架系统均采用螺旋弹簧或未安装弹性元件。近年来，关于多气囊、复合材

料弹性元件研究受到较高的关注[52-53]。陈雨等[54]基于传统的空气悬架系统引入尼龙摩擦阻尼器，设计了一种适用于高地隙农机底盘的独立式立轴空气悬架系统；王云超等[55]提出了一种基于体积压缩率和体积压缩速率的真实气体多变指数模型，囊式蓄能器的气体多变指数模型为更加准确研究油气悬架系统真实特性奠定了基础。YIN 等[56]开展气-油乳状液的配方油对空气悬挂支柱的非线性刚度和阻尼特性的影响，得出了乳状液的体积模量和质量密度随气体体积分数的变化规律。因此，空气弹簧悬架具有非线性弹性特性好、悬架行程大、负载能力强、刚度和阻尼可调等特点，广泛应用超高地隙植保机底盘悬架系统。

2.3　农用子午线轮胎

农用轮胎是轮式移动底盘的核心部件之一，按照胎体结构可分为斜交线轮胎和子午线轮胎，图 3 所示为 3 种不同功用的农用轮胎。由于农用子午线轮胎具有出色的牵引力、自清洁能力、舒适性和路面操控灵活性等特点，成为农业装备轮胎的首选[57]。目前，世界农用轮胎子午化率已达 90% 左右，欧洲轮胎技术组织标准手册在 20 世纪 70 年代已制定出农业子午线轮胎系列和产品标准，而我国农用子午线轮胎仍处于逐步取代斜交线轮胎阶段，截止 2019 年农用轮胎子午化率仅 65% 左右。为突破制约我国农用子午线轮胎发展的技术瓶颈，应研发适用于水田高漂浮农用子午线轮胎和旱田垄沟农用子午线轮胎，改变国内生产农业子午线轮胎品种单一化的现状，国内玲珑轮胎、中策橡胶、三角轮胎、昌丰轮胎等企业也开始研发生产农用子午线轮胎[58-59]。2020 年中国国际农机展中，多款国产化农业子午线轮胎方案亮相，其中拖拉机 TM600、TM700、TM800 系列子午线轮胎单宽胎、喷药机 TM150 系列子午线轮胎、收获机 TM3000 系列子午线轮胎的成功应用，提升了终端用户的使用便利性和高效性，从而大幅促进农业耕作增产增收[60-61]。



(a) 斜交线轮胎　(b) 子午线轮胎　(c) 水田轮胎

图 3　不同功用的农用轮胎

Fig. 3　Three kinds of tires with different functions

2.4　农用履带

履带移动式底盘具有接地比压小、附着性能好、转弯半径小、越障能力强等优点，在坡地、粘重、潮湿地及沙土地使用时性能显著。按照履带结构形式可分为组合式履带底盘和整体式履带底盘。其中组合式履带多用于履带式农业机器人底盘，常见的可分为带履带臂和不带履带臂 2 种，带履带臂的又被称为履腿复合式机器人，整体式履带多用于大功率、重负荷、山区农业装备底盘，如履带自走式拖拉机、履带自走式果园采摘机、履带自走式行间喷雾机等[62-63]。根据履带材料不同分为金属履带底盘和橡胶履带底盘，橡胶履带接地比压低，对土壤破坏程度轻，尤其适于低湿地、沙壤土质区作业。表 2 为不同结构形式的履带底盘结构特点及应用情况。

表 2　农用履带分类

Tab. 2　Classification of agricultural crawler

分类	形式	特点及应用
结构	组合式	节距小，绕转性好，寿命长，强度高，结构简单，价格便宜，应用于履腿复合式机器人
	整体式	履带基板作为承重轮，结构复杂、越障性能和越障稳定性高，但磨损快，应用于农业履带机器人
材料	金属	常用于下陷量不大的坚硬路面，如碎石、山地路面，应用于大功率拖拉机、收获机
	橡胶	常用于下陷量较大的路面，如水田、雪地等，应用于水田机械

2.5　悬浮式转向车桥

悬浮式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，其主要通过悬浮机构的液压油缸伸缩动作来缓和凹凸不平地面引起的冲击载荷对底盘的冲击，衰减由于路况与行驶速度相互作用而产生的低频振动，从而达到底盘的缓冲、减振的效果。图 4 为电控悬浮式转向车桥结构。目前，国外大功率轮式拖拉机底盘行驶系统均装配悬浮式弹性前桥，约翰迪尔的 6210R 型拖拉机采用该类型前桥，提升农用动力底盘前轮与地面的接触效率，增加整机的行驶速度和稳定性[64-65]。而国内由于核心关键零部件研发能力不足，动力底盘前桥系统仍多数采用刚性前桥系统，拖拉机前桥系统仍多数采用刚性前桥系统，由于缺乏衰减振动的有效部件，很大程度上制约着拖拉机舒适性的提升，已难以适应高端农机的发展需求[66-68]。国内学者对前桥悬架系统及关键技术的研究仍处于起步阶段，且主要集中在悬架特性分析等方面。其中，中国农业大学毛恩荣团队率先开展大功率拖拉机电控悬浮式前桥悬架系统振动控制研究，并设计了一种基于插装式比例阀液压系统回路的悬架参数调节系统，可实现多种模式的前桥悬架阻尼调节[69]。

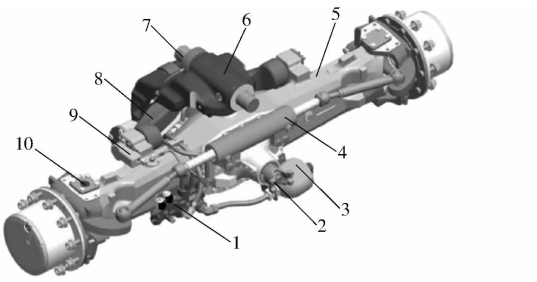


图 4 电控悬浮转向车桥结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of electronically controlled suspension steering axle

1. 悬浮控制系统液压单元 2. 动力输出轴 3. 悬浮控制系统储能器 4. 转向油缸 5. 前桥体 6. 悬浮挂耳 7. 悬浮耳轴 8. 摆臂支撑 9. 悬浮高度传感器 10. 转向角度传感器

3 农业机械底盘转向系统

转向系统的功用是利用外部驱动力矩操纵转向机构使得农机底盘按照既定的路径方向行驶。随着农业装备的智能化、高效化发展,农机行驶和作业过程中对于转向系统的要求也越来越高,农业机械转向系统类型有:机械式转向、液压助力转向、电动助力转向、电控液压助力转向以及线控转向[70-71]。

3.1 液压助力转向

液压助力转向(Hydraulic power steering, HPS)具有输出力矩大、转向稳定性高、使用灵活和故障率低等优点,是目前农用高地隙底盘中主流的助力转向技术,主要包括机械助力式液压助力和全液压助力两种类型。其中齿轮齿条式和循环球式转向器为传统液压助力系统的重要组成部件[72-73]。国外 19 世纪初期开始研发液压驱动转向系统,Case Crop 公司生产的 Patriot 4430 型喷雾机首次采用四轮液压助力转向。陈黎卿等[74]为了实现无人操作的辅助驾驶系统,在原有的高地隙植保机液压助力转向系统基础上并联一套转向液压系统,辅助驾驶状态时,液压油在优先阀的作用下经比例换向阀到达转向油缸,工作时利用驱动控制器控制比例阀芯移动,实现对液压油流量、方向的精确控制,完成辅助驾驶工况下的自动转向。扈凯等[75]研制了一种适用于高地隙喷雾机的多模式液压转向系统,并采用 PID 控制算法和压力补偿系统确保变载荷下转向系统控制精度和底盘稳定性。

3.2 电动助力转向

电动助力转向(Electric power-assisted steering, EPS)是一种利用电动机提供驱动扭矩的动力转向系统,如图 5 所示,其系统主要由扭矩传感器、转角传感器、车速传感器、电动机、减速机构和电子控制单元等组成[76-77]。其中助力电机及其控制策略是 EPS 系统中关键技术之一。根据助力电机安装位置不同分成 4 种类型:转向轴助力式、小齿轮助力式、齿条助力式、双齿轮结构式。约翰迪尔、拓普康、联适和华测等企业对电机控制转向系统进行了改进和优化,推出了安装在方向盘上或直接取代原方向盘的电机,其传动机构紧凑,安装简单,具有手动自动切换功能,适合对农业机械转向机构进行自动控制改造[78-80]。何杰等[81]研制了一种适用于深泥脚水田环境的水稻插秧机电动方向盘,并设计了基于 PID 嵌套的转向控制算法,在泥底层平坦和不平坦的水田中直线行驶时转向角跟踪平均绝对误差分别为 0.354°和 0.663°。沈跃等[82]设计了一种四轮独立驱动电驱动自转向电动高地隙底盘,通过控制转向桥与车架夹角便可以达到控制喷雾机转向的目的。

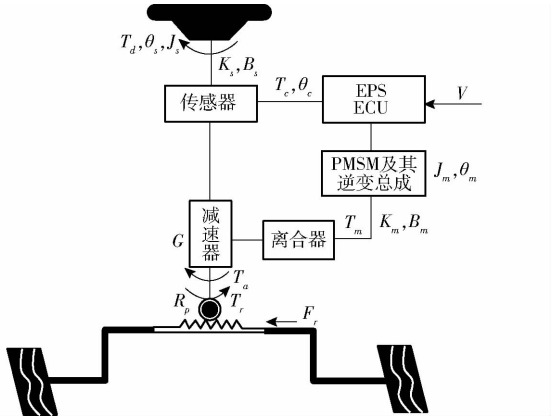


图 5 EPS 系统原理图

Fig. 5 Schematic of electric power-assisted steering

3.3 电控液压助力转向

电控液压助力转向(EHPS)是在传统的液压助力转向系统的基础上增加电子控制系统,对系统的流量和转阀等相关参数进行调节,从而改变转向系统的助力特性,降低损耗,灵敏度增加,稳定性提高。按照液压助力转向阀体特性参数,控制类型分为电磁节流阀流量调节式、转向阀扭转刚度调节式、转向阀阀口参数调节式。主要采用在常流量系统的高压油路和低压回路之间加上一个旁通电磁阀,电控单元控制电磁阀的可变阀口大小,实现转向阀的流量调节[83-84];张闻宇等[85-86]设计了一种摩擦轮式电控液压助力转向装置,通过摩擦轮驱动拖拉机方向盘从而带动全液压助力阀转动,实现驱动拖拉机前轮转向;施国标等[87]基于无人驾驶模式设计了融合液压助力转向和电动助力转向的电液复合转向系统,并提出一种自适应双闭环转向跟踪控制策略,有效降低转向角度跟踪误差,具有随速助力、主动回力等优点;杨洋等[88]设计了基于直流电机与全液压助力器直联的自动转向机构及其电控系统。通过在转

向驱动电机输出轴安装电磁离合器和转向柱扭矩传感器实现人工驾驶模式和自动驾驶模式的自动切换，图 6 所示为电控液压助力转向系统结构。

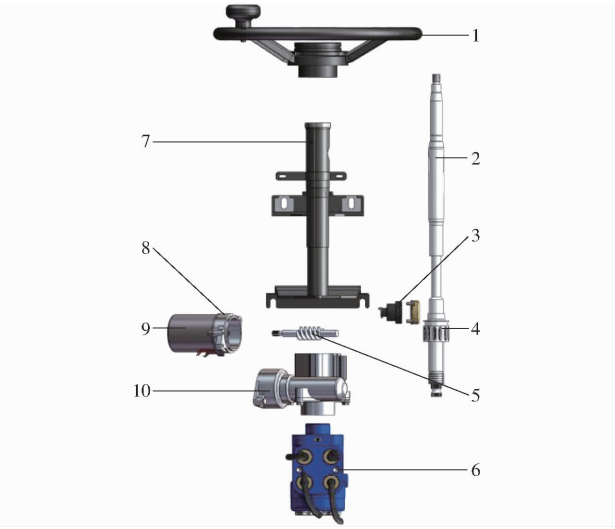


图 6　电控液压助力转向系统结构示意图

Fig. 6　Schematic of electric hydraulic power steering system

1. 方向盘　2. 转向柱　3. 扭矩传感器　4. 涡轮　5. 蜗杆　6. 全液压转向器　7. 转向柱外壳　8. 电磁离合器　9. 转向驱动电机　10. 传动齿轮外壳

3.4　线控转向

线控转向系统（Steer-by-wire，SBW）取消了传统转向系统中转向盘到转向执行器间的机械连接，实现底盘轻量化；SBW 系统由路感反馈总成、转向执行总成、控制器以及相关传感器组成[89-91]。图 7 为线控转向系统原理图，路感反馈总成主要包括转向盘、路感电机、减速器和扭矩转角传感器等。其中路感反馈控制策略是 SBW 系统中的核心技术，根据驾驶意图、车辆状况与路况等参数，通过 CAN 总线连接至 ECU 并实时输出路感反馈力矩指令，实现农机装备转向的完全自动化[92-96]。随着定位导航、无人驾驶、无人作业等技术的发展，SBW 系统逐渐成为农业机械主流转向系统。刘军等[97]设计一种基于 GPS/INS 数据融合的线控转向农业机械自动导航系统，上位机将位置、速度、姿态等信息利用 CAN 总线发送给主控制器，并根据相应的路径跟踪控制策略计算出目标前轮转角，控制转向执行电机驱动至目标转角。鲁植雄团队[98-99]设计一种拖拉机线控液压转向系统，并开展转向系统的静态随机转动试验、蛇形试验、双纽线试验、稳态回转试验以及转向瞬态响应试验，结果表明线控转向系统综合了液压和线控技术的优点，在保证大扭矩输出的同时，又具有转向灵敏、便于安装等特点。

4　农业机械底盘制动系统

主动制动系统有效减少了驾驶员制动过程中的经验性操作，实现制动精确化、智能化控制。高端农业机械底盘集成电控制动防抱死系统（Anti-lock braking system，ABS），在此基础上，驱动防滑控制系统（Acceleration slip regulation，ASR）、电子稳定系统（Electronic stability program，ESP）的发展极大提高了农用车辆、拖拉机等的行驶安全性。目前，防滑和防侧翻成为农业机械底盘制动系统研究的热点。

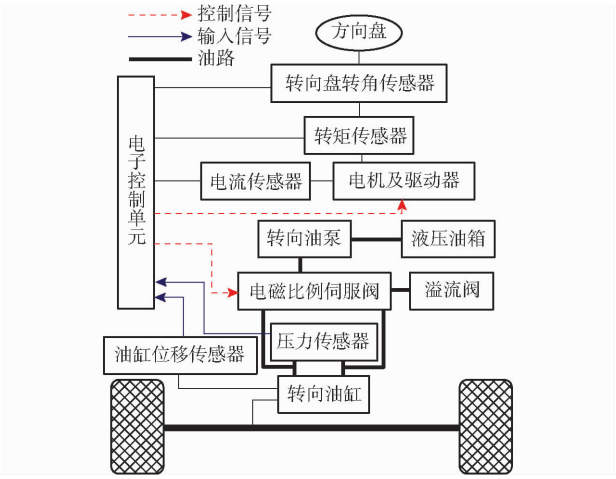


图 7　线控液压转向系统总体结构图

Fig. 7　Schematic of power by wire system

4.1　制动防滑技术

防滑控制系统主要包括制动防滑系统、驱动防滑系统两种。其中制动防滑系统（ABS）是防止拖拉机等农业机械在制动过程中车轮被抱死滑移，使得制动力达到最大，缩短制动距离，并且能够提高制动过程中的底盘方向稳定性和转向操纵能力；为防止拖拉机在起步、转向、加速等驱动过程中车轮发生滑转，部分学者将智能传感控制理论引入到 ABS、ASR 研究领域[100-102]。冯彦彪等[103]依据整机实际参数构建最优滑转率的控制模型，基于模糊 PID 控制器作为滑转率的控制器，实时监测滑转率的误差以及误差变化率来决定输出转矩大小，能够满足农机底盘在复杂路面上的控制需要。毛罕平团队[104-105]设计一种四轮液压驱动高地隙底盘转向防滑控制系统，并提出了基于转速比差值的 PID 控制策略，系统调控平均误差为 1.25%，满足转速比差值为 0.01 ~ 0.05 的控制要求，能够有效消除高地隙喷雾机转向时打滑现象；陈黎卿等[106]提出了一种基于改进人群搜索算法 PSO 的拖拉机驱动防滑控制策略，实时更新目标滑转率，实现自适应调整 PID 控制参数；周倩倩等[107]设计了全时四驱液压驱动喷雾机模糊防滑控制系统，机具在高速行驶时，未开启防滑控制时相对滑转率均值为 0.110，开启后相对滑转率均值为 0.035。

4.2 防侧翻技术

由于拖拉机、高地隙植保机等机体重心位置动态变化范围较大,易发生侧翻现象[108-109]。近年来学者围绕农机底盘侧翻机理、倾翻保护装置的自动部署及智能化设计开展研究。国内外关于侧翻机理的研究主要集中在拖拉机动力学行为特征描述与稳定性评价等方面,由于模型约束条件较多,很难反映整机系统的全时动力学行为;将虚拟仿真技术与实验等手段相结合,通过改进的横向载荷转移率、侧翻预测时间、静态稳定系数等方法评价拖拉机侧向稳定性[110-111];部分学者基于拖拉机前轮转角、轮胎与地面的接触状态等来研究不同阶段的拖拉机侧翻特性,为侧翻预警提供研究基础,提高拖拉机的驾驶安全性[112-113]。金智林等[113]分析驾驶员因素影响汽车侧翻稳定性的机理,提出的融合驾驶员的人-车闭环系统差动制动防侧翻控制策略,既可弥补驾驶经验不足又可克服驾驶员生理及心理的限制,有效提高汽车防侧翻能力。秦嘉浩等[114-115]以反作用动量飞轮为执行元件,提出了将动量飞轮置于拖拉机前部,取代传统静态配重的同时可主动提供防侧翻力矩。装备飞轮的拖拉机与无控制组对比可多次实现整机的防侧翻控制,使整机防侧翻性能得到明显改善。张硕等[116]将前后轮轮胎类型、前配重质量、前后轮距和机具位置 6 个影响因素作为控制因子,分析拖拉机斜坡直线行驶工况下侧向稳定性贡献度,结果表明:对拖拉机斜坡上侧前、后轮侧向稳定性影响最大的控制因子为前配重质量和后轮距。

5 农业机械底盘遥控技术

5.1 线控底盘

线控底盘系统是农机装备智能驾驶的核心技术之一,满足遥控驾驶、自动驾驶的线控底盘控制器 ECU 作为智能农机装备的核心主控制单元,如图 8 所示,通过 CAN 总线等方式与线控点火、线控油门、线控离合器、线控转向、线控制动、线控换挡、线控空气悬架等系统进行信息交互,通过对接收到的信息处理,判断各个子控制单元和整机系统的行驶状态,做出安全、合理的指令,从而使各个子控制单元协调、安全的工作,实现底盘遥控、自动驾驶的功能。目前,从执行端来看,线控油门、线控转向、线控制动等技术在农机机械底盘上的应用相对成熟[117],实现底盘线控换挡的一个技术瓶颈是无级变速和动力换挡,德国采埃孚(ZF)公司、意大利卡拉罗(Carraro)等企业比较成熟的农机用动力换挡技术及产品;目前国内有中国一拖集团、福田雷沃重工、五征集团等主机企业和配套企业研究动力换挡技术。底盘线控技术的发展大大降低了驾驶员对移动底盘的操作参与度,是未来农机装备实现辅助驾驶、遥控驾驶及无人驾驶的基础。

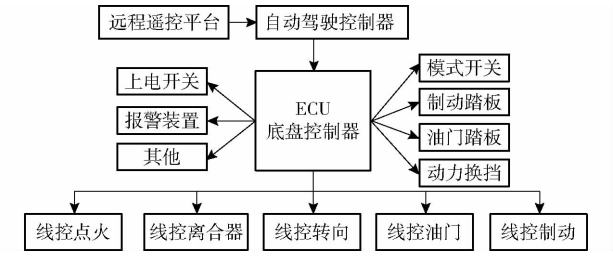


图 8 线控底盘系统架构

Fig. 8 Schematic of chassis system by wire

5.2 底盘遥控技术

底盘遥控技术指驾驶员利用遥控云端对移动底盘发送转向、加速、制动以及具体底盘安装附件的喷药、采摘、升降等指令信号,实现农机装备云端遥控作业、智慧管理等功能;从传播指令信号的载体大体可分为红外线遥控、超声波遥控和无线电遥控。受农田作物遮挡的影响,无线电遥控技术具有无方向性、穿透力强、遥控距离远等优势,成为农业机械底盘云端管理中传递信号的首选;国内外开展大量农机装备遥控技术应用研究,主要采用的无线通信模块有 WiFi、LoRa 网关、大功率网桥等[118-119];基于线控底盘的基础,主操纵端控制平台根据人机交互界面观察到的位于底盘上安装的摄像头实时回传的田间环境及整机位姿信息,输入方向盘转角、踏板位移等指令到上位机,远端车载控制单元通过无线网络通信系统获取指令并控制底盘实现远程驾驶,同时不断检测各传感器的信号以继续调整各机构转角或位移。

6 展望

随着 5G 移动互联网、大数据、云计算、人工智能等高端技术与现代制造业相结合,未来所预期的智能底盘的目标设置是以优化农业装备底盘可靠性、舒适性、安全性以及通用底盘平台设计为研究重点,农机底盘作为智能农机装备和农业生产信息化网络的一个重要“桥梁”,未来应从以下几方面取得发展:

(1)加强基础理论研究和关键零部件性能优化

国内虽然在农业机械底盘技术与系统组成部件研发方面展开了相关研究,但是基础理论研究方面有待于进一步突破完善,以大功率拖拉机底盘动力换挡控制规律为例,应突破机械、电控、液压等基础研究,提升关键零部件制造工艺;以水田深泥脚插秧机底盘打滑工况为例,需要探究底盘轮胎-泥壤打滑互作机理,轮胎打滑状态参数识别与前后扭矩分配

控制策略等系统理论。农机底盘基本都在潮湿环境下服役，常常与土壤、秸秆、雨水等接触，锈蚀破损严重，现有的农机底盘传统系统部件（离合器、变速器、驱动桥等）的密封性差易产生零件腐蚀，因此，研制耐磨防腐密封基础零件是保证底盘关键部件具备较佳性能的基础。同时，底盘用关键零部件的标准化、系列化、通用化程度相对降低，零部件的适应性有待提高。因此，针对不同区域土壤特性、作业环节、适应工况及技术需求的差异，进行同类底盘零部件归并、参数分挡，构建底盘通用件库、标准件库、系统模块库，为实现农机装备底盘智能化设计提供支撑。

（2）底盘平台化与轻量化设计

通用底盘平台化设计是未来农机装备发展的要求及趋势，根据适用水田、旱地、山区、果园、茶园、设施大棚等作业环境差异，实施通用底盘模块化设计策略，将含子系统数量相同、作业环节类同的农机装备底盘平台化，开发同功率级别的通用移动式动力底盘，通过更换轮胎和履带、调整轴距、更换系统部件以及在底盘上安装功能性附件等形式，实现通用底盘差异化功用；进一步加强探究影响覆盖底盘产品范围的关键因素和影响结构性能的关键参数之间的关联关系，实现不同种类底盘和不同规格的同类底盘的通用化设计；通过选用轻质材料、优化结构设计和选择先进制造工艺等来降低油耗、增加续航里程，实现底盘轻量化设计。其中，高强度钢、铝合金和碳纤维复合材料等制造底盘传动系统的变速箱、驱动桥壳体，悬架系统的控制臂、横向稳定杆、副车架铸铝等复合材料的使用将成为研究重点；随着无人作业模式的推广应用，转向系统选用电动助力转向及线控转向有助于实现底盘轻量化，转向器支架管柱、转向电机壳体等部分使用铝合金材料以期达到减重效果；制动系统集成化、行驶系统中铝合金铸旋、镁合金锻造车轮等是轻量化的方向。此外在新能源农机装备上，底盘减重可以增加续航里程，因此简化传统系统结构，发展直联式电驱动车桥、轮毂电机驱动的新能源底盘技术是未来轻量化发展方向。

（3）底盘智能化控制与信息化管理

随着定位导航、辅助驾驶、无人驾驶等技术在农业装备生产中应用范围的不断扩大和全球智慧农业系统的发展，农机装备底盘的信息化与智能化将得到更大幅度的提升，以智能化控制技术为核心，突破底盘各子系统作业状态参数和作业环境感知传感器的研究与开发，建立机内机外多参数融合的智能调控策略决策，实现底盘精准、高效、稳定行驶；结合智能感知、智能决策、智能驱动、智能管控等技术，底盘无人化、多机协同化作业将成为未来智能驱动底盘技术发展的新亮点和新方向。

底盘信息化管理是农机高效作业基础，不仅仅是农机作业效率的提升，更是指整个农业生产系统的高效运行。底盘作为未来智能农机装备的“双腿”，是整个农业物联网系统中的一个生产执行单元，一方面，与生产者、企业或相关服务机构相联通，可实现对农机装备群体作业状态的实时监控，一旦底盘各子系统发生异常，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、分析后，分类入库，对农机装备底盘的维护、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，移动式智能农机装备与目标用户保持联网通讯，可随时响应用户的使用要求，按需分配机具类型、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高效。

参　考　文　献

[1] 陈黎卿，王韦韦，杨洋，等. 小麦秸秆还田下机械智能装备设计方法[M]. 北京：北京理工大学出版社，2020.

[2] 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)

[3] 谢斌，武仲斌，毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(8)：1－17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1－17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)

[4] 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.
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. 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. (in Chinese)

[5] CHEN L Q, MA P P, TIAN J L, et al. Prediction and optimization of lubrication performance for a transfer case based on computational fluid dynamics[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2019, 13(1): 1013－1023.

[6] WANG Y M, WANG Q D, CHEN L Q, et al. Research on transfer case transmission power of heat load characteristics[J]. Int. J. Vehicle Design, 2019,79(1):84 - 105.

[7] 陈黎卿, 谭雨点, 吴荣, 等. 基于遗传算法的电动四驱汽车轴间扭矩分配控制策略[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):361 - 367.
CHEN Liqing, TAN Yudian, WU Rong, et al. Torque distribution control strategy of electronically controlled four-wheel drive axle based on genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):361 - 367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170746&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.046. (in Chinese)

[8] 张京,陈度,王书茂,等.农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(18):63 - 70.
ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Design and experiment of four wheel independent steering control system of agricultural wheeled robot[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(18):63 - 70. (in Chinese)

[9] QUAN Qiu, ZHENG Qiang, FAN Zhijun, et al. Extended ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2018,152(8):40 - 50.

[10] 李勇, 贾艳玲, 孙盼盼, 等. 四轮驱动拖拉机牵引效率问题的探讨[J]. 拖拉机与农用运输车,2014,41(2):1 - 4.
LI Yong, JIA Yanling, SUN Panpan, et al. Discussion on traction efficiency of four wheel drive tractor[J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle, 2014,41(2): 1 - 4. (in Chinese)

[11] HAS Z, RAHMAT M F, HUSAIN A R. Robust position tracking control of an electro-hydraulic actuator in the presence of friction and internal leakage[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014,39:2965 - 2978.

[12] 张立彬. 静液压驱动系统在农业机械领域的应用[J]. 液压气动与密封, 2014(10):78 - 80.
ZHANG Libin. Application of hydrostatic drive system in agricultural machinery field [J]. Hydraulic Pneumatic and Sealing, 2014(10): 78 - 80. (in Chinese)

[13] 张华,郑加强.4WD 型农药喷雾机液压四驱底盘直行同步控制方法比较及验证[J].农业工程学报,2016,32(23):43 - 50.
ZHANG Hua, ZHENG Jiaqiang. Comparison of straight line driving synchronous control methods and validation of 4WD sprayer chassis with hydraulic power[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(23):43 - 50. (in Chinese)

[14] WANG Guangming,SONG Yue, WANG Jiabo. Shift quality of tractors fitted with hydrostatic power split CVT during starting [J]. Biosystems Engineering,2020,196:183 - 201.

[15] 秦剑秋. 静液压传动技术(HST)在拖拉机上的应用[J]. 拖拉机与农用运输车,2006,33(2):34 - 36.
QIN Jianqiu. Application of hydrostatic transmission technology (HST) in tractors[J]. Tractors and Agricultural Transport Vehicles,2006,33(2): 34 - 36. (in Chinese)

[16] 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. Observation on the development of agricultural tractor technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):42 - 48. (in Chinese)

[17] VBAKER A L, GUZZOM I. A model and comparison of 4-wheel-drive fixed-chassis tractor rollover during phase I[J]. Biosystems Engineering,2013,116(2):179 - 189.

[18] YUKO U, JUN Y, KAZUNOBU S, et al. Study on the development of the electric tractor: specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor[J]. Engineering in Agriculture,Environment and Food,2013,6(4):160 - 164.

[19] 李同辉,谢斌,宋正河,等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(6):379 - 388.
LI Tonghui,XIE Bin,SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):379 - 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190645&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.045. (in Chinese)

[20] 刘路,杨路,高观光,等. 小型烟草植保机移动平台结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):156 - 162.
LIU Lu,YANG Lu,GAO Guanguang,et al. Structural design and test of wheeled tobacco plant protection mobile platform[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):156 - 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190417&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.017. (in Chinese)

[21] DEVENDRA S. The farm tractor and the nature of technological innovation[J]. Research Policy,1981,10(4):368 - 402.

[22] KIMY J, CHUNGS O, CHOIC H. Development of automation technology for manual transmission of a 50 HP autonomous tractor [J]. IFAC-PapersOnLine,2018,51(17):20 - 22.

[23] 廖湘平,龚国芳,王鹤,等. 双活塞液粘调速离合器动态特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(7):1 - 6.
LIAO Xiangping,GONG Guofang,WANG He, et al. Dynamic performance of hydro-viscous drive clutch with double-piston[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(7):1 - 6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.001. (in Chinese)

[24] 傅生辉,顾进恒,李臻,等. 基于 MFAPC 的动力换挡变速箱湿式离合器压力控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(12):367 - 376.
FU Shenghui,GU Jinheng,LI Zhen, et al. Pressure control method of wet clutch for PST of high-power tractor based on MFAPC algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):367 - 376. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201240&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.040. (in Chinese)

[25] BRENNINGER M M. FendtVario CVT in agricultural tractors[C]// SAE 2007 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition. SAE International in United States,2007:2007-01-4205.

[26] IQBAL S, AL-BENDER F, OMPUSUNGGU A P, et al. Modeling and analysis of wet friction clutch engagement dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015,60: 420-436.

[27] DREW J S. Integration control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2001,30:167-191.

[28] RAIKWAR S, TEWARI V K, MUKHOPADHYAY S, et al. Simulation of components of a power shuttle transmission system for an agricultural tractor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015,114:114-124.

[29] MENG F, SHI P, KARIMI H R, et al. Optimal design of an electro-hydraulic valve for heavy-duty vehicle clutch actuator with certain constraints[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2016, 68-69: 491-503.

[30] SONG X, SUN Z. Pressure-based clutch control for automotive transmissions using a sliding-mode controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(3):534-546.

[31] 余天明,郑磊,李颂. 电控机械式自动变速器离合器灰色预测 PID 控制技术[J]. 农业机械学报,2011,42(8):1-6.
YU Tianming, ZHENG Lei, LI Song. Gray prediction PID control technology of automated mechanical transmission clutch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):1-6. (in Chinese)

[32] 尹永芳, 鲁力群, 赵静, 等. 拖拉机全动力换挡自动变速器技术应用现状与展望[J]. 拖拉机与农用运输车,2019,46(2):1-5.
YIN Yongfang, LU Liqun, ZHAO Jing, et al. Application status and prospect of tractor full power shift automatic transmission technology[J]. Tractor and Agricultural Transport Vehicle, 2019,46(2): 1-5. (in Chinese)

[33] OUYANG T, LI S, HUANG G, et al. Mathematical modeling and performance prediction of a clutch actuator for heavy-duty automatic transmission vehicles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 136:190-205.

[34] 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.
XI Zhiqiang,ZHUO 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161147&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.047. (in Chinese)

[35] 王光明,张晓辉,朱思洪,等. 拖拉机液压功率分流无级变速器换段规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):7-15.
WANG Guangming, ZHANG Xiaohui, ZHU Sihong, et al. Shift performance of tractor hydraulic power-split continuously variable transmission[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(10):7-15. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20151002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.002. (in Chinese)

[36] 刘玺,何仁,程秀生. 双离合自动变速器预选挡特性分析及控制策略[J]. 农业工程学报,2018,34(3):80-87.
LIU Xi,HE Ren,CHENG Xiusheng. Gear preselector characteristics and control strategy of dual clutch transmission[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):80-87. (in Chinese)

[37] MENG F, CHEN H, ZHANG T, et al. Clutch fill control of an automatic transmission for heavy-duty vehicle applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64-65:16-28.

[38] 严忆泉, 宋健, 李亮. 干式双离合自动变速器分段优化换挡策略研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):30-36.
YAN Yiquan, SONG Jian, LI Liang. Multi-section optimization shift control method of dry dual clutch transmission[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 30-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.005. (in Chinese)

[39] LITTLE J P, ADAM C J. Geometric sensitivity of patient-specific finite element models of the spine to variability in user-selected anatomical landmarks[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18(6): 676-688.

[40] 赵雪彦,张青岳,温昌凯,等. 基于田间实测载荷的拖拉机转向驱动桥壳疲劳寿命分析[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):373-381.
ZHAO Xueyan,ZHANG Qingyue,WEN Changkai, et al. Fatigue life analysis of tractor steering drive axle housing based on field measured loads[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):373-381. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210342&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.042. (in Chinese)

[41] CWA B, BXA B, ZSA B, et al. Methodology for designing tractor accelerated structure tests for an indoor drum-type test bench [J]. Biosystems Engineering, 2021, 205(4): 1-26.

[42] 刘平义,王振杰,李海涛,等. 农用底盘轮距可调式转向机构[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):44-48,120.
LIU Pingyi,WANG Zhenjie,LI Haitao, et al. Design of steering mechanism with adjustable wheel track[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):44-48,120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.007. (in Chinese)

[43] 刘宏新,郑利双,徐高伟,等. 标准四驱水田自走底盘转向驱动桥设计与工程结构分析[J]. 农业工程学报,2015,31(8):54-60.
LIU Hongxin,ZHENG Lishuang,XU Gaowei,et al. Design and engineering structure analysis on paddy-field chassis steering drive axle with standard all-wheel-drive[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):54-60. (in Chinese)

[44] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Parameter sensitivity for tractor lateral stability against phase I overturn on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2016,150:10 - 23.
[45] MASHADI B, NASROLAHI H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes[J]. Journal of Terramechanics, 2016,46(6):299 - 311.
[46] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances: modle development [J]. Journal of Terramechanics, 2011,48(5):339 - 346.
[47] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system: US4809786[P]. 1989 - 03 - 07.
[48] 齐文超,李彦明,陶建峰,等.丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):381 - 388.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):381 - 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190742&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)
[49] 金诚谦,杨腾祥,刘岗微,等.履带式联合收获机全向调平底盘设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(11):393 - 402.
JIN Chengqian, YANG Tengxiang, LIU Gangwei, et al. Design and test of posture controlled chassis for caterpillar combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 393 - 402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201143&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.043. (in Chinese)
[50] 陈雨. 高地隙喷雾机独立式立轴空气悬架设计方法与特性研究[D].北京:中国农业大学, 2017.
CHEN Yu. Design method and characteristics of independent vertical shaft air suspension for highland gap sprayer [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[51] ESKANDARYP K, KHAJEPOUR A, WONG A, et al. Analysis and optimization of air suspension system with independent height and stiffness tuning[J]. International Journal of Automotive Technology,2016,17(5):807 - 816.
[52] CHEN Y, ZHANG S, MAO E R, et al. Height stability control of a large sprayer body based on air suspension using the sliding mode approach[J]. Information Processing in Agriculture,2020,7(1):20 - 29.
[53] 武秀恒,秦嘉浩,杜岳峰,等.高地隙喷雾机主动空气悬架减振控制与实验[J/OL].农业机械学报,2018,49(6):60 - 67.
WU Xiuheng, QIN Jiahao, DU Yuefeng, et al. Experiments of vibration control for active pneumatic suspension system in high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):60 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180607&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.007. (in Chinese)
[54] 陈雨, 陈随英, 杜岳峰, 等. 基于摩擦阻尼的高地隙农机底盘悬架减振特性[J].农业工程学报,2016,32(7):51 - 57.
CHEN Yu, CHEN Suiying, DU Yuefeng, et al. Damping characteristics of chassis suspension system of high clearance agricultural machinery based on friction damper[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 51 - 57. (in Chinese)
[55] 王云超,魏彬,杨岳霖.油气悬架囊式蓄能器真实气体多变指数模型建立及验证[J].农业工程学报,2019,35(20):10 - 16.
WANG Yunchao, WEI Bin, YANG Yuelin. Establishment and verificaiton of real gas multivariate idex model for hydro-pneumatic suspension system[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20):10 - 16. (in Chinese)
[56] YIN Y, RAKHEJA S, YANG J, et al. Characterization of a hydro-pneumatic suspension strut with gas - oil emulsion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2018,106:319 - 333.
[57] 刘婷韬, 徐岚俊, 李小龙, 等.超低压子午线农用轮胎试验应用与推广前景[J].农业工程,2016,6(增刊2):39 - 41.
LIU Xingtao, XU Lanjun, LI Xiaolong, et al. Test application and promotion prospects of ultra-low pressure radial agricultural tire[J]. Agricultural Engineering, 2016,6(Supp.2):39 - 41. (in Chinese)
[58] 桂飏芳.农业子午线轮胎市场概况和技术发展特点[J].中国橡胶,2014,30(3):17 - 18.
GUI Yangfang. Market overview and technical development characteristics of agricultural radial tire[J]. China Rubber,2014,30(3): 17 - 18. (in Chinese)
[59] GROTT M, BIRAL F, SORNIOTTI A. Vehicle simulation for the development of an active suspension system for an agricultural tractor[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2010, 2(1):12 - 25.
[60] ARVIDSSON J, WESTLIN H, KELLER T, et al. Rubber track systems for conventional tractors—effects on soil compaction and traction[J]. Soil and Tillage Research,2011,117: 103 - 109.
[61] HAFIZ MD-TAHIR, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors-optimising traction performance and wheel-soil interaction in field operations[J]. Biosystems Engineering,2019,188: 14 - 23.
[62] ZHU A B, WANG B K, TIAN C, et al. Dynamics modeling method and performance simulation for maneuvering system of tracked vehicle[J]. Journal of Machine Design National,2012,29(9):57 - 60.
[63] CHEN L Q, WANG P P, ZHANG P, et al. Performance analysis and test of a maize inter-row self-propelled thermal fogger chassis[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018,11(5):100 - 107.
[64] 马然, 朱思洪, CUONG D M. 拖拉机前桥半主动悬架特性参数匹配与控制[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12):6 - 10.
MA Ran, ZHU Sihong, CUONG D M. Parameters matching and control of tractor front axle semi-active suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 6 - 10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131202&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.002. (in Chinese)
[65] 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 and Farm Transporter,

2011,38(2):13 – 16. (in Chinese)
[66] MATTETTI M, DAVOLI S, MARALDI M, et al. Experimental characterisation of front axle suspension systems for narrow-track tractors[J]. Biosystems Engineering, 2019,185:45 – 55.
[67] CUONG D M, ZHU Sihong, ZHU Yue. Effects of tyre inflation pressure and forward speed on vibration of an unsuspended tractor[J]. Journal of Terramechanics, 2013,50(3):185 – 198.
[68] GOBBI M, MASTINU G, PREVIATI G. Farm tractors with suspended front axle: anti-dive and anti-lift characteristics[J]. Journal of Terramechanics, 2014,56(3):157 – 172.
[69] 顾进恒,傅生辉,刘长卿,等. 大功率拖拉机悬浮式前桥悬架插装式比例阀建模与设计[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):542 – 549.
GU Jinheng,FU Shenghui,LIU Changqing,et al. Modeling and design of cartridge proportional valve of front axle suspension for high-power wheeled tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):542 – 549. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2020s164&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.064. (in Chinese)
[70] HAN X Z, KIM H J, KIM J Y, et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112:161 – 171.
[71] DAVOOD K, DANNY M. Torque feedback on the steering wheel of agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65: 77 – 84.
[72] GONG Youping, BIAN Xiangjuan, CHEN Guojian. Multi-functional loader steering hydraulic system model construction and simulation based on power bond graphs[J]. Procedia Engineering, 2011, 15:358 – 364.
[73] ZAKARIA M, ZAMZURI H, MAZLAN S, et al. Vehicle path tracking using future prediction steering control[J]. Procedia Engineering,2012,41:473 – 479.
[74] 陈黎卿,许鸣,柏仁贵,等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):25 – 32.
CHEN Liqing,XU Ming,BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(9):25 – 32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)
[75] 扈凯,张文毅. 高地隙自走式喷雾机多模式液压转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(9):366 – 373.
HU Kai, ZHANG Wenyi. Design and experiment of multi-mode hydraulic steering system of high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):366 – 373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200942&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.042. (in Chinese)
[76] BESSELINK C. Computer controlled steering system for vehicles having two independently driven wheels[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2003,39(3):209 – 226.
[77] ADAM J, PIOTR M, SEWERYN L, et al. Precision of tractor operations with soil cultivation implements using manual and automatic steering modes[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145:22 – 28.
[78] 郑太雄,周花,古宏鸣. 无传感器式交流电动助力转向系统直接转矩控制[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):7 – 12.
ZHENG Taixiong,ZHOU Hua,GU Hongming. Direct torque control of sensorless AC electric power steering system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(3):7 – 12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140302&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.002. (in Chinese)
[79] BALACHANDRAN A, GERDES J. Designing steering feel for steer-by-wire vehicles using objective measures[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(1): 373 – 383.
[80] MAROUF A, DJEMAI M, SENTOUH C, et al. Sensorless control of electoric power assisted steering system[C]//2012 the 20th Mediterranean Conference on Control & Automation, 2012:909 – 914.
[81] 何杰,朱金光,罗锡文,等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报,2019,35(6):10 – 17.
HE Jie,ZHU Jinguang,LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(6):10 – 17. (in Chinese)
[82] 沈跃,何思伟,刘慧,等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(11):385 – 392,402.
SHEN Yue,HE Siwei,LIU Hui,et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):385 – 392,402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20201142&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.042. (in Chinese)
[83] XU G F, CHEN M Z, HE X K, et al. Path following control of tractor with an electro-hydraulic coupling steering system: Layered multi-loop robust control architecture[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209:282 – 299.
[84] HUA B, WANG L, DU Y, et al. Design and experiment on integrated proportional control valve of automatic steering system [J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17):389 – 396.
[85] 张闻宇,丁幼春,王磊,等. 拖拉机自动导航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.
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. http://www.j-csam.

org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170604&journal_id = jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 06. 004. (in Chinese)

[86] 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等. 拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):43 - 50.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LIAO Qingxi, et al. Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 43 - 50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150307&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.007. (in Chinese)

[87] 施国标,周倩,王帅,等. 无人驾驶模式下电液复合转向系统高鲁棒性控制策略[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):395 - 402.
SHI Guobiao, ZHOU Qian, WANG Shuai, et al. High robust control strategy for electro-hydraulic hybrid steering system in unmanned mode[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 395 - 402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191246&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.046. (in Chinese)

[88] 杨洋,张刚,查家翼,等. 基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(8):44 - 54,61.
YANG Yang, ZHANG Gang, ZHA Jiayi, et al. Design of automatic steering system based on direct connection of DC motor and full hydraulic steering gear[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 44 - 54, 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200805&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.005. (in Chinese)

[89] NASEEM D, MONIKA I. Yaw stability control of articulated frame off-highway vehicles via displacement controlled steer-by-wire[J]. Control Engineering Practice, 2015, 45: 46 - 53.

[90] HAN Y, HE L, WANG X, et al. Research on torque ratio based on the steering wheel torque characteristic for steer-by-wire system[J]. Journal of Applied Mathematics, 2014, 6: 1 - 8.

[91] KIM D H, CHOI C H, KIM Y J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 227 - 231.

[92] QIU Q, FAN Z, MENG Q, et al. Extended ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152(1): 40 - 50.

[93] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. A virtual yaw rate sensor for articulated vehicles featuring novel electro-hydraulic steer-by-wire technology[J]. Control Engineering Practice, 2014, 30: 45 - 54.

[94] 李伟,薛涛,毛恩荣,等. 高地隙自走式喷雾机多轮转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(1):141 - 151.
LI Wei, XUE Tao, MAO Enrong, et al. Design and experiment of multifunctional steering system for high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 141 - 151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190115&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.015. (in Chinese)

[95] DAHER N, IVANTYSYNOVA M. Yaw stability control of articulated frame off-highway vehicles via displacement controlled steer-by-wire[J]. Control Engineering Practice, 2015, 165: 46 - 53.

[96] TAVOOSI V, KAZEMI R, OVEISI A. Nonlinear adaptive optimal control for vehicle handling improvement through steer-by-wire system[J]. Journal of Central South University, 2014, 36(1): 100 - 112.

[97] 刘军,袁俊,蔡骏宇,等. 基于 GPS/INS 和线控助力的农业机械自动驾驶系统[J]. 农业工程学报,2016,32(1):46 - 53.
LIU Jun, YUAN Jun, CAI Junyu, et al. Autopilot system of agricultural vehicles based on GPS/INS and steer-by-wire[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 46 - 53. (in Chinese)

[98] 房素素,鲁植雄,王增才,等. 拖拉机线控液压助力系统设计及样车性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):86 - 93.
FANG Susu, LU Zhixiong, WANG Zengcai, et al. Design and prototype performance experiments of steering-by-wire hydraulic pressure system of tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 86 - 93. (in Chinese)

[99] 鲁植雄, 刁秀永, 龚佳慧, 等. 轮式拖拉机线控液压助力系统路感特性与评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 57 - 63.
LU Zhixiong, DIAO Xiuyong, GONG Jiahui, et al. Assessment and characteristic of road-feeling for wheeled tractor hydraulic steer-by-wire system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 57 - 63. (in Chinese)

[100] PAUL A, FARZANEH K. Reducing tractor rollover fatalities[J]. Resource Engineering & Technology for Sustainable World, 2017, 24(6): 6 - 7.

[101] QIN J, ZHU Z, JI H, et al. Simulation of active steering control for the prevention of tractor dynamic rollover on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2019, 185: 135 - 149.

[102] 王健, 余贵珍, 张为, 等. 基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术[J]. 农业机械学报,2010,41(6): 1 - 6.
WANG Jian, YU Guizhen, ZHANG Wei, et al. Real-time rollover prediction for vehicle based on principles sliding mode and fuzzy inference system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 1 - 6. (in Chinese)

[103] 冯彦彪,杨珏,季智燚,等. 基于最优滑转率的电动车辆驱动防滑控制策略[J]. 农业工程学报,2015,31(8):119 - 125.
FENG Yanbiao, YANG Jue, JI Zhiyi, et al. Fuzzy anti-slip control based on optimal slip control[J]. Transactionsof the CSAE, 2015, 31(8): 119 - 125. (in Chinese)

[104] 倪静,毛罕平,韩绿化,等. 高地隙四轮驱动喷雾机防滑系统控制仿真与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):13 - 16.
NI Jing, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Simulation and test on anti-skid system control for four-wheel drive of high clearance spray machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 13 - 16. (in

Chinese)
[105] 毛罕平,倪静,韩绿化,等. 高地隙液压四轮驱动喷雾机转向防滑控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(6):58 - 65.
MAO Hanping, NI Jing, HAN Lühua, et al. Turning anti-slip control system of hydraulic four-wheel drive high clearance sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):58 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120611&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.011. (in Chinese)
[106] 陈黎卿,胡冬宝,陈无畏. 基于人群搜索算法的四驱汽车扭矩分配控制策略[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(11):369 - 376.
CHEN Liqing,HU Dongbao,CHEN Wuwei. Control strategy and experiment of torque distribution for 4WD vehicle based on SOA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(11):369 - 376. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151150&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.050. (in Chinese)
[107] 周倩倩,温浩军,李中祥,等. 液压四驱喷雾机模糊防滑控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):283 - 288.
ZHOU Qianqian, WEN Haojun, LI Zhongxiang, et al. Design and test of fuzzy anti-skid control of four-wheel drive hydraulically driven sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2):283 - 288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s233&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.033. (in Chinese)
[108] 范李,李刚炎,陈冉,等. 基于横向力系数的汽车急转防侧翻车速计算模型与仿真[J]. 农业工程学报,2016,32(3):41 - 47.
FNA Li,LI Gangyan,CHEN Ran, et al. Speed calculation model and simulation of rollover prevention in condition of extreme turn based on lateral force coefficient[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(3):41 - 47. (in Chinese)
[109] SONG Y L, ZHANG X H, WANG W. Rollover dynamics modelling and analysis of self-propelled combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209:271 - 281.
[110] SHA R, KAWY A B. Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems[J]. Engineering Applications of Articial Intelligence,2010,23(7): 1041 - 1052.
[111] JING H H, LIU Z Y, CHEN H. A switched control strategy for anti-lock braking system with on/off valves[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2011,60(4): 1470 - 1484.
[112] MASHADI B, MOSTAGHIMI H. Vehicle lift-off modelling and a new rollover detection criterion[J]. Vehicle System Dynamics,2017,55(5): 704 - 724.
[113] 金智林, 严正华, 赵万忠. 驾驶员影响汽车侧翻稳定性机理分析与控制[J]. 机械工程学报,2019,55(4): 109 - 117.
JIN Zhilin, YAN Zhenghua, ZHAO Wanzhong. Influences of driver on vehicle rollover stability and anti-roll control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(4): 109 - 117. (in Chinese)
[114] 秦嘉浩,刘海帆,SUH C S,等. 拖拉机动量飞轮主动防侧翻控制与模型试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):515 - 520.
QIN Jiahao, LIU Haifan, SUH C S, et al. Tractor active anti-rollover control using momentum flywheel with experimental verification[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2):515 - 520. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s264&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.064. (in Chinese)
[115] 秦嘉浩,宋战胜,刘海帆,等. 拖拉机姿控飞轮防侧翻系统卸载能量回收试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):564 - 567,575.
QIN Jiahao, SONG Zhansheng, LIU Haifan, et al. Energy harvesting module design for flywheel-based tractor anti-rollover system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):564 - 567,575. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s167&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.067. (in Chinese)
[116] 张硕,李臻,朱忠祥,等. 多因素影响下拖拉机侧向稳定性模型实验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):358 - 363.
ZHANG Shuo,LI Zhen,ZHU Zhongxiang, et al. Scale model experiment on lateral stability of tractor affected by multi-factors [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10):358 - 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171046&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.046. (in Chinese)
[117] WANG Z, YANG J, LIU P. et al. Development of an agricultural vehicle leveling system based on rapid active levelling[J]. Biosystems Engineering,2019,186(11): 337 - 348.
[118] 薛金林, 卫瑶瑶, 闫嘉, 等. 基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):395 - 402.
XUE Jinlin, WEI Yaoyao, YAN Jia, et al. Design of wireless network for tractors based on teleoperation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):395 - 402. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180848&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.048. (in Chinese)
[119] 薛金林, 闫嘉, 夏成楷,等. 拖拉机遥操作系统优化与性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):386 - 393.
XUE Jinlin,YAN Jia,XIA Chengkai, et al. Optimization and performance experiments of teleoperation system for tractors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):386 - 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190843&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.043. (in Chinese)