doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.10.001

农业装备自动驾驶技术研究现状与展望

孟志军[1,2]　王　昊[1,2]　付卫强[1,2]　刘孟楠[2]　尹彦鑫[1,2]　赵春江[2,3]

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097;2.智能农业动力装备全国重点实验室,北京 100097;
3.国家农业智能装备工程技术研究中心,北京 100097)

摘要:农业装备自动驾驶技术可以显著提升作业质量,提高作业效率,降低作业成本,减轻劳动强度,已成为智能农业装备发展的重要方向。在政策和市场的共同推动下,我国农业装备自动驾驶技术发展迅速,并通过多场景、多层次的示范和应用推动技术熟化,逐步建立了完整的技术体系。农业装备自动驾驶技术系统主要包括环境感知、工况感知、决策规划、横向控制、纵向控制等关键技术。本文首先阐述了农业装备自动驾驶关键技术研究的现状,分析归纳了各技术领域有待解决的关键科学技术问题;结合农业装备自动导航技术产品和自动驾驶技术集成应用两方面,介绍了国内外农业装备自动驾驶技术研发和应用情况;从自动驾驶技术分级研究和建立标准规范角度,对比分析了农业装备自动驾驶与智能网联汽车行业的差距,指出了农业装备自动驾驶等级划分的迫切需求。为应对智慧农业生产非结构环境、高精度农艺和强农时约束三大挑战,建议突出农业生产应用中作业精准化和驾驶自动化双重需求的特点,有针对性地开展农业装备自动驾驶技术研发、应用示范和技术分级等方面工作。

关键词:农机自动驾驶;环境感知;决策规划;自动导航;自动驾驶分级

中图分类号:S24;TP23　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)10-0001-24　　**OSID**:

Research Status and Prospects of Agricultural Machinery Autonomous Driving

MENG Zhijun[1,2]　WANG Hao[1,2]　FU Weiqiang[1,2]　LIU Mengnan[2]　YIN Yanxin[1,2]　ZHAO Chunjiang[2,3]

(1. *Research Center of Intelligent Equipment*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100097, *China*
3. *National Engineering Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Agricultural machinery autonomous driving can improve work quality, enhance operational efficiency, reduce operating costs, and alleviate labor intensity. Autonomous driving technology for agricultural machinery is an important direction in the development of intelligent agricultural machinery systems. Driven by both policies and the market, China's autonomous driving technology for agricultural machinery has been rapidly developing and is gradually maturing through demonstration applications. The technological system for agricultural machinery autonomous driving is also being gradually established. Elementary technologies of agricultural machinery autonomous driving included environmental perception, working condition perception, decision-making and planning, lateral control, and longitudinal control. Firstly, the current status of key technology research for agricultural machinery autonomous driving was elaborated and the key scientific and technological issues that needed to be addressed were analyzed. And then the domestic and international research and application of agricultural machinery automatic driving products was introduced from the perspectives of automatic navigation technology and the integration and application of automatic driving systems. A comparison was made between the gap in grading standards and specifications for agricultural machinery autonomous driving and the intelligent connected vehicle industry, highlighting the urgent need for the classification of agricultural machinery autonomous driving. Finally, the main roles of agricultural machinery autonomous driving technology were summarized, and the future development directions for agricultural machinery autonomous driving were outlined. To address the challenges posed by the non-structured environment, high-precision agronomy, and time constraints

收稿日期:2023-07-01　修回日期:2023-08-17

基金项目:国家自然科学基金项目(31971800)和国家重点研发计划项目(2022YFD200150302)

作者简介:孟志军(1975—),男,研究员,博士生导师,主要从事农机自动驾驶与精准农业智能装备技术研究,E-mail:mengzj@nercita.org.cn

通信作者:赵春江(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事智慧农业与精准农业智能装备技术研究,E-mail:zhaocj@nercita.org.cn

in smart agricultural production, it was recommended to emphasize the dual requirements of precision operation and driving automation in agricultural production applications. Specifically, targeted efforts should be undertaken in the development of agricultural equipment autonomous driving technology, application demonstrations, and technological grading.

Key words: autonomous driving for agricultural machinery; environmental perception; decision-making and planning; automatic navigation; taxonomy of driving automation

0 引言

随着人工智能、大数据、物联网等前沿技术的快速发展,农业生产方式从机械化向自动化、智能化迅速迈进。智慧农业已成为各国现代农业科技竞争的制高点、未来农业发展的新业态[1]。发展智慧农业是贯彻落实我国“四化同步”国家战略、加快转变农业发展方式和推进农业现代化建设的迫切需要,对建设数字中国、实施乡村振兴战略、推进农业高质量发展具有重要意义。随着工业化与城镇化的不断推进,我国农业生产面临劳动力短缺和老龄化的严峻挑战,农业劳动力成本日趋增高,未来“谁来种地”问题日益凸显,“机器换人”的需求日趋增加[2]。

农业装备自动驾驶是机器换人完成大田农业生产任务的重要途径[3-4]。早在 20 世纪 60 年代,国外学者就已经开始了农业装备自动驾驶技术的研究。随着高精度卫星导航定位系统的普及和智能网联汽车技术的进步,国内外农业装备自动驾驶技术和相关的产品研发也实现快速迭代。目前具有自动驾驶功能的智能农业装备研发采用的通用系统架构如图 1 所示。传统农业装备通过搭载传感器、控制器和执行机构等装置,融合高精度地图及定位、自动控制和信息通信等技术,能够自动进行路径规划、导航避障、作业控制等一系列操作,已经有效地减轻农民在大田生产耕、种、管、收、运等环节的作业强度。

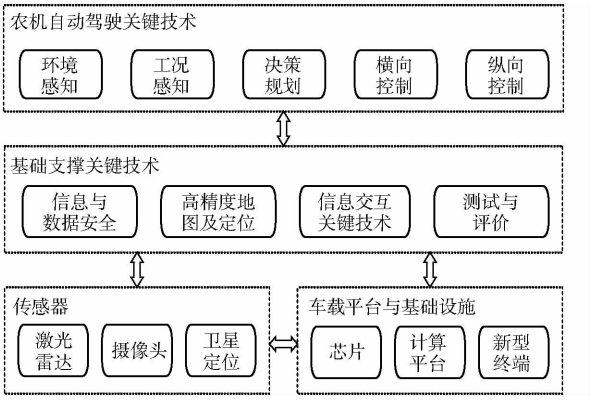


图 1 农业装备自动驾驶系统架构

Fig. 1 System architecture of unmanned agricultural machinery

本文从环境感知、工况感知、决策规划、横向控制和纵向控制等方面对农业装备自动驾驶技术进行探讨,分析作为典型的非道路车辆的农业机械在半结构化的农田场景实现自动驾驶所面临的难点和挑战。结合大田农业生产的典型应用分析农业装备自动驾驶技术的发展趋势,为相关研究提供参考和借鉴,促进农业装备自动驾驶技术的发展和推广应用。

1 农业装备自动驾驶关键技术

农业装备自动驾驶的核心技术包括智能感知、决策规划和执行控制。智能感知是指农业装备利用车载传感器探测和监控机组工况及周围环境信息。根据感知对象的不同,农业装备自动驾驶智能感知研究主要包括环境感知与工况感知两方面。通过对外界环境的感知可以实现车辆作业目标和障碍物的检测,通过车辆工况的感知可以实现车辆位置姿态、执行机构和控制器的运行状态监测,对保障作业安全和作业质量具有重要意义。决策规划是指根据感知信息进行车辆行走和作业的状态切换和路径规划。执行控制指通过对电机、液压系统等执行机构的控制,实现农业装备作业过程中横向(方向)控制和纵向(速度)控制及其组合对农业装备运动状态和作业质量的调整和控制。

1.1 环境感知

自动驾驶农业装备在复杂农田环境下自主行走与作业控制,首先要对周边的作业环境进行在线感知与分析,通常环境感知技术主要用于地块边界识别、动静态障碍物识别以及目标跟踪与识别等任务。目前,农业装备自动驾驶系统环境感知常用的传感器如表 1 所示。不同的传感器具有各自的特点与应用场景,通过对不同传感器进行标定、对齐实现融合感知,能够弥补单一传感器的不足,达到更好的效果。

1.1.1 地块边界检测

农田地块边界信息是保障无人农业装备精准作业的重要数据,可以用于导航地图的路径规划和电子围栏的设定。目前农田地块边界信息感知主要有基于遥感图像或人工打点方式的作业前离线数据采集和基于车载传感器数据融合的作业中实时感知两种方式。

人工打点即人工驾驶农机利用高精度卫星定位装置采集地块边界的坐标信息,是当前农业装备自

表 1　感知传感器性能对比

Tab. 1　Performance comparison of sensing sensors

传感器类型	制造商	成本	夜间	不良天气	探测距离	分辨率	文献序号
单目相机	日本索尼(SONY)	低	弱	弱	适中	高	[5-6]
深度传感器	美国微软(Microsoft)	适中	弱	弱	弱	高	[7-8]
红外热像仪	美国菲力尔(FLIR)	适中	较强	弱	适中	适中	[9]
激光雷达	德国西克(SICK)	高	强	弱	较远	适中	[10-11]
毫米波雷达	德国大陆(Continental)	适中	强	强	远	低	[12-13]

动驾驶产品获取农田边界的主要方法[14]。该方法在小地块表现出了良好的精度和鲁棒性,然而对于面积较大或内部含有多个固定障碍物的农田场景,该方法的经济性和采集效率较低,不具有实用性。

基于遥感图像的农田边界识别是指通过高分辨率或无人机遥感进行图像采集获取农田地块信息[15]。在高分辨率卫星图像中,分辨率通常可以达到亚米级,然而对于自动驾驶农业装备来说,这一精度难以满足自动驾驶农业装备精准作业的要求。无人机低空遥感的图像分辨率可达到厘米级[16],满足农田边界、道路、沟渠等地物识别的精度要求。基于边缘检测算子、频率特征法、阈值法与分水岭法等传统边缘检测算法易于实现,能够准确反映边缘特征较为明显的地物轮廓,可以用于简单场景的农田边界检测[17-19]。WANG 等[20]提出基于 GrabCut 的农田图像分割方法,通过简单的人机交互实现多个农田边界信息的提取。随着人工智能的发展,越来越多研究者[21-23]采用卷积神经网络算法提取农田边界。虽然卷积神经网络表现出良好的检测效果,但神经网络模型的训练通常需要大量的标注样本,同时模型的迁移能力还需进一步提升。

为了实现农田边界的在线感知,有研究者在农机装备上加装单目视觉、双目视觉、毫米波雷达等单一或多个传感装置[24-25]。基于单目视觉采集的农田图像运用颜色梯度、Hough 变换、随机样本一致性 RANSAC 等图像处理算法能够实现农田区域的识别,并不能明确农田边界的距离信息。王侨等[26]和洪梓嘉等[27]均采用了车载双目立体视觉的方案进行车辆前方农田边界的实时感知。张岩等[12]通过相机与毫米波雷达融合方式,利用视觉检测田埂形状以帮助毫米波雷达消除干扰信息,最终得到了农机前方田埂距离与高度信息。基于视觉的农田地块边界提取通常存在两个难点:一方面,光照、阴影与极端天气会影响地块边界识别的准确性;另一方面,部分农田周边杂草丛生,地块内外边界不明显,容易造成边界识别不完整的问题。

1.1.2　障碍物检测

障碍物检测是保障农业装备安全驾驶的基本功能[28]。农田中障碍物主要分为地面障碍物与负障碍物两大类,地面障碍物中包含了电线杆、土坡、石块、草垛等静态物体与人、牲畜、其他农机车辆等动态物体。而负障碍物主要是指沟渠、深坑等低于路面影响作业和通行的地物。在障碍物检测工作中,主要手段为通过视觉相机、雷达等传感器对障碍物进行特征提取[29]。

基于视觉的自动驾驶农业装备通常采用被动测量与结构光两种方式检测田间障碍物[30-31]。结构光相机普遍安装在农机前方,基于障碍物外观、帧间差分方式与立体匹配法检测障碍物。基于外观的障碍物检测从连续图像中获取所有目标边缘、颜色、纹理或形状等特征判断是否符合障碍物[32]。如果存在运动目标,则连续的帧和帧之间会有明显的变化。基于帧间差分法能够检测出视觉范围内的运动物体。而立体匹配法能够得到目标的深度与轮廓[33-34]。陈斌等[35]在农业装备顶部搭载全景相机获取其周围 360°的图像信息,并提出了一种改进 YOLO v3-tiny 目标检测模型,实现了田间行人和其他农机的实时检测与识别。MATTHIES 等[9]提出了基于热红外信息感知的负障碍物检测方法,通过地面与负障碍物内部的温度差,标记潜在的负障碍物的位置。

激光雷达与毫米波雷达是自动驾驶领域主要的主动探测传感器。激光雷达包括二维激光雷达与三维激光雷达,将采集的点云数据进行滤波与聚类便可得到障碍物的位置。尚业华等[11]设计了一套基于三维激光雷达的田间障碍物检测算法,该算法首先对点云数据进行降采样,分割出地面与障碍物的点云,最后对障碍物点云进行欧氏聚类,得到障碍物数量与外接长方体体积。毫米波雷达相较于三维激光雷达具有成本低、探测距离远等优点,同时具有不受雨雪等极端天气影响的特点,主要应用于检测田间动态障碍物。

单一传感器在感知方面会受到自身条件的限制。相机可以获得障碍物的纹理、颜色等信息,但是缺乏距离信息。激光雷达能够准确感知物体的三维结构,与相机类似,容易受到雾雪雨等天气的影响。

毫米波雷达相较于激光雷达有更长的波长，能穿透雨、雪、雾，实现移动物体的准确测量，可用于检测田间动态障碍物。因此基于多传感器融合的障碍物检测方法得到了越来越多的重视[36]。在视觉与毫米波融合方面，蔡道清[37]设计了以视觉感知为主，毫米波雷达探测为辅的农田障碍物感知策略，视觉图像检测障碍物位置，毫米波雷达检测障碍物的径向与侧向距离信息，通过将毫米波雷达与视觉进行时空间融合，得到障碍物的位置与尺寸。在视觉与激光雷达融合方面，薛金林等[30]通过对单目相机获取的图像进行显著性检测与激光雷达的数据进行聚类分析确定静态障碍物的数量、边界与位置，该检测方法能够有效排除非障碍物的干扰，实现障碍物的完整检出。

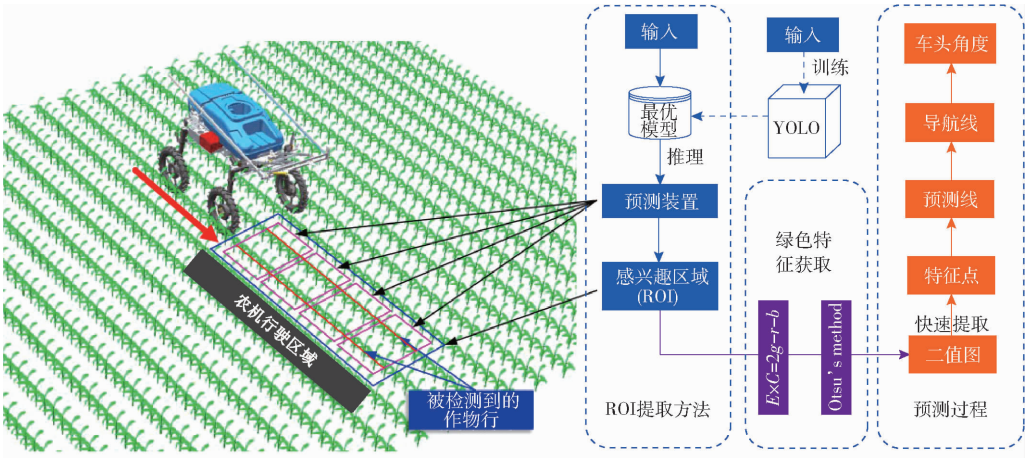
多传感器的数据融合大幅度提高了障碍物的检测效果，与之伴随的是计算量的提高。农机上需要配备更强性能的图形处理设备，这增加了自动驾驶系统的成本。另一方面，多种传感器同时配置在作业场景复杂的农业装备上，其长时间工作的稳定性难以保证。对比来看，具有先验知识的高精度地图在农业装备自主作业过程中能够减少实时环境感知带来的计算量，提高了工作的稳定性。基于以上考虑，基于农业装备自动驾驶的农田高精度地图将是今后研究的重点。

1.1.3 作物行检测

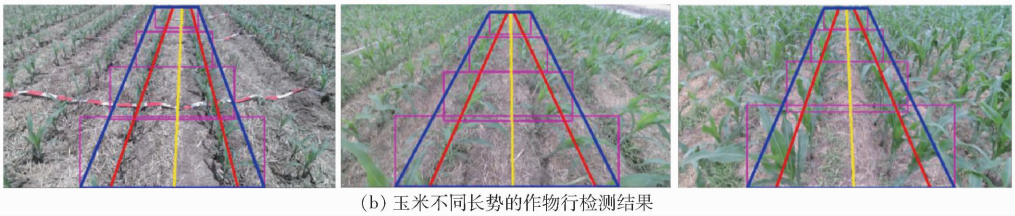
作物行的精确检测是农业装备在不损害作物情况下自主作业的前提[38-40]。作物行检测应用于农业中的多种场景，如除草、施肥、巡检、灌溉、植保与收获等。与地块边界检测相似，霍夫变换、频率分析、RANSAC 与神经网络等算法同样适用于作物行检测。与地块边界识别不同的是，地块边界的形状与位置通常不随农业劳作而变化，作物与作物行宽度却会随着作物生长与轮换而变化，因此对不同生产环节都需要对作物行进行精确检测[41]。

在卫星定位信号失锁或无法获取导航路径的经纬度信息时，进行田间管理需要检测作物行线，为车辆和机具的导航提供参考信息。因此，在检测作物行线时通常需要解决作物识别、作物行线拟合和导航信息提取等问题。

在作物苗期，针对多条作物行，王侨等[42]基于绿色分量增强、分割阈值优化与形态特征分析等组合方法对玉米苗期作物线进行检测；王爱臣等[43]通过最优阈值法对大蒜、玉米、油菜、水稻和小麦幼苗图像进行图像分割，利用基于区域生长均值漂移聚类法拟合不同作物苗期的作物行。由于苗期作物植株矮小，杂草对苗期作物行识别的干扰有较强的影响，基于特征点邻域 Hough 变换、透视变换等方法可以有效解决杂草密度分布、光照强度和秧苗行曲率变化等因素对秧苗行检测的影响。作物缺失同样会影响检测结果，李祥光等[44]限定玉米行在 HSV 颜色空间中的颜色范围，并进行二值化处理，去噪后填补了作物行中的空洞。YANG 等[45]针对高杂草、低光照等问题，提出了一种基于感兴趣区域自主提取的作物行检测算法。识别算法与效果如图 2 所示。



(a) 基于作物行检测的ROI自主提取流程图



(b) 玉米不同长势的作物行检测结果

图 2 基于单目视觉的玉米行检测系统

Fig. 2 Corn row inspection system based on monocular vision

作物行检测的另一难点在于收获边界的识别。由于收获时农业装备容易造成一定范围的扬尘影响视觉的检测，少数解决方案采用基于视觉的方法，ZHANG 等[46]通过立体视觉获取农业装备前方小麦的三维点云，使用 Otsu 方法获得的阈值提取作物面积，根据高度差区分已割与未割区域。更多研究者采用激光雷达的方式检测作物收获边界。伟利国等[47]通过将灰尘与作物特征阈值比较，对受灰尘影响的错误数据进行有效识别与剔除。采用移动平均数字滤波算法，消除系统测量噪声。通过信号阶跃变化模式识别算法，实现了收获边界的在线检测。尚业华等[11]将预处理后的点云数据分为两类，稻麦轮廓点和背景点，然后计算每一类的中心点，以中心点之间的连线作为收获边界。

作物行检测在精准农业中应用前景广阔。众多研究者基于传统图像算法与机器学习算法在作物行检测方面都做出了出色的成果。尽管如此，在作物行检测方面仍存在一些挑战。针对动态生长作物的行匹配问题与不同作物之间作物行检测的普适算法缺少相关的研究。作物行检测的难点不仅在于光影和杂草对作物识别的干扰，还存在于作物枝叶对检测作物中心位置的干扰，以及作物高度对行间距计算的干扰。此外，作物行线的拟合精度和导航参数的优化也是农业装备自动驾驶需要进一步研究的方向。

1.2　农业装备工况感知

农业装备工况感知主要分为运行工况和作业工况两方面，这类信息直接关系到自动驾驶农业装备的导航精度与作业质量，大多通过 CAN 总线或者加装传感器实现农业装备工况信息的采集与感知。

1.2.1　运行工况感知

自动驾驶农业装备本体的运行工况感知主要面向发动机、转向系、传动系、车身、车轮等对象，包括转矩、转速、排放、姿态、车速、轮速、振动以及应变等关键参数。

农业装备自动驾驶机组的运行工况信息主要分为两种方式。一种方式是通过 CAN 总线直接获取发动机、传动系统、排放的实际数据以及各类 ECU（Electronic control unit）故障信息，对农业装备的改造较小。孟志军等[48]读取了纽荷兰 1404 型动力换挡拖拉机 CAN 总线的发动机转速，并量化了油门开度与发动机转速的线性关系，最终实现了轮速控制。周俊博等[49]采集 20 组潍柴拖拉机柴油机 CAN 总线上的故障数据，并作为故障诊断的验证样本数据。杨丽丽等[50]基于沃得 4LB－150AA 型谷物联合收获机的 CAN 总线数据，建立了发动机平均扭矩、发动机平均转速、平均速度、加速度均值、减速度均值、加速度方差、减速度方差与油耗的油耗模型。

另外一种方式是通过加装各类传感器监测拖拉机车速、轮速、车身姿态、传动系转矩、壳体应变以及振动等信息。这类监测方式对农业装备的改造较大，测试成本较高，但是数据获取更直接、数据量更大。车速和轮速的监测是拖拉机自动驾驶与作业控制的关键基础，吸引诸多学者投入其中，有学者采用旋转编码器、旋转电位计和接近开关等测量元件直接或间接获取驱动轮转速，最终换算拖拉机前进的理论速度[51]；还有学者采用五轮仪等附加装置测量路面平整度较好工况下的拖拉机前进速度，但难以适应地形变化[52－54]；此外，部分研究人员将雷达传感器应用到实际车速的获取中，提高了测量精度，但是成本较高，对农用机械来讲推广意义小和实用性较差[55－60]。另外，也有学者在车身姿态、转矩、应变以及振动等运行工况信息感知方面进行了探索。齐文超等[61]采用动态倾角传感器设计了丘陵山地拖拉机的车身姿态监测系统；WEN 等[62]基于应变电测法获取了拖拉机前桥关键测点田间作业工况下的应力载荷数据，并研究了载荷谱加速编辑方法。温昌凯等[63]采集了拖拉机前桥、变速箱以及后桥在试验场模拟工况和田间实际作业工况下的实测应力数据。

农业装备运行工况感知可实时监测农业装备自动驾驶过程中的主机运行状况，为主机发动机、传动系统等各机构的精准控制提供基础数据支撑，目前在农业装备自动驾驶技术领域是非常重要的数据源。

1.2.2　作业工况感知

农业装备自动驾驶机组的作业工况信息主要包括悬挂系统牵引力、悬挂提升位置、PTO 扭矩、PTO 转速以及液压流量和压力等信息。

针对悬挂系统牵引力监测，诸多学者采用轴销式牵引力传感器布置于下拉杆铰接点、悬挂点处，经验证可实时获取牵引力数据[64－65]。针对液压流量和压力监测，大部分学者采用流量传感器与压力传感器安装在测试点，直接获取实测流量与压力。针对三点悬挂提升位置监测，YIN 等[66]设计了一种基于 MPU6050 运动处理模块车身姿态传感器，实时监测悬挂拉杆角度并计算耕作深度，田间试验表明，耕作深度检测误差小于 1.2 cm。谢斌等[67]将耕深传感器固定安装于拖拉机三点悬挂系统中的提升臂上拉杆或者下拉杆，结合悬挂机构的几何关系推算耕深，测量综合精度可达 ±1.4 mm，且测量线性度高、

稳定性好。针对动力输出轴转矩检测,现有研究大多采用无线转矩传感器直接测取关键部件作业数据,闫祥海等[68]开展了沙土旋耕、沙土驱动耙、黏土旋耕和黏土驱动耙 4 种田间工况试验,采用扭矩传感器测取了东方红 LY1004 型拖拉机的动力输出轴转矩载荷。

农业装备作业工况感知可实时监测拖拉机牵引机具作业时悬挂机构与机具实际的受载、受力情况,这一类作业工况信息的实时反馈有利于直接分析拖拉机作业时的牵引性能、牵引效率,可进一步发挥自动驾驶农业装备的实际作业性能,提升作业质量和作业效率。

1.3 农业装备路径规划

农业装备路径规划以农田位置、大小、边界、障碍物以及农业装备幅宽、转弯半径、作业类型等基本信息为依据,以最短作业时间、最小行驶距离、最低作业能耗为约束,对单台农业装备在农田地块中的作业路径、多台农业装备协同作业路径及农业装备在多个农田地块之间转移路径进行合理规划,为农业装备自动驾驶提供基础支撑[69-70]。

1.3.1 单机农田全覆盖路径规划

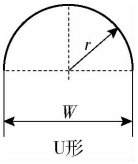
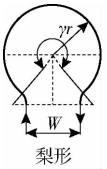
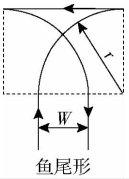
农业装备在农田内部典型驾驶行为包括地头转弯掉头、作业、避障,农田全覆盖路径规划主要是针对农业装备上述驾驶行为进行的路径规划。

(1)农业装备地头转弯掉头规划

农业装备地头转弯掉头方式主要包括 U 形、梨形和鱼尾形,3 种转弯掉头方式各具特点,U 形、梨形转弯一般需要地头预留一定的空间,鱼尾形转弯需要农业装备进行倒车等复杂操作,如表 2 所示[71-73]。由于农田地头环境较为复杂,农业装备转弯特性也不尽相同,这些因素对农业装备地头转弯掉头后的对行精度都有较大影响。为实现农业装备转弯掉头后的高精度对行,国内外学者结合农业装备自身运动属性结合地头特征,对地头转弯路径算法进行优化。HE 等[74]提出一种基于非对称折返转弯法的地头转弯路径规划算法,当农业装备自动驾驶转弯过程打滑时,算法根据车辆的实时位置动态规划转弯路径,提高了地头转弯效率及精度。WANG 等[75]针对 Switchback turning(即鱼尾形转弯)对行精度差的问题,提出了基于数据驱动转向模型的 Circle-back 转向方法以及转弯路径动态优化算法,有效提高了地头转弯的效率和对行精度。秦昌礼[76]为提高农业装备转向后的初始精度,在 Switchback turning 转向算法的基础上引入了三次贝塞尔缓和曲线,进而设计出了非切线圆鱼尾型转向路径,有效提高了地头转弯精度。

表 2 地头转弯掉头方式对比

Tab. 2 Comparison of head turning algorithms

地头转向方式	优势	不足
 U形	转弯过程无需换向,地头占用少	对于转弯半径大的农业装备只能采用套行作业模式,易对地头重复碾压
 梨形	转弯过程无需换向,支持临行作业	占用地头空间大
 鱼尾形	地头占用少,支持临行和跨行作业	转弯过程中需要换向,增加转弯时间和对土壤的碾压

(2)农业装备田间作业路径规划

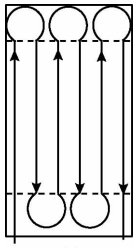
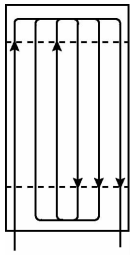
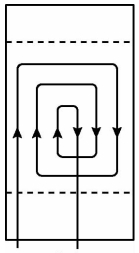
在农业装备田间作业路径规划方面,根据农田地块形状、农业装备作业类型和农艺约束的不同,农业装备作业路径一般可分为梭行、套行和绕行 3 种[77],3 种方式也各具特点,在应用中需要根据实际情况进行选择,如表 3 所示[78-80]。目前,农业装备田间作业路径规划方法已相对成熟,在耕作、施药、施肥及收获等领域已经得到了初步应用[81]。罗锡文等[82]通过采集地块四顶点坐标,依据作业行距离信息以及地块形状规划平行线路径,并采用地头跨行转向的方式,实现了作业区域的全覆盖。KHAJEPOUR 等[83]结合带有容量约束的弧路径方法(CARP)对农业装备田间路径规划算法进行了优化,有效提高了农业装备全覆盖路径规划效率。WANG 等[84]针对不规则农田自主作业过程路径规划效率低、通过性不强等问题,提出一种改进的鱼尾形地头转弯路径规划方法,配合梭行作业模式,有效提升了不规则地块有限地头空间转弯的对行精度和作业效率。

(3)农业装备田间避障路径规划

农业装备遇到障碍物实现停车让行或绕开障碍是农业装备自动驾驶的基本要求。绕开障碍物则需要先根据农业装备自身参数、障碍物信息及作业需求,规划出一条绕障路径[85]。目前,较为成熟的避障路径规划算法有人工势场法(Artificial potential field, APF)、动态窗口法(Dynamic window approach, DWA)、模糊逻辑法(Fuzzy logic, FL)以及人工神经网络算法(Artificial neural network, ANN)等[86]。因农业装备作业环境复杂,常规的避障路径规划算法应用于农业装备避障路径规划算法具有一定的局限

表 3　常见作业路径规划方法对比

Tab. 3　Comparison of path planning algorithms

路径形式	特点	优势	不足
 梭行	相邻行往复作业	能够覆盖整个作业区域，路径简单	所需地头转弯面积较大，转弯次数多
 套行	非相邻行往复作业	所需地头转弯面积较小，能有效避免重复作业和遗漏作业	易对地头重复碾压
 绕行	绕行作业区域的边界，逐渐向内覆盖	通用性好，不受农田形状、地头空间的制约	非作业路径成本高，转向次数多，能量消耗大

性，国内外研究者在传统避障路径规划的基础上进行了改进设计，以达到更好的避障效果。ROSTAMI 等[87]通过对人工势场法中的引力场与斥力场函数加以改进，避免了陷入局部最优解的问题。劳彩莲等[88]提出了一种基于改进 A* 算法与动态窗口法结合的路径规划算法，利用超声波传感器进行环境感知并通过优化动态窗口算法进行运动轨迹预测，对路径规划的平滑性有了一定程度的改善。

综上分析，规则地块单机农田全覆盖路径规划相对成熟，然而针对不规则地块、非固定障碍物的单机路径规划尚无成熟的解决方案，仍需要进一步研究和开发新的算法与技术，以适应不同地块和障碍物的变化，达到更好的全覆盖路径规划效果。

1.3.2　多机协同路径规划

多台农业装备协同作业能够极大提高作业效率，是当前重要的研究热点。高效合理、安全可靠的多机协同路径规划是多机协同作业的重要保障。目前国内外学者针对农业装备多机协同作业模式与路径规划方法研究已经取得了一定进展。曹如月等[89]为实现农田作业环境下的多机协同作业，提出了基于改进 A* 和 Bezier 曲线的多机协同路径规划算法，降低了转弯次数。翟志强等[90]针对多机协同过程存在转弯路径重叠，存在碰撞风险等问题，基于方向包围盒算法和分离轴定理提出了一种面向主从跟随模式的多机协同作业导航路径规划方法，有效提高了多机协同作业效率，降低了地头转向碰撞风险。多机协同路径规划的主要难点在于多机作业过程农业装备转弯以及作业冲突问题[91]，目前在以收获卸粮为主要应用场景的主-从协同路径规划算法方面的研究取得了一定的进展，然而在同一地块多机协同作业的路径规划与调度算法还处于仿真阶段，未来还需对多机协同算法进行优化和实验验证，以提高多机协同作业效率及灵活性，满足不同农业装备作业场景需求[92]。

1.3.3　农业装备田块间转移路径规划

农业装备田块间转移是指在一定区域范围内的多块农田中，农业装备从一个地块到另一个地块的转移过程。在季节性农业装备机群作业场景下，根据作业任务需求、农业装备作业性能以及时间能耗等约束条件，通过合理分配农业装备作业任务，规划最优转移路径，可实现多台农业装备有序、安全、高效转移及作业[93]。针对农业装备多任务分配以及转移路径规划问题，国内外相关学者多以车辆调度模型为基础，结合农业装备作业的实际情况进行调度模型的研究并加以优化改进。JENSEN 等[94]针对跨区段农业装备调度时空问题，利用 D* 结合图论法多台机器在同一条路径的调度模型进行了优化，有效提升了作业车辆在场内与场间运输的规划与执行效率。D'URSO 等[95]基于农业经营背景，针对小问题实例与大型问题实例分别提出了基于动态规划的精确算法和基于分支定界的随时近似算法。王猛等[96]为解决农业装备作业过程因突发状况引起的作业时间增加、作业任务无法完成等问题，提出了一种同种农业装备机群动态作业任务分配方法，有效提升了多机作业效率。目前，农业装备田块间转移路径规划主要难点在于多机任务分配的动态性以及实时性问题[1]，未来可针对不同应用环境及任务需求，研究动态条件下农业装备任务分配与路径优化方法，提高多机路径转移效率[97]。

1.4　横向控制

横向控制是指受控农业装备在所设计的路径跟踪算法作用下，能快速且稳定地跟踪上参考路径，并沿着指定路径行驶[98]。横向控制相关研究主要包含自动转向控制、农业装备数学模型和路径跟踪算法 3 部分。

1.4.1　自动转向控制

自动转向控制系统是自动导航与路径跟踪控制的关键，控制方法的选择及控制系统性能对整个控

制系统起着至关重要的作用。目前,国内外常见的农业装备自动转向驱动方式主要有电液和电机驱动2种。由于农田环境复杂,设计控制系统时应考虑自动转向系统的应用环境、导向轮在工作过程的滑移等因素。因此,转向控制的方法能否较好地适应控制环境,关键在于如何调整控制参数以提高控制系统的快速性和准确性[99]。

在自动转向控制研究初期,多采用电液比例阀控制的方式。吴晓鹏等[100]以东方红 X804 型拖拉机为平台,采用死区补偿 PD 控制算法,设计了基于电液比例阀的自动转向控制系统,最大误差 1.1°,平均误差 0.5°,平均延时 0.2 s。刘兆祥等[101]以雷沃 FT704 型拖拉机为试验平台,设计基于比例方向阀自动转向驱动装置,采用死区补偿 PD 控制算法,30°的阶跃信号跟踪时间 1.4 s。李逃昌等[102]在雷沃 TA800 型拖拉机采用电液比例阀对车轮转向的自动控制,采用横摆角速度鲁棒自适应控制理论提高了自动转向动态跟踪性能。赵春江团队[103-105]提出了一种支持农业装备驾驶人员手动操作优先的电液转向控制方法,导向轮转角控制误差 0.23°,自动/手动转向切换时间 0.8 s,提升了自动转向控制参数的适应性和应急响应速度。黎永键等[106]采用双闭环 PID 控制算法在东方红 X804 型拖拉机上进行电液比例转向控制试验,稳态跟踪误差不超过 0.6°。

随着农业装备自动驾驶系统后装市场的发展,对自动转向装置提出了强适应性、加装快速性、高可靠性要求,因而,农业装备自动转向装置的主流方式转变为电机驱动。陈文良等[107]设计了步进电机驱动转向器总成实现自动转向装置,采用增量式 PID 控制算法,控制误差 0.2°。GONZÁLEZ 等[108]设计了基于模糊控制算法的拖拉机电机转向控制盒,系统响应时间 0.5 s,左右极值切换时间 2 s。刘阳[109]在 TN654 型拖拉机上设计了一套基于 CAN 总线的自动导航系统,在方向盘上加装步进电机通过摩擦的方式带动方向盘,车轮转角控制误差 3°。张闻宇等[110-111]通过夹具将步进电机安装在拖拉机方向盘上,以摩擦轮带动方向盘转动,所设计驱动系统误差为 0.197°,平均上升时间 2.0 s;平均调节时间(3%误差带)为 2.4 s。YIN 等[66]采用模糊/PID 复合控制算法控制安装在水稻插秧机转向柱上的电机进行自动转向,转向角 8°、25°阶跃响应仿真结果表明,超调量分别为 0.2°和 1.6°,响应时间分别为 0.34 s 和 0.45 s,调节时间分别为 0.52 s 和 0.94 s。何杰等[112]在水田插秧机上通过安装电动方向盘的方式来控制插秧机转向,采用嵌套 PID 控制方法以实现电动方向盘的内环速度控制和外环角度控制,泥底层平坦与不平坦的水田中直线行驶时转向轮角跟踪的平均绝对误差分别为 0.354°和 0.663°,平均延迟时间均为 0.6 s,角度跟踪偏差最大为 1.4°和 3.6°,深泥脚转向阻力大时有 1.4 s 的控制滞后,基本上满足插秧机自动转向任务,但在较大阻力时会存在电机力矩不足而导致控制响应滞后的情况。

总体来说,常用的自动转向驱动方式为电液和电机两种。电液驱动转向方式一般用于农业装备主机厂商预装(即前装),而电机驱动转向方式则更适用于农业装备出厂后改造(即后装)。其原因主要在于液压方案改装过程复杂,而电动方向盘改装相对简单。现阶段农业装备自动驾驶以后装为主,电机驱动转向方式,因安装和售后便捷性,已经成为技术主流。随着农业装备主机厂商对农业装备自动驾驶的关注,农业装备自动驾驶前装市场会逐步兴起,电液自动转向方式也会逐步回归市场。

1.4.2 农业装备数学模型

在农业装备横向控制中,最经典、应用最广泛的是 ELLIS 提出的二轮车运动学模型(图 3)[113]。该模型假设地面平坦、前进速度恒定、轮胎没有侧偏、车辆没有侧向滑移。在这种模型中,把农业装备抽象为一个二轮车,在大地直角坐标系中,用农业装备当前位姿、农业装备当前的航向角、转向轮当前的转角、农业装备当前的速度矢量,以及农业装备后轮中心的坐标、农业装备前后轮的轴距等参量表示。

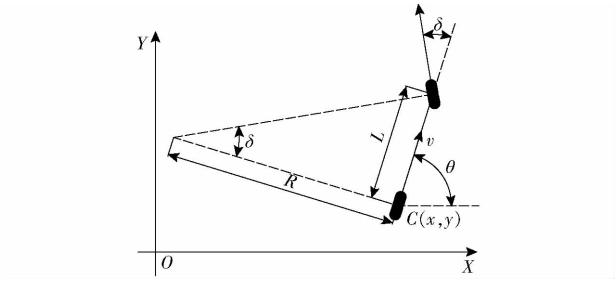


图 3 农业装备二轮车运动学模型

Fig. 3 Two wheels kinematics model of agriculture vehicle

农业装备横向控制技术的主要目的是保持机具作业点按照预定轨迹行进。但是,在农业装备作业过程中,存在作业机具与农业装备主机作业轨迹不一致现象,影响了农业装备作业质量。这一现象在农业装备挂载牵引式机具和农业装备曲线导航时更为明显。郝思佳等[114-115]在农业装备二轮车运动学模型基础上建立拖拉机-播种机运动学模型。为了研究拖拉机半挂车机组自动直线倒车自动控制技术,朱忠祥等[116-117]建立了拖拉机半挂车机组的运动学模型(图 4),并根据机具工况对模型进行了简化。BACKMAN 等[118]基于拖拉机-牵引式农机具运

动学模型，建立了非线性模型预测控制路径跟踪系统，设计的控制器能够保证拖拉机和农业装备在牵引速度 12 km/h 时的横向误差最大为 10 cm。KAYACAN 等[119]建立了改进型的拖拉机-牵引式农机具运动学模型，并设计了分布式非线性模型预测控制器，控制器在直线跟踪时拖拉机和机具的误差均值分别为 3.33 cm 和 3.22 cm。

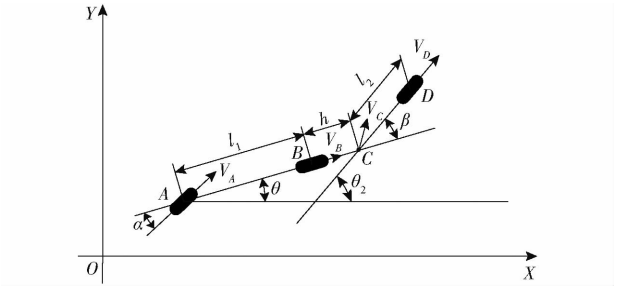


图 4　拖拉机半挂车机组的运动学模型

Fig. 4　Kinematics model of tractor-trailer combination

由于农业装备本身的复杂性、土壤农田环境以及作业负载的突变性，农业装备自动驾驶控制系统是一个复杂的不确定性系统。基于运动学模型的方法鲁棒性不强，且未考虑机具负载变化等情况下导致的农业装备动力学特性的变化，路径跟踪控制方法难以取得预期的效果。为此，诸多学者寻求建立高保真的自动驾驶农业装备非线性动力学模型。KAYACAN 等[120]建立了拖拉机挂车机组的纵向和横向的非线性动力学模型，为后续的控制器提供了有效的控制模型。ZANCHETTA 等[121]建立了牵引车-拖车高保真动力学模型，并通过直接横摆力矩控制降低了车辆的偏航率，提高了系统的稳定性。

由于复杂的地表情况和农业装备结构，农业装备机组运动学模型难以精准建立。对此，诸多学者采用神经网络等智能方法直接输出下一时刻车辆运动状态或控制指令。陈军等[122]构建了行驶农业装备的 4-4-4-3 结构神经网络结构运动模型；该神经网络模型的 4 个输入单元分别为农业装备当前位置与目标路径的距离、当前位置农业装备的横摆角、当前位置车辆的转向角、车辆转向角的变化量；3 个输出单元分别为下一个采样点农业装备与目标路径的距离、横摆角以及转向角。WANG 等[123]提出了一种基于动态模态分解算法的拖拉机在线系统辨识方法，通过少量的学习数据即可实现对车辆运动状态的估计，结合卡尔曼滤波方法实现在卫星信号失锁的情况下估算车辆位姿，维持高精度导航。

目前，在农业装备数学模型研究中，农业装备运动学模型和农业装备动力学模型应用比较广泛[124]。由于地表状况和农业装备结构上的原因，行驶农业装备模型难以精确建立，会对农业装备横向控制效果产生负面影响。采用包括神经网络在内的机器学习方法建立农业装备运动模型，可以避免建模不准确或者模型参数剧烈变化对农业装备横向控制效果的影响，会逐渐成为研究的重点。

1.4.3　路径跟踪算法

路径跟踪算法主要包括基于几何学的控制器和基于控制理论的控制器[125]。基于几何学的控制器是根据车辆转向的几何关系，结合期望路径推导出车辆转角或者角速度，典型的算法如纯追踪算法[126]和前轮反馈算法（Stanley）[127]。基于控制理论的控制器中，常用的算法有 PID 控制[128]、LQR（Linear quadratic regulator）[129]和 LQG（Linear quadratic gaussian）[130]、模型预测控制[131]、模糊控制[132]、滑膜控制[133-134]等算法，基于控制理论的算法需要准确的车辆模型和车体反馈量，以实现对农业装备运动的控制[135]。

在基于几何运动学的控制算法方面，纯追踪模型是其中最经典的模型，可用一个公式表达前轮转角与横向误差、航向误差和预瞄距离之间的关系，理论简单，参数少，在抗干扰和路径跟踪的整体表现优于其他方法，逐渐成为农业装备自动驾驶控制最常用算法[126,136-138]。NOGUCHI 团队[136-137]采用固定的预瞄距离，在车速为 0.8 m/s 的情况下，自动驾驶拖拉机控制精度达到 3 cm。但是，纯追踪模型的预瞄距离受跟踪偏差、车速、路径曲率等的影响，预瞄距离固定的传统纯路径跟踪控制算法不能满足需求，国内外研究人员围绕预瞄距离自适应的纯路径跟踪算法展开了研究[20-21]。FUE 等[139]根据路径的曲率和车速改变预瞄距离，在速度 1.2 m/s 下，控制精度可达 0.04 m。WOODS 等[140]根据车辆的横向偏差调整预瞄距离，在车速为 1.0 m/s 的情况下，控制一台四轮独立转向的车辆，曲线跟踪最大误差达到 1.46 m。贾全[141]在原有纯追踪算法的基础上，增加了基于人群搜索算法的实时评估环节，使改进后的纯追踪算法可以依据适应度函数在线调整预瞄距离，田间试验结果表明，在速度 9 km/h 下，拖拉机直线跟踪最大误差为 3.2 cm。

在基于控制理论的控制算法方面，刘进一[142]采用基于横向位置偏差和航向角偏差的双目标联合滑模控制方法，实现速度自适应控制，在速度小于 1.25 m/s 的条件下，田间直线跟踪最大误差为 10.60 cm。王辉等[143]采用基于预瞄追踪模型的纯路径跟踪控制方法，进行了实车的上线和直线路径跟踪试验，在初始航向偏差为 0°，初始位置偏差分别为 0.5、1、1.5 m 条件下，上线时间分别为 6.8、

8.2、9.4 s,上线距离分别为 6.73、8.11、9.33 m,超调量分别为 5.2、7.0、8.5 cm;颠簸不平旱地路面直线路径跟踪的最大误差为 4.23 cm,误差绝对值的平均值为 1 cm,标准差为 1.25 cm。张华强等[144]通过粒子群优化算法实时确定纯追踪模型预瞄距离,在车速为 0.7 m/s 的实验条件下,改进后的控制器在直线跟踪的效果以及上线距离等方面优于预瞄距离固定的控制器。WANG 等[145-146]提出了一种预瞄距离速度自适应的农业装备作业纯路径跟踪控制算法,通过优化损失函数选择最优的速度权重,在变速度工况 0~4 m/s 下,水泥地面和农田导航误差分别为 1.3 cm 和 3.3 cm,提高了自动驾驶系统速度适应性。

美欧日等发达国家农业装备横向控制技术研究较早,以农业装备卫星自动驾驶为代表的横向控制技术已经产品化,并由直线导航逐步扩展了曲线导航、地头自动转向、对角耙地等功能[147-148]。其代表厂家为美国天宝(Trimble)公司、约翰迪尔(John Deere)公司,以及加拿大半球(Hemisphere)公司。随着国内对农业装备横向控制技术研究的深入,国内以上海联适、农芯科技、中创博远、惠达科技、上海华测、无锡卡尔曼等公司为代表的农业装备北斗自动驾驶技术产品逐步占领了国内大部分市场,并开始逐步开拓欧美市场。两款国内农业装备横向控制技术典型产品和主要核心装置如图 5 所示。



(a)上海联适AF301农业装备北斗自动驾驶系统



(b)农芯科技AMG-1202农业装备北斗自动驾驶系统

图 5 国内农业装备横向控制技术产品

Fig. 5 Domestic agricultural machinery lateral control technology products

1.5 纵向控制

纵向控制是指受控农业装备在各种作业、运输工况下行驶速度控制和挂载农业机具的提升位置控制。纵向控制的研究主要包含定速巡航控制、机组系统建模和机具耕深控制 3 部分。

1.5.1 农业装备定速巡航控制方法

农业装备定速巡航控制方式主要分为 3 种:①原动机转速保持不变,通过调节传动系传动比调节行驶速度。②传动系传动比保持不变,通过调节原动机转速调节行驶速度。③原动机转速与传动系传动比同时调节实现行驶速度调节。

KAYACAN 等[149]设计了一款 PID 控制器来实现速度控制,田间试验时的速度控制误差为 0.04 m/s。ROSHANIANFARD 等[150]指出开发自动驾驶农业车辆时,须选用自动变速器的车辆,有利于通过 TCU 发送命令控制车辆的纵向速度。韩科立等[151]以雷沃 TG1254 型机械换挡拖拉机为平台,设计了一种基于步进电机的油门自动调节装置,研制了基于电-液综合式结构的自动机械式变速操纵装置,采用基于增量式 PID 控制算法的定速巡航方法,水泥路面行驶速度控制误差 0.2 m/s,自动变速机构反应时间最大为 19 s。郭娜等[152]提出了基于变论域自适应模糊 PID 插秧机行驶速度控制策略,以配备液压机械无级变速箱的高速乘坐式插秧机为试验平台,通过电动推杆拉动与油门踏板相连的钢丝绳实现油门的线控,道路试验表明插秧机行驶速度平均误差在 0.02 m/s 以内。魏传省[153]以约翰迪尔 4720 型静液压传动拖拉机为平台设计了基于 CAN 的拖拉机定速巡航控制系统,使用电动油门调节器对油门踏板实现线控并从其获取油门开度,在水泥路面空载、田间空载和平地作业 3 种工况下进行了试验,速度控制误差为 0.012 m/s。

农业装备定速巡航控制多采用定转速变传动比、定传动比变转速、转速传动比耦合控制、转速传动比协同控制等 4 种控制策略(表 4)。前 3 种控制策略因原动机功率利用率、燃动经济性差等原因,不符合农业装备高效作业的发展方向。以提高功率利用率、降低燃油消耗为目标,根据农业装备工况,对传动系传动比和原动机转速进行协同控制,是农业装备定速巡航控制今后研究的重点。

1.5.2 农业装备机组系统建模

农业装备机组的数学模型主要包括作业机组动力学模型、电液悬挂系统数学模型、轮胎-土壤作用力模型以及犁体受力模型。

针对作业机组动力学模型,OSINENKO 等[154]分析了拖拉机牵引效率的主要因素,建立拖拉机动力学模型,基于驱动力反馈力矩提出了能够适应悬挂土壤条件的牵引控制算法,通过仿真分析验证了提出的控制策略有更好的控制性能。朱思洪等[155]建立了拖拉机和悬挂农具系统振动微分方程,通过仿真分析,研究了拖拉机悬挂不同质量农具时拖拉

表 4　农业装备速度控制策略对比

Tab. 4　Comparison of agricultural machinery speed control strategies

控制策略	控制原理	特点
定转速变传动比	原动机转速保持不变，通过调节传动系传动比调节行驶速度	单变量，车速控制简便；原动机功率利用率低，燃动经济性低
定传动比变转速	传动系传动比保持不变，通过调节原动机转速调节行驶速度	
转速传动比耦合控制	原动机转速和传动系传动比成比例同时变化	双变量耦合为单变量，车速控制简便；原动机转速波动较大，燃动经济性不高
转速传动比协同控制	根据农业装备作业工况，智能调节原动机转速和传动系传动比	双变量协同控制，车速控制复杂；原动机功率利用率高，燃动经济性高

机与悬挂农具系统振动特性。BAUER 等[156]验证了犁耕作业时，三点悬挂上拉杆长度会对拖拉机犁沟轮和着地轮载荷变化产生影响，研究了后轮载荷、轮胎充气压力及其对拖拉机轮下接触压力的影响。

针对电液悬挂系统数学模型，赵建军[157]采用状态空间建立了拖拉机悬挂系统的负载敏感变量泵、电液比例控制阀的数学模型，田间试验结果表明，牵引力超调量小于 14.3%，耕深控制在 20 ~ 25 cm 范围内，效果良好。谭彧[158]建立了比例控制的液压悬挂系统数学模型，土槽试验结果表明，当力位综合调节的综合度值为 0.6 时，控制效果最优。杜巧连等[159]建立了耕深和阻力控制数学模型，试验结果表明，位控制过渡时间 0.65 s，误差 ±1.5 cm；力控制调节时间 7.5 s；力位综合控制耕深为 20 cm 时，耕深波动范围 ±1 cm。

针对轮胎-土壤互作模型，FARHADI 等[160]结合经验计算公式与田间试验，建立了轮胎气压影响拖拉机车轮打滑、牵引功率和牵引系数的数学模型，并提供了一种基于轮胎充气压力数值评估的车轮打滑预测方法；试验结果表明，当轮胎压力限制在 80 ~ 200 kPa 之间时，模型的最佳拟合优度 R^2 达到 0.957 5。LEE 等[161]利用统计框架和车辆-土壤相互作用试验数据，从一个简单的基于物理的轮胎-土壤相互作用模型构建随机元模型，并对模型进行了参数校准和响应预测；模型验证结果表明，根据作者提出的两种衡量指标，拉杆拉力的预测绝对误差分别小于 2% 和 0.4%。姜春霞等[162]为研究不同载荷、胎压、行驶速度下，土壤-轮胎接触面垂直应力的分布情况，为轮胎预埋了高精度阵列应力传感器，试验证明载荷对于垂直应力的影响最大，然后依次是胎压、行驶速度、纵向距离和横向距离。

现有农业装备机组系统建模研究主要以拖拉机为研究对象，为拖拉机电液悬挂系统设计、控制方法研究以及整机控制策略提供了基础数据和检验依据。后续拖拉机机组系统建模研究将着重关注农业装备自动驾驶的准确追踪路径与高质量牵引作业的综合需求。

1.5.3　机具耕深控制方法

现有机具耕深控制方法主要分为阻力控制（力调节）、位置控制（位置调节）、力位综合控制（即力位综合调节）以及滑转率控制。目前，力位综合控制和滑转率控制是农业装备机具耕深控制的主流方法。

针对力位综合控制方法，承鉴等[163]以重型拖拉机电液悬挂控制系统为研究对象，开展了以力位控制为代表的一系列电液悬挂系统自动控制研究。鲁植雄团队[164-166]提出了基于不同综合度系数的耕深模糊控制器，可以实现耕深的力位双参数控制，仿真结果表明，耕深从 0 到 20 cm 的响应时间低于 1.7 s，耕深为 20 cm 的最大误差在 ±1 cm 内。刘长卿等[167]针对力位综合控制器，考虑悬挂系统非线性和参数变化情况下控制性能适应性，田间试验表明，当权重系数为 0.7 时，牵引力为 16 350 N，牵引力标准差为 2 640 N；耕深为 1.84 cm，耕深标准差为 0.339 cm。

农业装备机组滑转率控制这一概念出现于 20 世纪 80 年代，主要针对拖拉机重载作业工况，国外学者 CHANCELLOR 等[168]、ISMAIL 等[169]发现控制车轮滑转率可实现拖拉机作业的节能、省油以及高效。随后，诸多学者投入研究，延续至今。现有面向滑转率控制的研究主要分为低速作业车轮滑转率测算[170-172]和拖拉机机组滑转率控制[173-176]。

国外对于拖拉机悬挂系统机具耕深控制的研究起步较早，开始于 20 世纪 30 年代，主要集中于大型拖拉机生产厂家，现在拖拉机电液悬挂系统开始成为拖拉机市场主流必备。德国博世力士乐公司（Bosch Rexroth）研制的大功率拖拉机 EHR 电液悬挂系统最具代表性，该系统配有微型处理器，可检测车速、发动机转速、耕深、牵引阻力等电信号，实现力调节、位调节、滑转率控制以及其他控制模式。此外，如约翰迪尔（John Deere）、芬特（Fendt）、克拉斯（CLASS）等大型农业装备厂家的拖拉机产品大多配有自产的电液悬挂系统，如图 6 所示。

而国内的电液悬挂系统相关研究开始于 20 世纪 70 年代，主要集中在中国农业大学、南京农业大学等科研院校，于 2000 年国内开始系统研发电液悬



(a) John Deere 7R (b) Fendt 800 Vario

图 6 典型拖拉机电液悬挂装置

Fig. 6 Typical tractor electro hydraulic hitch

挂系统及内置控制方法,并开始产出初代电液悬挂系统产品,其中最具代表性的是博创联动。现阶段,与国外先进农业装备厂家相比,国内电液悬挂系统产品成熟度不足,可靠性仍待检验,推广应用仍显薄弱,随着农业装备智能化进一步发展,电液悬挂系统相关产品将很快进入快速发展阶段。

2 典型农业场景自动驾驶应用

农业装备自动驾驶技术的应用主要分为 3 方面:以农业装备横向控制为主的自动导航技术与产品的应用;增加环境感知、自动避障、路径规划等功能的农业装备自动驾驶技术应用;具备自动驾驶功能的农业装备在农业全程无人化生产方面的集成应用[177-179]。

2.1 自动导航技术与产品应用

欧美日等发达国家在农业装备自动驾驶领域研究较早。美国斯坦福大学在 20 世纪 90 年代将差分 GPS 应用于 John Deere 7800 型拖拉机进行自动导航控制,在速度 0.33 m/s 下实现了直线行驶横向偏差 0.38 cm 的控制精度[180]。日本于 20 世纪 90 年代成功研制了基于 GPS 的自动导航拖拉机[181],德国 Fendt 公司同时也发布了领航-跟随型自动驾驶拖拉机,实现人工驾驶主机、从机自主跟随的机群作业。美国天宝(Trimble)、加拿大半球(Hemisphere)、日本拓普康(Topcon)等知名公司先后推出农业装备自动导航技术产品,成为行业标杆[182]。我国于 2000 年前后开始研究农业装备自动驾驶系统,落后国外近 10 年[183]。罗锡文等[82]基于东方红 X-804 型拖拉机平台开发了 RTK-DGPS 自动导航控制系统,拖拉机行驶速度为 0.8 m/s 时,平均横向偏差小于 0.03 m[82]。中国农业大学于 2009 年开展了基于视觉的收获机导航系统研究,割幅控制误差在 0.18 m 以内[184]。近年来,随着北斗卫星定位系统的成熟与商业化应用,基于卫星定位的农业装备自动导航技术实现了新的突破,如北京农业智能装备技术研究中心创新性提出了基于 PID 参数自适应的手动优先自动转向控制方法,解决了自动转向装置适应性差、应急响应慢等问题,成功研发了基于 GNSS 的 AMG-1102 系列产品,该产品具备手动优先电液转向控制、速度自适应的作业纯路径跟踪控制等多项国内首创技术,导航控制误差在 ±2 cm 内[185]。在应用方面,随着人工成本的不断增加,农业装备自动导航的市场需求愈加旺盛,催生出了上海华测、上海联适、农芯科技等多家优秀的国产农业装备自动导航企业,研发的自动导航产品在新疆、黑龙江等地实现了批量化应用,如图 7 所示,目前累计推广量超过了 21 万台套,作业效果显著,有效打破了国外农业装备导航产品的垄断地位,提升了我国农业装备智能化水平[186]。

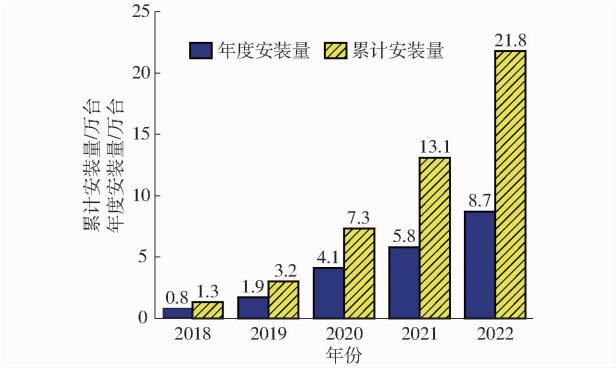


图 7 国产自动导航产品推广量

Fig. 7 Promotion volume of domestic automatic navigation products

2.2 自动驾驶整机集成与应用

在农业装备自动驾驶领域,美国 Autonomous Tractor Corporation(ATC)公司早在 2012 年就推出了无人驾驶拖拉机,能够自主完成直行、转弯、避障和常规作业[187]。2016 年,美国凯斯(Case IH)公司推出了目前最具代表性的无人驾驶拖拉机,该拖拉机安装有激光雷达、车载相机和 GPS 天线并取消了驾驶室,能够实现多机协同进行路径规划,完成多种类型作业任务,成为无人驾驶拖拉机技术产品代表[188]。2022 年 1 月,美国 John Deere 在 Consumer Electronics Show 上公布了一款可量产的全自动拖拉机 8R,该拖拉机将 GPS 自动导航技术与农业装备具 TruSet™ 自动调平技术相结合,实现了拖拉机机组无人化作业,无需坐在驾驶室内即可开展耕种作业。此外,该自动拖拉机配备了 6 台 360°视觉的立体摄像头,可以对农田常见障碍物进行检测,并计算出障碍物距离,拖拉机自动驾驶系统根据障碍物情况进行自主避障。目前,该拖拉机已作为成熟产品进入了量产阶段,如图 8 所示[189]。

日本久保田(Kubota)于 2016 年推出了具有自动转向和直线行走的插秧机、拖拉机,2018 年发布了具备更高级别自动驾驶功能的 Agri Robo 系列农业装备,包括无人拖拉机、无人插秧机和无人收获



图 8　迪尔自动驾驶拖拉机

Fig. 8　John Deere self-driving tractor

机[190]。此外，久保田将于 2024 年发售世界首个产品化的无人驾驶联合收获机，如图 9 所示。该收获机安装有 4 个 AI 摄像头、2 个毫米波雷达、激光传感器、RTK－GNSS 定位装置等，具备收获路径规划、巡线导航、遇障碍停车等自动驾驶功能，此外还可根据激光传感器检测出的作物高度自动调整割台高度及收获机作业速度等参数，实现倒伏角度为 60°的水稻和小麦的收获作业。



图 9　久保田无人驾驶收获机（DRH1200A－A 型）

Fig. 9　Kubota Agri Robocombine DRH1200A－A

我国第一拖拉机股份有限公司于 2016 年在中国国际农业机械展览会发布了国产东方红 LF1104－C 无人驾驶拖拉机，并进行田间作业演示[191]。该款无人驾驶拖拉机装配了卫星定位加惯导、视觉与雷达传感器，具备远程一键启动、自动路径规划及导航、自动换向、自动刹车、远程遥控随时干预等多项功能，横向控制精度达 2.5 cm，在旱田播种、水田打浆、平地作业实地测试中效果良好，如图 10 所示。

国外发达国家和地区农业装备自动驾驶技术发展早，产品相对成熟，应用较为广泛。近几年，随着国内市场需求的不断扩大，国产农业装备在实现自动导航的基础上，正在向整机无人化作业方向发展。与国外发达国家相比，我国在农业装备作业环境感知、自主规划与决策等领域还需要进一步开展深入研究。

2.3　农业装备全程无人化作业与技术体系构建

智能农业装备实现单机无人化作业后，开始



图 10　东方红无人驾驶拖拉机（LF1104－C 型）

Fig. 10　Dongfanghong unmanned tractor LF1104－C

向多机协同作业和技术体系集成方向发展[192]。日本北海道大学（Hokkaido University）和日立解决方案公司（Hitachi Solutions）联合开发了一套针对智能农业装备作业控制的农田管理信息系统，可以管理并整合多种精准农业信息，实现地块管理、路径规划以及无人农业装备多机作业远程管控[20]。在 2016 年英国哈珀亚当斯大学（Harper Adams University）与 Precision Decision 公司合作创立了世界首个小麦无人农场，首次实现了冬小麦全程无人化生产作业试验，并获得成功。试验证明了小麦无人化生产的可行性，成为智慧农业发展的标志性事件，也代表了世界当前的最新发展水平[4]。我国在农业装备全程无人化作业与技术体系构建方面也取得了很大进展，华南农业大学、北京市农林科学院智能装备技术研究中心分别于 2019 年和 2021 年构建了国内首个水稻无人农场与小麦无人农场[3,78]，在小麦、水稻耕、种、管、收等作业环节均实现了全程无人化作业，提高了农业装备作业效率，降低了人工劳动强度。在全球农业劳动力日益减少、农业生产对农业装备作业质量与作业效率要求不断提高、农业生产成本日趋增加的大背景下，未来谁来种田、怎样种田甚至无人种田问题凸显，农业生产全程无人化作业技术已成为农业科技领域的前沿技术，在未来农业生产中将发挥重要作用。

3　农业装备自动驾驶分级

农业装备自动驾驶是实现智能农业装备、农业机器人、无人化农场的关键。近年来，“智能农机”、“农业机器人”、“无人驾驶”、“无人农机”、“无人农场”、“无人化农业”等农机自动驾驶相关概念频频被提及，成为行业热点[78]。在农机自动驾驶技术研究与实际应用中，自动驾驶技术水平

和自动化程度不一,差别较大。例如,某些装置/产品仅具备基本的辅助驾驶功能,有些装置/产品具备了地块边界识别等自动化功能等,还有些装置/产品能够实现障碍物识别、自动规划路径等自主作业功能,还有些装置/产品具备了播种量施肥量等作业精准自动控制功能。但这些装置/产品都被称为“自动驾驶”。因此,为了保障农业装备自动驾驶行业的健康发展,农业装备自动驾驶的等级划分已成为行业的迫切需求。

2013 年,美国高速公路安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)率先发布了自动驾驶汽车的分级标准,将自动驾驶分为 5 个级别,如表 5 所示。2014 年国际自动机工程师学会(SAE - International)发布的 SAE J3016 标准提出了 0 ~ 5 级分类法,将汽车驾驶自动化分为从无驾驶自动化(0 级)直至完全驾驶自动化(5 级)在内的 6 个等级。2021 年,我国参考 SAE J3016 标准,颁布实施了适用于我国国情的汽车驾驶自动化分级国家标准 GB/T 40429—2021《汽车驾驶自动化分级》;该标准分为应急辅助(0 级)至完全自动驾驶(5 级)共 6 个等级。SAE J3016 和 GB/T 40429 均对汽车自动驾驶技术标准程度分为 6 个等级,并对汽车自动驾驶系统的整体发展方向进行了专业计划,从而在对应的产业内得到发展。

表 5 自动驾驶分级

Tab. 5 Automatic driving classification

等级	NHTSA	等级	SAE	等级	GB
L0	Momentary Driver Assistance (临时驾驶员辅助)	L0	No Driving Automation (人工驾驶)	0 级	应急辅助
L1	Driver Assistance (驾驶员辅助)	L1	Driver Assistance (辅助驾驶)	1 级	部分驾驶辅助
L2	Additional Driver Assistance (附加驾驶员辅助)	L2	Partial Driving Automation (部分自动驾驶)	2 级	组合驾驶辅助
L3	Conditional Automation (有条件自动化)	L3	Conditional Driving Automation (有条件自动驾驶)	3 级	有条件自动驾驶
L4	High Automation (高度自动化)	L4	High Driving Automation (高度自动驾驶)	4 级	高度自动驾驶
L5	Full Automation (完全自动化)	L5	Full Driving Automation (完全自动驾驶)	5 级	完全自动驾驶

相对于汽车领域,农业装备自动驾驶除了关注自走式动力部分之外,更应注重农业装备机组整体的作业自动化程度,是在横向和纵向控制的基础上,利用自动化技术提升农业装备作业性能和效率。2017 年 CEMA 峰会(CEMA Summit)上,美国凯斯(Case IH)公司基于美国技术及产业实践,在国际上率先提出了农业装备自动化分级(Levels of Autonomy)方法,将农业装备自动化分为从辅助驾驶(1 级)直至完全自动化(5 级)在内的 5 个等级[193]。凯斯公司提出的农业装备自动化分级方法未给出详细的分级说明和技术要求,亦未形成标准或技术规范。2021 年,中国农业机械学会发布团体标准 T/NJ 1260—2021《农林拖拉机和自走式机械驾驶自动化分级》,将农林拖拉机和自走式机械的驾驶自动化划分为 6 个等级,包括全人工驾驶系统(0 级)至全工况驾驶自动化系统(5 级)。该团标主要关注自走动力部分,并未过多涉及更关键的自动作业部分。

随着 2022 年中央一号文件强调农业装备“优机优补”和 2023 年中央一号文件强调“支持北斗智能监测终端及辅助驾驶系统集成应用”,2023 年 3 月,农业农村部农产品质量安全监管司批复:由北京市农林科学院智能装备技术研究中心牵头制定《农机自动驾驶分级》行业标准。我国自主制定的农业装备自动驾驶分级国家标准、农业装备自动驾驶分级检测大纲也逐步提上议事日程。至此,我国自动驾驶相关概念定义不清晰、自动驾驶分级模糊、自动驾驶优机优补依据缺乏的问题会逐步解决。

在政策和市场的双擎牵引下,我国农业装备自动驾驶技术发展迅速,技术体系正在逐步建立,农业装备自动驾驶产业模式正在示范应用中不断走向成熟。

4 展望

农业装备自动驾驶技术作为智慧农业生产的关键支撑技术,正推动和引领现代农业生产向高效、精准、智能和可持续方向发展。非结构环境、高精度农艺和强农时约束仍然是农业装备自动驾驶技术必须应对的 3 个重要挑战,也是未来农业装备自动驾驶技术研发和实际应用中需要解决的关键问题。结合

我国农业装备自动驾驶技术研发和应用现状，未来工作中应注重 3 方面的问题：

（1）农业装备自动驾驶技术研发过程中，既要积极吸收道路车辆自动驾驶技术成果和经验，也要充分考虑农业机械这种典型非道路作业机组驾驶自动化和作业精准化的实际需求，突出作业精准化和驾驶自动化双重需求驱动的特点，针对性开展农业装备自动驾驶核心技术攻关和产品研发。

（2）农业装备自动驾驶技术应用示范方面，应按照技术发展规律，避免急于求成和消极悲观两种极端思维和做法。充分考虑实际生产需求，结合不同作物、不同区域、不同作业环节，积极开展多层次、多场景应用示范，促进科学研究、技术迭代和示范应用领域高效链接。

（3）结合农业装备自动驾驶技术和农业生产应用场景特点，加快农业装备自动驾驶技术分级规范和标准方面的研究，为技术研究、产品开发、应用推广和相关补贴支持政策制定提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man，JI Yuhan，LI Shichao，et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18.（in Chinese）

[2] 李道亮，李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. 农业机械学报，2020，51(7)：1－12.
LI Daoliang，LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(7)：1－12.（in Chinese）

[3] 罗锡文，廖娟，胡炼，等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：8－17.
LUO Xiwen，LIAO Juan，HU Lian，et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University，2021，42(6)：8－17.（in Chinese）

[4] 兰玉彬，赵德楠，张彦斐，等. 生态无人农场模式探索及发展展望[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：312－327.
LAN Yubin，ZHAO Denan，ZHANG Yanfei，et al. Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(9)：312－327.（in Chinese）

[5] 乔榆杰，杨鹏树，孟志军，等. 面向自动驾驶农机的农田地头边界线检测系统[J]. 农机化研究，2022，44(11)：24－30.
QIAO Yujie，YANG Pengshu，MENG Zhijun，et al. Detection system of headland boundary line based on machine cision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，44(11)：24－30.（in Chinese）

[6] 史宝坤，李欣，魏春燕，等. 基于 Mask R－CNN 网络的农田地块识别[J]. 现代信息科技，2020，4(4)：25－27.
SHI Baokun，LI Xin，WEI Chunyan，et al. Farmland block recognition based on Mask R－CNN network[J]. Modern Information Technology，2020，4(4)：25－27.（in Chinese）

[7] 蒋冬生. 基于 Kinect 的果园对靶变量喷雾系统研究[D]. 镇江：江苏大学，2020.
JIANG Dongsheng. Research on orchard target variable spray system based on Kinect[D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2020.（in Chinese）

[8] 杨长辉，刘艳平，王毅，等. 自然环境下柑橘采摘机器人识别定位系统研究[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：14－22.
YANG Changhui，LIU Yanping，WANG Yi，et al. Research and experiment on recognition and location system for citrus picking robot in natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(12)：14－22.（in Chinese）

[9] MATTHIES L，RANKIN A. Negative obstacle detection by thermal signature[C]// Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems，2003.

[10] 汪佩，郭剑辉，李伦波，等. 基于单线激光雷达与视觉融合的负障碍检测算法[J]. 计算机工程，2017，43(7)：303－308.
WANG Pei，GUO Jianhui，LI Lunbo，et al. Negative obstacle detection algorithm based on single line laser radar and vision fusion[J]. Computer Engineering，2017，43(7)：303－308.（in Chinese）

[11] 尚业华，张光强，孟志军，等. 基于欧氏聚类的三维激光点云田间障碍物检测方法[J]. 农业机械学报，2022，53(1)：23－32.
SHANG Yehua，ZHANG Guangqiang，MENG Zhijun，et al. Field obstacle detection method of 3D LiDAR point cloud based on Euclidean clustering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(1)：23－32.（in Chinese）

[12] 张岩，潘胜权，解印山，等. 相机与毫米波雷达融合检测农机前方田埂[J]. 农业工程学报，2021，37(15)：169－178.
ZHANG Yan，PAN Shengquan，JIE Yinshan，et al. Detection of ridge in front of vehicle based on fusion of camera and millimeter wave radar[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(15)：169－178.（in Chinese）

[13] 薛金林，程峰，汪冰清，等. 基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法[J]. 农业机械学报，2023，54(4)：233－240.
XUE Jinlin，CHENG Feng，WANG Bingqing，et al. Method for millimeter wave radar farm obstacle detection based on invalid target filtering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(4)：233－240.（in Chinese）

[14] ARAB D P, SPISSER M, ESSERT C. Complete coverage path planning for wheeled agricultural robots[J]. Journal of Field Robotics, 2023,40(6):1460 – 1503.
[15] 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 277 – 293.
ZHAO Chunjiang. Advances of research and application in remote sensing for agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 277 – 293. (in Chinese)
[16] 廖小罕,肖青,张颢. 无人机遥感:大众化与拓展应用发展趋势[J]. 遥感学报, 2019, 23(6): 1046 – 1052.
LIAO Xiaohan,XIAO Qing,ZHANG Hao. UAV remote sensing: popularization and expand application development trend[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 23(6): 1046 – 1052. (in Chinese)
[17] WANG L, WANG Y,ZHANG J, et al. Research on boundary recognition and extraction method of field operation area based on UAV remote sensing images[J]. IFAC – Papers Online, 2019, 52(30): 231 – 238.
[18] ARGO W, RACHMAT A, SANTOSO H, et al. The development of mobile-based farmland mapping system with drones and wireless devices[J]. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020,9(5): 7894 – 7902.
[19] MOLLICK T, AZAM M G, KARIM S. Geospatial-based machine learning techniques for land use and land cover mapping using a high-resolution unmanned aerial vehicle image[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2023, 29: 100859.
[20] WANG H, REN Y, MENG Z. A farm management information system for semi-supervised path planning and autonomous vehicle control[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 7497.
[21] WU S, SU Y, LU X, et al. Extraction and mapping of cropland parcels in typical regions of southern China using unmanned aerial vehicle multispectral images and deep learning[J]. Drones, 2023, 7(5): 285.
[22] WANG X, SHU L, HAN R, et al. A survey of farmland boundary extraction technology based on remote sensing images[J]. Electronics, 2023, 12(5): 1156.
[23] LI X, XU X, YANG R, et al. DBC: deep boundaries combination for farmland boundary detection based on UAV imagery[C]// IGARSS 2020—2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020: 1464 – 1467.
[24] MAO J, GUO Z, GENG H, et al. Design of visual navigation system of farmland tracked robot based on raspberry pie[C]// 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2019.
[25] 蔡道清,李彦明,覃程锦,等. 水田田埂边界支持向量机检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 22 – 27.
CAI Daoqing, LI Yanming, TAN Chengjin, et al. Detection method of boundary of paddy fields using support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 22 – 27. (in Chinese)
[26] 王侨,刘卉,杨鹏树,等. 基于机器视觉的农田地头边界线检测方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 18 – 27.
WANG Qiao, LIU Hui, YANG Pengshu, et al. Detection method of headland boundary line based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 18 – 27. (in Chinese)
[27] 洪梓嘉,李彦明,林洪振,等. 基于双目视觉的种植前期农田边界距离检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 27 – 33.
HONG Zijia, LI Yanming, LIN Hongzhen, et al. Field boundary distance detection method in early stage of planting based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(5): 27 – 33. (in Chinese)
[28] 何勇,蒋浩,方慧,等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 21 – 32.
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of intelligent obstacle detection methods of vehicles and their application on agriculture[J]. Transactions of the CSAE,2018, 34(9): 21 – 32. (in Chinese)
[29] 成科扬,朱雪森,裴运申,等. 农业自动化机械障碍物检测研究进展[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 415 – 425.
CHENG Keyang, ZHU Xuesen, PEI Yunshen, et al. Research progress of agricultural automatic machinery obstacle detection [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition),2023, 44(4): 415 – 425. (in Chinese)
[30] 薛金林,李雨晴,曹梓建. 基于深度学习的模糊农田图像中障碍物检测技术[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 234 – 242.
XUE Jinlin, LI Yuqing, CAO Zijian. Obstacle detection based on deep learning for blurred farmland images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(3): 234 – 242. (in Chinese)
[31] 冯吉,胡佳宁,于家旋,等. 基于激光雷达信息的履带式自动割草机障碍物检测[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(5): 145 – 149.
FENG Ji, HU Jianing, YU Jiaxuan, et al. Crawler automatic mower obstacle detection based on LiDAR information[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 145 – 149. (in Chinese)
[32] HU Q, WANG P, SHEN C, et al. Pushing the limits of deep CNNs for pedestrian detection[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(6): 1358 – 1368.
[33] 陈成坤,陈军. 基于双目视觉的果园障碍物检测与定位[J]. 农机化研究, 2023, 45(4): 196 – 201.
CHEN Chengkun, CHEN Jun. Orchard obstacle detection and location based on binocular vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(4): 196 – 201. (in Chinese)
[34] 杨福增,刘珊,陈丽萍,等. 基于立体视觉技术的多种农田障碍物检测方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 168 – 172.
YANG Fuzeng, LIU Shan, CHEN Liping, et al. Detection method of various obstacles in farmland based on stereovision

technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 168 – 172. (in Chinese)

[35] 陈斌,张漫,徐弘祯,等. 基于改进 YOLO v3 – tiny 的全景图像农田障碍物检测[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):58 – 65.
CHEN Bin, ZHANG Man, XU Hongzhen, et al. Farmland obstacle detection in panoramic image based on improved YOLO v3 – tiny[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):58 – 65. (in Chinese)

[36] 刘家银,唐振民,王安东,等. 基于多激光雷达与组合特征的非结构化环境负障碍物检测[J]. 机器人, 2017, 39(5): 638 – 651.
LIU Jiayin, TANG Zhenmin, WANG Andong, et al. Negative obstacle detection in unstructured environment based on multiple LiDARs and compositional features[J]. Robot, 2017, 39(5): 638 – 651. (in Chinese)

[37] 蔡道清. 非结构农田环境下的自主作业感知技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
CAI Daoqing. Research on autonomous operation perception technology in unstructured farmland and environment[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)

[38] 赵学观,马伟,高原源,等. 基于逆透视变换的条播作物早期作物行识别[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 668 – 675.
ZHAO Xueguan, MA Wei, GAO Yuanyuan, et al. Identification of early crop row for drill crops based on reverse perspective transformation[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition),2019, 40(6): 668 – 675. (in Chinese)

[39] 韩长杰,郑康,赵学观,等. 大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 89 – 101.
HAN Changjie, ZHENG Kang, ZHAO Xueguan, et al. Design and experiment of row identification and row-oriented spray control system for field cabbage crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 89 – 101. (in Chinese)

[40] 罗晨晖. 多信息特征融合的作物行识别与路径规划研究[D]. 镇江:江苏大学, 2020.
LUO Chenhui. Research on crop row recognition and path planning based on multi-information fusion[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)

[41] ZHANG X, LI X, ZHANG B, et al. Automated robust crop-row detection in maize fields based on position clustering algorithm and shortest path method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 165 – 175.

[42] 王侨,孟志军,付卫强,等. 基于机器视觉的玉米苗期多条作物行线检测算法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 208 – 220.
WANG Qiao, MENG Zhijun, FU Weiqiang, et al. Detection algorithm of multiple crop row lines based on machine vision in maize seedling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(4): 208 – 220. (in Chinese)

[43] 王爱臣,张敏,刘青山,等. 基于区域生长均值漂移聚类的苗期作物行提取方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 202 – 210.
WANG Aichen, ZHANG Min, LIU Qingshan, et al. Seedling crop row extraction method based on regional growth and mean shift clustering[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 202 – 210. (in Chinese)

[44] 李祥光,赵伟,赵雷雷. 缺株玉米行中心线提取算法研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 203 – 210.
LI Xiangguang, ZHAO Wei, ZHAO Leilei. Extraction algorithm of the center line of maize row in case of plants lacking[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 203 – 210. (in Chinese)

[45] YANG Y, ZHOU Y, YUE X, et al. Real-time detection of crop rows in maize fields based on autonomous extraction of ROI[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 118826.

[46] ZHANG Z, ZHANG X, CAO R, et al. Cut-edge detection method for wheat harvesting based on stereo vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106910.

[47] 伟利国,张小超,汪凤珠,等. 联合收割机稻麦收获边界激光在线识别系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 30 – 35.
WEI Liguo, ZHANG Xiaochao, WANG Fengzhu, et al. Design and experiment of harvest boundary online recognition system for rice and wheat combine harvester based on laser detection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 30 – 35. (in Chinese)

[48] 孟志军,尹彦鑫,罗长海,等. 农机深松作业远程监测系统设计与实现[J]. 农业工程技术, 2018, 38(18): 34 – 37.
MENG Zhijun, YIN Yanxin, LUO Changhai, et al. Design and implementation of remote monitoring system for subsoiling operation of agricultural machinery[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(18): 34 – 37. (in Chinese)

[49] 周俊博,朱烨均,肖茂华,等. 采用 LWD – QPSO – SOMBP 神经网络的拖拉机柴油机故障诊断[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 39 – 48.
ZHOU Junbo, ZHU Yejun, XIAO Maohua, et al. Fault diagnosis of tractor diesel engine based on LWD – QPSO – SOMBP neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 39 – 48. (in Chinese)

[50] 杨丽丽,田伟泽,徐媛媛,等. 谷物联合收割机油耗随机森林预测模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 275 – 281.
YANG Lili, TIAN Weize, XU Yuanyuan, et al. Predicting fuel consumption of grain combine harvesters based on random forest[J]. Transactions of the CSAE,2021, 37(9): 275 – 281. (in Chinese)

[51] RAHEMAN H, JHA S. Wheel slip measurement in 2WD tractor[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1): 89 – 94.

[52] ZOERB G, POPOFF J. Direct indication of tractor-wheel slip[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1967, 9(2): 91 - 93.
[53] GREVIS J, DEVOE D R, BLOOME P D, et al. Microcomputer-based data acquisition for tractors[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26(3): 692 - 695.
[54] ERICKSON L R, LARSEN W E, RUST S J. Four-wheel drive tractor axle and drawbar horsepower: field evaluation and analysis[J]. American Society of Agricultural Engineers (Microfiche Collection),1938,26(3):692 - 695.
[55] THANSANDOTE A, STUCHLY S, MLADEK J, et al. A new slip monitor for traction equipment[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(5): 851 - 856.
[56] WANG Z, DOMIER K. Prediction of drawbar performance for a tractor with dual tires[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5): 1529 - 1533.
[57] GRISSO R, TAYLOR R, WAY T, et al. Tractive performance of 18.4 R46 and 18.4 R42 radial tractor tires[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(6): 739 - 745.
[58] FREELAND R, TOMPKINS F, WILHELM L. Portable instrumentation to study performance of lawn and garden ride-on tractors[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1989, 5(2): 143 - 147.
[59] KHALILIAN A, HALE S, HOOD C, et al. Comparison of four ground speed measurement techniques[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1989(31):369 - 374.
[60] TOMPKINS F, HART W, FREELAND R, et al. Comparison of tractor ground speed measurement techniques[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(2): 369 - 374.
[61] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(7): 381 - 388. (in Chinese)
[62] WEN C, XIE B, LI Z, et al. Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 73 - 88.
[63] 温昌凯,谢斌,李若晨,等. 拖拉机作业载荷数据平台设计与旋耕作业质量预测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 372 - 381.
WEN Changkai, XIE Bin, LI Ruochen, et al. Construction of tractor working load data platform and prediction of rotary tillage quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 372 - 381. (in Chinese)
[64] 李淑艳,杨世钊,翟友邦,等. 基于小波变换的拖拉机 PTO 载荷加速编辑方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 167 - 173.
LI Shuyan, YANG Shizhao, ZHAI Youbang, et al. Editing method of tractor PTO load acceleration based on wavelet transform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 167 - 173. (in Chinese)
[65] ZHANG Q, WU D, REID J, et al. Model recognition and validation for an off-road vehicle electrohydraulic steering controller [J]. Mechatronics, 2002, 12(6): 845 - 858.
[66] YIN J, ZHU D, LIAO J, et al. Automatic steering control algorithm based on compound fuzzy PID for rice transplanter[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2666.
[67] 谢斌,李皓,朱忠祥,等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 15 - 21.
XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE,2013, 29(4): 15 - 21. (in Chinese)
[68] 闫祥海,周志立,贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 74 - 81.
YAN Xianghai, ZHOU Zhili, JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor power take-off [J]. Transactions of the CSAE,2019, 35(19): 74 - 81. (in Chinese)
[69] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1 - 14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1 - 14. (in Chinese)
[70] 王宁,韩雨晓,王雅萱,等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 1 - 19.
WANG Ning, HAN Yuxiao, WANG Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(Supp. 1): 1 - 19. (in Chinese)
[71] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 17 - 26.
CHEN Kai, XIE Yinshan, LI Yanming, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022, 53(5): 17 - 26. (in Chinese)
[72] 刘明杰. 智能收获机路径规划与跟踪方法研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
LIU Mingjie. Research on path planning and path tracking methods of intelligent harvester[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
[73] 翟卫欣,王东旭,陈智博,等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 1 - 7.
ZHAI Weixin, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 1 - 7. (in Chinese)
[74] HE Z, BAO Y, YU Q, et al. Dynamic path planning method for headland turning of unmanned agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107699.
[75] WANG H, NOGUCHI N. Adaptive turning control for an agricultural robot tractor[J]. International Journal of Agricultural and

Biological Engineering, 2018, 11(6): 113 - 119.

[76] 秦昌礼. 基于数据融合的农机路径规划方法研究[D]. 淄博:山东理工大学, 2022.
QIN Changli. Research on path planning method of agricultural machinery based on date fusion[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)

[77] 王猛. 农机多机协同作业任务分配关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2021.
WANG Meng. Research on key technologies on farm task allocation for multi-machine cooperative operation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2021. (in Chinese)

[78] 尹彦鑫,孟志军,赵春江,等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业, 2022, 4(4): 1 - 25.
YIN Yanxin, MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, et al. State-of-the-art and prospect of research on key technical for unmanned farms of field crop[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 1 - 25. (in Chinese)

[79] 袁加红. 水稻插秧机最优覆盖路径规划研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2016.
YUAN Jiahong. Research on optimal complete coverage path planning for rice transplanter[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[80] 段贤强. 水稻直播机无人驾驶与智能作业系统研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
DUAN Xianqiang. Research on unmanned rice and intelligent working system of rice direct seeding machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. (in Chinese)

[81] NILSSON R S, ZHOU K. Decision support tool for operational planning of field operations[J]. Agronomy, 2020,10(2):229.

[82] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X - 804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139 - 145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X - 804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139 - 145. (in Chinese)

[83] KHAJEPOUR A, SHEIKHMOHAMMADY M, NIKBAKHSH E. Field path planning using capacitated arc routing problem [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105401.

[84] WANG H, NOGUCHI N. Autonomous maneuvers of a robotic tractor for farming[C] // 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Sapporo, 2016: 592 - 597.

[85] 师树谦,王亚磊. 农业机器人技术现状与发展趋势[J]. 新疆农机化, 2023(3): 12 - 16.
SHI Shuqian, WANG Yalei. Current technical situation and development trend of agricultural robot[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2023(3): 12 - 16. (in Chinese)

[86] 李晓旭,马兴录,王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 9 - 19.
LI Xiaoxu, MA Xinglu, WANG Xianpeng. A survey of path planning algorithms for mobile robots[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(7): 9 - 19. (in Chinese)

[87] ROSTAMI S M H, SANGAAISH A K, WANG J, et al. Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, 2019(1): 1 - 19.

[88] 劳彩莲,李鹏,冯宇. 基于改进 A* 与 DWA 算法融合的温室机器人路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 14 - 22.
LAO Cailian, LI Peng, FENG Yu. Path planning of greenhouse robot based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 14 - 22. (in Chinese)

[89] 曹如月,张振乾,李世超,等. 基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 548 - 554.
CAO Ruyue, ZHANG Zhenqian, LI Shichao, et al. Multi-machine cooperation global path planning based on A* algorithm and Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 548 - 554. (in Chinese)

[90] 翟志强,王秀倩,王亮,等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 542 - 547.
ZHAI Zhiqiang, WANG Xiuqian, WANG Liang, et al. Collaborative path planning for autonomous agricultural machinery of master-slave cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 542 - 547. (in Chinese)

[91] 姚竟发,滕桂法,霍利民,等. 联合收割机多机协同作业路径优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 12 - 18.
YAO Jingfa, TENG Guifa, HUO Limin, et al. Optimization of cooperative operation path for multiple combine harvesters without conflict[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 12 - 18. (in Chinese)

[92] LI S, ZHANG M, WANG N, et al. Intelligent scheduling method for multi-machine cooperative operation based on NSGA - Ⅲ and improved ant colony algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107532.

[93] 王博,毛罕平,王亚娜,等. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 45 - 53.
WANG Bo, MAO Hanping, WANG Ya'na, et al. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 45 - 53. (in Chinese)

[94] JENSEN M, BOCHTIS D, SORENSEN C, et al. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(4): 1054 - 1061.

[95] D'URSO G, SMITH S, METTU R, et al. Multi-vehicle refill scheduling with queueing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 44 - 57.
[96] 王猛,赵博,刘阳春,等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 199 - 210.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 199 - 210. (in Chinese)
[97] 邵敏. 面向智能农机作业的全覆盖路径规划研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2021.
SHAO Min. Research on complete coverage path planning for intelligent agricultural machinery[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[98] ASTOLFI A, BOLZERN P, LOCATELLI A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: a Lyapunov-based approach[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1):154 - 160.
[99] 刘金波,迟德霞,金宏亮. 国内的农用车辆自动转向系统研究进展[J]. 农业科技与装备, 2011(4): 67 - 68.
LIU Jinbo, CHI Dexia, JIN Hongliang. Research progress on automatic steering system in domestic farm vehicles[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2011(4): 67 - 68. (in Chinese)
[100] 吴晓鹏,赵柞喜,张智刚,等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2009,40(增刊): 1 - 5.
WU Xiaopeng, ZHAO Zuoxi, ZHANG Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.): 1 - 5. (in Chinese)
[101] 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148 - 152.
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010, 41(11): 148 - 152. (in Chinese)
[102] 李逃昌,胡静涛,高雷. 基于级联式控制策略的农业机械鲁棒自适应路径跟踪控制[J]. 机器人, 2014, 36(2): 241 - 249.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei. Robust adaptive path tracking control of agricultural machines based on cascaded control strategy[J]. Robot, 2014, 36(2): 241 - 249. (in Chinese)
[103] FU W, WU G, YUE C, et al. Development of tractor automatic steering system with manual priority function[C]// 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2015: 555 - 559.
[104] 孟志军,付卫强,徐飞军,等. 手动优先的拖拉机自动转向装置:CN 201592732 U[P]. 2010 - 09 - 29.
[105] 赵春江,孟志军,付卫强,等. 手动优先的拖拉机自动转向方法及其装置:CN 101774398 B[P]. 2011 - 12 - 14.
[106] 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导航系统[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 11 - 19.
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11 - 19. (in Chinese)
[107] 陈文良,宋正河,毛恩荣. 拖拉机自动驾驶转向控制系统的设计[J]. 华中农业大学学报, 2005(增刊): 57 - 62.
CHEN Wenliang, SONG Zhenghe, MAO Enrong. Design of steering control system for automatic drive of tractor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(Supp.): 57 - 62. (in Chinese)
[108] GONZÁLEZ A, ALONSO S, GOMEZ-GIL J. Design, development and implemementation of a steering controller box for an automatic agricultural tractor guidance system, using fuzzy logic[C]// Technological Developments in Education and Automation, Springer Netherlands, 2010: 153 - 158.
[109] 刘阳. 拖拉机自动导航系统 CAN 总线的设计与实现[D]. 石河子:石河子大学, 2012.
LIU Yang. Design and implement CAN-bus of automatic navigation system on the tractor[D]. Shihezi: Shihezi University, 2012. (in Chinese)
[110] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(6): 32 - 40. (in Chinese)
[111] 张闻宇. 基于 BDS(北斗)的油菜直播机组作业导航技术研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
ZHANG Wenyu. Automatic navigation technology for direct-seeding planter for rapeseed based BDS[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[112] 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)
[113] MICHAEL LEE O C. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Stanford University, 1998.
[114] 郝思佳. 基于 GNSS 的拖拉机-播种机运动模算法仿真与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
HAO Sijia. Tractor - planter simulation and experimental research on motion trajectory[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
[115] 郝思佳,李丽霞,付卫强,等. 牵引式农机—机具二维三自由度运动学模型研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10): 111 - 117.

HAO Sijia, LI Lixia, FU Weiqiang, et al. Research on 3 - DOF kinematic model of 2 - D trailed agricultural machinery-machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10): 111 - 117. (in Chinese)

[116] 陈军,韩冰,朱忠祥,等. 拖拉机半挂车机组自动直线倒车控制器设计与实验[J]. 农业机械学报, 2008,39(1): 102 - 105.
CHEN Jun, HAN Bing, ZHU Zhongxiang, et al. Optimal control for automatic backward driving system of tractor-trailer combination along rectilinear path[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 102 - 105. (in Chinese)

[117] 朱忠祥,陈军,鸟巢谅. 基于 PD 控制的拖拉机半挂车机组自动直线倒车系统[J]. 农业机械学报, 2006,37(7): 98 - 100,73.
ZHU Zhongxiang, CHEN Jun, JORISU Ryo. Automatic backward driving system of tractor-trailer combination along rectilinear path using PD control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 98 - 100, 73. (in Chinese)

[118] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82: 32 - 43.

[119] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. Mechatronics, 2014, 24(8): 926 - 933.

[120] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Nonlinear modeling and identification of an autonomous tractor-trailer system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106: 1 - 10.

[121] ZANCHETTA M, TAVERNINI D, SORNIOTTI A, et al. Trailer control through vehicle yaw moment control: theoretical analysis and experimental assessment[J]. Mechatronics, 2019, 64: 102282.

[122] 陈军,朱忠祥,鸟巢谅,等. 基于神经网络的农用车辆自动跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2007,38(5): 131 - 133.
CHEN Jun, ZHU Zhongxiang, JORISU Ryo, et al. Automatic on-tracking control of farm vehicle based on neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 131 - 133. (in Chinese)

[123] WANG H, NOGUCHI N. Real-time states estimation of a farm tractor using dynamic mode decomposition [J]. GPS Solutions, 2021, 25(1): 16.

[124] 白晓平,孟鹏,王卓,等. 基于运动特性的农机导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 21 - 27.
BAI Xiaoping, MENG Peng, WANG Zhuo, et al. Control method for navigation based on kinetic characteristic of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 21 - 27. (in Chinese)

[125] 单云霄. 城市无人驾驶规划与控制系统的关键技术研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018.
SHAN Yunxiao. Research on key technology of the system of the motion planning and control with applications to autonomous urban driving[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)

[126] COULTER R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm[M]// Carnegie Mellon University, The Robotics Institute, 1992.

[127] THRUN S, MONTEMERLO M, DAHLKAMP H, et al. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 661 - 692.

[128] NOGUCHI N, ISHII K, TERAO H. Development of an agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensors[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67(1): 1 - 15.

[129] KARKEE M, STEWARD R. Study of the open and closed loop characteristics of a tractor and a single axle towed implement system[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(6): 379 - 393.

[130] BLOSCH M, WEISS S, SCARAMUZZA D, et al. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments [C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 21 - 28.

[131] CUTLER C, RAMAKER B L. Dynamic matrix control: a computer control algorithm [C] // Joint Automatic Control Conference, 1980: 72.

[132] ZHANG Q. A generic fuzzy electrohydraulic steering controller for off-road vehicles[J]. Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(9): 791 - 799.

[133] AMER A F, SALLAM E A, SULTAN I A. Adaptive sliding-mode dynamic controller for nonholonomic mobile robots[C]// 2016 12th International Computer Engineering Conference (ICENCO), 2016: 230 - 235.

[134] ASIF M, KHAN M, CAI N. Adaptive sliding mode dynamic controller with integrator in the loop for nonholonomic wheeled mobile robot trajectory tracking[J]. International Journal of Control, 2014, 87(5): 964 - 975.

[135] 张闻宇,王进,张智刚,等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 18 - 27.
ZHANG Wenyu, WANG Jin, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 18 - 27. (in Chinese)

[136] MIZUSHIMA A, ISHII K, NOGUSHI N, et al. Development of a low-cost attitude sensor for agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 198 - 204.

[137] WANG H, NOGUCHI N. Navigation of a robot tractor using the Japanese quasi-zenith satellite system (Part 1)—application of precise point positioning method to a robot tractor[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers, 2019, 81(4): 250 - 255.

[138] NOGUCHI N, BARAWID J O C. Robot farming system using multiple robot tractors in Japan agriculture[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 633 - 637.

[139] FUE K, PORTER W, BARNES E, et al. Autonomous navigation of a center-articulated and hydrostatic transmission rover using a modified pure pursuit algorithm in a cotton field[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4412.

[140] WOODS M R, KATUPITIYA J. Modelling of a 4WS4WD vehicle and its control for path tracking[C]// 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA), 2013: 155 - 162.

[141] 贾全. 拖拉机自动导航系统自适应控制方法研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2018.
JIA Quan. Adaptive control method for tractor auto-guidance system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2018. (in Chinese)

[142] 刘进一. 基于速度自适应的拖拉机自动导航控制系统研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
LIU Jinyi. Research on automatic navigation control system of tractor based on speed adaptation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[143] 王辉,王桂民,罗锡文,等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 - 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 - 19. (in Chinese)

[144] 张华强,王国栋,吕云飞,等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18 - 25.
ZHANG Huaqiang, WANG Guodong, LÜ Yunfei, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 18 - 25. (in Chinese)

[145] WANG H, NIU W, FU W, et al. A low-cost tractor navigation system with changing speed adaptability[C]// 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2021: 96 - 102.

[146] WANG H, REN Y, FU W, et al. Digitalizing and controlling a conventional tractor for autonomous farming work[C]// 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting, 2021:1 - 6.

[147] WANG H, NOGUCHI N. Navigation of a robot tractor using the centimeter level augmentation information via Quasi-Zenith satellite system[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2019, 12(4): 414 - 419.

[148] YANG L, NOGUCHI N. Development of a wheel-type robot tractor and its utilization[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 11571 - 11576.

[149] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Towards agrobots: identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 78 - 87.

[150] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N, OKAMOTO H, et al. A review of autonomous agricultural vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 91: 155 - 183.

[151] 韩科立,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 21 - 26.
HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 21 - 26. (in Chinese)

[152] 郭娜,胡静涛. 插秧机行驶速度变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 245 - 251.
GUO Na, HU Jingtao. Variable universe adaptive fuzzy-PID control of traveling speed for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 245 - 251. (in Chinese)

[153] 魏传省. 静液压式传动拖拉机定速巡航控制系统研制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
WEI Chuansheng. Development of the cruise control system for a HST tractor[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[154] OSINENKO P, GEISSLER M, HERLITZIUS T. A method of optimal traction control for farm tractors with feedback of drive torque[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 20 - 33.

[155] 朱思洪,徐刚,袁加奇,等. 农具质量对拖拉机悬挂农具系统振动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 30 - 37.
ZHU Sihong, XU Gang, YUAN Jiaqi, et al. Influence of implement's mass on vibration characteristics of tractor-implement system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 30 - 37. (in Chinese)

[156] BAUER F, PORTEŠ P, POLCAR A, et al. Differences in the wheel loads and contact pressure of the in-furrow and on-land rear tractor tyres with mounted and semi-mounted ploughs[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105190.

[157] 赵建军. 重型拖拉机电液提升器比例控制阀设计与特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHAO Jianjun. Design and characteristic study of proportional control valve for electro-hydraulic lifter of heavy tractor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[158] 谭彧. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究[D]. 北京:中国农业大学, 2004.
TAN Yu. The study of characteristics for hydraulic hitch & loading system in tractor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

[159] 杜巧连,熊熙程,魏建华. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 62 - 65.
DU Qiaolian, XIONG Xicheng, WEI Jianhua. Design and experiment on the control system of electro-hydraulic plow depth of tractor hydraulic hitch mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 62 -

65. (in Chinese)
[160] FARHADI P, ALIMARDANI R, MOHSENIMANESH A, et al. Effect of vertical load and inflation pressure of off road vehicle on compaction and motion resistance ratio[J]. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 2013, 5(6): 565.
[161] LEE J, GARD K. Vehicle-soil interaction: testing, modeling, calibration and validation[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 52: 9 - 21.
[162] 姜春霞,鲁植雄,陈丰. 人字形花纹轮胎压实土壤垂直应力分布规律研究[J]. 农业机械学报, 2019, 35(9):80 - 87.
JIANG Chunxia, LU Zhixiong, CHEN Feng. Vertical stress distribution rules in compacted topsoil under tire with chevron tread pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 35(9):80 - 87. (in Chinese)
[163] 承鉴,迟瑞娟,毛恩荣. 悬挂农具对电液悬挂系统拖拉机振动的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 24 - 32.
CHENG Jian, CHI Ruijuan, MAO Enrong. Influence of hanging farm implement on vibration of tractor with electrohydraulic hitch system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 24 - 32. (in Chinese)
[164] 鲁植雄,郭兵,高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 23 - 29.
LU Zhixiong, GUO Bing, GAO Qiang. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 23 - 29. (in Chinese)
[165] 郭兵,鲁植雄. 基于 AMESim 和 MATLAB 的拖拉机电控液压悬挂系统仿真[J]. 农机化研究, 2014, 36(1): 36 - 39.
GUO Bing, LU Zhixiong. Simulation of electronic hydraulic control system for tractor hitch based on AMESim/MATLAB[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014, 36(1): 36 - 39. (in Chinese)
[166] 徐煌,鲁植雄,宋延东. 拖拉机电液悬挂系统力位综合控制策略研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(4): 879 - 883.
XU Huang, LU Zhixiong, SONG Yandong. Study on force-position regulation of tractor electro-hydraulic hitch system[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(4): 879 - 883. (in Chinese)
[167] 刘长卿,华博,杜岳峰,等. 拖拉机电液悬挂系统动压反馈校正方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 535 - 541.
LIU Changqing, HUA Bo, DU Yuefeng, et al. Dynamic pressure feedback correction method for tractor electro hydraulic hitch[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020, 51(Supp. 1): 535 - 541. (in Chinese)
[168] CHANCELLOR W, ZHANG N. Automatic wheel-slip control for tractors[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(1): 17 - 22.
[169] ISMAIL S, SINGH G, GEE-CLOUGH D. Comparison of the field performance of three implement control systems for a tractor [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1983, 28(6): 521 - 536.
[170] 周慧,鲁植雄,白学峰,等. 四轮驱动拖拉机滑转率的测量与特性分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 423 - 427.
ZHOU Hui, LU Zhixiong, BAI Xuefeng, et al. Wheel slip measurement in 4WD tractor based on Labview[J]. Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition), 2013, 44(3): 423 - 427. (in Chinese)
[171] 曹青梅,周志立,张明柱,等. 拖拉机驱动轮滑转率估算法与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 35 - 41.
CAO Qingmei, ZHOU Zhili, ZHANG Mingzhu, et al. Algorithm and verification for estimating tractor driving wheel slip rate [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 35 - 41. (in Chinese)
[172] 周志立,刘尧,徐立友. 改进自适应卡尔曼滤波的拖拉机驱动轮滑转率估计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 72 - 76.
ZHOU Zhili, LIU Yao, XU Liyou. Estimation of tractor driving wheel slip rate based on improved adaptive Kalman filtering [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science),2017, 38(4): 72 - 76. (in Chinese)
[173] PRANAV P, TEWARI V, PANDEY K, et al. Automatic wheel slip control system in field operations for 2WD tractors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 84: 1 - 6.
[174] GUPTA C, TEWARI V, KUMAR A, et al. Automatic tractor slip-draft embedded control system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104947.
[175] ZHANG S, DU Y, ZHU Z, 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.
[176] SOYLU S, CARMAN K. Fuzzy logic based automatic slip control system for agricultural tractors [J]. Journal of Terramechanics, 2021, 95: 25 - 32.
[177] 李虎,许宁,宋裕民,等. 农业机械自动导航技术研究综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(3): 49 - 52.
LI Hu, XU Ning, SONG Yumin, et al. A review on automatic navigation technology of agricultural machinery [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(3): 49 - 52. (in Chinese)
[178] 白学峰,常江雪,滕兆丽,等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2): 10 - 21.
BAI Xuefeng, CHANG Jiangxue, TENG Zhaoli, et al. Research progress on key technologies of intelligent agricultural tractors in China[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization(in Chinese and English), 2022, 3(2): 10 - 21. (in Chinese)
[179] 胡子谦. 基于北斗定位的联合收获机自主导航技术研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2022.
HU Ziqian. Research on autonomous navigation technology of combine harvest based on Beidou positioning[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[180] 胡文武. 基于苗带识别的水田管理机直线辅助驾驶系统研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020.
HU Wenwu. Research on linear auxiliary driving system of paddy management machine based on seedling belt recognition [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[181] TAMAKI K, NAGASAKA Y, NISHIWAKI K, et al. A robot system for paddy field farming in Japan[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 143 - 147.

[182] 黄腾达. 基于北斗导航田间管理机辅助驾驶系统研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2020.
HUANG Tengda. Research on field management machine assisted driving system based on Beidou navigation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[183] 乔楠. 基于运动特性的收获机路径跟踪及转向控制方法研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
QIAO Nan. Research on path tracking and steering control method of harvester based on kinematical characteristics[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)

[184] 孟庆宽. 基于机器视觉的农业车辆—农具组合导航系统路径识别及控制方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
MENG Qingkuan. Methods of navigation control and path recognition in the integrated guidance system of agricultural vehicle and implement based on machine vision[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[185] 孟志军,刘卉,王华,等. 农田作业机械路径优化方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 147 - 152.
MENG Zhijun, LIU Hui, WANG Hua, et al. Optimal path planning for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 147 - 152. (in Chinese)

[186] 智晓慧. HC 企业自动驾驶农机项目应用综合效益评价[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022.
ZHI Xiaohui. Benefit evaluation of HC enterprise automatic driving agricultural machinery project application[D]. Wrumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[187] GELLER T. Farm automation gets smarter[J]. Communications of the ACM, 2016, 59(11):18 - 19.

[188] 王辉. 基于双天线 GNSS 的拖拉机自动导航关键技术研究及系统集成应用[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
WANG Hui. Research on key technologies and application of system integration of tractor automatic navigation based on dual-antenna GNSS[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[189] 姜明耀. 农业机械路径跟踪控制方法研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2023.
JIANG Mingyao. Research on path tracking control method of agricultural machinery[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023. (in Chinese)

[190] 熊宏江. 无人插秧机的路径跟踪控制方法研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
XIONG Hongjiang. Research on path tracking control method of unmanned rice transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[191] 胡珉珉. 基于自适应模型预测控制的拖拉机路径跟踪控制研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
HU Minmin. Research on tractor path tracking control based on adaptive model predictive control[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[192] 高文杰. 农机自动驾驶协同作业路径规划方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
GAO Wenjie. Research on path planning method of collaborative operation for automatic driving of agricultural machinery [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022. (in Chinese)

[193] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1 - 18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1 - 18. (in Chinese)