

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.08.021

杨帆, 滕利, 孙宜田, 等. 农业机械底盘智能化发展现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(8): 138-147

Yang Fan, Teng Li, Sun Yitian, et al. Development status and prospect of intelligent chassis of agricultural machinery [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(8): 138-147

农业机械底盘智能化发展现状与展望*

杨帆^{1, 2}, 滕利³, 孙宜田^{1, 4}, 孙永佳^{1, 4}, 蒋振晗¹, 侯加林²

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南市, 250103; 2. 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东泰安, 271018; 3. 潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司, 山东潍坊, 261206; 4. 农业农村部黄淮海现代农业装备重点实验室, 济南市, 250103)

摘要: 农机底盘技术是智能农机装备的关键技术,也是影响农业农村现代化的关键技术。欧美农场化、集约化的种植场景和雄厚的工业基础的先天优势使美西方在智能农机领域领先于我国,我国农机底盘的适应性差、智能化程度不足、舒适性差以及安全系数低。为此,从智能驱动、高适应性行走和自主作业三个方面对未来农业机械底盘智能化发展的方向进行思考和展望。着重归纳液压提升、动力换挡、无级变速、可变轮距、线控转向以及无人驾驶等新技术在农业机械底盘上应用的进展,并结合我国实际应用情况阐述农机底盘各系统相关技术的基本原理与特点,最后根据国内外农机底盘的研究进展和国内外的差距,从强化电液技术、E-CVT的研发与升级、推动多向行走与线控转向技术的落地、实现智能化控制与无人作业等方面为未来智能农机底盘研究设计以及农业农村现代化发展提供参考。

关键词: 农业机械; 底盘; 智能化; 自动驾驶

中图分类号: S232.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 08-0138-10

Development status and prospect of intelligent chassis of agricultural machinery

Yang Fan^{1, 2}, Teng Li³, Sun Yitian^{1, 4}, Sun Yongjia^{1, 4}, Jiang Zhenhan¹, Hou Jialin²

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Jinan, 250103, China; 2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China; 3. Weichai Lovol Intelligent Agricultural Technology Co., Ltd., Weifang, 261206, China; 4. Huanghuaihai Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Jinan, 250103, China)

Abstract: The chassis technology of agricultural machinery is the key technology of intelligent agricultural machinery and equipment, and also the key technology that affects agricultural and rural modernization. The inherent advantages of European and American farm based and intensive planting scenarios, as well as strong industrial foundations, make Europe and America ahead of China in the field of intelligent agricultural machinery, the adaptability of agricultural machinery chassis in our country is poor, the degree of intelligence is insufficient, the comfort is poor, and the safety factor is low. In response to the above issues, combined with the actual situation and characteristics of China's agricultural machinery development, this paper will think and look forward to the direction of intelligent development of agricultural machinery chassis in the future from three aspects of intelligent drive, high adaptability walking and independent operation. This paper focuses on summarizing the progress of new technologies such as hydraulic lifting, power shifting, continuously variable transmission, variable wheelbase, wire controlled steering, and unmanned driving applied to agricultural machinery chassis. Combining with the actual application situation in China, the basic principles and characteristics of various systems related to agricultural machinery chassis are elaborated. Finally, based on the research progress of agricultural machinery chassis

收稿日期: 2023年1月8日 修回日期: 2023年5月16日

* 基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC020703)

第一作者: 杨帆, 男, 1998年生, 山东邹城人, 硕士研究生; 研究方向为智能农机装备。E-mail: 488353010@qq.com

通讯作者: 侯加林, 男, 1963年生, 山东高密人, 博士, 教授, 博导; 研究方向为现代农业装备。E-mail: jlhou@sdau.edu.cn

at home and abroad and the gap between domestic and foreign countries, reference is provided for future research and design of intelligent agricultural machinery chassis and modernization of agriculture and rural areas from strengthening the research and upgrading of electro-hydraulic technology and E-CVT, promoting the landing of multi-directional walking and wire controlled steering technology, and realizing intelligent control and unmanned operation.

Keywords: agricultural machinery; chassis; intelligence; automatic driving

0 引言

农业机械底盘是一种可以依靠外挂其他农机具完成农业生产的动力机械移动平台。我国在农机底盘方面的研发和设计距离当前国际一流水平还有很大的差距,离农业农村现代化对智能农机装备的要求也有一定的距离,特别是在高适应性行走技术、动力优化技术和自主作业技术等方面难以适应农机装备智能化高质量发展的要求。近年来,国内外科技工作者围绕着新一代农机装备的智能化发展进行了诸多研究,同时在底盘遥控、无级变速、线控转向等方向上取得了很多成果对助力农机底盘提档升级具有重要意义。

本文在分析国内外智能农机底盘研究现状的基础上,深度剖析合当前研究和实际需求的差距和不足,结合我国农机发展实际情况和特点,从智能驱动、高适应性行走和自主作业三个方面对未来农业机械底盘智能化发展的方向进行思考和展望,为未来智能农机底盘研究设计以及农业农村现代化发展提供参考。

1 农业机械底盘概述

1.1 农业机械底盘分类

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,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。按照行走特点可将其分为轮式底盘和履带式底盘。

轮式底盘一般由传动系、转向系、制动系和行驶系组成。相较于履带式底盘,在机动灵活性、制造成本、运行速度、对其他农机具的匹配程度、能耗以及维修便利程度等方面比履带式底盘更具优势,缺点是难以应对复杂地形、容易在潮湿或松软地面陷落和打滑以及牵引力不足等。履带式底盘一般由传动系、转向系(包含制动)、行走系和回转支承装置构成。和轮式底盘相比,履带式底盘与农田土壤的接触面积大、对土壤的压强小不易造成土壤板结、在潮湿泥泞或松软土壤条件见下不易陷落和打滑、能更好适应复杂地形,但是,机动灵活性差、制造成本较高、运行速度慢、能耗高以及容易破坏路面从而不利于公路运输。

1.2 国内外研究现状

根据农业机械底盘传动系统驱动方式的不同,农

机底盘又分为机械式、液力式和电力式三种。其中机械式底盘主要是依靠燃油机提供动力,经离合器、变速器、万向传动轴传入驱动桥,然后经过主减速器和差速器传入半轴,从而驱动车轮旋转,广泛应用于拖拉机中。在当前我国农业生产中,最常见的底盘就是机械式四轮驱动农机底盘,广泛用于农业生产各方面,不过稳定性和易打滑等问题一直存在。为此,Chen等^[1]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,试验结果显示,动力性和稳定性有大幅提升;郑利双^[2]以车辆底盘设计理论和试验研究为依据,以对比分析为研究方法,以有限元法为分析手段设计出一种移栽机底盘,有效缩短了转弯半径。

液力式传动系统主要通过将发动机机械能转化为液体的动能,然后再将动能转化为驱动机械前进的机械能,具有自适应性强、无级变速和过载保护等优点,广泛应用于高地隙植保机和收获机。在液力式机械底盘研发和使用方面,我国远远落后于欧美发达国家,不过近年来很多研究人员在液力式底盘的研究取得了很大进步。赵峰^[3]提出一种新型的电磁液力式非接触过载保护限制与力矩控制装置,提高了设备的安全性和控制精度;孙超^[4]结合园艺技术,研究设计可用于配套植保、果实采摘、果树修剪、运输等农机具的液力式行走底盘,实现了无级变速条件下的多种工况的速度要求;李贤哲等^[5]提出一种串联式液力机械复合传动方案及其配套拖拉机总体设计方法,载与轻载区段能够实现无级变速,工况适应性良好。

电力式传动系统与液力传动类似,发动机(这里的发动机也可以是电动机)的机械能转化为发电机的电能,通过电能驱动行走机构,工艺上比液力式更简便、更容易实现自动控制、污染和能耗更低。Yuko等^[6]设计一款纯电动拖拉机,田间行走和耕作所需的能源消耗可减少约70%。

2 智能驱动关键技术

对于农业机械来说,农机驱动具有能耗高、动力大的特点,所以,农机底盘的驱动系统优化更是新一代智能底盘研究必不可少的环节。当前,农业机械底盘机—电—液控制的传动系统依然是制约农业机械化、现代化和智能化的短板,特别是在无级变速、动力换挡

等关键技术上。

2.1 农业机械底盘的传动系统

在根据驱动方式分类的三种底盘中,机械式底盘广泛用于收获机和拖拉机,是我国当前农业生产过程中最常见的农业机械底盘,但其在稳定性、动力、转弯半径等方面存在缺陷,该型机械也将逐步退出农机研究和应用前沿。液力式底盘是当前农业机械领域的“卡脖子”问题所在,特别是无级变速、动力换挡等关键技术,液力式底盘对于农业机械底盘的自动化操作、智能化控制以及云端操作具有重要意义,是农业机械底盘发展的重要方向。电力式传动底盘符合新能源发展趋势和节能环保的要求,另外可以有效保障驾驶员的舒适性,不过动力问题是其发展短板,该类机型的发展受到动力电池技术和电机动力技术发展的制约,也是未来发展的方向。

2.2 液压提升关键技术

2.2.1 液压系统

液压系统是液力式底盘的核心部件,在驱动机械行走过程中起着重要的作用。国内外很多科研人员在液压系统的设计等方面进行了大量试验和研究,在不同方向上对农机底盘的液压系统进行改进与研发。农机底盘的液压系统主要有液压供油系统、液压低压系统、液压高压系统、液压转向系统和液压润滑系统组成。其主要部件及相互关系如图1所示。

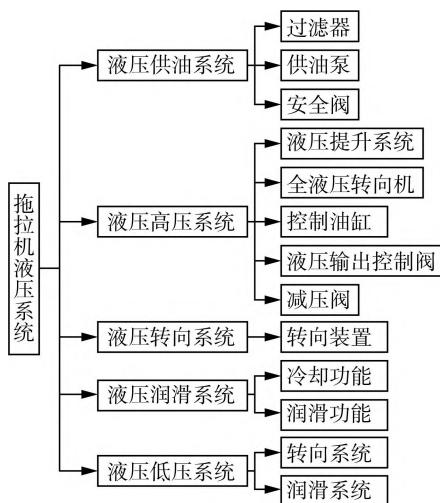


图1 拖拉机液压系统核心装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of tractor hydraulic system core device

液压供油系统主要包含供油装置、过滤装置和安全阀三部分。供油装置是一个供油泵,主要是负责液压油的输出。过滤装置则是由过滤器构成的,供油泵供给的液压油需经过过滤器过滤,最后被送入限压式油泵中。安全阀则是起到保障作用,当液压油超过标准油量时,多余的油会通过安全阀回流重新进入油箱,用来控制液压油供给的稳定性和可持续性。

液压低压系统主要有润滑系统和传动系统,前者负责为机械传动轴转向提供润滑油,后者则负责完成传动系统的操作,如离合器和变速箱的操作等。

液压高压系统是农机底盘液压系统的重要组成部分,主要是将液压低压系统传输进来的压力转化为巨大的机械能和动能,从而保证液压能量的输出。在农机底盘中,液压提升系统、制动系统还有其他液压输出环节都需要液压高压系统的支撑。一般有悬挂控制阀、控制油缸、减压阀和液压输出阀等装置组成,同时,从节能环保和能量高效利用的角度考虑,限压式油泵也是液压高压系统的必要元件。

液压转向系统是液压系统负责转向的装置,其结构较为复杂,需在润滑系统的相互协调下工作,主要包括供油泵、油缸以及优先阀等部件组成。

液压润滑系统是整个液压系统的助推器,起到协调各方的作用,对其他各个系统的机械装置提供润滑油,保障机械正常运转。润滑系统可以给离合器、传动轴、齿轮等机械装置提供满足正常转动的润滑油,减少摩擦阻力;润滑油也可以起到冷却降温的作用,以达到保护机械结构的目的。

2.2.2 液压提升系统

液压系统是农机底盘的关键环节,决定了农机动力输出的大小和农业机械的工作效率。当前,我国在液压系统的设计以及液压提升技术上离美西方先进农机技术相比还有很大的差距,严重制约了我国农业机械智能化的发展。

液压提升系统主要起到升降牵引农具的作用,现在很多大型农机的液压提升系统都会配备控制油缸,这样可以有效增加系统的提升能力。不过,控制阀开闭的瞬间会给整个液压系统带来强大的冲击力,对液压元件、连接接头等元件有较大冲击,影响机械运行安全。因此,解决液压冲击问题成为了科研人员研究的重要方向。王加攀等^[7]通过对液压提升系统的压力冲击的研究发现增大换向阀前管路内径可以有效减少液压冲击。

随着电液技术的发展,以及相应传感器技术的进步,与传统液压提升系统相比,电液提升系统具有高精度、高效率、高舒适性、高安全性以及有效减少滑移的优点,更适合农机底盘发展需要,是未来农机底盘液压提升系统的重要研究方向。美西方在电液提升系统的研究方面起步早,远远领先于我国,美西方头部农机企业生产的大中型农业机械均配备了电液提升系统,Bhondave等^[8]通过研究发现电液提升系统比机械提升系统工作效率高3.8%且滑移率低30%;Fernandez

等^[9]设计了基于自整定调节器的自适应系统,能够在不同速度和作业条件下自适应进行耕地作业;Langer等^[10]则进行了电液提升系统的控制算法优化试验与设计,进一步优化了电液提升系统性能。在半个世纪的研究和积累的基础上,美西方的电液技术已经趋于成熟,如今国外高端农机底盘正在逐步应用该技术,并不断与动力换挡技术、定位导航技术、综合驾驶室以及悬浮前桥等技术融合,自动化、智能化、信息化的农机底盘正在慢慢落地。

相对国外电液技术趋于成熟的现状,我国农机电液提升系统的研究起步晚了许多,以至于到现在很多关键技术依旧受制于人,不过随着近年来农机装备领域越来越受重视和信息产业革命的发展,电液提升系统的研发也取得了一定的成果。张硕^[11]针对大型农机滑转率控制方法进行了研究,设计了适用于滑转率控制的电液提升系统,具有很好的时效性;蔡鲁锋^[12]以某型号拖拉机为样机设计了一套电控液压悬挂系统,经过田间作业试验验证,结果表明该系统作业速率及稳定性符合农机作业要求;吴凯瑞^[13]则针对电液提升系统的核心组件犁深控制阀进行设计,配合电液提升系统的数学模型搭建试验平台,试验结果表明,所设计的电液提升系统满足实际生产需求。

2.3 动力换挡技术

动力换挡技术是通过液压系统和湿式离合器控制变速器换挡、换向的关键技术,是农业机械底盘进行自动变速的核心技术之一。与传统机械式手动换挡相比,具有简单易操作、控制精准稳定以及响应速度快等优点,可以有效提升农机底盘作业效率。大型农机的动力换挡传动系统主要由传动系统、电液控制单元和液压系统组成。动力换挡变速箱是利用离合器或制动器实现农业机械动力换挡的核心装置。动力换挡变速箱应用于农业机械始于20世纪80年代,如今美西方和日本等发达国家等农机产品都配有动力换挡变速箱,法国、意大利、美国等国家的农机企业的拖拉机都配有该装置。相对来说,国内动力换挡技术的研发远远落后于西方,目前国内动力换挡变速器的使用主要以合资或进口产品为主,在新疆、内蒙地区的大型农场有所应用。当然,中国农机企业也在逐步研究动力换挡技术并应用于部分产品。

目前,适用于农机底盘的变速器主要有AT(液力机械式自动变速器)、AMT(电控机械式自动变速箱)、PST(动力换挡自动变速箱)、HST(静液压无级自动变速器)、CVT(金属带式无级变速器)、HMCVT(液力机械式无级自动变速器)^[14]。表1为各种典型变速器的种类、优缺点及应用情况。

表1 农业机械底盘用典型变速器的种类、特点及应用

Tab. 1 Types, characteristics and applications of typical gearboxes for agricultural machinery chassis

变速箱类型	变速箱特点	应用情况
液力机械式自动变速器 AT	优点:起步平稳、换挡品质高、对外部负载的自动调节能力强;缺点:低速时效率低	芬特 Farmer 611LSA、613LSA 型、凯斯 800 系列拖拉机
电控机械式自动变速箱 AMT	优点:结构简单、成本低、油耗低;缺点:换挡不平稳	克拉斯 ARES 系列拖拉机、纽荷兰 T2104/T1 804 拖拉机
金属带式无级变速器 CVT	优点:传动效率高、噪音低、耗损较低;缺点:负载驱动力不足、维护保养困难	雷沃 P2404-7V 拖拉机、雷沃 P700 智能拖拉机、纽荷兰 T2504 拖拉机
液力机械式无级自动变速箱 HMCVT	优点:无级变速、变速范围大、满足大功率农业机械作业要求;缺点:制造成本高	麦赛福格森 MF8700 系列拖拉机、东方红 LW3204 拖拉机
静液压无级自动变速箱 HST	优点:无级变速、变速平稳、成本低;缺点:传动效率低、噪声大、换挡稳定性差	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
动力换挡自动变速箱 PST	优点:换挡平稳、适应高负载换挡要求、可靠性强、油耗较低、传动效率高;缺点:成本高、运维困难	凯斯 600 系列拖拉机、约翰迪尔 8R 系列拖拉机、东方红 LF2204
电传动无级变速器 E-CVT	优点:噪声低、传动效率高、低耗能、环保;缺点:成本高、续航不足、动力不足	丰田 P710 等应用于汽车工业,农机产品暂未有 E-CVT 量产产品,但在一些微耕机、无人植保机等小功率农机上有研究和应用

近年来,农业机械动力换挡技术成为了国内研究人员的研究热点,许许多多的科研人员希望通过自己的努力解决动力换挡这一严重制约我国农机事业发展的“卡脖子”技术。蔡祖戈等^[15]提出一种多离合器结合、分阶段控制变速器的策略,实现了换挡过程中的动力

连续;王毅等^[16]建立了动力换挡变速箱电液控制系统的 AMESim 模型,结果显示可以有效减少换挡过程中的液压冲击。

动力换挡技术及相应对动力换挡策略是自动变速器的核心技术,也是农业机械底盘急需攻关的关键技

术,自动控制、智能控制等控制算法也将逐步应用于动力换挡装置中。未来,怎样结合发动机转速与农机负载来确定最佳作业功率、实现最优控制,怎样提高电液系统的可靠性和稳定性,怎样实现关键零部件的完全国产化都是动力换挡智能技术的研究方向。

2.4 无级变速

从表1可以看出,无级变速(CVT、HMCVT和HST)是当前变速箱技术最前沿的技术,也是变速器技术发展的方向。相较于传统变速技术,无级变速的传动结构简单而且在变速范围和油耗方面也有较大优势,可见无级变速是农机底盘发展的趋势。

2.4.1 机械式无级变速

机械式无级变速是用机械摩擦传动的方式实现无级变速,其典型代表是金属带式无级变速器(CVT)。CVT被广泛应用在汽车工业特别是家用中小型汽车上,其在农业机械上的应用最早可追溯到1988年德国人KIRSTE研发的Munich试验拖拉机,第一次实现了农业机械的无级变速。尽管CVT在技术上趋于成熟,但是在在大负载条件下其设计方案容易引起金属带的打滑,无法适配大型农业机械的大功率作业。尽管国内外很多科学家曾尝试使用金属带功率分流等方法解决这一问题,但是结果都以失败告终。

2.4.2 液压式无级变速

液压式无级变速是利用液压传动的方式实现无级变速,该型变速器具有传递功率大和变速平稳的优点,主要包括液压机械式无级自动变速箱(HMCVT)和静液压无级自动变速箱(HST)两种,其中HMCVT是目前世界上唯一实现大规模实际应用于农业机械的无级变速系统。虽然HMCVT已经取得了实际运用的成功,但是其功耗高、效率低,这也是未能在中小功率农机中应用的最主要原因。

HMCVT是通过液压传动和机械传动实现无级变速的,可以满足大功率农机的传动要求,比较典型的应用是英国研制的麦赛福格森MF8700型拖拉机以及日本研制的YR系列水稻插秧机。我国既有适合大规模机械作业的广袤平原,也有仅适用于小型农机作业的丘陵山地,因此上述两款机械对于我国无级变速农机研发具有很强的指导意义。

国内针对HMCVT的研究最早来源于刘修骥教授于1998年编写的《车辆传动系统分析》,此后很多高校和科研院所对此进行了钻研,研发了数款HMCVT,并提出优化算法,为后人进行HMCVT研究提供了参考。张明柱等^[17]采用参数循环算法对HMCVT的传动效率进行优化,提高了燃油经济性;曹允莲^[18]针对小功率农业机械

设计了一套串联式拖拉机HMCVT,其结构简单、成本低,为我国中小功率HMCVT研制提供了方法支撑。

HST主要依靠液压来进行能量传递,通过调节液压马达转速来实现无极调速^[19],变速平稳和传递效率高是其最大的特点,其原理图如图2所示。

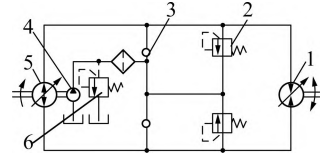


图2 液压无级自动变速箱传动原理图

Fig. 2 PST transmission schematic diagram

1. 马达 2. 安全阀 3. 单向往补油阀 4. 补油泵 5. 变量泵 6. 溢流阀

通常情况下,HST几乎不会单独使用,一般会与机械换挡变速箱串联^[20]。国外很多农机适配了HST,比如约翰迪尔4000系列收获机、凯斯A8000甘蔗收获机、久保田4LBZ-172B无级变速收获机和麦赛福格森“全收系列”T5联合收获机等。国内很多研究人员也在努力突破HST变速箱的前沿技术,在动力系统提升、液压参数优化、变速器功率分流技术提高等方面展开研究,但是,在HST效率提升与HST与发动机协调性能等实际应用方面却鲜有研究。

总体说来,以HMCVT和HST为代表的液压式无级变速系统已然成为当前农业机械无级变速系统研发与应用的主力变速器。尽管我国在这一领域的研发和技术水平相较于美西方一流农机产品还有很大差距,但这也代表了无级变速系统的前沿技术,迫切需要解决HST与机械换挡变速箱串联之后的效率问题和HMCVT功耗过高的问题。

2.4.3 电传动无级变速

随着新一轮能源革命风暴的兴起和绿电的大规模应用,新能源车辆设备已然成为了新的趋势和技术增长极,电传动无级变速箱(E-CVT)如今俨然成为无级变速研究的热门并在新能源汽车领域率先应用。与传统无级变速系统相比,E-CVT的耗能结构更少、传动效率更高,再加上电能为驱动能源,对节能减排和我国“双碳”目标的实现具有重要意义。

近年来,以特斯拉为代表的新能源汽车行业异军突起,实现了机动车领域由燃油车到电动车的不可逆转历史进程,这对农业机械的发展有很大的启发作用。受限于电池续航和电机动力,大型农机底盘的电动化大多停留在概念机阶段,仅有小型农机的试验样机配备了E-CVT,比如张超^[21]研制出了一套适用于小型农田作业的电动微耕机,但也只是存在于样机阶段,实用意义不大。

E-CVT具有很强的未来性,可以预见的是未来该

类无级变速系统一定会成为农业机械无级变速的主力。

3 高适应性行走技术

3.1 可变轮距技术

在实际农业生产中,受农作物种植密度、地形地貌、季节气候特别是南北方种植种类不同等客观因素的影响,在播种、施肥、收获等阶段的行距会有所不同(表2)。为满足农业生产过程中农用动力底盘沿农作物行距行走作业的实际需求,这就要求通用底盘轮距可以根据田间地头的实际情况进行针对性、适应性的调整。

表2 农作物行距和地隙要求

Tab. 2 Requirements for row spacing and ground clearance of crops

农作物类型	行距/cm	地隙要求间距/cm
玉米	65	60~80
大豆	20	40~60
棉花	60	80~100
茶树	130~150	150~180
高粱	15	60~80
甘蔗	100	80~100

面对这一制约农机底盘技术发展的问題,很多专家学者也给出了自己的解决方案,从目前的研究来看,农机底盘的可变轮距功能大多通过液压驱动或伺服电机驱动。其中液压驱动转向在输出力矩、稳定性、故障率以及灵活性上都比电机驱动好很多,在农用高地隙底盘中应用广泛;而伺服电机驱动转向是利用电动机为转向提供驱动扭矩的系统,因其具有环保、操作简单等优点,目前欧美一流农机企业都在这方面加大研究力度。

从国内来看,这方面的研究大多针对于特定农机具。譬如,刘平义等^[22]设计了轮距可调式农用底盘,可以满足作业要求。

3.2 多向行走技术

针对我国很多农田长度较短的实际特点,大型农机具在作业过程需要频繁掉头转弯,这样不仅影响作业效率,更容易压实土壤,不利于农作物的生长。因此,如果可以实现农机底盘的多向行走,或者在底盘上实现农机具的转向,将极大提高作业效率,并减少对土壤的破坏程度。因其技术实现的复杂性以及在田间实际操作的复杂性,目前国内外农机企业和科研机构对农机底盘多向行走的研究几乎为零。不过从理论上来说,底盘的多向行走功能还是可以实现的。

3.3 线控转向

线控转向是当前农机装备领域以及汽车工业领域最活跃的技术之一,运用线控底盘代替传统机械底盘已然成为农机底盘技术发展的趋势,通过自动控制技术和传感器相结合以取代传统机械底盘,可以有效提

高农机底盘的灵活性、安全性和稳定性。特别是新能源汽车的爆火,智能线控底盘已然成为新能源车企布局最广的赛道,我国品牌有望打破欧美日在底盘产业链、供应链的顶端地位,实现线控底盘领域的换道超车,这也为农业机械线控底盘的发展提供了重要参考。

3.3.1 线控技术

相较传统底盘控制技术,线控技术是通过电路进行连接、实现控制信号的传递,直接省去了传统的机械装置,将原本机械装置实现的换挡、转向、加减速和制动等操作全部转化为数字信号并传达给机械,最终实现设备的控制。从理论上讲,线控技术主要是通过计算机的人机接口将驾驶员对机器的操作指令转化为计算机内部的数字信号,经过规划的电路传递给执行装置,然后机器具体执行上述指令,执行完毕以后将反馈信号传递给人机接口,形成一个闭环反馈回路。从结构来看,线控技术把传统机械连接装置替换为一些电子元器件,用数字电路替代机械传动,节省了大量复杂机械装置,同时也方便驾驶员的实际操作。

3.3.2 线控转向

线控转向系统又称SBW(steer-by-wire)系统,主要包括转向盘系统、电控系统和转向系统三个部分,线控转向彻底去除了方向盘和齿条间的机械连接装置。根据驾驶员的实际作业需求,通过CAN总线连接的电子控制单元(ECU)传递指令,执行电机收到指令后驱动转向轮转动,实现农机底盘转向的自动化,具有响应速度快、体积小和安全系数高等优点,SWB系统已然成为了未来农机底盘技术发展的主流。曲浩等^[23]提出线控转向执行电机控制策略,可以满足线控转向需求;靳万里^[24]将传感器解析冗余和底盘控制技术相结合,提高了安全性和稳定性。

线控转向系统在实际运用过程中需要对转向力进行计算,这对于转向执行电机的算法要求和控制器的控制精度有着很高要求。与机械转向实实在在的操作机械不同,线控转向系统是通过控制技术与算法进行操控,对农机的安全性至关重要,所以容错控制技术在线控转向系统得到广泛应用,一般有硬件冗余方法和解析冗余方法两种方法,从而提高系统的容错性能。

4 自主作业技术

辅助驾驶和自主作业已经是农业智能装备研究的热点之一,农业机械底盘配备辅助驾驶甚至自主作业单元后,可以基本实现农业生产的无人化和自动化,根据驾驶员对驾驶农机过程中的参与程度的不同,很多科研机构和农机企业对农业机械领域的自动驾驶进行

了分类,以凯斯纽荷兰(CNH Industrial)为例,它把自动驾驶具体分成5类(表3)。

表3 农业装备自动驾驶分类

Tab. 3 Classification of automatic driving for agricultural equipment

类型	描述
导航	操作员负责驾驶操作车辆,导航可以提高对行准确性,提高工作效率
协调和优化	使用农机和环境的数据形成信息枢纽,使得操作员控制的装备之间实现通信
人员协作下的自动驾驶	自动驾驶系统可以接管基础的行进对任务,操作员专注于装备作业
有监督的自动驾驶	操作员需要现场监督无人驾驶的设备作业,同时也可以进行其他工作
完全自动驾驶	完全的自动驾驶装备,可以在远程监督下进行作业,或者通过人工智能进行操作

4.1 智能环境感知

智能环境感知技术即农机作业是对外界的信息采集,通过各种传感器对农机装备的运行数据进行采集和分析。农机装备的作业环境是异常复杂多变的,不仅要考虑到地形地貌的影响,还要综合土壤、气候、农作物生长情况以及人员和其他农机具的走动等方面。当前环境感知技术的主要研究方向在于图像识别、超声测距、激光雷达、红外传感和多传感融合技术等。Michls团队^[25]使用三维激光雷达检测障碍物,检测结果受天气因素影响小;Fleischmann^[26]、Brand^[27]等使用双目立体视觉生成点云信息,识别障碍物比单目视觉更加准确;黄沛琛^[28]在果园环境场景下结合卫星定位和机器视觉技术,可以有效检测出果树行区域。

农业装备作业环境中对于障碍物的感知技术中,检测行走的人以及其他动物最有效的方法是红外感知,视觉感知与雷达技术结合是兼顾性价比较高的选择,超声波雷达和三维雷达的检测精度最高、灵敏性最好,未来农机装备智能感知的研究重点应该在多传感融合。

4.2 智能定位与路径规划

实现农机装备的智能定位是实现无人作业的基础,其中定位主要依靠视觉定位和GNSS定位技术。当然,随着我国北斗系统的建成与全面商用以及SpaceX的“星链”的全球组网,我国的智能定位也有了其他选择和研究方向,这也必将促进农业装备自动驾驶技术的发展。Kaizu等^[29]通过增强现实技术构建环境的三维图像,来确定拖拉机的实时位置;王伟康等^[30]设计一套双电机履带式底盘自动驾驶系统,能够实现农机作业路径的自动跟踪。

智能底盘装配路径规划单元是农机实现自动驾驶与无人作业的重要环节,也是技术上的重点。路径规划应

该满足农业生产规范的要求,在作业区域内准确、快速地进行作业,并且保证不重复作业和不遗漏作业,寻找最优行走路径,这需要考虑时间、地形地貌、农作物生长情况、机械转弯情况以及能源消耗等多种因素。在农田环境中,农机的运动主要包括进行作业时的直线行驶部分和地头转弯时的曲线部分。其中,直线行驶部分较为简单,主要是运用智能定位与导航技术,在固定的线路上进行农机作业即可。在农田作业区域内,全过程路径规划应该包括直线行驶和地头转弯两部分,前者一般有S形、口字形、回字形和对角形四种方案,而后者一般是弓形、半圆形、梨形和鱼尾形四种方案。Ryerson等^[31]运用遗传算法来实现区域内恰好完全覆盖作业的条件下的最小运动路径;Karen^[32]则在拖拉机导航中使用决策支持系统,综合时间、能耗以及经济方面实现最优路径选择。国内来看,魏逸飞^[33]提出一种激光雷达和毫米波雷达融合的导航系统,实现了果园环境中的实时定位、地图构建以及路径规划;刘刚等^[34]则设计出一种基于GNSS的农田自动驾驶路径规划方法,融合K-均值与聚类算法,基本实现路径规划要求。

目前在规则地块的条件下,农业机械路径规划的技术和算法以及趋于成熟,在实际作业过程中的效果也不错,不过针对不规则地块和复杂地形的全覆盖路径规划算法还有待研究。

4.3 辅助驾驶

辅助驾驶技术是目前我国农机无人作业研究所处的技术阶段,作为从人工驾驶到无人驾驶的过渡阶段,辅助驾驶在转弯和直线行驶等过程中能够实现自动驾驶,但是在农机具具体操作等方面使用人工辅助,这样有利于驾驶员将更多的精力放在农机具的操作上,从而提高作业效率和质量。

目前,在农业机械辅助驾驶领域,国外农机企业和科研机构的研究相对成熟。美国研发的AutoTrac系统可以充分优化机器效率,延长驾驶员的作业时间,提高作业量;德国研发的的智能转弯系统SmartTurn,可以实现挖掘机的全自动转向。我国目前的辅助驾驶研究也日趋成熟,孙煜等^[35]设计了一套基于RTK的农业机械辅助驾驶系统,可以在无人驾驶的前提下实现对农机位置、速度、航向和姿态信息的获取;黄腾达^[36]结合我国自主研发的北斗导航系统,提出了南方水田田间管理机辅助驾驶系统设计方案,可以很好适应作业要求。

未来,随着大数据、AI、深度学习以及新一代移动互联网技术等现代前沿科技与农机底盘的深度融合,在辅助驾驶赛道上一定会有更好的研究成果。值得一提的是,很多基于深度学习以及人工智能技术与传统

汽车工业的融合已经做得很好了,相信在农业机械领域也能很快落地。

4.4 无人驾驶

自动驾驶的最高境界就是实现无人驾驶,是集环境感知、行为决策、路径规划等于一体的前沿技术。随着技术进步与农业人口的不断下降,发展无人化农机自主作业技术势在必行。当然,由于技术、资金以及其他现实原因,目前农业机械的无人驾驶还处在概念机阶段,距离真正应用还有一段路要走。将农机装备的无人驾驶技术与智能底盘的设计相融合,把无人化、自动化、智能化、数字化赋能智能农机,就可以实现农业机械生产的无人作业。就目前国内外研究情况,无级变速是实现农机无人驾驶的核心技术,美国约翰迪尔、德国道依茨法等国际农机巨头都生产出无级变速大功率拖拉机。国内很多企业也通过不同的方式研究无级变速技术,推出了搭载其欧洲技术中心研发的动力换挡传动系的拖拉机P5000和自己的动力换挡拖拉机。不过,通过调查发现:国内企业的动力换挡产品还是依赖于欧美技术。随着我国大功率牵引机械需求的扩大,对于动力换挡和无级变速产品的研发会日趋完善,打破国外的技术垄断。

在未来一段时间,辅助驾驶仍将是实际生产中的主要产品,随着智能化的发展以及更多科研成果的落地,无人驾驶农机将成为农业机械的主要推动力量。

4.5 无人作业

实现农业装备的无人作业,需要将农机底盘的无人驾驶技术与智能化的农机具相结合,不仅在驾驶过程中不需要人工操作,在实际生产过程中农机具也是依靠计算机指令或者算法程序来完成。由于技术的复杂性和客观条件的多样性,当前真正的无人作业还停留在理论阶段,欧美国家农业生产装备的自动化水平高、具备无人作业的装备基础和技术条件,但没有太大实际需求,我国由于人口老龄化加剧等客观原因,在这方面有很大的实际需求和广阔市场。

5 展望

智能农机底盘的研究与5亿多农业从业者息息相关,研究前景及其广阔,对提高我国农业生产效率、提高粮食产量、大力解放和发展农村剩余生产力都具有重要意义。

1) 智能驱动技术:实现农机底盘的驱动技术的升级换代还有许多工作需要深入研究,液压提升方面在未来急需解决,特别是电液技术是具有颠覆性的创新,在未来一定会成为液压提升系统的关键一环;动力

换挡技术方面主要是控制算法需要优化、怎样结合发动机转速与农机负载来实现效率最大化以及电液系统的稳定性设计都是未来动力换挡技术需要突破的关键点;无级变速装置设计方面,离合器换挡稳定性仍需改善、HMCVT的控制策略与控制方法需要优化提升、HMCVT与大型农业机械的适配问题需要解决、HST与机械换挡变速箱串联之后的效率有待提高以及最具未来性和前瞻性的E-CVT设备的研发与应用,其中E-CVT的研发应用是实现我国农机装备智能化换道超车的绝佳机会。

2) 高适应性行走技术:实现农机底盘的多向行走目前仅停留在理论研究层面,未来实现该项技术的落地应用将极大农机的提高作业效率,这也是农机底盘技术未来发展的方向;线控转向技术已经是智能化农机底盘研究的热点了,其执行电机的算法优化、控制器的控制精度的提升、容错控制技术的改良升级以及如何提高农机底盘的灵活性安全性和稳定性的等都是线控技术发展的方向。

3) 自主作业技术:农机装备的无人作业是农机底盘研究的最高实现形式。环境感知技术上需要改进的是如何兼顾设备的性价比问题,以及多传感融合技术上;定位精度的提升伴随着“北斗”的联网已经得到很大改善,比较棘手的是路径规划方面,特别是针对我国广大丘陵山地地区复杂农田的适应技术与路径规划算法还有待研究;辅助驾驶与无人驾驶技术上需要突破的是与新一代移动互联网技术、AI以及深度学习的融合,争取实现技术上的最优控制;无人作业是农机底盘各项前沿技术的集大成者,但也是智能农机底盘技术发展的核心关键技术。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 郑利双. 一种新型水田栽植机底盘的理论分析与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Zheng Lishuang. A new type of rice transplanting machine of theoretical analysis and experimental research [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [3] 赵峰. 新型电磁液力式过载保护限制与力矩控制装置设计与应用研究[J]. 中国设备工程, 2022(16): 268-270.
- [4] 孙超. 液力式行走底盘的设计与研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
Sun Chao. Design and research of hydraulic type walk

- chassis [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013.
- [5] 李贤哲, 张辉, 徐立友, 等. 液力机械复合传动拖拉机动力系统设计匹配特性研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(4): 46-52.
- Li Xianze, Zhang Hui, Xu Liyou, et al. Research on power system matching characteristics of the hybrid hydraulic and mechanical tractor [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(4): 46-52.
- [6] 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.
- [7] 王加攀, 吴仁智, 秦磊, 等. 基于AMESim的拖拉机液压提升系统压力冲击研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(2): 128-133.
- Wang Jiapan, Wu Renzhi, Qin Lei, et al. Research on pressure impact of tractor hydraulic lifting system based on AMESim [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 128-133.
- [8] Bhondave B, Ganesan T, Varma N, et al. Design and development of electro-hydraulics hitch control for agricultural tractor [C]. SAE International, 2017.
- [9] Fernandez, Benjamin, Herrera. Self-tuning regulator for a tractor with varying speed and hitch forces [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 182-288.
- [10] Langer T H. Model-in-the-loop tuning of hitch control systems of agricultural tractors [C]. 75th VDI Internationale Tagung Landtechnik (Agricultural Engineering), 2017.
- [11] 张硕. 基于滑模变结构的重型拖拉机犁耕作业滑转率控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- Zhang Shuo. Study on slip rate control of heavy tractor for ploughing based on sliding mode variable structure control [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [12] 蔡鲁锋. 基于电控液压系统的拖拉机悬挂装置耕深自动控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- Cai Lufeng. research on the plowing depth automatic control of tractor hydraulic system based on electronic control [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [13] 吴凯瑞. 拖拉机电液提升系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Wu Kairui. Research of electro-hydraulic hitch system of tractor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [14] 王伟伟, 陈黎卿, 杨洋, 等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 1-15.
- Wang Weiwei, Chen Liqing, Yangyang, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 1-15.
- [15] 蔡祖戈, 詹东安. 动力换挡变速器多离合器换挡控制策略研究[J]. 工程机械, 2022, 53(9): 8-13.
- [16] 王毅, 鲁力群, 孙萌, 等. CAN智能节点下拖拉机动力换挡变速器控制系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(2): 245-250.
- Wang Yi, Lu Liqun, Sun Meng, et al. Research on control system of tractor power shift transmission based on can intelligent node [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(2): 245-250.
- [17] 张明柱, 王界中, 王建华, 等. 提高燃油经济性的拖拉机变速控制策略[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 82-89.
- Zhang Mingzhu, Wang Jiezhong, Wang Jianhua, et al. Speed changing control strategy for improving tractor fuel economy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 82-89.
- [18] 曹允莲. 串联式拖拉机液压功率分流无级变速箱的设计[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [19] 时元玲. 全液压顶驱电液比例容积调速系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [20] 薛丽君, 赵业慧, 宋悦, 等. 无级变速和电传动农业作业机械现状研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(7): 81-89.
- Xue Lijun, Zhao Yehui, Song Yue, et al. Research on the current situation of continuously variable transmission and electric drive technology [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 81-89.
- [21] 张超. 太阳能微耕机动力特性及其控制系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [22] 刘平义, 王振杰, 李海涛, 等. 农用底盘轮距可调式转向机构[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 44-48, 120.
- [23] 曲浩, 曲宝军, 周海安, 等. 叉车线控转向执行电机控制策略研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 52-57.
- Qu Hao, Qu Baojun, Zhou Hai'an, et al. Research on control strategy of forklift steer by wire actuator [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(6): 52-57.
- [24] 靳万里. 基于传感器解析冗余的智能汽车底盘域控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [25] Michls J, Saxena A, Ng Ay. High speed obstacle avoidance using monocular vision and reinforcement learning [C]. Proceedings of the 22nd International Conference on Machine Learning. ACM, 2005.
- [26] Fleischmann P, Berns K. A stereo vision based obstacle detection system for agricultural applications [C]. Field and Service Robotics. Springer, Cham, 2016.
- [27] Brand C, Schuster M J, et al. Stereo-vision based obstacle

- mapping for indoor/outdoor SLAM [C]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014.
- [28] 黄沛琛. 基于视觉与卫星定位的履带式果园机器人的导航系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [29] Kaizu Y, Choi J. Development of a tractor navigation system using augmented reality [J]. *Engineering in Agriculture, Environment & Food*, 2012.
- [30] 王伟康, 罗承铭, 张国忠, 等. 双电机履带式水稻收获机底盘自动导航系统设计与试验[J]. *华中农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(2): 199-207.
Wang Weikang, Luo Chengming, Zhang Guozhong, et al. Design and experiment of automatic navigation system for rice harvester with dual-motor crawler chassis [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(2): 199-207.
- [31] Ryerson A E F, Zhang Q. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms [C]. *CIGR Ejournal*, 2007.
- [32] Karen L. A decision-support system for analyzing tractor guidance technology [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018.
- [33] 魏逸飞. 基于激光雷达和毫米波雷达融合的果园机器人导航系统研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [34] 刘刚, 李笑, 康熙, 等. 基于GNSS的农田平整自动导航路径规划方法[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(z1): 21-29.
Liu Gang, Li Xiao, Kang Xi, et al. Automatic navigation path planning method for land leveling based on GNSS [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(z1): 21-29.
- [35] 孙煜, 黄启宏, 赵博, 等. 基于RTK的农机机械智能辅助驾驶系统[J]. *电子技术与软件工程*, 2021(19): 69-71.
- [36] 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.
-
- (上接第 119 页)
- [40] Lertworasirikul S, Tipsuwan Y. Moisture content and water activity prediction of semi-finished cassava crackers from drying process with artificial neural network [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(1): 65-74.
- [41] 孟国栋, 彭桂兰, 罗传伟, 等. 花椒真空干燥特性分析及动力学模型研究[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(4): 89-96.
Meng Guodong, Peng Guilan, Luo Chuanwei, et al. Vacuum drying characteristics and kinetics modeling study of *Zanthoxylum bungeanum* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(4): 89-96.
- [42] 姜苗, 杨薇. 洋葱对流干燥特性及其神经网络模型的建立[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(5): 14-18.
Jiang Miao, Yang Wei. Drying characteristics and neural network model of onions during convection drying [J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(5): 14-18.
- [43] 张欣, 张记, 彭桂兰, 等. 山药切片真空干燥特性及模型研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(4): 82-89.
Zhang Xin, Zhang Ji, Peng Guilan, et al. Study on vacuum drying characteristics and model of yam slices [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(4): 82-89.
- [44] 孙丽萍. 木材含水率在线检测融合体系及仿真技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [45] 胡晓锋. 食品干燥设备自动控制系统设计[J]. *食品工业*, 2019, 40(12): 215-218.
Hu Xiaofeng. Design of automatic control system for food drying equipment [J]. *The Food Industry*, 2019, 40(12): 215-218.
- [46] 李凯旋, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于GA-BP神经网络的蒜香调味粉制备工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(10): 150-159.
Li Kaixuan, Zhan Ping, Tian Honglei, et al. Optimization of processing conditions of garlic flavoring powder based on GA-BP Neural Network [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(10): 150-159.
- [47] 刘焕燕, 郑光耀, 王衍彬, 等. 基于BP神经网络的微波辅助提取无花果黄酮工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(19): 197-202, 207.
Liu Huanyan, Zheng Guangyao, Wang Yanbin, et al. Process parameter optimization of microwave assisted extraction of flavonoids from *Ficus carica* Linn based on BP neural network [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(19): 197-202, 207.