DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.01.007

谷物联合收获机喂入量检测技术研究现状与发展趋势

陈旭[1,2], 何勋[1,2], 朱晨辉[1,2], 王宝山[1,2], 王万章[1,2*]

(1. 河南农业大学机电工程学院,河南郑州,450002;
2. 河南省低碳农业智能装备工程技术研究中心,河南郑州,450002)

摘要:我国谷物联合收获机普遍存在作业性能和效率难以兼顾、故障率高、自动化水平低等问题,喂入量是谷物联合收获机的重要参数之一,其对机器的作业性能、整机可靠性以及经济效益有着直接影响;只有当喂入量稳定在额定范围内,收获机才能发挥出最佳效能。研究从喂入量对机器性能的影响至关重要为切入点,着重介绍了国内外联合收获机借助传感技术实现对喂入量的检测功能,主要通过扭矩传感器测量关键工作部件传动轴扭矩或功率和利用压力传感器检测物料对机械结构壳体的挤压力来反映喂入量;其次,采用机器视觉和激光雷达技术识别作物密度以及利用力传感器测定作物茎秆的弯曲力来间接表示喂入量;另外,对影响喂入量检测信号处理的原因及联合收获机喂入量的自动调控等方面的关键技术与应用做了梳理分析。最后,该研究提出了现有谷物联合收获机喂入量检测技术所存在的问题以及未来的研究重点和发展趋势。虽然国内联合收获机喂入量检测方法较多,但均存在检测精度不高、系统稳定性差及只适用于单一作物,难以大面积推广应用等问题。因此,我国联合收获机喂入量检测技术仍有很大的提升空间,应加大对高精度农业传感器和控制器的研发力度,提高检测系统整体的稳定性;未来联合收获机将向着大型化、智能化、集成化方向迈进。

关键词:联合收获机;喂入量检测;机器视觉;传感器;自动调控;智能化
中图分类号:S225.31 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-7217(2025)01-0071-10

陈旭, 何勋, 朱晨辉, 王宝山, 王万章. 谷物联合收获机喂入量检测技术研究现状与发展趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 71-80
CHEN Xu, HE Xun, ZHU Chenhui, WANG Baoshan, WANG Wanzhang. Research status and development trend of feed quantity detection technology for grain combine harvester [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 71-80

0 引言

在我国谷物种植范围广,南部主要盛产水稻,中原地区夏产小麦、秋收玉米,北方主要以一季粮食作物(小麦、玉米、大豆)为主;近年来,谷物单产在稳步增长,主粮作物小麦、水稻、玉米机收率分别超过97%、94%和78%,喂入量是影响机器稳定收获的关键。联合收获机的喂入量是指单位时间内进入机体内作物的量,一般受到割茬高度、割幅宽度、作业速度、植株高度、作物产量及含水率等的影响[1-3]。喂入量也是联合收获机一个非常重要的工作参数,其各个部件只有在设计的额定物料质量喂入范围内才能发挥最佳效能[4]。然而,目前机手为了追求更高的经济效益,在不断地提高收获速度,随之喂入量也在不断飙升,有时甚至远超机器的额定喂入量,造成物料在输送过程中发生拥堵,严重时甚至会导致零部件损坏,因此很有必要对联合收获机喂入量进行检测。传统喂入量测试方法一般通过人工或借助辅助装置接收联合收获机尾部排出的茎秆及杂余,用收集到的物料和籽粒质量之和除以收集时间得到联合收获机在该段时间内的平均喂入量,这种方法测试结果最为准确,但耗时、费力,并且无法达到对喂入量的实时在线检测。近年来,国外大型联合收获机已具备对喂入量的检测功能[5],国内也有许多科研院所、高校、农机企业对收获机喂入量检测进行了大量研究,并取得了一定的成果,为我国联合收获机喂入量检测和高效收获奠定了基础。

收稿日期:2024-03-04 修回日期:2024-04-11
基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项—小麦机械化技术(CARS-03)
第一作者:陈旭,男,1994年生,河北邯郸人,博士研究生;研究方向为农业装备结构设计与智能化控制。E-mail: chenxu1994@stu.henau.edu.cn
*通信作者:王万章,男,1963年生,河南洛阳人,教授,博士生导师;研究方向为智能农机装备。E-mail: wangwz@henau.edu.cn

研究从喂入量对机器性能影响、检测方法、信号处理及自动控制等方面,对国内外联合收获机喂入量检测技术的研究现状进行总结,并对未来的发展方向加以展望,以促进谷物联合收获机喂入量检测技术不断改进和提升,满足智能化、精准收获作业要求。

1 喂入量对机器性能的影响

喂入量是谷物联合收获机的主要工作参数之一,其对整机的可靠性、作业性能以及经济效益有着重要影响。只有将喂入量稳定在一定范围内,联合收获机各工作部件才能达到最佳的工作效能[6]。喂入量增加后,联合收获机物料喂入口、输送链耙及脱粒滚筒处极易出现堵塞现象(图1),严重时可能会造成工作部件损坏;尤其是在作物含水率较高的情况下,还可能会出现割刀、皮带打滑磨损加剧,油耗增加、发动机功率下降等不良现象[3]。

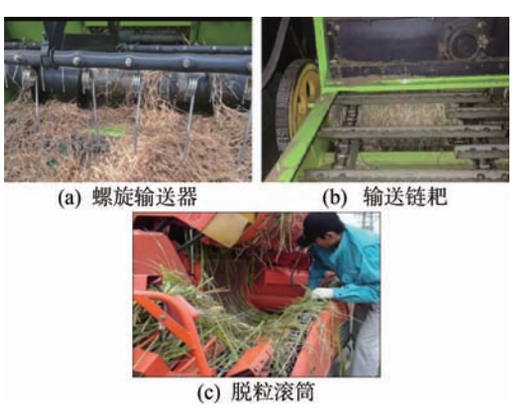


图1 收获机堵塞位置

Figure 1 Blockage position of combine harvester

喂入量波动较大时对收获机各工作部件极其不利,影响整机的作业效率;在脱粒过程中,喂入量过大或过小都会造成滚筒脱粒损失增加;如果喂入量过大,导致穗头上许多籽粒未被完全分离出来便排出机外造成严重的夹带和未脱净损失;如果喂入量过小,导致滚筒上钉齿对物料的打击力度增强造成籽粒和茎秆破碎严重,不利于清选[7]。在清选过程中,过大的喂入量使得筛面堆积的秸秆太厚,清选负担过重造成跑粮,清选室空间有限,在振动筛扬起较厚的物料时高度落差小,部分籽粒掺杂在颖糠和秸秆中无法顺利到达筛面落入筛孔内,随着筛面前后晃动向后输送排出机外,造成严重的夹带损失[8]。喂入量超出机器额定范围时会严重影响联合收获机作业性能和整机的可靠性,对喂入量进行实时在线检测,确保物料维持在额定喂入范围内,才能有效降低收获损失率、提高整机作业效率并减小机器故障率。

2 喂入量检测方法

利用现代化传感技术和机器视觉技术对联合收获机喂入量进行实时在线检测,当喂入量较低时提高机器作业速度来提升喂入速率,当喂入量超过额定值时降低作业速度来减小喂入量,可以有效防止物料喂入超载发生堵塞,使联合收获机始终保持在最佳收割状态。目前,国内外用于谷物联合收获机喂入量检测的主要方法有以下几种[9-17]:(1)通过扭矩传感器采集关键工作部件传动轴(如螺旋输送器、割台、倾斜输送器、脱粒滚筒等)扭矩或功率来表示喂入量;(2)通过压力传感器检测物料对过桥底板或滚筒上盖板等的挤压力来反映喂入量变化;(3)通过机器视觉或激光雷达技术预测机器前方作物密度、高度等来间接计算喂入量的值;(4)借助作用在作物茎秆上的弯曲力来预测喂入量。

虽然对喂入量检测的方法多种多样,但每种方法各有利弊;通过扭矩和挤压力的方法需要在联合收获机上安装扭矩传感器或应变片,加装时需要拆卸改装收获机相关工作部件极不方便;机器视觉技术需在收获机上安装相机,可以实现快速无损检测,但相机价格昂贵,再加上机器自身的震动和田间收获时扬尘较大,用相机获取的图像比较模糊,对后期图像处理预测喂入量偏差影响较大。借助茎秆弯曲力的方法可以在作物未进入联合收获机前对生物量进行预测,但受作物品种、生长环境的影响较大。对上述联合收获机喂入量检测方法进行总结,如表1所示。

2.1 传动轴扭矩或功率表示喂入量

作物经割刀切割后由拨禾轮拨至割台底板,通过螺旋输送器将物料向中间聚集向后输送,再由倾斜输送器链耙推送物料至脱粒滚筒进行脱粒。物料在经过各部分时都会产生一定的扭矩和功率,不同的物料量所产生的扭矩或功率大小各异,如表2所示。

国外对检测工作部件传动轴扭矩来预测喂入量的研究较早。1966年,FRIESEN等[18]通过测量脱粒滚筒驱动轴扭矩来表示收获机喂入量;1974年,EIMER[19]使用前喂入轮毂位移量与螺旋输送器扭矩来反映喂入量变化。近年来,国内也有不少学者通过检测主要工作部件的扭矩或功率来获取喂入量,刘元元等[20]对割台螺旋搅龙功率与喂入量之间关系进行研究,田间试验数据处理结果显示两者之间的相关系数R^2高达0.91,表明通过检测螺旋搅龙功率来预测喂入量的方法是可行的;张振乾等[21]设计了基于割台传动轴扭矩的喂入量监测系统,并建立了喂入量预测模型,田间试验表明该系统具有较高的稳定性;孙意帆

等[22-23]提出了基于割台传动轴功率和倾斜输送器功率的喂入量检测方法，并建立了2种计算模型，结果表明割台传动轴功率和倾斜输送器功率对喂入量预测的平均相对误差分别为19.6%和16.1%；梁学修等[24]通过脱粒滚筒轴扭矩、转速与喂入量的理论计算和试验验证，导出了两者之间的关系，试验结果显示喂入量在线监测误差保持在5%以内，具有较好的实用性。陈进等[25]在分析喂入主动轴扭矩与喂入量之间数学关系的基础上，通过大量的试验数据拟合出了喂入量与喂入主动轴扭矩之间的回归方程，为联合收获机喂入量的监测提供理论依据。从表3可以看出，各工作部件主动轴扭矩与喂入量均具有较高的相关性。因此，可以通过检测各工作部件传动轴的扭矩来准确测量联合收获机喂入量的值。

表1　典型的喂入量检测方法

Table 1　Typical feeding quantity detection methods

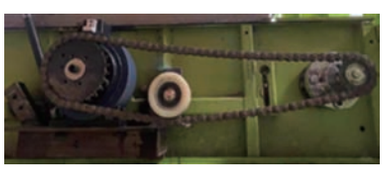
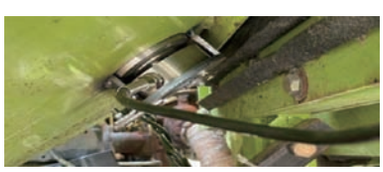
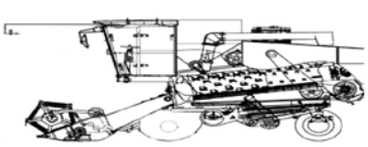
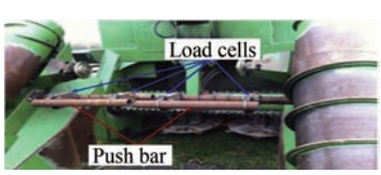
检测位置	检测装置	装置安装结构示意图	主要特点
割台主动轴	扭矩传感器		具有较好的实时性，但安装不便
脱粒滚筒轴	扭矩传感器		由于空间小，难以应用安装在联合收获机上，且实时性较差
倾斜输送器底板出口	压力传感器		在理想环境下精度较高，但未解决倾斜输送器角度随作业地块状况和割茬高度不断变化造成误差的问题
机前	工业相机		安装便捷，但由于机器震动和田间收获扬尘较大，获取的图片模糊，对后期图像处理预测喂入量偏差影响较大
割台	力传感器		安装方便，能够实现作物未进入机器前对喂入量的预测，但受作物品种、生长环境的影响较大

表2　喂入量与扭矩和功率之间的关系

Table 2　Relationship between feeding amount, torque and power

喂入量/(kg·s^{-1})	割台主动轴扭矩电压/V	倾斜输送器扭矩电压/V	螺旋输送器功率/kW	纵轴流滚筒扭矩/(N·m)
0.5	0.2	0	0.425	25.68
1	1.41	0.5	0.475	43.16
1.5	2.88	1.12	0.525	60.64
2	4.35	1.74	0.575	78.13

2.2　物料挤压力反应喂入量

物料经过倾斜输送器时在链耙的作用下推送至脱粒滚筒进行脱粒，由于物料层具有一定的厚度，其对过桥底板产生挤压力；其次，滚筒脱粒过程中作物茎秆随滚筒回转的同时对顶盖产生挤压冲击作用。使用物料对机械结构接触面的挤压力来间接反应收获机喂入量的方法得到了一系列的试验验证[26-27]，结果表明两者在一定条件下具有很强的相关性，且试验测试误差小于8%，这说明该方法适用于联合收获机喂入量检测。

联合收获机倾斜输送器和脱粒室容积是一定的，

在不同喂入量下物料通过倾斜输送器和脱粒滚筒时对其底板和顶盖产生的挤压力是不断变化的,一般随着物料量的增加挤压力也在逐渐增大。不少学者对两者之间的关系做了大量研究,赵胜华等[28]利用薄膜传感器检测到脱粒滚筒顶盖侧边压力(图2)随着喂入量的变化呈现一定规律的波动,试验结果表明传感器采集的电压信号与喂入量之间显著相关,可为联合收获机喂入量的测量提供理论依据;王万章等[29]利用压阻式薄膜传感器自制的压力感应装置安装于链耙式输送器的出口底板上,如图3所示,在物料通过感应装置拱形上压板时对薄膜传感器产生一定的压力,通过试验获取不同喂入量下对应的压力值,拟合得到喂入量与过桥底板压力之间的相关数学模型;刘婉茹[30]研发了一种基于压阻式薄膜传感器的喂入量检测装置,利用三种方法对电压信号进行处理,得到小麦输送质量与电压之间的数学模型,相关系数R^2高达0.97。

表3 各参数与喂入量的相关性

Table 3 Correlation between various parameters and feeding amount

参数	与喂入量的相关系数	检测误差
螺旋搅龙功率	0.91	/
割台传动轴扭矩	0.852	≤30%
倾斜输送器动力轴扭矩	0.783	16.1%
脱粒滚筒轴扭矩	0.912	≤5%



图2 传感器的安装示意图

Figure 2 Schematic diagram of sensor installation

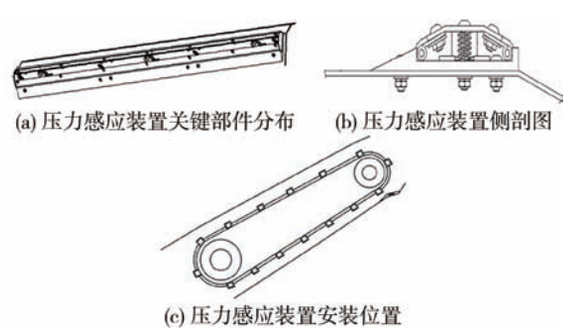


图3 感应装置结构与安装示意图

Figure 3 Structure and installation diagram of induction device

2.3 作物密度及株高预测喂入量

喂入量一般与作业速度、割幅宽度、割台高度、含水量、作物密度、植株高度、作物品种等因素有关,在实际的收获过程中割茬高度可以确定在一定范围内,作业速度可以直观测量得到,通常为满割幅作业,作物品种和含水量在一次收获作业过程中变化不大,所以只需特别关注作物密度、植株高度对喂入量的影响。

随着科学技术的飞速发展,机器视觉和激光雷达技术已广泛应用于农业生产的各个环节中,借助以上先进技术可以快速、精准地检测出田间农作物多种信息[31-34],例如:作物高度、密度、成熟度、产量及病虫害等。国内外不少学者将机器视觉和激光雷达技术用于收获机喂入量检测,SAEYS等[35]使用两种类型的光探测和测距(LiDAR)传感器以及不同的在线数据处理方法来估计联合收获机前作物密度的可行性。使用这两种传感器类型中的任何一种来测量激光穿透深度的变化,对于不同的行驶速度和机器振动,获得了良好的作物密度估计,确定系数(R^2)在0.80~0.96;同时也提出了一种新的作物体积估计方法,该方法通过地面和穗位点使用薄板样条拟合来计算地面剖面和作物剖面之间的体积,再结合密度能较好地估测出收获机喂入量。张姝琦[14]利用卷积神经网络,设计并搭建了油菜收获疏密度检测模型,能够准确地检测出田间油菜的疏密度等级;此外,还利用机器视觉技术对油菜高度进行测量,再结合疏密度检测结果对收获机的喂入量进行估测。陈进等[36]设计了一种联合收获机喂入量在线预测装置,通过图像采集模块实时获取机器前方作物的图片,并传输给中控处理器,获取作物的穗头个数;利用粒子群算法得到的最优个体赋值给BP神经网络的初始权值和阈值,得到喂入量预测模型。潘静等[37]通过对水稻冠层密度图像光谱的分析,以2R+G颜色特征参数值作为收获机喂入密度特征,并与实际测得的喂入密度值进行拟合建立模型,试验结果表明:各个时期,不同品种水稻拟合的曲线均达到显著水平,决定系数高达0.88。

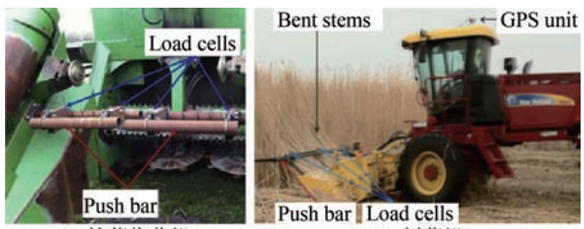
2.4 作物茎秆弯曲力估测喂入量

近年来,工程技术已广泛应用到农业生产中,极大地促进了农业工程各项领域的发展,生物力学理论及相关的研究方法被越来越多应用于农业生产中许多基础性问题的研究[38]。其中作物茎秆生物力学特性的研究正在蓬勃发展[39-42],通过大量实验发现作物茎秆在受到外力作用时产生的形变与生物量之间存在一定的关系,证实了基于力学传感技术对作物生物量预测的可行性。

作物在受到外力作用时的形变与其茎秆强度、种植密度、品种等有关,而这些因素又与生物量相关,因此通过测定作物在弯曲变形过程中所受作用力的大小

来预测生物量。MATHANKER等[17,43]设计了一种基于重力传感器的作物茎秆弯曲力测量系统，并将其分别安装于John Deere 3522甘蔗收割机和New Holland割草机割台前(图4)，作业过程中通过检测推杆上作物茎秆弯曲产生的作用力大小来预测象草和芒草产量值，弯曲力与产量之间的相关系数(R^2)分别为0.92和0.80，产量预测误差分别为4.9%和12.9%。郑玲等[44]研制了一种基于LabVIEW的小麦生物量检测装置，利用压力传感器来测量小麦植株在外力作用下产生的回弹力，试验结果表明茎秆回弹力与生物量具有一定的相关性并建立了数学模型，模型决定系数为0.712 7。

综上所述，4种喂入量检测方法均能实现对联合收获机喂入量的在线检测，但每种方法的检测原理各不相同，均有各自的特点如表4所示。



(a) 甘蔗收获机　　(b) 割草机

图4　茎秆弯曲力测量系统安装示意图

Figure 4　Installation diagram of stem bending force measurement system

表4　4种喂入量检测方法的特点

Table 4　Characteristics of four feeding quantity detection methods

类型	优点	缺点
主动轴扭矩或功率	采集的信号稳定、精度较高	扭矩传感器不便于安装
物料挤压力	检测装置成本低廉	受物料输送的不均匀性影响较大
机器视觉和激光雷达	便于安装在机器前方进行作物信息采集	成本较高，受恶劣环境影响较大
作物茎秆弯曲力	可以在物料未进入机器前对喂入量进行预测	预测结果受作物品种影响较大

3　喂入量检测信号处理及调节技术

3.1　传感器检测信号处理

喂入量检测信号的处理也是非常关键的一步，影响检测信号处理的原因主要有几个方面[45-47]：(1)由于收获机运行时自身的振动、颠簸等原因对传感器产生的干扰信号无法被完全滤除；(2)田间单位面积作物植株密度无法保证绝对均匀，造成实际喂入量计算过程中存在误差；(3)传感器精度及信号处理方法。针对联合收获机田间作业环境差和机器振动对喂入量检测精度的影响，张振乾等[48]通过对田间采集的扭矩信号进行双阈值滤波、插值和降噪处理，结果表明，分段线性插值和自适应滤波效果最佳，信号经处理后的喂入量平均相对误差为12.5%。传感器是指能够感受到被测量的信息，并能将感受到的信息按一定规律转换成可用信号，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求的检测装置[49-50]。因此，根据联合收获机结构条件和检测结果所要获取的信息，尽可能选择统一、简单、便捷安装的高精度传感器。

3.2　喂入量自适应调节技术

将喂入量检测系统与控制系统相结合，在传感器感测到作物信息后经处理得到喂入量估测值，再将其反馈给控制中枢进行作业速度调节，以达到联合收获机能够始终保持在最佳喂入量范围内收获作业，可有效降低油耗和机器故障。喂入量自适应调节是谷物联合收获机自动控制的核心，利用传感器检测出联合收获机喂入量超出所设定的范围后，需及时采取相应措施(升高割台、降低作业速度)来减小物料的喂入。最早采用单输入的控制方法，通过传感器反馈喂入量信息，改变联合收获机作业速度，用传感器反馈作物切割茎秆长度信息，调整割台高度，以保证稳定的喂入量[51-52]。

目前，国内外许多农机企业、高校及研究所对联合收获机喂入量自适应调节功能做了大量研究，并取得了一定成果。国外许多机型已经实现了用喂入量信号既控制行走速度，又控制滚筒转速的功能，大大提升了收获机的作业效率，有效降低了故障率[53-55]。ROBERT[55]研究了通过改变前进速度来保持稳定的滚筒负荷，按照特定的控制算法来调整收获机的作业速度，从而获得稳定的喂入量。林伟等[56]设计了一种基于喂入量的联合收获机行走速度自动控制系统，此系统能够综合分析传感器检测到的喂入量和当前机器的行走速度等有关参数，通过对行走速度的控制最终使收获机喂入量稳定在一个设定的范围内。介战等[57]设计了一种联合收获机喂入量自适应智能控制液压系统，应用模糊控制理论和方法，采用多路电磁液压阀为控制执行部件，可以控制收获机在所设定的最佳喂入量工况下作业。王志文[58]设计了基于喂入量预测的联合收获机作业速度控制系统，利用视觉传感器对收获机前方待收区域的作物生物量模型进行预测，将草谷

比、留茬高度及含水率输入模型,即可实现下一时刻的喂入量预测,田间试验结果表明:基于喂入量预测的联合收获机作业速度控制系统的收获效率比驾驶员手动控制提升了约9.9%。

联合收获机一般为满割幅作业,同一地区同一品种作物收获期的含水量、株高、产量基本相同。因此,喂入量与收获机行走速度和割茬高度有关,在喂入量超出机器的额定值时一般通过改变行走速度或割台高度来减小喂入量。上述研究大多通过控制行走速度来改变喂入量,由于行走速度比割台高度调节对改变喂入量效果更为明显,并且行走速度系统更易控制调节,而割台高度在作业的过程中只能微调对喂入量的改变也是微小的。

4 存在问题

虽然我国对联合收获机喂入量检测技术和自适应调节技术的研究取得了一定成果,但仍存在一些棘手问题。

1)传感器在检测信号的过程中由于收获机自身的振动、颠簸等原因产生的干扰信号无法被完全滤除,严重影响了喂入量检测结果的准确性。

2)现有喂入量检测系统大多只适用于一种作物的收获作业,收获其他作物时效果较差,需要对新作物的属性参数重新标定。

3)国内学者对喂入量的研究大多仅限于对收获机喂入物料量的单一检测,并没有兼顾到其他工作部件的运转性能,更没有完整的智能控制系统对检测结果做出合理的自动反馈调节。

5 发展趋势分析

1)加快高精度农用传感器的研发进度。作物参数信息的精准获取是确保谷物联合收获机物料稳定喂入的关键,收获作业时,通过传感器来获取尽可能多的信息(作业速度、喂入量、作物水分含量、损失率等)。同时,采用多传感器信息融合技术实现对行走速度、割台高度、喂入量等作业参数的自适应调整,从而实现高效、精准收获。

2)实现喂入量检测系统的通用化。现有喂入量检测系统用于收获不同作物时(一机多用),需要多次不同标定、极其不便;开发通用型检测系统,建立常见作物品种属性数据库和信号分析处理库,实现使用同一系统能够满足主粮作物收获喂入量检测需求。

3)实现收获机作业性能的最大化。国内对联合收获机喂入量的研究大多仅限于对喂入物料量的单一检测,不能兼顾到其他工作部件的运转性能,缺少自动控制系统对检测结果的反馈调节。应加大喂入量自适应调节系统的研发力度,利用CAN总线技术对行走系统、输送系统、脱粒及清选系统等做出合理调整以更好地满足收获机稳定在额定喂入量范围内。

4)积极学习、引进国外先进的智能化检测技术,研发高集成度的联合收获机智能调控系统。借鉴国外联合收获机上现有的智能检测系统,对谷物收获机智能化远程在线管理服务技术进行学习、吸收和再创新,以进一步提升我国已有的喂入量在线检测技术,向着拥有多功能集成的智能调控方向迈进。

参 考 文 献

[1] 卢里耶,格罗姆勃切夫斯基著. 农业机械的设计和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1983.

[2] 陈度,王书茂,康峰,等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报,2011,27(9):18-21.
CHEN Du, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 18-21.

[3] 管延华. 浅析谷物联合收获机的喂入量[J]. 中国农机化,2012(5):51-53.
GUAN Yanhua. Brief analysis on feeding amount of grain combine harvester [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(5): 51-53.

[4] LIANG Z, QIN Y, SU Z. Establishment of a feeding rate prediction model for combine harvesters [J]. Agriculture, 2024, 14(4): 589.

[5] 冉军辉,吴崇友. 传感器在谷物联合收获机中的应用进展及发展方向[J]. 江苏农业科学,2019,47(22):23-29.

[6] 何勋,陈旭,屈哲,等. 小麦收获智能化技术应用研究进展[J]. 河南农业大学学报,2022,56(3):341-354.
HE Xun, CHEN Xu, QU Zhe, et al. Review on application research and development of intelligent technology in the process of wheat harvest [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(3): 341-354.

[7] CHEN X, HE X, WANG W, et al. Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review [J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1935.

[8] 倪俊旗. 小麦机收清选损失探索与研究[J]. 农业机械,2021(5):91-93.

[9] JIM K. Computer control for the combine [J]. Agricultural Engineering, 1983, 64(2): 7-9.

[10] 曹崇文. 谷物联合收割机的自动调节[J]. 粮油加工与食品机械,1975(A2):75-90,97.

[11] 汤玲玉,魏新华,童浩,等. 联合收割机喂入量检测方法研究[J]. 农机化研究,2023,45(5):37-42.
TANG Lingyu, WEI Xinhua, TONG Hao, et al.

Research on the detection method of combine harvester feeding rate [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(5): 37－42.

[12] 介战，周学健．喂入量传感器测试模型研究[J]．农业机械学报，2001(5)：53－55.
JIE Zhan, ZHOU Xuejian. Study on mathematical model of feed quantity sensors measuring [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001(5): 53－55.

[13] 罗四倍，介战．无线数据采集和虚拟仪器在喂入量测量中的应用[J]．河南科技大学学报(自然科学版)，2010，31(5)：72－75，111－112.
LUO Sibei, JIE Zhan. Application of wireless data acquisition and virtual instrument techniques to measurement of combine feed quantity [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 31(5): 72－75, 111－112.

[14] 张姝琦．基于机器视觉的油菜收获喂入量及品质监测[D]．南京：南京大学，2021.
ZHANG Shuqi. Monitoring the feeding quantity and quality of rape harvest based on machine vision [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021.

[15] MATHANKER S K, MAUGHAN J D, HANSEN A C, et al. Sensing miscanthus swath volume for maximizing baler throughput rate [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 355－362.

[16] SAEYS W, LENAERTS B, CRAESSAERTS G, et al. Estimation of the crop density of small grains using LiDAR sensors [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 22－30.

[17] MATHANKER S K, BUSS J C, GAN H, et al. Stem bending force and hydraulic system pressure sensing for predicting napiergrass yield during harvesting [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 111: 174－178.

[18] FRIESEN O H, ZOERB G C, BIGSBY F W. For combines: controlling feedrates automatically [J]. Agricultural Engineering, 1966, 47(8): 434－435.

[19] EIMER M. Automatic control of combine threshing process [C]// IFAC Symposium on Automatic Control for Agriculture. 1974.

[20] 刘元元，刘卉，尹彦鑫，等．基于功率监测的联合收割机喂入量预测方法[J]．中国农业大学学报，2017，22(11)：157－163.
LIU Yuanyuan, LIU Hui, YIN Yanxin, et al. Feeding assessment method for combine harvester based on power measurement [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 157－163.

[21] 张振乾，孙意凡，刘仁杰，等．联合收获机喂入量监测系统设计与试验[J]．农业机械学报，2019，50(6)：85－92.
ZHANG Zhenqian, SUN Yifan, LIU Renjie, et al. Design and test of feed rate monitoring system for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 85－92.

[22] SUN Y, LIU R, ZHANG M, et al. Design of feed rate monitoring system and estimation method for yield distribution information on combine harvester [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 201: 107322.

[23] 孙意凡，刘仁杰，欧颢，等．基于功率测量的联合收获机喂入量检测方法研究[J]．农业机械学报，2020，51(5)：118－123.
SUN Yifan, LIU Renjie, OU Hao, et al. Analysis and comparison of feed rate detection methods of combine harvester based on power detection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 118－123.

[24] 梁学修，陈志，张小超，等．联合收获机喂入量在线监测系统设计与试验[J]．农业机械学报，2013，44(S2)：1－6.
LIANG Xuexiu, CHEN Zhi, ZHANG Xiaochao, et al. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S2): 1－6.

[25] 陈进，李耀明，季彬彬．联合收获机喂入量测量方法[J]．农业机械学报，2006(12)：76－78.
CHEN Jin, LI Yaoming, JI Binbin. Study on measurement method of combine feed quantity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006(12): 76－78.

[26] 介战，朱永宁，李振华，等．谷物随机喂入量定量测试技术研究[J]．洛阳工学院学报，1990，11(3)：43－48.
JIE Zhan, ZHU Yongning, LI Zhenhua, et al. Study on quantitative measuring technique for random feed quantity of grain [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1990, 11(3): 43－48.

[27] 介战，朱永宁，李建朝，等．谷物联合收割机喂入量测试装置[J]．粮油加工与食品机械，1994(6)：12－14.
JIE Zhan, ZHU Yongning, LI Jianchao, et al. Test device for feeding amount of grain combine harvesters [J]. Cereals and Oils Processing (Electronic Version), 1994(6): 12－14.

[28] 赵胜华，张国忠，张仕杰，等．基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒实时喂入量测量系统设计[J]．华中农业大学学报，2020，39(2)：160－169.
ZHAO Shenghua, ZHANG Guozhong, ZHANG Shijie, et al. Designing a real-time feed measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on thin film

sensor [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 160－169.

[29] 王万章, 袁玲合, 兰明明, 等. 一种谷物联合收获机喂入量检测方法[P]. 河南省: CN202211630680.6, 2023－03－14.

[30] 刘婉茹. 小麦植株建模与单纵轴流小麦联合收获机物料输送检测试验[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
LIU Wanru. Establishment wheat plant model and test of material movement of single longitudinal axial flow wheat combine harvester [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.

[31] 杨涛, 李晓晓. 机器视觉技术在现代农业生产中的研究进展[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(3): 171－181.
YANG Tao, LI Xiaoxiao. Research progress of machine vision technology in modern agricultural production [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(3): 171－181.

[32] 秦昌友, 杨艳山, 顾峰玮, 等. 现代农业领域中计算机视觉技术的运用与发展[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12): 119－128.
QIN Changyou, YANG Yanshan, GU Fengwei, et al. Application and development of computer vision technology in modern agriculture [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(12): 119－128.

[33] 田鹏菲, 王皞阳. 机器视觉技术在我国农业领域内的应用分析[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 13－21.
TIAN Pengfei, WANG Haoyang. Application analysis of machine vision technology in Chinese agricultural fields [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(14): 13－21.

[34] 徐辉煌, 吴敏, 王梦露. 基于图像处理的菊花收缩率及色泽变化研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(4): 24－38.
XU Huihuang, WU Min, WANG Menglu. Study on the kinetics of shrinkage and color changes of chrysanthemum based on image processing [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 24－38.

[35] SAEYS W, LENAERTS B, CRAESSAERTS G, et al. Estimation of the crop density of small grains using LiDAR sensors [J]. Biosystems Engineering, 2009, 102(1): 22－30.

[36] 陈进, 王志文, 陈海文, 等. 一种联合收获机喂入量在线预测装置及方法[P]. 江苏省: CN202011008723.8, 2021－01－19.

[37] 潘静, 邵陆寿, 王轲. 水稻联合收割机喂入密度检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 113－116.
PAN Jing, SHAO Lushou, WANG Ke. Detection method on feed density for rice combine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 113－116.

[38] 郑玲. 小麦生物量田间快速测量方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
ZHENG Ling. Research on the fast detection method of wheat biomass in field [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.

[39] 郭维俊, 黄高宝, 王芬娥. 作物生长力学的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2005(4): 555－559.
GUO Weijun, HUANG Gaobao, WANG Fen′e. Research progress on mechanics of crop growth [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2005(4): 555－559.

[40] 朱艳姝, 朱大洲, 朱石沙, 等. 小麦茎秆机械强度的力学评价研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 17－23.
ZHU Yanshu, ZHU Dazhou, ZHU Shisha, et al. Study on the mechanical evaluation model of mechanical strength of wheat stalks [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(9): 17－23.

[41] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. 农业机械学报, 2007(7): 172－176.
LIU Qingting, QU Yinggang, QING Shangle, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007(7): 172－176.

[42] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 不同产量水平下小麦倒伏与茎秆力学特性的关系[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 151－155.
GUO Cuihua, GAO Zhiqiang, MIAO Guoyuan. Relationship between lodging and mechanical characteristics of winter wheat stem under different yield levels [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 151－155.

[43] MATHANKER S K, HANSEN A C, GRIFT T E, et al. Sensing miscanthus stem bending force for maximizing throughput rate in a disk mower-conditioner [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(1): 5－12.

[44] 郑玲, 朱大洲, 王成, 等. 基于LabVIEW的小麦生物量检测系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 214－218.
ZHENG Ling, ZHU Dazhou, WANG Cheng, et al. Detection system for wheat biomass based on LabVIEW [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 214－218.

[45] 高志朋, 徐立章, 李耀明, 等. 履带式稻麦联合收获机田间收获工况下振动测试与分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 48－55.
GAO Zhipeng, XU Lizhang, LI Yaoming, et al. Vibration measure and analysis of crawler-type rice and wheat combine harvester in field harvesting condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 48－55.

[46] 解鸿儒, 金诚谦, 印祥, 等. 履带式大豆联合收获机振动

测试与分析[J]. 农机化研究，2019，41(8)：158－163，174.
XIE Hongru，JIN Chengqian，YIN Xiang，et al. Vibration measurement and analysis of tracked soybean combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(8)：158－163，174.

[47] 刘仲鹏，赵建军，刘丽娟. 基于改进算法的小麦收获机作物密度检测研究[J]. 农机化研究，2015，37(8)：49－52.
LIU Zhongpeng，ZHAO Jianjun，LIU Lijuan. Study on wheat harvester crop density detection during maturity based on the improved algorithms [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2015，37(8)：49－52.

[48] 张振乾，彭程，孙意凡，等. 联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理[J]. 农业机械学报，2019，50(S1)：73－78.
ZHANG Zhenqian，PENG Cheng，SUN Yifan，et al. Signal analysis and processing of combine harvester feedrate monitoring system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(S1)：73－78.

[49] 传感器,未来可期[J]. 自动化博览，2016(5)：28－29.

[50] 何万龄. 传感器及其应用分析[J]. 中学生数理化(高二版)，2009(12)：37－38.

[51] 吴琼，王秀均，潘放. 传感器在联合收割机上的应用[J]. 现代化农业，1996(2)：29－30.

[52] 吴清分. 国外联合收割机的最新发展趋势[J]. 拖拉机与农用运输车，2019，46(4)：1－4，10.
WU Qingfen. Latest development trend of foreign combine harvesters [J]. Tractor & Farm Transporter，2019，46(4)：1－4，10.

[53] SÜMER S K，SAY S M，EGE F，et al. Noise exposed of the operators of combine harvesters with and without a cab [J]. Applied Ergonomics，2006，37(6)：749－756.

[54] 中国农业机械化科学研究院. 国内外收获机械化技术发展趋势[J]. 农机科技推广，2003(5)：4－5.

[55] ARNER J R . Combine harvester rotor load control [P]. US：19980022112，2000－03－14.

[56] 林伟，吕新民，樊建荣. 基于喂入量的联合收割机速度控制系统的研究[J]. 农机化研究，2009，31(5)：118－121.
LIN Wei，LÜ Xinmin，FAN Jianrong. Research on combine harvesters′ velocity control system based on feed quantity [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2009，31(5)：118－121.

[57] 介战，貌建华，万庆，等. 联合收割机喂入量自适应控制液压系统[J]. 中国农机化，2002(1)：38－39.
JIE Zhan，MAO Jianhua，WAN Qing，et al. Hydraulic system for adaptive control of feed rate in combine harvesters [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2002(1)：38－39.

[58] 王志文. 基于喂入量预测的联合收获机作业速度控制系统研究[D]. 镇江：江苏大学，2021.
WANG Zhiwen. Research on speed control system of combine harvester based on feed quantity forecast [D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2021.

Research status and development trend of feed quantity detection technology for grain combine harvester

CHEN Xu[1, 2]，HE Xun[1, 2]，ZHU Chenhui[1, 2]，WANG Baoshan[1, 2]，
WANG Wanzhang[1, 2*]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*，*Henan Agricultural University*，*Zhengzhou* 450002，*China*；
2. *Henan Province Low Carbon Agriculture Intelligent Equipment Engineering Technology Research Center*，*Zhengzhou* 450002，*China*)

Abstract: There are common problems in Chinese grain combine harvester，such as difficulty in balancing operational performance and efficiency，high failure rate，and low automation level. Feed quantity is one of the important parameters of grain combine harvester，which directly affects the machine′s operational performance，overall reliability，and economic benefits. Only when the feeding quantity stabilizes within the rated range can the harvester achieve optimal efficiency. Starting from the fact that feeding amount has a vital impact on machine performance，this paper focuses on the detection function of feeding amount by domestic and foreign combine harvesters with the help of sensing technology. The feeding quantity is mainly reflected by measuring the torque or power of the transmission shaft of key working components through torque sensors

and detecting the extrusion force of materials on the mechanical structure shell through pressure sensors. Secondly, machine vision and laser radar technology are used to identify crop density and the bending force of crop stems is measured by force sensor to indirectly represent the feeding quantity. In addition, the reasons that affect the signal processing of feed quantity detection and the key technologies and applications of automatic control of feed quantity in combine harvesters were analyzed and sorted out. Finally, this study proposes the problems existing in the feeding rate detection technology of existing grain combine harvesters, as well as future research priorities and development trends. Although there are many methods for detecting the feeding quantity of domestic combine harvester, they all have low detection accuracy, poor system stability, and are only suitable for a single crop, making it difficult to promote and apply on a large scale. Therefore, there is still great room for improvement in Chinese technology for detecting the feeding quantity of combine harvester. We should increase our research and development efforts on high-precision agricultural sensors and controllers to improve the overall stability of the detection system; The future combine harvester will move towards large-scale, intelligent, and integrated directions.

Keywords: combine harvester; feeding quantity detection; machine vision; sensors; automatic control; intelligent

Foundation items: The China Agriculture Research System: Wheat Mechanization Technology (CARS－03)

First Author: CHEN Xu, E-mail: chenxu1994@stu. henau. edu. cn

* **Correspondence Author:** WANG Wanzhang, E-mail: wangwz@henau. edu. cn