

引用本文格式 崔岳山. 国内玉米联合收获机技术进展[J]. 农业工程, 2024, 14(5): 22-26. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.05.004. CUI Yueshan. Technical progress on domestic corn combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(5): 22-26.

国内玉米联合收获机技术进展

崔岳山

(辽宁省铁岭市昌图县大洼镇农业综合服务中心, 辽宁 铁岭 112500)

摘要: 在研究国内玉米联合收获机割台系统、轴流脱粒系统、智能清选系统、谷物流量传感系统和在线监测系统等相关部件技术研究概况的基础上, 介绍了几款玉米籽粒收获机、青饲料收获机和鲜食玉米收获机的主要技术特点, 为今后研究技术和性能先进的玉米联合收获机提供参考。

关键词: 玉米; 联合收获机; 技术进展; 青饲料收获机; 割台; 脱粒系统

中图分类号: S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2024)05-0022-05

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.05.004

Technical Progress on Domestic Corn Combine Harvester

CUI Yueshan

(Dawa Agricultural Comprehensive Service Center, Changtu County, Tieling Liaoning 112500, China)

Abstract: On basis of studying technical research overview of key components such as header system, axial threshing system, intelligent cleaning system, grain flow sensing system, and online monitoring system of domestic corn combine harvesters, main technical characteristics of several domestic corn grain harvesters, green feed harvesters, and fresh corn harvesters were introduced, providing a foundation for future research on advanced technology and performance of corn combine harvesters.

Keywords: corn, combine harvester, technical progress, green feed harvester, header, threshing system

0 引言

玉米作为我国的主要粮食作物之一, 其生产效率的提升直接关系到农业经济的稳定发展。近年来, 随着科技不断进步和农业机械化水平日益提高, 玉米联合收获机作为实现玉米生产自动化的关键设备, 其技术发展受到了广泛关注。但是, 玉米联合收获机在实际应用过程中仍然存在一些问题需要解决。一方面, 部分机器的收获效率、脱粒效果及籽粒损失率等方面无法达到理想状态, 影响了玉米收获的质量和效率; 另一方面, 土地集约化程度不高和种植结构多样化制约了玉米联合收获机的推广应用。此外, 为了提高经济效益, 一些农户在种植玉米时还会间作套种其他作物, 增加了机械化收获的难度; 部分玉米品种具有生育期较长、抗倒性差和果穗苞叶多等特性, 这不利于机械化收获, 也制约了玉米联合收获机的发展。

本研究梳理和分析国内玉米联合收获机技术进展, 探讨其发展趋势, 分析玉米联合收获机关键工作部件

在性能、部件设计、作业效率等方面的技术特点, 展望玉米联合收获机技术发展方向, 为提高我国玉米收获机械化水平奠定基础。

1 技术分析

1.1 割台系统

割台是玉米联合收获机的关键核心部件, 相关研究内容较多。耿爱军等^[1]针对国内玉米收获机割台高度机械调控存在的问题, 研发了一套割台高度自动调控系统。该系统整合了浮动压紧式仿形机构、STM32控制单元和相关电子模块, 通过角度传感器监测并配合扭簧优化的仿形板适应地面变化, 确保割台贴合地形。系统运用PID控制算法自动调节割台高度, 实现精确控制。测试显示, 在自动模式下割台高度调节误差控制在20 mm内, 响应速度达0.42 m/s, 满足玉米收获机割台调控要求, 为收获机的智能化设计提供了技术支持。特别是在南方丘陵地区, 由于气候原因, 玉米收获期的籽粒含水率高, 直接影响机械化收获的效

果。

罗琪^[2]以湖南省为例，深入分析了玉米种植农艺现状，对割台进行了优化研究，旨在减少收获过程中的籽粒损失。研究内容：一是对南方地区玉米茎秆进行机械性能测试，获取其抗弯、压缩和切割性能参数，并通过混合脱粒试验评估了高含水率下玉米直收的可能性；二是分析割台结构功能，优化关键部件，建立数学模型，并进行了实地测试以验证结构设计的合理性；三是通过模态分析研究割台在工作时的共振问题，并计算出避免共振的工作条件；四是利用 Design-Expert 软件设计曲面响应试验，优化拨禾轮安装位置、高度、转速和割刀高度等因素，田间落穗率降低 19.91%，显著提升了割台的收获效果。通过这些综合性研究，对推动南方地区玉米收获机械化的发展和提升收获效率与质量有重要作用。

金诚谦等^[3]为了提高联合收获机割台高度调控系统的地形响应灵敏度和精度，设计了一种主副板压紧式仿形机构，包括主副仿形板、弹簧、角度传感器和四连杆传动机构。通过几何和力学模型确定关键参数，并运用粒子群优化和多体动力学-离散元素法（MBD-DEM）耦合进行优化测试。优化结果表明，弹簧刚度系数和初始长度是影响因素。最佳参数组合：弹簧刚度系数 464 N/m，弹簧初始长度 0.09 m，副仿形板长度 484 mm，主仿形板长度 450 mm，材料为 301 不锈钢。田间试验结果表明，割台对副仿形板的作用力均 >0 ，土壤对主仿形板平均作用力 85~86 N，对应的土壤沉降距离 <10 mm，验证了仿形机构设计参数的合理性和割台仿形系统的可靠性，可满足收获需求。

姚传鑫^[4]针对现行玉米联合收获机存在的问题，如茎秆折断、籽粒破损和割台碰撞，通过对摘穗、脱粒和割台控制机构的改进研究，提出了针对性的解决方案，以期达到低损伤、高效率的收获目标。研究设计了一种新型激振摘穗装置，利用激振理论，减少了对茎秆的拉力。同时，通过运动学仿真和响应曲面分析，得出了更适合的作业参数。此外，还提出了锥形脱粒分离装置的创新设计，通过减少脱粒元件对果穗的冲击力，降低了籽粒损伤。通过仿真试验确认了装置的优化结构参数，实现了更高效的脱粒效果。针对割台高度控制问题，研究开发了割台仿形测控系统，结合超声波传感器与机械仿形机构的测量方案，提高了割台的作业精度和可靠性。最后，通过对割台进行运动学分析和受力分析，采用卡尔曼滤波优化的 PID 控制算法，实现了割台运动的精确控制。研究结果表明，所提方案能显著提高玉米联合收获机的作业质量和效率，对推动我国玉米机械化收获水平的提升具有重要的理论价值和应用前景。

1.2 轴流脱粒系统

目前，国内外大多数联合收获机使用纵轴流脱粒系统，其性能对谷物的脱粒效果至关重要，影响机械化收获的效率、破碎率和损失率。王勋威等^[5]为了提升中小型联合收获机中横轴流脱粒分离装置的性能，研究了滚筒转速、喂入量及脱粒间隙等因素对其脱粒分离能力的影响，并通过概率学原理，建立了相应的数学模型来预测未脱净率和夹带损失率。模型验证试验结果显示，未脱净率和夹带损失率的预测误差分别为 8.23% 和 2.90%。模型及试验结果均确认了这些参数对脱粒分离性能具有显著影响，从而为优化横轴流脱粒分离装置结构提供了理论支撑。

金冬博^[6]针对单纵轴流玉米联合收获机在实际操作中存在控制系统复杂、工作效率和质量不高的问题，设计了一种高智能化控制系统，以提升收获机的性能。该系统综合考虑工作地点、作业时间和作物含水率等因素，自动调整脱粒滚筒转速和凹板间隙，实现了最优工作参数的实时调节。采用液压比例控制技术和电机控制技术相结合，以 PLC 为核心进行 PID 算法实时控制，通过模拟和实地测试验证了系统的有效性。

刘婉茹等^[7]优化了纵轴流稻谷脱粒设备中鼓形脱粒滚筒的棒齿结构，以改善鼓形脱粒滚筒的轴向负载均匀性，降低了脱粒功率消耗。通过建立棒齿与稻谷的碰撞力学模型，分析了影响轴向负载均匀性的棒齿直径和长度等参数，通过仿真测试确定了最佳的棒齿直径 10 mm、脱粒间隙 25 mm。试验研究表明，优化后的弯曲棒齿设计比传统圆柱棒齿和闭弓棒齿的轴向负载分布更均匀，脱粒功率消耗降低 7.15%，有效提高了脱粒滚筒的性能。此研究对我国丘陵山区小型纵轴流收获机的性能优化具有重要参考价值。

在华北地区，由于玉米收获季节籽粒含水率较高，使用常规的钉齿式和杆齿式脱粒组件会导致较高的籽粒破碎率。为解决这一问题，王镇东等^[8]研究开发了一种新型纹杆式脱粒元件，并对其结构进行了细致研究。通过分析纹杆前倾角对果穗受力的影响，以籽粒破碎时的压缩量作为参考，对纹杆块顶端的弧面形状进行了优化设计。利用 EDEM 软件进一步研究了纹杆顶部参数对果穗受力的影响，并通过 4 因素 4 水平的正交试验法对其结构参数进行了优化。试验结果表明，最佳的纹杆参数组合为前倾角 75°、凸棱倾角 25°、凸棱宽度 6 mm 和凸棱高度 10 mm。台架试验探究了滚筒转速和凹板间隙等工作参数对脱粒效果的影响。在籽粒含水率 28.5% 时，滚筒转速 300 r/min 和凹板间隙 50 mm 下的籽粒破碎率可降至 5.34%。与传统的脱粒元件相比较，比杆齿式脱粒元件的籽粒破碎率（9.91%）和钉齿式脱粒元件的籽粒破碎率（7.83%）分别降低

4.57 和 2.49 个百分点,验证了新型纹杆式脱粒元件在减少玉米脱粒破碎率方面的有效性。

1.3 智能清选系统

作为玉米联合收获机的核心组成部分,清选系统中各项结构参数的精确调节对于降低籽粒在清选过程中的损失率及减少含杂率起着至关重要的作用。刘鹏等^[9]为提升国内谷物收获机的清选效率,针对风筛式清选装置的作业参数调控和监测自动化水平较低的问题,分析了4个关键清选参数(振动筛曲柄转速、风门开度、风机转速和筛片开度)的调节原则,并设计了一套多参数可调可测式清选系统。该系统改进了参数的自动调控、监测和显示,通过电力驱动实现了绿色环保作业。系统调节精度达97.17%以上,确保了参数的精确调控和实时显示。田间试验表明,安装该系统的4LZ-4型收获机收获总损失率3.13%,含杂率2.70%,满足行业标准要求。

张伟等^[10]为了提升玉米籽粒收获机的清选性能,降低其损失率和含杂率,设计了一种结合风机和双层鱼鳞状筛网的清选装置。对该装置建立数学模型,并进行理论分析,识别了影响清选效率的关键因素。利用ADAMS进行动态仿真,得到了清选筛动态加速度的特征曲线,并对风机蜗壳的主要参数进行了精细化的优化。试验采用Box-Behnken设计,以籽粒的杂质含量和损失率作为试验指标,通过变化风机转速、振动频率和筛网开度,建立了因素与指标之间的回归模型。分析物料在清选过程中的运动状态,确定了合适的筛网加速度范围,并通过振动筛连杆进行数学建模,找到了影响清选效果的主要因素。在优化的参数下,即风机转速1050 r/min、振动频率6 Hz、筛网孔径17 mm时,籽粒的杂质含量降至0.94%,损失率降至1.19%,显示出清选装置的参数优化能有效满足行业要求。

1.4 谷物流量传感系统

精确获取和绘制作物产量分布图是实施精细农业和精准管理的关键。安装在玉米联合收获机上的产量监测系统可以提供这些数据,支持田间管理和资源优化,增加产量,减少污染,促进可持续农业发展,并推动国内农业技术创新。谷物产量监测技术主要分为冲击式、容积式、动态称量和辐射测量。冲击式测量普遍使用,但可能损害谷物;容积式测量和动态称量因田间条件和机器振动导致误差;辐射测量因成本和安全性未广泛采用^[11]。

耿端阳等^[12]开发了一种基于粮流压力原理的在线监测系统,并构建了相应的数学模型。该系统包括粮流监测装置、定位装置、割台高度控制开关、核心处理器和人机交互设备等。系统实现了粮食收获过程中

产量的实时测量、显示和存储。通过优化试验,确定了传感器数量、安装位置和设备倾角的最佳参数,实现了粮食产量监测系统的精确度。试验表明,系统监测误差5.28%。能够满足精准农业实际生产需求。

马鑫等^[13]开发了一套利用CAN总线技术的微波产量感应器。该装置通过在收获机上安装的微波模块发射和接收微波信号,通过检测反射回的微波频率变化来分析作物的产量数据。

为了准确监测农作物的损失率,李耀明等^[14]设计了一套籽粒损失监测传感器标定试验台,由升降平台、升降驱动装置、给料装置和传感器安装平台等构成。该设备能够在实验室环境下模拟不同的作业条件,通过调整传感器的安装高度和角度,对饱满和不饱满的小麦籽粒及不同长度的茎秆进行精确标定。试验结果显示,该监测传感器在不同水分含量的小麦样品中,测量误差控制在4.8%以内。基于实验室的标定结果,确定了传感器在田间监测时的最佳安装位置,田间测试显示夹带损失的最大监测误差3.40%,证明了标定试验台在精确监测作物损失方面的有效性。

1.5 在线监测系统

张敏等^[15]开发了一种利用近红外光谱技术的谷物蛋白含量在线检测系统,集成到玉米联合收获机中,用于收获时实时监测作物蛋白含量及记录采样位置。系统由近红外传感器、螺旋取样机构、PID控制步进电机、GPS/北斗定位和数据处理软件组成,能在不同玉米籽粒流经时进行光谱捕获和定位信息记录。室内外测试表明,系统预测性能稳定,均方根误差分别为0.638和0.516,满足田间在线检测需求,为精准农业提供参考。

2 产品技术特点

近年来,国内玉米联合收获机发展方向主要有籽粒收获机、青饲料收获机和鲜食玉米收获机。市场上一些代表产品列举如下。

2.1 中联收获4YZL-5(G4)型自走式玉米籽粒联合收获机

①采用四连杆铰接结构,割台角度调整方便,3次深度粉碎,有机肥料还田。②传感器灵敏度高,响应速度快,瞬时传递转速讯息,精密联动报警,预防突发事件。③利用人体仿生学原理,设计指型压送装置,5组20辊同步开动,柔性剥皮技术,提速作业效能品质。④机械离合搅龙卸粮,智能化无人工作业,卸籽粒效能较高。

2.2 雷沃谷神GK120 PRO型联合收获机

①可配套4.57 m刚台、5.34 m挠台、6行/8行籽粒割台、捡拾割台等。②单纵轴流滚筒喂入锥体导草

板、喂入叶片螺旋角优化, 喂入更顺畅。③新3段式滚筒, 大纹杆块螺旋排布, 长分离齿横向排布, 收玉米配圆钢凹板+栅格凹板+梳齿凹板组合, 减少碎芯, 降低籽粒破碎, 脱粒干净, 分离彻底。④栅格凹板结构全新优化, 排出秸秆更长, 脱粒干净, 分离彻底。⑤脱粒分离能力强, 清选面积大, 粮仓大, 卸粮速度快。⑥正压密封空调驾驶室, 格拉默悬浮减振座椅, 电控手柄, 操纵更轻便, 手柄集成割台高低、拨禾轮高低、卸粮筒开合、卸粮离合和一键急停按键, 操作方便。⑦操控面板集电控工作离合, 电控滚筒调速, 卸粮筒一键开合, 粮箱盖电动开合, 扶手箱高低电控调节按钮, 操作更舒心。⑧可用于大豆、玉米籽粒、小麦、谷子和高粱等作物的收获作业, 适用于东北、中原, 以及新疆维吾尔自治区(简称新疆)的大型农服组织、合作社进行大地块作业。

2.3 美迪 9QZ-3000 型自走式青饲料收获机

①往复式割台留茬低, 收获倒伏玉米效果好。割台具有仿形装置, 可以随地势小范围上下浮动, 有效保护割刀。②玉米籽粒破碎率可达 90% 以上, 是传统对辊籽粒破碎器破碎面积的 270%。③喂入室由 8 个喂入辊组成, 能有效对秸秆多级滚压、压扁, 饲料适口性好; 喂入宽度 580 mm, 喂入更流畅、不易堵塞。④选用双叶片螺旋推运器, 输送流畅、螺旋片强度高、经久耐用。

2.4 谷耘丰 4YZT-2 型自走式鲜食玉米收获机

①配置四驱液压无级变速驱动桥, 取代传统无级变速轮和离合器, 驱动动力强劲, 大大降低故障率, 提高作业效率。②配备模拟人手采摘的夹持式仿生割台, 近似人工采摘, 玉米损伤率低。③全车液压系统, 反应灵敏、稳定性好、可靠性高。④装备电控系统, 智能操纵、简单灵活, 驾驶员疲劳感降低、舒适度提升。

3 发展趋势

3.1 不同地区产品发展趋势

随着国内玉米种植品种的不断改良, 预计未来 5~8 年, 黑龙江农垦、新疆生产建设兵团, 以及黄淮海大部区域机械化程度将会走入发展的快车道, 有望早日全面实现籽粒收获。其中, 大面积成片地块将实现规模机械作业, 烘干设施完善、粮商布局完备区域, 将以大中型籽粒收普及为主; 黄淮海等区域籽粒收机型由小及中, 逐步过渡, 摘穗机型的应用场景将逐步减少。在此基础上, 特需机型将在全面技术进步下展现出新形态, 如鲜食玉米收获机、穗茎兼收等复合功能机型将在细分领域有充足的发展空间; 丘陵山区特需小型或履带式玉米收机型将并存; 随着籽粒收获技

术的不断升级, 各地区将逐步向更适用的产品过渡, 这是今后主要发展方向。

3.2 技术发展趋势

(1) 智能化和自动化。引入先进的传感器、控制系统和导航技术, 实现自动导航、智能识别作物成熟度、自动调整收获参数等功能, 从而提高收获效率和精度。

(2) 多样化和个性化。开发适合不同地区、不同种植模式的收获机型号, 满足农民对机械设备多样化的需求。

(3) 信息化和智能化。与信息化和智能化管理技术相结合, 实现远程监控、故障诊断、智能维护等功能, 帮助农民更好地管理农业生产。

(4) 节能和环保。未来玉米联合收获机将更加注重环保和节能技术的应用。如采用更加高效的发动机、优化机械结构、使用可再生能源等, 降低能源消耗, 减少环境污染。

4 结束语

我国是玉米生产大国, 随着玉米产业的快速发展, 玉米联合收获机作为促进产业化的关键手段, 其技术性能、作业效率和智能化程度也将取得更大的突破。同时, 玉米联合收获机技术的发展还面临着诸多挑战。在解决机械性能不稳定、智能化水平不足等问题上, 仍需科研机构和企业持续投入研发力量, 加大技术创新力度。展望未来, 玉米联合收获机技术不断取得新的突破和进展, 为提升我国玉米生产效率和质量作出更大的贡献。推动我国农业机械化水平再上新台阶, 为构建现代化农业体系、实现农业强国目标提供有力支撑。

参考文献

- [1] 耿爱军, 张猛, 张姬, 等. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计及试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 118-125.
GENG Aijun, ZHANG Meng, ZHANG Ji, et al. Design and experiment of automatic control system for corn header height[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 118-125.
- [2] 罗琪. 玉米联合收获机割台优化设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
LUO Qi. Optimal design and experimental research on the header of corn combine harvester[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.
- [3] 金诚谦, 刘岗微, 倪有亮, 等. 基于 MBD-DEM 耦合的联合收获机割台仿形机构设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(2): 1-10.
JIN Chengqian, LIU Gangwei, NI Youliang, et al. Design and ex-

- periment of header profiling mechanism for combine harvester based on MBD-DEM coupling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(2): 1-10.
- [4] 姚传鑫. 玉米联合收获机关键部件参数优化与割台仿形系统研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- YAO Chuanxin. Research on parameter optimization of key components and header profiling system of corn combine[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.
- [5] 王勋威, 谢方平, 任述光, 等. 横轴流脱粒分离装置的数学模型的建立与试验[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(4): 480-487.
- WANG Xunwei, XIE Fangping, REN Shuguang, et al. A mathematical model and test of the horizontal axial flow threshing separation device[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 46(4): 480-487.
- [6] 金冬博. 单纵轴流玉米联合收获机脱粒装置控制系统[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- JIN Dongbo. Single longitudinal flow corn combine thresher control system[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [7] 刘婉茹, 周勇, 徐红梅, 等. 水稻鼓形纵轴流脱粒滚筒杆齿优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 34-45.
- LIU Wanru, ZHOU Yong, XU Hongmei, et al. Optimization and experiments of the drum longitudinal axial threshing cylinder with rod tooth for rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15): 34-45.
- [8] 王镇东, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米联合收获机纹杆式脱粒元件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 115-123.
- WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of rasp bar threshing element of corn combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 115-123.
- [9] 刘鹏, 金诚谦, 杨腾祥, 等. 多参数可调可测式清选系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 191-201.
- LIU Peng, JIN Chengqian, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of multi parameter adjustable and measurable cleaning system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 191-201.
- [10] 张伟, 靳范, 李谦绪, 等. 玉米籽粒联合收获机清选装置优化设计与试验[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(12): 3102-3112.
- ZHANG Wei, JIN Fan, LI Qianxu, et al. Design and experiment of cleaning device for corn grain combine harvester[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(12): 3102-3112.
- [11] 田原, 王熙. 谷物产量监测系统研究现状分析[J]. *南方农机*, 2023, 54(23): 11-13.
- TIAN Yuan, WANG Xi. Analysis of the current research status of grain yield monitoring systems[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2023, 54(23): 11-13.
- [12] 耿端阳, 谭德蕾, 苏国梁, 等. 压力式谷物产量监测系统优化与试验验证[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 245-252.
- GENG Duanyang, TAN Delei, SU Guoliang, et al. Optimization and experimental verification of grain yield monitoring system based on pressure sensors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(9): 245-252.
- [13] 马鑫, 王熙, 王新忠, 等. 基于微波的产量监测传感器设计与试验[J]. *农机化研究*, 2022, 44(12): 163-169.
- MA Xin, WANG Xi, WANG Xinzhong, et al. Design and test of yield monitoring sensor based on microwave[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(12): 163-169.
- [14] 李耀明, 梁振伟, 赵湛, 等. 联合收获机籽粒损失监测传感器性能标定试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(S1): 79-83.
- LI Yaoming, LIANG Zhenwei, ZHAO Zhan, et al. Calibration experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(S1): 79-83.
- [15] 张敏, 吴崇友, 陈旭, 等. 近红外光谱式联合收割机谷物蛋白质含量检测系统设计[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 36-43.
- ZHANG Min, WU Chongyou, CHEN Xu, et al. Design of near-infrared spectral grain protein detection system for combine-harvesters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1): 36-43.