

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.08.029

# 玉米脱粒参数多工作模式智能决策研究

董佳琪 崔涛 张东兴 杨丽 和贤桃 邢书仑

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对玉米联合收获机作业过程中存在的籽粒损失严重、工作参数无法实时调节等问题,本文设计了一种玉米脱粒参数多工作模式智能决策系统,可动态调整脱粒装置工作参数,从而降低收获损失。探究了脱粒参数调控机理。开发了夹带损失监测系统和脱粒参数智能调控系统。基于 Simulink 环境构建了脱粒参数智能决策模型,对提出的系统进行了仿真测试,结果表明,在高效收获模式及低损收获模式下,系统均能较好地达到设定目标。通过现场测试验证了智能调控系统性能,试验结果表明,低损收获模式下,夹带损失率均值为 1.767%,相对传统模式下降 16.536%;高效收获模式下,夹带损失率均值为 2.030%,相对传统模式上升 1.970%,证明了所提出的系统表现良好,能够满足实际收获作业需求。研究结果为提升玉米联合收获机智能化水平提供了技术支撑。

**关键词:** 玉米; 夹带损失监测; 脱粒参数智能决策; 多工作模式

中图分类号: S225.39 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)08-0314-06

OSID:



## Intelligent Decision Making for Maize Threshing Parameters in Multiple Operating Modes

DONG Jiaqi CUI Tao ZHANG Dongxing YANG Li HE Xiantao XING Shunlun

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of serious grain loss and working parameters not being able to be adjusted in real time during the operation of maize combine harvester, a maize threshing parameter multi-mode intelligent decision-making system was designed, which can dynamically adjust the working parameters of the threshing device so as to reduce the harvest loss. The mechanism of threshing parameter regulation was explored. The entrainment loss monitoring system and threshing parameter intelligent regulation system were developed. The intelligent decision model of threshing parameters was constructed based on Simulink environment, and the proposed system was simulated and tested, and the results showed that the system could better achieve the set objectives in both high-efficiency harvesting mode and low-loss harvesting mode. The performance of the intelligent regulation system was verified through field tests, and the test results showed that the average value of the entrainment loss rate was 1.767% in the low-loss harvesting mode, which was decreased by 16.536% relatively to the traditional mode; and the average value of the entrainment loss rate was 2.030% in the high-efficiency harvesting mode, which was increased by 1.970% relatively to the traditional mode, which proved that the proposed system performed well and met the requirements of actual harvesting operations. The research results can provide technical support for improving the intelligent level of maize combine harvester, and provide a reference for the improvement of maize crop harvesting yield and quality.

**Key words:** maize; entrainment loss monitoring; intelligent decision making for threshing parameters; multiple operating modes

## 0 引言

玉米是我国最重要的粮食作物之一<sup>[1-4]</sup>。机械

化籽粒直收已成为玉米收获的发展新方向,其中脱粒分离装置是玉米联合收获机核心部件<sup>[5-7]</sup>。现阶段,脱粒分离装置正在朝着智能化、自动化方向发展

收稿日期: 2025-03-14 修回日期: 2025-04-06

基金项目: 国家现代玉米产业技术体系建设项目(CARS-02)和产业基础再造和制造业高质量发展专项(2023ZY02006)

作者简介: 董佳琪(1998—),男,博士生,主要从事农业机械与计算机测控研究,E-mail: bs20233070706@cau.edu.cn

通信作者: 崔涛(1985—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与计算机测控研究,E-mail: cuitao@cau.edu.cn

展<sup>[8]</sup>。面向田间复杂多变的收获环境,高智能化、自动化脱粒分离装置已成为急需突破的技术难点<sup>[9]</sup>,智能农机研发成为玉米全程机械化进程中的关键问题<sup>[2,10-12]</sup>。

夹带损失率是评价脱粒装置工作性能最关键指标之一,在联合收获机总损失中占据重要地位<sup>[13-15]</sup>。受田间地形起伏、植株种植密度等因素的影响,收获机工作过程中喂入量通常实时变化,造成夹带损失波动。而机手无法根据实时变化的夹带损失来动态调节脱粒系统中各项参数,造成了大量夹带损失。现有研究表明,当收获机工作参数设置不合理时,会造成大量的经济损失<sup>[16-17]</sup>。因此,突破脱粒参数智能调控技术已经成为目前研究的重点。

为了提升脱粒分离装置的智能化水平,降低收获过程中的损失,国内外学者进行了大量研究<sup>[18-23]</sup>。然而,现有研究大多通过间接参数评估夹带损失,如采用滚筒扭矩、凹板侧边油缸压力、活塞杆负载等参数表征收获过程的喂入量、滚筒负荷等,最终实现工作性能提升,调控过程繁琐,标定过程复杂。此外大多数研究仅支持一种工作模式,仅可实现预定的损失目标。对于如低损失收获、高效率收获等不同需求的参数智能化决策研发仍处于技术研发起步阶段。

基于单纵轴流脱粒装置,面向不同工作要求,本文研究适用于高效收获模式与低损收获模式的玉米联合收获机智能决策方法,以实现基于监测的籽粒损失量实时调整脱粒系统工作参数,从而提升玉米收获作业质量与产量。

## 1 脱粒参数决策机理分析

脱粒系统工作参数主要有滚筒转速、凹板间隙、导流板角度等<sup>[24]</sup>,对夹带损失率影响最大的参数为导流板角度<sup>[25]</sup>,因此,以导流板角度为调控对象,对导流板角度影响夹带损失机理开展研究。

对玉米果穗在脱粒装置内的运动进程进行了分析,如图 1 所示,以单个玉米果穗为例,设定果穗与导流板接触点为原点,以沿滚筒轴向为  $x$  轴,以垂直滚筒轴向为  $y$  轴,构建导流板与玉米果穗运动学关系模型,其中  $\theta$  为导流板角度。

由图 1 可知,当玉米果穗在脱粒装置内运动时,其沿导流板运动速度  $v$  可以分解为  $y$  轴方向和  $x$  轴方向,即

$$\begin{cases} v_x = v \sin \theta \\ v_y = v \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,当果穗以固定速度沿导流板运动时,其轴向运移速度与导流板角度有关。当导流

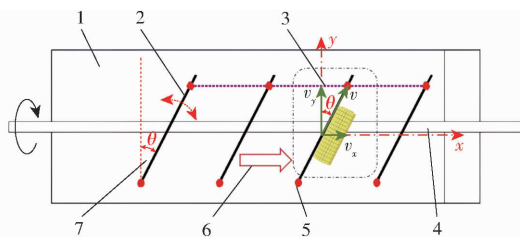


图 1 导流板角度影响果穗运动进程分析

Fig. 1 Analysis of process of maize movement influenced by deflector plate angle

1. 脱粒室 2. 导流板 3. 导流板连杆 4. 脱粒滚筒中心轴 5. 导流板固定点 6. 果穗运移方向 7. 导流板角度

板角度增大时,玉米果穗轴向运动分速度变大,则轴向运移速度变快,脱粒时间变短,夹带损失随之增加;反之,导流板角度减小,果穗轴向运移速度减小,脱粒时间变长,则夹带损失减少。因此,导流板角度与夹带损失呈正相关。

当脱粒进程中夹带损失率超出设定阈值时,可通过导流板连杆移动实现导流板角度调整,进而控制夹带损失。

## 2 脱粒参数智能控制系统设计

### 2.1 夹带损失实时监测系统设计

设计的夹带损失监测传感器作为脱粒损失核心监测单元<sup>[17]</sup>,安装于脱粒滚筒尾部<sup>[26-28]</sup>,传感器监测系统流程如图 2 所示。

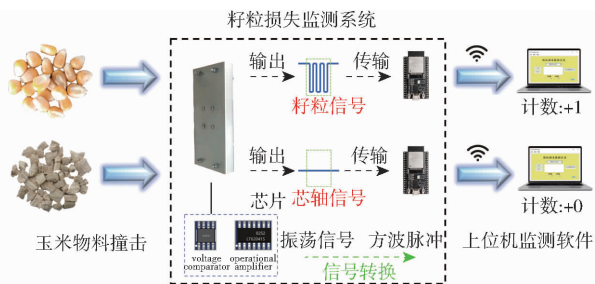


图 2 夹带损失监测系统流程

Fig. 2 Composition of entrainment loss monitoring system

当收获机工作时,不同物料(玉米籽粒、玉米碎芯轴、玉米苞叶等)撞击到籽粒损失监测传感器时,传感器敏感板外壳感受物料振动冲击并将振动传递至压电陶瓷,传感器中的信号处理电路对各撞击信号进行分析,其中碎芯轴信号和苞叶信号被过滤掉,籽粒信号被处理为规律脉冲,最后得出检测的损失籽粒数。

脱粒过程中,传感器可实时监测损失籽粒量,并转换为损失率发送至控制器,其中设置监测数据每秒发送一次。传感器监测籽粒量与实际损失率关系为

$$S = \frac{M(l+1)}{10kg_b Wl} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $S$ ——夹带损失率, %

$M$ ——传感器每秒监测籽粒量,粒  
 $g_b$ ——玉米百粒质量, g  
 $k$ ——传感器监测量与实际损失量比例  
 $W$ ——收获机喂入量, kg/s  
 $l$ ——玉米谷草比

其中,通过夹带损失监测传感器实时获取  $M$ 。  $l$  为 0.58,在开展台架试验过程中,由于忽略茎秆影响,基于对籽粒、苞叶及芯轴的测量,取  $l$  为 4.50。两侧传感器监测系数  $k$  选择为 0.12 和 0.06<sup>[26]</sup>。通过对试验样本称量,得到百粒质量  $g_b$  为 36.31 g。喂入量  $W$  选为 5~11 kg/s。

## 2.2 脱粒参数智能调控系统设计

导流板自适应调控装置由比例放大板、比例换向阀、液压缸、位移传感器、导流板调节连杆等组成,如图 3 所示。导流板一端固定于脱粒室,另一端则与导流板调节连杆连接,当控制器通过比例换向阀控制液压缸伸缩时,液压缸则带动导流板调节连杆移动从而实现导流板转动。同时位移传感器实时监测液压缸伸长量,实现导流板角度调节反馈。

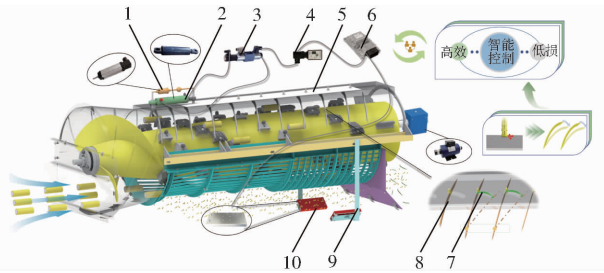


图 3 导流板智能调控系统组成

Fig. 3 Composition of guide plate intelligent regulation system

1. 位移传感器 2. 液压缸 3. 电磁比例阀 4. 比例放大板 5. 导流板调节连杆 6. PLC 控制器 7. 导流板角度调节空间 8. 导流板 9. 夹带损失传感器安装支架 10. 夹带损失监测传感器

根据实际作业需求,该系统可面向低损收获模式和高效收获模式,在不同模式下实现导流板角度智能化决策。

## 3 多工作模式智能决策

### 3.1 总体决策方案设计

玉米机械化收获过程中,因机手或农户对籽粒

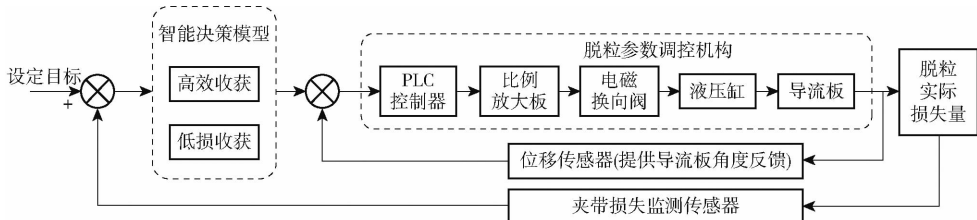


图 4 脱粒参数智能决策总体方案

Fig. 4 General scheme of intelligent decision making for threshing parameters

收获需求的多样化<sup>[29]</sup>,需构建多工作模式玉米智能化收获策略,因此,本文提出了基于作业参数在线监测的多工作模式玉米脱粒参数智能决策方法,集中面向高效智能收获和低损智能收获。

基于夹带损失监测传感器获取的实时损失籽粒量,依据导流板角度-夹带损失调控模型,在不同工作模式下实现对导流板角度调节,最终将夹带损失控制在设定阈值范围内。决策方案如图 4 所示。

### 3.2 脱粒参数-脱粒性能影响规律模型

以导流板角度与喂入量为试验因素,以夹带损失率为试验指标开展了全因素试验。其中喂入量选取 5、8、11 kg/s,导流板角度选取 20°、25°、30°,基于多元线性回归算法对试验结果构建了夹带损失受导流板角度及喂入量影响模型,即

$$y = -0.799827 - 0.968716x_1 + 0.355408x_2 + 0.023499x_1x_2 + 0.0227327x_1^2 - 0.007924x_2^2 \quad (3)$$

式中  $y$ ——夹带损失率预测值, %

$x_1$ ——喂入量监测值, kg/s

$x_2$ ——导流板角度监测值, (°)

### 3.3 面向高效率需求的决策设计

玉米收获过程中,保持较高收获效率前提下,将损失率维持在设定阈值附近。将夹带损失率阈值设定为 2%。因此,在决策过程中,损失率不超过 2% 前提下,应尽可能增加导流板角度或增加喂入量以提高收获效率。

### 3.4 面向低损失需求的决策设计

玉米收获进程中,若采用低损收获模式,则只需将损失率控制在 2% 以内,可降低喂入量或减少导流板角度,此时脱粒进程略有下降。

## 4 智能决策系统性能验证

### 4.1 智能决策系统仿真测试

#### 4.1.1 基于 Simulink 环境的智能决策系统搭建

利用 Matlab 中的 Simulink 对导流板自适应调控系统进行了仿真测试。仿真环境如图 5 所示。

为探究自动控制系统在不同工作环境下的有效性和可靠性,选取喂入量 5、8、11 kg/s,对比在不同工况下使用参数智能决策系统与传统参数恒定系统

时夹带损失率。

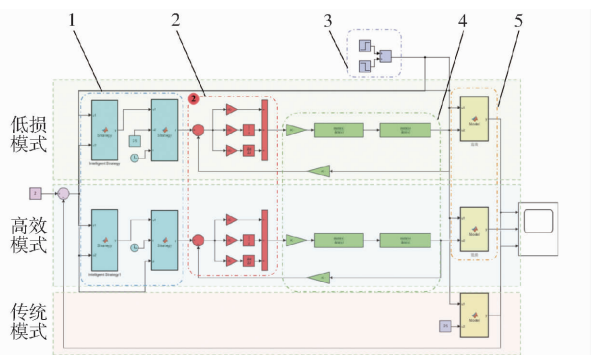


图 5 导流板自适应调控系统 Simulink 模型

Fig. 5 Simulink model of deflector adaptive regulation system

- 1. 控制策略 2. PID 控制 3. 喂入环境波动 4. 调控系统
- 5. 脱粒损失预测模型

#### 4.1.2 智能决策系统仿真试验

不同工况下,使用高效、低损、传统收获模式时,脱粒损失率仿真结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,当设定损失率阈值为 2% 时,在高效收获模式下,通过系统调节,脱粒损失率均达到 2% 附近。不同工况下,脱粒损失率均值为 1.981%。在低损收获模式下,通过系统调节,脱粒损失率均达到设定阈值以下,而当损失率不超过阈值时,系统维持原有参数。不同工况下,脱粒损失率均值为 1.754%。在传统收获模式下,脱粒参数维持恒定,不同工况下,脱粒损失率均值为 1.908%,平均值未超过设定阈值,然而在特定喂入量(如 11 kg/s)下,夹带损失率仍超出设定阈值范围。因此,在高效收获模式下,虽

脱粒损失率相对升高 3.826%,但能够提升作业效率,且在不同环境下均能达到损失率要求,在低损收获模式下,脱粒损失率相对下降 8.071%,达到了机械收获大幅减损的目的。

在高效收获模式下,当喂入量为 5、8、11 kg/s 时,导流板角度调整为 29.5°、26.3°、23.0°,导流板角度增加有助于果穗向后运移,以提升脱粒效率。在低损收获模式下,以 5-8-11 kg/s 工作环境为例,导流板角度调整为 25.0°、25.0°、21.3°,可以看出,导流板角度减小有助于降低夹带损失,但同时会增加脱粒时间,降低脱粒效率<sup>[30]</sup>。

#### 4.2 智能决策系统现场性能验证试验

##### 4.2.1 现场验证试验设计

2024 年 10—11 月在河北省邯郸市开展了现场验证试验(图 7)。喂入环境选择 5-8-11 kg/s,初始导流板角度设为 25°,试验过程中实时采集夹带损失率以及导流板角度,试验完成后,人工对夹带损失率进行统计。试验结果如表 1 所示。

##### 4.2.2 现场验证试验结果与分析

由表 1 可知,低损收获模式下,夹带损失率均值为 1.767%,相对传统模式下降 16.536%;高效收获模式下,夹带损失率均值为 2.030%,相对传统模式上升 1.970%。

现场试验数据较仿真试验数据增加的原因在于试验过程中由于台架振动、喂入果穗形状差异等因素,造成统计数据增加,但统计规律与仿真试验保持一致,且偏差在可接受范围内,进一步验证了提出的多工作模式的脱粒参数智能决策系统的

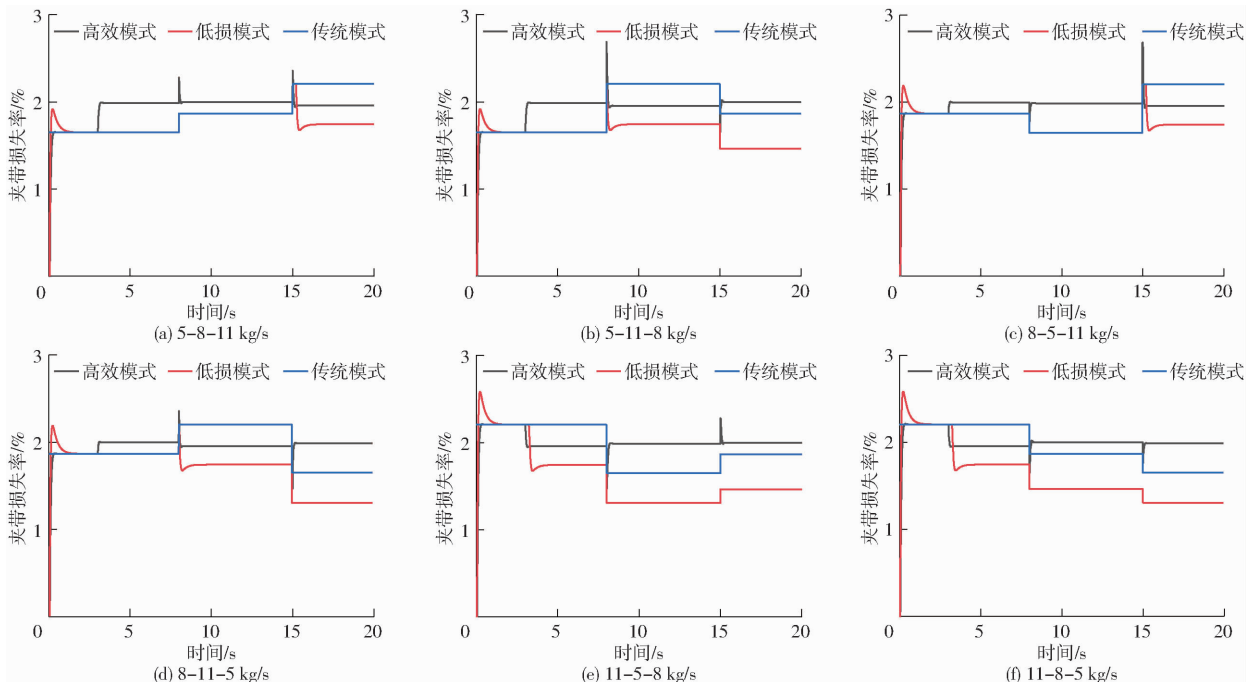


图 6 不同工况和工作模式下脱粒损失率仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results of threshing loss rate under different working conditions and operating modes



图7 现场试验流程

Fig.7 Field test flow

1. 导流板角度反馈与调节装置 2. 夹带损失监测装置

可行性。

表1 不同工作模式夹带损失率对比

Tab.1 Comparison of entrainment loss rates for different operating modes %

序号	传统模式	高效模式	低损模式
1	2.13	2.08	1.77
2	1.99	1.85	1.84
3	1.86	2.16	1.69

## 5 结论

(1) 设计了夹带损失监测装置与导流板智能调控装置,提出了基于夹带损失实时监测的导流板角度智能调控系统。面向不同收获作业需求,开发了高效智能收获与低损智能收获两种工作模式,通过合理设定夹带损失理想值,可实现在不同工况下导流板角度的智能化决策与调控,使脱粒系统达到最佳工作水平。

(2) 基于 Simulink 仿真环境,构建了多工作模式脱粒参数智能决策模型,在不同工作环境下,对系统进行了测试。结果表明,在高效收获模式下,损失率均值为 1.981%,在低损收获模式下,损失率均值为 1.754%,均实现了各自模式下的目标。

(3) 对脱粒参数智能决策系统进行了现场试验验证。结果表明,与传统模式相比,使用高效收获模式时,夹带损失率上升 1.970%;使用低损收获模式时,夹带损失率下降 16.536%。与仿真结果保持一致,验证了该系统的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] DONG Jiaqi, ZHANG Dognxing, YANG Li, et al. Discrete element method optimisation of threshing components to reduce maize kernel damage at high moisture content[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 221–240.
- [2] 崔涛, 樊晨龙, 张东兴, 等. 玉米机械化收获技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 1–13.  
CUI Tao, FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 1–13. (in Chinese)
- [3] XIAO Tianpu, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Early detection of nicosulfuron toxicity and physiological prediction in maize using multi-branch deep learning models and hyperspectral imaging[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 474: 134723.
- [4] 王飞, 阿力木·买买提吐尔逊, 张俊三, 等. 玉米籽粒收获机组合筛面预筛分式清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 135–147, 166.  
WANG Fei, ALIMU Maimaitiursun, ZHANG Junsan, et al. Design and experiment of pre-screening cleaning device for combined screen surface of corn grain harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 135–147, 166. (in Chinese)
- [5] 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. (in Chinese)
- [6] 高朋飞, 张新伟, 姜春霞, 等. 轴向滚筒式鲜食玉米脱粒装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊2): 145–156.  
GAO Pengfei, ZHANG Xinwei, JIANG Chunxia, et al. Optimized design and test of axial roller fresh corn threshing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp.2): 145–156. (in Chinese)
- [7] 张蔚然, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 基于 FSLYOLO v8n 的玉米籽粒收获质量在线检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 253–265.  
ZHANG Weiran, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Online detection method of corn kernel quality based on FSLYOLO v8n [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 253–265. (in Chinese)
- [8] MUTUNGI C, MANDA J, FELEKE S, et al. Adoption and impacts of improved post-harvest technologies on food security and welfare of maize-farming households in Tanzania: a comparative assessment [J]. Food Security, 2023, 15(4): 1007–1023.
- [9] 欧阳安, 崔涛, 林立. 智能农机装备产业现状及发展建议 [J]. 科技导报, 2022, 40(11): 55–66.  
OUYANG An, CUI Tao, LIN Li. Development status and countermeasures of intelligent agricultural machinery equipment industry [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(11): 55–66. (in Chinese)
- [10] 欧阳安, 王明磊, 崔涛, 等. 粮食作物生产装备应用现状与发展趋势 [J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 298–304.  
OUYANG An, WANG Minglei, CUI Tao, et al. Application status and development trend of mechanized equipment for grain crop production [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 298–304. (in Chinese)
- [11] 张真, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 基于 CAN 总线的玉米收获智能控制系统研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 275–281.  
ZHANG Zhen, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Investigation on CAN-bus-based corn harvester intelligent control system [J].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 275 – 281. (in Chinese)
- [12] 唐小涵, 金诚谦, 张国海, 等. 我国联合收获机脱粒分离装置的研究现状[J]. 农机化研究, 2022, 44(3): 1 – 9, 15. TANG Xiaohan, JIN Chengqian, ZHANG Guohai, et al. Research status of threshing and separating device for combine harvester in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(3): 1 – 9, 15. (in Chinese)
- [13] 刘阳春, 李明辉, 王吉中, 等. 玉米籽粒直收机夹带损失检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 140 – 149. LIU Yangchun, LI Minghui, WANG Jizhong, et al. Design and test of entrainment loss detection system for corn kernel direct harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 140 – 149. (in Chinese)
- [14] 梁振伟, 李耀明, 赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 18 – 26. LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 18 – 26. (in Chinese)
- [15] 李洋, 薛臻, 徐立章, 等. 谷物联合收获机夹带损失监测方法研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2020, 1(1): 13 – 23. LI Yang, XUE Zhen, XU Lizhang, et al. Research progress on the monitoring methods of the separating loss in grain combine harvester[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2020, 1(1): 13 – 23. (in Chinese)
- [16] ZHANG Zemin, LU Changlu. Identification of maize yield trend patterns in the north China plain[J]. International Journal of Plant Production, 2021, 15(1): 125 – 137.
- [17] DONG Jiaqi, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of maize kernel loss monitoring system based on signal interval duration[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108230.
- [18] 李耀明, 王建鹏, 徐立章, 等. 联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 68 – 75. LI Yaoming, WANG Jianpeng, XU Lizhang, et al. Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 68 – 75. (in Chinese)
- [19] LIU Yanbin, LI Yaoming, DONG Yunhua, et al. Development of a variable-diameter threshing drum for rice combine harvester using MBD – DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106859.
- [20] GUNDOSHMIAN T M, GHASSEMZADEH H R, POUR S A, et al. Application of artificial neural network in prediction of the combine harvester performance[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2010, 8: 721 – 724.
- [21] FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. A multi-parameter control method for maize threshing based on machine learning algorithm optimisation[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 212 – 223.
- [22] 冯少源, 周章金. 基于转速调控的玉米收获机脱粒装置优化研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(4): 73 – 77. FENG Shaoyuan, ZHOU Zhangjin. Optimization of threshing device of the corn harvester based on speed control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(4): 73 – 77. (in Chinese)
- [23] 崔中凯, 张华, 周进, 等. 智能玉米籽粒联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 26 – 30. CUI Zhongkai, ZHANG Hua, ZHOU Jin, et al. Design and experiment of intelligent corn grain harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 26 – 30. (in Chinese)
- [24] 朱晓龙, 迟瑞娟, 杜岳峰, 等. 玉米收获机低损脱粒智能控制系统半实物仿真平台设计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 114 – 122. ZHU Xiaolong, CHI Ruijuan, DU Yuefeng, et al. Design of hardware in loop simulation platform for intelligent control system of corn kernel harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 114 – 122. (in Chinese)
- [25] DONG Jiaqi, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Development of a low-damage maize threshing system based on discrete element technology to effectively improve maize harvest quality and yield[J]. Powder Technology, 2024, 448: 120297.
- [26] DONG Jiaqi, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Research on monitoring model for maize entrainment loss sensor applicable to different operating parameters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108854.
- [27] 唐忠, 李耀明, 赵湛, 等. 夹带损失传感器不同安装位置对籽粒检测精度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 46 – 52. TANG Zhong, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Effect of different installed location of entrainment loss sensor on grain testing accuracy[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 46 – 52. (in Chinese)
- [28] LIANG Zhenwei, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Optimum design of an array structure for the grain loss sensor to upgrade its resolution for harvesting rice in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2017, 157: 24 – 34.
- [29] 辛尚龙, 赵武云, 曲浩, 等. 玉米机械化收获技术现状分析及发展趋势[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 9 – 14. XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, QU Hao, et al. Current situation analysis and development trend of maize mechanized harvesting technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 9 – 14. (in Chinese)
- [30] FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Development and performance evaluation of a guide vane inclination automatic control system for corn threshing unit based on feedrate monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106745.