doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.041

基于 MEMS 传感器的仿真电子玉米果穗设计与试验

邢书仑[1]　崔　涛[1,2]　张东兴[1,2]　杨　丽[1,2]　和贤桃[1,2]　董佳琪[1]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对高含水率玉米籽粒收获时存在破碎率高的问题,本文设计了一种可脱粒式仿真电子玉米果穗,电子果穗内部嵌入了 IMU 模块和柔性薄膜压力传感器,可以对脱粒过程中电子果穗受到的动态冲击力和静态挤压力进行实时检测,为探究脱粒过程中籽粒破碎原理提供新的技术方法。为验证该电子果穗工作性能,分别开展了动态冲击力检测试验和挤压力检测试验。动态冲击力检测试验结果表明,该电子果穗动态冲击力检测平均误差为 0.91 N,最大误差为 2.25 N,平均检测精度为 98.15%。静态挤压力检测试验结果表明,电子果穗挤压力平均检测误差为 2.47 N,最大检测误差为 7.25 N,与万能试验机曲线拟合度较高,R^2 为 0.987 4。利用纵轴流脱粒装置开展了电子果穗实际工况下的脱粒试验,结果表明,电子果穗能够有效检测出其在脱粒装置中的受力情况。当喂入量为 2.5 kg/s、脱粒滚筒转速为 450 r/min、脱粒间隙为 40 mm、导流角度为 45°时,电子果穗受到的平均冲击力为 17.40 N,最大冲击力为 70.73 N;平均挤压力为 34.49 N,最大挤压力为 96.30 N。研究结果为解析高速绕流群体果穗脱粒工况下玉米果穗受力参数提供新的技术手段,为探明籽粒发生破碎的原理提供新的研究方法。

关键词: 仿真电子玉米果穗; 脱粒试验; 动态冲击力; 静态挤压力
中图分类号: S817.12　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)07-0446-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Simulated Electronic Corn Ear Based on MEMS Sensors

XING Shulun[1]　CUI Tao[1,2]　ZHANG Dongxing[1,2]　YANG Li[1,2]　HE Xiantao[1,2]　DONG Jiaqi[1]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Aiming to address the issue of high breakage rates during the harvesting of high-moisture corn kernels, a threshable simulated electronic corn ear was designed. It was embedded with an inertial measurement unit (IMU) module and a flexible film pressure sensor, which can detect the dynamic impact force and static squeezing force during the threshing process in real time. Furthermore, it provided a technical method for exploring the principle of grain breakage during the threshing process. To verify the working performance of the simulated electronic corn ear, dynamic impact force test and static squeezing force test were conducted separately. The results of the dynamic impact force detection test showed that the average error of the impact force was 0.91 N, the maximum error was 2.25 N, and the average detection accuracy was 98.15%. The results of the static squeezing pressure detection test showed that the average detection error of the squeezing pressure was 2.47 N, and the maximum average detection error was 7.25 N. The curve fitting degree with the universal testing machine was high, and the R^2 was 0.987 4. Finally, threshing tests on the simulated electronic corn ear under actual working conditions were conducted by using a longitudinal flow threshing device. The experimental results indicated that the electronic corn ear could effectively detect its stress parameters in the threshing device. Under the conditions of a feeding rate of 2.5 kg/s, a threshing drum speed of 450 r/min, a threshing gap of 40 mm, and a guide angle of 45°, the average impact force on the electronic corn ear was 17.40 N, and the maximum impact force was 70.73 N. The average squeezing force was 34.49 N, and the maximum squeezing force was 96.30 N. The research result can provide a technical means for analyzing

收稿日期: 2025-03-08　修回日期: 2025-03-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(52275280)和产业基础再造和制造业高质量发展专项项目(2023ZY02006)
作者简介: 邢书仑(1996—),男,博士生,主要从事农业机械装备及自动化研究,E-mail: slxing1001@163.com
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: cuitao850919@163.com

the stress parameters of corn ears under high-speed flow group threshing conditions, and provide a new research method for exploring the principle of grain breakage.

Key words: simulated electronic corn ear; threshing test; dynamic impact force; static squeezing force

0　引言

玉米是我国第一大粮食作物，对保证国家粮食安全具有重要的战略意义[1]。目前我国玉米机械化收获面临籽粒破碎率高、损失率高的难题，严重制约了玉米产业的发展[2]。脱粒装置是玉米联合收获机上核心作业部件之一，也是产生籽粒破碎和损失的主要环节[3-5]。脱粒装置利用脱粒元件对果穗的击打、揉搓作用将玉米籽粒从芯轴上脱离，并将籽粒与杂余分离开[6-8]。由于我国玉米收获时籽粒含水率普遍较高，籽粒硬度较低，脱粒过程中极易产生破碎[9-11]。

针对破碎率高的问题，相关学者对玉米脱粒过程进行了研究[12-17]，并对脱粒装置结构和工作参数进行了优化设计，有效降低了籽粒破碎率。除此之外，还有其他学者通过台架试验、离散元仿真、高速摄像等方法对玉米脱粒过程进行研究，并取得了一定成效[18-20]。然而，上述传统研究方法在解析脱粒过程中籽粒破碎原理方面均存在一定弊端，例如台架试验难以直接反映果穗脱粒过程受力情况；离散元仿真虽可模拟受力过程，但离散元模型无法准确反映果穗真实物料特性，仿真结果难免存在误差；高速摄像能够拍摄的场景有限，难以持续追踪群体果穗脱粒工况，亦无法检测果穗受力参数。

随着 MEMS（Micro - electro - mechanical system）传感器技术的发展，研究人员通过将三轴加速度测量单元植入果实内部或者模仿真实果实形状制作的外壳中，而研制了多种类型的仿真电子果实[21]。这些仿真电子果实可以用来检测苹果、番茄、马铃薯等果实收获和加工过程中的冲击加速度，进而找到损伤源的具体位置[22-24]。YU 等[25-26]设计了一种电子蓝莓，可用于蓝莓采摘或加工过程中冲击加速度检测，并通过蓝莓采摘试验验证了该方法的可行性。XU 等[27]对电子蓝莓进行了改进，研制了二代电子蓝莓，其采样频率和精度均得到提升。文献[28-29]分别设计了一种电子柑橘，并将其成功应用于柑橘采摘和加工环节中冲击力检测。贾娜等[30]研制了一种电子核桃，并对核桃多点同步振动参数和脱落条件进行了研究。以上研究为检测玉米果穗脱粒过程中的受力参数提供了参考。然而，相比于上述果实采摘加工过程，玉米脱粒过程处在一个更加复杂多变的场景中。脱粒装置不仅会对果穗产生强烈的冲击、碰撞等动态载荷，而且会产生挤压、搓擦等静态载荷[31-32]。因此，为了探明籽粒破碎原理，需要对脱粒过程中果穗的动态冲击力和静态挤压力等多种形式的作用力进行全面检测。而现有的电子果实仅能对三轴加速度信号进行检测，无法满足玉米果穗检测要求。

针对以上问题，本文基于 MEMS 技术研制一种可脱粒式仿真电子玉米果穗，通过在电子果穗内部嵌入 IMU 模块、A/D 采样模块和柔性薄膜压力传感器，实现对动态冲击力和静态挤压力的精准检测。通过开展实际工况下脱粒试验，得到脱粒过程中电子果穗真实受力参数，以期为探究脱粒过程中玉米籽粒破碎原理提供新的技术手段，为脱粒装置优化设计提供数据参考。

1　玉米果穗脱粒过程受力分析与检测原理

1.1　受力分析

玉米果穗在脱粒过程中会受到脱粒元件、脱粒凹板以及果穗之间的击打、挤压、搓擦等多种形式的作用力，从而使籽粒从芯轴上脱落。图 1 为玉米果穗在脱粒装置内部不同位置处的受力情况。果穗 a 运动到脱粒滚筒下方时，受到脱粒凹板上横向栅条的阻挡作用而处于短暂的静止状态，此时果穗 a 主要受到脱粒元件挤压力 F_p，脱粒凹板支持力 F_n，自身重力 G，横向栅条挤压力 F_t，脱粒元件摩擦力 F_{f1} 以及它与果穗 b 之间的作用力 F_{ab} 的作用，当任意方向上合力大于籽粒与芯轴之间的连接力时，籽粒开

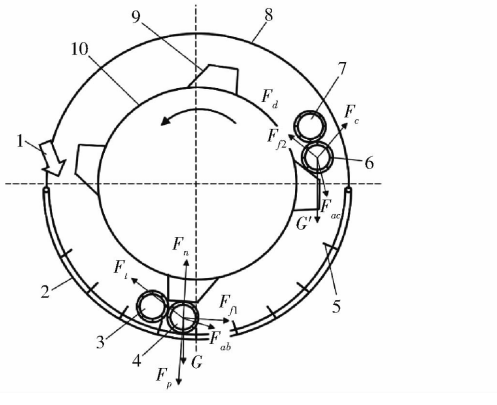


图 1　脱粒过程中玉米果穗受力示意图

Fig. 1　Schematic of force acting on corn ear during threshing process

1. 果穗喂入方向　2. 脱粒凹板　3. 果穗 b　4. 果穗 a　5. 横向栅条　6. 果穗 a(位置 a′处)　7. 果穗 c　8. 弧形顶板　9. 脱粒元件　10. 脱粒滚筒

始从芯轴脱落。随后果穗 a 在摩擦力 F_{f1} 的作用下跟随脱粒元件围绕脱粒滚筒做螺旋运动，运动到位置 a′时果穗已经离开脱粒凹板，此时果穗 a 主要受到脱粒元件的击打力 F_c、摩擦力 F_{f2}、自身重力 G' 以及它与果穗 c 之间的作用力 F_{ac} 的作用，使得籽粒进一步从芯轴上脱落。之后，果穗再次进入脱粒凹板区域，重复上述运动，直至完全脱粒。由此可知，玉米果穗脱粒是动态冲击力和静态作用力综合作用的过程，过大的冲击力和静态挤压力均是造成籽粒破碎的关键原因。利用仿真电子玉米果穗对脱粒过程中果穗受到的作用力进行检测，可以解析果穗受力与籽粒破碎率之间的关系，进而指导脱粒装置工作参数和结构参数优化设计。

1.2 检测原理

图 2 为果穗脱粒过程中受力参数检测原理示意图。将电子果穗与真实的玉米果穗一起喂入脱粒装置中，控制脱粒装置在设定参数下运行，在脱粒滚筒作用下，电子果穗与真实果穗一起沿滚筒轴向做高速螺旋运动。运动过程中，果穗受到脱粒元件和脱粒凹板作用力，使得籽粒从芯轴上脱落，完成脱粒过程。电子果穗内部嵌入 MEMS 传感器，可以实时检测脱粒过程中的动态冲击力和静态挤压力，并通过无线通讯将数据发送至上位机系统进行显示和存储。由于电子果穗运动过程与真实果穗运动过程基本一致，因此，可以根据电子果穗受力参数间接反映真实果穗受力情况。

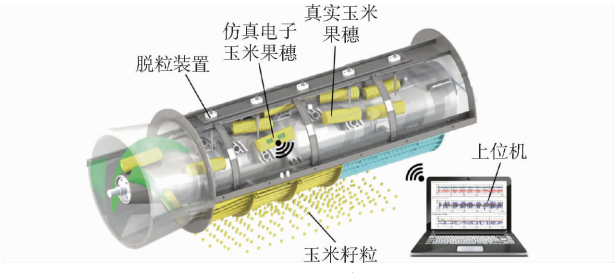


图 2 脱粒过程中果穗受力参数检测原理示意图

Fig. 2 Schematic of principle of detecting force on corn ear during threshing process

2 材料与方法

2.1 仿真电子玉米果穗结构组成与工作原理

如图 3 所示，仿真电子玉米果穗主要由仿真玉米籽粒、柔性橡胶层、基底层外壳、IMU 模块（IM948 型，辰翼电子科技有限公司）、柔性薄膜压力传感器及配套的 A/D 采集模块（M0404 型，蜂米智能科技有限公司）、锂电池、开关等组成。其中仿真玉米籽粒、柔性橡胶层和基底层外壳均是采用 3D 打印制作而成。电子果穗制作过程可以分为：①利用热熔胶将各个传感器模块及锂电池等元件固定在基底层外壳的内部。②利用螺栓将基底层外壳固定为一个整体。③利用纳米胶将柔性薄膜压力传感器固定于基底层外壳表面。④将柔性橡胶层紧密套在柔性薄膜压力传感器外部。⑤将仿真玉米籽粒逐个安装在柔性橡胶层的定位孔中。⑥在柔性橡胶层和仿真玉米籽粒之间涂抹适量硅胶，增加两者之间的粘结力，待硅胶凝固后即可得到完整的仿真电子玉米果穗。

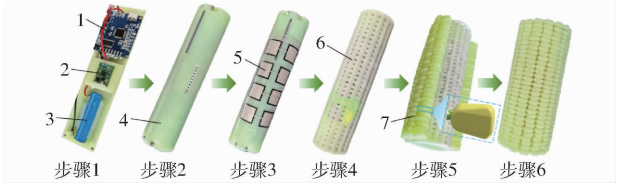
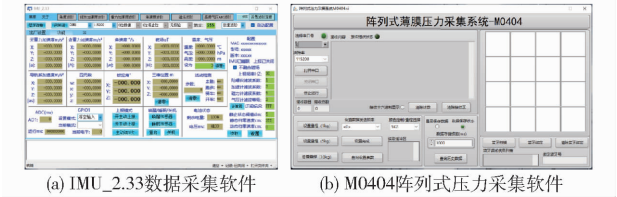


图 3 仿真电子玉米果穗结构组成与制作步骤

Fig. 3 Structure composition and manufacturing steps of simulated electronic corn ear

1. A/D 采样模块 2. IMU 模块 3. 锂电池 4. 基底层外壳 5. 柔性薄膜压力传感器 6. 柔性橡胶层 7. 仿真玉米籽粒

IMU 模块位于仿真电子玉米果穗的几何中心，可以检测果穗受到的动态冲击力，并通过蓝牙将数据传输至数据采集软件（IMU_2.33 数据采集软件）。柔性薄膜压力传感器位于柔性橡胶层和基底层外壳之间，用于检测果穗受到的静态挤压力，其中柔性橡胶层可以对传感器起到一定的缓冲和保护作用。A/D 模块则用于采集柔性薄膜压力传感器数据并通过蓝牙将数据发送至数据采集软件（M0404 阵列式压力采集软件）。图 4 为上位机软件显示界面。电子果穗主要技术参数如表 1 所示。



(a) IMU_2.33数据采集软件 (b) M0404阵列式压力采集软件

图 4 上位机软件信号采集界面

Fig. 4 Signal acquisition interface of host computer software

2.1.1 电子果穗冲击力检测原理

电子果穗利用内部嵌入的 IMU 模块检测冲击加速度，根据牛顿第二定律计算得到动态冲击力。由于 IMU 模块检测的电子果穗加速度信息是基于载体坐标系（b 系），因此需要根据陀螺仪姿态信息转换至大地坐标系（n 系），然后计算冲击力[33]。如图 5 所示，假设某一时刻电子果穗受到冲击合力 F，沿 n 系和 b 系分别对合力 F 进行矢量分解。

假设 IMU 模块检测的加速度矢量为 $(a_{rx}, a_{ry}, a_{rz})^{\mathrm{T}}$，则剔除重力加速度 g 的线性加速度矢量 $(a_{bx}, a_{by}, a_{bz})^{\mathrm{T}}$ 计算式为

表 1　仿真电子玉米果穗主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of simulated electronic corn ear

组成部分	参数	数值
电子果穗	直径 × 长度/(mm × mm)	Φ45 × 120
	质量/g	276
	工作电压/V	3.30 ~ 5.00
	工作电流/mA	260
	单次稳定工作时长/h	3
	允许充放电次数	3
IMU 模块	通讯方式	蓝牙 5.3
	通讯频率/Hz	0.50 ~ 250
	加速度量程(误差)/g	±16(0.01)
	陀螺仪量程(误差)/((°)·s^{-1})	±2 000(0.06)
	正常温度/℃	−40 ~ 85
柔性薄膜压力传感器	传感器单点量程/N	100
	传感器厚度/mm	<0.30
	数据上传速率/Hz	0.50 ~ 20
	响应时间/ms	<20
	数据稳定时间/s	<5
	正常温度/℃	−50 ~ 50
	正常相对湿度/%	0 ~ 95

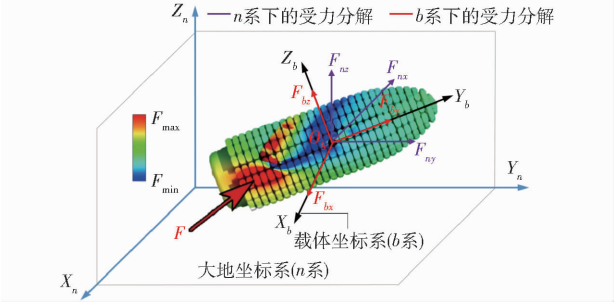


图 5　果穗冲击力沿不同坐标系的矢量分解示意图

Fig. 5　Schematic of vector decomposition of corn ear impact force along different coordinate systems

$$[a_{bx}\quad a_{by}\quad a_{bz}]^{\mathrm{T}}=[a_{rx}\quad a_{ry}\quad a_{rz}]^{\mathrm{T}}-[a_{gx}\quad a_{gy}\quad a_{gz}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中
$$[a_{gx}\quad a_{gy}\quad a_{gz}]^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{R}_n^b)^{-1}[0\quad 0\quad g]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中　$[a_{gx}\quad a_{gy}\quad a_{gz}]^{\mathrm{T}}$——重力加速度 g 在 b 系下各轴分量，m/s^2

$\boldsymbol{R}_n^b$——b 系至 n 系旋转矩阵

根据 IMU 模块测得的四元数数组 $Q(q_0, q_1, q_2, q_3)$ 计算得到[34]。则 n 系下加速度矢量$(a_{nx}, a_{ny}, a_{nz})^{\mathrm{T}}$ 计算式为

$$[a_{nx}\quad a_{ny}\quad a_{nz}]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{R}_n^b[a_{bx}\quad a_{by}\quad a_{bz}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

根据牛顿第二定律求得电子果穗受到的冲击力 F 为

$$[F_{nx}\quad F_{ny}\quad F_{nz}]^{\mathrm{T}}=m[a_{nx}\quad a_{ny}\quad a_{nz}]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

式中　m——电子果穗质量，取 0.276 kg

电子果穗冲击力解析流程如图 6 所示。

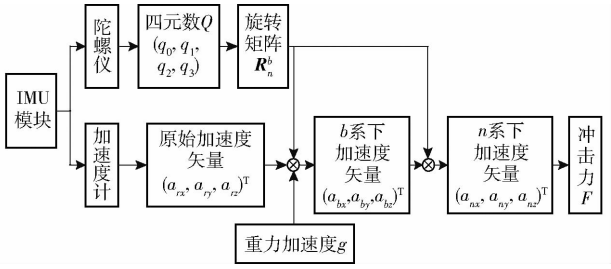
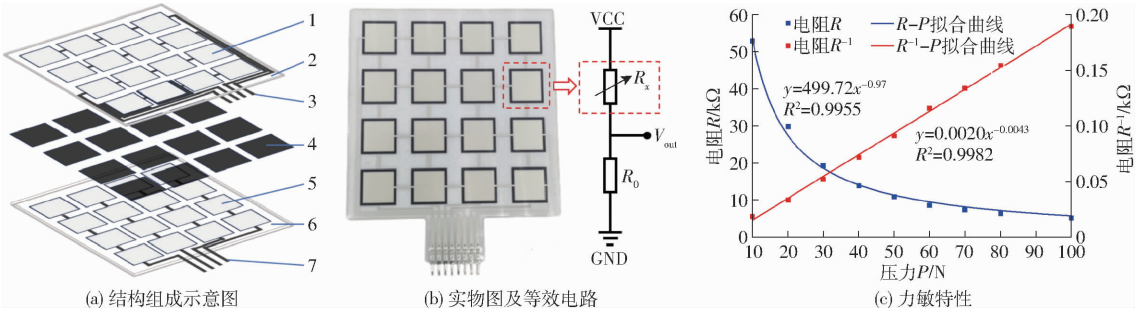


图 6　仿真电子玉米果穗冲击力解析流程

Fig. 6　Analysis process of impact force on simulated electronic corn ear

2.1.2　电子果穗静态挤压力检测原理

电子果穗静态挤压力由柔性薄膜压力传感器采集，图 7 为柔性薄膜压力传感器结构示意图和特性曲线。柔性薄膜压力传感器为多层三明治结构，由上至下依次为上基底层、行电极与导线、纳米力敏材料、列电极与导线、下基底层等 5 层。该传感器共有 16 个力敏单元，采用 4 × 4 的矩形阵列方式均匀排布。行导线将每行 4 个力敏单元并联，列导线将每列的 4 个力敏单元并联，分别引出 4 个行引脚和 4 个列引脚，用于连接外部电路。每个力敏单元可等效为一个可变电阻 R_x，通过与参考电阻 R_0 分压输出模拟量信号 V_{out}。根据传感器力敏特性曲线(图 7c)可知，当传感器受到压力时，电阻随压力增大而减小，其压阻特性表现为电阻与压力呈幂函数关系(R^2 = 0.995 5)，电阻倒数与压力呈近似线性关系(R^2 = 0.998 2)。



(a) 结构组成示意图　(b) 实物图及等效电路　(c) 力敏特性

图 7　柔性薄膜压力传感器

Fig. 7　Flexible film pressure sensor

1. 行电极　2. 上基底层　3. 行导线　4. 纳米力敏材料　5. 列电极　6. 下基底层　7. 列导线

图 8 为柔性薄膜压力传感器信号采集电路示意图,每列力敏单元选通由 COL1、COL2、COL3 和 COL4 引脚输出高电平或者低电平控制,每行力敏单元的选通则由 ROW1、ROW2、ROW3 和 ROW4 的断开或闭合状态控制,ROW_CONTROL 用于为所选通的行输出高电平或低电平。参考电阻 R_0 与可变电阻分压后输出模拟量信号 V_{out},并由 A/D 模块进行采集。通过控制引脚电平和选通开关的高速切换,达到循环扫描采集每个节点电阻输出信号的效果。为了消除各个节点电阻之间的交叉耦合,采用二次扫描方法进行解耦运算,得到每个节点电阻实际值,并通过线性变换得到压力,从而达到检测目的。

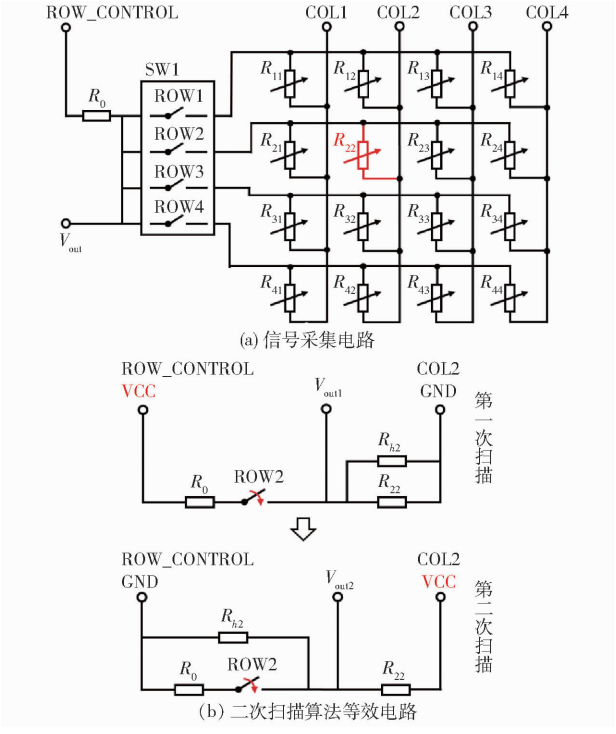


图 8 柔性薄膜压力传感器信号采集原理

Fig. 8 Signal acquisition principle of flexible film pressure sensor

由于柔性薄膜压力传感器具有良好的弯曲变形特性,因此可以将其弯曲成圆柱形,并放置于电子果穗柔性橡胶层和基底层外壳之间。弯曲变形会导致各感应单元产生一定的初始应力,在检测电子果穗静态载荷时,应首先排除初始应力干扰。将电子果穗竖直放置 30 min,统计 1 ~ 16 号感应单元初始值如表 2 所示。

表 2 柔性薄膜压力传感器初始应力统计

Tab. 2 Initial stress statistics of flexible film pressure sensor

编号	应力/N	编号	应力/N
1	5.33 ± 0.34	9	4.19 ± 0.34
2	0.47 ± 0.15	10	3.97 ± 0.29
3	2.56 ± 0.18	11	4.06 ± 0.37
4	5.02 ± 0.33	12	7.55 ± 0.58
5	4.29 ± 0.21	13	2.82 ± 0.33
6	7.11 ± 0.61	14	4.77 ± 0.46
7	5.14 ± 0.34	15	4.83 ± 0.39
8	8.27 ± 0.53	16	4.29 ± 0.31

2.2 脱粒装置结构组成及工作原理

为检验电子果穗工作性能,设计了一种具有透明外壳且参数可调的轴流式脱粒装置。如图 9 所示,脱粒装置主要由喂料口、机架、脱粒滚筒、高可视性透明外壳、脱粒凹板、分离凹板、导流板、电机、导流角度调节电动推杆、脱粒间隙调节电动推杆、拉压力传感器、测速传感器及测控系统等组成。该脱粒装置滚筒转速、脱粒间隙及导流角度等作业参数均可通过测控系统进行调节,并且脱粒装置作业时,可通过拉压力传感器实时检测脱粒凹板挤压力。通过高可视性透明外壳可降低外部环境对传感器无线通讯的干扰,并且可以实时观察脱粒装置内部脱粒过程。脱粒装置主要技术参数如表 3 所示。

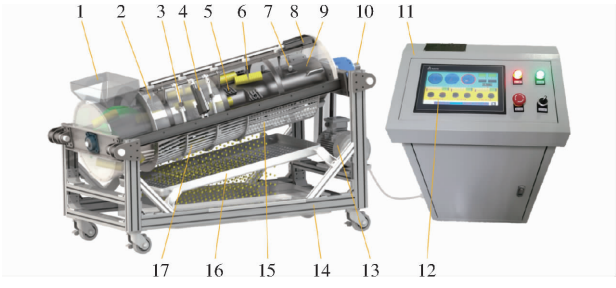


图 9 纵轴流式玉米脱粒装置

Fig. 9 Longitudinal flow corn threshing device

1. 喂料口 2. 透明外壳 3. 拉压力传感器 4. 脱粒间隙调节电动推杆 5. 纹杆式脱粒元件 6. 导流板 7. 杆齿式脱粒元件 8. 导流角度调节电动推杆 9. 脱粒滚筒 10. 测速传感器 11. 测控系统 12. 人机交互界面 13. 电机 14. 机架 15. 分离凹板 16. 清选筛 17. 脱粒凹板

表 3 脱粒装置主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of threshing device

参数	数值
整机尺寸(长 × 宽 × 高)/(m × m × m)	1.67 × 1.05 × 0.77
脱粒滚筒直径/m	0.36
脱粒滚筒长度/m	1.40
脱粒滚筒转速/(r·min^{-1})	≤1 000
脱粒凹板间隙/mm	20 ~ 60
导流板角度/(°)	0 ~ 60

2.3 试验方法

2.3.1 电子果穗冲击力检测试验

如图 10 所示,试验采用电子果穗自由落体冲击碰撞检测方式,共选取 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 m 等 5 种跌落高度。试验时由试验人员手持电子果穗

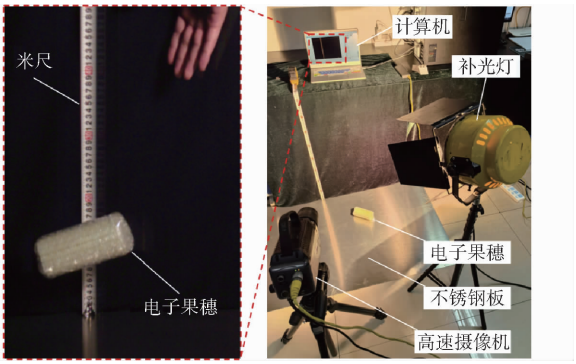


图 10　电子果穗冲击力检测试验

Fig. 10　Electronic corn ear impact force detection test

在固定高度，静止 3 ~ 5 s 后，释放电子果穗，果穗做自由落体运动与底部不锈钢板产生冲击，而后连续反弹，最终静止。试验过程中，利用高速摄像机记录电子果穗与不锈钢板碰撞的时间，利用电子果穗内部嵌入的 IMU 模块检测冲击加速度变化。为保证试验结果准确性，试验前，先将电子果穗上电预热 30 min，待传感器温度稳定后开始试验，每组试验重复 3 次。

试验结束后，统计电子果穗与不锈钢板之间产生的最大冲击力 F_{max} 与理论计算最大冲击力 F_Q 之间的误差，作为衡量电子果穗冲击力检测精度标准。最大冲击力 F_{max} 计算式为

$$F_{max} = \sqrt{F_{nx}^2 + F_{ny}^2 + F_{nz}^2} \tag{5}$$

其中冲击力 F_{nx}、F_{ny} 和 F_{nz} 由式(4)计算得到。根据动量守恒定理计算理论最大冲击力 F_Q，计算式为

$$F_Q \Delta t = mv_2 - mv \tag{6}$$

其中

$$v = v_0 + gt \tag{7}$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \tag{8}$$

式中　Δt——碰撞持续时间，s

v——碰撞前速度，m/s

v_2——碰撞后速度，取 0

v_0——初始速度，取 0

t——下落时间，s

h——下落高度，m

冲击力检测误差 e_t 计算式为

$$e_t = F_Q - F_{max} \tag{9}$$

2.3.2　电子果穗挤压力检测试验

如图 11 所示，利用万能试验机每隔 45°对电子果穗进行径向压缩试验，共进行 8 组试验。试验过程中设置万能试验机压缩速度为 3 mm/min，并由上位机记录柔性薄膜压力传感器数据。为防止万能试验机下压力过大对电子果穗造成破坏，在电子果穗下面放置厚度为 25 mm 的柔性垫。试验前首先上电预热 30 min，待传感器温度稳定后开始试验。试验结束后，计算电子果穗检测静态载荷平均误差，计算式为

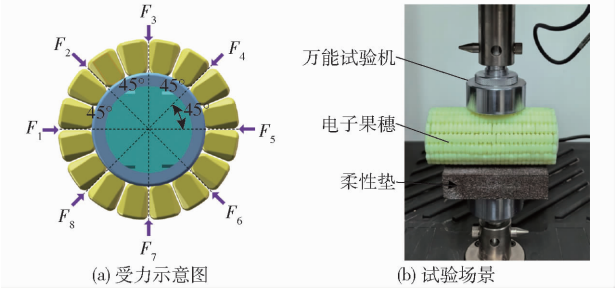
$$e = \frac{\sum_0^N | F_w - F_s |}{N} \tag{10}$$

式中　e——电子果穗检测静态载荷平均误差，N

F_w——万能试验机压力，N

F_s——柔性薄膜压力传感器中主要受力的感应单元压力总和，N

N——采集压力个数



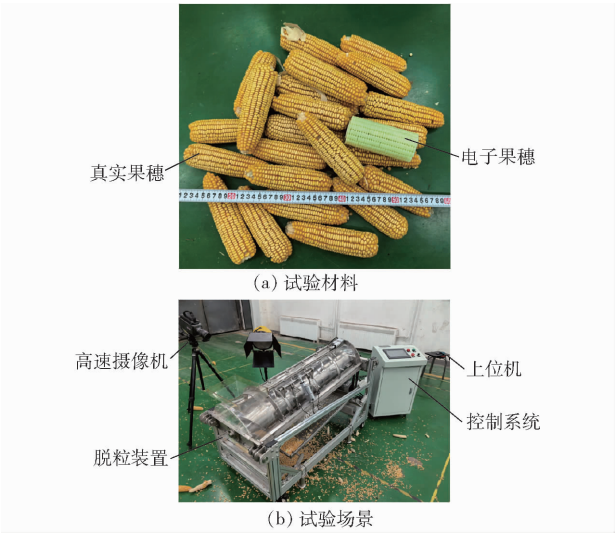
(a) 受力示意图　　(b) 试验场景

图 11　电子果穗挤压力检测试验

Fig. 11　Simulated electronic corn ear squeezing pressure detection test

2.3.3　电子果穗脱粒试验

利用高可视性玉米脱粒装置对电子果穗进行脱粒试验，试验场景如图 12 所示。试验前首先将电子果穗上电预热 30 min，待内部传感器温度稳定后开始试验。试验时首先由控制系统控制脱粒装置在目标脱粒参数下运行，然后将仿真电子果穗和真实玉米果穗同时喂入脱粒装置中进行脱粒。脱粒过程中，由 IMU 模块对电子果穗的冲击力进行检测，由柔性薄膜压力传感器对电子果穗受到的挤压力进行检测，并通过蓝牙将传感器数据发送至上位机系统进行显示和存储。根据前期脱粒装置试验结果，选



(a) 试验材料

(b) 试验场景

图 12　电子果穗脱粒试验现场

Fig. 12　Simulated electronic corn ear threshing test

取较优作业参数:脱粒滚筒转速为 450 r/min、脱粒间隙为 40 mm、导流角度为 45°、玉米果穗喂入量为 2.50 kg/s。试验玉米品种为郑单 958,平均籽粒含水率为 26.83%,果穗平均直径约为 50.43 mm,平均长度约为 160.78 mm。

试验结束后分别对籽粒破碎率、未脱净率、脱粒凹板挤压力进行统计。籽粒破碎率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{W_p}{W} \times 100\% \tag{11}$$

式中 W_p——取样中破碎籽粒质量,g

W——样本籽粒总质量,g

未脱净率 Y_2 计算式为

$$Y_2 = \frac{W_t}{W} \times 100\% \tag{12}$$

式中 W_t——未脱净籽粒质量,g

脱粒凹板挤压力 Y_3 由拉压力传感器检测,计算式为

$$Y_3 = \frac{\sum_0^n | F_1 - F_0 |}{n} \tag{13}$$

式中 F_1——脱粒时拉压力传感器检测受力,N

F_0——空载时拉压力传感器检测受力,N

n——脱粒期间数据采集个数

3 结果与讨论

3.1 冲击力检测试验结果

根据式(5)计算得到电子果穗冲击力检测试验结果如图 13 所示。可以看出,当电子果穗从高度 0.50 m 跌落时,首先进行 0.32 s 左右的自由落体运动,然后与不锈钢板发生碰撞,产生最大冲击力为 24.04 N,随后反弹滞空约 0.31 s,最后与不锈钢板反复碰撞若干次,翻滚并逐渐静止,与高速摄像机记录的实际运动状态一致。图 14 为不同高度下最大冲击力,可以看出,随着电子果穗跌落高度增加,最大冲击力 F_{max} 和理论最大冲击力 F_Q 均不断增大,并且两者之间的差值较小。表 4 为不同高度下 3 次重复试验的误差,电子果穗检测最大冲击力平均误差为 0.91 N,最大误差为 2.25 N,平均检测精度为 98.15%,满足电子果穗冲击力检测要求。

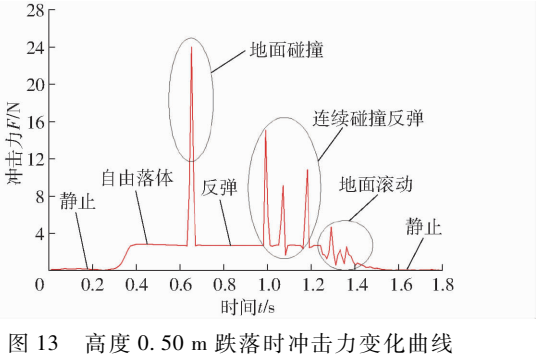


图 13 高度 0.50 m 跌落时冲击力变化曲线

Fig. 13 Impact force variation curve at a dropping height of 0.50 m

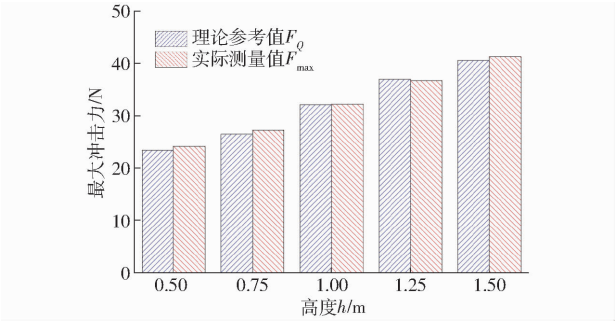


图 14 不同跌落高度下的冲击力

Fig. 14 Impact force at different drop heights

表 4 冲击力检测误差统计

Tab. 4 Statistics of impact force detection error N

试验序号	高度/m				
	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
1	0.76	2.25	-0.21	-1.08	1.46
2	1.88	0.57	1.35	0.57	-0.39
3	-0.37	-0.38	-0.85	-0.25	1.29

3.2 挤压力检测试验结果

电子果穗挤压力检测试验结果如图 15 所示。由图 15a 可知,沿 0°方向径向压缩时,柔性薄膜压力传感器力敏单元 1、2、3、4 的压力随着万能试验机压力增大而显著增大,因此可以推测,在该方向上力敏单元 1、2、3、4 为主要受力单元。将力敏单元 1、2、3、4 压力去除初始压力后求和,得到感应单元 1~4 求和压力变化曲线,可以看出,求和压力变化趋势与万能试验机压力变化趋势一致,R^2 为 0.982 0。随着压力增大,求和压力增大速度逐渐变缓,其原因可能是柔性垫对电子果穗的受力具有一定的缓冲作用,降低了各感应单元压力增大的速度。由图 15b 可以看出,沿 45°方向径向压缩时,柔性薄膜压力传感器力敏单元 13、14、15、16 压力显著增大,推测其为主要受力单元,其求和压力与万能试验机的压力变化趋势基本一致,R^2 为 0.985 7。同理,由图 15c 可知,沿 90°方向径向压缩时,柔性薄膜压力传感器的力敏单元 5、6、7、8 为主要受力单元,其求和压力与万能试验机压力变化趋一致,R^2 为 0.991 8;由图 15d 可知,沿 135°方向径向压缩时,柔性薄膜压力传感器的力敏单元 1、2、3、4 为主要受力单元,其求和压力与万能试验机的压力变化趋势一致,R^2 为 0.993 1。由于电子果穗具有对称性,沿 180°、225°、270°和 315°方向进行径向压缩时,柔性薄膜压力传感器上各力敏单元的变化曲线与上述试验结果类似。绘制电子果

穗检测挤压力与万能试验机测量结果累计误差分布曲线如图 16 所示，可以看出，在置信度为 95% 的水平下，沿 0°、45°、90°和 135°方向压缩时，误差分别小于 8.48、5.79、4.50、3.23 N。

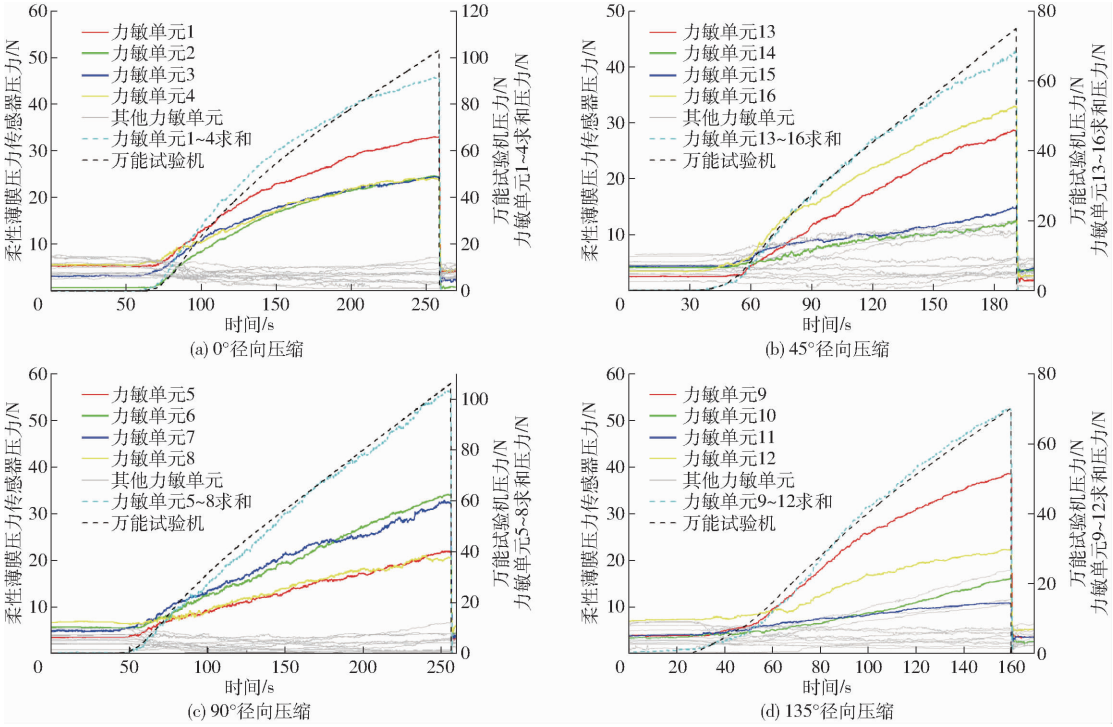


图 15　电子果穗挤压力检测试验结果

Fig. 15　Test results of simulated electronic corn ear squeezing pressure detection test

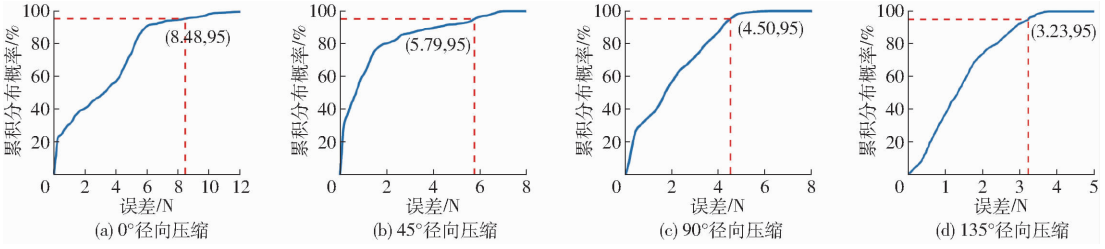


图 16　电子果穗挤压力检测累积误差分布曲线

Fig. 16　Cumulative error distribution curves of simulated electronic corn ear squeezing pressure detection test

统计电子果穗在 8 个不同方向上的挤压力平均检测误差和最大检测误差，如表 5 所示。结果表明电子果穗在 0°和 180°方向上的挤压力检测误差较大，最大检测误差大于 10 N，平均检测误差为 4 N 左右；而在其他 6 个方向上的检测误差较小，最大检测误差均小于 10 N，平均检测误差均小于 3 N，这可能与压缩过程中电子果穗内部基底层外壳的变形有关，在 0°和 180°方向压缩时，基底层外壳变形较大。总之，电子果穗挤压力平均检测误差为 2.47 N，最大检测误差为 7.25 N，R^2 为 0.987 4，说明柔性薄膜压力传感器对挤压力检测精度较高，满足电子果穗外部挤压力检测需求。

表 5　挤压力检测误差统计

Tab. 5　Statistics of squeezing force detection errors

受力角度/(°)	最大检测误差/N	平均检测误差/N	决定系数 R^2
0	12.52	4.07	0.982 0
45	7.13	1.32	0.985 7
90	5.84	2.09	0.991 8
135	3.76	1.49	0.993 1
180	10.16	3.92	0.983 4
225	6.85	2.47	0.986 9
270	6.33	2.59	0.984 2
315	5.42	1.84	0.992 0
平均值	7.25	2.47	0.987 4

3.3　脱粒试验结果

图 17 为脱粒过程中电子果穗的受力检测结果。由 17a 可以看出，在喂入阶段，电子果穗受到的动态冲击力较小，而在脱粒阶段受到的动态冲击力明显增大。计算得脱粒阶段冲击力平均值约为 17.40 N，最大冲击力为 70.73 N，最大冲击力发生在 2.38 s，此时电子果穗处于螺旋上升阶段，推测是与脱粒元件或者脱粒装置顶部导流板发生碰撞，产生了较大的冲击力。图 17b 为电子果穗挤压力检测结果。由于

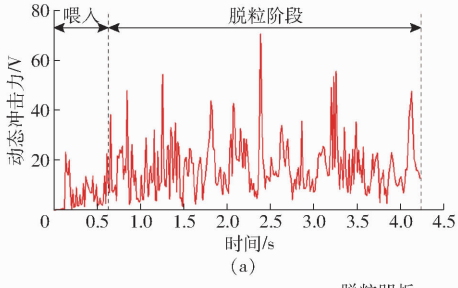


图 17 电子果穗脱粒过程中受力检测结果

Fig. 17 Force detection results during simulated electronic corn ear threshing process

果穗在脱粒装置中的姿态难以固定,因此将柔性薄膜压力传感器上 16 个力敏单元受力求和,得到电子果穗总挤压力变化曲线。可以看出,电子果穗所受到的挤压力与脱粒凹板挤压力变化趋势相同,整体呈增大-减小-增大-减小的变化规律。其原因可能是电子果穗和真实果穗形成的群体果穗在脱粒元件作用下围绕脱粒滚筒做高速螺旋运动,当群体果穗运动到脱粒滚筒与脱粒凹板之间时,受到脱粒元件与脱粒凹板挤压、搓擦作用,而产生了较大挤压力,导致电子果穗和脱粒凹板挤压力均增大;而当群体果穗离开脱粒凹板区域时,电子果穗主要受到冲击力作用,挤压力变小,脱粒凹板挤压力也随之变小。由挤压力曲线变化规律可以推测电子果穗在脱粒装置内部围绕脱粒滚筒旋转 2 圈左右,由于失去了外部籽粒保护,基底层外壳在脱粒元件作用下产生破裂,导致内部线路断开,影响传感器正常工作,这与玉米果穗芯轴断裂原理类似。因此,试验仅采集到 4.25 s 的传感器数据。不过,由高速摄像可以观察到,电子果穗和真实果穗在 4 s 之内基本完成了脱粒,因此,本次试验结果仍然能够有效反映脱粒过程中果穗受力情况。由试验结果计算得到脱粒过程中电子果穗受到的挤压力平均值为 34.49 N,最大值为 96.30 N。电子果穗受力检测结果表明,玉米果穗脱粒是动态冲击力和静态挤压力综合作用的过程,过大的冲击力和挤压力均是造成籽粒破碎的原因。图 18 为实际脱粒效果。



图 18 实际脱粒效果

Fig. 18 Actual threshing effect of corn ears

试验结束后,对籽粒破碎率(Y_1)、未脱净率(Y_2)和脱粒凹板挤压力(Y_3)3 项指标进行统计,得到 Y_1 为 2.93%,Y_2 为 1.18%,Y_3 为 51.23 N。根据前期利用该脱粒装置开展脱粒试验建立的参数预测模型[35],计算得到在本次试验参数下模型预测籽粒破碎率、未脱净率和脱粒凹板挤压力分别为 2.84%、1.24% 和 47.04 N。实际试验结果与模型预测结果误差均小于 10%,说明加入电子果穗并不会对真实果穗的脱粒过程造成显著影响。文献[36]表明,玉米籽粒从芯轴上脱粒而不破碎的最佳受力为 11.93 ~ 124.33 N,与本次试验结果基本相符。因此,相比于传统的玉米脱粒研究方法,该试验方法能够更加直观细致地反映整个脱粒过程中玉米果穗真实受力参数,从而为解析籽粒破碎原理提供了有效数据参考。

4 结论

(1)冲击力检测试验结果表明,电子果穗能够通过 IMU 模块准确地检测动态冲击力,平均检测误差为 0.91 N,最大误差为 2.25 N,平均检测精度为 98.15%。

(2)静态挤压力检测试验结果表明,电子果穗能够通过柔性薄膜压力传感器准确地检测静态挤压力,平均检测误差为 2.47 N,最大平均检测误差为 7.25 N,与万能试验机曲线拟合度较高,R^2 为 0.9874。

(3)脱粒试验结果表明,脱粒过程中电子果穗受到的平均冲击力为 17.40 N,最大冲击力为 70.73 N;平均挤压力为 34.49 N,最大挤压力为 96.30 N。各项试验指标与模型预测结果误差小于 10%,达到预期目标。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 国家统计局关于 2024 年粮食产量的公告[EB/OL]. [2024-12-13]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202412/t20241213_1957744.html.

[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] 徐立章，李洋，李耀明，等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：1－16.
XU Lizhang，LI Yang，LI Yaoming，et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(10)：1－16.（in Chinese）

[4] 宋志才，刁培松，陈美舟，等. 纵轴流玉米脱粒分离装置设计与试验[J]. 农机化研究，2022，44(2)：58－66.
SONG Zhicai，DIAO Peisong，CHEN Meizhou，et al. Analysis design and test of longitudinal flow corn threshing and separating plant[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2022，44(2)：58－66.（in Chinese）

[5] 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.

[6] 王占滨，王振伟，张银平，等. 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：109－117.
WANG Zhanbin，WANG Zhenwei，ZHANG Yinping，et al. Design and test of longitudinal axial flexible hammer-claw corn thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp. 2)：109－117.（in Chinese）

[7] DONG Jiaqi，ZHANG Dongxing，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.

[8] 樊晨龙，崔涛，张东兴，等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2019，50(4)：113－123.
FAN Chenlong，CUI Tao，ZHANG Dongxing，et al. Design and test of low-damage combined corn threshing and separating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(4)：113－123.（in Chinese）

[9] 王克如，李璐璐，鲁镇胜，等. 黄淮海夏玉米机械化籽粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报，2021，37(7)：1－7.
WANG Keru，LI Lulu，LU Zhensheng，et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the CSAE，2021，37(7)：1－7.（in Chinese）

[10] 方会敏，牛萌萌，史嵩，等. 机械收获方式及籽粒含水率对玉米收获质量的影响[J]. 农业工程学报，2019，35(18)：11－18.
FANG Huimin，NIU Mengmeng，SHI Song，et al. Effect of harvesting methods and grain moisture content on maize harvesting quality[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(18)：11－18.（in Chinese）

[11] 李洪成，曾荣，杨天圆，等. 玉米籽粒冲击破碎特性试验研究[J]. 农业工程学报，2022，38(7)：29－37.
LI Hongcheng，ZENG Rong，YANG Tianyuan，et al. Experimental study on the impact breakage characteristics of maize kernels[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(7)：29－37.（in Chinese）

[12] 李心平，熊师，杜哲，等. 浮动式玉米单穗脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(7)：104－111.
LI Xinping，XIONG Shi，DU Zhe，et al. Design and experiment on floating corn single panicle threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(7)：104－111.（in Chinese）

[13] 李义博，姜建军，徐杨，等. 高含水率玉米橡胶复合钉齿制备与脱粒性能试验[J]. 农业机械学报，2020，51(11)：158－167.
LI Yibo，JIANG Jianjun，XU Yang，et al. Preparation and threshing performance tests of rubber composite nail teeth under maize with high moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：158－167.（in Chinese）

[14] 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）

[15] LI Xiaoyu，DU Yuefeng，LIU Lei，et al. Research on the constitutive model of low-damage corn threshing based on DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，194：106722.

[16] 崔涛，荆茂盛，张东兴，等. 玉米果穗离散元模型构建与脱粒仿真验证[J]. 农业工程学报，2023，39(24)：33－46.
CUI Tao，JING Maosheng，ZHANG Dongxing，et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(24)：33－46.（in Chinese）

[17] STEPONAVIČIUS D，KEMZŪRAITĖ A，KINIULIS V，et al. Analysis of corn ears movement within the threshing crescent using high-speed recording method[J]. Journal of Measurements in Engineering，2017，5(4)：240－248.

[18] 杨立权，王万章，张红梅，等. 切流-横轴流玉米脱粒系统改进设计及台架试验[J]. 农业工程学报，2018，34(1)：35－43.
YANG Liquan，WANG Wanzhang，ZHANG Hongmei，et al. Improved design and bench test based on tangential flow-transverse axial flow maize threshing system[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(1)：35－43.（in Chinese）

[19] 陈美舟，徐广飞，王传旭，等. 纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(10)：123－131.
CHEN Meizhou，XU Guangfei，WANG Chuanxu，et al. Design and experiment of roller-type combined longitudinal axial flow flexible threshing and separating device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(10)：123－131.（in Chinese）

[20] 胡必友，李耀明. 玉米籽粒脱粒的果穗碰撞有限元仿真分析[J]. 农业装备技术，2018，44(4)：4－7.
HU Biyou，LI Yaoming. Simulation analysis of ear collision in corn kernel threshing[J]. Agricultural Equipment &

Technology, 2018, 44(4): 4 – 7. (in Chinese)

[21] PRAEGER U, SURDILOVIC J, TRUPPEL I, et al. Comparison of electronic fruits for impact detection on a laboratory scale [J]. Sensors, 2013,13(6): 7140 – 7155.

[22] GEYER M, PRAEGER U, KÖNIG C, et al. Measuring behavior of an acceleration measuring unit implanted in potatoes[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1267 – 1274.

[23] ARAZURI S, ARANA I, JAREN C. Evaluation of mechanical tomato harvesting using wireless sensors[J]. Sensors, 2010, 10(12): 11126 – 11143.

[24] VAN CANNEYT T, TIJSKENS E, RAMON H, et al. Characterisation of a potato-shaped instrumented device[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 275 – 285.

[25] YU P, LI C, TAKEDA F, et al. Measurement of mechanical impacts created by rotary, slapper, and sway blueberry mechanical harvesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101: 84 – 92.

[26] YU P, LI C, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: hardware design and calibration[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 103 – 111.

[27] XU R, LI C. Development of the second generation berry impact recording device (BIRD Ⅱ)[J]. Sensors, 2015, 15(2): 3688 – 3705.

[28] 杜小强, 李党伟, 贺磊盈, 等. 基于电子果实技术的机械振动采收过程果实运动分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 58 – 64.
DU Xiaoqiang, LI Dangwei, HE Leiying, et al. Fruit motion analysis in process of mechanical vibration harvesting based on electronic fruit technique[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 58 – 64. (in Chinese)

[29] VALLONE M, ALLERI M, BONO F, et al. A new wireless device for real-time mechanical impact evaluation in a citrus packing line[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 1 – 9.

[30] 贾娜, 薄嘉成, 张航宇, 等. 基于电子果实技术的核桃多点同步振动参数监测与脱落条件研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 215 – 222.
JIA Na, BAO Jiacheng, ZHANG Hangyu, et al. Monitoring of multi-point synchronous vibration parameters and dropping conditions of walnuts based on electronic fruit technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 215 – 222. (in Chinese)

[31] 邸志峰, 崔中凯, 张华,等. 纹杆块与钉齿组合式轴流玉米脱粒滚筒的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 28 – 34.
DI Zhifeng, CUI Zhongkai, ZHANG Hua, et al. Design and experiment of rasp bar and nail tooth combined axial flow corn threshing cylinder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 28 – 34. (in Chinese)

[32] 耿端阳, 孙延成, 王宗源,等. 玉米籽粒直收机板齿式脱粒装置设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(11): 3281 – 3292.
GENG Duanyang, SUN Yancheng, WANG Zongyuan, et al. Design and experiment of plate tooth threshing device of corn grain direct harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(11): 3281 – 3292. (in Chinese)

[33] XING Shulun, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of the simulated electronic corn ear based on UWB/IMU technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108567.

[34] 吕乐. 基于 UWB 与 IMU 组合的室内定位系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
LÜ Le. Research on indoor positioning system based on UWB and IMU combination[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)

[35] XING Shulun, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and optimization for a longitudinal-flow corn ear threshing device of low loss and low energy consumption[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109328.

[36] 王镇东, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米收获机低损变径脱粒滚筒设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 98 – 105.
WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of low damage corn threshing drum with gradually changing diameter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 98 – 105. (in Chinese)