

玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验

刘瑞^{1,2} 刘忠军^{2,3} 刘立晶^{2,3} 李鹰航⁴

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;
3. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083; 4. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对现有玉米气吸式排种器高速作业引起的种子漏吸, 导致作业效果不佳的问题, 通过增大充种区域, 增加排种盘的充种时间, 加强种群离散度, 减小吸附压力, 并基于此设计一种双重扰动辅助充种高速气吸式排种器。分析不同高度种层种子的受力平衡方程, 计算扩容板位置和结构参数。分析扰种台柱和型孔作用下种子运动力学模型, 并确定了带扰种台柱的中字型吸种孔排种盘的关键结构参数。以颗粒瞬态法向力为评价指标, 运用 EDEM 软件仿真分析 3 种排种盘的扰动性能, 结合台架试验检测 3 种排种盘充种性能, 得到所设计的排种盘能够有效加强对种群的离散, 强化排种盘的吸种性能。台架试验结果显示, 当扰动辅助充种高速气吸式玉米排种器作业速度为 8 ~ 10 km/h、吸附负压为 3.0 ~ 4.0 kPa 时, 漏播指数不高于 5.1%, 重播指数不大于 4.2%, 粒距合格指数不小于 94.6%, 合格粒距变异系数不大于 15.33%; 当作业速度为 12 ~ 14 km/h、吸附负压为 3.5 ~ 4.0 kPa 时, 漏播指数不高于 7.9%, 重播指数不大于 1.3%, 粒距合格指数不小于 92.1%, 合格粒距变异系数不大于 17.67%, 高速条件下作业性能较好, 各项指标均优于国家标准。

关键词: 玉米; 气吸式排种器; 扰动辅助充种

中图分类号: S985.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0050-10 OSID: 

Design and Experiment of Corn High Speed Air Suction Seed Metering Device with Disturbance Assisted Seed-filling

LIU Rui^{1,2} LIU Zhongjun^{2,3} LIU Lijing^{2,3} LI Yinghang⁴

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China
3. State Key Laboratory of Soil - Plant - Machinery System Technology, Beijing 100083, China
4. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor operation effect caused by seed leakage due to the high-speed operation of the existing corn high speed air suction seed metering device, a double disturbance auxiliary filling high speed air suction seed metering device was designed by increasing the seed filling area, increasing the seed filling time of the seed metering disk, strengthening the dispersion of the population and reducing the adsorption pressure. The stress balance equation of seed layer with different heights was analyzed, and the position and structural parameters of expansion plate were calculated. The mechanical model of seed movement under the action of disturbing seed column and shaped hole was analyzed, and the key structural parameters of seed metering disc with middle shaped seed suction hole with disturbing seed column were determined. Taking the transient normal stress of particles as the evaluation index, the disturbance performance of the three seed trays was simulated by EDEM software, and the seed filling performance of the three seed trays was tested by bench test. The results showed that the designed seed trays can effectively strengthen the dispersion of the population and strengthen the seed absorption performance of the seed trays. The bench test results showed that when the operating speed of the high speed air suction maize seed metering device with disturbance assisted seed filling was 8 ~ 10 km/h and

收稿日期: 2021-10-28 修回日期: 2021-12-20

基金项目: 中国机械工业集团有限公司重大科技专项(ZDX2020-2)

作者简介: 刘瑞(1990—), 男, 博士生, 主要从事农业机械设计与理论研究, E-mail: ruiliuqiusuo@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事种植机械装备研究, E-mail: xylilj@sina.com

the adsorption negative pressure was 3.0 ~ 4.0 kPa, the leakage absorption rate was less than 5.1% and the gravity absorption rate was less than 4.2%, the qualified index of grain distance was greater than 94.6%, and the coefficient of variation of qualified grain distance was less than 15.33%. When the operating speed was 12 ~ 14 km/h and the adsorption negative pressure was 3.5 ~ 4.0 kPa, the leakage and absorption rate was not higher than 7.9% and the gravity rate was not higher than 1.3%, the qualified index of grain distance was greater than 92.1%, and the coefficient of variation of qualified grain distance was less than 17.67%. The operating performance was better at high speed, and all the indexes were better than that of the national standard.

Key words: corn; air suction seed metering device; disturbance assisted seed-filling

0 引言

精密播种技术具有突出的节本增效优点,满足现代农业对经济效益的追求;随着农业生产规模化,经营主体追求高速高效生产^[1-2];气吸式排种器对种子形状适用性广、单粒播种精度高、满足高速作业对稳定性的要求,因而高速精密播种机多采用气吸式排种器^[3-7]。该类型排种器利用吸种孔两侧的压差来完成吸种,在高速作业时,种室中种群离散度低,吸种孔充种作业时间急剧缩短,大大增加种子的漏充率,降低整机作业性能。

国内外学者对高速精密排种器进行了大量研究,德国 Horsch 公司^[8]的 Maestro 气吸式排种器,采用渐开线形式的型孔,并在型孔边缘开倒角,有利于对种子的吸附,作业速度可达 15 km/h。美国 Precision Planting 公司^[9]的 vDrive 气吸式排种器,排种盘采用带有凸台的吸种孔,加强排种盘对种室中种群的扰动。陈玉龙^[10]设计了一种大豆气吸机械复合式排种器,采用取种孔与吸孔复合结构的排种,以较低的负压完成高速精密排种作业,作业速度为 10 ~ 12 km/h。丁力等^[11]针对高速作业时玉米气吸式精密排种器风压需求量增大、漏吸严重的问题,设计了一种利用型孔凸台扰动种群和托持种子,在作业速度 8 ~ 14 km/h 时,合格指数超过 91.3%。史嵩等^[12-13]采用主动驱导种群、减少局部种间接触的方法,通过确定排种盘导种槽曲线,规划种子相对运动轨迹,高速条件下充种性能较稳定,作业速度为 9.11 km/h。

上述研究主要是通过改变吸种孔结构降低高速作业时漏播指数,缺少对种群离散度和增加排种盘充种时间的相关研究。为此,本文在兼顾减小种群层间压力的同时设计扩容板增大充种区域,并设计一种具有扰种台柱和中字型吸种孔的排种盘,以期实现在高速作业时,不增加工作负压,且充种效果良好。

1 作业速度对排种器充种过程的影响

排种器高速作业时,种盘是充种过程携种的直

接接触部件,当排种器充种区角度为 θ 时,充种时间为

$$T = \frac{r\theta}{v_k} \tag{1}$$

其中

$$v_k = 2\pi nr$$

$$n = \frac{1 \times 10^4 v}{6LZ}$$

- 式中 T ——充种时间, s
 r ——吸种孔与排种盘中心距离, mm
 v_k ——吸种孔中心线速度, m/s
 n ——排种盘转速, r/min
 v ——播种机前进速度, km/h
 L ——理论粒距, cm
 Z ——排种盘吸种孔个数

排种盘高速通过充种区与排种盘低速通过充种区的时间差为

$$\Delta t = T_D - T_G \tag{2}$$

- 式中 T_G ——高速种盘充种时间, s
 T_D ——低速种盘充种时间, s
 Δt ——高速种盘与低速种盘充种时间差, s

联立式(1)、(2)可得

$$\Delta t = \frac{3 \times 10^{-4} \theta LZ (v_G - v_D)}{\pi v_G v_D} \tag{3}$$

- 式中 v_G ——高速作业时播种机前进速度, km/h
 v_D ——低速作业时播种机前进速度, km/h

当 v_D 为一定值且大于零, v_G 为自变量, Δt 为因变量时,对式(3)求导可知 Δt 的导数值大于零,即式(3)是一个单调递增的函数,由此可知,排种器高速作业时,速度越大,充种时间下降越快;在保持粒距不变时,为了适应速度变化引起的种子漏吸,应从增大充种区角度和选取合适排种盘吸孔数两方面来增加充种时间,因此本文设计一种双重扰动排种盘和增加充种区域的排种器,从而提高气吸式排种器高速作业的充种性能。

2 排种器结构与工作原理

玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器结构如

图 1 所示,主要由排种壳体、种室、下刮种刀、上刮种刀、排种盘、吸室壳体、进气口、阻气板、强制刮种刀等零部件组成。排种盘沿径向由外向内周向布置中字型吸种孔和扰种台柱,吸种孔一侧布置有导种台;排种盘结构如图 1、2 所示。

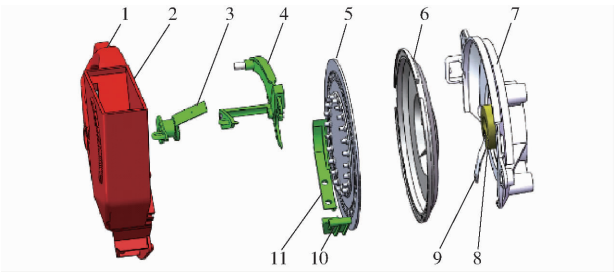


图 1 高速气吸式排种器结构图

Fig. 1 Structure diagram of high speed air suction seeding metering device

1. 排种壳体 2. 种室 3. 下刮种刀 4. 上刮种刀 5. 双重扰动排种盘 6. 吸室壳体 7. 后壳体 8. 进气口 9. 阻气板 10. 排种下壳体 11. 强制刮种刀

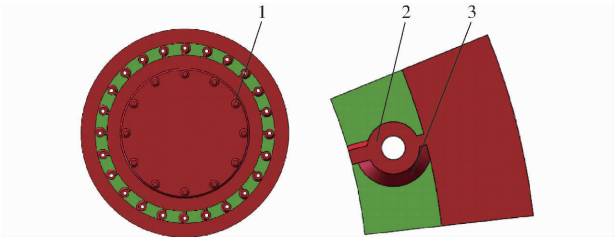


图 2 排种盘结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of seed tray

1. 扰种台柱 2. 导种台 3. 中字型吸种孔

排种器工作时,在排种盘的旋转驱动下,依靠种盘上的凹槽和扰种台柱产生双重扰动,将密集的种群离散开来;待吸附的种子首先落入两吸种孔间的凹槽中,随后在导种台的辅助下,进入吸种孔区域;通过吸种孔两侧的压差,种子被压附在吸种孔上,随着吸种孔做圆周运动;种子脱离种群后,在上下刮种刀的作用下,完成单粒种子的定量充种过程;种子到达投种区域时阻断气流,种子脱离排种盘,沿竖直方向进入导种管后,落入种沟。

3 关键部件参数设计

3.1 种室

玉米属于农业散体物料,在种室与排种盘接触的待充种区的分布区域由种室结构和玉米休止角决定^[14-15]。种室结构如图 3 所示,该种室沿排种盘圆周切向布置,为了使玉米种子在种室内能在不同高度同时均匀全部向下流动,形成整体流,根据无限长缝隙型孔的成拱原理,参照文献^[15]种子临界结拱间隙与矩形孔长度关系曲线,结合本文所设计排种器的总体布局,种室进种孔宽度 a 取 57 mm,进种孔

长度 b 取 133 mm。

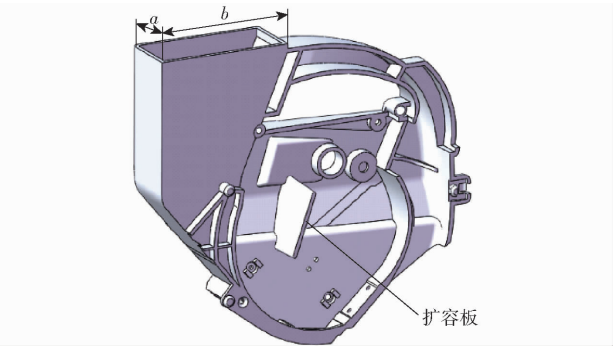


图 3 种室

Fig. 3 Seed chamber

充种作业时,如图 4 所示,种子在充种区的分布主要由玉米种子休止角 β 决定;为了增加充种区角度,如图 3 所示,采用扩容板可提高玉米种子休止角水平线,从而扩大种子充种区域;扩容板位置直接影响不同高度种层种子压力,进而增加排种盘吸种孔吸种难度,不同高度物料层种子受力如图 5 所示。

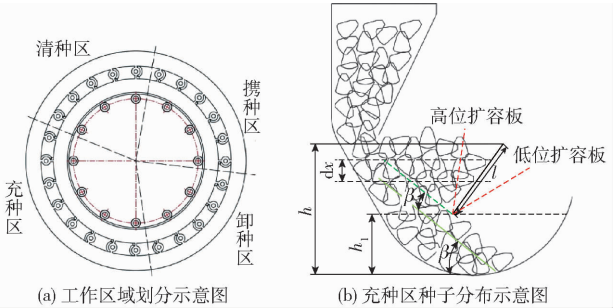


图 4 工作区域划分和充种区示意图

Fig. 4 Schematics of work area division and seed filling area

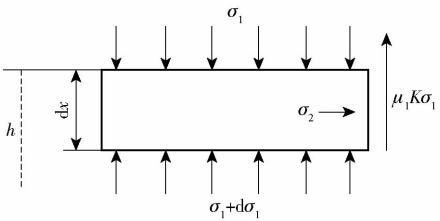


图 5 充种区 dx 段物料层受力图

Fig. 5 Stress diagram of material layer in dx section of seed filling area

设垂直压力为 σ_1 ,物料对壁面的侧压力为 σ_2 ,种室壁面与种间摩擦因数为 μ_1 ,充种区界面面积为 A ,周长为 C ,则物料层受力平衡方程为

$$\sigma_1 A + \gamma dx A = (\sigma_1 + d\sigma_1) A + \mu_1 K \sigma_1 C dx \quad (4)$$

其中

$$K = \sigma_2 / \sigma_1$$

式中

γ ——物料重度, kN/m^3

dx ——物料层宽度微分

代入初始条件 $x = 0, \sigma_1 = 0$,积分得

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\gamma R_s}{\mu_1 K} (1 - e^{-\frac{k\mu_1 h}{R_s}}) \\ \sigma_2 = \frac{\gamma R_s}{\mu_1} (1 - e^{-\frac{k\mu_1 h}{R_s}}) \end{cases} \quad (5)$$

其中 $R_s = \frac{A}{C}$ (6)

式中 R_s ——液力半径,mm
 h ——扩容板上部与种室最低点的距离
由于充种区相对较浅,颗粒与壁面的摩擦力 $fK\sigma_1 Cdx$ 较小,可以忽略,所以可得

$$\begin{cases} \sigma_1 = \gamma h_i \\ \sigma_2 = K\gamma h_i \end{cases} \quad (7)$$

式中 h_i ——颗粒所在物料层与最上层物料距离,mm

由式(7)可知,上层种群对下层种群的垂直压力随 h_i 呈线性增加。如图 4b 所示,扩容板的下部设置在种群休止角顶点,当扩容板处在高位时,结合图 4b 可知,种群横截面长度减小,降低玉米种子在吸种孔处的数量,从而导致漏吸率增加;当扩容板处在低位时,会形成部分无效种群横截面长度,在形成相同吸种区域时,扩容板的长度需增加,与排种盘上的扰种台柱形成干涉。综合上述分析,扩容板底部与种室最低点的距离 h_1 设计为 70 mm;为了增加充种区角度,同时降低种群垂直压力,结合上部刮种刀的位置,故取扩容板上部与种室最低点的距离 h 为 130 mm。扩容板倾角 φ 与玉米休止角 β 相同,参照文献[14] φ 取 35° ,由

$$l = \frac{h - h_1}{\sin\varphi} \quad (8)$$

计算扩容板长度 l 为 104.6 mm,为了确保加工精度, l 取整为 104 mm,扩容板宽度为种室与排种盘间的距离 65 mm。

3.2 排种盘

排种盘是吸附和携带玉米种子的关键部件,其主要结构参数包括:吸种孔直径 r_1 和周向布置半径 r_2 ,中字型吸种孔的周向间距 C_1 、径向长度 C_2 与个数,导种台高度 g 与倾角 α ,扰种台柱的个数、高度 E 、半径 r_3 和周向布置半径 r_4 。

3.2.1 吸种孔参数确定

以被吸种孔吸附的单粒玉米种子为研究对象,假定种子为材质均匀的刚体,排种器在工作过程中,受种间碰撞和机具振动影响,需引入吸种可靠性系数 K_1 (1.8 ~ 2.0) 和外界可靠性系数 K_2 (1.6 ~ 2.0) [16],受力分析如图 6 所示,忽略不计空气及种间摩擦力 F_f ,建立种子稳定吸附受力方程为

$$\begin{cases} S = \frac{\pi}{4} r_1^2 \\ Q = \sqrt{(G + \gamma h_i)^2 + J^2 + 2(G + \gamma h_i)J\cos\beta} \\ F_p \frac{r_1}{2} = Qd \\ F_p = pS \end{cases} \quad (9)$$

式中 p ——一个吸种孔的吸附负压,Pa
 J ——种子所受离心力,N
 G ——种子重力,N
 β —— J 与 $G + \gamma h_i$ 之间的夹角, ($^\circ$)
 d ——种子重心与排种盘之间距离,m
 S ——吸种孔截面积, m^2

可得

$$p = \frac{8d}{\pi r_1^3} \sqrt{(G + \gamma h_i)^2 + J^2 + 2(G + \gamma h_i)J\cos\beta} \quad (10)$$

进而可得实际需要最小吸附负压 $p_{\min}$ 为

$$p_{\min} = \frac{8K_1 K_2 d}{\pi r_1^3} \cdot \sqrt{(G + \gamma h_i)^2 + J^2 + 2(G + \gamma h_i)J\cos\beta} \quad (11)$$

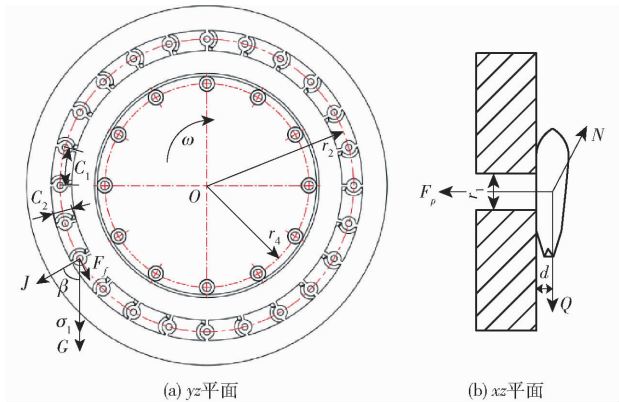


图 6 充种受力分析

Fig. 6 Stress analyses of seed filling

吸种孔对马齿形玉米种子吸附能力弱于球锥形和类球形玉米种子 [17],即马齿形玉米种子所需吸附负压最大;吸种孔直径 r_1 为 $0.64B \sim 0.66B$ [18],马齿形玉米种子平均宽度 B 为 8.5 mm [19],故确定吸种孔直径 r_1 为 5.5 mm。

由文献[15]可知玉米排种盘吸种孔的个数绝大多数为 26,结合本文吸种孔的尺寸和排种器尺寸,故确定吸种孔的个数为 24。

如图 7 所示,凹槽需满足单粒种子以竖向和横向两种姿态顺利进入,而凹槽的尺寸与吸种孔的尺寸相关联,由文献[19]可知玉米种子最大长度为 12.82 mm,根据前期试验,故确定吸种孔的周向间距和径向长度范围分别为 $16\text{ mm} \leq C_1 \leq 18\text{ mm}$ 、 $14\text{ mm} \leq C_2 \leq 16\text{ mm}$;由于吸种孔个数为 24 个,根据圆周长计算公式可得 $368\text{ mm} \leq 2\pi r_2 \leq 414\text{ mm}$,确定

吸种孔周向布置半径最小为 58.59 mm,故取 r_2 为 60 mm;现有气吸式排种器排种盘直径一般为 80 ~ 260 mm^[20],结合文献[18]设计规范要求,故确定排种盘直径为 200 mm。

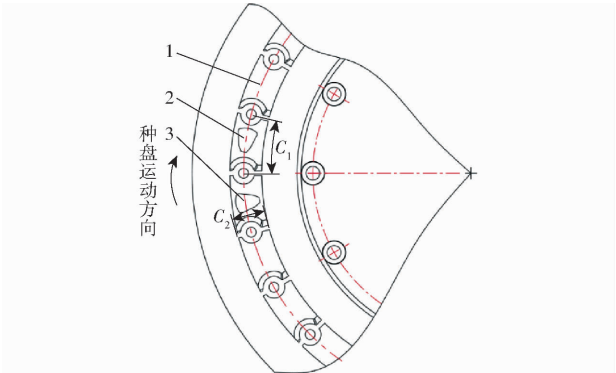


图 7 种子在凹槽中的状态示意图
Fig. 7 Schematic of seed state in groove
1. 凹槽 2. 竖向姿态种子 3. 横向姿态种子

3.2.2 导种台

排种盘转动时,中字型吸种孔间凹槽从充种区的种群中穿过,种子以如图 7 所示的姿态 2 或姿态 3 进入凹槽,随着排种盘的进一步转动,种子沿着导种台进入吸种孔区域,由此建立种子在导种台的力学等效模型,如图 8 所示。

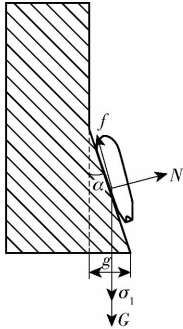


图 8 种子受力分析
Fig. 8 Seed stress analysis

为了使种子能够顺利沿着导种台运动,应确保其有沿导种台向吸种孔运动的趋势,即

$$\begin{cases} N = (G + \sigma_1) \sin \alpha \\ f = N \mu_2 \\ (G + \sigma_1) \cos \alpha \geq f \end{cases} \quad (12)$$

式中 α ——导种台与排种盘平面的夹角, ($^\circ$)
 μ_2 ——种子与排种盘间摩擦因数
 N ——种子在导种台斜面受到的支持力, N
 f ——种子沿导种台平面受到的摩擦力, N

可得
$$\alpha \leq \arctan \frac{1}{\mu_2} \quad (13)$$

由式(13)可得 $\alpha \leq 65.34^\circ$,考虑加工精度,本文设计时选取 $\alpha = 60^\circ$; α 取值一定时,导种台高度 g 增大会增加种子在导种台的行程,造成吸种困难,因此

g 应小于玉米种子厚度的一半。导种台的高度过小,凹槽对种群的扰动效果不佳,导种台的高度过大,种子容易卡在凹槽中,由文献[19]可知玉米种子的平均厚度为 5.16 mm,本文设计排种盘厚度为 3 mm,因此 g 取值应在 0 ~ 2.58 mm 之间,通过试验可知 $g = 1.5$ mm 时,对种群的扰动效果最好,且不会造成卡种,综合考虑确定 $g = 1.5$ mm。

3.2.3 扰种台柱

高速气吸式排种器充种区增加,导致上层种群对下层种群垂直压力增加,排种盘吸种孔吸种难度增加、携种稳定性降低;在扰种台柱对种群定向扰动下,玉米种子以散体颗粒形式从种群分离,分布在吸种孔附近,可提高充种性能。扰种台柱为圆柱体,其结构如图 2 所示。为了使扰种台对种群形成有效扰动,同时避免种子停留在扰种台上,扰种台尺寸应满足

$$\begin{cases} l_z < E < l_x \\ 0.6l_w \leq r_3 \leq l_w \end{cases} \quad (14)$$

式中 l_z ——玉米种子长度, mm
 l_w ——玉米种子宽度, mm
 l_x ——排种盘面与种室内壁的距离, mm

通过测量可知排种盘面与种室内壁的最短距离为 28 mm,结合文献[19]中玉米的三轴尺寸,确定扰种台高度 E 为 25 mm,半径 r_3 为 6 mm。

如图 9 所示,排种盘转动时,相邻两扰种台之间的空隙应满足不会发生卡种现象。当吸种孔处于携种状态时,扰种台与吸种孔间的径向距离应满足扰种台不会对被吸附的种子施加挤压力,因此扰种台的位置应满足

$$\begin{cases} r_4 \sin \frac{\xi}{2} - r_3 = \frac{t}{2} \\ 1.5l_z < r_2 - r_4 < 2l_z \\ l_z < t \end{cases} \quad (15)$$

其中
$$\xi = \frac{2\pi}{n} \quad (16)$$

式中 ξ ——相邻两扰种台柱中心与排种盘圆心的夹角, ($^\circ$)
 t —— ξ 角对应的弦长, mm
 n ——扰种台个数

根据文献[19]中玉米的三轴尺寸,结合式(15)可知 r_4 的取值范围为 34.36 ~ 40.44 mm,扰种台的周向布置半径越小,对近吸种孔附近的种群扰动能力弱,不利于充种,所以确定扰种台柱的周向布置半径 r_4 为 40 mm。当 r_3 、 r_4 为已知值,扰种台的个数 n 取 10、12、14 时,代入式(15)可求得最佳扰种台个数为 12。

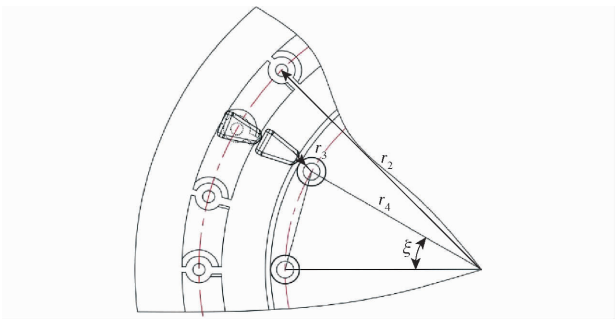


图 9 扰种台位置分析
Fig. 9 Analysis of position of scrambling station

4 仿真试验

本文设计的种室充种区域增大,种层间压力增大,高速条件下,吸种孔吸附种子的难度增加,排种盘需要增设搅种机构以加强对种群的扰动,降低种子被吸附的难度,因此需要对排种盘的扰动性能进行研究。本文应用 EDEM 仿真软件对光面排种盘 A、中字型吸种孔排种盘 B 和带扰种台柱的中字型吸种孔排种盘 C 进行种群扰动的对比仿真试验,排种盘结构如图 10 所示。

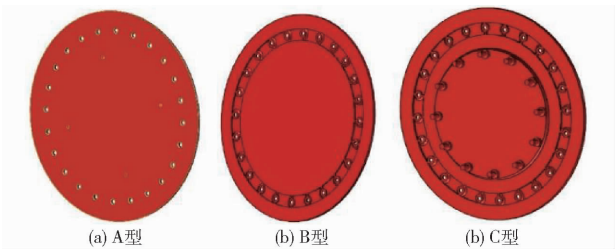


图 10 3 种结构排种盘
Fig. 10 Three structure types of seed tray

4.1 仿真模型

利用 EDEM 进行数值模拟时,将本文设计的高速气吸式排种器简化为气室壳体、排种壳体和排种盘 3 部分;以郑单 958 玉米种子为对象建模,将如图 11 所示的玉米种子模型按照实际不同形状玉米种子数量占比进行设置,马齿形、球锥形、类球形的比例为 6:2:1。颗粒接触模型选用 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型。利用颗粒工厂生成种子,每种形状玉米种子按照体积正态分布的方式生成, EDEM 仿真模型如图 12 所示。种子、排种盘物理特

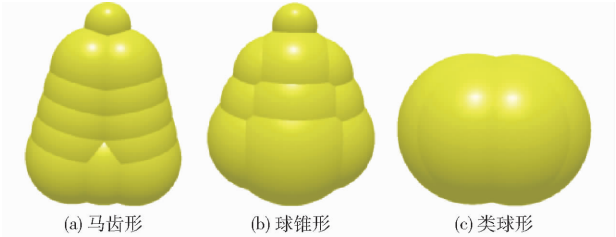


图 11 玉米种子模型
Fig. 11 Corn seed models

性参数和相关力学特性参数如表 1 所示^[21-24]。

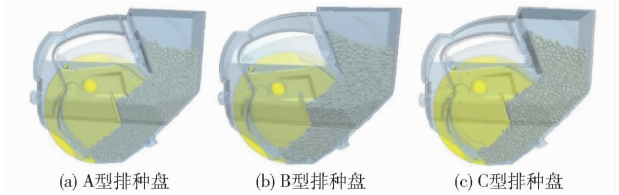


图 12 EDEM 仿真模型
Fig. 12 EDEM simulation model

表 1 玉米种子与排种盘物理和力学仿真参数

Tab.1 Physical and mechanical simulation parameters of corn seed and seed tray

参数	材料	
	种子	排种盘
泊松比	0. 4	0. 5
剪切模量/Pa	$1. 37 \times 10^8$	$1. 77 \times 10^8$
密度/(g·cm ⁻³)	1. 197	1. 180
碰撞恢复系数(与种子)	0. 182	0. 621
静摩擦因数(与种子)	0. 431	0. 459
动摩擦因数(与种子)	0. 078 2	0. 093 1

4.2 仿真试验方法

种群扰动强度大能够降低种子瞬态的法向力即瞬时种子内摩擦力,可以提高种子充种性能^[25]。为了探究 3 种不同结构排种盘对种群的扰动程度,以种群内每个时刻颗粒法向力平均值作为评价指标进行仿真试验。本文设计排种器工作速度为 8 ~ 14 km/h,同时兼顾试验水平宽度,故试验时排种盘转速分别设置为 20、30、40、50、60 r/min,在不同转速下开展 3 种排种盘的仿真试验。仿真中颗粒工厂生成 3 000 颗玉米种子需要耗时 2 s,排种盘从 2 s 开始转动,所以应用 EDEM 后处理模块提取 2 ~ 10 s 时间段内颗粒的平均法向力。

4.3 仿真结果分析

本文设计排种器最高工作速度为 14 km/h,故以种盘转速 40 r/min 为例进行分析。3 种排种盘颗粒平均法向力随时间变化曲线如图 13 所示,从图 13a 可以看出,A 型排种盘颗粒的平均法向力在 2 ~ 3 s 时,围绕着一个中心值小范围上下波动;待排种盘转动步入稳定状态时,颗粒的平均法向力基本没有震荡。图 13b 中显示,B 型排种盘颗粒的平均法向力随着排种盘的周期转动,在 2 ~ 10 s 内,围绕着一个中心值呈现稳定的波动状态。图 13c 中 C 型排种盘颗粒的平均法向力在保持稳定波动的基础上,上下震动的幅值均明显高于 B 型排种盘。

3 种排种盘种群法向力总和与排种盘转速之间的关系如图 14 所示,随着转速的变化,B 型排种盘颗粒的法向力总和上下波动较大;C 型排种盘颗粒的法向力总和基本呈上升趋势;B 型排种盘和 C 型

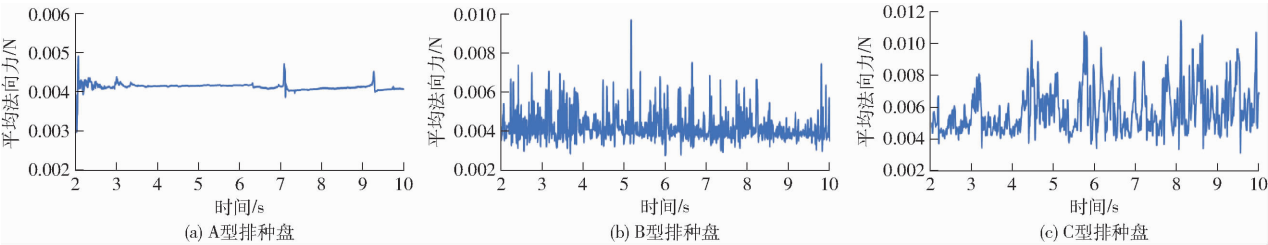


图 13 3 种排种盘的种子平均法向力随时间变化曲线

Fig. 13 Variation curves of average normal force of seeds with time in three types of seed tray

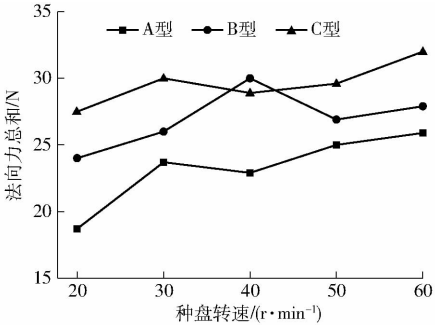


图 14 3 种排种盘种群法向力总和与转速的关系曲线

Fig. 14 Relationship between sum of normal stress and rotational speed

排种盘的种群法向力总和均大于 A 型排种盘。

综合上述分析,C 型排种盘具有较大的扰动强度,会显著降低种子颗粒瞬时的内摩擦力,吸种孔对种子的吸附难度降低,即所需吸附负压小,C 型排种盘的辅助充种性能较好。

5 台架试验

5.1 试验材料与设备

试验材料选用建模使用的郑单 958 玉米种子,其含水率为 13%,千粒质量 375 g。排种盘按照仿真使用的 3 种排种盘进行加工试制,分别安装在自主设计的玉米高速气吸式排种器上,将排种器安装在中国农业机械化科学研究院集团有限公司土壤植物机器系统技术国家重点实验室 2PST 型排种器性能测试系统上,并增设 FASTEC-TS3 型高速摄像机,

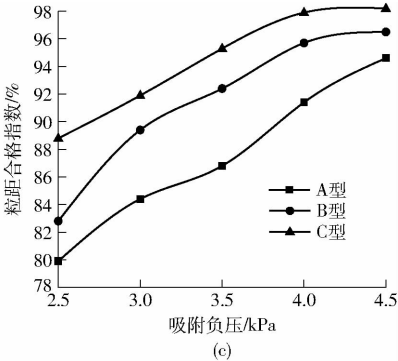
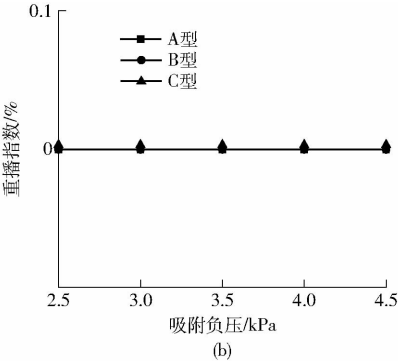
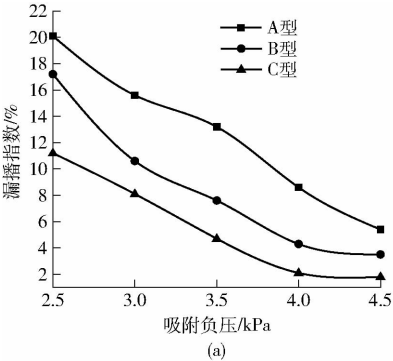


图 16 转速为 40 r/min 不同吸附负压时吸种性能变化曲线

Fig. 16 Variation curves of seed absorption performance under different adsorption negative pressures at rotational speed of 40 r/min

如图 15 所示。

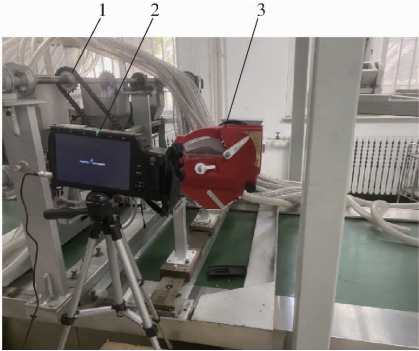


图 15 试验台

Fig. 15 Test bed

1. 驱动装置 2. 高速摄像机 3. 排种器

5.2 不同排种盘排种性能对比试验

排种盘排种性能检测试验中,排种盘转速选定为 20、30、40、50、60 r/min,工作吸附负压设定为 2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 kPa;试验区域是以吸种孔离开种群位置为起点,吸种孔到达携种区最高位置为终点。利用高速摄像机记录该区域的图像,每组试验记录排种盘转 5 圈的图像进行统计计算,每组试验重复 5 次取平均值作为试验结果。

5.3 试验结果分析

由图 16a 可知,排种盘转速为 40 r/min 时,3 种排种盘漏播指数随着吸附负压的增大而减小,但 C 型排种盘在负压为 4.0~4.5 kPa 时,漏播指数基本保持不变,而 B 型排种盘和 C 型排种盘在吸附负压从 4.0 kPa 增加到 4.5 kPa 时,漏播指数仍保持较大

的下降速率。由图 17a 可知,吸附负压为 4.0 kPa 时,转盘转速为 20 ~ 30 r/min 时,3 种排种盘的漏播指数增加规律基本一致;当转速由 40 r/min 增加到 60 r/min 时,A 型排种盘和 B 型排种盘的漏播指数增长速率均显著高于 C 型排种盘。出现上述试验结果的原因在于,C 型排种盘扰动性最优,吸种孔对种子的捕获能力最强。

由图 16b 和图 17b 可知,吸种孔尺寸相同时,转盘转速较大时,吸附负压对各盘重播指数影响

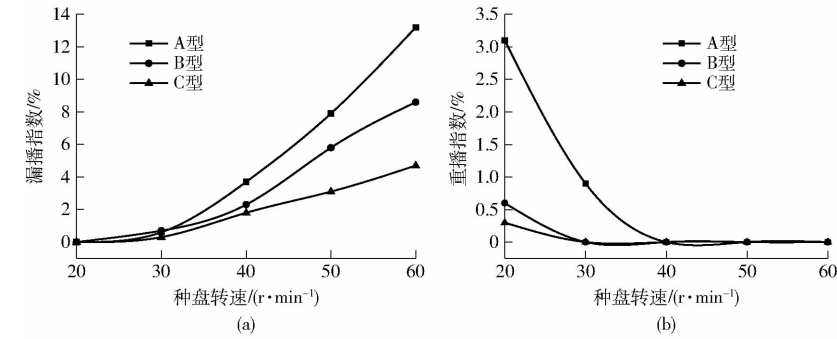


图 17 负压为 3.5 kPa 不同转盘转速时吸附性能变化曲线

Fig. 17 Adsorption performance change curves when negative pressure was 3.5 kPa with different rotating speeds of turntable

5.4 验证试验

为了进一步验证安装 C 型排种盘的排种器排种性能,根据 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》中的要求,以重播指数、漏播指数、粒距合格指数和合格粒距变异系数为试验指标,进行作业速度、吸附负压的全因素试验,试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果
Tab. 2 Test result

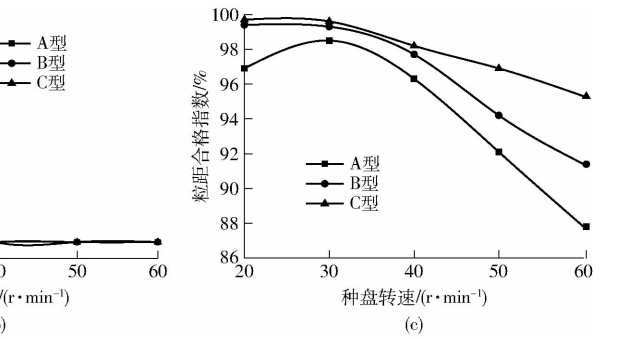
作业速度/ (km·h ⁻¹)	吸附 负压/ kPa	试验指标			
		漏播指 数/%	重播指 数/%	粒距合格 指数/%	合格粒距变异 系数/%
8	2.5	4.8	0	95.2	10.67
	3.0	3.6	0.8	95.6	9.67
	3.5	1.7	2.6	95.7	11.33
	4.0	0.6	4.2	95.2	10.33
10	2.5	6.4	0	93.6	16.67
	3.0	5.1	0.3	94.6	15.33
	3.5	2.5	1.4	96.1	12.67
	4.0	1.5	2.9	95.4	13.33
12	2.5	9.7	0	90.3	17.33
	3.0	7.5	0	92.5	15.67
	3.5	5.1	0.6	94.3	14.00
	4.0	3.8	1.3	94.9	14.33
14	2.5	11.4	0	88.6	19.67
	3.0	9.5	0	90.5	17.33
	3.5	7.9	0	92.1	17.67
	4.0	5.6	0.4	94.0	16.67

从 C 型排种盘排种器作业性能整体试验结果

几乎无差异;因此,合理的吸种孔尺寸可减低重播指数。

由图 17c 可知,当排种盘转速为 60 r/min 时,C 型排种盘粒距合格指数较 A 型排种盘提高了 7.5 个百分点。

综合上述结果和上文对未设扩容板的排种器的计算分析可知,高速作业时,扩大充种区域,排种盘的漏播指数降低,扰种强度增大,可显著改善吸种孔的吸附能力。



可知,当作业速度为 8 ~ 10 km/h、吸附负压为 3.0 ~ 4.0 kPa 时,漏播指数不高于 5.1%,重播指数不大于 4.2%,粒距合格指数不小于 94.6%,合格粒距变异系数不大于 15.33%;当作业速度为 12 ~ 14 km/h、吸附负压为 3.5 ~ 4.0 kPa 时,漏播指数不高于 7.9%,重播指数不高于 1.3%,粒距合格指数不小于 92.1%,合格粒距变异系数不高于 17.67%。各项指标均优于国家标准。

6 结论

(1) 针对高速作业时,玉米气吸式排种器漏播指数增大,工作性能不佳的问题,设计扩容板增大充种区域,延长充种时间,降低漏播指数。

(2) 充种区域扩大,种群层间压力增大,为了加强对种群离散度,设计一种具有扰种台柱和中字型吸种孔的扰动辅助充种排种盘。

(3) 通过 EDEM 仿真试验和台架试验对光面排种盘、中字型吸种孔排种盘和带扰种台柱的中字型吸种孔排种盘进行扰动性能对比试验,结果表明带扰种台柱的中字型吸种孔排种盘的扰动性能最佳。

(4) 排种盘转速为 60 r/min 时,扰动辅助充种玉米排种器的粒距合格指数较原排种器提高了 7.5 个百分点。扰动辅助充种高速气吸式玉米排种器作业速度为 8 ~ 10 km/h、吸附负压为 3.0 ~ 4.0 kPa 时,漏播指数不高于 5.1%,重播指数不大于 4.2%,粒距合格指数不小于 94.6%,合格粒距变异系数不大于 15.33%;当作业速度为 12 ~ 14 km/h、吸附负

压在 3.5 ~ 4.0 kPa 时,漏播指数不高于 7.9%,重播指数不大于 1.3%,粒距合格指数不小于 92.1%,合格粒距变异系数不高于 17.67%,各项指标均优于国家标准。

参 考 文 献

- [1] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J].农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- [2] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等.玉米播种与测控技术研究进展[J].农业机械学报,2018,49(9):1-18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. (in Chinese)
- [3] 周军平,刘立晶,刘忠军,等.精密播种机株距均匀性影响因素分析[J].农机化研究,2014,36(7):49-53.
ZHOU Junping, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Influence factors analysis of the plants distance uniformity of precision planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 49-53. (in Chinese)
- [4] 陈玉龙,贾洪雷,王佳旭,等.大豆高速精密播种机凸凹排种器设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(8):95-104.
CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 95-104. (in Chinese)
- [5] 杨丽,史嵩,崔涛,等.气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J].农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48-53. (in Chinese)
- [6] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A, ONAL I, et al. Mathematical modeling and optimization of the performance of a metering unit for precision corn seeding[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 95(10): 5801-5806.
- [7] ONAL I, DEGIRMENCIOGLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2012, 36(2): 133-144.
- [8] Horsch seed meter [EB/OL]. (2016-1-12). <http://www.horsch.com/us/produkte/sae>.
- [9] The vSet meter [EB/OL]. (2018-2-23). <http://www.precisionplanting.com/#products/vset/>.
- [10] 陈玉龙.气吸式机械复合式大豆高速精密排种器研究[D].长春:吉林大学,2018.
CHEN Yulong. Research of air-suction mechanical combined soybean high-speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [11] 丁力,杨丽,刘守荣,等.辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J].农业工程学报,2018,34(22):1-11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1-11. (in Chinese)
- [12] 史嵩,周纪磊,刘虎,等.驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(5):61-70.
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61-70. (in Chinese)
- [13] 史嵩,刘虎,位国建,等.基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J].农业机械学报,2020,51(5):54-66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54-66. (in Chinese)
- [14] 杨明韶.农业物料流变学[M].北京:中国农业出版社,2015.
- [15] 丁力.辅助充种高速气吸式精量排种器设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2020.
DING Li. Design and experimental study of high speed precision seed-metering device with auxiliary seed-filling and air-suction [D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [16] 颜丙新,张东兴,崔涛,等.吸种盘和负压腔室同步转动气吸式精量排种器设计[J].农业工程学报,2017,33(23):15-23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15-23. (in Chinese)
- [17] 丁力,杨丽,张东兴,等.基于 DEM-CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(5):50-60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 50-60. (in Chinese)
- [18] 中国农业机械化科学研究院.农业机械手册:上册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [19] 陈泽仁.玉米种子颗粒群体建模方法研究[D].长春:吉林大学,2019.
CHEN Zeren. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [20] 李兆东,杨文超,张甜,等.油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J].农业工程学报,2019,35(1):12-22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with

- groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12 – 22. (in Chinese)
- [21] 崔涛,刘佳,杨丽,等. 基于高速摄影的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(15):34 – 41.
CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34 – 41. (in Chinese)
- [22] 王云霞,梁志杰,张东兴,等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型间接触参数标定[J]. 农业工程学报,2016,32(22):36 – 42.
WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36 – 42. (in Chinese)
- [23] CHEN Z, YU J, XUE D. An approach to and validation of maize-seed-assembly modelling based on the discrete element method [J]. Powder Technology, 2018, 328: 167 – 183.
- [24] 李婉宜,曾攀,雷丽萍,等. 离散颗粒流动堆积行为离散元模拟及实验研究[J]. 力学与实践,2012,34(1):20 – 26.
LI Wanyi, ZENG Pan, LEI Liping, et al. Simulation based on discrete element method and experiment on flow and packing behavior of particles[J]. Mechanics in Engineering, 2012, 34(1): 20 – 26. (in Chinese)
- [25] 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(3): 62 – 69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)

(上接第 38 页)

- [16] FU L, MAJEED Y, ZHANG X, et al. Faster R – CNN-based apple detection in dense-foliage fruiting-wall trees using RGB and depth features for robotic harvesting[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 245 – 256.
- [17] GAO F, FU L, ZHANG X, et al. Multi-class fruit-on-plant detection for apple in SNAP system using Faster R – CNN[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 1 – 10.
- [18] GENE-MOLA J, VILAPLANA V, ROSELL-POLO J R, et al. Multi-modal deep learning for Fuji apple detection using RGB – D cameras and their radiometric capabilities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 689 – 698.
- [19] ZHANG J, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Multi-class object detection using Faster R – CNN and estimation of shaking locations for automated shake-and-catch apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 1 – 10.
- [20] KANG H, CHEN C. Fruit detection, segmentation and 3D visualisation of environments in apple orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 1 – 10.
- [21] 王丹丹,何东健. 基于 R – FCN 深度卷积神经网络的机器人疏果前苹果目标的识别[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 156 – 163.
WANG Dandan, HE Dongjian. Recognition of apple targets before fruits thinning by robot based on R – FCN deep convolution neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 156 – 163. (in Chinese)
- [22] KANG H, CHEN C. Fast implementation of real-time fruit detection in apple orchards using deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 1 – 10.
- [23] 龙燕,李南南,高研,等. 基于改进 FCOS 网络的自然环境下苹果检测[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 307 – 313.
LONG Yan, LI Nannan, GAO Yan, et al. Apple fruit detection under natural condition using improved FCOS network[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 307 – 313. (in Chinese)
- [24] KANG H, CHEN C. Fruit detection and segmentation for apple harvesting using visual sensor in orchards[J]. Sensors, 2019, 19(20): 4599.
- [25] GENE-MOLA J, SANZ-CORTIELLA R, ROSELL-POLO J R, et al. Fruit detection and 3D location using instance segmentation neural networks and structure-from-motion photogrammetry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 1 – 11.
- [26] ULTRALYTICS. YOLOv5[R/OL]. 2020 – 05 – 18 [2022 – 03 – 01]. <https://github.com/ultralytics/yolov5>.
- [27] 宋怀波,王亚男,王云飞,等. 基于 YOLOv5s 的自然场景油茶果识别方法[J]. 农业机械学报,2022,53(7):234 – 242.
SONG Huaibo, WANG Ya'nan, WANG Yunfei, et al. *Camellia oleifera* fruit detection in natural scene based on YOLOv5s [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 234 – 242. (in Chinese)
- [28] 何斌,张亦博,龚健林,等. 基于改进 YOLO v5 的夜间温室番茄果实快速识别[J]. 农业机械学报,2022,53(5):201 – 208.
HE Bin, ZHANG Yibo, GONG Jianlin, et al. Fast recognition of tomato fruit in greenhouse at night based on improved YOLO v5 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 201 – 208. (in Chinese)
- [29] YAO J, QI J M, ZHANG J, et al. A real-time detection algorithm for kiwifruit defects based on YOLOv5[J]. Electronics, 2021, 10(14): 1711.