

倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验

李兆东^{1,2} 王晴晴¹ 张亚兰¹ 王韦韦¹ 杨洋^{1,2} 陈黎卿^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 230036)

摘要:为解决淮北平原玉米秸秆覆盖地小麦播量较大且难以精量控制以及现有小麦集排供种装置结构较复杂的问题,设计了一种具有倾斜抛物线型孔轮式小麦精量供种装置。阐述了该供种装置结构和工作原理,分析并确定了主要相关参数,建立了型孔截面曲线限制方程,构建了小麦充种过程的力学模型,以型孔锥角、型孔轮转速和供种轮数量为试验因素,以供种速率、供种速率稳定性变异系数和种子破损率为试验指标,进行了供种性能试验研究。试验表明:倾角为40°抛物线型孔的供种稳定性较优,其供种速率稳定性变异系数小于1.8%,种子破损率低于0.2%;在型孔轮数量1~5、工作转速10~100 r/min条件下,小麦供种速率随型孔轮数目和转速增加呈上升趋势,其供种速率范围为30~1 500 g/min,供种速率稳定性变异系数随型孔轮数量增加呈下降趋势、随转速增加呈先降后升趋势,其稳定性变异系数均小于2.0%,种子破损率均不大于0.2%;以安装5个抛物线型孔轮供种机构建立单位面积播种量数学模型进行的主动供种匹配试验得出,模拟机组前进速度不大于9.8 km/h时,可实现较大范围的主动供种,其稳定性变异系数均小于2.0%;田间试验得出直播小麦种植密度为230~270株/m²,均匀性变异系数为21.97%。倾斜抛物线型孔轮可实现小麦高速供种并简化供种装置结构。

关键词:小麦;气送式排种器;供种装置;倾斜抛物线型孔轮

中图分类号: S223.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0116-09

Design and Experiment of Inclined Parabolic Cell Wheel in Seed Feeding Device for Wheat

LI Zhaodong^{1,2} WANG Qingqing¹ ZHANG Yalan¹ WANG Weiwei¹ YANG Yang^{1,2} CHEN Liqing^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Laboratory of Engineering of Intelligent Agricultural Machinery Equipment of Anhui Province, Hefei 230036, China)

Abstract: In order to solve the difficulty of high speed and precision control of wheat in corn straw covered ground of Huaibei Plain and simplify the existing wheat seed supplying pneumatic type mechanism, a inclined parabolic cell wheel seed feeding device for wheat was designed. The structure and working principle of wheat precision seed device was described, the relevant parameters were analyzed and determined, the curve limit equation of cell and the mechanical model of wheat seed supplying process was established, and then taking the cone angle, speed of cell and wheel number as test factors, seed feeding rate, stability coefficient of variation of seed feeding and damage rate were taken as test indexes and a performance experiment was carried out. Experimental results showed that parabolic cell with a dip angle of 40° had better stability, whose stability coefficient of variation of seed supplying was less than 1.8% and damage rate was below 0.2%; under the condition that the amount of cell wheel was 1~5 and working speed was 10~100 r/min, wheat seed feeding rate, which was ranged from 35 g/min to 1 500 g/min, was rising as the number and speed of cell wheel was increased; stability coefficient of variation of seed feeding, which was less than 2.0%, was decreased as cell wheel number was increased, and it was decreased first and then raised as cell wheel speed was increased; according to

收稿日期: 2018-02-14 修回日期: 2018-03-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)、公益性行业(农业)科研专项(201503136)和安徽农业大学青年科学基金重点项目(2016ZR010)

作者简介:李兆东(1987—),男,讲师,主要从事旱作农业装备设计与智能测控研究,E-mail: Lizd@ahau.edu.cn

通信作者:陈黎卿(1979—),男,教授,主要从事玉米机械与秸秆处理机械、智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

the variable feeding matching experiment with the mathematical model of sowing amount per hectare, which was established by seed feeding device for wheat with the installment of 5 cell wheel, a large range of variable supplying, whose stability coefficient of variation of seed supplying was less than 2%, was achieved when simulation advancing velocity of the equipment was less than 9.8 km/h. The field experiment showed that the planting density of direct seeding wheat was 230 ~ 270 strain per square, and homogeneity coefficient of variation of seed supplying was 21.97%. Inclined parabola cell wheel proposed can realize a wide range of wheat seed supplying and simplify the structure of seed supplying device, in order to design a high performance wheat variable seed sowing machine for corn straw mulch in Huaibei Plain and provide the basis.

Key words: wheat; air-assisted centralized metering device; seed feeding device; inclined parabolic cell wheel

0 引言

淮北平原粮食种植以小麦-玉米轮作为主。因秸秆还田有助于减少雾霾和农田水土流失、提高土壤肥力等优点,同时农村土地分散经营逐渐向适度规模经营转变,该区域实施玉米秸秆还田下小麦高速精量联合直播作业已成趋势^[1-4]。高速集中排种系统多采用机械供种与气流输送分配成行组合技术,可将种箱内的无序种群成行且均匀的播入田间,该技术具有简化整机结构、提高工作效率和降低种子破损率等优点^[5-7]。由于小麦种子球形度低、流动性差,供种装置的供种性能对实现小麦精量播种至关重要,其影响后续的种子流输送和均匀分配,制约了小麦播种机的可靠性和实用性。

为改善小麦种子的流动性,提高其集排供种性能,一些机构和相关学者对此进行了研究。意大利 Maschio Gaspardo 公司、德国 Amazone 公司、加拿大 Fiexi-Coil 公司以及美国 John Deere 和 Case IH 公司等研制集排气力式播种机,其供种装置多为带有搅种机构的槽轮式排种器实现精量供种^[8]。常金丽等^[9]研制的 2BQ-10 型气流一阶式小麦排种系统,其采用轴推式外槽轮机构实现供种量调节;刘立晶等^[10]设计了一种带有星形给料装置的气力式排种系统;赵晓顺等^[11]采用梯形槽缝与负压吸附组合技术实现小麦的精量供种;雷小龙等^[12-13]设计了一种具有倾斜锥孔轮与双螺旋搅种机构组合式小麦供种装置,可有效提高小麦的供种性能。上述研究表明,小麦集排气力式供种装置仍以外槽轮式供种机构为主,且多采用增设机械或气力辅助机构提高供种性能,其不足之处是供种装置结构较复杂且供种量调节范围不大。因此,简化供种装置结构和增大供种范围仍是需要解决的问题。

本文根据小麦种子物料特性和农艺种植要求,设计一种结构简单、供种范围大的小麦精量供种装置,确定其主要结构参数,开展型孔锥角、工作转速、

型孔轮数目对供种速率和稳定性变异系数影响的研究,为研制适应淮北平原玉米秸秆覆盖地高性能小麦变量播种机提供依据。

1 供种装置结构与工作原理

1.1 小麦电控气送式变量直播机

直播机主要由旋耕装置、主机架、风泵驱动装置、气流输送装置、供种装置、精量分配器、输种管道、肥箱、种肥组合开沟装置和镇压辊等组成,如图 1 所示。

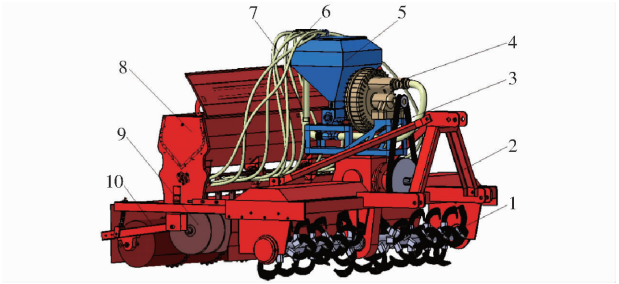


图 1 小麦电控气送式变量直播机结构图

Fig.1 Structure diagram of electric control air-assisted direct seeder for wheat

1.旋耕装置 2.主机架 3.风泵驱动装置 4.气流输送装置
5.供种装置 6.精量分配器 7.输种管道 8.肥箱 9.种肥组合开沟装置 10.镇压辊

直播机工作时,电动机直接驱动供种装置转动,均匀种子流与风泵产生的正压气流在料气室混合输送,经由增压管将种子输送至分配器,分配器再将统一的种子流按行分配,被分配的种子流经由输种管道播入开沟器开出的种沟内,完成播种的一个循环。

1.2 供种装置

小麦供种装置主要由种箱、供种壳体、充种室、充种调节板和供种机构等组成,如图 2a 所示。其中供种机构为核心工作部件,主要包括型孔轮、填充轮、隔板和传动轴等,如图 2b 所示。

供种装置工作区域包括充种区Ⅰ、携种区Ⅱ和供种区Ⅲ。工作时,种子箱里的小麦种子在重力作

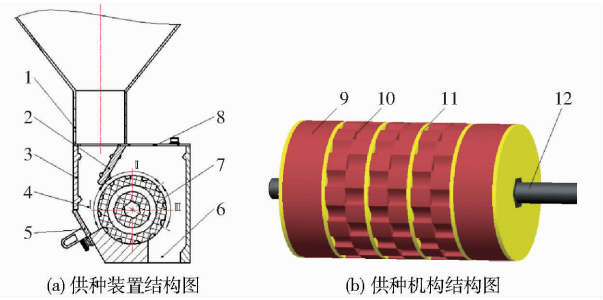


图 2 小麦供种装置

Fig. 2 Structure diagrams of seed feeding device for wheat
1. 种箱 2. 充种调节板 3. 供种壳体 4. 充种室 5. 卸种板
6. 供种口 7. 供种机构 8. 密封板 9. 填充轮 10. 型孔轮
11. 隔板 12. 传动轴

用下进入充种室,充种室内的种子在种群侧向压力和锯齿扰动携带作用下充入型孔,并随型孔一起转动,通过控制充种调节板与供种机构的间隙,保证精量充填概率。携有小麦种子的型孔运动至投种区时,种子在重力和离心力共同作用下经供种口进入料气混合室,完成精量供种。

以工作幅宽为 2 200 mm 的直播机中的小麦供种装置为研究对象,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 小麦供种装置主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of seed feeding device for wheat

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	500×500×594
供种轮数	1~5(可选)
供种机构转速/(r·min ⁻¹)	10~100
播种量/(kg·hm ⁻²)	150~450
工作速度/(km·h ⁻¹)	3~10(可调)
行数	10~12(可选)
行距/mm	170~200(可调)

2 关键部件设计与参数分析

2.1 型孔轮直径

型孔轮显著影响小麦精量供种效果,其直径是确定型孔数、型孔轮线速度和种子惯性离心力等参数的依据。由小麦供种装置可提供播量与种植农艺所需播量可知

$$\begin{cases} Q_x = \frac{Bv_m}{ab} \\ Q_s = \frac{MNZ\lambda n}{60} \end{cases} \quad (1)$$

式中 Q_x ——农艺要求小麦播量,粒/s
 B ——直播机工作幅宽,m
 v_m ——直播机前进速度,m/s
 a ——直播行距,m
 b ——直播粒距,m

Q_s ——供种装置播量,粒/s
 M ——供种装置个数
 N ——型孔轮个数
 Z ——单个型孔轮径向型孔数
 λ ——单个型孔充入种子数
 n ——型孔轮转速,r/min

小麦供种装置提供播量与小麦种植农艺要求播量一致,由式(1)得

$$Z = \frac{60Bv_m}{abMN\lambda n} \quad (2)$$

由式(2)可知,当播种幅宽、行距、株距和机组前进速度一定时,单个型孔轮径向型孔数与型孔轮转速成反比,当转速超过一定范围可通过增加型孔轮数降低转速。满足小麦种植农艺要求时,型孔轮直径不宜过大与过小:型孔轮直径适当增大,径向型孔数增加,可适当降低转速提高充种时间,改善充种性能,但相同转速时型孔轮直径过大种子线速度显著增加,为避免投种时种子与供种壳体碰撞,以致供种装置整体尺寸增大;型孔轮直径过小,型孔数减少,转速增加以致充种时间较短,供种性能显著下降。根据前期研究型孔充种时间与型孔轮直径大小无关,现用于直播小麦的传统外槽轮直径一般为 50~80 mm,考虑供种装置整体设计,本文设计的型孔轮直径为 65 mm。

2.2 型孔设计

小麦种子呈椭球体、流动性差,以致“平躺”、“侧卧”和“竖立”充入型孔种子姿态存在随机性^[12,14-15]。理论分析表明,种子充入型孔的姿态概率与其截面面积成正比^[16],即

$$\begin{cases} \frac{W_P}{W_C} = \frac{S_P}{S_C} \\ \frac{W_P}{W_L} = \frac{S_P}{S_L} \\ \frac{W_L}{W_C} = \frac{S_L}{S_C} \end{cases} \quad (3)$$

式中 W_P ——种子平躺姿态概率,%
 W_C ——种子侧卧姿态概率,%
 W_L ——种子竖立姿态概率,%
 S_P ——种子平躺姿态截面积,mm²
 S_C ——种子侧卧姿态截面积,mm²
 S_L ——种子竖立姿态截面积,mm²

种子充入型孔的姿态为完全随机独立事件,其概率总和为

$$W_P + W_C + W_L = 100\% \quad (4)$$

联立式(3)和式(4),得

$$\begin{cases} W_p = \frac{S_p}{S_p + S_c + S_L} \times 100\% \\ W_c = \frac{S_c W_p}{S_p} \times 100\% \\ W_L = \frac{S_L W_p}{S_p} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

小麦 3 种姿态截面近似椭圆形,其截面积为

$$\begin{cases} S_p = \frac{\pi}{4}lw \\ S_c = \frac{\pi}{4}lt \\ S_L = \frac{\pi}{4}tw \end{cases} \quad (6)$$

式中 l ——小麦种子长度,mm
 w ——小麦种子宽度,mm
 t ——小麦种子厚度,mm

随机选取淮北平原 3 个常规品种 100 粒种子,测定其三轴尺寸,结合式(5)和式(6)计算出种子充入型孔的姿态概率,见表 2。

表 2 小麦种子三轴尺寸与姿态概率

Tab.2 Triaxial size and postural probability of wheat seeds

品种	长度/ mm	宽度/ mm	厚度/ mm	平躺姿 态概 率/%	侧卧姿 态概 率/%	竖立姿 态概 率/%	平躺侧 卧概率 和/%
				率/%	率/%	率/%	和/%
百农 207	6.46	3.62	3.22	42	37	21	79
皖麦 68	6.46	3.24	2.90	43	38	19	81
济麦 22	6.35	3.37	3.10	42	39	19	81

根据表 2 可知,小麦种子“平躺”与“侧卧”姿态概率之和约 80%,其在充种区主要依靠自重以平躺与侧卧的姿态充入型孔。小麦种子球形度低、流动性差且易产生“卡种”现象,已有研究表明,对颗粒流扰动可显著提高充种性能^[17-19],而传统外槽式型孔易产生脉动现象,降低供种均匀性^[20]。为改善种子流连续充种与投种性能,避免投种环节“卡种”,兼顾简化供种装置结构,结合已有研究基础^[14-15,21],本文设计了易于种子“平躺”与“侧卧”姿态充种与投种的抛物线形型孔,其截面形状如图 3 所示。

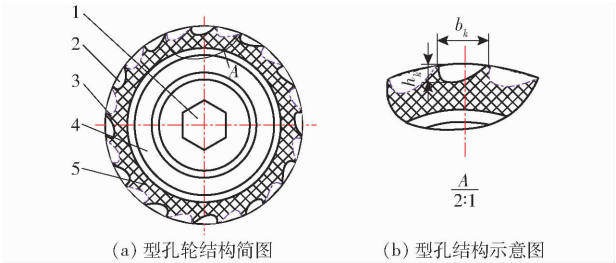


图 3 小麦型孔轮结构简图

Fig.3 Structure diagrams of cell wheel for wheat

1. 轴孔 2. 型孔 3. 锯齿 4. 减重孔 5. 型孔支撑体

为使 2 粒最大小麦种子以“平躺”或“侧卧”姿态充入型孔且确保单个型孔至少充入 3 粒种子,同时便于种子在供种区顺利从型孔中投出,根据已有研究^[22],本文型孔长度 l_k 、型孔宽度 b_k 和型孔深度 h_k 分别为

$$\begin{cases} 1.2l_{\max} < l_k < 1.8l_{\max} \\ b_k = k_b w_{\max} \\ h_k = k_h w_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中 l_k ——型孔长度,mm
 $l_{\max}$ ——小麦种子最大长度,mm
 b_k ——型孔宽度,mm
 $w_{\max}$ ——小麦种子最大宽度,mm
 k_b ——宽度调整系数,取 1.3~2.0
 h_k ——型孔深度,mm
 k_h ——深度调整系数,取 0.7~1.1

根据表 2 中小麦种子三轴尺寸,确定型孔长度 l_k 为 10 mm,型孔宽度 b_k 为 7 mm,型孔深度 h_k 为 3 mm。

抛物线型孔可确保种子在型孔内以“平躺”或“侧卧”姿态流动,避免投种时存在“卡种现象”。为获取抛物线曲线,需结合抛物线特殊点位置坐标与型孔结构关键尺寸确定。如图 4a 所示,起始充种角 α 应小于卸种角 φ ,卸种角需大于小麦自然休止角 θ ,根据上述小麦品种获得小麦自然休止角 $\theta \leq 35^\circ$,由此设计起始充种角 $\alpha = 35^\circ$; β 为投种位置角,为简化供种装置结构和有效降低种子破损率,本文无增设护种装置,同时兼顾避免“卡种”以及减少种子投出与供种壳体碰撞,则设计投种位置角 $\beta = 40^\circ$ 。如图 4b 所示,建立以抛物线对称轴为 y 轴,抛物线底部切线为 x 轴的坐标系,便于求解。根据型孔宽度为 7 mm,最大深度为 3 mm,两切线夹角 ζ 与 α 、 β 的关系,可获得限制方程

$$\begin{cases} \left| \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{k(x_1 + x_2)^2}{4} - kx_1x_2 \right| = 3 \\ \sqrt{1 + k^2(x_1 + x_2)^2} \\ \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + k^2(x_2 - x_1)^2} = 7 \\ \arctan(2kx_1) + \arctan(2kx_2) = \frac{\xi\pi}{180} \\ \xi + \alpha = \gamma + \beta \\ b_k = \frac{\gamma\pi}{180}R \end{cases} \quad (8)$$

式中 k ——两焦点连线所在直线斜率
 x_1 、 x_2 ——两焦点对应横坐标值
 γ ——抛物线曲线两焦点分别与中心点连线所夹锐角,(°)

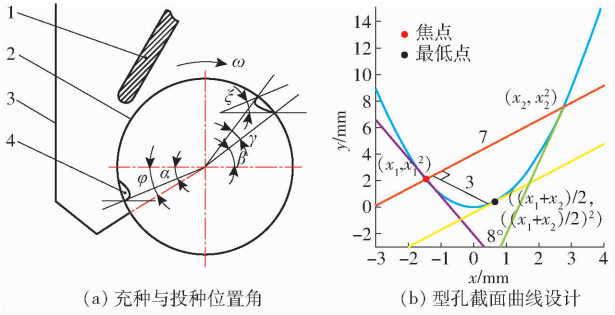


图 4 型孔截面形状曲线分析

Fig. 4 Curve analysis of section shape for type hole

1. 充种调节板 2. 型孔轮 3. 供种壳体 4. 型孔

由式(8)可得

$$\begin{cases} |k| |x_1 - x_2|^3 = 84 \\ \frac{2k(x_1 + x_2)}{1 - 4k^2x_1x_2} = \tan 8^\circ \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,型孔曲线设计不是唯一的, k 值越大型孔形状越细深, k 值越小型孔形状越粗浅,细深的型孔容易“卡种”,粗浅的型孔充种能力有限,为确保设计型孔可容纳不少于 3 粒种子且避免“卡种”现象,结合前期试验选取 $k = 1$ 可获得较好的充种和投种效果。令 $k = 1$,解得 $x_1 = -1.5402 \text{ mm}$, $x_2 = 2.8393 \text{ mm}$ 。由此,得出型孔曲线方程

$$y = x^2 \quad (x \in [-1.5402 \text{ mm}, 2.8393 \text{ mm}]) \quad (10)$$

2.3 型孔数量

供种轮采用抛物线形型孔交错布置方式,以改善外槽轮存在的脉动现象和提高小麦颗粒扰动性能。当供种轮直径确定时,适当增加型孔数,可提高小麦充种性能,故型孔间距应大于 1 倍型孔宽度且小于 2 倍型孔宽度,即

$$\begin{cases} ZT = \pi D_p \\ b_k < T < 2b_k \end{cases} \quad (11)$$

式中 T ——孔距,mm

D_p ——型孔轮直径,mm

由式(11)取整,得 $15 < Z < 29$ 。

为提高充种时间和确保加工精度,本文试验确定型孔数 Z 为 24,交错布置型孔对应中心角为 15° 。为满足淮北平原不同时期小麦播量,可通过供种轮数和供种转速调节。供种装置可一次布置 5 个供种轮同时供种,供种轮材料为 ABS 工程塑料,采用 3D 打印技术试制。

2.4 型孔锥角与极限供种转速分析

改善小麦种子充种性能是提高供种稳定性和适应变量播种的重要途径,进行充种过程分析对探究种子充填机理尤为重要^[23]。由于小麦种子在充种室内以散体颗粒形式连续运动,型孔随型孔轮转动可主动拾取多颗种子,以多颗种子充入型孔组成的

质点系为研究对象,假定种子为材质均匀的刚体,不考虑研究对象与种群间摩擦力及振动,受力分析如图 5 所示。根据质点系运动的法向和切向建立辅助坐标系,其受力方程为

$$\begin{cases} N_1 \cos \sigma = N_p \sin \alpha + F_f \sin \sigma + G \cos \alpha \\ F_l + G \sin \alpha \leq N_p \cos \alpha + F_f \cos \sigma + N_1 \sin \sigma \\ F_f = \mu N_1 \\ F_l = m \omega^2 R \\ G = mg \\ \omega = \frac{\pi n_p}{30} \end{cases} \quad (12)$$

式中 N_1 ——型孔侧壁对质点系支撑力,N
 N_p ——充种室内种群对质点系的侧压力,N
 F_f ——质点系与型孔侧壁间摩擦力,N
 F_l ——惯性离心力,N
 G ——质点系重力,N
 m ——质点系质量,kg
 σ ——型孔锥角, $(^\circ)$
 ω ——型孔轮角速度,rad/s
 R ——型孔轮半径,m
 μ ——种子与型孔轮接触表面摩擦因数,取 0.55^[24]
 n_p ——型孔轮工作转速,r/min

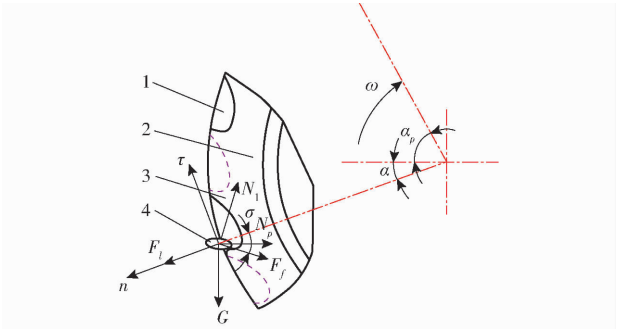


图 5 小麦充种过程力学分析简图

Fig. 5 Mechanics analysis diagram of seed-filling process

1. 型孔 2. 型孔支撑体 3. 锯齿 4. 种子

根据式(12)得出

$$\alpha \geq \arccos \frac{\omega^2 R a}{g \sqrt{1 + \mu^2}} - \arctan \frac{a}{b} \quad (13)$$

其中 $a = \cos \sigma - \mu \sin \sigma$ $b = \mu \cos \sigma + \sin \sigma$

由式(13)得知,起始充种角 α 与型孔锥角 σ 、小麦种子物料特性 μ 、型孔轮角速度 ω 、型孔轮直径等有关。当角速度确定时,起始充种角 α 与型孔锥角 σ 呈反比例变化;在起始充种角 α 相同时,型孔锥角 σ 与型孔轮角速度 ω 呈正相关。为确保充种区存量较少种子也能较好充入型孔,起始充种角 α 应小于等于卸种角 φ ,即 $\alpha \leq 35^\circ$,再结合供种机构设

计转速 10 ~ 100 r/min,可计算出型孔锥角 σ 范围为 8.02° ~ 50.42°。

前期试验观察,当型孔轮工作转速持续增加,充种区上部易发生“飞种”现象,将飞出型孔的种子视为质点系,以质点系脱离型孔后的临界为研究对象,此时该质点系受重力和惯性离心力作用,根据达朗贝尔原理建立受力方程

$$\begin{cases} G\sin\alpha_p = F_l \\ F_{l\max} = m\omega_p^2 R \\ \omega_p = \frac{\pi n_{pM}}{30} \end{cases} \quad (14)$$

式中 α_p ——最大充填角,(°)
 ω_p ——型孔轮极限角速度,rad/s
 n_{pM} ——极限供种转速,r/min
 $F_{l\max}$ ——最大惯性离心力,N

由式(14)可得

$$n_{pM} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g\sin\alpha_p}{R}} \quad (15)$$

根据上述结构设计并结合前期试验,该供种机构最大充填角 $\alpha_p \in [25^\circ, 45^\circ]$ 。为确保该供种装置工作稳定性,现取最大充填角的平均值,即 $\alpha_p = 35^\circ$,将其代入式(15),该小麦供种装置极限供种转速为 125.6 r/min。

3 供种性能试验

3.1 试验材料与设备

以淮北平原常用小麦品种百农 207 为试验材料,其千粒质量为 51.19 g,含水率为 8.07%。本试验在自行设计的主动供种试验平台上进行,如图 6 所示。



图 6 主动供种试验平台

Fig. 6 Test platform of seed feeding device

1. 种箱 2. 供种装置 3. 排种驱动电动机 4. 平台支架 5. 编码器控制电动机 6. 编码器 7. 排种控制器 8. 车速模拟控制器

3.2 试验设计与方法

为验证理论分析的合理性,进行了型孔锥角验证试验,型孔锥角分别为 10°、20°、30°、40°、50°,共

5 个梯度,工作转速 20、40、60 r/min 取 3 个梯度;供种装置工作性能试验,工作转速分别为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 r/min,共 10 个梯度,供种轮数量 1、2、3、4、5,共 5 个梯度;为满足淮北平原玉米秸秆覆盖下小麦在不同播期的供种量,开展了主动供种验证试验,供种装置提供的供种量分别为 150、225、300、375、450 kg/hm²,共 5 个梯度,机组前进速度分别为 3.8、5.1、6.3、7.8、8.6、9.8 km/h,共 6 个梯度。上述试验均以供种速率、供种速率稳定性变异系数和种子破损率为试验指标

参照 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》,开展供种装置性能试验。试验时,用量杯收集供种口排出的小麦种子,采集时间为 1 min,称量其净质量,再拾取出破碎损伤种子称量其质量,重复 6 次,计算出不同处理下的供种速率、供种速率稳定性变异系数和种子破损率

$$\begin{cases} m_v = \frac{\sum_{i=1}^j m_{vi}}{j} \\ C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{j-1} \sum_{i=1}^j (m_{vi} - m_v)^2}}{m_v} \times 100\% \\ P_z = \frac{m_p}{m_z} \times 100\% \end{cases} \quad (16)$$

式中 m_v ——平均供种速率,g/min
 m_{vi} ——第 i 次的供种速率,g/min
 j ——试验次数, $j=6$
 P_z ——种子破损率,%
 m_p ——破损种子质量,g
 m_z ——每个处理供种总质量,g
 C_v ——供种速率稳定性变异系数,%

3.3 试验结果与分析

3.3.1 型孔锥角验证试验结果分析

由表 3 可知,在转速为 20 ~ 60 r/min 条件下,小麦供种速率随倾角的增大呈先增加后减小趋势,变异系数随倾角的增大呈先降低后上升趋势,倾角为 40°抛物线型孔的供种稳定性较优,其稳定性变异系数小于 1.8%,该结果与型孔设计理论分析相吻合。试验中小麦种子破损率均低于 0.2%,采用抛物线型孔交错布置设计的供种机构完成充种、携种和供种 3 个过程,简化了供种环节。

3.3.2 主动供种性能结果分析

为明确小麦供种范围、适应主动供种要求,进行了型孔轮数量与转速对供种性能影响的试验,试验结果如表 4 所示。结果表明:小麦供种速率随型孔轮数目和转速增加呈上升趋势,其供种速率范围为

表 3 不同锥角的小麦供种性能
Tab.3 Seed feed performance for wheat at different cone angle

锥角/ (°)	转速/ (r·min ⁻¹)	性能参数		
		$m_v/(g\cdot min^{-1})$	$C_V/\%$	$P_z/\%$
10	20	42.94	4.58	0.18
	40	55.79	3.09	0.14
	60	57.85	3.44	0.16
20	20	52.23	4.13	0.12
	40	67.91	3.48	0.05
	60	68.56	4.49	0.09
30	20	55.87	2.28	0.11
	40	81.88	1.76	0.13
	60	105.08	2.43	0.17
40	20	77.03	1.79	0.10
	40	116.39	1.59	0.10
	60	149.81	0.95	0.10
50	20	70.45	3.33	0.08
	40	113.90	1.88	0.09
	60	142.25	2.41	0.09

30 ~ 1 500 g/min;供种速率稳定性变异系数随型孔轮数量增加呈下降趋势;工作转速在 10 ~ 100 r/min 内,其稳定性变异系数均小于 2.0%,种子破损率均不大于 0.2%。

3.3.3 主动供种试验验证

为提高供种能力、实现主动供种,以工作幅宽 2.2 m 直播机上安装 5 个抛物线型孔轮的供种机构获取的试验结果为例,以工作转速、机组前进速度为自变量,以单位面积播量为因变量,构建主动供种预测模型

$$\begin{cases} m_v = 140.27n + 121.12 \quad (R^2 = 0.9936) \\ m_s = \frac{3\,600m_v}{60 \times 1\,000} \\ t_b = \frac{10\,000}{3\,600Bv_m} \\ m_Q = m_s t_b \end{cases} \quad (17)$$

式中 m_s ——播种机单位时间播量,kg/h
 t_b ——播种机工作效率,h/hm²
 m_Q ——单位面积播种量,kg/hm²

由式(17)得出安装 5 个型孔轮的小麦供种量方程

$$m_Q = \frac{140.27n + 121.12}{13.2v_m} \quad (18)$$

结合式(18),为验证小麦供种装置主动供种的精确度,在相同车速下对播量进行测试,以步进电动机带动编码器旋转模拟播种机行驶,排种控制系统采集编码器模拟车速变化量,实时调节脉冲信号输出频率,控制步进排种电动机转速,测试过程如图 7 所示。

表 4 不同转速与型孔轮数量时的供种性能
Tab.4 Seed feeding performance for wheat at different sawtooth-hole units and rotational speeds

转速/ (r·min ⁻¹)	型孔轮数	性能参数		
		$m_v/(g\cdot min^{-1})$	$C_V/\%$	$P_z/\%$
10	1	39.01	1.73	0.03
	2	96.98	1.59	0.06
	3	137.89	1.65	0.08
	4	181.54	1.48	0.13
	5	215.71	0.76	0.14
20	1	65.44	1.04	0.07
	2	162.42	1.71	0.06
	3	239.38	1.92	0.11
	4	326.19	1.09	0.13
	5	404.10	0.51	0.07
30	1	93.22	0.94	0.06
	2	208.55	1.61	0.04
	3	334.02	1.38	0.08
	4	440.04	0.93	0.12
	5	550.17	0.69	0.09
40	1	102.99	0.96	0.05
	2	250.65	1.27	0.04
	3	418.05	1.16	0.09
	4	537.38	0.88	0.12
	5	670.69	0.39	0.08
50	1	119.59	0.97	0.07
	2	298.44	0.78	0.03
	3	501.37	0.89	0.08
	4	639.63	0.53	0.11
	5	860.15	0.28	0.09
60	1	127.13	1.22	0.08
	2	333.88	0.58	0.05
	3	531.07	0.83	0.10
	4	719.06	0.55	0.09
	5	977.42	0.44	0.14
70	1	141.49	1.78	0.07
	2	379.71	0.93	0.05
	3	619.42	0.66	0.09
	4	773.10	0.75	0.08
	5	1 139.65	0.45	0.17
80	1	153.45	1.79	0.14
	2	418.11	1.14	0.05
	3	692.57	1.82	0.08
	4	859.60	0.59	0.10
	5	1 283.64	0.31	0.17
90	1	153.94	1.59	0.05
	2	443.66	1.50	0.06
	3	751.86	1.74	0.08
	4	939.54	0.65	0.13
	5	1 349.33	0.09	0.19
100	1	174.72	1.79	0.07
	2	492.83	1.60	0.05
	3	794.61	1.64	0.12
	4	1 002.95	0.50	0.16
	5	1 475.39	0.27	0.20

匹配试验的动力选用约翰迪尔-854 型拖拉机。设定不同的机组前进速度和播种量,采集时间间隔 1 min,重复 6 次取平均值,结果如表 5 所

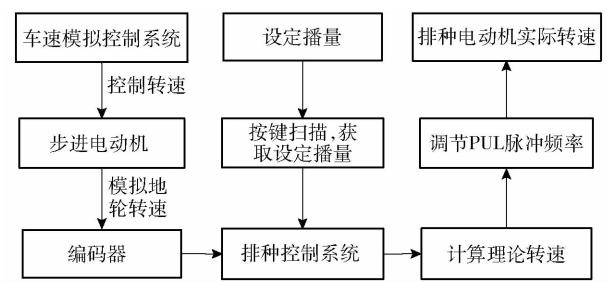


图 7 主动供种测试过程
Fig. 7 Test process of active sowing

示。试验表明,模拟机组前进速度不大于 9.8 km/h 时,供种轮式小麦供种装置主动供种较为准确,其稳定性变异系数均小于 2.0%,满足淮北平原变量播种需要。

表 5 主动供种匹配性能试验结果

Tab. 5 Matching test result of variable seed feeding			
机组前进速度/ (km·h ⁻¹)	供种量/ (kg·hm ⁻²)	性能参数	
		$m_v/(g\cdot min^{-1})$	$C_v/\%$
3.8	150	249.33	1.62
	225	360.85	1.01
	300	477.55	1.50
	375	582.59	1.42
	450	673.50	0.76
5.1	150	308.42	0.89
	225	456.36	1.31
	300	586.95	1.23
	375	701.13	1.25
	450	823.75	0.85
6.3	150	355.45	1.33
	225	507.54	1.43
	300	629.59	1.28
	375	737.47	0.62
	450	849.80	0.80
7.8	150	429.39	1.00
	225	590.33	1.01
	300	724.76	1.02
	375	853.49	1.50
	450	1 001.08	1.00
8.6	150	453.63	1.03
	225	617.12	1.42
	300	770.82	0.92
	375	919.85	0.86
	450	1 068.87	1.64
9.8	150	500.86	1.12
	225	672.49	1.62
	300	851.42	0.66
	375	1 016.64	0.42
	450	1 166.37	1.12

4 田间试验

为进一步验证该供种装置主动供种性能,于

2017 年 10 月 29 日在安徽省蒙城县秸秆还田正负效应实验示范区进行,田间试验如图 8a 所示,前茬作物为玉米,其秸秆覆盖量为 450 ~ 500 kg/hm²,试验以自行开发的小麦电控气送式变量直播机为平台,实际幅宽为 2 m,播种 10 行,行距 200 mm,型孔轮数目为 5,牵引动力为黄海金马 1304A-1 型拖拉机,机组前进速度为 6.1 km/h,根据农户需要试验播种量设定 300 kg/hm²。2018 年 3 月 9 日对小麦种植密度进行测定,苗情长势如图 8b 所示,每行选取 5 段,每段测量长度为 1 m,测定 10 行的小麦种植密度为 230 ~ 270 株/m²,其均匀性变异系数为 21.97%,满足 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机 技术条件》和小麦种植农艺要求。

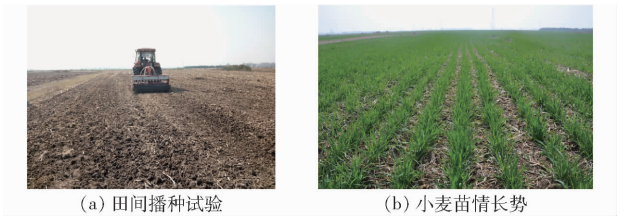


图 8 田间试验及苗情长势
Fig. 8 Field test and growing tendency of wheat

5 结论

- (1)设计了一种带有倾斜型孔轮的小麦精量供种装置,阐述了其结构组成和供种原理,确定了型孔和型孔轮关键结构参数。建立了型孔曲线限制方程,构建了小麦充种过程力学模型,确定了型孔锥角较优范围为 8.02° ~ 50.42°,型孔轮稳定工作极限供种转速应不大于 125.6 r/min。
- (2)台架试验表明:在工作转速 20 ~ 60 r/min 条件下,倾角为 40°抛物线型孔的供种稳定性较优,其供种速率稳定性变异系数小于 1.8%,种子破损率低于 0.2%;在型孔轮数量 1 ~ 5、工作转速 10 ~ 100 r/min 条件下,小麦供种速率随型孔轮数目和转速增加呈上升趋势,其供种速率范围为 30 ~ 1 500 g/min;供种速率稳定性变异系数随型孔轮数量增加呈下降趋势;工作转速为 10 ~ 100 r/min 条件下,其稳定性变异系数均小于 2.0%,种子破损率均不大于 0.2%。
- (3)以安装 5 个抛物线型孔轮供种机构建立单位面积播种量数学模型进行的主动供种匹配试验得出,模拟机组前进速度不大于 9.8 km/h 时,可实现较大范围的主动供种,其稳定性变异系数均小于 2.0%。该装置用于实际直播小麦种植密度为 230 ~ 270 株/m²,均匀性变异系数为 21.97%,满足淮北平原小麦播种需要。

参考文献

- 1 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011.
- 2 ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 87-96. (in Chinese)
- 3 郑侃,何进,王庆杰,等. 联合整地作业机具的研究现状[J]. 农机化研究,2016,38(1):257-263.
- 4 王晓燕,高焕文,李洪文,等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(3):66-69.
- 5 WANG Xiaoyan, GAO Huanwen, LI Hongwen, et al. Experimental study on runoff and erosion under conservative tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 66-69. (in Chinese)
- 6 王伟韦,朱存玺,陈黎卿,等. 玉米免耕播种机主动式秸秆移位防堵装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24):10-17.
- 7 WANG Weiwei, ZHU Cunxi, CHEN Liqing, et al. Design and experiment of active straw-removing anti-blocking device for maize no-tillage planter[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 10-17. (in Chinese)
- 8 KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng Res., 2000, 75(1): 81-95.
- 9 祁兵,张东兴,崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(18):8-15.
- 10 QI Bing, ZHANG Dongxing, CUI Tao. Design and experiment of centralized pneumatic seed metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese)
- 11 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216-220.
- 12 YANG Hui, LIU Lijing, ZHOU Junping, et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(12): 216-220. (in Chinese)
- 13 贾晶霞,常圣,张丽丽. 国内外气流输送式条播机研究进展[J]. 农业机械,2015(9):90-92.
- 14 常金丽,张晓辉. 2BQ-10型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136-141.
- 15 CHANG Jinli, ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)
- 16 刘立晶,刘忠军,杨学军,等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):54-57.
- 17 LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 54-57. (in Chinese)
- 18 赵晓顺,于华丽,张晋国,等. 槽缝气吸式小麦精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):48-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130210&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.010.
- 19 ZHAO Xiaoshun, YU Huali, ZHANG Jinguo, et al. Slot-type pneumatic precise wheat seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 48-51. (in Chinese)
- 20 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油菜兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10-18.
- 21 LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10-18. (in Chinese)
- 22 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油菜小麦兼用气送式集排器搅种装置设计及充种性能试验[J]. 农业工程学报,2016,32(18):26-34.
- 23 LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design of seed churning device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat and experiment on seed filling performance[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 26-34. (in Chinese)
- 24 张顺,夏俊芳,周勇,等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):11-19.
- 25 ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11-19. (in Chinese)
- 26 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等. 水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J]. 农业工程学报,2007,23(3):108-112.
- 27 LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108-112. (in Chinese)
- 28 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- 29 ANANTACHARA M, PRASANNA KUMAR B G V, GURUSWAMY T. Development of artificial neural network models for the performance prediction of an inclined plate seed metering device[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11: 3753-3763.
- 30 丛锦玲,余佳佳,曹秀英,等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(1):46-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008.
- 31 CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46-52. (in Chinese)
- 32 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2017,33(23):15-23.
- 33 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)
- 34 王永梅,杨宛章,王希贵. 螺旋槽轮式排种器的研究[J]. 新疆农业大学学报,2006,29(1):67-70.
- 35 WANG Yongmei, YANG Wanzhang, WANG Xigui. Study on row sowing device with spiral sheave[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(1): 67-70. (in Chinese)
- 36 曹成茂,秦宽,王安民,等. 水稻直播机气吹辅助匀轮式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010.
- 37 CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66-72. (in Chinese)
- 38 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 39 李兆东,李姗姗,曹秀英,等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):17-25.
- 40 LI Zhaodong, LI Shanshan, CAO Xiuying, et al. Seeding performance experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 17-25. (in Chinese)
- 41 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.