doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.006

油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验

王　磊[1,2]　席日晶[1,2]　廖宜涛[1,2]　张青松[1,2]　林　翩[1,2]　廖庆喜[1,2]
(1.华中农业大学工学院,武汉 430070;2.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070)

摘要:针对油麦兼用型气送式免耕播种机宽幅播种时各行排量一致性受地表坡度变化影响的问题,设计了一种利用输送气流驱动转动、安装于分配装置的匀种涡轮,分析了匀种涡轮进口工作角和出口工作角对输送气流速度的影响,确定了影响 3 种匀种涡轮工作特性的关键参数。应用 CFD 仿真中的 6 自由度动网格模型及台架试验,对比分析 3 种匀种涡轮对输送气流分布及匀种涡轮转速的影响,结果表明:进口工作角和出口工作角均为锐角的匀种涡轮可提高种子的输送及搅拌性能。选择叶片数量为 4、6、8、10 的匀种涡轮进行了分配装置内流场分布仿真试验,结果表明,增加匀种涡轮叶片数量可提高匀种涡轮出口处输送气流分布的稳定及均匀性。利用智能种植机械测试平台模拟田间作业不同地表坡度时,安装不同数量叶片的匀种涡轮对各行排量一致性的影响,结果表明:转速为20 ~ 50 r/min,沿播种机作业方向的前后与侧向单向组合摆动、前后与侧向往复组合摆动角相对平整地表在 -5° ~5°变化,叶片数量为 8 时,油菜及小麦各行排量一致性变异系数最小,分别为 4.99% ~ 5.82% 和 3.85% ~ 4.92%;前后与侧向单向组合摆动角绝对值为 5°时,叶片数量为 8 的匀种涡轮比无匀种涡轮排种油菜和小麦时各行排量一致性变异系数分别降低 7.53、11.98 个百分点,满足地表坡度变化时油菜及小麦的排种要求。

关键词:油麦兼用型免耕播种机;气送式集排器;分配装置;匀种涡轮;地表坡度
中图分类号:S223.2⁺3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)08-0062-11　　**OSID**:

Design and Test on Even Seeding Turbine of Air-assisted Centralized Metering Device for Rapeseed and Wheat

WANG Lei[1,2]　XI Rijing[1,2]　LIAO Yitao[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]　LIN Pian[1,2]　LIAO Qingxi[1,2]
(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Considering the problem that the each seeding quantity consistency variability of air-assisted no-tillage planter for rapeseed and wheat is affected by the change of land slope, a prototype of even seeding turbine which was suitable for distributor device driven rotation by conveying airflow was developed. The influence law of inlet and outlet working angles of even seeding turbine on the velocity of conveying airflow were analyzed. The key parameters affecting the working characteristics of three kinds of even seeding turbine were determined. The effects of three kinds of even seeding turbine on the distribution of conveying airflow and the rotating speed of even seeding turbine were compared and analyzed by using the dynamic mesh model in CFD simulation and bench test. The simulation results showed that the even seeding turbine with acute inlet and outlet working angles could improve the transportation and mixing performance of seeds. The effect of even seeding turbine with 4, 6, 8 and 10 impellers on the airflow field distribution in the distributor device was carried out. The simulation results indicated that with the increase of the number of impeller, the stability and uniformity of the airflow distribution at the outlet of the even seeding turbine could be improved. The intelligent test platform for planting machines was used to simulate the effect of even seeding turbine with different numbers of impeller on the each seeding quantity consistency variability in field operation with different land slopes. The bench test results indicated that when the rotating speed was 20 ~ 50 r/min, the swing angle in one-

收稿日期:2020 - 09 - 17　修回日期:2020 - 10 - 15
基金项目:国家自然科学基金项目(51875229)、财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系项目(CARS - 12)和湖北省科技厅农业科技创新行动项目
作者简介:王磊(1988—),男,博士后,主要从事油菜播种技术与装备研究,E-mail:wangchong12356@126.com
通信作者:廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

way combination of the front or rear, and lateral, the reciprocating swing combination of front or rear, and lateral along the operation direction of the planter was relatively flat, the land surface was changed from −5° to 5°, and the number of impeller was 8, rapeseed and wheat had the lowest consistency variation coefficient of each seeding quantity. The consistency variation coefficient of each seeding quantity of rapeseed and wheat were 4.99% ~5.82% and 3.85% ~4.92%, respectively. When the swing angle in one-way combination of the front or rear, and lateral was 5°, the consistency variation coefficient of each seeding quantity of even seeding turbine with 8 impellers was 7.53 and 11.98 percentage points lower than that of non impeller as seeding rapeseed and wheat. It could meet the requirements of rapeseed and wheat seeding when the land slope was changed.

Key words: no-tillage planter for rapeseed and wheat; air-assisted centralized metering device; distributor device; even seeding turbine; land slope

0　引言

油菜和小麦是我国重要的油料和粮食作物[1-4]，在长江中下游稻油、稻麦轮作区[5]及新疆春油菜、春小麦等种植区[6-8]播种工序相似，播种机应用油麦兼用排种器可以提高机具利用率、降低机械化成本。集中气送式排种技术在国内外宽幅播种机上得到广泛研究和应用[9-10]，且适用于油麦兼用排种[11-12]。当作业幅宽较大时，受地表坡度影响播种机会侧向、前后倾斜和摆动，导致气送式集排器分配装置内的种子难以经导种口均匀随机地排出。根据地表坡度等级划分，油菜和小麦播种地表坡度为0°~5°[13]，随着播种机作业幅宽及作业速度的增大，排种速率逐渐增加，排种稳定性、各行排量一致性等性能指标对地表坡度变化更加敏感[14]。

为提高气送式集排器各行排量一致性，国内外学者进行了深入研究，设计了具有波纹状增压管的碗式分配装置、具有圆锥外盖和褶皱波纹管结构及具有倒锥形导流板结构的分配装置[15-17]，应用 CFD 仿真、DEM－CFD 耦合仿真，并结合台架试验分析了输送气流速度、种子质量浓度、种子体积浓度、排种口堵塞、输种管长度、排种量分布等对各行排量一致性的影响规律[18-19]，建立各结构和工作参数与各行排量一致性的数学模型[20]，确定了输种管和分配装置参数的较优组合。综上，现有研究主要针对静态地表下分配装置结构进行改进优化，而地表坡度变化对气送式集排器分配装置各行排量一致性的影响研究相对较少。

针对油麦兼用型气送式免耕播种机宽幅播种时各行排量一致性受地表坡度变化影响的问题，设计一种利用输送气流驱动转动、安装于分配装置的匀种涡轮。应用 CFD 仿真中的 6 自由度动网格模型仿真分析 3 种匀种涡轮的叶片结构对分配装置内输送气流的压力、速度分布及匀种涡轮转速的影响，研究地表坡度变化时匀种涡轮叶片数量对各行排量一致性的影响，为播种机分配装置结构改进提供参考。

1　总体结构与工作原理

1.1　总体结构

气送式排种系统主要由风机、种箱、供种装置、送料装置、分配装置、排种口、输种管等组成，结构如图 1 所示。

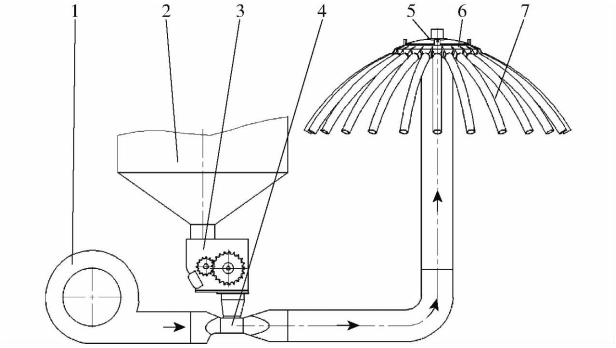

图 1　气送式排种系统结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of air-assisted metering system

1. 风机　2. 种箱　3. 供种装置　4. 送料装置　5. 分配装置　6. 排种口　7. 输种管

分配装置主要由送料管、导种口、下弧板、导流隔板、上弧板、匀种涡轮等组成，结构如图 2 所示。

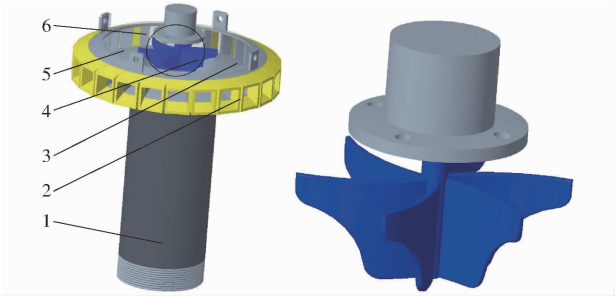

图 2　分配装置结构示意图

Fig. 2　Structural diagram of distributor device

1. 送料管　2. 导种口　3. 上弧板　4. 匀种涡轮　5. 下弧板　6. 导流隔板

1.2　工作过程及工作原理

播种作业时，油麦兼用型气送式免耕播种机受地表坡度影响会侧向及前后倾斜、摆动，倾斜及摆动角为 θ，种箱中的种子经供种装置进入送料装置与

输送气流混合,受气送式集排器倾斜、摆动状态影响,输送气流裹挟种子难以均匀分布于送料管中,当种子与输送气流进入分配装置主体内时,种子受自身重力作用,难以随机均匀从各导种口排出。分配装置安装匀种涡轮时,风机产生的输送气流驱动匀种涡轮转动,进入分配装置主体内的种子与输送气流两相流在匀种涡轮搅拌作用下,均匀散布到分配装置的各导种口中,提高了地表坡度变化时分配装置各行排量一致性。地表坡度变化时分配装置工作过程如图 3 所示。

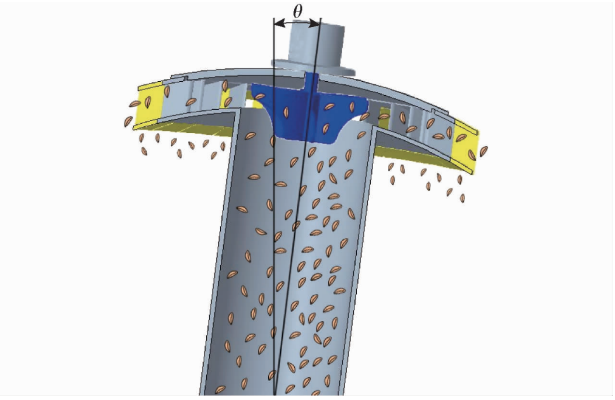

图 3 分配装置工作原理图

Fig. 3 Working principle sketch of distributor device

2 匀种涡轮设计

2.1 参数分析

叶片是匀种涡轮传递能量的主要部件,可将输送气流的能量转化为匀种涡轮叶片的转动。圆弧型叶片气流流动性好,搅拌种子与输送气流两相混合流时对叶片磨损小[21]。根据种子与输送气流在匀种涡轮中的运动关系,输送气流速度如图 4 所示。

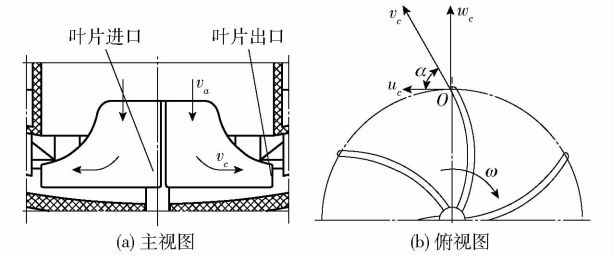

图 4 输送气流速度示意图

Fig. 4 Diagrams of velocity of conveying airflow

由图 4a 可知,输送气流由送料管经匀种涡轮扰动作用后压强损失为

$$p_h = p_1 + \frac{\rho_a v_a^2}{2} + \rho_a g Z_1 - p_2 - \frac{\rho_a v_c^2}{2} - \rho_a g Z_2 \quad (1)$$

式中 p_h——输送气流压强损失,Pa

p_1——送料管内输送气流压强,Pa

p_2——匀种涡轮内输送气流压强,Pa

v_a——送料管内输送气流速度,m/s

v_c——匀种涡轮内输送气流速度,m/s

Z_1——送料管末端中心距基准面的高度,m

Z_2——匀种涡轮中心距基准面的高度,m

ρ_a——输送气流密度,kg/m^3

g——重力加速度,m/s^2

由式(1)可知,输送气流由送料管进入匀种涡轮后,经匀种涡轮流出的压强损失与送料管内输送气流压强、匀种涡轮内输送气流压强、送料管内输送气流速度、匀种涡轮内输送气流速度相关。匀种涡轮由输送气流驱动转动实现搅拌种子功能,输送气流压强损失主要用于驱动匀种涡轮转动,种子、输送气流与匀种涡轮间的摩擦作用也产生了部分压强损失。

由图 4b 可知,匀种涡轮内输送气流速度可分解为驱动叶片转动的切向速度分量 u_c 及与输送种子速度相关的径向速度分量 w_c[22]。根据速度间的几何关系可知

$$\begin{cases} u_c = v_c \cos\alpha \\ w_c = v_c \sin\alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中 α——输送气流速度与切线速度分量间夹角,(°)

由式(2)可知,当输送气流速度与切线速度分量间夹角 α 在 0°~90°内逐渐增大时,切向速度分量 u_c 逐渐减小,径向速度 w_c 逐渐增大,当输送气流速度与切线速度分量间夹角 α 在 90°~180°内逐渐增大时,切向速度分量 u_c 逐渐增大,径向速度 w_c 逐渐减小。根据输送气流与匀种涡轮、种子间的作用关系,切向速度分量越大,则匀种涡轮转速越高,叶片对种子的搅拌效果越好,可提高具有坡度地表作业时各行排量一致性,但切向速度分量越大,径向速度分量越小,输送气流输送种子能力降低,易造成导种口内种子的滞留及堵塞,故输送气流速度与切线速度分量间夹角是决定匀种涡轮性能的关键。

2.2 叶片型线分析

匀种涡轮叶片型线影响输送气流的速度、压力,以及驱动匀种涡轮转动搅拌种子的效果,圆弧型叶片型线如图 5 所示。

由图 5 可知,叶片型线基圆方程为

$$x^2 + y^2 = r_c^2 \quad (3)$$

式中 r_c——叶片型线基圆半径,mm

x——叶片型线基圆上 x 轴坐标,mm

y——叶片型线基圆上 y 轴坐标,mm

叶片型线基圆与轮毂、叶轮直径间的位置关系决定叶片进口输送气流速度与切线速度分量间夹角 α_c 的取值范围。定义叶片进口输送气流速度与切线速度分量间夹角 α_c 为进口工作角,叶片出口输送气

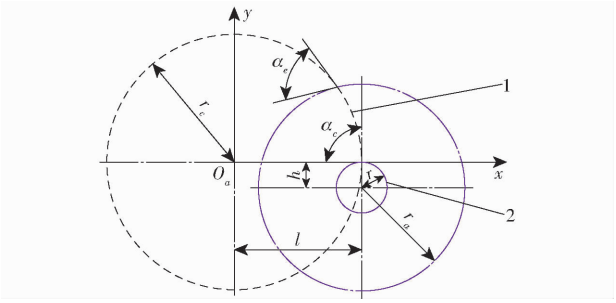

图 5　叶片型线坐标图

Fig. 5　Coordinate system diagram of impeller curve

1. 叶片型线　2. 轮毂

流速度与切线速度分量间夹角 α_e 为出口工作角。根据图 5 几何关系可得 α_c 为锐角或直角时，叶轮型线与轮毂、叶轮之间的关系式为

$$\begin{cases} r_c = l \\ h \leqslant r \end{cases} \tag{4}$$

式中　l——叶片型线基圆与轮毂在 x 轴方向距离，mm

h——叶片型线基圆与轮毂在 y 轴方向的距离，mm

r——轮毂半径，mm

由式(2)～(4)可知，当进口工作角 α_c 为锐角或直角时，叶片型线上除叶片进出口处，任一点输送气流速度与切线速度分量间夹角均为锐角，则输送气流切向速度分量与转动方向一致，有利于匀种涡轮的转动。

当进口工作角 α_c 为钝角时，叶轮型线与轮毂、叶轮之间的关系式为

$$\begin{cases} r_c = l \\ r < h < (r^2 + 2rr_c)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \tag{5}$$

由式(2)、(3)、(5)可知，当进口工作角 α_c 为钝角时，叶片型线上输送气流速度与切线速度分量间夹角由钝角至直角过渡到锐角，则输送气流切向速度分量及对匀种涡轮转动方向的作用随叶片型线上输送气流速度与切向速度分量间夹角变化而改变。

根据分配装置结构设计参数，送料管半径为 40.5 mm，为实现匀种涡轮有效搅拌种子，匀种涡轮直径应不小于送料管内径，综合考虑匀种涡轮叶片对气流和种子迁移轨迹的扰动，确定匀种涡轮半径 r_a 为 40.5 mm。匀种涡轮为 3D 打印结构，根据式(4)可知，轮毂半径越大，则 α_c 为锐角的范围越大，在满足结构强度的基础上应降低轮毂直径以提升叶片对种子的搅拌效果并减少种子与轮毂的碰撞，为避免采用 ABS 工程塑料 3D 打印的轮毂断裂，确定轮毂直径为 8 mm。

基于式(3)～(5)对叶片型线基圆的分析，结合进口工作角 α_c 及出口工作角 α_e 的范围对输送气流速度的影响，为实现匀种涡轮对种子有效搅拌并满足输送气流输送种子要求，参照涡轮叶片设计中叶片型线基圆半径应大于涡轮直径的原则[23]，确定叶片型线基圆半径为 50 mm。

根据输送气流与叶片作用关系，匀种涡轮转动方向与叶片上输送气流切向速度之和的方向相反，根据式(2)及匀种涡轮结构参数可得叶片上输送气流切向速度和计算式为

$$u_a = \sum_{r_i=8}^{r_a} v_c \cos\alpha \quad (r_i \leqslant r_a) \tag{6}$$

式中　u_a——叶片上输送气流切向速度和，m/s

r_i——叶片上任一点的径向半径，mm

由式(6)可得匀种涡轮理论转速为

$$n_c = -\sum_{r_i=8}^{r_a} \frac{v_c \cos\alpha}{2\pi r_i} \quad (r_i \leqslant r_a) \tag{7}$$

式中　n_c——匀种涡轮理论转速，r/min

由式(7)可知，匀种涡轮理论转速与输送气流速度、轮毂半径、匀种涡轮半径、叶片上输送气流速度与切线速度分量间夹角相关。当输送气流速度、轮毂半径、匀种涡轮半径确定时，匀种涡轮理论转速由控制叶片上输送气流速度与切线速度分量间夹角的进口工作角和出口工作角确定。

2.3　结构参数设计

为探究不同结构匀种涡轮对分配装置内流场及匀种涡轮转速的影响，根据叶片进口工作角 α_c、出口工作角 α_e 差异设计了 3 种匀种涡轮，如图 6 所示，Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮进口工作角 α_c 分别为锐角、直角、钝角。匀种涡轮主要技术参数如表 1 所示。

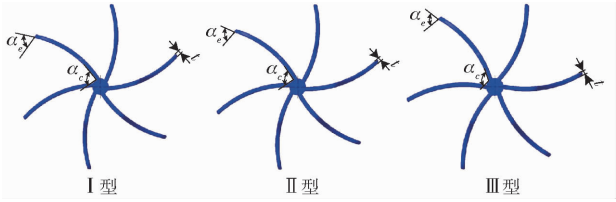

图 6　3 种结构匀种涡轮示意图

Fig. 6　Structural diagrams of even seeding turbine

表 1　匀种涡轮主要技术参数

Tab. 1　Main parameters of even seeding turbine

参数	数值/类型
匀种涡轮直径/mm	90
轮毂直径/mm	8
叶片型线基圆半径/mm	50
叶片厚度/mm	2
叶片数量	4～10
出口工作角类型	锐角

根据图 6 并结合式(2)可知，Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型

匀种涡轮均有利于叶片对种子的搅拌作用。根据匀种涡轮叶片类型与输送气流间作用特性，Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型叶片数量一般为偶数片[24]，叶片数量增加会提高匀种涡轮对种子的搅拌效果，也提高了种子与叶片碰撞导致的种子无序性，并增大了输送气流、种子与叶片摩擦引起的输送气流压力损耗，考虑匀种涡轮叶片与流场的作用效果，确定叶片数量不低于 4 片，综合考虑匀种涡轮对种子的搅拌作用并降低输送气流压强损耗，确定叶片数量为 4 ~ 10[25]。匀种涡轮叶片为 3D 打印加工制成，叶片厚度 t 应在满足结构强度的同时降低厚度以减少叶片与种子的碰撞及输送气流驱动叶片转动的压力损失，为避免叶片断裂，确定叶片厚度为 2 mm。

2.4 安装匀种涡轮分配装置的随机过程分析

以分配装置 1 min 各导种口排种质量为排种速率 V_p，得方程

$$V_p = V_p(t_p) \quad (t_p \in T_p) \tag{8}$$

式中 V_p——导种口排种速率，g/min

t_p——排种速率周期，s

T_p——n 段排种速率周期，s

根据式(8)，作业地表平整时，各导种口排种速率 V_p 不受排种周期 t_p 影响，排种速率 V_p 均为随机过程中的平稳过程。作业地表具有坡度时，基于对排种过程的分析可知，排种速率 V_p 随排种速率周期 t_p 变化，排种速率不再为随机平稳过程，破坏了分配装置排种随机平稳过程，降低了各行排量一致性。分配装置安装匀种涡轮时，通过匀种涡轮叶片搅拌种子与输送气流两相混合流，种子均匀散布至各导种口中，提高具有坡度地表的各行排量一致性，实现坡度地表作业时排种过程趋于随机平稳过程。

3 匀种涡轮结构对排种性能影响试验

3.1 流场仿真与分析

3.1.1 仿真方法

为对比分析未安装匀种涡轮及安装 3 种结构匀种涡轮对分配装置内输送气流速度、压力及匀种涡轮转速的影响，应用计算流体力学(CFD)仿真中的 6 自由度动网格模型分析流场变化得出较优的匀种涡轮结构[26]。综合考虑 3 种匀种涡轮结构参数，确定匀种涡轮叶片数量为 6。采用 ANSYS Fluent 19.0 软件开展 CFD 模拟仿真，利用 Workbench 19.0 的四面体非结构化方法自动划分分配装置和匀种涡轮网格，网格最小面尺寸为 8 mm，网格畸形度小于 0.67，设置送料管入口为输送气流入口，导种口为输送气流出口，参照油菜和小麦种子输送速度要求，设置送料管入口输送气流速度为 24 m/s[27]，匀种涡轮转动惯量为 3.38×10^{-3} kg·m^2，仿真时间为 8 s，应用 Fluent 输出匀种涡轮叶片出口处切向速度，仿真模型如图 7 所示。



图 7 匀种涡轮仿真模型

Fig. 7 Simulation model of even seeding turbine

3.1.2 结果分析

根据 Fluent 输出的叶片出口处切向速度计算得匀种涡轮转速如图 8 所示；CFD 仿真得出未安装匀种涡轮及安装 3 种结构匀种涡轮的分配装置内输送气流速度、压力分布、匀种涡轮截面输送气流速度分布如图 9 所示。

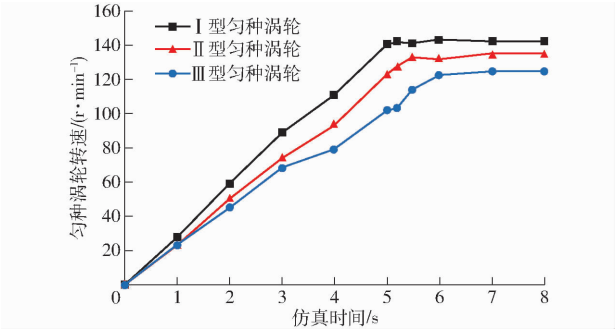

图 8 匀种涡轮转速仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of even seeding turbine rotating speed

由图 8 可知，3 种结构匀种涡轮转速随仿真时间的增加先逐渐增大后趋于稳定，是由于输送气流驱动匀种涡轮转动应先克服匀种涡轮的转动惯量。Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮的稳定转速分别为 142、135、124 r/min，Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮对种子的搅拌效果逐渐降低；根据 3 种匀种涡轮转速趋于稳定的时间可知，Ⅰ型匀种涡轮转速稳定的时间为仿真时间的第 5 秒，Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮转速稳定的时间分别为仿真时间的第 5.5、6 秒，综合匀种涡轮的稳定转速及转速稳定时间可知，Ⅰ型匀种涡轮更有利于搅拌种子。

导种口内输送气流速度的增加，可避免导种口内种子滞留及阻塞，根据图 9a 可知，安装Ⅰ型

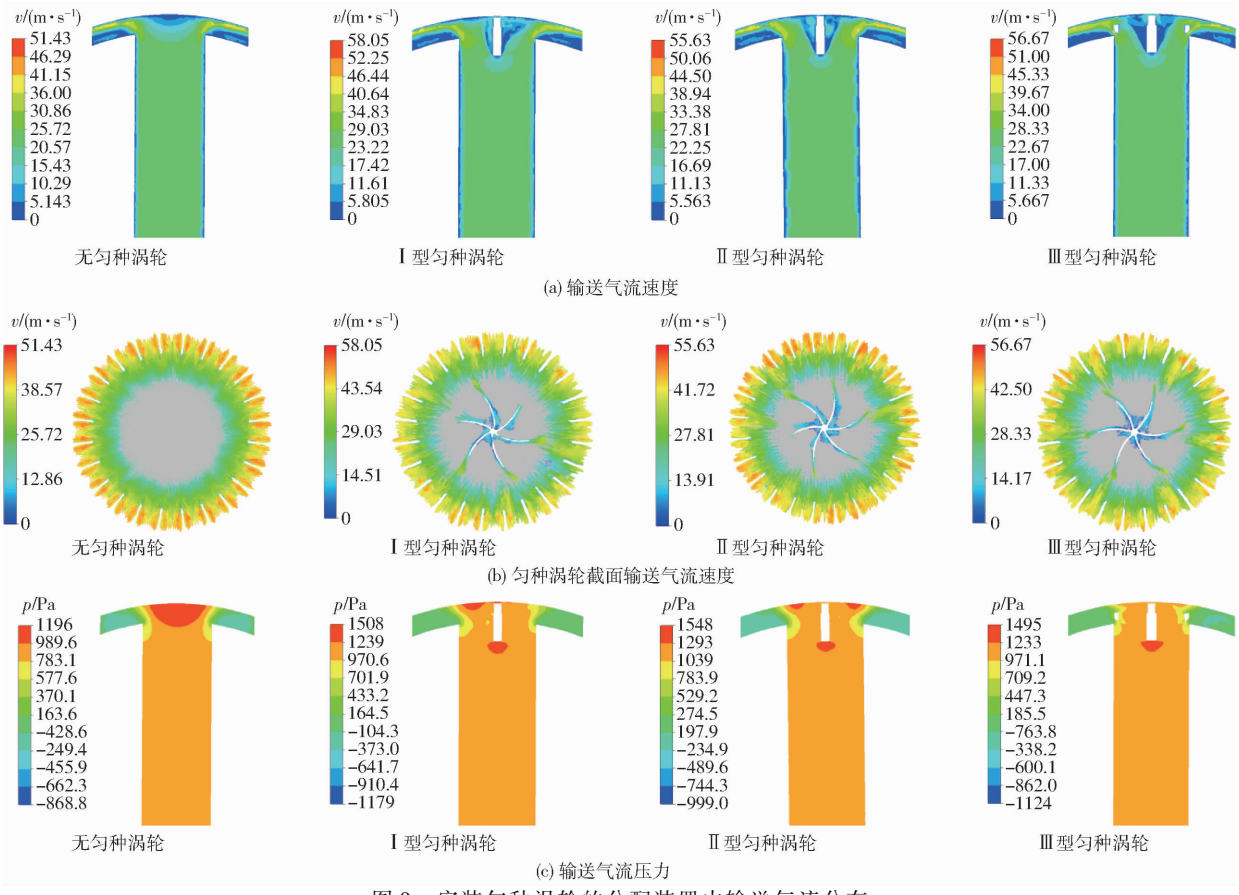

图 9　安装匀种涡轮的分配装置内输送气流分布

Fig. 9　Diagrams of conveying airflow distribution in distributor device installed even seeding turbine

匀种涡轮的供种装置内输送速度高于安装Ⅱ型、Ⅲ型及未安装匀种涡轮的供种装置，且Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型及未安装匀种涡轮对导种口内输送气流速度分布影响规律一致，则Ⅰ型匀种涡轮更有利于导种口内种子的输送。由图 9b 可知，3 种匀种涡轮叶片进口处输送气流速度较低，产生涡流区域，根据气送式排种特性，涡流区域会阻碍种子的有效输送，增加输送气流速度损耗并降低输送气流驱动匀种涡轮转动的效率，图 9b 中，Ⅰ型、Ⅱ型匀种涡轮涡流区域较小，Ⅲ型匀种涡轮涡流区域较大。由图 9c 可知，安装不同结构匀种涡轮的分配装置内输送气流压力分布规律与未安装匀种涡轮的分配装置内输送气流压力分布规律基本相同，且输送气流压力变化范围基本相同。

结合图 8、9 可知，Ⅰ型匀种涡轮稳定转速高于Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮，安装Ⅰ型匀种涡轮的供种装置导种口内输送气流速度大于安装Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮的供种装置，且Ⅰ型匀种涡轮进口处涡流区域较小。综上，安装Ⅰ型匀种涡轮的供种装置更利于种子的输送及搅拌。

3.2　验证试验

3.2.1　试验设备

为验证不同结构匀种涡轮对地表坡度工况的适应性，采用上弧板为 3D 打印透明材质的分配装置，以便于观测匀种涡轮的转动，利用智能种植机械测试平台开展未安装匀种涡轮分配装置及安装不同结构匀种涡轮分配装置对气送式集排器各行排量一致性影响对比试验，试验装置如图 10 所示。该平台通过液压系统控制实现沿播种机作业方向侧向、前后相对平整地表 −5°～5°范围任意组合倾斜、摆动，并可驱动风机及供种装置转动，以满足油菜及小麦排种过程中对输送气流速度、压力及种量要求。

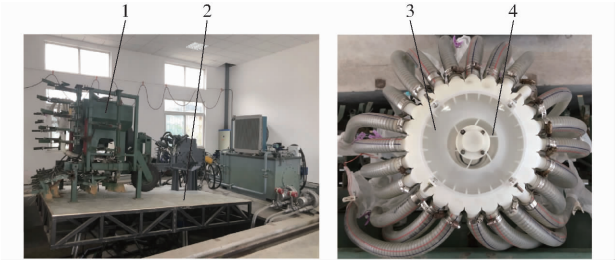

图 10　智能种植机械测试平台

Fig. 10　Intelligent test platform for planting machines

1. 油麦兼用型气送式免耕播种机　2. 测试平台　3. 分配装置　4. 匀种涡轮

3.2.2　试验方案

根据油麦兼用型气送式免耕播种机实际田间作业工况，导致气送式集排器分配装置各行排量差异

的原因是地表坡度引起的供种装置供种速率变化及分配装置内种子受自身重力影响难以均匀随机分配。播种机在不同地表坡度下的作业工况复杂,播种机主要为以下倾斜、摆动工况状态:①播种机沿地表上坡或下坡、侧向的摆动组合,随机变换角度(状态 1)。②播种机沿地表上坡、下坡、侧向的往复组合摆动(状态 2)。为更好地模拟实际田间播种动态作业工况下,匀种涡轮对提高各行排量一致性的效果,选取状态 2 开展试验,状态 2 简化为沿作业方向前后与侧向往复组合摆动。

试验选取油菜品种为华油杂 62,千粒质量为 4.67 g;小麦品种为郑麦 9023,千粒质量为 44.87 g。应用非接触式转速仪测定未排种的分配装置内匀种涡轮转速;试验中供种装置传动轴分别安装 4 个和 6 个交错排布型孔轮开展试验,用尼龙网袋收集分配装置 30 s 内各导种口的排种质量,计算供种装置安装 4 个和 6 个交错排布型孔轮的各行排量一致性变异系数平均值。

设置供种装置转速为 30 r/min[28],前后与侧向往复组合摆动试验水平为 -5°~5°、-4°~4°、-3°~3°、-2°~2°、-1°~1°,试验重复 5 次。

3.2.3 试验结果与分析

试验观测结果表明匀种涡轮均稳定转动,未排种时分配装置内Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮转速分别为 137、129、117 r/min,表明采用输送气流驱动匀种涡轮转动仿真试验结果合理可信。

图 11 为不同匀种涡轮结构的各行排量一致性变异系数。由图 11 可知,作业方向前后与侧向往复组合摆动角为 0°~10°时,安装Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮分配装置油菜各行排量一致性变异系数分别为 5.38%~6.37%、5.38%~6.92%、5.89%~7.51%,小麦各行排量一致性变异系数分别为 4.51%~5.21%、4.85%~6.25%、4.97%~6.98%,安装匀种涡轮分配装置各行排量一致性优于未安装匀种涡轮分配装置;沿作业方向前后与侧向往复组合摆动角相同时,安装Ⅰ型匀种涡轮分配装置的各行排量一致性优于安装Ⅱ型、Ⅲ型匀种涡轮的分配装置,表明开展安装涡轮分配装置内气流场分布规律仿真研究可行。

4 叶片数量对排种性能的影响试验

4.1 流场仿真与分析

4.1.1 仿真方法

为确定较优结构的Ⅰ型匀种涡轮叶片数量对匀种涡轮截面气流速度及气流场的影响,并减少叶片数量增加使匀种涡轮与种子碰撞、摩擦概率

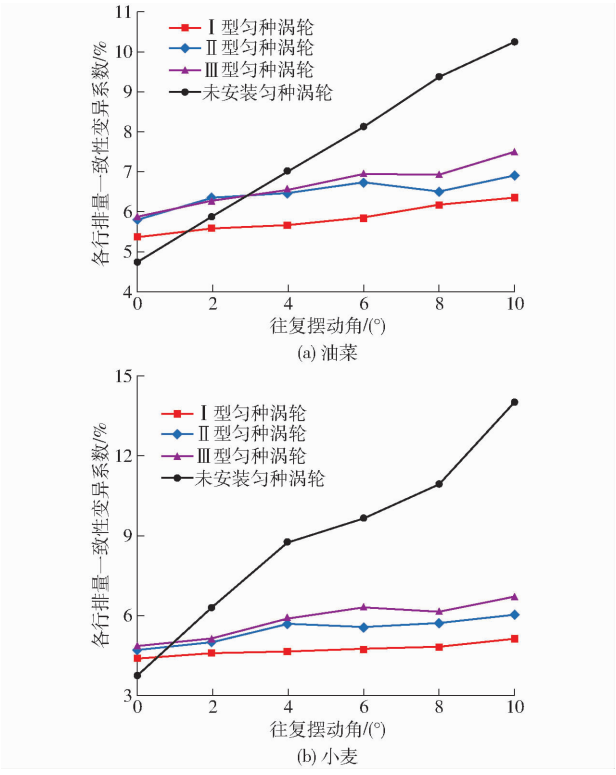

图 11 不同匀种涡轮结构的各行排量一致性变异系数

Fig. 11 Consistency variation coefficient of each seeding quantity under different even seeding turbine structure

增加导致的种子无序性,选择叶片数量为 4、6、8、10 的匀种涡轮开展模拟仿真,设置送料管入口输送气流速度为 24 m/s,根据匀种涡轮不同的叶片数量设置转动惯量,仿真时间为 8 s,试验结果如图 12 所示。

4.1.2 结果分析

由图 12a 可知,随匀种涡轮叶片数量的增加,输送气流越集中由匀种涡轮出口处进入导种口,输送气流输送种子时,种子主要在匀种涡轮出口处搅拌,匀种涡轮出口处叶片切向速度最大,易于种子被搅拌均匀;由图 12b、12c 可知,随匀种涡轮叶片数量的增加,分配装置内匀种涡轮截面出口处输送气流速度和压力分布更加均匀,匀种涡轮对气流的扰动效果更明显,匀种涡轮对种子连续搅拌作用更稳定,利于种子由导种口均匀排出;图 12c 中,分配装置内匀种涡轮截面处输送气流压力分布随匀种涡轮叶片数量的增加更趋于稳定,有利于输气流有效输送种子。由图 12 可知,匀种涡轮涡流生成区域主要在匀种涡轮进口处,对输送气流输送种子作用影响较小;匀种涡轮叶片数量的增加,可提高匀种涡轮出口处输送气流分布的均匀性,有利于种子搅拌后稳定输送,但叶片数量越多,输送气流、种子与叶片摩擦增大,且种子由送料管进入分配装置主体时与叶片碰撞概率增加,增大了种子的无序性,降低了各行排量一致

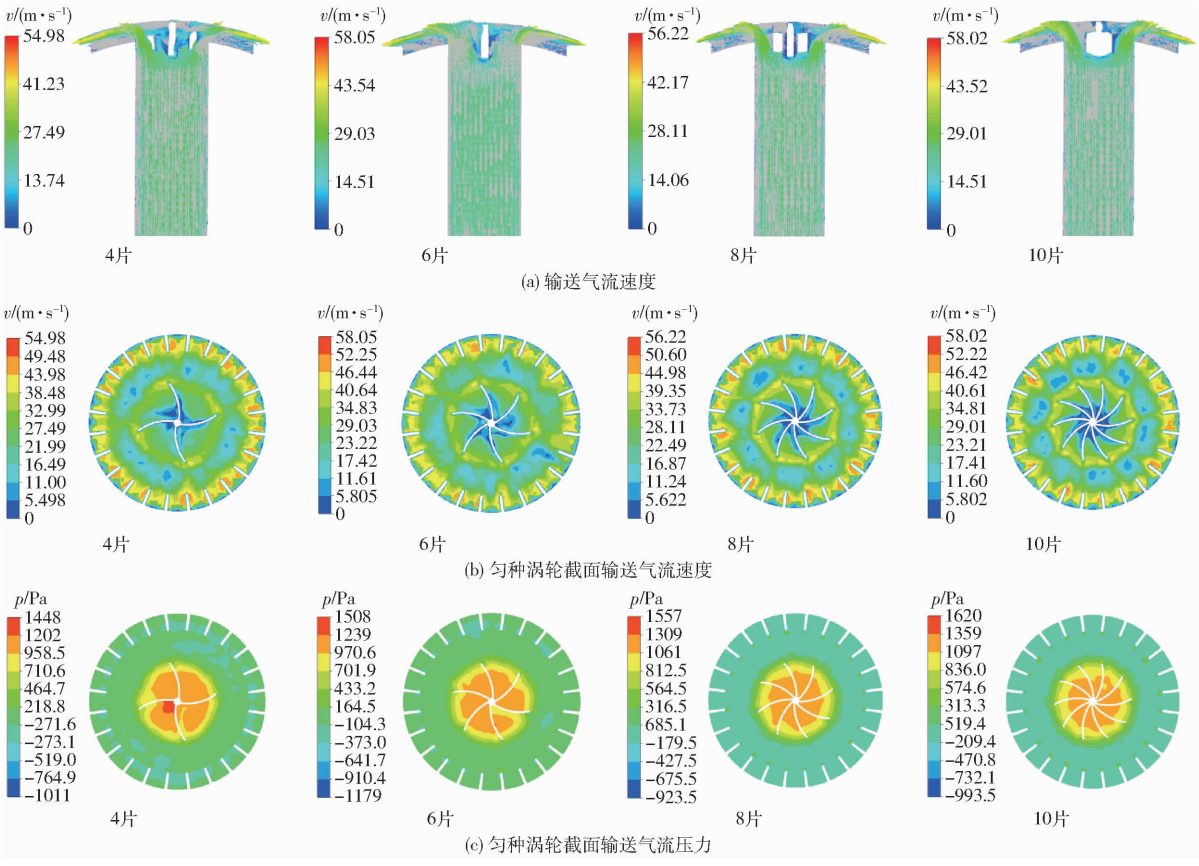

图 12　安装不同数量叶片匀种涡轮的分配装置内输送气流分布图

Fig. 12　Diagrams of conveying airflow distribution in distributor device installed different impeller numbers even seeding turbine

性，需开展台架验证试验确定叶片数量对输送气流和种子的影响。

4.2　验证试验

4.2.1　试验设备

为验证不同叶片数量的Ⅰ型匀种涡轮对不同地表坡度工况、不同种子排量的适应性，利用智能种植机械测试平台开展未安装匀种涡轮分配装置及安装不同叶片数量匀种涡轮的分配装置对气送式集排器各行排量一致性影响对比试验。

4.2.2　试验方案

选取状态 1 简化为沿作业方向前后与侧向单向组合摆动；状态 2 简化为沿作业方向前后与侧向往复组合摆动。

试验种子品种、匀种涡轮转速测定方式、供种装置型孔轮排布数量与匀种涡轮结构对排种性能影响验证试验相同。统计分配装置 30 s 内各导种口的排种质量及种子破损率。

沿作业方向前后与侧向单向组合摆动，与供种装置转速双因素试验中，供种装置转速为 20 ~ 50 r/min，每间隔 10 r/min 为一个水平，前后与侧向单向组合摆动试验水平为 −5° ~ 0°、−4° ~ 0°、−3° ~ 0°、−2° ~ 0°、−1° ~ 0°、0° ~ 1°、0° ~ 2°、0° ~ 3°、0° ~ 4°、0° ~ 5°，试验重复 5 次。

沿作业方向前后与侧向往复组合摆动，与供种装置转速双因素试验中，供种装置转速为 20 ~ 50 r/min，每间隔 10 r/min 为一个水平，前后、侧向往复组合摆动试验水平为 −5° ~ 5°、−4° ~ 4°、−3° ~ 3°、−2° ~ 2°、−1° ~ 1°，试验重复 5 次。

4.2.3　试验结果与分析

试验观测结果表明匀种涡轮均稳定转动，未排种时分配装置内匀种涡轮转速为 125 ~ 155 r/min，表明采用输送气流驱动匀种涡轮转动仿真试验结果合理可信。

图 13 为沿播种机作业方向前后与侧向单向组合摆动的各行排量一致性变异系数。由图 13 可知，未安装匀种涡轮时，随前后与侧向单向组合摆动角绝对值的增加，油菜各行排量一致性变异系数在 4.72% ~ 13.14% 内逐渐增大，小麦各行排量一致性变异系数在 3.74% ~ 16.82% 内逐渐增大，表明前后与侧向单向组合摆动对油菜和小麦各行排量一致性影响明显；前后与侧向单向组合摆动角相同时，油菜和小麦各行排量一致性变异系数随供种装置转速在 20 ~ 50 r/min 内增加而逐渐增大，表明排种速率越大，前后与侧向单向组合摆动对油菜和小麦各行

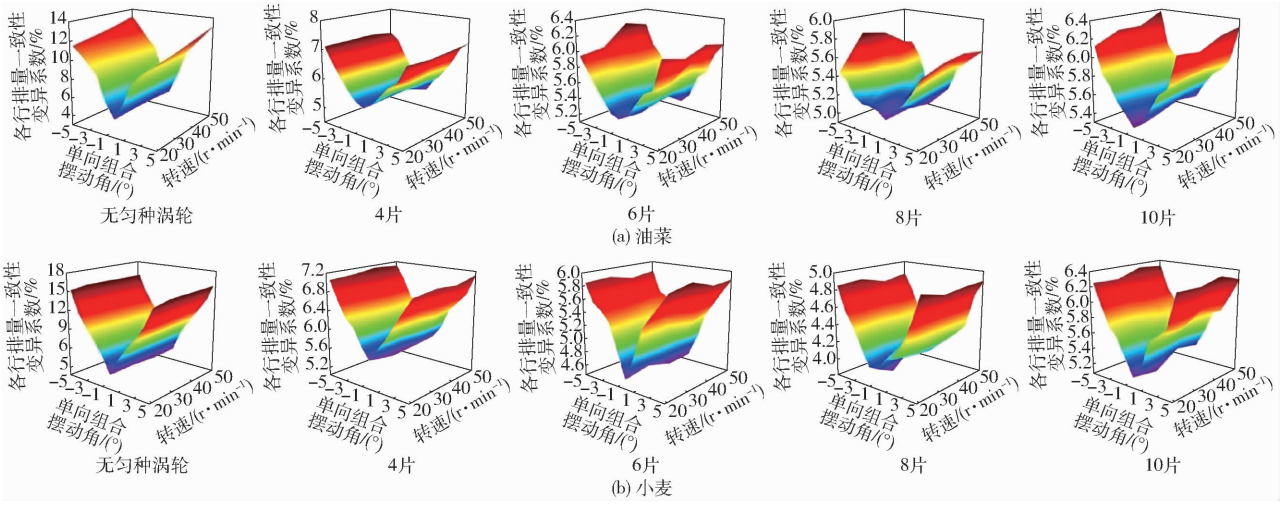

图 13 单向组合摆动角和供种装置转速对各行排量一致性变异系数的影响

Fig. 13 Effects of single combination swing and rotating speed of seed feeding device on consistency variation coefficient of each seeding quantity

排量一致性影响越明显;安装匀种涡轮时,前后与侧向单向组合摆动角、供种装置转速相同时,随匀种涡轮叶片数量增加,油菜和小麦各行排量一致性变异系数先逐渐减小后增大,匀种涡轮叶片数量为 8 时,油菜和小麦各行排量一致性变异系数最小,分别为 5.04% ~5.82% 和 3.85% ~4.92%;前后与侧向单向组合摆动角绝对值为 5°时,安装叶片数量为 8 的匀种涡轮比无匀种涡轮分配装置排种油菜和小麦时各行排量一致性变异系数分别降低 7.53、11.98 个百分点,表明安装匀种涡轮可有效提高沿作业方向前后与侧向单向组合摆动的各行排量一致性。

图 14 为沿播种机作业方向前后与侧向往复组合摆动的各行排量一致性变异系数。由图 14 可知,未安装匀种涡轮时,随前后与侧向往复组合摆动角的增加,油菜各行排量一致性变异系数在 4.72% ~10.82% 内逐渐增大,小麦各行排量一致性变异系数在 3.74% ~15.48% 内逐渐增大,表明前后与侧向往复组合摆动对油菜和小麦各行排量一致性影响明显;前后与侧向往复组合摆动角相同时,油菜和小麦各行排量一致性变异系数随供种装置转速在 20 ~50 r/min 内增加而逐渐增大,表明排种速率越大,前后与侧向往复组合摆动对油菜和小麦各行排量一致性影响越明显;安装匀种涡轮时,前后与侧向往复组合摆动角、供种装置转速相同时,随匀种涡轮叶片数量增加,油菜和小麦各行排量一致性变异系数先逐渐减小后增大,匀种涡轮叶片数量为 8 时,油菜和小麦各行排量一致性变异系数最小,分别为 4.99% ~5.42% 和 3.98% ~4.91%;前后与侧向往复组合摆动角为 10°时,安装叶片数量为 8 的匀种涡轮比无匀种涡轮分配装置排种油菜和小麦时各行排量一致性变异系数分别降低 6.06、10.67 个百分点,表明安装匀种涡轮可有效提高沿作业方向前后与侧向往复

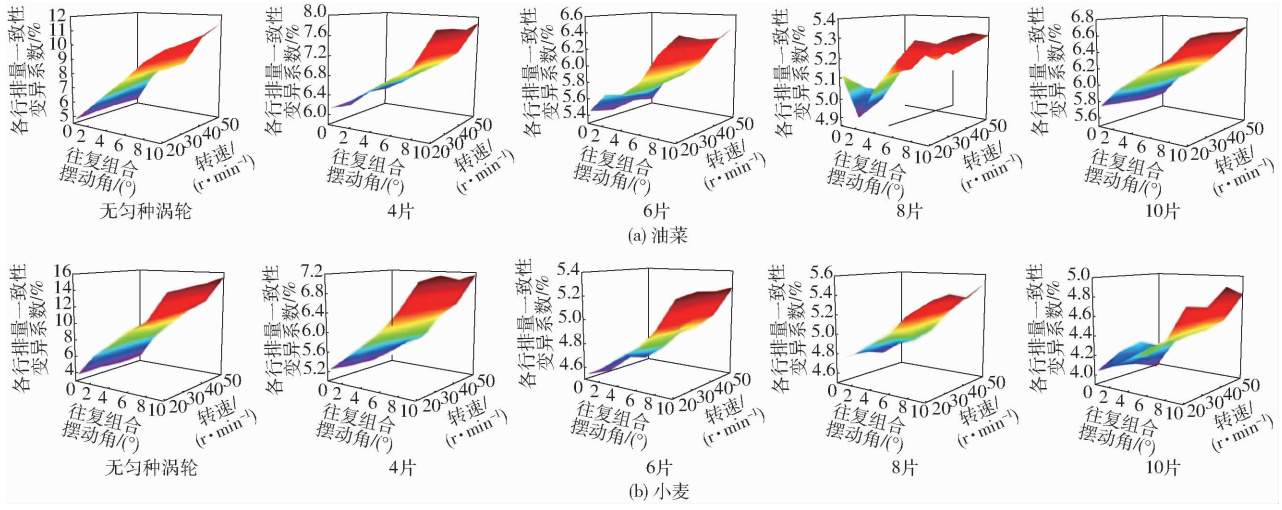

图 14 往复组合摆动角和转速对各行排量一致性变异系数的影响

Fig. 14 Effects of reciprocating combination swing and rotation speed of seed feeding device on consistency variation coefficient of each seeding quantity

组合摆动的各行排量一致性。

基于沿作业方向前后与侧向单向组合摆动、前后与侧向往复组合摆动和供种装置转速对排种性能影响双因素试验分析可知，无匀种涡轮分配装置油菜种子破损率为 0.02% ~0.04%，小麦种子破损率为 0.01% ~0.05%；安装匀种涡轮分配装置油菜种子破损率为 0.05% ~0.09%，小麦种子破损率为 0.03% ~0.07%，表明因匀种涡轮搅拌种子且与种子碰撞摩擦，增加了种子破损率。根据图 13、14 并结合叶片数量对分配装置流场影响分析，因沿作业方向前后与侧向往复组合摆动为前后与侧向单向组合摆动叠加而成，故沿作业方向前后与侧向往复组合摆动总体比前后与侧向单向组合摆动的各行排量一致性变异系数小；根据叶片数量对分配装置流场影响分析可知，匀种涡轮叶片数量的增加，可提高匀种涡轮出口处输送气流分布的均匀性，有利于种子搅拌后稳定输送，但匀种涡轮叶片数量的增加会增大种子由送料口至叶片进口处与叶片的碰撞，导致种子运动的无序性增加，且叶片数量越多，输送气流、种子与叶片摩擦增大，降低了匀种涡轮搅拌种子的效率，故前后与侧向单向组合摆动、前后与侧向往复组合摆动模拟试验中，随匀种涡轮叶片数量的增加，相同摆动状态下，油菜和小麦各行一致性变异系数先逐渐减小后增大，叶片数量为 4 ~8 时，叶片对气流场的影响为主导作用，叶片数量为 10 时，叶片与种子间的碰撞、摩擦为主动作用，综上，地表坡度为 0° ~5°，叶片数量为 8 时，供种装置转速为 20 ~50 r/min，供种装置传动轴分别安装 2、6 个交错排布型孔轮，可满足播种机作业速度为 6 ~12 km/h 的油菜和小麦排种量要求，表明安装匀种涡轮可有效实现地表坡度变化时油麦兼用型气送式免耕播种机不同排量的各行排量一致性的提高。

5　结论

（1）设计了一种利用输送气流驱动转动的匀种涡轮，应用计算流体力学（CFD）仿真中的 6 自由度动网格模型分析了 3 种不同进口工作角和出口工作角的匀种涡轮对分配装置内输送气流流场分布及匀种涡轮转速的影响，并利用台架试验验证匀种涡轮结构对排种性能的影响。仿真与台架试验表明，进口工作角和出口工作角均为锐角的Ⅰ型匀种涡轮有利于种子的输送及搅拌，安装Ⅰ型匀种涡轮分配装置的油菜及小麦各行排量一致性变异系数分别为 5.38% ~6.37% 和 4.51% ~5.21%。

（2）应用计算流体力学中的 6 自由度动网格模型分析了进口工作角和出口工作角均为锐角，叶片数量分别为 4、6、8、10 的分配装置内流场分布。输送气流速度及压力分布特性表明，增加匀种涡轮叶片数量可提高匀种涡轮出口处输送气流分布的稳定及均匀性，有利于种子搅拌后的稳定输送。

（3）利用智能种植机械测试平台进行了未安装匀种涡轮分配装置及安装不同数量叶片匀种涡轮的分配装置对各行排量一致性影响的对比试验，试验表明，相对平整地表，地表坡度为 0° ~5°、叶片数量为 8 时，油菜及小麦各行排量一致性变异系数最小，分别为 4.99% ~5.82% 和 3.85% ~4.92%；前后与侧向单向组合摆动角绝对值为 5°时，安装叶片数量为 8 的匀种涡轮比无匀种涡轮分配装置排种油菜和小麦时各行排量一致性变异系数分别降低 7.53、11.98 个百分点；前后与侧向往复组合摆动角度为 10°时，安装叶片数量为 8 的匀种涡轮比无匀种涡轮分配装置排种油菜和小麦时各行排量一致性变异系数分别降低 6.06、10.67 个百分点，其各行排量一致性变异系数明显比未安装匀种涡轮分配装置低。

参　考　文　献

[1] 谷晓博，李援农，杜娅丹，等. 施肥深度对冬油菜产量、根系分布和养分吸收的影响[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(6)：120 - 128，206.
GU Xiaobo，LI Yuannong，DU Yadan，et al. Effects of fertilization depth on yield，root distribution and nutrient uptake of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(6)：120 - 128，206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160616&flag = 1. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.016.（in Chinese）

[2] 卓拉，王伟，冯变变，等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(9)：264 - 271.
ZHUO La，WANG Wei，FENG Bianbian，et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(9)：264 - 271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190931&journal_id = jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.031.（in Chinese）

[3] WOJTKOWSKI M，PECEN J，HORABIK J，et al. Rapeseed impact against a flat surface：physical testing and DEM simulation with two contact models[J]. Powder Technology，2010，198(1)：61 - 68.

[4] SADDIQUE Q，LIU D L，WANG B，et al. Modelling future climate change impacts on winter wheat yield and wateruse：a case study in Guanzhong Plain，northwestern China[J]. European Journal of Agronomy，2020，119(9)：1 - 13.

[5] 丛日环，张智，鲁剑巍. 长江流域不同种植区气候因子对冬油菜产量的影响[J]. 中国油料作物学报，2019，41(6)：894 - 903.

CONG Rihuan, ZHANG Zhi, LU Jianwei. Climate impacts on yield of winter oilseed rape in different growth regions of the Yangtze River Basin[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2019, 41(6): 894 - 903. (in Chinese)

[6] 肖登攀,齐永青,王仁德,等. 1981—2009 年新疆小麦和玉米物候期与气候条件变化研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(6):189 - 194,202.
XIAO Dengpan, QI Yongqing, WANG Rende, et al. Changes in phenology and climatic conditions of wheat and maizein Xinjiang during 1981—2009[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 189 - 194, 202. (in Chinese)

[7] 李强,贾东海,顾元国,等. 新疆春油菜冬播对产量和品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(8):27 - 40.
LI Qiang, JIA Donghai, GU Yuanguo, et al. Effect of sowing before winter on the yield and quality of spring rapeseed in Xinjiang[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(8): 27 - 40. (in Chinese)

[8] 郎新婷,马惠兰. 新疆小麦生产效率及地区差异研究[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(10):127 - 133.
LANG Xinting, MA Huilan. Wheat production efficiency and region differences in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(10): 127 - 133. (in Chinese)

[9] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1 - 12.

[10] KEEP T, NOBLE S D. Optical flow profiling method for visualization and evaluation of flow disturbances in agricultural pneumatic conveyance systems[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 118(9): 159 - 166.

[11] 王磊,廖宜涛,张青松,等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):63 - 73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 63 - 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20191107&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.007. (in Chinese)

[12] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170901&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[13] 王磊,席日晶,廖宜涛,等. 地表坡度对油菜宽幅精量免耕播种机排种性能的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(7):11 - 21.
WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Effects of land slope on seeding performance of a broad width precision no-tillage planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 11 - 21. (in Chinese)

[14] 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.

[15] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150(6): 98 - 109.

[16] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 131(12): 29 - 39.

[17] 张晓辉,王永振,仉利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):59 - 67.
ZHANG Xiaohui, WANG Yongzhen, ZHANG Li, et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 59 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180307&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)

[18] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):55 - 64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):55 - 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20200606&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.006. (in Chinese)

[19] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9): 120 - 134.

[20] MUDARISOV S, BADRETDINOV I, RAKHIMOV Z. Numerical simulation of two-phase "Air-Seed" flow in the distribution system of the grain seeder[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2020, 168(1): 1 - 7.

[21] 郭广强,张人会,陈学炳,等. 低比转速离心叶轮的 POD 代理模型优化方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(7):50 - 55.
GUO Guangqiang, ZHANG Renhui, CHEN Xuebing, et al. Optimization method for low specific speed centrifugal impeller based on POD surrogate model[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019,47(7): 50 - 55. (in Chinese)

[22] 高筱钧,徐杨,贺小伟,等. 气送式高速玉米精量排种器导流涡轮设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):42 - 52.
GAO Xiaojun, XU Yang, HE Xiaowei, et al. Design and experiment of diversion turbine of air-assisted high speed maize precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 42 - 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191105&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.005. (in Chinese)

[23] 李庆宜. 小型风力机设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

(下转第 97 页)