

基于TRIZ-AD的振动辅助充种气吸式大豆精量排种装置设计

李世杰, 郭子熙, 刘诚伟, 覃方雄

广西师范大学职业技术师范学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年6月7日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

针对传统气吸式大豆排种器在高速作业时存在的充种性能差、气压依赖性高及品种适应性不强等问题, 研究提出一种集成创新设计方法, 将发明问题解决理论(TRIZ)与公理化设计(AD)相融合, 开展振动辅助充种气吸式大豆精量排种装置的设计。首先, 利用TRIZ九屏幕法对排种系统进行资源分析, 明确理想化目标与用户需求; 其次, 通过AD“之”字形映射构建功能-结构分解框架, 在设计矩阵识别出耦合问题后, 应用TRIZ的矛盾矩阵与发明原理进行解耦与方案求解。在关键部件设计中, 采用离散元与计算流体动力学(DEM-CFD)耦合仿真, 揭示振动激励下的种群运动规律与气流场分布特性, 并通过响应面法优化吸孔数量、工作负压与作业速度等核心参数。台架验证试验表明, 在吸孔数量为48个、负压为4.2 kPa、作业速度为8.5 km/h的最优参数组合下, 排种合格率达到94.9%, 相对误差仅为0.9%。该设计从方法论与结构层面为大豆精量播种装备的创新研发提供了新的思路与参考。

关键词

TRIZ, 公理化设计, 大豆, 气吸式排种器, 振动辅助充种, DEM-CFD耦合

Design of a Vibration-Assisted Seed-Filling Air-Suction Precision Seed-Metering Device for Soybean Based on TRIZ-AD

Shijie Li, Zixi Guo, Chengwei Liu, Fangxiong Qin

Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Received: June 7, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 15, 2026

文章引用: 李世杰, 郭子熙, 刘诚伟, 覃方雄. 基于 TRIZ-AD 的振动辅助充种气吸式大豆精量排种装置设计[J]. 农业科学, 2026, 16(7): 1047-1060. DOI: 10.12677/hjas.2026.167127

Abstract

To address the issues of poor seed-filling performance, high dependence on air pressure, and limited variety adaptability commonly encountered in traditional air-suction soybean seed-metering devices during high-speed operation, this study proposes an integrated innovative design methodology by fusing the Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ) with Axiomatic Design (AD) to develop a vibration-assisted seed-filling air-suction precision seed-metering device for soybean. Initially, the nine-screen method of TRIZ was employed to conduct a resource analysis of the metering system, thereby clarifying the idealization objectives and user requirements. Subsequently, a function-structure decomposition framework was established through the zigzagging mapping of AD; once coupling issues were identified in the design matrix, the contradiction matrix and inventive principles of TRIZ were applied for decoupling and solution generation, for the design of critical components, coupled discrete element method and computational fluid dynamics (DEM-CFD) simulations were carried out to reveal the seed population movement behavior under vibration excitation and the airflow field distribution characteristics. The core parameters, including the number of suction holes, working negative pressure, and operational speed, were optimized via the response surface methodology. Bench validation tests indicate that under the optimal parameter combination of 48 suction holes, a negative pressure of 4.2 kPa, and an operational speed of 8.5 km/h, the qualified seeding rate reaches 94.9%, with a relative error of merely 0.9%. The proposed design offers novel insights and references for the innovative development of soybean precision seeding equipment from both methodological and structural standpoints.

Keywords

TRIZ, Axiomatic Design, Soybean, Air-Suction Seed-Metering Device, Vibration-Assisted Seed Filling, DEM-CFD Coupling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大豆是我国重要的粮、油、饲兼用作物，2022 年全国种植面积已达 1027 万公顷，但自给率长期处于低位，提高大豆单产是保障国家粮食安全的关键[1]。播种作为全程机械化的核心环节，其质量直接影响出苗与产量。气吸式排种器因伤种率低、适应性强而被广泛应用于大豆等作物的精密播种[2]。然而，随着作业速度的提升，充种时间窗口被急剧压缩，传统排种器普遍面临漏播指数攀升、对高负压过度依赖及功耗过大等问题。特别是对于桂夏三号等扁椭圆形大豆种子，因其形态不规则、流动性差，在种群堆积状态下极易形成架拱与死区，更凸显了高速充种的结构性矛盾[3] [4]。

针对上述问题，国内外学者已开展大量研究，主要集中于吸孔形态优化、清种机构改良及气流场分析[5]-[7]，但多局限于单一结构的经验改进，缺乏从系统创新高度出发，将设计方法论、多物理场耦合仿真与参数优化深度融合的解决方案。公理化设计(AD)为产品设计提供了“用户域-功能域-结构域”的理性逻辑框架，但其在处理耦合问题时缺乏直接工具[8]。发明问题解决理论(TRIZ)则是一套基于技术进化规律的结构化创新方法，其矛盾矩阵、物场分析等工具擅长识别和解决工程冲突[9]-[11]。例如，郑娟等将 TRIZ-AD 集成用于油菜排种装置创新设计，成功简化了传动与供气系统[12]；侯炳华等结合 TRIZ

与 AD 设计了空心挂面盘条醒发装置,解决了柔性支撑与运动解耦难题[13]。这些研究证明了 TRIZ-AD 集成方法在农业与食品装备设计中的巨大潜力。

因此,本文在现有研究基础上,以桂夏三号大豆种子为作业对象,提出一种基于 TRIZ-AD 集成的振动辅助充种气吸式排种装置创新设计。该设计将振动激励主动引入充种区以改善种群流动性,并通过 TRIZ-AD 方法系统求解结构方案。进一步地,利用 DEM-CFD 耦合仿真与响应面优化试验,验证设计的科学性与合理性。本研究旨在为高速精密排种装置的设计提供方法论的指引与技术支持。

2. 基于 TRIZ-AD 的集成创新设计模型

2.1. TRIZ-AD 集成设计流程

TRIZ 与 AD 的结合,在功能与结构上具有天然的互补性[14][15]。参照优化设计流程[16][17],本文构建了面向排种装置的 TRIZ-AD 集成设计模型,如图 1 所示。其核心流程为:

问题定义与资源分析:运用 TRIZ 的九屏幕法分析排种系统的过去、现在和未来及超系统和子系统,明确问题发生的背景和可利用的资源,推导最终理想解,确立总功能要求。

功能-结构“之”字形映射:利用 AD 框架将总功能要求(FRs)逐步分解为子功能要求,并映射到对应的设计参数(DPs),构建设计矩阵。

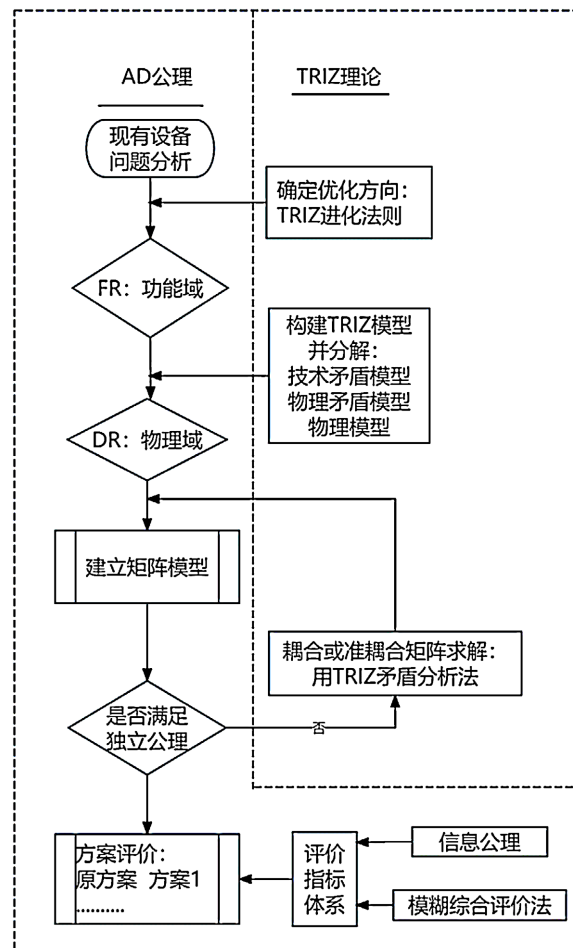


Figure 1. Optimization design process based on AD and TRIZ
图 1. 基于 AD 和 TRIZ 的优化设计流程

耦合识别与 TRIZ 解耦：判断设计矩阵的类型。若为非对角阵(准耦合或耦合)，则引入 TRIZ 的矛盾矩阵和发明原理，将耦合问题转化为标准工程参数冲突并加以解决，直至满足 AD 的独立公理。

方案评价与细化：利用信息公理对满足独立性的解耦方案进行评价。在关键设计参数的具体求解中，引入 CAE 仿真工具进行机理揭示和参数优化，完成方案定型。

2.2. 用户域分析与最终理想解

应用 TRIZ 的九屏幕法，以“高速精密排种系统”为当前系统，分析其子系统(排种盘、气室、种群)和超系统(播种机、田间环境、驾驶员)。分析表明，子系统中种群的静态堆积是阻碍种子向吸孔流动的根本原因；超系统的需求是向无人驾驶、智能变量作业进化。

由此，推导出排种装置的最终理想解：排种盘无需依赖高负压即可主动“捕捉”种子，无论作业速度如何变化，种子都能以流化状态有序地填充至每一个吸孔，且对任何形状的种子均无损伤。这为后续的功能分解指明了方向。

3. 振动辅助充种排种装置的 TRIZ-AD 设计

3.1. 功能域分解与设计矩阵构建

根据最终理想解，确立总功能要求 FR0：实现大豆种子的高速、低功耗、精密排种。运用 AD 的“之”字形映射，对 FR0 进行层次化分解。

3.2. 基于 AD 的功能域 - 结构域层次化分解

根据 AD 理论的自顶向下分解原则，将总功能要求 FR₀逐级展开，通过在功能域与结构域之间反复进行“之”字形映射，获得各层级的功能要求与设计参数。

3.2.1. 第一级分解

依据 AD 理论的自顶向下分解原则，对总功能要求 FR₀进行第一级分解，获得三项子功能要求及其对应的设计参数：FR₁为提供稳定的气力吸附与输送，映射至设计参数 DP₁ 环形气室与负压供气系统；FR₂为实现种子高效充填与单粒拾取，映射至 DP₂ 充种区与排种盘机构；FR₃为调节并优化种群供给状态，映射至 DP₃ 种群状态调节机构。

建立第一级设计方程：

$$\begin{bmatrix} \text{FR}_1 \\ \text{FR}_2 \\ \text{FR}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{X} & 0 & 0 \\ 0 & \text{X} & \text{X} \\ 0 & \text{X} & \text{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{DP}_1 \\ \text{DP}_2 \\ \text{DP}_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中，X 表示功能需求与设计参数之间存在关联关系。该矩阵的非对角元素不为零，表明 FR₂、FR₃ 与 DP₂、DP₃ 之间存在明显的功能耦合。具体而言，为实现高效充填，排种盘的结构设计(DP₂)与种群的供给状态(DP₃)相互影响、互为约束，这是整个设计过程中必须解决的核心矛盾。根据 AD 独立公理的要求，需对第二级进行更深层次的分解与解耦处理。

3.2.2. 第二级分解

为进一步识别功能耦合的内在根源，将 FR₂ 与 FR₃ 作更深层次的功能细化。其中，FR₂ 分解为三项子功能：FR₂₁ 为打破种群自然堆积状态，消除充种区架空现象；FR₂₂ 为精准吸附并稳定拖持单粒种子；FR₂₃ 为清除多余吸附的种子，确保单粒率。FR₃ 则分解为两项子功能：FR₃₁ 为调节并维持适宜的充种层宏观高度；FR₃₂ 为隔离种群对已吸附种子的力学干扰。

上述功能要求若直接映射至具体设计参数,将面临显著的物理矛盾。一方面,排种盘对种子的吸附作用要求充种区种子处于相对稳定的位置,以利于吸孔的精准捕获;另一方面,持续高效的充填又要求种子具有足够的流动性,以保障种群的及时补充。换言之,充种区种群需同时满足“静止稳定”与“流动活跃”这一对特性相反的需求,这正是 TRIZ 理论中典型物理矛盾的体现,即同一系统参数需呈现出相互排斥的属性特征。

3.3. 基于 TRIZ 的矛盾分析与解耦求解

3.3.1. 技术矛盾的标准化表述

将上述物理矛盾引发的工程问题,系统性地提炼为 TRIZ 理论中 39 个通用工程参数构成的标准技术矛盾[18]-[20]:

矛盾对一:改善参数“27-可靠性”(提高高速充种合格率)与恶化参数“22-能量损失”(增加负压导致功耗激增)。这一矛盾反映了性能提升与能源消耗之间的根本冲突。

矛盾对二:改善参数“31-物体产生的有害因素”(降低种子损伤与种群干扰),同时恶化参数“36-装置的复杂性”(需要增加额外机构来完成这一功能)。这一矛盾反映了功能增加与结构简化之间的制约关系。

矛盾对三:改善参数“35-适应性及多用性”(提升对不同品种大豆种子的适配能力),恶化参数“37-控制复杂度”(调节手段不应显著增加操作难度)。

3.3.2. 矛盾矩阵检索与发明原理选择

查阅阿奇舒勒矛盾矩阵,在各矛盾对的交叉单元中确定可用的发明原理[21][22]:

对于矛盾对一(27 vs. 22),矩阵推荐#10(预先作用)、#18(机械振动)、#35(参数变化)等原理。其中,#18 机械振动原理启示通过振动能量输入改变物质状态,#10 预先作用原理启示在吸附动作发生前对种群进行预处理。

对于矛盾对二(31 vs. 36),矩阵推荐#1(分割)、#24(中介物)、#15(动态化)等原理。其中,#1 分割原理启示将充种过程在空间上进行功能分区,#15 动态化原理启示赋予系统可变的动态特性以适应不同工况。

对于矛盾对三(35 vs. 37),矩阵推荐#15(动态化)、#28(机械系统的替代)等原理,启示采用可调的机械结构替代复杂的电子控制系统。

3.3.3. 解耦方案的综合与设计方程重构

综合上述发明原理的启示,形成层次化的解耦方案:

1) 空间分离方案(基于#1 分割原理):将充种过程物理分割为“种群活化区”和“单粒吸附区”两个功能区域。在活化区执行 DP₂₁:振动辅助充种装置,通过振动激励打破种群静态堆积;在吸附区由 DP₂₂:带弧形取种槽与导种槽的排种盘执行精确取种。

2) 动态化方案(基于#15 动态化、#18 机械振动、#10 预先作用):通过 DP₂₁ 对种群施加受控低频振动,使其由“准静态固体”向“微流化状态”转变。这一过程本质上是一种“预先作用”——在种子进入吸孔之前通过能量输入改善其运动状态,有效降低种间等效摩擦系数,同时实现 FR₂₁(打破堆积)和 FR₃₂(减少干扰)两个功能。振动频率与振幅的动态可调(#15)赋予装置对不同品种种子特性的适应能力。

3) 结构存储方案(基于#28 机械系统的替代、#35 参数变化):DP₃₁ 为安装于环形种室内的可调节挡片,通过纯机械结构实现充种层高度在 20~50 mm 范围内的灵活调节,无需引入电动执行器,以最低结构复杂度实现功能需求。

解耦后,重构第二级设计方程为上三角矩阵:

$$\begin{bmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{31} \\ FR_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ X & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{31} \\ DP_{32} \end{bmatrix} \quad (2)$$

该矩阵为上三角矩阵,即设计方案满足 AD 的独立公理要求,设计参数的确定可按照 DP_{21} 、 DP_{22} 、 DP_{31} 、 DP_{32} 的先后顺序依次进行,层次关系清晰,无反馈耦合。具体而言:首先确定振动辅助装置(DP_{21})的动力学参数,以打破种群静态堆积;在此基础上设计排种盘及取种槽结构(DP_{22}),使其适配流化状态下的种子捕获行为;继而确定可调节挡片(DP_{31})的高度调节范围,以匹配不同品种及作业条件下的充种需求;最后综合前三者,通过吸孔位置与取种槽深度的协同设计(DP_{32})实现对已吸附种子的隔离保护。

3.3.4. 最终设计参数矢量的确定

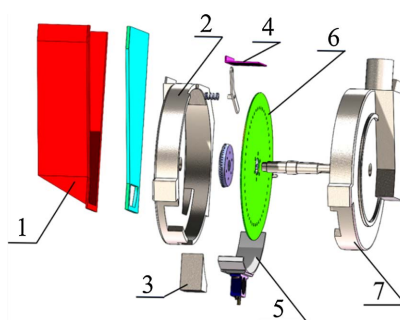
依据上述解耦方案,形成完整的设计参数矢量:

$$\{DP\} = \begin{cases} DP_{21}: \text{振动辅助充种装置(微型振动器,频率 } 20 \sim 60 \text{ Hz, 振幅 } 0.5 \sim 2 \text{ mm)} \\ DP_{22}: \text{带弧形取种槽的排种盘(48个椭圆形吸孔,长轴 } 5 \text{ mm, 短轴 } 3.5 \text{ mm)} \\ DP_{31}: \text{可调节挡片结构} \\ DP_{32}: \text{导种槽与取种槽协同结构} \end{cases}$$

4. 装置结构与关键部件参数设计

4.1. 整机结构及工作原理

根据上述解耦方案,设计完成的振动辅助充种气吸式排种器主要由种箱、环形种室、振动辅助充种装置、排种盘、环形连通气室、清种刀及传动轴等组成,如图 2 所示。其工作原理为:种子从种箱落入环形种室,通过可调节挡片设定适宜充种层高度。位于种室底部的微型振动器产生高频低幅振动,使充种区种子流态化。排种盘旋转时,流态化的种子在导种槽引导下顺畅进入取种槽,并被椭圆形吸孔在环形气室提供的均匀负压下稳定吸附。随后经过清种区清除多余种子,最后在投种区切断负压,种子在重力作用下精准落入种沟[23] [24]。



1. 种箱; 2. 排种器左壳体; 3. 节种支管; 4. 密封刷; 5. 振动辅助充种机构; 6. 排种盘; 7. 排种器右壳体

Figure 2. Overall structure of vibration-assisted seed filling air suction soybean seed meter

图 2. 振动辅助充种气吸式大豆排种器整体结构

4.2. 关键部件参数设计

4.2.1. 振动辅助充种装置

该装置是解决核心矛盾的关键部件,如图 3 所示。选用微型振动器(型号 VB-10),其频率可在 20~60

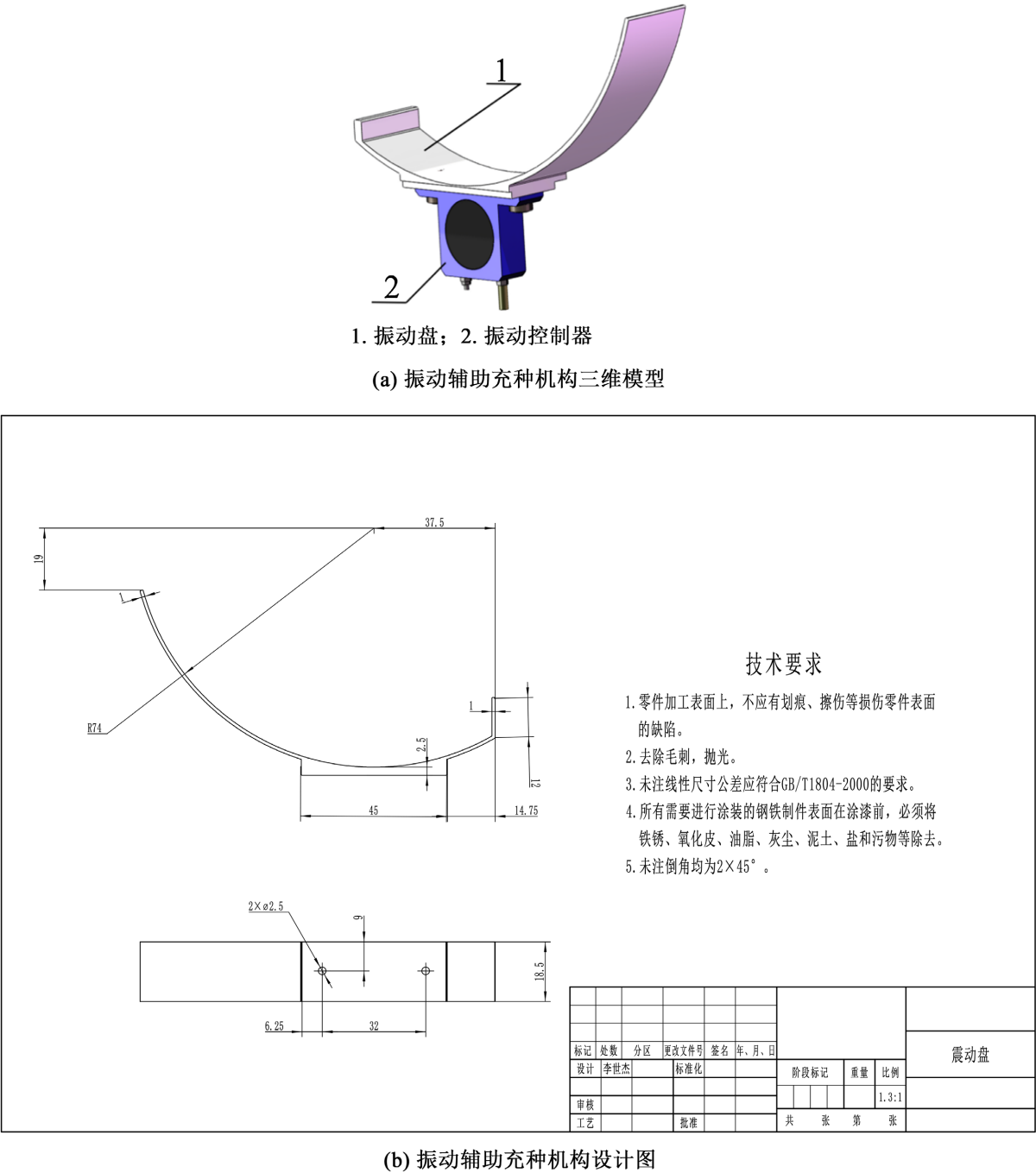
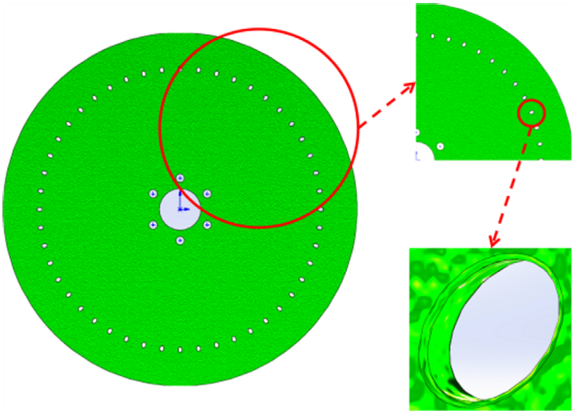


Figure 3. Vibration-assisted seeding mechanism
图 3. 振动辅助充种机构

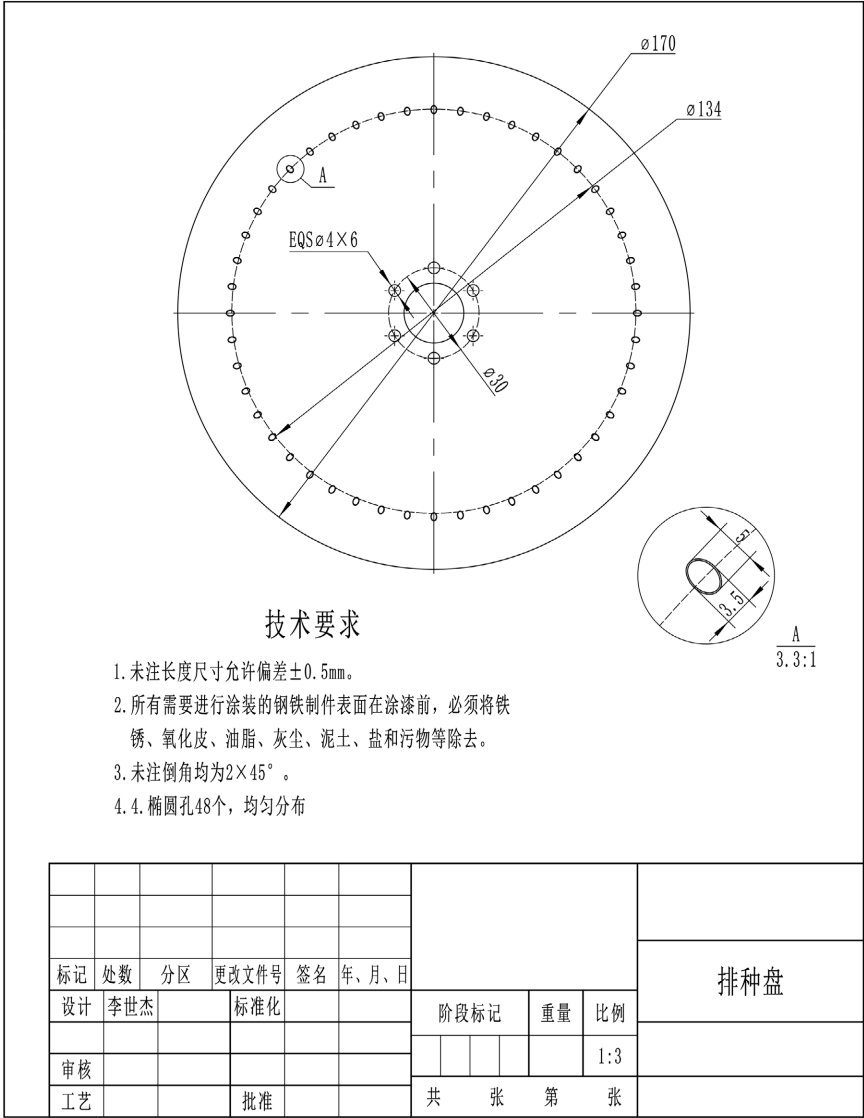
Hz 之间无级调节。该频率范围的振动能有效破坏桂夏三号大豆因扁椭圆形形态形成的机械咬合力链，实现种群的“微流化”。

4.2.2. 排种盘与取种结构

针对桂夏三号大豆种子(平均等效直径 4.9 mm)，进行适配性设计，如图 4 所示。排种盘直径 d_3 为 232 mm，其上均匀分布 48 个吸孔。吸孔设计为长轴 5 mm、短轴 3.5 mm 的椭圆形，能更好地贴合种子



(a) 排种盘三维模型



(b) 排种盘设计图

Figure 4. Seed plate and suction hole structure
图 4. 排种盘与吸孔结构

图 5-1 气室结构

5. 性能仿真与试验验证

5.1. 基于 DEM-CFD 耦合的仿真优化

本研究采用 EDEM-Fluent 双向耦合仿真,系统探究了振动的作用机理及关键参数对性能的影响规律。

5.1.1. 振动辅助充种机理仿真

如图 6 所示,仿真对比了无振动与施加 40 Hz、0.8 mm 振幅两种工况下的种群状态,结果如图 7 所示。

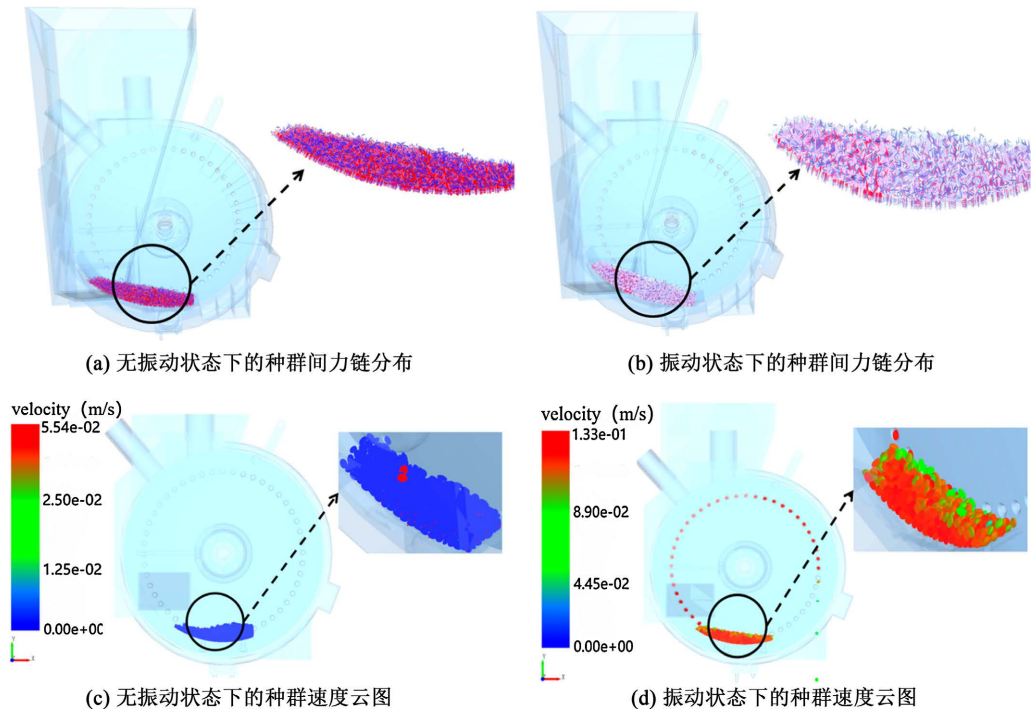


Figure 6. The effect of vibration on seeding
图 6. 振动对充种的影响

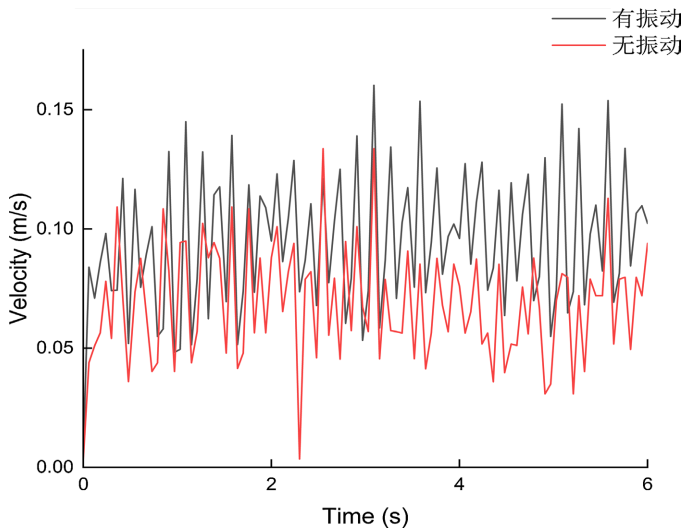


Figure 7. Comparison of the average speed of seeds over time in the seeding area
图 7. 充种区内种子平均速度随时间变化的对比

结果表明：无振动时，种群内部形成致密的力链网络，充种区出现明显的“架桥”现象；施加振动后，种间的静态摩擦平衡被周期性打破，力链网络不断断裂与重构，种群转变为孔隙率更高、流动性更强的松散状态。这从微观力学层面验证了 TRIZ 解决方案的正确性。

5.1.2. 单因素与响应面优化试验

在保持排种器其他结构参数及仿真边界条件一致的前提下，选取影响充种性能五个主要因素：吸孔数量(A)、工作负压(B)、前进速度(C)、振动频率(D)及振幅(E)。各因素的水平设定依据第三章单因素试验结果及第二章理论分析中的适宜取值范围确定。其中，吸孔数量取 45、48、51 个，工作负压取 3、4、5 kPa，前进速度取 8、10、12 km/h，振动频率取 20、40、60 Hz，振幅取 0.4、0.8、1.2 mm。试验以充种合格率(Y)为评价指标，采用五因素三水平 Box-Behnken 设计，共安排 46 组试验方案(含中心点重复)。回归方程方差分析如表 1 的试验结果所示，各因素对合格指数的影响主次顺序为：作业速度(C) > 吸孔数量(A) > 负压(B)。通过 Design-Expert 软件建立的二次回归模型极显著($P < 0.0001$)，且失拟项不显著($P = 0.2447$)，模型决定系数 $R^2 = 0.9945$ ，表明模型拟合精度高。各因素交互作用如图 8 所示，48 个吸孔结构在不同速度和负压下均表现出最佳适应性。

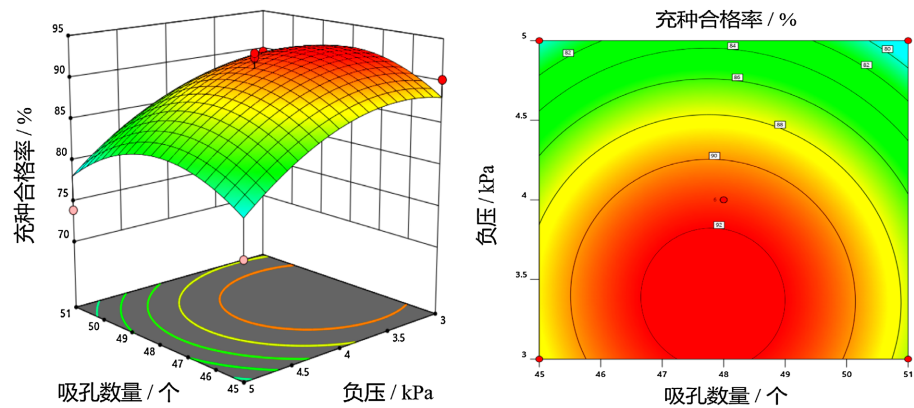
Table 1. Analysis of variance of regression equation
表 1. 回归方程方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1126.46	20	56.32	7.11	<0.0001	***
A	6.38	1	6.38	0.8049	0.0082	**
B	305.38	1	305.38	38.55	<0.0001	***
C	160.02	1	160.02	20.2	0.0001	***
D	87.89	1	87.89	11.1	0.0027	**
E	118.27	1	118.27	14.93	0.0007	***
AB	0.1225	1	0.1225	0.0155	0.902	-
AC	0.64	1	0.64	0.0808	0.7786	-
AD	1.69	1	1.69	0.2134	0.6481	-
AE	0.01	1	0.01	0.0013	0.9719	-
BC	6.25	1	6.25	0.7891	0.3829	-
BD	0.7225	1	0.7225	0.0912	0.7651	-
BE	17.22	1	17.22	2.17	0.1528	-
CD	0.9025	1	0.9025	0.1139	0.7385	-
CE	0.9025	1	0.9025	0.1139	0.7385	-
DE	2.72	1	2.72	0.3437	0.563	-
A ²	177.71	1	177.71	22.44	<0.0001	***
B ²	107.67	1	107.67	13.59	0.0011	**
C ²	212.76	1	212.76	26.86	<0.0001	***
D ²	216.37	1	216.37	27.32	<0.0001	***
E ²	130.2	1	130.2	16.44	0.0004	***

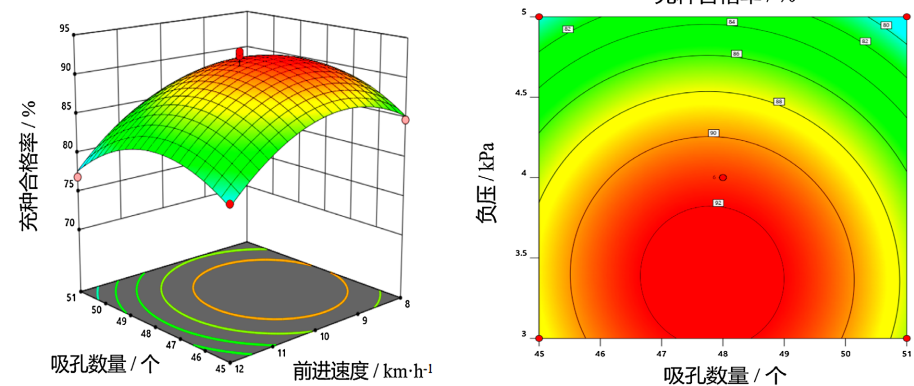
续表

残差	198.02	25	7.92			
失拟值	131.75	20	6.59	0.497	0.8794	-
纯误差	66.27	5	13.25			
总和	1324.48	45				
R^2	0.8599					
变异系数	3.36					

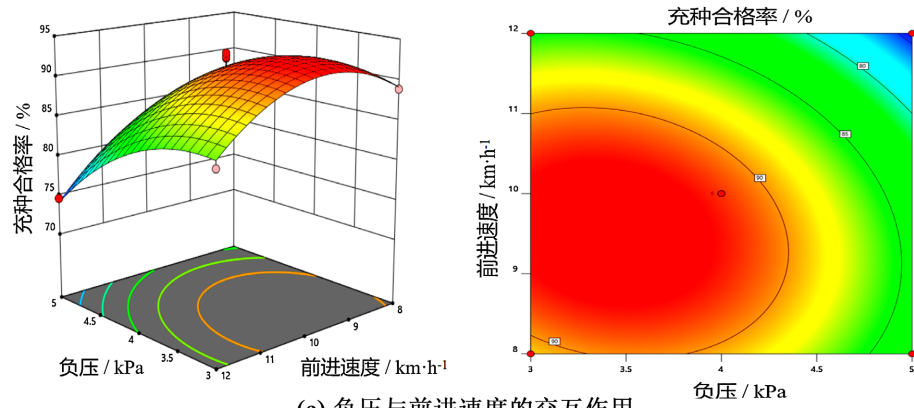
注：*** $P < 0.001$ 为极显著；** $P < 0.01$ 为显著。



(a) 吸孔数量与负压的交互作用



(b) 吸孔数量与前进速度的交互作用



(c) 负压与前进速度的交互作用

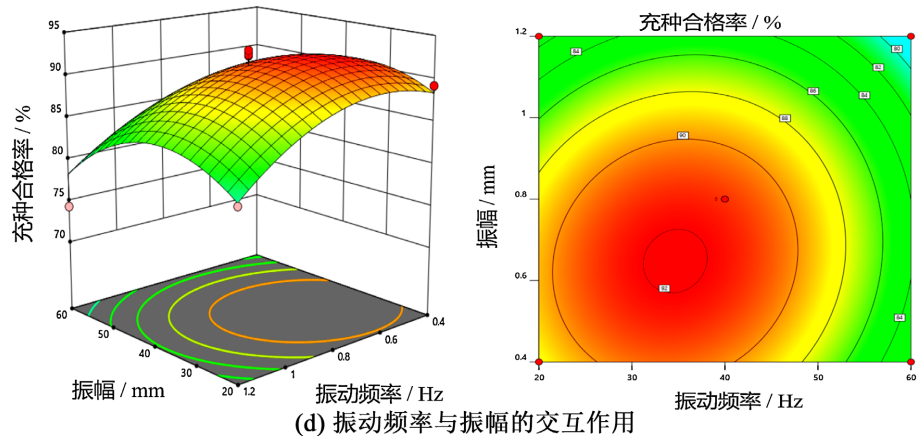


Figure 8. The interactions between various factors
图 8. 各因素之间的交互作用

5.2. 台架验证试验

为检验仿真优化的准确性，如图 9 所示，在 JPS-12 排种器性能试验台架上进行验证。试验材料为“桂夏三号”大豆种子。根据模型寻优结果，设定最优参数组合：吸孔数量 48 个，负压 4.2 kPa，作业速度 8.5 km/h。在此条件下进行 3 次重复验证试验，实测排种合格指数平均值为 94.9%，漏播指数与重播指数均处于较低水平。实测值与模型预测值(94.1%)的相对误差仅为 0.9%，小于工程上 3%的可接受范围，有力证明了基于 TRIZ-AD 方法所设计装置的优越性以及仿真优化模型的可靠性。

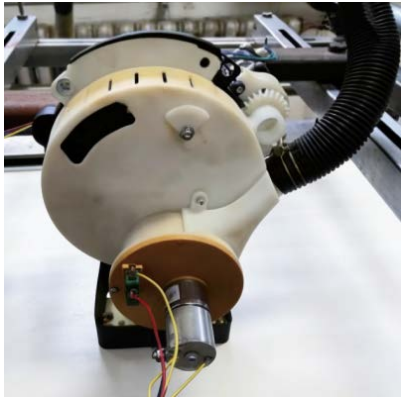


Figure 9. Seeding device performance test bench
图 9. 排种器性能试验台架

6. 结论

- 1) 针对大豆高速精密排种难题，提出了一种 TRIZ-AD 集成的创新设计方法。该方法利用 TRIZ 工具识别并解决了 AD 分解中暴露出的“打破种群稳定”与“维持吸附稳定”这一核心物理矛盾，最终形成了以“振动辅助充种”为标志性特征的解耦方案，为农业装备创新提供了方法论范例；
- 2) 基于该方案，设计了一种集成振动辅助充种装置、非对称椭圆形吸孔排种盘及环形连通气室的新型气吸式排种器。DEM-CFD 耦合仿真直观揭示并验证了振动激励通过破坏种间力链、诱导种群流态化来提升充种性能的机理；
- 3) 响应面优化与台架试验表明，在吸孔数量为 48 个、负压为 4.2 kPa、作业速度为 8.5 km/h 的最优

参数下,该排种器合格指数可达 94.9%,与模型预测值高度吻合。相较于传统设计,该装置在较低负压下实现了高速、高效的精密播种,符合现代农业装备“高效、低耗”的发展方向,具有广阔的应用前景。

基金项目

广西师范大学大学生创新创业计划国家级项目:《基于 DEM-CFD 的振动辅助充种气吸式大豆排种器的设计与优化》(202410602079)。

参考文献

- [1] 曹梦楠,鲁海龙.中国大豆产量及进口量分析[J].粮食加工,2025,50(5):8-12,16.
- [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.
- [3] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐,等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(4):75-86,139.
- [4] 刘文忠,赵满全,王文明,等.气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J].农业工程学报,2010,26(9):133-138.
- [5] 王国伟,夏晓蒙,朱庆辉,等.基于 DEM-CFD 耦合的辅助充种气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(5):1208-1221.
- [6] 陈林涛,李世杰,李育霖,等.基于 DEM-CFD 的振动辅助充种气吸式排种器设计与优化[J/OL].现代农业装备:1-12. <https://link.cnki.net/urlid/44.1616.S.20260421.1624.002>,2026-06-05.
- [7] 高增强,张开飞,杨东福,等.基于 DEM-CFD 耦合的气吸式大豆排种器种盘参数优化[J].中国农机化学报,2023,44(11):1-8.
- [8] 周仁义.气吸式大豆高速精密排种器设计与试验[D]:[硕士学位论文].长春:吉林大学,2021.
- [9] Suh, N.P. (1990) The Principles of Design. Oxford University Press.
- [10] 肖人彬,蔡池兰,刘勇.公理设计的研究现状与问题分析[J].机械工程学报,2008,44(12):1-11.
- [11] 檀润华.发明问题解决理论[M].北京:科学出版社,2004.
- [12] 周苏.创新思维与 TRIZ 创新方法[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [13] 郑娟,廖宜涛,廖庆喜,等.基于 TRIZ-AD 的集成式油菜气力精量排种装置设计[J].农业工程学报,2023,39(14):49-59.
- [14] 侯炳华,寇子明,刘瑞,等.基于 TRIZ-AD 的空心挂面盘条醒发装置设计[J].包装与食品机械,2026,44(1):66-75.
- [15] 罗兵,张建敏.基于 TRIZ 和 AD 理论的刺梨采摘机设计研究[J].农机化研究,2023,45(1):24-29.
- [16] 李瑞琴.现代机械概念设计与应用[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [17] 俞斌,陈振华.基于 AD 和 TRIZ 的产品优化设计研究与应用[J].现代制造工程,2019(7):115-120.
- [18] 刘晓敏,黄水平,陈智钦,等.基于 TRIZ 与 AD 的海草夹苗机械手概念创新设计及可靠性研究[J].机械工程学报,2016,52(5):40-46.
- [19] Wu, Y., Zhou, F. and Kong, J. (2020) Innovative Design Approach for Product Design Based on TRIZ, AD, Fuzzy and Grey Relational Analysis. *Computers and Industrial Engineering*, **140**, Article ID: 106276. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106276>
- [20] 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.
- [21] 李玉环,杨丽,张东兴,等.豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):61-73.
- [22] 顿国强,于春玲,杨永振,等.大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J].农业工程学报,2019,35(19):62-73.
- [23] 苏微,赵庆辉,赖庆辉,等.辅助充种带气吸式蚕豆精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(7):144-155.
- [24] 张凯,洪杨,徐祝欣.基于 DEM-CFD 耦合的气吸式排种器仿真研究[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(6):767-772.