

分类号：
学号：20232010045

密级：
单位代码：10759

石河子大学 硕士学位论文



射流式施肥器结构设计及吸肥性能优化研究

学位申请人	赵晨好
指导教师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

分类号：
学号：20232010045

密级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



射流式施肥器结构设计及吸肥性能优化研究

学位申请人	赵晨好
指导教师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业水土工程
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2026年5月

**Optimization of Structural Design and Fertilizer Injection
Performance for Jet Fertilizer Injectors**

A Dissertation Submitted to
Shihezi University
In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

By

Zhao Chenyu
(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Zhenhua

May, 2026

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本研究的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：赵晨婷

时间：2016年5月20日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：赵晨婷

时间：2016年5月20日

导师签名：洪

时间：2016年5月20日

摘要

目的: 施肥装置是水肥一体化设备中的重要组成部分, 其质量直接影响着水肥一体化设备的性能。近年来, 射流式施肥器开始在水肥一体化设备中广泛使用, 但其依赖截面收缩产生负压的工作原理会产生局部能量损失, 限制了吸肥性能提升。优化结构参数及形式是提升射流式施肥器的吸肥性能的有效方式之一, 但目前多个关键结构参数对其吸肥性能的影响规律及原理尚不明确。因此本研究以高吸肥效率和大吸肥流量为目标, 对射流式施肥器的结构参数进行优化, 并引入螺旋流以优化其内部能量分配。上述研究对提升射流式施肥器吸肥性能及促进新型射流式施肥器研发有重要意义。

方法: 本研究采用物理试验和数值模拟结合的方法对射流式施肥器进行研究。通过单因素试验与数值模拟云图, 分析射流式施肥器喷嘴直径、喉管直径、扩散角、喉管长度对其吸肥性能的影响, 确定了射流式施肥器在本研究范围内的最优结构参数组合; 在此基础上, 提出在收缩段内增加导流叶片, 利用螺旋流降低喷嘴出口处压力的结构优化思路, 设计出新型射流式施肥器, 并探究叶片结构参数对吸肥性能的影响及最优参数组合; 通过吸肥性能验证试验明确新型射流式施肥器的吸肥性能优势。

结果: (1) 相同工况下, 随着喷嘴直径、喉管直径、喉管长度的增大, 射流式施肥器的吸肥流量及吸肥效率均呈现先增大后减小的变化趋势。随着扩散角的增大, 吸肥流量及吸肥效率均逐渐减小。单因素试验结果表明, 射流式施肥器在本研究范围内的最优结构参数组合为: 喷嘴直径 4 mm、喉管直径 7 mm、扩散角 8°、喉管长度 32 mm。与基础射流式施肥器相比, 参数优化后射流式施肥器的吸肥流量及吸肥效率分别提升 12.48%~49.89%和 8.91%~48.75%。(2) 将最大高度设置在距离收缩段进口 1/3 处的三角形导流叶片是新型射流式施肥器的最佳导流叶片结构形式, 最佳导流叶片参数为最大高度为 2 mm, 个数为 3 个, 旋转角度为 30°; 导流叶片的个数、最大高度、旋转角度均会影响新型射流式施肥器的吸肥效率 ($p < 0.05$), 高度与旋转角度的交互项对吸肥效率有极显著影响 ($p < 0.01$)。(3) 在相同试验工况下, 与基础及结构参数优化后的射流式施肥器对比, 新型射流式施肥器吸肥流量分别提升 18.01%~229.73%和 5.03%~59.12%, 吸肥效率分别提升 29.83%~189.06%和 9.36%~56.34%。

结论: 减小射流式施肥器的扩散角, 能减小扩散段内漩涡面积, 有利于提升其吸肥性能。新型射流式施肥器的收缩段导流叶片能为水流提供切向速度分量, 使水流在喷嘴处形成高速螺旋流射流, 射流中心处的负压区和螺旋流射流边界处水流与肥料液体的相互作用使吸肥流量提升。说明新型射流式施肥器比依靠轴向速度产生负压的传统射流式施肥器具有更好的吸肥性能。

关键词: 射流式施肥器; 吸肥性能; 结构优化; 水肥一体化; 数值模拟

Abstract

Objective: Fertilization equipment is a critical component of water-fertilizer integration equipment, and its quality directly influences the performance of the system. In recent years, jet fertilizer injectors have been widely adopted in water-fertilizer integration equipment. The working principle of jet fertilizer injector relying on cross-section contraction to produce negative pressure will produce local energy loss, which limits the improvement of fertilizer injection performance. Optimizing structural parameters and configurations is an effective approach to enhance the fertilizer injection performance of jet fertilizer injectors. However, the influence laws and underlying mechanisms of multiple key structural parameters on the fertilizer injection performance remain unclear. Therefore, aiming to achieve high fertilizer injection efficiency and fertilizer injection flow rate, this study optimizes the structural parameters of the jet fertilizer injector and introduces spiral flow to optimize its internal energy distribution. This study contributes to enhancing the fertilizer injection performance and promoting the development of novel jet fertilizer injectors.

Methods: In this thesis, the jet fertilizer injector is investigated through a combined approach of physical experiments and numerical simulations. The influences of nozzle diameter, throat pipe diameter, diffusion angle, and throat pipe length on the fertilizer injection performance are analyzed. Based on the results of single-factor experiments and numerical simulation contours, to determine the optimal combination of structural parameters. On this basis, a structural optimization strategy is proposed, involving the addition of guide vanes within the contraction section to reduce the pressure at the nozzle outlet via the swirling effect, resulting in the design of the novel jet fertilizer injector. This study investigates the effects of guide vane structural parameters on fertilizer injection performance, identifies the optimal parameter combination, and clarifies the performance advantages of the novel fertilizer injector through verification tests.

Results: (1) Under identical operating conditions, the fertilizer injection flow and fertilizer injection efficiency of the jet fertilizer injector show a trend of first increasing and then decreasing as the nozzle diameter, throat pipe diameter, and throat pipe length increase. In contrast, both the fertilizer injection flow and efficiency decrease gradually as the diffusion angle increases. The results of the single-factor experiment indicate that the optimal combination of structural parameters for the jet fertilizer injector was determined as follows: a nozzle diameter of 4 mm, a throat diameter of 7 mm, a diffusion angle of 8° , and a throat length of 32 mm; Compared with the basic jet fertilizer injector, the fertilizer injection rate and fertilizer injection efficiency of the optimized jet fertilizer injector are increased by 12.48%–49.89% and 8.91%–48.75%, respectively. (2) For the novel jet fertilizer injector, the optimal guide vane structure was identified as a triangular vane with its maximum height located at $1/3$ of the distance from the inlet of the contraction section. The optimal parameters for guide vanes were determined as follows: a maximum blade height of 2 mm, a blade count of 3, and a blade rotation angle of 30° . The fertilizer injection efficiency of the novel jet fertilizer injector is significantly influenced by the number, the maximum height, and rotation angle of the guide vanes ($p < 0.05$), the interaction term between the maximum height and rotation angle of

the guide vanes exhibits a highly significant effect on the fertilizer injection efficiency ($p < 0.01$). (3) Under identical experimental conditions, the novel jet fertilizer injector demonstrated significant improvements compared to both the basic jet fertilizer injector and the structurally optimized jet fertilizer injector. The fertilizer injection flow rate increased by 18.01%~229.73% and 5.03%~59.12%, respectively, while the fertilizer injection efficiency increased by 29.83%~189.06% and 9.36%~56.34%, respectively.

Conclusion: Reducing the diffusion angle of the jet fertilizer injector was found to decrease the vortex area within the diffusion section, which is conducive to enhancing fertilizer injection performance. In the novel jet fertilizer injector, the guide vanes within the contraction section impart a tangential velocity component to the water flow, generating a high-speed swirling jet at the nozzle. The increase in fertilizer injection flow rate is attributed to the intensified negative pressure zone at the jet center and the interaction between the water and fertilizer liquid at the boundary of the swirling jet. It shows that the novel jet fertilizer injector has better fertilizer injection performance than the basic jet fertilizer injector which relies on axial velocity to produce negative pressure.

Key words: Jet fertilizer injector; Fertilizer injection performance; Structural optimization; Water-fertilizer integration; Numerical simulation

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 射流式施肥器发展历程及现状	2
1.2.2 射流式施肥器结构改进现状	4
1.2.3 螺旋流技术的应用	5
1.2.4 存在的问题	6
1.3 研究内容	7
1.4 技术路线	7
第 2 章 材料与方法	9
2.1 传统射流式施肥器结构组成及运行过程	9
2.2 物理试验	10
2.2.1 试验台架搭建及操作步骤	10
2.2.2 试验样件制造	11
2.3 数值仿真	12
2.3.1 建立参数化模型	12
2.3.2 模型前处理设置	12
2.3.3 流场求解	14
2.3.4 后处理	18
2.4 评价指标	18
第 3 章 射流式施肥器参数优化研究	20
3.1 射流式施肥器结构参数对吸肥性能影响	20
3.1.1 射流式施肥器喷嘴直径对吸肥性能的影响	21
3.1.2 射流式施肥器喉管直径对吸肥性能的影响	23
3.1.3 射流式施肥器扩散角对吸肥性能的影响	25
3.1.4 射流式施肥器喉管长度对吸肥性能的影响	26
3.2 参数优化前、后射流式施肥器吸肥性能对比	28
3.2.1 试验模型参数	28
3.2.2 吸肥性能对比	29

3.3 小结	31
第 4 章 新型射流式施肥器结构优化设计研究	32
4.1 新型射流式施肥器设计思路	32
4.2 新型射流式施肥器导流叶片结构形式优选	33
4.3 新型射流式施肥器导流叶片参数对吸肥性能的影响	35
4.3.1 导流叶片个数对吸肥性能的影响	36
4.3.2 导流叶片最大高度对吸肥性能的影响	37
4.3.3 导流叶片旋转角度对吸肥性能的影响	38
4.3.4 导流叶片结构参数全因素试验分析	38
4.4 小结	40
第 5 章 新型射流施肥器吸肥性能研究	42
5.1 不同射流式施肥器吸肥性能对比	42
5.1.1 结构形式对吸肥性能影响	43
5.1.2 压差对吸肥性能影响	46
5.1.3 吸肥临界压差对比	47
5.2 内部流场分析	48
5.2.1 流场内压力分布	49
5.2.2 速度及流线	49
5.2.3 湍流动能	52
5.3 小结	53
第 6 章 结论与展望	54
6.1 结论	54
6.2 展望	55
参考文献	56
致谢	64
作者简介	66

第 1 章 绪论

1.1 背景与意义

我国作为农业生产大国，农业用水短缺和化肥利用效率较低的问题是制约农业可持续发展的重要问题^[1-2]。2024 年，全国用水总量为 5928.0 亿 m³，农业用水量为 3648.4 亿 m³，占用水总量的 61.6%，农业用水效率低下，农田灌溉水有效利用系数仅为 0.580^[3]，远低于发达国家水平^[4-5]。我国化肥使用量巨大，自 2015 年农业化肥施用量达到峰值后，年化肥施用量呈现逐年下降趋势，2024 年农业化肥施用量已下降至 4988.19 万吨^[6]，但化肥利用率依然低于发达国家水平^[7-8]。化肥生产是高能耗、高排放产业，较低的化肥利用效率意味着额外消耗了不可再生的煤炭和磷矿等资源，还可能导致水体富营养化及土壤酸化，破坏土壤结构，影响土壤微生物活性，造成严重污染^[9-10]。为了应对这一挑战，提高水资源和化肥的利用效率对于实现可持续农业发展至关重要^[11-12]。水肥一体化技术是通过灌水系统将一定浓度的肥料溶液均匀输送至作物根区土壤，满足不同生长阶段作物对水分和养分的需求，实现节水、节肥及增产增效的目标，它如今被认为是目前先进的节水节肥农业技术之一^[13-14]。

水肥一体化设备的质量很大程度上取决于施肥设备的类型和效率^[15-16]。目前常用的施肥装置主要有压差施肥罐、比例施肥泵、自压施肥装置、文丘里施肥器和水肥一体机等。大田农业生产中水肥一体化灌溉以经济易用型施肥设备为主，压差施肥罐和文丘里施肥器由于结构简单、使用方便和成本较低等优点被广泛使用^[17-18]。但压差施肥罐肥液浓度随时间推进不断衰减，不符合农业现代化发展中精确变量施肥的要求^[19]。文丘里施肥器作为一种基础施肥单元，简单经济、使用灵活，在水肥一体化领域占有重要地位^[20-21]。但是由于其喉部可利用的负压区域有限，吸肥性能难以进一步提升，不能满足高施肥需求和低能耗的施肥需求^[22-23]，因此近年来部分农户逐渐开始在水肥一体化装备中应用射流式吸肥器^[24]。

射流式施肥器与中心射流泵的结构很相似，其工作原理是利用快速收缩的过流面积提升水流流速，使喷嘴处喷出高速射流水流，使吸肥腔内部产生局部负压区域，肥液在大气压作用下从肥料桶中吸入施肥器内部，并与射流水流在喉管段内混合均匀。相较于传统文丘里施肥器，射流式吸肥器具有更大吸肥流量、水肥混合程度高以及工作压力范围广等优势。射流式施肥器的工作原理依靠内部结构将水流的动能转换成喉

部的负压，过程中会产生显著压力损失，系统能量损耗较大；现有关于射流式施肥器的研究主要通过参数寻优的方式^[25]，进行有限次数的参数组合试验，获得局部最优解^[26]，并建立结构参数与性能的预测模型^[27]，但未能深入探究关键结构参数的变化对其内部流场及吸肥性能的影响规律。

因此，本研究在市面上一种常见的射流式施肥器（SSQ-170）关键结构的基础上，通过物理试验分析结果、数值模拟分析变化规律的方法，探究射流式施肥器关键结构参数对其吸肥性能的影响。并在结构参数优化的基础上，设计出高吸肥效率、大吸肥流量的新型射流式施肥器，对提高水肥一体化设备的工作效率及推动农业可持续发展具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 射流式施肥器发展历程及现状

施肥装置是水肥一体化设备中的重要组成部分，可以最大限度地减少肥料投入，提升水肥利用效率，其性能对水肥一体化设备的工作效率至关重要^[28]。当前，常用的施肥装置包括：压差施肥罐^[29-30]、文丘里施肥器^[31-32]、比例施肥泵^[33-34]、水肥一体机^[35-36]等。其中，文丘里施肥器的应用较为广泛^[37-38]，国内外学者对文丘里施肥器的研究内容主要包括：理论推导^[39-40]、结构参数优化^[41-42]及结构改进^[43-44]，提升了文丘里施肥器的吸肥性能。但由于文丘里施肥器可利用的负压区域相对有限，其吸肥性能很难进一步提升，无法满足较大灌溉区域的施肥需求，因此国内水肥一体机生产商引入了一种与文丘里施肥器工作原理及结构相似的射流式施肥器（原型为SSQ型水射器）。射流式施肥器的工作原理是利用过流面积逐渐减小的收缩结构，使水流在喷嘴出口处形成高速射流，吸肥腔内会形成局部负压区域，肥料液体在压差作用下被吸入射流式施肥器内部，并与高速射流液体在喉管段内进行动量交换使水肥混合，随着扩散段过流面积的逐渐增大，液体的压力逐渐升高，水肥混合液随灌溉管网流入灌溉区域^[45]。该装置最初主要应用于污水处理、曝气^[46-47]及化工领域精确加药的特殊场景中，依靠其在运行时的稳定性及较宽的压力适用范围，使其成功应用于水肥一体化装置，接近了当前规模化灌溉过程中对大吸肥流量及运行稳定性的要求。

当前，国内应用于水肥一体化设备的射流式施肥器型号众多，近年来，部分学者对射流式施肥器的性能验证和结构参数优化进行了探究。汪小珊等^[24]对8种不同规格的射流式施肥器进行了性能测试，并推导了进出口压差与进口压力之间关系的公式，同时还发现射流式施肥器适用于较高进口压力工况，且吸肥量范围与施肥器长度呈正

相关关系，最大吸肥量与其喉管—喷嘴面积比有关。俞晓峰等^[48]通过研究不同喷嘴对射流式施肥器吸肥性能影响发现：喷嘴长度是射流式施肥器的关键因素，当喷嘴长度过长时，施肥器的吸肥流量增长受限，吸肥性能降低。为了提升射流式施肥器的吸肥性能，部分学者的研究聚焦于对其多项关键结构参数进行寻优。袁寄望等^[25]研究了吸肥腔收缩角、吸肥腔直径、喉管—喷嘴直径比等结构参数对射流式施肥器吸肥性能的影响，并优选出这些结构参数的最优值，优化后射流式施肥器吸肥性能明显提升。张琼等^[26]对比了多种射流式施肥器与文丘里施肥器的吸肥性能差异，并使用正交试验及极差分析得到了射流式施肥器喉管—喷嘴面积比、扩散角、收缩角与喉嘴距的最优参数组合。Tang 等^[27]使用响应面法探究了射流式施肥器吸肥腔直径、收缩角和喉管—喷嘴直径比之间的交互作用对吸肥性能的影响，并建立了结构参数与吸肥性能指标的预测回归方程。尽管众多学者对射流式施肥器多个结构参数进行了参数寻优，但未能深入探究其关键结构参数的变化对其内部流场及吸肥性能的影响规律。

当前关于射流式施肥器结构参数的研究相对较少，与射流式施肥器相近的射流泵也有众多学者针对其结构参数优化开展了研究。龙新平等^[49]通过数值研究结果表明喉管长度对射流泵的效率及性能均有影响，且较长的喉管长度增加了两种液体的混合程度，但增加了系统的能量损失；周良富等^[50]在探究混药装置结构参数对其性能影响中发现，对其性能有较大影响的是面积比和喷嘴到混合室进口之间的距离。Wang 等^[51]通过试验探究了射流泵的喉管类型、长度以及扩散角的空化特性，结果表明喉管结构对空化的影响比扩散段更大，且扩散型喉管提升了射流的卷吸能力，而收缩型喉管的卷吸能力明显下降。王洋等^[52]发现喉管直径是影响射流自吸泵效率的重要因素，且不同速度的水流混合增大了喉管段的压力梯度，内部流场更复杂，对性能产生较大影响。为了更全面地提升射流泵性能，部分学者旨在通过设计多因素试验，全面探究不同结构参数间的交互影响与最佳射流泵参数组合。Sheha 等^[53]对射流泵的扩散角度、混合室长度、喷嘴—喉管面积比以及喷嘴位置进行了研究，结果表明射流泵的效率会随着扩散角和混合室长度的减小而增大，达到一定值后射流泵效率降低。Sun 等^[54]为提升射流泵的泵送效率，通过 XGBoost 机器学习技术预测喷射泵喉道长度、喉道直径、喉道倾角和流量比的最优特性参数。Chen 等^[55]通过 CFD 数值模拟和单因素及响应面试验对射流泵的四种结构参数进行了优选，优化后得到的射流泵增加了高速区域同时提高了流体输送效率。射流泵的工作原理和结构形状与射流式施肥器基本一致，总结出的相应规律对射流式施肥器的参数设计具有指导意义。但是射流泵的结构尺寸相对较大，且工作压力远大于射流式施肥器，射流泵结构参数优化得到的相应范围不一定适用于射流式施肥器。

上述关于结构参数优化的研究虽提升了射流式施肥器的吸肥性能，减少了因结构

参数设计产生的能量损失，但其依赖过流断面快速收缩产生负压的过程中局部能量损失较大。

1.2.2 射流式施肥器结构改进现状

由于射流式施肥器进入市场的时间相对较短，当前通过改进射流式施肥器的结构形式来提升其吸肥性能的研究相对较少。为解决管道安装位置产生的吸肥量不均匀、振动强烈的现象，王永涛等^[56-57]通过调整并联文丘里射流器管道间距，得出了最佳吸肥流量的并联四通道射流器水肥一体机结构。俞晓峰^[45]通过增加吸肥管数量发现：在相同工况下增加一条吸肥管道后，射流式施肥器的吸肥流量、吸肥浓度及进口流量比均有提升，吸肥腔内的负压区域增大，吸肥性能提升明显。

射流式施肥器在结构上和射流泵有相似性，为提升射流泵的能量转换效率及性能，部分学者对射流泵的结构形式进行了改进。唐洋^[58]等为保证泥沙水被均匀吸入，在射流泵的喷嘴与喉管之间设置3个吸入口，在射流液体的卷吸作用下，喉管入口附近区域形成环形的冲蚀区域，使泥沙分布得更均匀。孙琬婷等^[59]对射流泵喉管结构进行优化后发现在大流量比工况下，提升喉管倾角能降低喉管负压值，增大喉管倾角、减小喉管长度的结构相较于倾角为 0° 的射流泵泵送效率有所提升，并且更节约材料成本。

由于射流泵的喷嘴处是整个结构中水流流速最大、动能最大的区域，喷嘴结构直接影响射流水流初始动能，部分学者将优化射流泵的喷嘴结构作为提升射流泵整体性能的研究方向。宋昕等^[60]对多级串联喷嘴的液气射流泵进行抽气试验后发现，在不同试验工况下，多级串联的射流式施肥器相比于常规射流泵的抽气性能均有提升，多级串联喷嘴段总长度较长，且在运行过程中流速较快，在此过程中工作流体与气体进行了充分的能量交换，混合程度更高。袁丹青等^[61]将单一喷嘴改成多个圆形小喷嘴，射流液体与吸入液体的接触面积相较单个喷嘴的射流泵明显提升，能量交换发生在较短射流泵空间内，减小了喉管长度。赵丽娟等^[62]对不同射流泵喷嘴的结构形式进行对比后发现，由于过流断面在圆柱喷嘴前突然缩小，该射流泵引射效果最差，余弦喷嘴相比于圆锥喷嘴的射流泵引射效率更高。李万钟等^[63]针对实际应用中，射流泵喷嘴轴线偏移的问题进行探究，结果表明喷嘴轴线偏移量与引射性能呈负相关关系，喷嘴轴线使扩散段内水流产生回流现象，对射流泵引射性能产生不利形象。Zou等^[64]对深井射流泵的安装方向及液体进口与喷嘴的方向进行了分析，结果表明垂直安装射流泵的方式使扩散管内水流流速降低，且液体进口与喷嘴方向平行时射流泵性能最好，流场中产生的漩涡最少，阻力损失最小。Gan等^[65]为解决现有泵能量损失较大的问题，提出了一种非轴对称射流泵，研究结果表明非轴对称结构设计可以有效降低能量损失，且优化装置比现有轴对称射流泵具有更小的能量损失和更宽的工作范围。

现有研究通过改变设备安装方式、增加吸肥管数量、优化喷嘴及结构形式等多种结构改进思路,对射流式施肥器及射流泵的结构进行了有益改进。这些工作在不同程度上提升了设备的运行效率及稳定性,减小了能量损失,这也说明结构改进是性能提升的一种有效方法。但上述改进还是在传统结构形式的基础上,对局部结构进行参数化调整或形状改变,设备工作原理还是通过过流断面收缩和扩大实现能量转换并产生负压,结构形式本身产生的压力损失较大,性能无法进一步提升的问题仍未得到有效解决。

1.2.3 螺旋流技术的应用

螺旋流是流体在轴向运动过程中还有绕中心轴的周向旋转运动^[66],整体呈现沿螺旋轨迹运动,自然界中的龙卷风及河道中的螺旋漩涡均能发现螺旋流。这种流动形态因其能够产生离心分离效果,并增强流体之间的剪切和混合效果,改变流体的运动状态,在众多工程技术领域得到了深入研究和广泛应用,如利用离心力分离不同密度的物质^[67-68],增强不同流体的混合效果^[69-70],以及减小管道内堵塞和能量损耗^[71-72]等问题。螺旋流在农业设备中也有较多应用。在减小堵塞情况方面,Wang等^[73]为解决灌水器内部漩涡中心区域流速过低造成泥沙淤积的问题,设计了一种漏斗型漩涡滴灌灌水器,通过改变导流槽的入射角度使水流形成螺旋流,并通过漩涡消能的方式使该灌水器的流态指数保持在0.433~0.466之间,既提高了灌水器的水力性能,也降低了灌水器堵塞的风险。在分离灌溉水中的泥沙方面,排沙漏斗的工作原理是利用水流切向进入漏斗时产生初始角动量,在向中心区域汇聚过程中,水流旋转速度随半径减小逐渐加快并形成螺旋流,排沙底孔处吸力漩涡将泥沙高效排出^[74];离心式过滤器也是利用螺旋流实现固液分离,高含沙水切向进入过滤器后高速旋转并形成螺旋流,泥沙在离心力及重力作用下被甩向边壁并沉降,由底部排出,清水从中心区域流出^[75]。在能量转换方面,Zhao等^[76]设计了一种水力驱动施肥器,能将水流动能通过水轮机叶片转化成机械能,驱动隔膜柱塞泵产生稳定负压吸肥;与国内外研究的文丘里施肥器相比,该水力驱动施肥器的施肥流量平均提升38.7%至461.0%。低工作压力区间的性能优势明显。在提升混合效果方面,张爱习等^[77]为解决臭氧水灌溉杀菌技术中,臭氧与水混合效率低,接触时间短的问题,设计了一种漩涡螺旋式臭氧混合泵,利用螺旋流增加臭氧与水的接触路径,提升了混合效率及臭氧水浓度;宋海潮等^[78]为提升脂溶性农药与水混合的均匀程度,通过继旋器以及在扩散管内增加导叶的方式,使脂溶性农药与水混合的均匀性指数提升至0.9995。

螺旋流除上述效果以外,还具有提升水流流速,降低管道负压的作用。Rajbanshi等^[79]在对水平轴螺旋水轮机叶片研究的过程中发现,叶轮中心区域出现负压区,产生

的负压效果提升了水流流速，增加了水轮机的输出功率。Afrizal^[80]通过对多相液体在传统直管及螺旋管道的模拟结果发现，传统直管因泥沙颗粒堵塞导致管道压力过大，在低流速和低固体体积分数的情况下，螺旋管道的压降为直管的55%，说明螺旋管道结构减小了阻力，保证了高流速和低压力损失的运输方式。彭华仔等^[81]通过改变吸水管的位置，使工作流切向进入扩散器内部，环形水室负压下降，带动周围污水从吸水管吸入扩散管内部，混掺效果明显，有效减少排污输水管道长度，水头损失较低。与射流式施肥器结构类似的射流泵也通过使内部水流产生螺旋流的方式提升其性能。研究表明：引入螺旋流显著提升了射流泵的卷吸流量比与装置效率，增大了喉管段与扩散管交界处的低压区域，卷吸能力和混合作用增强，其核心原理是利用螺旋流产生的离心作用降低喉管中心静压，增强对流体的卷吸与掺混能力^[82]。董景明等^[83]在射流泵出口直管内设计了导叶结构使管内水流呈螺旋流动，结果表明：导叶产生的螺旋流降低了环形射流泵喉管内的静压，射流泵的流量比增大形成了更大的湍动能分布区域，但随着进口压力提升，湍流动能增大，说明导流叶片产生了较大阻力。

上述研究表明在多种装置中，螺旋流均能通过改变水流运动方式，改变流场内速度及压力分布，达到增强液体混合作用、固液分离及提速降压效果。当前，提升射流式施肥器性能的核心目标正是增大喷嘴处水流流速，降低吸肥腔内压力、优化压力分布并减少能量损失，这与螺旋流产生的提速降压效果一致。因此在射流式施肥器中引入螺旋流是提升其吸肥流量及吸肥效率、增强水肥混合效果的有效性能优化方案。

1.2.4 存在的问题

根据现有研究可知，关于射流式施肥器的研究主要通过参数寻优的方式提升射流式施肥器的吸肥流量及吸肥效率，进行有限次数的参数组合试验，获得了局部最优解，并建立结构参数与性能的预测模型，但目前仍存在一些不足：

(1) 针对射流式施肥器的结构参数的研究目前还不够完善，未能深入探究关键结构参数（如喷嘴直径、扩散角等）变化对其内部流场及吸肥性能的影响规律。

(2) 射流式施肥器因结构形式产生压力损失较大，螺旋流产生的提速降压效果有望优化其内部能量分配，进一步提升射流式施肥器的性能上限。

因此，进一步探究射流式施肥器结构参数及结构形式对其吸肥性能的影响机理，得出射流式施肥器的最优结构参数，并在此结构参数组合的基础上，进行结构形式和结构参数优化设计，得出更优的结构参数范围和新的射流式结构形式，对提升射流式施肥器的吸肥性能及水肥一体化装备的工作效率具有重要意义。

1.3 研究内容

(1) 射流式施肥器结构参数优化设计研究

采用物理试验分析结果,数值模拟分析变化规律的方法,研究射流式施肥器结构参数对吸肥性能的作用及影响。通过施肥器内部的压力、速度及湍流动能云图,综合分析射流式施肥器的喷嘴直径、喉管直径、扩散角、喉管长度等关键结构参数对吸肥流量、吸肥效率的影响规律,确定出射流式施肥器研究范围内最优结构参数组合,并与基础射流式施肥器进行对比,验证结构参数优化的可行性。

(2) 新型射流式施肥器结构优化设计研究

在参数优化后的射流式施肥器结构基础上,通过在收缩段上增加导流叶片,使进入射流式施肥器的水流产生螺旋流,提出新型射流式施肥器结构形式。分析不同导流叶片形式对吸肥性能的影响,确定出吸肥性能最好的叶片结构形式;并通过单因素及全因素试验设计方案,探究导流叶片个数、高度、旋转角度等关键结构参数对其吸肥效率的变化规律,提出最佳导流叶片结构的新型射流式施肥器结构参数组合。

(3) 新型射流式施肥器吸肥性能研究

通过吸肥性能测试试验,以新型射流式施肥器及同结构尺寸下的基础射流式施肥器、结构参数优化后的射流式施肥器作为研究对象,进行吸肥流量、吸肥效率、吸肥浓度及进口流量比等吸肥性能评价指标对比;确定多种进口压力情况下,不同射流式施肥器的吸肥流量与进出口压差的关系。综合评价不同射流式施肥器的吸肥性能差异,通过对比分析不同射流式施肥器内部的速度、压力云图,分析其结构形式及结构参数改变与吸肥性能之间的关联。

1.4 技术路线

为探究射流式施肥器结构参数对其吸肥性能的影响规律,使用物理试验和数值模拟结合的研究方法,对射流式施肥器的结构参数喷嘴直径、喉管直径、扩散角、喉管长度等关键结构参数进行了分析和优选,并对比了基础射流式施肥器与结构参数优化后两种射流式施肥器的吸肥流量与吸肥效率等评价指标。通过结构参数优化后的射流式施肥器吸肥性能提升相对有限,螺旋流产生的提速降压效果有望优化其内部能量分配,进一步提升射流式施肥器的性能上限。因此,通过在收缩段增加导流叶片的设计思路,使喷嘴处水流产生螺旋流,降低射流式施肥器吸肥腔内压力,设计了新型射流