

·灌排工程与技术装备· (栏目主编: 王振华 唐学林)

文章编号: 1672-3317(2025)01-0050-09

## 等截面双作用柱塞泵的仿真与试验研究

朱梅<sup>1</sup>, 范舟<sup>1</sup>, 李晓乐<sup>2\*</sup>, 刘靖喆<sup>1</sup>, 周迪<sup>3</sup>

(1.安徽农业大学工学院, 合肥230036; 2.安徽省水文局王家坝水文站, 安徽阜阳236312; 3.江苏远瀚建筑设计有限公司, 江苏常州213000)

**摘要:**【目的】为提升水肥一体化机施肥泵的机械效率, 设计了一种等截面双作用柱塞泵, 通过仿真分析和对比试验结合的方法验证了新式柱塞泵的稳定性和精准性。【方法】运用Fluent软件对柱塞泵模型内部流道进行仿真, 验证了设备结构的合理性。开展柱塞泵与文丘里施肥泵的对比试验, 测试进排水肥可溶性离子浓度(EC值)和泵的机械效率, 分析等截面双作用柱塞泵应用于水肥一体化机组的实际工作性能。【结果】进排水肥溶液EC值平均值方差仅约为48.5, 同文丘里施肥器试验数据的平均值方差814.8相比, 极限值波动减少约54%。【结论】试验工况范围内, 等截面双作用柱塞泵对比文丘里施肥泵的最大机械效率提升点出现在0.30 MPa时, 约提升56%。研究为提升水肥一体化机工作效率, 增强水肥一体化机市场适应性提供理论和试验参考。

**关键词:** 柱塞泵; Fluent仿真; 机械效率; 施肥器; 注肥

中图分类号: S224.21

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggpps.2023506

朱梅, 范舟, 李晓乐, 等. 等截面双作用柱塞泵的仿真与试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 50-58.

ZHU Mei, FAN Zhou, LI Xiaole, et al. Numerical and experimental analysis of double-acting plunger pump with constant cross section[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 50-58.

### 0 引言

【研究意义】党的十九大以来, 以习近平同志为核心的党中央高度重视节水工作, 省、市、县各级水利部门、农业部门坚持和落实“节水优先”方针, 以提升水资源集约节约利用能力为目标, 深入实施国家节水行动, 大力发展农业节水灌溉<sup>[1]</sup>。我国是农业大国, 化肥单亩使用量和种植面积皆位于全球前列, 化肥总使用量占全球30%以上<sup>[2]</sup>, 但由于施肥设备和肥料制造等多方面的原因导致国内肥料利用率同各主要发达国家相比仍处于较低水平<sup>[3]</sup>。我国水资源虽然总量丰富但人均占有量较少, 是世界上水资源严重短缺的国家之一<sup>[4]</sup>。大部分农田施肥依然使用较为落后的传统灌溉施肥方式。过度灌溉、施肥不仅浪费水肥资源, 还会破坏水土环境, 导致土壤板结, 严重影响作物产量、质量。如果灌溉用水效率适度提高10%, 即在50 a内用水效率每年提高0.3%, 可以减少城市地表水赤字约26.18亿m<sup>3</sup>, 能帮助78%的水脆弱城市及2.36亿居民缓解水

危机, 因此提高灌溉效率具有重要意义<sup>[5]</sup>。水肥一体化技术是将灌溉与施肥融为一体的农业技术, 该技术可以保证作物所需水分和养分得到供应, 提高节水节肥效果, 是实现农业水资源高效利用的重要环节。因此研究提高水肥一体化注肥设备工作效率, 推动水肥一体化技术发展, 是“加快建设农业强国”的一个重要举措。

【研究进展】水肥一体化机施肥设备按照工作方式的不同, 主要分为文丘里施肥器、压差式施肥罐、比例泵施肥器和往复式注肥泵。部分学者<sup>[6-7]</sup>对文丘里施肥器、压差式施肥罐、比例泵施肥器的应用和已有研究做了详细的阐述。往复式注肥泵属于容积式水力机器<sup>[8]</sup>, 广泛应用于工业领域, 其由3个主要部件组成, 分别是驱动系统、调节装置及输送装置<sup>[9]</sup>。国内对往复式注肥泵在微灌、滴灌等水肥一体化系统的应用研究还较少, 主要在大型灌区进行了应用研究, 范围较小<sup>[10-16]</sup>。近年来因往复式注肥泵工作效率较高且操作便捷等优点, 在农业领域内使用范围日益增加<sup>[17-19]</sup>, 利用控制活塞的周期性往复式运动实现进出水肥功能进行研究也质疑增多, Thierry等<sup>[20]</sup>利用水流驱动活塞运动, 成功研制出一种可实现自动加肥的活塞式驱动泵。Silva等<sup>[21]</sup>研究出了工作原理与活塞泵相近的可安置于大型拖拉机的施肥设备, 提升了肥料利用率。杨志春等<sup>[22]</sup>分析

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2024-09-14

基金项目: 安徽省重点研究和开发计划项目(201904A06020053)

作者简介: 朱梅(1977—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: zhumei@ahau.edu.cn

通信作者: 李晓乐(1994—), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为节水灌溉、水肥一体化。E-mail: lixiaole@stu.ahau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

单柱塞泵流量压力输出特性，研究了单柱塞泵的工作原理。

目前应用于农业领域的往复式注肥泵存在机械效率较低，泵箱占用空间较大，重量过大，集成化程度较低，加工与运输成本较高等问题。机械效率是表征能量转换装置效率的重要参数，是施肥设备性能的重要技术指标之一<sup>[23]</sup>。由于施肥设备内部存在多个摩擦副，相对运动和水肥溶液间黏性造成的损失势必导致机械效率降低，影响施肥效益。施肥设备机械效率的高低直接影响整个灌溉系统的效率和工作稳定性<sup>[24]</sup>，机械效率已成为施肥设备选型与应用的重要考虑因素。

【切入点】目前，根据实际调查，工业用往复泵因其工作环境承受压力较大，机械效率远高于农业用泵。又因为往复泵单位时间内抽送的液体体积取决于活塞（柱塞）的截面积、行程长度、冲次及缸数，与压力并无关系，所以工业往复泵可以作用在农业中。工业往复泵在流量可调性、稳定性、防腐性等方面相较农业用泵都有较大提升，虽然相比于工业中动辄 8~10 MPa 的压力工作环境，农业灌溉不论微灌或是喷灌，压力都不会超过 1 MPa，这将导致机械效率有所降低，但同比目前市场上常用的文丘里管、压差式施肥罐，工业往复泵的机械效率依然占有较大优势。因此开展往复式注肥泵的优化设计，研究往复式注肥泵的核心部件改进方案，对于提升水肥一体化机施肥设备性能具有重要意义<sup>[25-26]</sup>。

【拟解决的关键问题】本文基于提升机械效率的目标对往复式注肥泵的核心部件进行改进，设计了一款能够精准调节施肥量、机械效率高、成本低的等截面双作用柱塞泵。运用 Fluent 软件对等截面双作用柱塞泵模型进行仿真，通过提取内部流场流体域中速度矢量、压力矢量及质量分数等特征，确定新式柱塞泵工作腔与内部流道方案设计的合理性，根据仿真结果分析新式柱塞泵模型的设计合理性。将等截面双作用柱塞泵与文丘里施肥管组装入水肥一体化机，进行不同时间内输出水肥可溶性离子浓度（EC 值）变化试验、不同管段输出水肥 EC 值变化试验及新式柱塞泵的机械效率试验，通过试验数据进一步分析等截面双作用柱塞泵的优化程度。研究为提升水肥一体化机机械效率提供试验和理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 泵设计

等截面双作用柱塞泵设备结构如图 1 所示，整机长度 0.75 m，宽 0.25 m，高 0.10 m，由驱动系统、传动系统、进排水系统三部分组成。其中驱动系统

使用供电 DC24V 直流电动机，电动推杆伸出速度 0.03 m/s，扭矩 500 N·m，行程 0.1 m，电机功率因数 0.85；传动系统使用直流电动连杆直线连接柱塞，柱塞往复周期 0.2 m，柱塞杆直径 0.02 m；进排水系统由 304 材质、3/8 尺寸单向阀模组、直径 0.015 m 进出水肥管道、最大工作压力 1.0 MPa，流量 180 L/h 的柱塞泵组成。

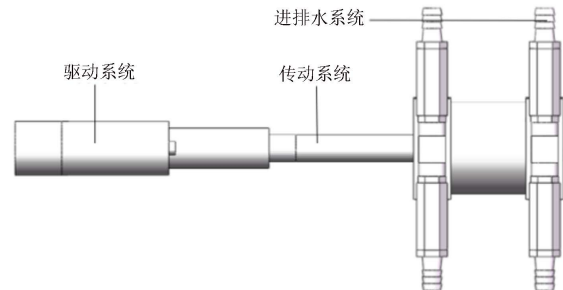


图 1 等截面双作用柱塞泵结构

Fig.1 Structure of constant section double acting plunger pump

等截面双作用柱塞泵通过与直线电机连接，代替传统的曲柄连杆机构传动，避免因侧向力导致柱塞与缸壁间的严重摩擦，减小换向时因压力波动大造成的能量损耗。搭配调速控制器改变柱塞的往复行程工作，可达到精确调节工作流量的目的。电机推动的柱塞在等截面工作腔中往复运动，前后工作腔内进出水肥流量一致，配合单向阀模组控制水肥流向，使流量均匀，提升工作效率。由 2 组单向阀进出水口和三通管道连接组成的双作用流道，配合两侧工作腔持续工作，保证水肥一体化机工作时各管段灌溉水肥浓度一致。

### 1.2 仿真分析

运用 Fluent 软件对等截面双作用柱塞泵的内部流道进行仿真分析，不但可以了解柱塞泵内部流场特点，还能通过进出口水肥溶液质量分数分布云图验证柱塞泵吸入、输出肥料的效果。等截面双作用柱塞泵模型内部流场计算原始模型如图 2 所示。

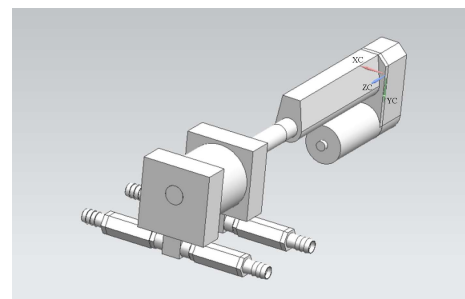


图 2 内部流场计算原始模型

Fig.2 Original model for calculating internal flow field

对等截面双作用柱塞泵内部流场进行建模，如图 3 所示，柱塞泵设计 2 组进出水口，且内部流道相连接。利用 Fluent 内置的 Mesh 软件对流体区域进行网格划分，采用非结构网格，新式柱塞泵内部流

场计算网格整体效果如图 4 所示, 网格划分过程中, 对网格质量进行检查。设置成比例增加的网格数分别进行仿真, 相邻网格数下的仿真参数均相差小于 5%, 仿真参数收敛。本次网格设置总数为 8 876 825, 其中网格正交质量最小为 0.215 1, 满足网格划分需求。

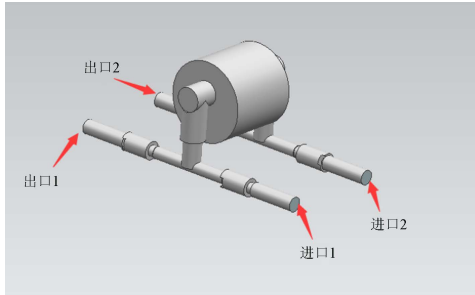


图 3 往复泵内部流场模型

Fig.3 Internal flow field model of reciprocating pump

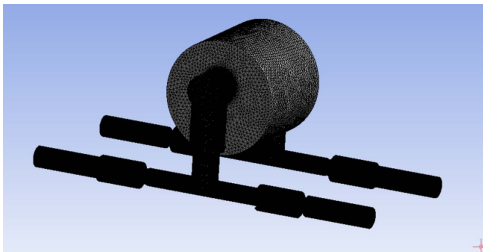


图 4 内部流场计算网格整体模型

Fig.4 Integral model of internal flow field calculation grid

### 1.2.1 流体模型

通过分析柱塞泵出水口附近的流场, Fluent 软件中流体模型的选择将决定在模拟仿真过程中采用何种方程进行求解, 直接影响最终仿真结果。常用的流体模型主要有  $k$ -epsilon 湍流模型 (简称  $k$ - $\epsilon$  模型)、 $k$ - $\omega$  模型和 SST 模型。

$k$ - $\epsilon$  模型具有很好的收敛速率和相对较低的内存要求, 因此在大多数工业设计中应用广泛。它对于复杂几何周围外部流动问题的求解效果优异;  $k$ - $\omega$  模型类似于  $k$ - $\epsilon$  模型, 不过它求解的是动能耗散的具体速率  $\omega$ 。其是一个低雷诺数模型, 比  $k$ - $\epsilon$  模型的非线性程度更大, 因此更加难以收敛, 并且对于解的初始猜测值相当敏感; SST 模型结合了自由流中的  $k$ - $\epsilon$  和近壁的  $k$ - $\omega$  模型。在对分辨率的要求方面, 该模型与  $k$ - $\omega$  模型和低雷诺数模型相似, 但对壁面依赖性强, 不适用自由剪切流。

分析柱塞泵工作腔内流场, 柱塞往复运动的惯性力对流场的影响大于黏滞力, 流体流动较不稳定, 流速的微小变化容易发展、增强, 形成紊乱、不规则的湍流流场, 因此流体模型选择  $k$ - $\epsilon$  模型, 同时还选择 Enhanced Wall Treatment 壁面函数增加模型计算结果的准确度。

在  $k$ - $\epsilon$  湍流模型中湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\epsilon$  方程如下所示:

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = P - \rho \epsilon + D_k, \quad (1)$$

$$\frac{D(\rho \epsilon)}{Dt} = C_1 \frac{P \epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_3 \rho \epsilon (\nabla \cdot \mathbf{u}) + D_\epsilon, \quad (2)$$

式中:  $D/Dt$  为物质的导数;  $\mathbf{u}$  为平均速度矢量;  $D_k$  和  $D_\epsilon$  表示湍动能扩散项, 分别为:

$$D_k = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

$$D_\epsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right), \quad (4)$$

其中:

$$\mu = \nu_0 + \nu_t, \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon, \quad (6)$$

式中:  $\mu$  为有效黏度系数;  $\nu_0$  为分子的黏性系数;  $\nu_t$  为涡流黏性系数。

等截面双作用柱塞泵的设计目的为保证水肥浓度的稳定性与施肥流量的均匀度, 在此过程中水与肥料并不发生化学变化, 所以选用 Species 模型模拟肥液的输送过程。

### 1.2.2 边界条件

采用基于压力的 COUPLED 算法, 梯度项采用基于节点的 GUASS-GREEN 插值格式, 压力项采用体积力权重的插值格式, 动量对流项采用三阶迎风插值格式, 湍动能及比耗散率对流项采用二阶迎风插值格式。计算工况及边界条件如表 1 所示。

表 1 计算工况及边界条件

Tab.1 Calculation conditions and boundary conditions					
工况	进口 1 压力	进口 2 压力	出口 1 压力	出口 2 压力	介质
压力值/MPa	0.5	0.5	0.3	0.3	水

### 1.3 试验方案

开展对比试验, 将等截面双作用柱塞泵与文丘里施肥器应用于水肥一体化机, 开展水肥溶液可溶性离子浓度值 ( $EC$  值)、机械效率测试 2 种试验, 验证新型柱塞泵的优化程度。

#### 1.3.1 试验设备

本次试验在自研的水肥一体化机上实施, 水肥一体化机整机结构如图 5 所示。为了保障等截面双作用柱塞泵吸肥的流畅性, 配置的吸肥管路不宜超过 5 m。等截面双作用柱塞泵样机安装实况如图 6 所示。



图 5 水肥一体化机整机结构

Fig.5 Structure of water and fertilizer integrated machine



图 6 柱塞泵安装

Fig.6 Installation of pump

### 1.3.2 EC 值试验

EC 值通常表示溶液中可溶性盐浓度，也可以用来测量液体肥料或种植介质中的可溶性离子浓度。高或者低可溶性离子浓度都会对作物生长造成抑制或损伤，测量温度通常为 25 ℃。正常的 EC 值介于 1 000~4 000 μS/cm。

试验设计不同作业时间和管道行程 2 种条件下，对比水肥一体化机安装等截面双作用柱塞泵和文丘里施肥器 2 种情况下 EC 值变化，重点分析 2 种施肥设备作用下的水肥溶液浓度波动。试验选用 DN25 文丘里施肥器，长 243 mm，质量为 60 g，工作承压为 0.07~0.90 MPa，工作流量为 0.6~2.4 m<sup>3</sup>/h，自吸能力 9~90 L/h。

为减少误差，相同试验条件下装有 2 种不同施肥设备的水肥一体化机每次工作运行 1 h 以上，反复运行 3 次，取 3 次试验平均值作为试验数据。考虑到水肥一体化机实际灌溉情况，试验设定灌溉压力为 0.2 MPa，循环水肥桶中的肥液按照液体肥料（氯化钾）与清水的质量比为 1:300 进行配置，利用开关阀门调节出水流量<sup>[27]</sup>。

#### 1) 不同时间下输出水肥的 EC 值试验

试验在 0.20 MPa 管道压力下进行，水肥一体化机运行时间设定为 1 h，每间隔 2 min 在灌溉主管道末端提取需要检测的水肥溶液，利用 EC 传感器采集数据并汇总，对比 2 种水肥机排出水肥溶液的变化，分析等截面双作用柱塞泵施肥浓度的精准性。

#### 2) 不同管道行程下输出水肥的 EC 值试验

水肥一体化机灌溉主管道长度约 3 m，管段每间隔 50 cm 加设 1 组取水阀，共设置 4 处，水肥一体化机运行间隔 1 min 时，在 4 组取水阀同时取样。试验进行 3 次，水肥一体化机每次运行 10 min。

### 1.3.3 机械效率试验

输入到泵轴的功率称为轴功率，用  $P$  表示。查阅资料获知柱塞效率和轴功率计算式为：

$$P = \frac{\rho g q H}{1\,000\eta} \approx \frac{q p}{1\,000\eta}, \quad (7)$$

式中： $q$  为泵的流量； $H$  为泵的扬程； $p$  为泵的排出压力； $\eta$  为柱塞泵的效率。

为验证等截面双作用柱塞泵在实际灌溉作业运行中的机械效率，试验将在多种工况下对新式柱塞泵进行功率检测。因为文丘里施肥器不可进行电机转速与柱塞行程比例的调节，所以试验将新式柱塞泵电机转速比、柱塞行程比例均调整至 100% 条件下进行，灌溉主管道压力范围设定 0.10~0.30 MPa，每隔 0.05 MPa 递增。

## 2 仿真分析

### 2.1 特征截面

为方便分析往复泵内部流场计算结果，分别以 2 个进口及泵为中心，创建了 3 个特征截面，各特征截面位置如图 7 所示。

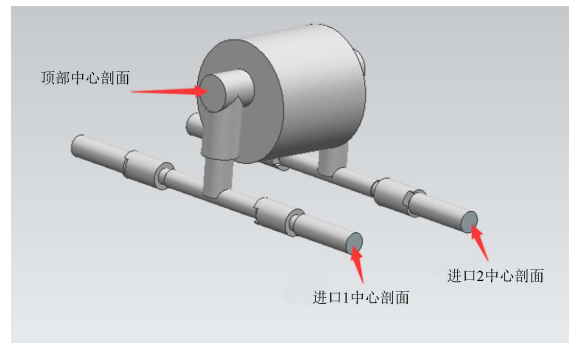


图 7 特征截面

Fig.7 Characteristic section

### 2.2 仿真结果及分析

通过提取进出口 1、2 的速度矢量图、中心剖面参数云图、内部速度流线和进出口的流量变化曲线图，分析等截面双作用柱塞泵内部流道的流场特征。

流道进出口 1、2 的速度云图如图 8 (a)、图 8 (b) 所示，从进出口速度云图中可以看出，肥液水流的提速范围主要集中在 2 组单向阀的中间管段，肥液在流道内流速均匀并无明显波动，说明内部流道设计合理。流道进出口 1、2 的压力云图如图 8 (c)、图 8 (d) 所示，从中心剖面压力云图可以看出，压力梯度分布较为明显的压力区域主要分布于进口处，所以在此处压力区域吸入肥液效果良好。但从压力梯度分布可以看出，进出水口 1 处的压力明显高于进出水口 2，主要原因是直线电机在启闭时会对机械能造成波动，距离柱塞启动时较近的进出水管段将承受这部分压力波动，因此，在实际制作样机过程中因对此影响进行改进设计。

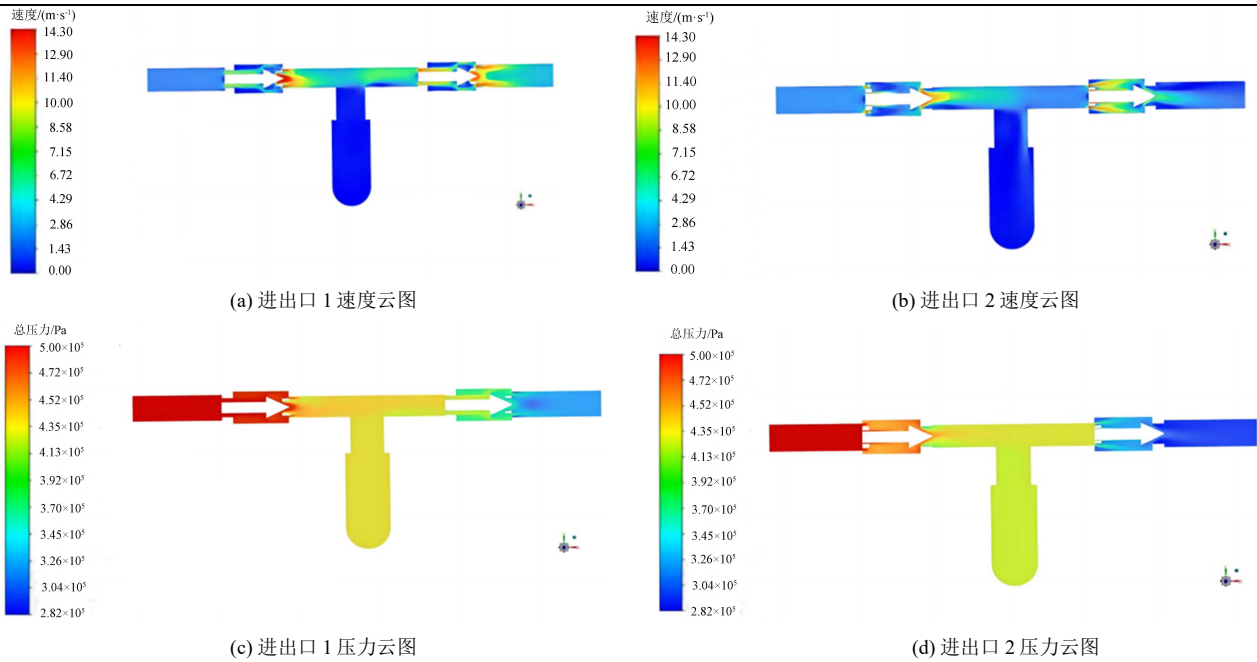


图 8 进出口 1、2 中心剖面参数云图

Fig.8 Import and export 1, 2 central section parameter nephogra

速度流线如图 9 所示，肥液被吸入管道后将被压进等截面双作用柱塞泵工作腔，随着柱塞往复运动将肥液汇入灌溉主管道与水充分混合后灌入农田。2 组单向阀同时工作将大大提升工作腔的工作效率，还能保证进出肥液的稳定性。除了开启时进出水口均有较大波动外，整体运行流量恒定，仿真结果符合样机制造要求。

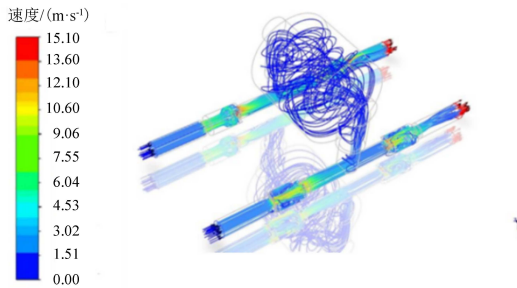


图 9 速度流线图

Fig.9 Velocity streamline diagram

表 2 为柱塞泵进出口流体特性仿真结果，由表 2 可知，当 2 组进出口设定为相同的边界条件时，进出口肥液速度、流量略有差异，具体表现为进口 1 的肥液平均流速、质量流量均略小于进口 2，出口 1 肥液平均流速、质量流量均略大于出口 2。主要原因是进口 2 的肥液流到等截面双作用柱塞泵工作腔下端时，向上流动的速度大于相同位置下进口 1 的速度，因此，部分肥液会通过工作腔汇集流入进口 2 的管道，使进口 1 出口流量变大，出口 2 流量略微减少，具体细节可从图 10 中看出。根据仿真结果可以得出结论，等截面双作用柱塞泵模型符合样机制造要求。

表 2 柱塞泵进出口流体特性仿真结果

Tab.2 Calculation results of fluid characteristics at inlet and outlet of plunger pump simulation

截面	平均流速/(m s <sup>-1</sup> )	平均压力/Pa	质量流量/(kg s <sup>-1</sup> )
进口1	2.405 3	500 000	0.271 50
进口2	2.595 3	500 000	0.293 01
出口1	2.600 9	305 822	0.293 60
出口2	2.400 8	301 414	0.270 90

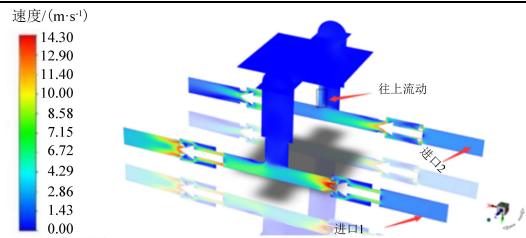


图 10 进出口 1、2 流量流动云图

Fig.10 Import and export 1, 2 flow nephogram

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同时间下水肥 EC 值试验结果分析

图 11 为新式柱塞泵进排水肥溶液的 EC 值监测数据，除新式柱塞泵运行之初，流量不稳定时，EC 值偏高外，其余工作时间 EC 值介于 2 400~ 2 800 μS/cm，所测数据略有波动但都保持在合理范围中，说明新式柱塞泵可以保证水肥一体化机的灌溉工作稳定运行。文丘里施肥器进排水肥溶液的 EC 值如图 12 所示，水肥浓度波动时间长，波动变化大，无法预估各工作时段内水肥溶液浓度。

2 组施肥设备检测出的 EC 值初始浓度普遍高于平均浓度，随后急速下降，出现这种现象的原因是施肥设备在工作开始时，进排肥液未得到完全稀释

便随灌溉水一同排出施肥管道，针对这种问题，需要在施肥设备与灌溉主管道连接处设置注肥喷嘴<sup>[23]</sup>，这样可以保证灌溉水肥能够在较大程度上保持浓度一致，有利于作物生长。

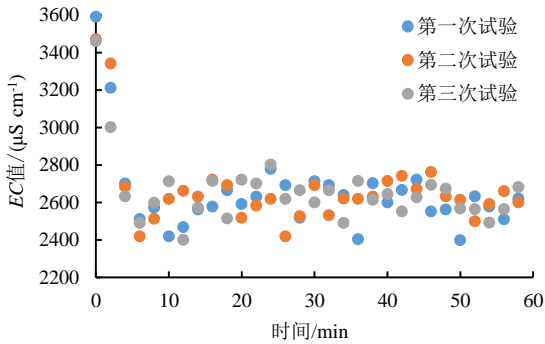


图 11 新式柱塞泵试验

Fig.11 Test of new plunger pump

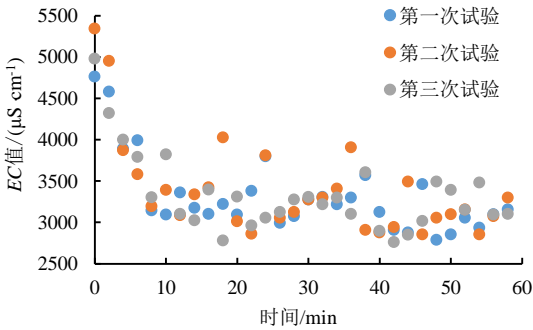


图 12 文丘里施肥器试验

Fig.12 Test of venturi fertilizer

图 13 为灌溉主管道 0.20 MPa 工况下，安装不同施肥设备的水肥一体化机排出水肥溶液的 EC 值监测数据，由图 13 可知，安装等截面双作用柱塞泵的水肥一体化机 3 次试验数据平均值方差仅约为 48.5，EC 值波动明显小于文丘里施肥器试验数据的平均值方差 814.8，其中，等截面双作用柱塞泵的最高 EC 值为 3 590 μS/cm，最低值为 2 399 μS/cm，与文丘里施肥器最高值 5 344 μS/cm，最低值 2 760 μS/cm 相比，极限值波动减少了 54%，这表明同市场上最常用的施肥设备相比，本次研制的新式柱塞泵注肥流量均匀，施肥浓度稳定，有利于市场推广。

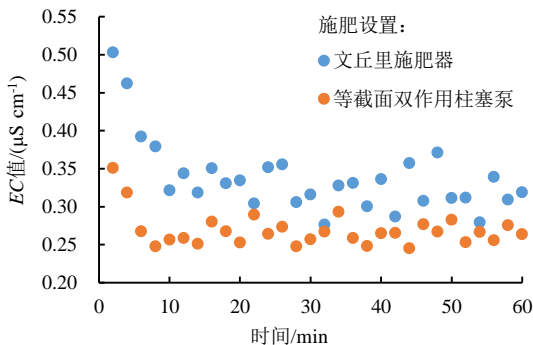


图 13 3 组试验平均 EC 值

Fig.13 Average EC value of three groups of tests

### 3.2 不同管道行程下水肥 EC 值试验结果分析

图 14 为等截面双作用柱塞泵进排水肥溶液在不同管段内的 EC 值测量数据。由图 14 可知，在灌溉主管道 0~50 cm 处，肥液刚通过新式柱塞泵被压入灌溉主管道，肥液未能与灌溉水充分融合，因此前置管段中监测的水肥 EC 值普遍较高；在灌溉主管道 50~100 cm 处，EC 值急剧下降，表明肥液与灌溉水开始充分溶解；在灌溉主管道 100~200 cm 处，EC 值变化趋势平缓，表示等截面双作用柱塞泵注肥平稳，输送水肥流量精准。同文丘里施肥器监测数据（图 15）相比，可以明显看到这一组溶液中的可溶性盐浓度虽然整体保持下降趋势，但其变化波动大，水肥混合不均匀的问题仍然存在，说明文丘里施肥器注肥流量不稳定，单位时间内无法精准控制水肥溶液进排量，导致施肥误差大。

综上，等截面双作用柱塞泵的实际应用可以减少灌溉管道中水肥溶液浓度的差异性，提升水肥混合的均匀性。

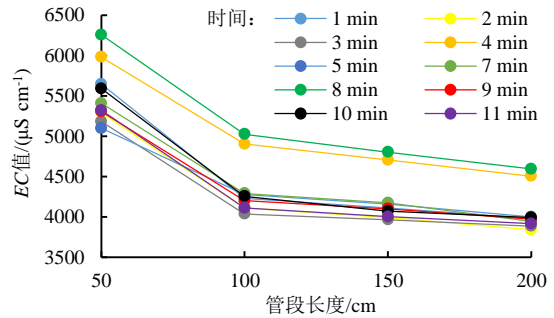


图 14 新式柱塞泵不同管段 EC 值

Fig.14 EC value of different pipe sections of new plunger pump

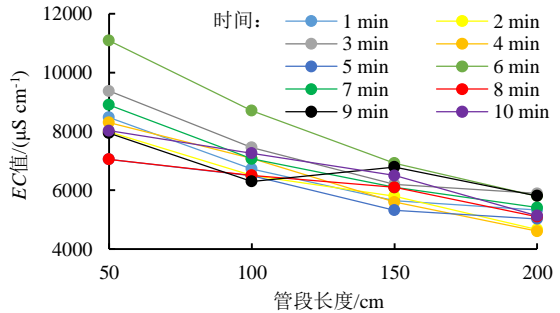


图 15 文丘里施肥器不同管段 EC 值

Fig.15 EC value of different pipe sections of venturi fertilizer applicator

### 3.3 机械效率试验结果分析

图 16 为不同灌溉主管道压力下安装等截面双作用柱塞泵的水肥一体化机运行的机械效率结果。由图 16 可知，在所有工况压力下，根据计算所得机械效率标准方差最大值出现在灌溉主管道压力 0.20 MPa 时，仅约为 0.51，表明新式柱塞泵应用于水肥一体化设备实际灌溉作业中，运行状态良好，机械效率稳定，符合本次研究设计要求。

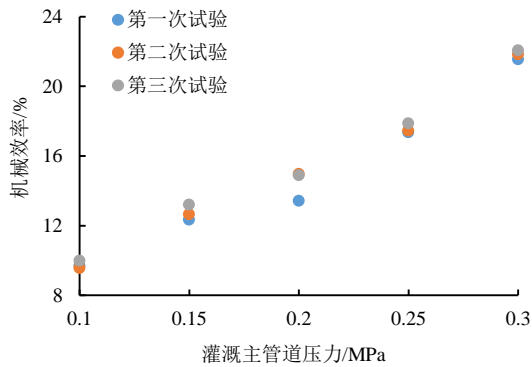


图 16 不同工况下新式柱塞泵实际机械效率

Fig.16 Actual mechanical efficiency of new plunger pump under different working conditions

图 17 为不同灌溉主管道压力下 2 种施肥设备实际运行的机械效率, 无论是等截面双作用柱塞泵还是文丘里施肥器, 机械效率都随着工况压力的增加而提升, 但是当压力增至 0.20 MPa 时, 文丘里施肥泵的机械效率开始变得缓慢, 直至压力增至一定程度后, 其机械效率上升趋势完全停滞, 这验证了文丘里施肥器机械效率随压力变化, 增值一定压力后机械效率便无法提升。当工况相同时, 等截面双作用柱塞泵的机械效率最小值出现在灌溉主管道压力 0.10 MPa 时, 约为 9.55%, 最大值则在灌溉主管道压力 0.30 MPa 时, 约为 22.06%。DN25 文丘里施肥器机械效率最小值同样出现在灌溉主管道压力 0.10 MPa 时, 约为 7.07%。经多次试验验证, 当灌溉主管道压力升至 0.24 MPa 后, 其机械效率达到最大值 14.1%。本次试验工况范围内, 等截面双作用柱塞泵对比文丘里施肥器的机械效率有明显提升, 最大机械效率提升点在 0.30 MPa 时, 约提升 56%。新式柱塞泵在不同灌溉主管道压力下运行更加平稳, 机械效率波动小; 文丘里施肥器在灌溉主管道不同压力下运行, 机械效率测试波动大, 无法调节。

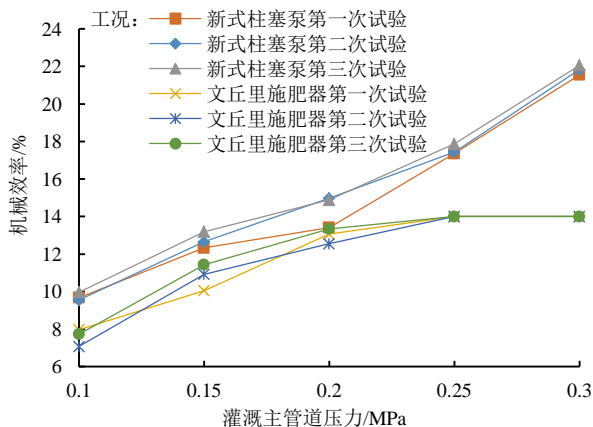


图 17 不同工况下 2 种施肥设备机械效率对比

Fig.17 Comparison of mechanical efficiency of two fertilizer applicators under different working conditions

新式柱塞泵与电动机的直线连接方式可有效减少传统曲柄连杆式换向时因压力波动大导致的传动能量损耗, 避免了因侧向力导致的柱塞杆与工作腔发生的严重摩擦, 提升机械效率<sup>[28]</sup>。因为本研究参考工业用泵设计, 可承受压力远高于目前农业灌溉极限压力, 因此随着喷灌作业压力的增加, 机械效率还将不断提升<sup>[29]</sup>。水肥一体化设备的实际灌溉作业验证了前期试验结果, 即灌溉主管道压力越大, 等截面双作用柱塞泵机械效率越高。参考工业领域柱塞泵设计, 可承受灌溉压力远高于传统水肥一体化设备使用的施肥设备。因此, 随着水肥一体化设备实际灌溉作业中工况压力的增加, 整机机械效率还将不断提升。

## 4 结论

1) 通过建立等截面双作用柱塞泵的流域模型, 分析等截面双作用柱塞泵工作时内部流场的特点, 根据仿真结果验证等截面双作用柱塞泵模型符合进排水肥连续、施肥均匀的设计要求, 经细节优化后实现了样机制作。

2) 将制造完成的等截面双作用柱塞泵样机用于水肥一体化机, 设计不同时间、不同管段输出水肥 EC 值变化试验与机械效率试验, 并与 DN25 文丘里式施肥器进行对比。结果表明, 等截面双作用柱塞泵进排水肥溶液 EC 值极限波动减少 54%。等截面双作用柱塞泵的机械效率最小约 9.55%, 最大约 22.06%, DN25 文丘里施肥器机械效率最小约 7.07%, 最大约 14.1%。试验压力范围内, 新式柱塞泵机械效率提升 11%~56%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 刘曜, 胡筱琼. 高效节水灌溉在高标准农田工程设计中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S1): 52-55.  
LIU Yao, HU Xiaoqiong. Application of high-efficiency water-saving irrigation in high-standard farmland engineering design[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(S1): 52-55.
- [2] CAI D Y, YAN H J, LI L H. Effects of water application uniformity using a center pivot on winter wheat yield, water and nitrogen use efficiency in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2 326-2 339.
- [3] ROBERT P C. Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management[M]. Plant Nutrition. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 692-693.
- [4] 郭依剑, 朱兴业, 陈盛源, 等. 卷盘式喷灌机智能灌溉模糊控制技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 65-69, 95.  
GUO Yijian, ZHU Xingye, CHEN Shengyuan, et al. Fuzzy control on the performance of hose-reel sprinkler irrigation system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 65-69, 95.
- [5] 陈郁, 张清涛, 袁利兵, 等. 不同灌溉方式对旱区葡萄脯氨酸及渗透势

- 迫相关基因的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 9-16.  
CHEN Yu, ZHANG Qingtao, YUAN Libing, et al. The effects of irrigation methods on proline-and osmotic stress-related genes of grape(*Vitis vinifera* L.cv. Moldova) in arid regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(11): 9-16.
- [6] 李红, 汤攀, 陈超, 等. 中国水肥一体化施肥设备研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 200-209.  
LI Hong, TANG Pan, CHEN Chao, et al. Research status and development trend of fertilization equipment used in fertigation in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 200-209.
- [7] ZHANG Z Y, LI H, CHEN C, et al. Design and performance experiment of fertigation equipment using solid fertilizer[C]. Boston: 2019 ASABE Annual International Meeting, 2019: 1901103: 1-10.
- [8] 李红, 张乾坤, 汤攀, 等. 阀门调节式比例施肥泵性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 34-41.  
LI Hong, ZHANG Qiankun, TANG Pan, et al. Performance analysis and test of valve-regulated proportional fertilization pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18): 34-41.
- [9] 庞洵. 往复式柱塞泵密封结构研究[J]. 中国设备工程, 2020(6): 94-95.
- [10] 王宇帆, 王兆强, 张娇. 热流固耦合下柱塞泵配流副参数对摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封, 2021, 46(12): 65-71.  
WANG Yufan, WANG Zhaoqiang, ZHANG Jiao. Influence of port plate pair parameters on friction performance of piston pump under thermal-fluid-solid coupling[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(12): 65-71.
- [11] WANG Z Q, HU S, JI H, et al. Study on the characteristics of oil film load capacity for axial piston pump[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2020, 18(S1): 140-150.
- [12] 杨迦迪, 赵斌, 武兵, 等. 变排量非对称轴向柱塞泵控制性能分析[J]. 液压与气动, 2021(2): 42-49.  
YANG Jiadi, ZHAO Bin, WU Bing, et al. Analysis of control performance of variable displacement asymmetric axial piston pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021(2): 42-49.
- [13] 徐威, 张洪信, 舒培, 等. 缸间齿轮联动液压发动机柱塞泵动力学研究[J]. 机械传动, 2016, 40(5): 5-8, 29.  
XU Wei, ZHANG Hongxin, SHU Pei, et al. Kinematics research of the plunger pump of the gear-linked cylinders hydraulic engine[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(5): 5-8, 29.
- [14] 杜尊令. 轴向柱塞泵效率特性分析及渐变可靠性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.  
DU Zunling. Analysis of efficiency characteristics and research on gradual reliability of axial piston pump[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [15] ZHANG T X, HE D. An improved high-order statistical moment method for structural reliability analysis with insufficient data[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2018, 232(6): 1 050-1 056.
- [16] ZHANG T X, HE D. A reliability-based robust design method for the sealing of slipper-swash plate friction pair in hydraulic piston pump[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(2): 459-469.
- [17] 王晶晶, 卓越, 张颀晖, 等. 柱塞式注肥泵的设计试验及精准施肥应用[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(1): 22-29.  
WANG Jingjing, ZHUO Yue, ZHANG Haohui, et al. Design and test of piston injection pump and its application in precise fertigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(1): 22-29.
- [18] LI H R, MEI X R, WANG J D, et al. Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 244: 106 534.
- [19] 韩明君. 往复泵的技术特点及应用现状[J]. 化工时刊, 2019, 33(5): 38-41.  
HAN Mingjun. Technical characteristics and application status of reciprocating pump[J]. Chemical Industry Times, 2019, 33(5): 38-41.
- [20] THIERRY G, HIGHAM D, VACHER D. Reciprocating hydraulic machine, especially a motor, and dosing apparatus comprising such a motor: US7207260[P]. 2007-04-24.
- [21] DA SILVA M J, MAGALHÃES P S G. A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 150-158.
- [22] 杨志春, 郁林聪. 单柱塞泵流量压力输出特性研究[J]. 液压与气动, 2019(10): 135-140.  
YANG Zhichun, YU Lincong. Study on flow and pressure characteristics of single piston pump[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2019(10): 135-140.
- [23] 江景涛, 杨然兵, 鲍余峰, 等. 水肥一体化技术的研究进展与发展趋势[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 1-9.  
JIANG Jingtao, YANG Ranbing, BAO Yufeng, et al. Research progress and development trend of water and fertilizer integration[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 1-9.
- [24] 范军亮, 张富仓, 吴立峰, 等. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 96-101.  
FAN Junliang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 96-101.
- [25] 戴菲菲, 周永光, 汤根法, 等. 电动隔膜泵性能优化与试验研究[J]. 科学技术创新, 2022(22): 172-175.  
DAI Feifei, ZHOU Yongguang, TANG Genfa, et al. Performance optimization and experimental study of electric diaphragm pump[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(22): 172-175.
- [26] 严登丰, 叶健, 陈茂满, 等. 泵及泵装置效率表达与换算[J]. 排灌机械, 2007, 25(1): 1-8.  
YAN Dengfeng, YE Jian, CHEN Maoman, et al. Pump efficiency and conversion methods for efficiency[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(1): 1-8.
- [27] 张志洋. 固体肥水肥一体化关键装备与技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.  
ZHANG Zhiyang. Research on key equipment and technologies of solid fertilizer fertigation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [28] ZHU M, LUO H, LI X L, et al. Simulation and experiment study on structure optimization of fertilizer injection nozzle[J]. Taiwan Water Conservancy, 2023, 71(1): 201-213.
- [29] 范舟, 李晓乐, 栗昕羽, 等. 等截面双作用柱塞泵结构设计[J]. 农业工程, 2023, 13(3): 92-96.  
FAN Zhou, LI Xiaole, LI Xinyu, et al. Structural design of constant cross-section double-acting piston pump[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(3): 92-96.



## Numerical and experimental analysis of double-acting plunger pump with constant cross section

ZHU Mei<sup>1</sup>, FAN Zhou<sup>1</sup>, LI Xiaole<sup>2\*</sup>, LIU Jingzhe<sup>1</sup>, ZHOU Di<sup>3</sup>

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

2. WangJiaBa Hydrological Station, Anhui Hydrological Bureau, Fuyang 236312, China;

3. Jiangsu Yuanhan Architectural Design Co., Ltd, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** **【Objective】** Integrated irrigation and fertilization has been increasingly used as a water- and fertilizer-saving technology in modern agriculture. However, conventional equipment often suffers from low mechanical efficiency and poor synchronization of water and fertilizer application, limiting its effectiveness. To address these limitations, we designed and evaluated a high-efficiency fertilization pump for integration into irrigation systems.

**【Method】** The device was designed based on the equal-section double-acting pump. We analysed the internal flow characteristics in the pump and established a numerical model to simulate fertiliser flow in the inlet and outlet channels, as well as in the chamber. The k-epsilon turbulence model with enhanced wall treatment wall function was used to increase modelling accuracy. All simulations were conducted using the Fluent software. We first verified that the simulated results met the design requirements for continuous fertiliser flow in the inlet and outlet channels and uniformity of fertilizer application, and then conducted a comparative experiment using the plunger pump and the traditional Venturi fertilizer pump to compare the electric conductivity (*EC*) of solution in the inlet and outlet channels, as well as the mechanical efficiency of the two pumps. **【Result】** The simulated results indicated that the new device achieved continuous and uniform fertilizer application. The experimental results showed that the variance in the *EC* of the solution in the inlet and outlet of the new device was less than 48.5, a significant improvement compared to the variance of 814.8 in the Venturi pump. Furthermore, the new device reduced the fluctuation by 54%; the mechanical efficiency of the new device at 0.30 MPa of working pressure was 56% higher than that of the Venturi pump. **【Conclusion】** The equal-section double-acting plunger pump demonstrated significant improvements in mechanical efficiency, precise fertilizer application, and seamless integration into water-fertilizer systems. These findings provide valuable insights for optimizing fertiliser application equipment, improving structural design and commercial applications of integrated fertilisation and irrigation apparatus in modern agriculture.

**Key words:** plunger pump; Fluent simulation; mechanical efficiency; fertilizer applicator; fertilization

责任编辑: 赵宇龙