doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.019

# 自吸入式气液两相流喷头设计与关键结构参数优化

刘俊萍　解荣俊　汪鑫喆　张玉静

（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，镇江 212013）

**摘要**：针对大田喷雾作业中喷洒液体利用率低和环境污染严重等问题，本文设计了一种自吸入式气液两相流喷头。采用单因素控制变量试验，分析工作压力、驱动喷嘴出口直径、吸气口数量以及 V 形槽切角对喷雾性能的影响。试验结果表明，压力升高会显著增大喷头流量、飘移量与沉积量，但也导致飘移潜力显著上升，尤其在侧风条件下更为明显；当压力为 0.2 MPa 时能在沉积性能与飘移控制之间取得较好平衡。气液两相流作用提升了喷洒液体沉积效率，驱动喷嘴出口直径和 V 形槽切角对雾化性能具有显著影响。喷雾角和沉积量均随出口直径增大而增大。当吸气口数量为 2 时，沉积量较单相流喷头提升 14.0%。V 形槽切角为 20°时喷雾角最大，15°时防飘移性能最优。通过响应面试验及多目标优化获得了喷头最优参数组合，在压力 0.2 MPa 工况下喷雾角达 90.20°且飘移潜力仅为 6.35%，实现了宽喷雾角与低飘移潜力的协同优化。研究结果为大田喷雾作业提供了一种覆盖范围广、飘移损失小的解决方案。

**关键词**：气液两相流喷头；自吸入式；结构参数优化；响应面法；雾化性能

**中图分类号**：S49　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)12-0205-08　　**OSID**：

# Design and Optimization of Key Structural Parameters for Self-aspirating Gas – Liquid Two-phase Flow Nozzle

LIU Junping　XIE Rongjun　WANG Xinzhe　ZHANG Yujing

(*The National Water Pump and System Engineering Technology Research Center*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

**Abstract**: Aiming to address issues such as low liquid utilization and severe environmental pollution in field spraying operations, a novel self-aspirating gas – liquid two-phase flow nozzle was designed. A single-factor controlled variable experiment was employed to analyze the effects of operating pressure, drive nozzle outlet diameter, suction inlet quantity, and V-groove cutting angle on spray performance. Experimental results indicated that increased pressure significantly enhanced nozzle flow rate, drift volume, and deposition rate, yet also led to a marked rise in drift potential, particularly under crosswind conditions. A pressure condition of 0.2 MPa achieved a favourable balance between deposition performance and drift control. The interaction between gas and liquid phases enhanced the deposition efficiency of sprayed liquids. The outlet diameter of the drive nozzle and the V-groove angle significantly influenced atomization performance. Both the spray angle and deposition rate were increased with large outlet diameters. With two air inlets, deposition was increased by 14.0% compared with that with single-phase flow nozzles. The spray angle reached its maximum at a V-groove angle of 20°, while a 15°angle exhibited optimal drift suppression performance. Through response surface experiments and multi-objective optimization, the optimal parameter combination for the nozzle was determined. At an operating pressure of 0.2 MPa, the spray angle reached 90.20° with a drift potential of merely 6.35%, achieving synergistic optimization of a wide spray angle and low drift potential. The research result can provide a solution for field spraying operations characterized by extensive coverage and minimal drift loss.

**Key words**: gas – liquid two-phase flow nozzle; self-aspirating; structural parameter optimization; response surface methodology; atomization performance

收稿日期：2026-01-12　修回日期：2026-01-31

**基金项目**：国家自然科学基金项目(52279036)

**作者简介**：刘俊萍(1982—)，女，教授，博士生导师，主要从事流体机械及排灌机械研究，E-mail：liujp@ujs.edu.cn

## 0 引言

在大田喷雾作业中,喷头是植保机械和喷雾系统的基础部件之一,其性能直接影响整体作业质量[1-3]。以施药系统为例,在喷头喷洒实际应用中,通常过度追求宽喷雾角、高覆盖率以提升作业效率及经济效益,但忽视了喷洒雾滴飘移现象[4-5],易引发环境污染及带来生态问题[6-8]。因此,综合考虑喷头喷洒沉积量、雾滴飘移量等性能参数,对建立高效高性能雾化系统具有重要意义。

国内外学者对喷头雾化方面开展了大量研究,NUYTTENS 等[9]研究表明,选择能产生较大液滴的喷头是抑制飘移常用策略。近年来,气液两相流雾化喷头结构设计,因其喷洒为两相流具有良好的性能,得到了应用推广。FERGUSON 等[10]针对文丘里雾化喷头开展了研究,并与 3 种杀虫剂喷雾溶液与标准喷头进行对比,发现其飘移潜力可降低 85%。BOUSE 等[11]研究表明,无论是否添加助剂,相同工况下,文丘里雾化喷头均能生成更大粒径的雾滴,且飘移量显著低于传统扇形喷嘴。窦硕[12]通过试验发现,在相同喷雾压力条件下空气射流喷头雾滴沉积量显著高于标准扇形雾喷头。国内外对气液两相流喷头结构也开展了大量研究,VASHAHI 等[13]通过参数化试验分析了喉管直径、空气孔布局及混合室长度对进气效率的影响;LEE 等[14]采用高速摄像技术可视化不同倾角下文丘里喷头气泡动力学行为;HYUNWOO 等[15]利用 CCD 相机揭示了自吸入喷嘴内气液两相流型与压力、水流速率和扩散角的关联;WU 等[16]探讨了气通道倾角、气道数和气体入口压力对喷嘴内液体速度、液体体积分数以及液滴粒径的影响规律;SIJS 等[17]探究了平均液滴尺寸与文丘里喷头出口面积的关系。吴恩启等[18]分析了喷嘴气液夹角对喷嘴雾化效果的影响。

尽管国内外在气液两相流喷头结构设计参数优化上取得了一定进展,但针对自吸入式气液两相流喷头研究较少,尤其在关键结构参数交互作用及其对多目标性能的优化机制方面存在明显不足。本文设计一种自吸入式气液两相流喷头,研究压力 0.1 ~ 0.3 MPa 内喷头流量、飘移量、沉积量及飘移潜力变化规律,并结合侧风条件分析压力对雾滴沉积与飘移的影响。通过单因素控制变量法试验,探究关键结构参数对喷雾角、飘移量、沉积量及飘移潜力的影响机制。通过响应面优化法获得交互作用下各因素对响应变量的影响规律,并通过多目标优化获得最优参数组合,以期为大田作物高效低耗喷雾作业提供理论支撑与技术方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 结构及工作原理

自吸入式气液两相流喷头结构如图 1 所示,由喷嘴壳体、设置在喷嘴壳体中混合喷射部件和产生进入射流的驱动喷嘴组成。

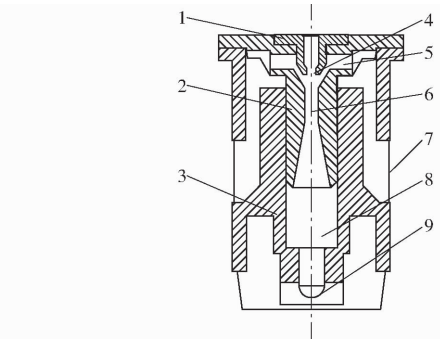


图 1 自吸入气液两相流喷头结构示意图

Fig. 1 Schematic of self-aspirating gas - liquid two-phase flow nozzle structure

1. 驱动喷嘴 2. 混合喷射部件 3. 喷嘴壳体 4. 驱动喷嘴出口 5. 进气通道 6. 混合注射室 7. 吸气口 8. 混合腔室 9. V 形槽

如图 1 所示,驱动喷嘴固定在混合喷射部件内部。高压液体流经驱动喷嘴后,以高速实心射流的形式从驱动喷嘴出口喷出并进入混合注射室。驱动喷嘴出口直径作为关键结构参数直接影响射流流速分布与体积流量。根据伯努利方程,高速射流在注射室内产生显著的局部负压,从而在吸气口处形成与大气压之间压力梯度。在此压差驱动下,环境空气被吸入混合室,而吸气口数量决定吸气量。随后,气液两相流经喷嘴外壳 V 形槽切向喷出,实现雾化过程,V 形槽切角对液膜破碎及雾化锥角具有决定性影响。

### 1.2 试验设计与方法

在江苏大学喷灌实验室进行试验,环境平均温度为 28.6℃,相对湿度为 51.5% ~62.2%,采用风机模拟室外环境提供一定方向的风速。雾滴飘移测试系统如图 2 所示。测试设备由垂直杆、雾滴收集系统、控制单元组成。雾滴收集系统长 4 m,宽 0.5 m,距地面高度 0.3 m,每个雾滴收集单元规格为 0.5 m×0.2 m,凹槽内放置水敏纸,用于收集飘移的雾滴,每个凹槽上面均有滑盖,控制系统可同时打开或关闭所有滑盖。

试验前,将水敏纸放入凹槽,关闭滑盖,垂直杆放置距平台末端凹槽 1 m,当喷杆越过垂直杆上端时控制单元接收电信号,气动阀自动打开雾滴收集系统上方的滑盖,凹槽内水敏纸收集飘移雾滴,在滑盖打开时开始计时,收集时间为 60 s,测试后立即收集并密封水敏纸[19]。启动风机,在雾滴收集系统中

心测得风速为 0.8 ~ 1 m/s，重复上述步骤。

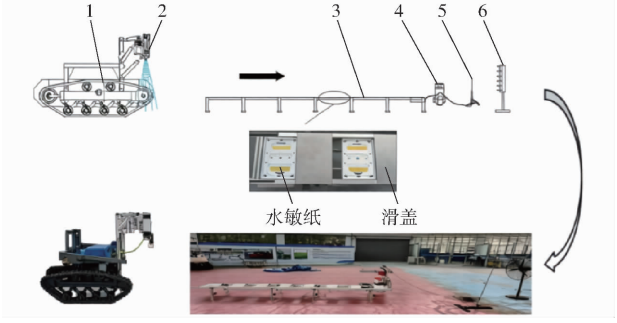


图 2　雾滴飘移测试示意图

Fig. 2　Fog droplet drift test diagram

1. 喷杆式喷雾机　2. 喷杆　3. 雾滴收集系统　4. 控制单元　5. 垂直杆　6. 风机

关键结构参数设计方案如表 1 所示，以上试验均采用单因素控制变量法进行测试。改变压力时，驱动喷嘴出口直径为 0.8 mm，V 形槽切角为 20°，吸气口数量为 2。改变驱动喷嘴出口直径时，V 形槽切角为 20°，吸气口数量为 2。改变 V 形槽切角时，驱动喷嘴出口直径为 0.8 mm，吸气口数量为 2。改变吸气口数量时，驱动喷嘴出口直径为 0.8 mm，V 形槽切角为 20°。试验样机如图 3 所示。

**表 1　关键结构参数设计方案**

**Tab. 1　Core structural parametric design scheme**

| 参数 | 数值 | | | |
|---|---|---|---|---|
| 驱动喷嘴出口直径/mm | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| V 形槽切角/(°) | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 吸气口数量 | 0 | 1 | 2 | |




图 3　试验样机

Fig. 3　Prototype unit

### 1.3　试验性能指标

在喷头出口，作雾化边界切线，两根切线夹角即为喷雾角[20]。喷雾角决定雾滴横向扩散范围，宽喷雾角(如 90° ~ 120°)能提供较大的覆盖面积，适用于大田作物。

雾滴飘移量及沉积量是影响喷雾作业效果的重要因素。试验后将收集的水敏试纸利用分辨率为 600 像素的扫描仪进行扫描，导入配套的雾滴分析软件(六六山下雾滴分析软件 V 2.0)进行识别，分析后得到飘移量及沉积量[21-22]。

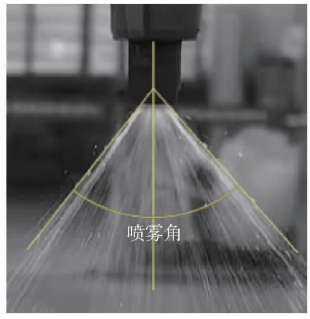


图 4　喷雾角

Fig. 4　Spray angle

喷头飘移潜力反映飘移量及沉积量间的关系，飘移潜力越小越好。参照文献[23]，飘移潜力计算式为

$$d_{PV} = \sum D_i / d_{RS} \times 100\% \quad (1)$$

式中　$d_{PV}$——飘移潜力，%

$D_i$——单位面积飘移量，μL/cm$^2$

$d_{RS}$——理论喷头单位面积沉积量，μL/cm$^2$

## 2　结果与分析

### 2.1　压力对喷头性能的影响

当出口直径为 0.8 mm、V 形槽切角为 20°、吸气口数量为 2 时，不同压力下喷头性能如表 2、图 5 所示。由表 2 和图 5 可知，喷头流量、飘移量、沉积量及飘移潜力均表现出随工作压力升高而增大的趋势，这与标准扇形雾化喷头一致，当引入侧风条件时，各压力工况下飘移量与飘移潜力均呈现显著上升趋势，而沉积量则相应降低。在不同工况条件下，喷头飘移量均表现出随雾滴收集距离增加而减小的趋势，且距离越近，压力对飘移量影响越显著。压力对飘移量影响显著，无侧风条件下，最大飘移量从 0.009 47 μL/cm$^2$ 增至 0.016 3 μL/cm$^2$，增幅达 72.1%。引入侧风后，飘移量进一步升高，说明压力升高加剧雾滴飘移，尤其在外部扰动下更为明显。沉积量随压力上升而增加，有侧风时沉积量略低，表明侧风会干扰雾滴靶向沉积。有侧风时飘移潜力随压力的增长明显高于无侧风工况。低压 0.1 MPa 工况虽能有效抑制飘移潜力，但受限于较低的动能，沉积量也相应较少，0.3 MPa 下能提供较多沉积量，但飘移潜力最大且极易受侧风影响，0.2 MPa 下能兼顾沉积量及飘移潜力。

### 2.2　关键结构参数对喷头性能的影响

#### 2.2.1　喷雾角

喷雾角可评价雾化质量[24]。如表 3 可知，吸气口数量增加导致喷雾角减小。驱动喷嘴出口直径越小，液体流速越高，高动能产生的强压降使射流更加

表 2 不同压力下喷头性能

Tab. 2 Performance of spray nozzle at different pressures

| 压力/MPa | 流量/(L·min$^{-1}$) | 最大飘移量/(μL·cm$^{-2}$) | | 沉积量/(μL·cm$^{-2}$) | | 飘移潜力/% | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 无侧风 | 有侧风 | 无侧风 | 有侧风 | 无侧风 | 有侧风 |
| 0.1 | 0.51 | 0.009 47 | 0.010 3 | 0.241 | 0.235 | 8.27 | 9.98 |
| 0.2 | 0.67 | 0.012 90 | 0.015 0 | 0.310 | 0.299 | 9.01 | 11.21 |
| 0.3 | 0.73 | 0.016 30 | 0.018 2 | 0.334 | 0.319 | 12.22 | 16.81 |

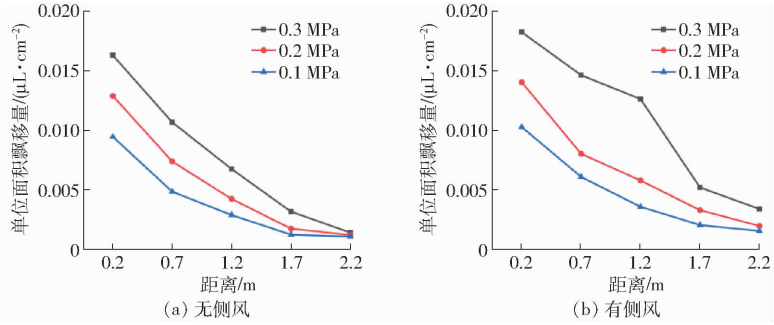


图 5 不同压力下飘移量

Fig. 5 Drift amount under different pressures

表 3 不同结构参数喷头喷雾角

Tab. 3 Spray angle of nozzles with different structural parameters

| 参数 | 吸气口数量 | | | 驱动喷嘴出口直径/mm | | | | V 形槽切角/(°) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 喷雾角/(°) | 132.13 | 128.03 | 125.00 | 71.67 | 98.91 | 119.93 | 125.00 | 73.52 | 83.21 | 125.00 | 85.69 |

集中,从而导致喷雾角缩小。V 形槽切角对喷雾角的影响呈先增后减趋势,切角 20°时喷雾角最大。较小的切角限制了流动空间,而过大的切角则使液流趋向轴向集中喷射,只有适中的切角才能实现最大化横向扩散效果。

### 2.2.2 飘移量

如图 6 可知,单位面积飘移量随雾滴收集距离增加而递减。对比不同结构参数发现:吸气口数量增大能有效降低飘移量,表明其具有显著的抗飘作用。当驱动喷嘴出口直径为 0.5 mm 时,由于流量受限,飘移量降至最低。在 V 形槽结构方面,飘移量随切角增大呈先上升后下降趋势,在切角 15°处获得最优抗飘移性能。

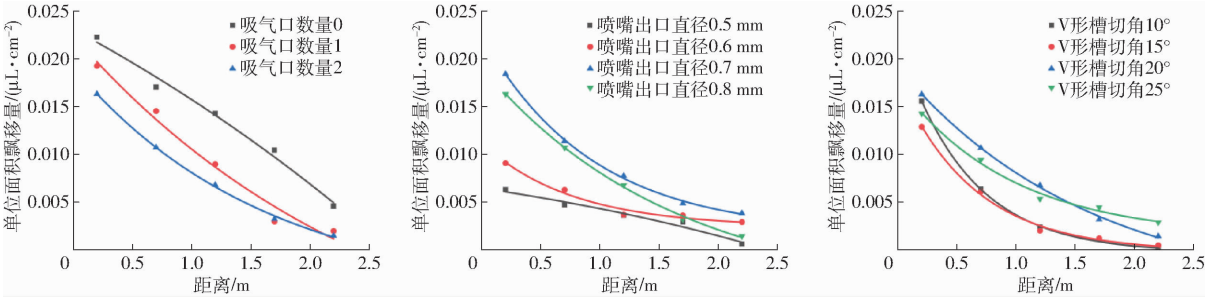


图 6 在 0.2 MPa 下不同结构参数喷头飘移特性曲线

Fig. 6 Drift characteristic curves of nozzles with different structural parameters at 0.2 MPa

### 2.2.3 沉积量及飘移潜力

如图 7 可知,出口直径是决定沉积量的首要因素,二者呈正相关,即较小出口直径导致较低的沉积量和较高的飘移潜力。吸气口数量增加有助于提升沉积量,当吸气口数量为 2 时,沉积效果最佳且飘移潜力最小,体现了气液两相流在改善沉积量与抗飘移方面的优势。V 形槽切角为 10°~20°时对沉积量影响不大,但切角 15°展现出最优抗飘移性能;而当切角增至 25°时,沉积量急剧下降,不利于喷雾作业。

## 3 结构参数优化

### 3.1 试验设计与方法

在大田喷雾过程中,喷雾角决定有效覆盖范围,然而喷头喷雾角越大,飘移潜力也会增大,既会影响沉积量,也会影响周围的生态环境。因此,取喷雾角

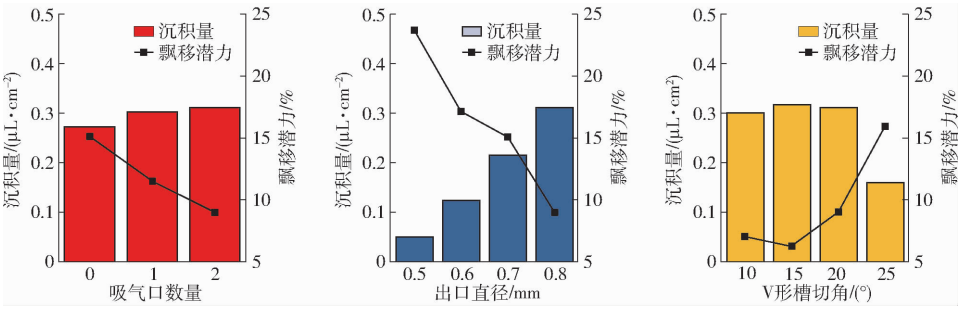


图 7　在 0.2 MPa 下不同结构参数喷头沉积量和飘移潜力

Fig. 7　Deposition and potential drift of nozzles with different structural parameters at 0.2 MPa

和飘移潜力作为响应值。根据单因素试验结果，采用响应面设计试验，根据 Box－Benhnken 中心组合试验设计原理，选择吸气口数量、驱动喷嘴出口直径和 V 形槽切角作为设计因素，进行三因素三水平的响应面试验。试验因素编码如表 4 所示。

**表 4　响应面试验设计因素编码**

**Tab. 4　Response surface design factors codes**

| 编码 | 因素 | | |
|---|---|---|---|
| | 吸气口数量 $X_1$ | 驱动喷嘴出口直径 $X_2$/mm | V 形槽切角 $X_3$/(°) |
| −1 | 0 | 0.6 | 15.0 |
| 0 | 1 | 0.7 | 17.5 |
| 1 | 2 | 0.8 | 20.0 |

## 3.2　结果与分析

### 3.2.1　试验结果

试验结果如表 5 所示。

**表 5　响应面试验设计及结果**

**Tab. 5　Response surface design and results**

| 序号 | 因素 | | | 喷雾角 $Y_1$/(°) | 飘移潜力 $Y_2$/% |
|---|---|---|---|---|---|
| | 吸气口数量 $X_1$ | 驱动喷嘴出口直径 $X_2$/mm | V 形槽切角 $X_3$/(°) | | |
| 1 | 0 | 0.6 | 17.5 | 60.10 | 20.87 |
| 2 | 2 | 0.6 | 17.5 | 55.84 | 16.28 |
| 3 | 0 | 0.8 | 17.5 | 88.32 | 9.94 |
| 4 | 2 | 0.8 | 17.5 | 84.51 | 6.45 |
| 5 | 0 | 0.7 | 15.0 | 75.50 | 10.07 |
| 6 | 2 | 0.7 | 15.0 | 70.67 | 7.78 |
| 7 | 0 | 0.7 | 20.0 | 123.44 | 21.3 |
| 8 | 2 | 0.7 | 20.0 | 116.93 | 15.26 |
| 9 | 1 | 0.6 | 15.0 | 70.30 | 13.49 |
| 10 | 1 | 0.8 | 15.0 | 83.58 | 8.55 |
| 11 | 1 | 0.6 | 20.0 | 94.51 | 25.53 |
| 12 | 1 | 0.8 | 20.0 | 129.89 | 12.63 |
| 13 | 1 | 0.7 | 17.5 | 92.20 | 9.45 |
| 14 | 1 | 0.7 | 17.5 | 95.09 | 9.19 |
| 15 | 1 | 0.7 | 17.5 | 92.35 | 8.57 |
| 16 | 1 | 0.7 | 17.5 | 93.44 | 8.97 |
| 17 | 1 | 0.7 | 17.5 | 93.83 | 9.03 |

### 3.2.2　响应面回归及显著性分析

表 6 与表 7 为喷雾角与飘移潜力响应面模型方差分析结果。喷雾角与飘移潜力的响应面模型均高度显著（$p < 0.0001$），拟合度良好。在喷雾角模型中，各因素影响由大到小为 V 形槽切角、出口直径、吸气口数量，且吸气口数量对喷雾角的影响未达到显著水平（$p > 0.05$）。进一步分析交互作用发现，出口直径与 V 形槽切角的交互项对喷雾角的影响显著。对于飘移潜力模型，$X_1$、$X_2$、$X_3$ 的 $p$ 均小于 0.0001，表明各因素均对其产生影响极显著。其中，出口直径对飘移潜力的影响最大，而吸气口数量影响最小。出口直径与 V 形槽切角交互效应最为突出。

**表 6　喷雾角模型方差分析**

**Tab. 6　Spray angle model ANOVA**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $p$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 6 534.08 | 9 | 726.01 | 59.45 | <0.0001 ** |
| $X_1$ | 47.09 | 1 | 47.09 | 3.86 | 0.0903 |
| $X_2$ | 1 392.60 | 1 | 1 392.60 | 114.04 | <0.0001 ** |
| $X_3$ | 3 391.58 | 1 | 3 391.58 | 277.74 | <0.0001 ** |
| $X_1X_2$ | 0.0506 | 1 | 0.0506 | 0.0041 | 0.9505 |
| $X_1X_3$ | 0.7056 | 1 | 0.7056 | 0.0578 | 0.8169 |
| $X_2X_3$ | 122.10 | 1 | 122.10 | 10.00 | 0.0159 * |
| $X_1^2$ | 385.00 | 1 | 385.00 | 31.53 | 0.0008 ** |
| $X_2^2$ | 569.23 | 1 | 569.23 | 46.62 | 0.0002 ** |
| $X_3^2$ | 691.50 | 1 | 691.50 | 56.63 | 0.0001 ** |
| 残差 | 85.48 | 7 | 12.21 | | |
| 失拟 | 79.90 | 3 | 26.30 | | |
| 误差 | 5.58 | 4 | 1.40 | | |
| 总和 | 6 619.56 | 16 | | | |

注：** 表示影响极显著（$P < 0.01$）；* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）。下同。

### 3.2.3　交互效应分析

如图 8c 可知，响应面形状不规则，具有陡峭的坡度和明显的曲线，轮廓线近似椭圆，表明出口直径和 V 形槽切角之间存在很强的相互作用。由等高线图可知，喷雾角在接近出口直径和 V 形槽切角上限范围内达到最大值。

表 7 飘移潜力模型方差分析

Tab. 7 Potential drift model ANOVA

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ | $p$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 484. 96 | 9 | 53. 88 | 161. 98 | <0. 000 1 ** |
| $X_1$ | 33. 66 | 1 | 33. 66 | 101. 19 | <0. 000 1 ** |
| $X_2$ | 186. 25 | 1 | 186. 25 | 559. 87 | <0. 000 1 ** |
| $X_3$ | 151. 64 | 1 | 151. 64 | 455. 85 | <0. 000 1 ** |
| $X_1X_2$ | 0. 302 5 | 1 | 0. 302 5 | 0. 909 3 | 0. 372 0 |
| $X_1X_3$ | 3. 52 | 1 | 3. 52 | 10. 57 | 0. 014 0 * |
| $X_2X_3$ | 15. 84 | 1 | 15. 84 | 47. 62 | 0. 000 2 ** |
| $X_1^2$ | 8. 83 | 1 | 8. 83 | 26. 53 | 0. 001 3 ** |
| $X_2^2$ | 35. 29 | 1 | 35. 29 | 106. 10 | <0. 000 1 ** |
| $X_3^2$ | 40. 80 | 1 | 40. 80 | 122. 64 | <0. 000 1 ** |
| 残差 | 2. 33 | 7 | 0. 332 7 | | |
| 失拟 | 1. 91 | 3 | 0. 637 4 | | |
| 误差 | 0. 416 5 | 4 | 0. 104 1 | | |
| 总和 | 487. 28 | 16 | | | |

如图 9b 可知,飘移潜力在吸气口数量上限和 V 形槽切角下限范围内达到最低。等高线趋近于椭圆,说明吸气口数量与 V 形槽切角的相互作用对飘移潜力的影响显著。如图 9c 可知,当出口直径为 0. 6 mm 且 V 形槽切角为 20°时,飘移潜力最大。响应面具有陡峭的坡度和明显的曲线,说明出口直径和 V 形槽切角之间存在很强的相互作用。

结合上述 3 个参数的一阶项、相互作用项和二次项,喷雾角和飘移潜力回归方程为

$$Y_1 = 176.54 + 18.85X_1 + 1\,371.88X_2 - 78.83X_3 + 1.13X_1X_2 - 0.17X_1X_3 + 22.10X_2X_3 - 9.56X_1^2 - 1\,162.72X_2^2 + 2.05X_3^2 \quad (2)$$

$$Y_2 = 208.08 - 0.31X_1 - 317.04X_2 - 9.74X_3 + 2.75X_1X_2 - 0.38X_1X_3 - 7.96X_2X_3 + 1.45X_1^2 + 289.52X_2^2 + 0.50X_3^2 \quad (3)$$

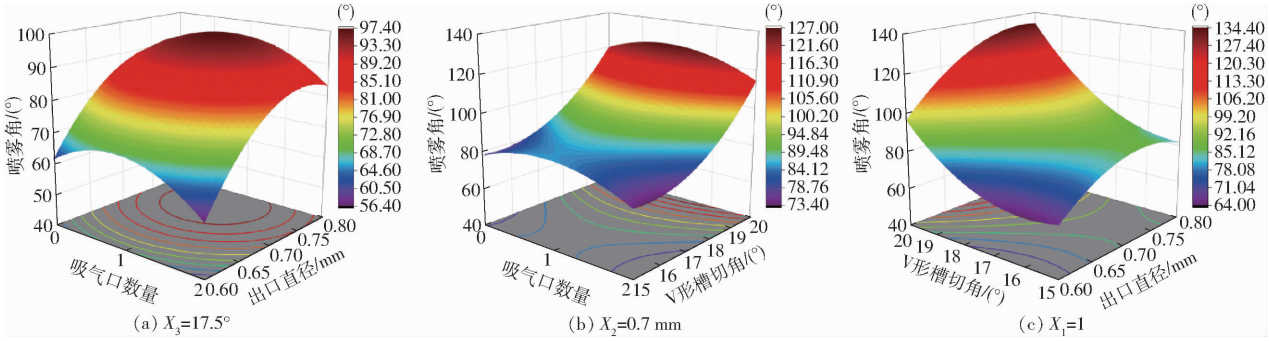


图 8 因素交互作用对喷雾角的影响

Fig. 8 Effect of interaction on spray angle

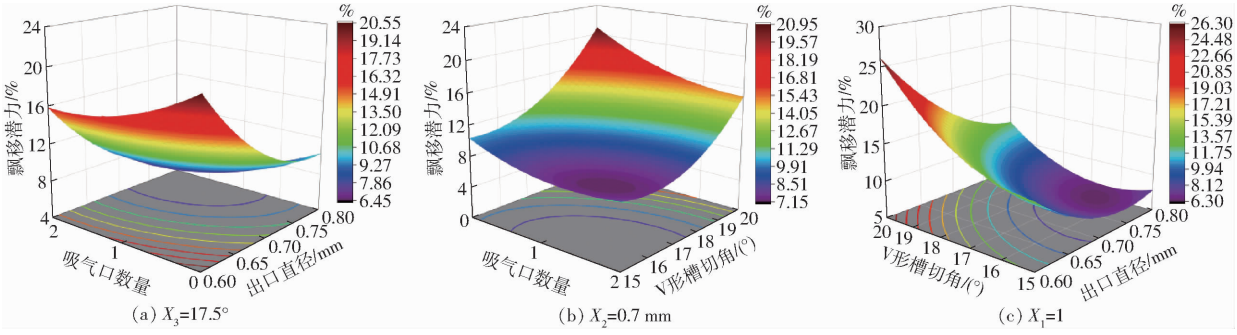


图 9 因素交互作用对飘移潜力的影响

Fig. 9 Effect of interactions on potential drift

### 3.3 喷头结构参数多目标优化

在多目标优化问题中,当多个响应变量间存在目标冲突时,单一响应面函数难以有效处理非线性多目标优化需求[25]。为实现喷头在宽喷雾角与低飘移潜力之间的协同优化,构建了以“喷雾角 90°”和“飘移潜力最小”为双目标的优化模型。采用期望函数法对多目标进行归一化处理,将各响应值转换为 0 ~ 1 之间的期望值 $d_i$,其中越接近 1 表示性能越优。期望函数数学表达式为

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 0 & (y_i(x) < L_i) \\ \left(\dfrac{y_i(x) - L_i}{U_i - L_i}\right)^{w_i} & (L_i \leqslant y_i(x) \leqslant U_i) \\ 1 & (y_i(x) > U_i) \end{cases} \quad (4)$$

$$d_i(y_i(x)) = \begin{cases} 1 & (y_i(x) < L_i) \\ \left(\dfrac{U_i - y_i(x)}{U_i - L_i}\right)^{w_i} & (L_i \leqslant y_i(x) \leqslant U_i) \\ 0 & (y_i(x) > U_i) \end{cases} \quad (5)$$

$$d_i(y_i(x))=\begin{cases}0 & (y_i(x)<L_i)\\ \left(\dfrac{y_i(x)-L_i}{T_i-L_i}\right)^{w_i} & (L_i\leqslant y_i(x)<T_i)\\ 1 & (y_i(x)=T_i)\\ \left(\dfrac{U_i-y_i(x)}{U_i-T_i}\right)^{w_i} & (T_i<y_i(x)\leqslant U_i)\\ 0 & (y_i(x)>U_i)\end{cases} \tag{6}$$

式中　$y_i(x)$——第 $i$ 个响应值

$L_i$——响应优化范围下限

$U_i$——响应优化范围上限

$T_i$——响应优化目标

$w_i$——第 $i$ 个响应权重

式(4)~(6)分别用于求解目标最大化、目标最小化及特定目标值。根据不同优化目的,选择对应的单期望函数进行计算,基于计算结果建立各单期望函数加权几何平均多目标优化函数,即整体期望函数

$$D=\left(\prod d_i^{w_i}\right)^{1/w} \tag{7}$$

优化设计目标为

$$\begin{cases}55.84^\circ\leqslant Y_1\leqslant 129.89^\circ\\ 6.3\%\leqslant Y_2\leqslant 25.53\%\\ \text{s.t.}\begin{cases}X_1=0,1,2\\ 0.6\ \text{m}\leqslant X_2\leqslant 0.8\ \text{m}\\ 15^\circ\leqslant X_3\leqslant 20^\circ\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

利用 Design-Expert 13 软件进行多目标优化求解,通过迭代计算,寻找使整体期望值 $D$ 最大化的参数组合。优化过程中,对多组参数候选方案进行筛选,对比其对应的喷雾角、飘移潜力及整体期望值,最终确定喷头优化结构参数为:吸气口数量 1、驱动喷嘴出口直径 0.77 mm、V 形槽切角 16.71°,喷雾角和飘移潜力分别为 90.20°和 6.35%。该方案不仅兼顾了减少环境污染的生态效益,也满足了大田作业中对广域喷雾覆盖的技术要求。

## 4　结论

(1)自吸入式气液两相流喷头的流量、飘移量、沉积量及飘移潜力均随压力的增大而增大,与标准扇形雾化喷头一致。

(2)增加吸气口数量可提高沉积量并降低飘移潜力,2 个吸气口时防飘性能最佳,沉积量较单相流喷头提高 14.0%,同时飘移潜力显著降低。喷雾角随出口直径增大而增大,在 0.8 mm 时达到最大值 125°。较小出口直径虽能减少飘移量,但沉积量较低,影响作业效率。切角对喷雾角和飘移量有非线性影响。当 V 形槽切角为 15°时,飘移量最少,防飘移性能最优;切角为 20°时喷雾角最大,但飘移潜力较高。

(3)基于响应面法和期望函数准则,优化得到最佳参数组合:吸气口数量 1、驱动喷嘴出口直径 0.77 mm、V 形槽切角 16.71°。在 0.2 MPa 工况下,喷雾角达到 90.20°且飘移潜力仅为 6.35%,适用于大田作物高效作业。

## 参　考　文　献


[1] 曾杨, 伍志军, 李艺凡, 等. 植保静电喷雾技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 52-58.
ZENG Yang, WU Zhijun, LI Yifan, et al. Review on development of electrostatic spraying technology for plant protection[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(1): 52-58. (in Chinese)

[2] 邓巍, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 植保施药喷头研发现状分析[J]. 现代农业装备, 2020, 41(6): 58-63.
DENG Wei, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Research status and suggestions on plant-protection nozzles in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(6): 58-63. (in Chinese)

[3] 刘雪美, 马旻睿, 侯献伟, 等. 气液两相流喷头研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 296-318.
LIU Xuemei, MA Minrui, HOU Xianwei, et al. Research progress and trend analysis of gas-liquid twin-fluid nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 296-318. (in Chinese)

[4] 刘晓慧, 袁亮亮, 石鑫, 等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. 农药学学报, 2022, 24(2): 232-247.
LIU Xiaohui, YUAN Liangliang, SHI Xin, et al. Research progress on spray drift of droplets from plant protection application machinery[J]. Acta Pesticida Sinica, 2022, 24(2): 232-247. (in Chinese)

[5] 吕晓兰, 傅锡敏, 宋坚利, 等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 59-63.
LÜ Xiaolan, FU Ximin, SONG Jianli, et al. Influence of spray parameters on droplet drift characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 59-63. (in Chinese)

[6] 杨学军, 严荷荣, 徐赛章, 等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6):129-131, 137.
YANG Xuejun, YAN Herong, XU Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129-131, 137. (in Chinese)

[7] 翟长远,张焱龙,邹伟,等. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2): 160-169.

ZHAI Changyuan, ZHANG Yanlong, ZOU Wei, et al. Design and test of precision variable-rate spray monitoring and control system based on pesticide spraying traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):160 – 169. (in Chinese)

[8] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133 – 146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133 – 146. (in Chinese)

[9] NUYTTENS D, BAETENS K, SCHAMPHELEIRE D M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 333 – 345.

[10] FERGUSON J C, CHECHETTO R G, O'DONNELL C C, et al. Determining the drift potential of Venturi nozzles compared with standard nozzles across three insecticide spray solutions in a wind tunnel. [J]. Pest Management Science, 2016, 72(8): 1460 – 1466.

[11] BOUSE L F, LEERSKOW R E. Drift comparisons of low-expansion foams and conventional sprays[J]. Weed Science, 1973, 21(5):405 – 409.

[12] 窦硕. 新型扇形雾射流喷头雾滴沉积和飘移潜力特性研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(1): 59 – 66.
DOU Shuo. Study on droplets deposition and drift potential of typical different flat fan nozzles[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(1): 59 – 66. (in Chinese)

[13] VASHAHI F, RA S, CHOI Y, et al. A preliminary investigation of the design parameters of an air induction nozzle[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(7): 3297 – 3303.

[14] LEE H C, CHOI H, JERNG D, et al. Experimental investigation of microbubble generation in the Venturi nozzle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 1127 – 1138.

[15] HYUNWOO B, JAEYONG S. An experimental analysis of water-air two-phase flow pattern and air entrainment rate in self-entrainment venturi nozzles[J]. Energies, 2021, 14(9): 2664.

[16] WU W, ZHANG M, DONG H. Numerical investigation on flow and atomization characteristics of hydrated magnesium nitrate gas – liquid two-fluid nozzle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237(1):83 – 94.

[17] SIJS R, KOOIJ S, BONN D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles[J]. Experiments in Fluids, 2023, 64(2): 43.

[18] 吴恩启, 顾自明, 赵兵, 等. 空气雾化喷嘴的设计与实验研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(4): 69 – 75.
WU Enqi, GU Ziming, ZHAO Bing, et al. Design and experimental study of air atomizing nozzles[J]. Thermal Power Engineering, 2018, 33(4): 69 – 75. (in Chinese)

[19] 王潇楠. 农药雾滴飘移及减飘方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
WANG Xiaonan. Study on spray drift and anti-drift method[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[20] 胡传胜, 熊洪亮, 虞先煌. 喷嘴液滴雾化细度和喷雾角测量装置的研究[J]. 能源研究与信息, 2001(4): 225 – 231.
HU Chuansheng, XIONG Hongliang, YU Xianhuang. An apparatus for determining simultaneously the atomized particle size and spray angle of the atomizing nozzle[J]. Energy Research and Information, 2001(4): 225 – 231. (in Chinese)

[21] 李天华, 董广胜, 姚玉康, 等. 连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 170 – 179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukuang, et al. Design and experiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 170 – 179. (in Chinese)

[22] 王雪儿, 邱林, 丁文兵, 等. 植保无人机飞行参数对不同生育期水稻上雾滴沉积分布的影响[J]. 中国植保导刊, 2025, 45(6): 67 – 71.
WANG Xueer, QIU Lin, DING Wengbing, et al. Effects of plant protection drone flight parameters on dewdrop deposition distribution on rice at different growth stages[J]. China Plant Protection, 2025, 45(6): 67 – 71. (in Chinese)

[23] Crop protection equipment—drift classification of spraying equipment-Part 3: potential sptay drift measurement for field crop sprayers by the use of a test bench: ISO22369 – 3 – 2010[S]. ISO, 2012.

[24] 蒋金成, 刘赵玉, 王沛, 等. 植保无人机精细施药关键技术[J]. 植物医学, 2024, 3(4): 72 – 79.
JIANG Jincheng, LIU Zhaoyu, WANG Pei, et al. Key technology of precision application of plant protection UAVs[J]. Plant Health and Medicine, 2024, 3(4): 72 – 79. (in Chinese)

[25] QIU Y, LAN X, LIU J, et al. Optimization design of nozzle parameters under the condition of submerged water jet breaking soil based on response surface method[J]. Applied Ocean Research, 2025, 154: 104369.