doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.023

气吸式射流喷头内部瞬态流场数值模拟与气液两相流变特性研究

刘昶希[1,2]　赵德继[1]　孙　昊[1]　石　航[1]　闫　闯[1]　李庆达[1]　李宇飞[1]　胡　军[1,3]

（1. 黑龙江八一农垦大学工程学院，大庆 163319；2. 贵州大学绿色农药全国重点实验室，贵阳 550025；
3. 农业农村部大豆机械化重点实验室，大庆 163319）

摘要：气吸式射流喷头（Air-induction nozzle，AIN）具备特殊的文丘里结构，在降低农药雾滴飘移概率、实现精准施药等技术领域得到了广泛应用。为探明气吸式射流喷头内部气液两相瞬态流动分布及文丘里几何结构参数对气液比的影响规律，本文采用 TD 型文丘里管、ST 型扇形喷嘴组合的射流喷头进行数值模拟及气液比预测模型探究。基于开放型进、出口边界条件，采用 VOF 模型、Realizable 湍流控制方法，对 TD－ST 组合气吸式射流喷头进行数值模拟，研究结果表明：组合式 AIN 瞬态流动特性由文丘里管几何参数决定，内部速度和压力在文丘里角处发生显著扩散变化。相同 ST 型喷嘴下，气液两相流中气相体积分数随 TD 文丘里管喉管尺寸增大而减小。TD03－ST06 型组合式 AIN 在压力 0.6 MPa 下气体体积流量达到最大值（0.009 2 L/min）。通过设计进气量测量系统，建立气液比回归模型，依据模型可明晰喉管尺寸与喷雾参数对气液比的影响规律，方差分析结果表明该模型适用于 TD－ST 型组合式 AIN 喷头气液比预测。阐明了 AIN 内部气液耦合规律，为量化分析喷头几何参数、喷雾参数与气液比间的关系提供了参考。

关键词：气吸式射流喷头；VOF 模型；气液比；数值模拟；模型预测

中图分类号：S491　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298（2026）18-0271-11　　**OSID**：

Numerical Simulation of Internal Transient Flow Field and Air－Liquid Two-phase Flow Characteristics on Air-induction Nozzle

Liu Changxi[1,2]　Zhao Deji[1]　Sun Hao[1]　Shi Hang[1]　Yan Chuang[1]　Li Qingda[1]　Li Yufei[1]　Hu Jun[1,3]

（1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *State Key Laboratory of Green Pesticides*, *Guizhou University*, *Guiyang* 550025, *China*
3. *Key Laboratory of Soybean Mechanized Production*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Daqing* 163319, *China*）

Abstract: Air-induction nozzles (AINs) feature a unique Venturi structure, which has led to their widespread application in technical fields such as reducing pesticide droplet drift and achieving precise application. To investigate the transient two-phase flow distribution within the air-induction jet nozzle and the influence of Venturi geometric parameters on the air-to-liquid ratio, numerical simulations and a predictive model for the air－liquid ratio were developed by using a jet nozzle comprising a TD-type Venturi tube and an ST-type fan-shaped nozzle. Based on the VOF model and the realizable $k-\varepsilon$ turbulence scheme, numerical simulations of the TD－ST composite air-induction nozzle were conducted using open-type inlet and outlet boundary conditions. The results indicated that the transient flow characteristics of the composite AIN were determined by the geometric parameters of the Venturi tube, with significant diffusion changes in internal velocity and pressure occurring at the Venturi angle. For the same ST nozzle model, the gas phase content in the gas－liquid two-phase flow was decreased as the throat size of the TD Venturi tube increased. The gas volumetric flow rate of the TD03－ST06 combined

收稿日期：2026－03－22　修回日期：2026－04－25

基金项目：黑龙江省自然科学基金青年基金项目（QC2025C032）、黑龙江省博士后面上项目（LBH－Z25250）、黑龙江省“优秀青年教师基础研究支持计划”项目（YQJH2025161）、黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金项目（XYB202504）、贵州大学绿色农药全国重点实验室开放基金项目（GPLKF202511）和大庆市指导课题（zd－2025－034）

作者简介：刘昶希（1996—），男，讲师，博士，主要从事植保机械与减飘施药技术研究，E-mail：liuchangxi0527@163.com

通信作者：胡军（1972—），男，教授，博士生导师，主要从事植保机械设计研究，E-mail：gcxykj@126.com

AIN reached a maximum value of 0.009 2 L/min at 0.6 MPa. By designing an air intake measurement system, a gas - liquid ratio regression model was established. Based on this model, the influence of throat dimensions and spray parameters on the gas - liquid ratio can be clearly elucidated. Analysis of variance confirmed that this model was suitable for predicting the gas-liquid ratio of TD - ST composite AIN nozzles. The research result elucidated the gas - liquid coupling mechanisms within AINs, providing a reference for the quantitative analysis of the relationship between nozzle geometric parameters, spray parameters and the gas-liquid ratio.

Key words: air-induction nozzle; VOF model; air - liquid ratio; numerical simulation; model prediction

0 引言

中国是农业大国,有害生物多发、频发、重发。施用化学农药防治病、虫、草害是目前最有效的防治手段[1-4]。目前,农药施用方法经多年演变仍以液体药剂喷洒居多[5-8]。在农药喷施过程,部分农药雾滴会被气流携带向非靶标区域飘移而造成飘失[9-13]。导致农药飘移的因素主要有雾滴尺寸、药剂类型、施药技术及气象条件等。目前,减少雾滴飘移的方法有多种,如采用罩盖技术、循环喷雾技术、风力辅助喷雾技术、变量喷雾技术等[13-15]。基于上述防飘、减飘高效施药技术研制的新型植保装备为农药减量提供了重要保证手段、同时也助推了农药利用率提高和农药减量计划实施。

与上述研究方法相比,解决雾滴飘移最直接有效的方法为提高雾化部件即喷头的抗飘移性能[16-19]。使用气吸式防飘喷头(AIN)是降低农药雾滴飘移概率、实现精准施药的重要技术方式。与普通喷头相比,AIN 具备特殊的文丘里结构,当进行施药作业时,可通过高速液流诱导空气进入液相在气液混合腔内形成微气泡,以此扩大喷射液滴分布的总体平均尺寸抵御飘移[20-22]。其中,被诱导空气与液体的体积比称为气液比(ALR),是衡量雾化特性的重要指标[23-24]。

目前,AIN 相关研究大部分集中在与标准喷头雾化、飘移、沉积性能对比上。Doruchowski 等[25]研究了同型号标准扇形喷头和 AIN 的粒径谱宽、覆盖率和潜在飘移概率。Yu 等[26]基于高速风洞对标准扇形喷头和 AIN 雾化特性进行了探究,试验结果可为固定翼有人机航空施药喷头选型提供参考。由于常规 AIN 喷嘴(如 LECHLER 公司生产的 IDK)体积较小,通过探究 AIN 内部流动特性改进喷嘴结构较为困难。因此,改变 AIN 几何结构探究其自吸气性能影响雾化特性的研究较少。

常规 AIN 喷嘴孔径略大于同型号标准扇形喷嘴孔径,因此有部分学者认为 AIN 产生雾滴尺寸增大是由于喷嘴孔径增大。对此,Butler 等[27]设计并研制了一种可变孔口直径和喉管尺寸的 AIN,并从雾滴粒径分布及流速对雾化特性进行了宏观意义上的表征。Vashahi 等[28]制造了一种易于更换部件的气吸式射流喷头,并分析了文丘里喉管、空气孔直径等参数对 AIN 自吸气效果的影响。基于前期研究成果,Vashahi 等[29]基于 STAR CCM + 软件,采用流体体积法(VOF)对设计的可变几何结构 AIN 进行了数值模拟。现有研究采用试验测试或数值模拟方法研究喷嘴几何结构、药液理化性质等对 AIN 雾化特性的影响。虽然自制 AIN 可通过改变文丘里结构各关键几何参数,探究雾化特性,但喷嘴几何尺寸与标准扇形喷头尺寸差异较大,并不适合得出普适性的研究结论。

基于上述研究背景,本文采用基于气液耦合的数值模拟技术与试验验证相结合方法对组合式 AIN 内部气液两相瞬态流动特征及气液比模型进行研究。基于气液两相流体动力学,对 AIN 内部气液两相流动特性及关键几何尺寸进行分析,确定 AIN 仿真模型组合。基于 CFD 技术对 AIN 进行数值模拟。通过设计进气量测量系统,建立气液比回归模型,阐明 AIN 内部气液耦合规律。以期为生产含气雾滴的 AIN 组合提供设计依据,也为推广 AIN 进行防飘、减飘喷雾作业提供使用参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

由于一体化生产的 AIN 已固定文丘里管管径及喷头型号,难以改变单一变量进行试验测试。此外,一体化生产的 AIN 喷嘴体积较小且进气口结构复杂,难以对自吸气特性进行测量分析。对此,根据 Hu 等[30] TD - ST 组合式 AIN 流量测试研究,将德国 Agrotop 公司生产的 Turbo Drop 系列文丘里管与德国 Lechler 公司生产的 ST 系列扇形喷嘴进行组合并对各型号文丘里管-喷头组合进行测试,将雾化效果正常且进气孔无漏液现象组合作为试验用喷头(图 1)。组合式 AIN 与常规一体式 AIN 工作原理相同,均是基于高速液流产生的文丘里效应,由进气口向喷头内部吸入空气,使喷出的雾滴含有微气泡结构,抵御飘移。



图 1　TD－ST 组合气吸式射流喷头

Fig. 1　Combination of TD－ST type AIN

1.2　试验设备与方法

TD－ST 组合式 AIN 气液比测量试验在黑龙江八一农垦大学 HARDI 植保机械学院进行，测量原理示意图如图 2 所示。室内温度为 20℃。试验用液体由空压机向储液罐加压提供，通过压力梯度 0.2 ~ 0.6 MPa 进行测试。液体压力由 Suxun SUX90A－0－10Mpa型扩散硅压力传感器监测，测试精度为 1%，具备数字显示屏可实时读数。在喷嘴底部设置液体接收器，可实时收集液体。

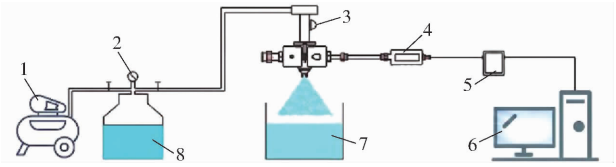


图 2　ALR 测量原理示意图

Fig. 2　Schematic of ALR measurement test

1. 空压机　2. 压力表　3. 紧固装置及喷头　4. 气体质量流量传感器　5. 电信号转换模块　6. 数据分析模块　7. 液体接收器　8. 储液罐

如图 3 所示，Siagro MF4700－50－R－BV－A 型气体质量流量传感器(Santa Clara CA，美国)放置在文丘里管与气体传输紧固模具相通的空气传输通道前端，用于测量空气流量，该传感器可监测流量范围为 0.000 1 ~ 10 L/min，通讯输出为 RS485 modbus RTU，通讯接口为 R1/4，测试精度为 ±(1.5 + 0.2FS)%。为防止测试气体逸出，将文丘里管与气体传输紧固模具之间用特制橡胶模具进行密封。当喷头进行喷雾作业时，基于伯努利定律及文丘里效应的外部空气由文丘里管气孔进入气体传输通道，由气管传输后被气体质量流量传感器采集、电信号模块转换为数据后储存至 Siargo User Application 气体质量流量记录软件中。该软件由 Siargo 开发，可对指定时间段内气体质量流量数据进行专业处理与分析。

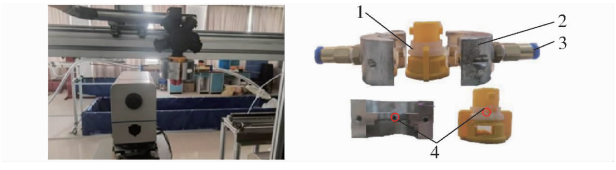


图 3　文丘里管与气体传输紧固模具安装和试验

Fig. 3　Installation and field test of Venturi tube and air transmission fastening mold

1. 橡胶模具　2. 气体传输紧固模具　3. 气体传输通道　4. 文丘里管气孔

2　气液比监测与喷头内部瞬态流场数值模拟

2.1　模型构建

AIN 是一种利用射流技术将空气和水混合形成二相流的雾化喷嘴，工作原理与射流泵类似：通过特殊的文丘里结构，在内部收缩段使流速迅速增加，液体从压缩段射出后，在出口附近形成真空区，并将外界空气吸入，液体和空气进入气液混合压缩段，此时二相进行混合及能量交换，共同进入扩散段，在扩散腔形成气液两相流，然后再通过喷嘴喷出充满空气泡的大雾滴。试验结果表明这些大雾滴具有很好的抗飘移性，且含有气泡雾滴击中靶标后会爆裂形成小雾滴，形成良好的覆盖效果。

由气液两相流体动力学可知，AIN 雾化良好的关键在于使扩散腔内形成稳定的泡状气液两相流。泡状气液两相流稳定流态与混合室直径和长度有关，也与液体性质有关。对于 AIN 中气液两相流动问题的研究，可近似认为当两相流均匀时，泡状气液两相流动临界速度 c 为

$$c=\sqrt{\frac{\rho_a}{\beta^2\rho_a+\beta(1-\beta)\rho_l}}c_a \tag{1}$$

式中　ρ_a——空气密度，kg/m^3

ρ_l——液体密度，kg/m^3

c_a——气体速度，m/s

β——空隙率，%

气液两相流平均密度 ρ_n 为

$$\rho_n=\frac{1+ALR}{\frac{1}{\rho_l}+\frac{ALR}{\rho_a}} \tag{2}$$

式中　ALR——气液比

喷嘴临界流量 M 为

$$M = \mu AcP = \mu Ac_a P_a \sqrt{\frac{1 + ALR}{ALR}} \tag{3}$$

式中 A——缩孔面积,mm^2 μ——流量系数

P——喷雾压力,Pa

P_a——空气压力,Pa

流量系数通常取 0.58 ~ 0.65,当喷施液体压力确定后,液体前置进口直径 d_p 计算式为

$$d_p = \sqrt{\frac{M_l}{\frac{\pi}{4}\mu[2\rho_l(P_l - P_m)]^{0.5}}} \tag{4}$$

式中 P_m——混合室压力,Pa

P_l——液体压力,Pa

M_l——液体流量,L/min

由气液两相流体动力学可知,空隙率 β、液体前置进口直径 d_p 等都会对混合室内流态产生影响。研究表明,当 $\beta > 0.3$ 时泡状流已很难维持。β 与气液比 ALR 关系为

$$ALR = \frac{\rho_a}{\rho_l}\frac{\beta}{1-\beta} = \frac{M_a}{M_l} \tag{5}$$

式中 M_a——气体流量,L/min

TD - ST 组合式 AIN 仿真模型几何尺寸如图 4 所示。由式(1) ~ (5)可知,进气孔直径 d_a 增加会使气体流量 M_a 增大,从而使 ALR 有所提高。液体前置进口直径 d_p 对液体流量特性和运行参数影响同样显著。混合室压力 P_m 也是决定 AIN 稳定工况的重要原因,主要由文丘里角 θ、前置进口直径与喉管直径比 d_p/d_t 决定。所以 d_p、θ、d_t、d_a 是 AIN 稳定工作关键。通过逆向工程扫描,得到 3 种 TD 型文丘里管文丘里角 θ 均为 30°、进气孔直径 d_a 均为 1.8 mm,TD - 02、TD - 03、TD - 04 前置进口直径与喉管直径比 d_p/d_t 分别为 0.69、0.76、0.85。

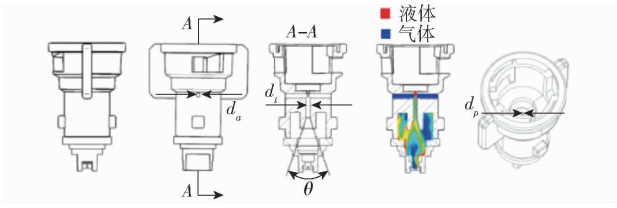


图 4 TD - ST 组合式 AIN 仿真模型关键几何尺寸

Fig. 4 Simulation model of TD - ST type AIN with key geometric ruler

2.2 CFD 数值模拟方法

2.2.1 模型构建

使用 TD - ST 组合式 AIN 作为初始模型。利用逆向工程技术对 AIN 进行测绘后使用 NX 10.0 对其进行仿真建模,如图 5 所示。为分析不同几何参数下 TD - ST 组合式 AIN 的 ALR,利用 CFD (ANSYS)软件的流体动力学计算方法进行数值模拟分析。

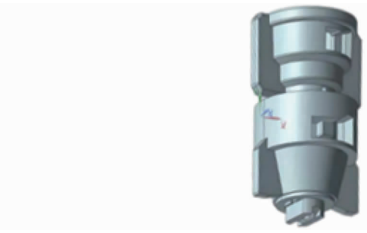
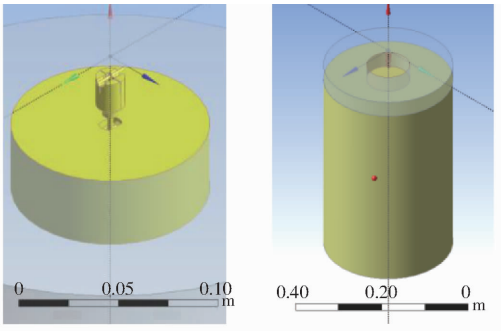


图 5 TD - ST 型 AIN 模型

Fig. 5 TD - ST type AIN model

2.2.2 计算域构建

对 AIN 进行模型简化,在 CFX 网格软件中建立 AIN 流场计算域,并将流场分为 2 部分:①AIN 内部气液两相计算域,如图 6a 所示。②AIN 外部喷嘴雾化计算域,如图 6b 所示。



(a) 内部计算域 (b) 外部计算域

图 6 计算域划分

Fig. 6 Calculation domain diagrams

2.2.3 控制方程与湍流模型

采用流体体积法(VOF)对 AIN 气液两相流进行数值模拟,体积分数运算守恒方程为

$$\int_{V_p} \varepsilon_i \mathrm{d}V + \int_S \varepsilon_i (v - v_g)\,\mathrm{d}\boldsymbol{a} = \int_{V_p} \left(S_{\varepsilon i} - \frac{\varepsilon_i}{\rho_i}\frac{\mathrm{d}\rho_i}{\mathrm{d}t}\right)_i \mathrm{d}v \tag{6}$$

式中 V_p——多相流总体积,cm^3

v——混合速度,m/s

$\boldsymbol{a}$——表面积向量 ε_i——体积分数

$S_{\varepsilon i}$——第 i 相密度的拉格朗日导数

$\mathrm{d}\rho_i/\mathrm{d}t$——第 i 相质量分数的拉格朗日导数

v_g——气泡速度,m/s

S——边界表面积,cm^2

ρ_i——第 i 相密度

在 VOF 方法中,对于 2 种不同粘度和密度流体,可将 Navier - Stokes 方程用于一维公式进行方程求解。因此,各相连续性方程和动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_{V_p} \rho \mathrm{d}V\right) + \oint_A \rho v \mathrm{d}A = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\int_{V_p} \rho v \mathrm{d}V\right) + \oint_A \rho v \otimes v \mathrm{d}A = -\oint_A P\boldsymbol{I}\mathrm{d}A + \int_A \boldsymbol{T}\mathrm{d}A + \int_{V_p} \rho g \mathrm{d}V + \int_{V_p} \boldsymbol{f}_b \mathrm{d}V - \sum_i \int_A \varepsilon_i \rho_i \boldsymbol{v}_{d,i} \otimes \boldsymbol{v}_{d,i} \mathrm{d}A \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{I}$——单位张量

$\boldsymbol{T}$——应力张量　　$\boldsymbol{f}_b$——重力矢量

$\boldsymbol{v}_{d,i}$——第 i 相绝对速度矢量，m/s

g——重力加速度

2.2.4　网格划分

采用非结构网格划分 AIN 内、外部分流场。设置内部气液两相计算域为 100 mm × 300 mm × 50 mm（内直径 × 外直径 × 高），外部喷嘴雾化计算域为 300 mm × 500 mm（直径 × 高）。采用逆向工程技术建立各组合 AIN 模型关键参数。为确保计算结果准确性，对模型关键部位，如液体进口、气体进口、喷雾出口等进行网格加密，网格总数为 1.6×10^6，并将文丘里喉管设置为进水口，喷嘴为自由流动出水口，进气口为自由流动入口（图 7）。为准确预测跨壁边界层流动情况，将喷嘴其他部分视为具有无滑移边界的壁面。

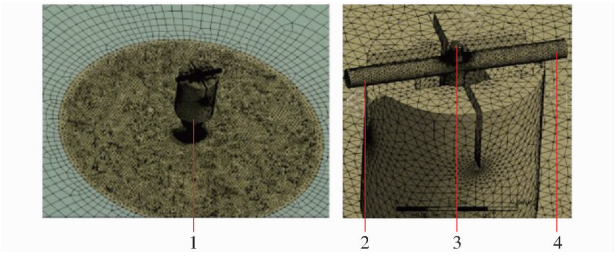


图 7　网格加密

Fig.7　Local grid encryption

1. 出水口　2、4. 进气口　3. 进水口

3　结果与分析

3.1　气液两相流场分布

3.1.1　压力和速度分布

喷雾压力 0.6 MPa 下，TD02 − ST06 型组合式 AIN 沿中心线的速度和压力分布如图 8 所示。根据速度及压力分布，将喷头内部划分为 6 个区域。由于喉部 A 面积增加，在孔前区域速度较高，然后在喉部区域减小。在文丘里角处，随着面积逐渐增大，速度逐渐降低，速度最低值在气液混合室内为 0.27 m/s。在喷嘴出口，随着压力能转化为动能，速度急剧增加。喷嘴内压力变化与速度变化相反，在混合液到达喷嘴前随着面积增加而逐渐增大。但压力在区域 C 出现先增大后减小变化，是由于混合液在文丘里角处产生了扩散作用。

由图 8 可知，当液体以较高速度喷射到文丘里喉道时，在文丘里喉道周围产生 1 个低压区，从而使空气被吸入喉道。该压力低于环境压力，并作为夹带空气的驱动力。在扩散器区域内，随着横截面积逐渐增大，速度逐渐减小，动能转化为压力能。为证明上述能量转变规律，通过分析两相流速度矢量进

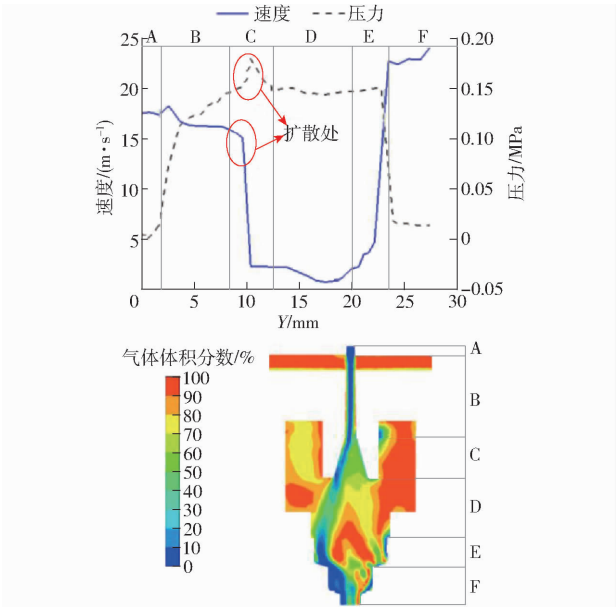


图 8　AIN 内部沿中心线液体速度和压力以及气体体积分数分布

Fig. 8　Velocity and pressure distribution along centerline and air volume fraction of AIN

一步探明文丘里几何尺寸对 AIN 自吸气效果的影响。在喷雾压力 0.6 MPa 下，3 种组合式 AIN 速度矢量分布如图 9 所示。

从图 9 可知，不同组合式 AIN 气液两相流均具有较高矢量速度，但由于 TD02 型文丘里管前置进口直径与喉管直径比较小，降低“伯努利效应”产生的压差，导致 TD02 − ST06 型组合式 AIN 转移空气的驱动力不足，从而降低两相流速度。随着喉管直

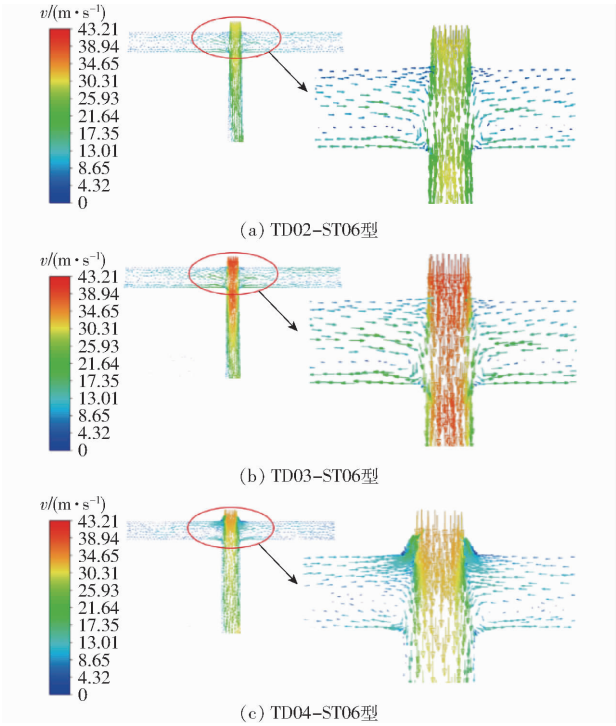


图 9　喉管区域速度矢量分布

Fig. 9　Velocity vector distribution at throat region

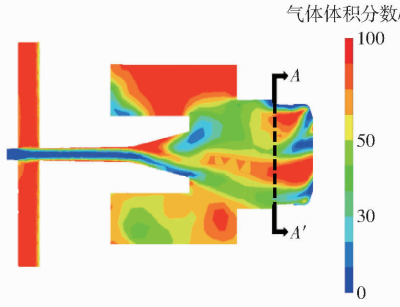
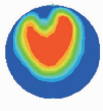
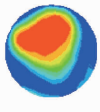
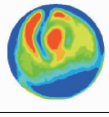
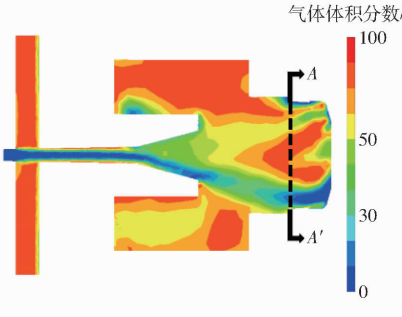
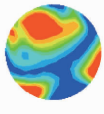
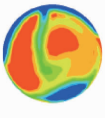
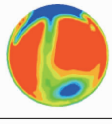
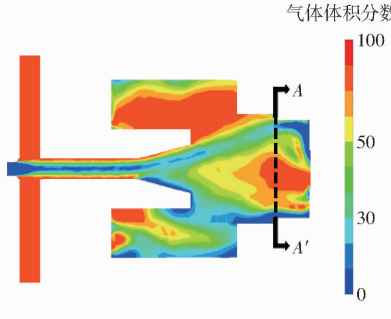
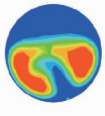
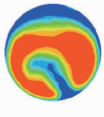
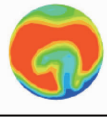
径增加(直径比增大),TD03 - ST06 型组合式 AIN 矢量速度达到最大(43.21 m/s),是由于水射流占据面积增加,进而增大“文丘里效应”产生的压差。但随着喉道直径进一步增加,TD04 - ST06 型组合式 AIN 在吸气区出现“涡旋”区域。表明当前置进口直径与喉部直径比值达到 0.85 时,吸气区内部气相流体和喉管内部液相流体产生的“混合液团结构”会诱发回流运动,是由于“文丘里效应”压差增大使得“混合液团结构”内回流速度增大,因此“混合液团”随着液相速度增大而逆向运动。气液两相之间的动量传递使得气流动量减小而液体动量增加,气流速度越大动量传递也越强,由此导致回流区气流的最大负速度随着射流液相增大呈下降趋势,最终降低了空气夹带率。

3.1.2 气液两相体积分数

3 种组合式 AIN 在混合区气体体积分数分布如表 1 所示。在 CFD 后处理中,为获得表征整体进气性能的 ALR,在喷头出口截面设置监测面。通过计算该截面上气体体积流量平均值与液体体积流量平均值,两者比值即为仿真得到的气液比。随着喷雾压力增加各组 AIN 气体体积流量 M_a、液体体积流量 M_l 以及二者比值 M_a/M_l(ALR)均逐渐增大。其中,TD03 - ST06 型组合式 AIN 在 0.6 MPa 下气体体积流量达到最大值(0.009 2 L/min)。但在同一喷雾压力下,气体体积流量并不随着文丘里管喉管尺寸增加持续增大。是由于在同一喷雾压力下,组合式 AIN 流量仅由文丘里管喉管尺寸决定,虽然较大喉管尺寸可以产生更大气体体积流量,但同时液体体

表 1 AIN 气体体积分数分布

Tab.1 Volume fraction of air in AIN

喷头类型	喷雾压力/MPa	A–A′	气体体积流量/(L·min⁻¹)	液体体积流量/(L·min⁻¹)	气液比
 TD02–ST06型	0.4		0.0036	0.95	0.0038
	0.5		0.0044	1.08	0.0041
	0.6		0.0051	1.16	0.0044
 TD03–ST06型	0.4		0.0061	1.58	0.0039
	0.5		0.0078	1.79	0.0044
	0.6		0.0092	1.96	0.0047
 TD04–ST06型	0.4		0.0045	1.98	0.0022
	0.5		0.0073	2.21	0.0033
	0.6		0.0089	2.46	0.0036

积流量也随之增大，导致二者比 M_a/M_l 并不呈线性持续增长。从气液两相体积分数分布可以看出，TD03 型文丘里管与 ST06 型喷头进行搭配使用时，可以产生更大气液比。

3.1.3　气液比

在喷雾压力 0.6 MPa 下，3 种组合式 AIN 在喉部区域气体体积分数如图 10 所示。在同一喷雾压力下，TD03－ST06 型组合式 AIN 喉部区域气体体积分数最高。随着前置进口直径与喉管直径比增大，液体射流所占面积逐渐增大，但随着喉道直径进一步增加，水流速减小，夹带气体的动量减小，导致 ALR 降低。此外，液体流量增大也使气体体积分数降低，与表 1 结果一致。

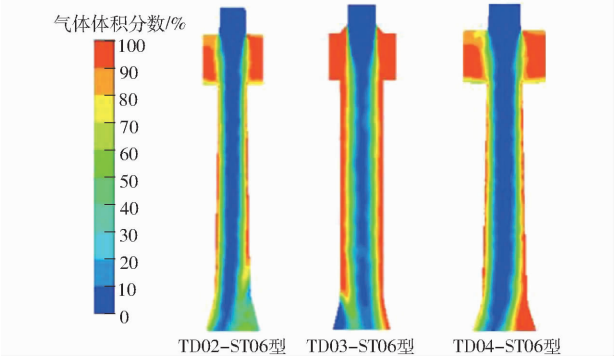


图 10　喉管区域气体体积分数分布云图

Fig. 10　Contour of air volume fraction at throat region

通过上述仿真分析，从微观流场角度阐明了文丘里结构对自吸气性能的影响机制。为进一步量化喷头几何参数与宏观喷雾性能指标间的关系，通过搭建 ALR 测试系统获取实测数据，并与仿真结果进行对比分析。TD03－ST06 型组合式 AIN 瞬时气体体积流量仿真和试验监测数据如图 11 所示。试验前，由于喷头及流量计内部均存在空气，因此在开始监测阶段气体体积流量呈负值，在进行一段时间的迭代及试验后，仿真和试验监测数据呈现稳定趋势。对各型号下 TD－ST 组合 AIN 在 0.3、0.4、0.5、0.6 MPa 下气液比进行仿真及测量试验，每组试验重复 3 次取平均值，如图 12 所示。

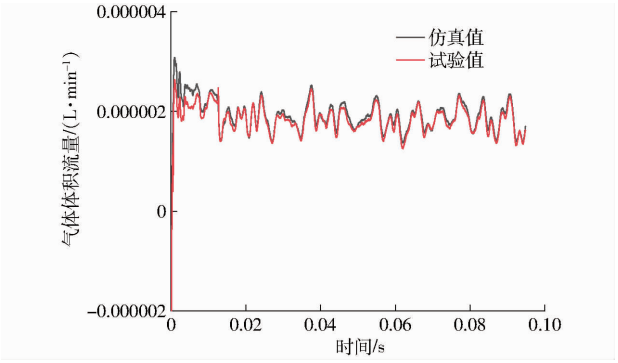


图 11　气体体积流量仿真和试验结果

Fig. 11　Air volume flow of simulation and experiment

由图 12 可知，3 种组合下喷头 ALR 均随着喷雾压力增加而增大，且各组 ALR 仿真值均高于试验值，是由于在实际试验时传感器监测系统管路存在沿程损失，导致一部分气体未被监测。当喷雾压力为 0.6 MPa、d_p/d_t 为 0.76 时，即 TD－03 型文丘里管与 ST－06 型喷头进行组合时，ALR 达到仿真与试验最大值，分别为 0.008 4、0.008 1。当 d_p/d_t 逐渐增大时，ALR 呈先增大后减小趋势，与表 1 中体积分数分布规律一致。

3.2　气液比回归模型分析

气液比（ALR）是评价气吸式喷头性能的关键指标，受到喷雾压力 P 与喷头几何结构（如文丘里管孔径比 K、喷嘴狭缝宽度 W）的显著影响。为量化这些参数对 ALR 的影响规律，并实现对不同结构喷头在特定工况下 ALR 预测，基于试验数据，建立 ALR 与 P、K、W 的多元线性回归模型。以喷雾压力 P、孔径比 K、喷嘴狭缝宽度 W 为试验自变量，TD－ST 组合式 AIN 气液比为因变量的试验方案和结果如表 2 所示。对表 2 数据进行多元线性拟合，得到 TD－ST 组合式 AIN 气液比回归模型及残差如图 13、14 所示，拟合方程系数如表 3 所示。对该模型进行方差显著性分析，结果如表 4 所示。

从表 3、4 可得，对于喷雾压力、孔径比以及狭缝宽度主效应及其对气液比模型均具有极显著影响。孔径比是决定气吸式喷头气液比最主要的因

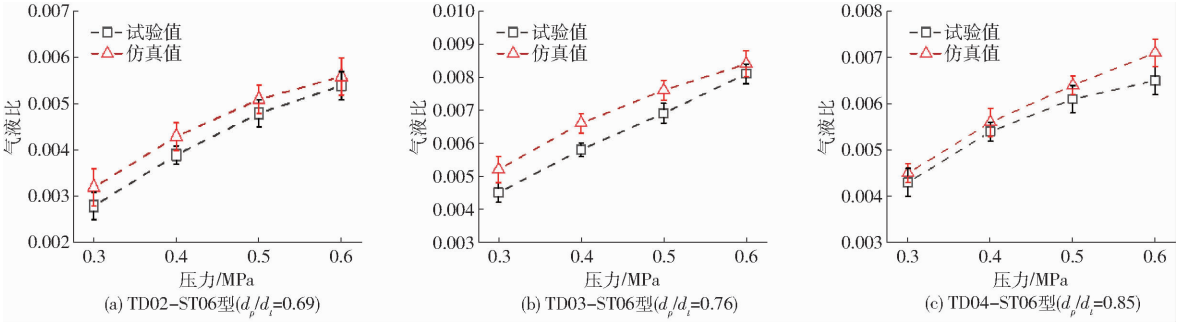


图 12　气液比仿真和试验结果

Fig. 12　ALR of simulation and experiment

表 2 气液比试验方案与结果

Tab. 2 Test protocols and results of ALR

喷雾压力/MPa	孔径比	狭缝宽度/mm	ALR	喷雾压力/MPa	孔径比	狭缝宽度/mm	ALR
0.3	0.69	0.99	0.001 4	0.4	0.69	0.99	0.002 2
	0.69	1.20	0.002 1		0.69	1.20	0.003 3
	0.69	1.40	0.002 8		0.69	1.40	0.003 9
	0.76	1.20	0.003 4		0.76	1.20	0.004 4
	0.76	1.40	0.004 5		0.76	1.40	0.005 8
	0.76	1.80	0.003 9		0.76	1.80	0.004 6
	0.85	1.40	0.004 3		0.85	1.40	0.005 4
	0.85	1.80	0.004 7		0.85	1.80	0.006 1
0.5	0.69	0.99	0.003 1	0.6	0.69	0.99	0.004 2
	0.69	1.20	0.004 2		0.69	1.20	0.004 7
	0.69	1.40	0.004 8		0.69	1.40	0.005 4
	0.76	1.20	0.005 6		0.76	1.20	0.006 5
	0.76	1.40	0.006 1		0.76	1.40	0.007 1
	0.76	1.80	0.006 5		0.76	1.80	0.006 9
	0.85	1.40	0.006 8		0.85	1.40	0.007 8
	0.85	1.80	0.007 2		0.85	1.80	0.008 1

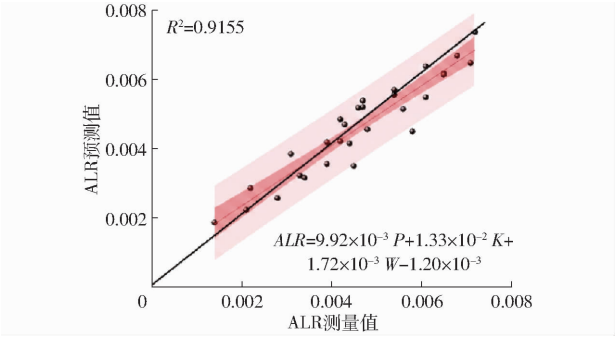


图 13 TD－ST 组合式 AIN 气液比回归模型

Fig. 13 TD－ST combined AIN air-liquid ratio regression model

素,且气液比随着孔径比增加而增大。喷雾压力是影响气吸式喷头气液比的次要因素,随着喷雾压力增加,气液比逐渐增大。喷嘴狭缝宽度对气液比的影响较小。对于气液比回归方程,从图 13 可看出,决定系数 R^2 为 0.915 5,调整后决定系数 R^2_{adj} 为 0.906 5,表明模型可信。气液比回归模型方程为

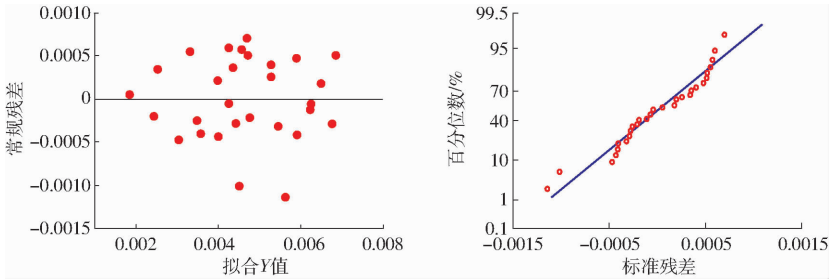


图 14 气液比监测残差检验

Fig. 14 Air-liquid ratio monitoring residual test

表 3 拟合方程系数

Tab. 3 Coefficient of fitted equations

因素	非标准化系数		标准化系数	T 值	95% CI（置信区间）
	B 值	标准误差	Beta 值		
常量	−0.001 201	0.001 208		−9.947	−0.014 490 ~ −0.009 539
喷雾压力	0.009 924	0.000 823	−2.068 8	12.050	0.008 238 ~0.011 610
孔径比	0.013 33	0.001 846	3.409 5	7.219	0.009 547 ~0.017 110
狭缝宽度	0.001 715	0.000 429	−4.721 1	3.987	0.000 833 2 ~0.002 594

表 4 方差显著性分析

Tab. 4 Significance analysis of variance

类型	平方和	自由度	均方	p
喷雾压力	3.940×10^{-5}	1	3.940×10^{-5}	<0.000 1 **
孔径比	1.414×10^{-5}	1	1.414×10^{-5}	<0.000 1 **
狭缝宽度	4.312×10^{-6}	1	4.312×10^{-6}	<0.000 1 **
回归	8.233×10^{-5}	3	2.744×10^{-5}	<0.000 4 **
残差	7.597×10^{-6}	28	2.713×10^{-7}	
总计	8.992×10^{-5}	31		

注：** 表示差异极显著($p<0.01$)。

$$ALR = 9.92\times10^{-3}P + 1.33\times10^{-2}K + 1.72\times10^{-3}W - 1.20\times10^{-3} \quad (9)$$

为验证式(9)预测准确性,采用如图 15 的 TD－ST 组合气吸式射流喷头进行验证试验,并从相关性、标准差和均方根差异等方面的匹配程度比较预测值和实际值之间的统计相似性。验证试验时室内温度为 20℃,试验用液体由空压机向储液罐加压提供,通过压力梯度 0.2 ~0.6 MPa 进行测试,试验现场按照图 2、3 形式进行布置。图 15 采用 Siargo User Application 气体质量流量记录软件收集上述 6 个 TD－ST 组合气吸式射流喷头 ALR 试验数据,在仿真过程模拟相同工况(喷雾压力、喷头型号等)并得到对应的数据共计 1 541 组。基于 Python 编程语言,使用 Matplotlib、Seaborn 库并结合 Numpy、Scipy 数学统计工具,Talyer Plot 组合模型,对数据进行多



图 15　TD－ST 组合气吸式射流喷头(验证试验)

Fig. 15　Test combination of TD－ST type AIN tested (validation test)

维度、可视化分析。

从图 16a 可知,颜色渐变表示点密度变化,即相同区域内的数据点数量。从蓝色到红色渐变,密度越来越高,表明大部分数据集中在一条线上,说明 ALR 模型预测值与实际值较为接近。红色拟合线通过线性回归得到,表示预测值与实际值之间的平均关系。图 16a 中 2 条拟合线近乎 1∶1 重合,表明 ALR 预测值准确。图中 n 表示 ALR 数据点数量(1 541 个);r 表示相关系数,表明数据间具有较强的正相关性;RMSE 表示均方根误差,为 0.081,表明上述 6 个 TD－ST 组合气吸式射流喷头 ALR 数值模拟与试验验证间的误差极小。ubRMSE 表示无偏均方根误差,bias 表示偏差,二者均在考虑预测偏差的角度解释了均方根误差。

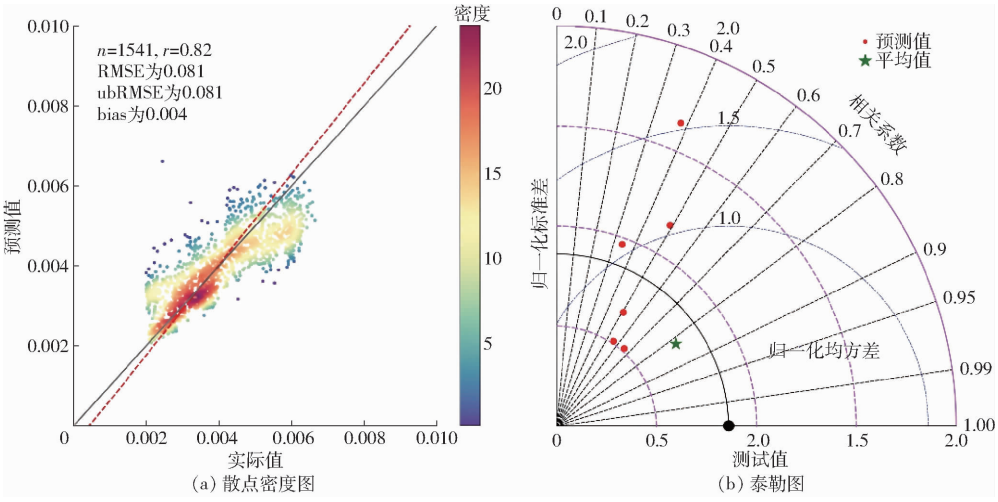


图 16　散点密度图与泰勒图组合模型

Fig. 16　Combined model of scatter density plot and Taylor plot

从图 16b 可知,灰色曲线表示标准偏差,是标准化后观测值或预测值与平均值偏差。粉色曲线表示相关系数,从 0～1 变化(与散点密度图中 r 对应,越靠近 1 水平线上的点表示预测值标准偏差与观测值越接近)。蓝色同心圆表示归一化均方差,衡量预测值变异程度。绿色星标表示所有组平均预测值,蓝色圆点表示数据观测点,红色圆点表示各个组预测值,即 6 组 TD－ST 组合气吸式射流喷头 ALR 试验数据组,且红色圆点越接近最外层的圆圈,表示相关系数越高预测越准确,图 16b 从最外圈向内依次为 TD015－ST03、TD01－ST02、TD05－ST10、TD015－ST04、TD05－ST08、TD01－ST03。

综合来看,建立的气液比回归模型(式(9))在拓展至更多文丘里管-喷嘴组合后仍具有较好的预测效果,模型相关系数可达到 0.82。TD015－ST03 型组合式气吸式射流喷头 ALR 模拟值与试验值相关性最好,TD01－ST02 次之,这是由于这 2 种组合的孔径比有利于 ALR 产生,其他 4 种组合随着相关系数减小,ALR 之间的差异也逐渐明显。另外比较图 16b 中红蓝点分布可以发现,同一变量中,大部分红色圆点比蓝色点更接近于观测点,特别是 TD015－ST03 型组合气吸式射流喷头表现更为明显。

4　结论

(1)运用 CFD 数值模拟方法,可以对 AIN 内部流动特性,如速度、压力、气液两相分布、喉管进气量等进行可视化分析。上述参数可以较好地描述 AIN 内部瞬态流动行为,阐明 AIN 内部气液耦合

规律。

(2)组合式 AIN 孔径比显著影响气液两相流体分布,当喷雾压力为 0.6 MPa、孔径比为 0.76 时,即 TD-03 型文丘里管与 ST110-06 型喷头进行组合时,ALR 达到仿真与试验测量最大值,试验结果与仿真结果吻合。

(3)通过多元线性回归方法,建立了喷雾压力、孔径比、喷嘴狭缝宽度与气液比间回归模型,方差分析表明该模型显著性极高($p<0.0001$,R^2为0.9155)。基于 Python 编程语言构建了散点密度图与泰勒图的组合模型,结果表明在拓展至更多文丘里管-喷嘴组合后,建立的气液比回归模型仍具有较好预测效果,模型相关系数可达 0.82,适用于 TD-ST 组合式 AIN 喷头气液比预测。

参 考 文 献

[1] 张豪, 祁力钧, 吴亚垒, 等. 无人机果树施药旋翼下洗气流场分布特征研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 44-54.
Zhang Hao, Qi Lijun, Wu Yalei, et al. Study on the distribution characteristics of downwash airflow field of drone rotor for fruit tree pesticide application[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(18): 44-54. (in Chinese)

[2] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 389-397.
He Xiongkui. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 389-397. (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] 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 experiment of precision variable-rate spraying monitoring system based on pesticide application traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 160-169. (in Chinese)

[5] Sayinci B. The influence of strainer types on the flow and droplet velocity characteristics of ceramic flat-fan nozzles[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2016,40(1): 25-37.

[6] 权龙哲, 郦亚军, 王旗, 等. 考虑风扰的对靶喷雾机械臂药液喷洒动力学建模与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 48-59.
Quan Longzhe, Li Yajun, Wang Qi, et al. Dynamics modeling and experiment of targeted spraying manipulator considering wind disturbance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 48-59. (in Chinese)

[7] 张智泓, 曾荣壕, 赖庆辉, 等. 小型植保无人机下洗气流场影响雾滴运动特性规律研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 208-216,226.
Zhang Zhihong, Zeng Ronghao, Lai Qinghui, et al. Investigation of effects of downwash airflow field on droplet motion characteristics of small plant protection unmanned aerial vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 208-216, 226. (in Chinese)

[8] Hu P, Zhang R, Sun J, et al. A rapid method for qualitative evaluation of nozzle spraying potential drift based on phase doppler interferometer measurement[J]. Measurement, 2026, 259: 119593.

[9] 李建平, 李绍波, 于少猛, 等. 伞形风场式防飘喷雾装置沉积特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 80-91.
Li Jianping, Li Shaobo, Yu Shaomeng, et al. Deposition characteristics of umbrella-shaped air-assisted anti-drift spray device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 80-91. (in Chinese)

[10] 张京, 宫帅, 宋坚利, 等. 气液两相感应式静电喷头性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 107-110, 120.
Zhang Jing, Gong Shuai, Song Jianli, et al. Performance of two-phase gas-liquid electrostatic induction nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 107-110, 120. (in Chinese)

[11] 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 Yukang, 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)

[12] 刘昶希, 胡军, 李宇飞, 等. 锥形风场式防飘喷雾装置内流道优化与防飘特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 11-20.
Liu Changxi, Hu Jun, Li Yufei, et al. Optimization of the inner flow channel of conical wind field anti-drift spray device and anti-drift characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(22): 11-20. (in Chinese)

[13] 樊桂菊, 牛成强, 张震明, 等. 多气流协同式果园 V 形防飘喷雾装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 138-147.
Fan Guiju, Niu Chengqiang, Zhang Zhenming, et al. Design and experiment of V-shaped orchard anti-drift spray device with multi-airflow cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 138-147. (in

Chinese)

[14] 胡军, 刘昶希, 初鑫, 等. 锥形风场式防飘移装置雾滴沉积特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 142 – 149,174.
Hu Jun, Liu Changxi, Chu Xin, et al. Droplet deposition characteristics of conical wind field anti-drift device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 142 – 149, 174. (in Chinese)

[15] Huang Z, Wang Z, Wang C, et al. Dynamic surface tension at liquid sheet breakup governs spray droplet size: a unified model for reduced drift and improved targeting[J]. Environmental Research, 2025, 285: 122653.

[16] 孙春华, 宁智, 乔信起, 等. 气液两相流流型影响喷嘴喷雾形态及液滴粒径分布[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 29 – 37.
Sun Chunhua, Ning Zhi, Qiao Xinqi, et al. Gas – liquid two-phase flow pattern affecting spray shape and droplet size distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 29 – 37. (in Chinese)

[17] Li L, Zhang R, Chen L, et al. Toward a remote sensing method based on commercial LiDAR sensors for the measurement of spray drift and potential drift reduction[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: 170819.

[18] Vashahi F, Ra S, Choi Y, et al. Influence of design parameters on the air/liquid ratio of an air induction nozzle[J]. Journal of Mechanics, 2018, 34(3): 375 – 385.

[19] Sijs R, Kooij S, Bonn D. Droplet size from Venturi air induction spray nozzles[J]. Experiments in Fluids, 2023, 64(2): 43.

[20] 孙春华, 宁智, 乔信起, 等. 气泡雾化喷嘴泡状流喷雾特征试验与仿真[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 367 – 374,409.
Sun Chunhua, Ning Zhi, Qiao Xinqi, et al. Experiment and simulation on spray characteristics of effervescent atomizer within bubbly flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 367 – 374, 409. (in Chinese)

[21] Hilz E, Vermeer A W P. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction[J]. Crop Protection, 2013, 44: 75 – 83.

[22] Alidoost D R, Yu S, Choi Y, et al. Effect of geometrical parameters of air-induction nozzles on droplet characteristics and behaviour[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 14 – 29.

[23] Lee J, Abdelmotalib H M. CFD-based evaluation of air induction nozzle performance: integration with AI for predictive modeling[J]. Results in Engineering, 2025, 28: 107116.

[24] Gong C, Li D, Kang C. Visualization of the evolution of bubbles in the spray sheet discharged from the air-induction nozzle [J]. Pest Management Science, 2022, 78(5): 1850 – 1860.

[25] Doruchowski G, Świechowski W, Masny S, et al. Low-drift nozzles *vs.* standard nozzles for pesticide application in the biological efficacy trials of pesticides in apple pest and disease control[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1239 – 1246.

[26] Yu S H, Kang Y, Lee C G. Comparison of the spray effects of air induction nozzles and flat fan nozzles installed on agricultural drones[J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11552.

[27] Butler E M C, Swan T, Miller P C H, et al. PM—power and machinery[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(3): 289 – 296.

[28] 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.

[29] Vashahi F, Ra S, Choi Y, et al. Influence of design parameters on the air liquid ratio of an air induction nozzle[J]. Journal of Mechanics, 2017, 34(3): 1 – 11.

[30] Hu J, Liu C,Wang Z, et al. Motion model for describing the quantity of air in droplets through changing the structure of air induction nozzle[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(5): 35 – 40.