

一种变几何特性离心喷嘴的结构设计与流场分析^①

陈 炳， 谢守勇

西南大学 工程技术学院，重庆 400715

摘要：为适应植保作业变量喷雾需求，设计了一种变几何特性离心喷嘴。通过 Fluent 软件的 VOF 模型对喷嘴内外流场进行三维全尺寸数值模拟，研究了喷嘴稳定喷雾时内流场径向分布特性及轴向变化规律，分析了喷嘴内部形成空气涡的喷口旋流条件；通过对外流场模拟和试验数据采用数字图像处理求取喷雾角，并结合经验公式比较分析了计算结果的准确性。该研究为优化喷嘴构型和连续变量喷雾装置的研发提供了理论基础。

关 键 词：离心喷嘴；数值模拟；流场特性；空气涡；喷雾角

中图分类号：S491

文献标志码：A

文章编号：1000-5471(2020)12-0065-07

离心喷嘴是一种产生涡流喷雾的压力喷嘴，离开喷口后涡流在离心力的作用下可以形成比较大的雾化锥角，因其结构简单、不易堵塞、雾化性能良好，在植保领域有着广泛应用。

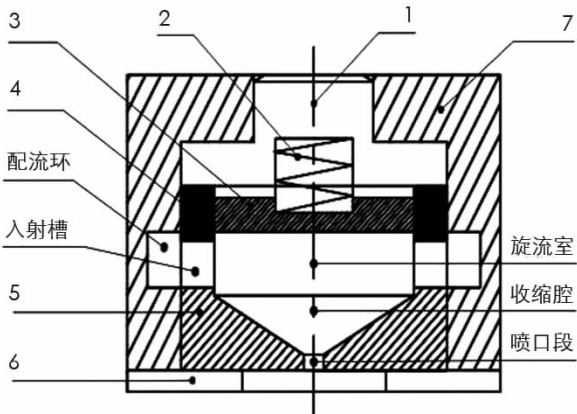
相同工况下，喷嘴内部流场特性取决于结构参数，表现在喷雾性能。基于特定假设条件的经验和理论公式以及实验方法，难以准确分析和测量各种喷嘴内部的湍流特征，也限制了科技工作者从结构上对喷雾性能进行改善。

随着计算流体力学的发展，CFD 方法为三维全尺寸研究喷嘴雾化流场提供了解决方案^[1]，研究人员运用 CFD 软件，在简单离心喷嘴结构基础上研发了喷雾性能可调的变量喷雾装置^[2-5]。目前，该方法已经成为研究喷嘴流场特性、优化喷嘴构型的重要的现代设计手段。

基于上述研究背景，本文针对植保领域变量施药作业特点，设计了一种变几何特性离心喷嘴。并采用 Fluent 软件的 VOF 模型，对流量 $q_v = 1.5 \text{ L/min}$ 时的喷嘴流场特性进行三维全尺寸数值研究，对外流场喷雾角预测值进行了试验验证，为优化喷嘴结构参数和研发连续变量喷雾装置提供了重要理论基础。

1 喷嘴的结构

喷嘴具体结构如图 1 所示，该型离心喷嘴主要由柱塞、复位弹簧以及入口阀芯、阀套、喷嘴、底板、配流座等组成。所有弹簧采用不锈钢材料，



1. 柱塞；2. 复位弹簧；3. 阀套；
4. 入口阀芯；5. 喷嘴；6. 底板；7. 配流座

图 1 喷嘴结构

^① 收稿日期：2019-05-16

基金项目：重庆市科委社会事业和民生保障科技创新专项重点开发计划项目（cstc2017shms-zdyfx0006）。

作者简介：陈 炳（1983—），男，助理工程师，硕士研究生，主要从事智能化农业喷雾技术的研究。

通信作者：谢守勇，博士，教授，硕士生导师。

其余零部件采用铝或铜制成。喷嘴内部流场沿轴向可依次分为旋流室、收缩腔、喷口段三部分，为便于加工质量保证和研究方便，本文将收缩腔及喷口段集中设计在喷嘴零件上，并采用独立的入口阀芯设计，以便实现对喷嘴入口面积控制。

喷嘴流场几何参数如图 2 所示。收缩腔收缩角 β 、喷口段轴向长度和直径为 l_o 与 d_o ，旋流室轴向长度和直径分别是 L_s, D_s ，在旋流室周向均布两个宽 b 高 h 的矩形组合结构的切向入射槽。根据喷嘴几何特性参数的定义^[6]，切向槽入口总面积 $\Sigma f = nbh$ ，喷嘴的几何特性参数 $A = \pi R r_o / nbh$ 。因此，只要更换不同的入口阀芯与喷嘴零件便可得到不同 A 值，从而得到不同的喷雾性能。

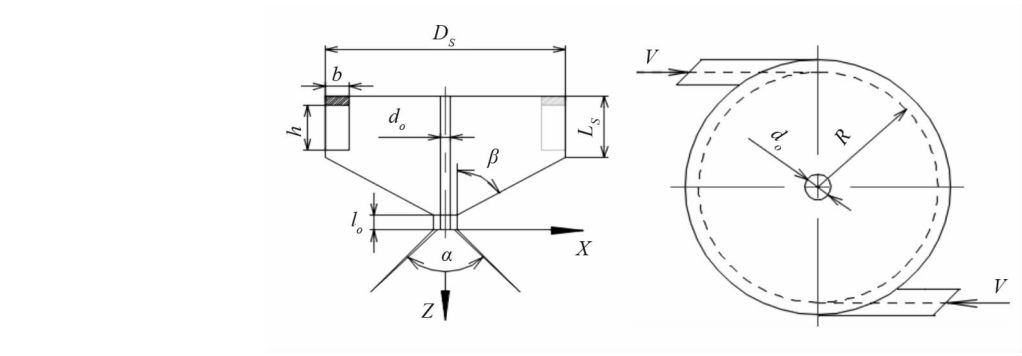


图 2 喷嘴流场几何参数

喷嘴各几何参数具体取值见表 1。

表 1 喷嘴各参数取值

b/mm	h/mm	D_s/mm	L_s/mm	d_o/mm	l_o/mm	$\beta(^{\circ})$	A
1.5	3.5	15	5	1.5	1	60	1.5

2 试验及数值计算方法

2.1 试验方法

试验系统如图 3 所示，主要实现对喷嘴外流场喷雾角的测量。水压系统由测试喷头、带 RS485 输出流量计、脉冲信号输出的压力变送器、压力表、开关阀、安全阀、电动水泵及水箱、过滤器等组成。测量系统采用摄像头与计算机连接，并通过 MATLAB 软件获取试验图像及进行数据处理^[7-10]。

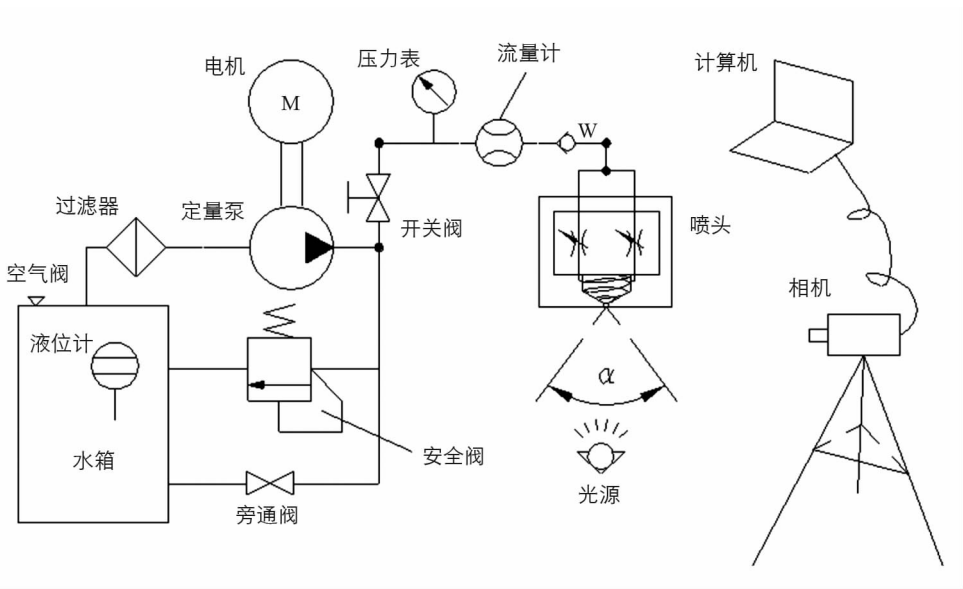


图 3 试验系统示意图

如图 4 所示, 根据《植物保护机械 喷雾设备第 1 部分喷雾机喷头试验方法》(GB/T20183.1-2006)及《航空喷雾设备喷头性能试验方法》(MH/T1055-2013)的定义, 试验需要测定的喷雾角 α 是在靠近喷头处沿雾流边界所形成的液膜夹角, 测量时需先确认喷头内部入射槽开口高度 $h=3.5\text{ mm}$, 然后调节电机泵流量 $q_v=1.5\text{ L/min}$, 待喷头形成稳定喷雾后进行测量.



图 4 喷雾角定义与测量原理图

2.2 数值计算方法、网格及初边值条件

图 5 所示是喷嘴的网格模型. 整个计算域是由六面体网格装配成的混合结构, 网格数量在 100 万左右. 切向入口截面设为入口边界, 旋流腔表面设为固壁边界, 采用无滑移壁面, 喷口及外部流场设为出口边界.

雾化过程为典型的气液两相流动. VOF (volume of fluid) 方法适用于气液两相均为质量力有势、不可压缩, 且相互间滑移可忽略的流体计算, 是目前用来追踪气液两相界面的使用最广泛的数值计算方法^[11-17]. 本文采用 fluent 软件的 VOF 模型, 数值模拟喷嘴内外流场, 并对离心喷嘴的雾化流场特性和气液两相分布情况进行研究和预测. 由于喷嘴内部是带有强旋转的湍流流动, 数值计算时采用带旋修正的 Realizable $k-\epsilon$ 紊流模型比较合

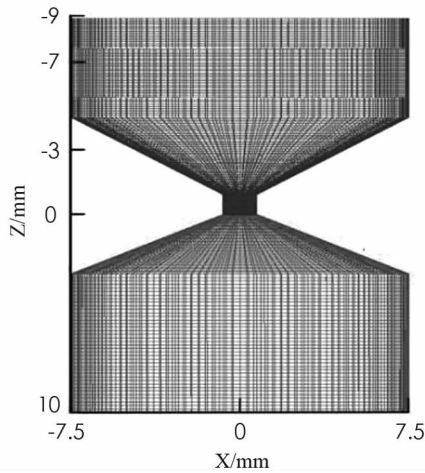


图 5 喷嘴计算域网格

适. 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法, 对压力项的离散采用 PRESTO 方法. 对于采用湍流模型的高雷诺数湍流流动的近壁区, 采用标准壁面函数对边界层进行计算, 以改进网格质量和计算准确度.

本例中喷嘴内部初始全为空气, 因此设置空气为第一相, 水为第二相, 计算域初始化液相体积为 0. 模型入口为速度入口, 入口边界上是水, 第二相容积比率设为 1; 模型出口边界采用压力出口, 外部为大气环境, 第二相回流率设置为 0, 保证水从出口流出后不会返回计算域参与计算. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水的动力粘度 $\mu_L=0.001\text{ }005\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 空气与水表面张力系数为 $0.073\text{ }5\text{ N/m}$, 设定计算工作流量为 $q_v=1.5\text{ L/min}$, 流体从配流环切向入口高速射入旋流室的旋流半径为 $R=(D_s-b)/2$, 则用来维持涡核周围恒定的无旋流动、提供涡源的入口处平均速度为

$$\bar{V} = \frac{q_v}{2bh} = \frac{25}{3h} \approx 2.38\text{ (m/s)} \quad (1)$$

3 结果与分析

3.1 稳定喷雾时内流场分布规律

为研究稳定喷雾阶段喷嘴内流场特征, 分别取距喷口 $z=0$ 、收缩段 $z=-3$ 、旋流室 $z=-7$ 三处坐标截面的流场进行分析.

3.1.1 速度场分布规律

分析图 6 发现,在全流域内,即使在喷口处,流体的径向速度 V_r 的值及其变化都很小;在轴心附近,轴向速度取得最大值,且始终高于此处的切向速度,在旋流室部分切向速度占据主导地位.如果忽略粘性效应和径向速度,不考虑轴向拉伸速度 V_z ,在旋流室和收缩腔上部分流场径向分布具有兰金涡特征^[18-19],依次可分为近壁区、环流区(势流区)及轴线附近涡核区(强迫涡).

喷嘴内流场从上游随 z 轴过渡到下游喷口的过程中,由于径向结构逐渐收缩,轴向速度逐渐增大;流场切向速度逐渐增大,最大值点沿径向靠近轴心,涡核及环流区、近壁区径向尺寸逐渐被压制.在喷口段以及喷口截面,流场径向分布呈强迫涡结构特征,切向速度和轴向速度取得全流域最大值.

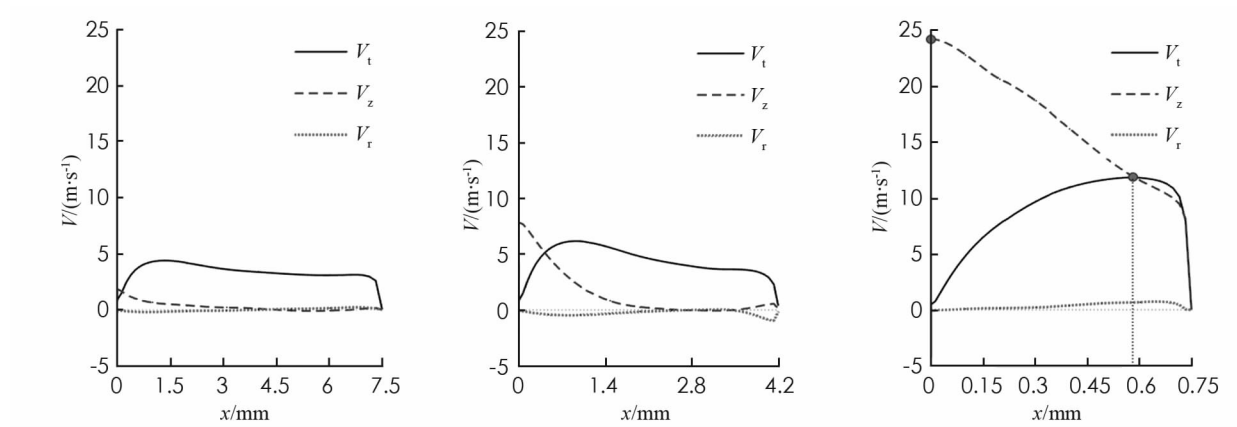


图 6 喷嘴内流场速度径向分布特性

3.1.2 压力场分布规律

分析图 7(a), (b)发现,在旋流室和收缩段上部,静压 P_s 从近壁面到轴心的径向压降主要是由于切向速度 V_t 造成的;近壁区压降主要是由于壁面粘性摩擦力造成的.由于内流场上部流域速度较小,动压 P_d 较小,所以总压 P^* 曲线与静压 P_s 曲线很接近.沿轴线向流场下游移动,动压 P_d 逐渐升高而静压 P_s 逐渐下降.在喷口截面,轴心静压 P_s 取得极值负压,而 P_d 为全流域最高,且有 $P_d > |P_s|$,所以喷口各处总压 P^* 仍为正,如图 7(c).

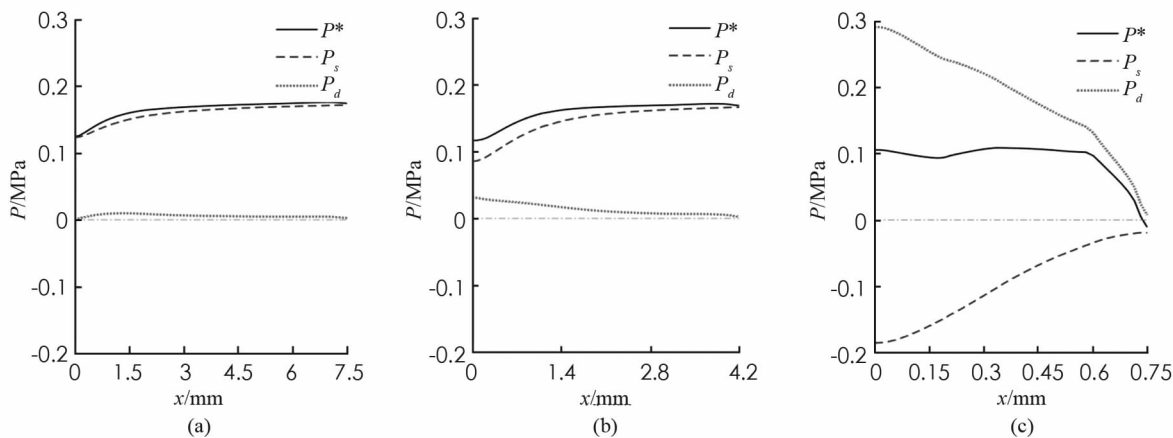


图 7 喷嘴内流场压力径向分布特性

3.2 空气涡存在的条件与判定

经离心喷嘴形成的旋动射流具有一定的切向速度,在强旋情形下,切向速度产生的轴向逆压梯度足以形成沿轴向的反向流,旋流强度一般用无量纲数旋度 S 来衡量.根据在喷口截面上模拟值, $V_{tmax} \approx 11.815$ m/s, $V_{zmax} \approx 24.157$ m/s,求得喷口处旋度 $S=0.324$,由此可知,该工况下出口旋流只处于中等旋度^[20].

将液相(水)体积分数为 0.5 的节点定义为气液交界面,大于 50%为液体,小于该值为空气,通过对喷

口截面气液两相体积分布云图(图 8)分析发现, 由边缘至轴心方向上, 液相体积分数由 0 增大到 1, 除了在靠近壁面处有少量空气回流外, 在中心处并没有气体存在. 由速度及压力分布特性可知, 由于喷口处轴向速度很大, 切向速度产生的负压只能使总压减小, 但仍为正压, 所以不会因逆压梯度产生空气涡.

3.3 外流场喷雾角预测与试验结果分析

喷雾角是反应喷雾性能的一个关键参数. 如图 9 所示, 本文通过数字图像处理方法, 提取外流场液相体积分数分布云图和试验图像的轮廓边界直线部分进行拟合并求取喷雾角, 并与表 2 文献中经验公式^[21-23]计算结果进行对比分析.

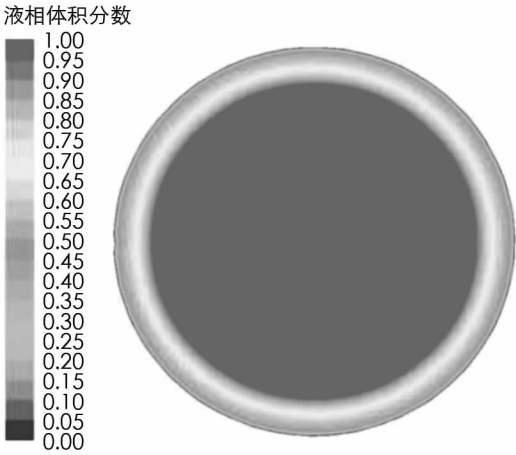


图 8 喷口截面液相体积分数云图

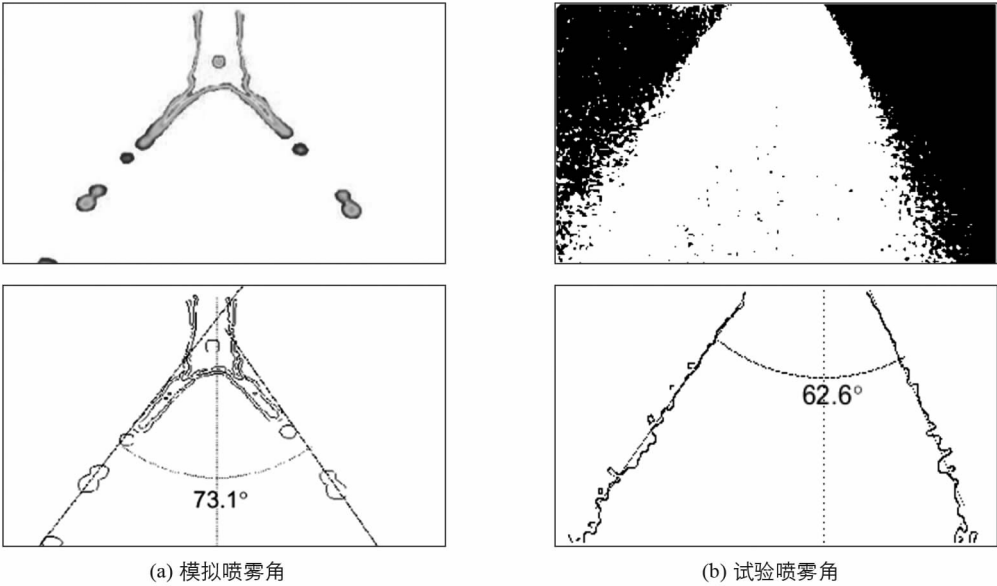


图 9 模拟与试验喷雾角

表 2 流量 $q_v=1.5\text{ L/min}$ 时喷雾角的公式计算值

几何特性参数 A	压降 $(\Delta P)/(\text{MP} \cdot \text{a}^{-1})$	数据来源	喷雾角/ $^\circ$
1.5	0.23	文献[21-22]	74
		文献[23]	61

文献[21-22]中离心喷嘴平均喷雾角可用喷口平均速度的正切值来表示, 其表达式为

$$\alpha = 2\arctan(\bar{V}_t/\bar{V}_z)$$
 (2)

将喷口截面数值模拟得到的平均速度代入公式(2), 计算结果与图 9(a)模拟喷雾角相差 0.9° , 数据吻合性很好, 验证了通过图像法预测外流场喷雾角的可行性.

文献[23]中喷雾角计算公式:

$$\alpha = 6K^{-0.15} \left[\frac{\Delta P d_0^2 \rho_L}{\mu_L^2} \right]^{0.11}, \text{ 其中 } K = \frac{\Sigma f}{D \cdot d_0}$$
 (3)

公式(3)是 Lefebvre 在理论推导的基础上结合大量的实验结果通过量纲分析得到, 主要考虑了压降与喷嘴几何特性参数. 本例中计算结果与图 9(b)试验喷雾角非常接近, 表明当喷嘴几何特性参数 $A < 2.5$ 时采用 Lefebvre 理论计算喷雾角比较准确^[24], 验证了采用图像法测量喷雾角的准确性.

本文中,数值模拟与试验结果存在较大的偏差,分析原因主要是:受喷头内部运动阀芯泄漏和喷嘴零件表面质量的影响,使得实际测量喷雾角偏小;另外在数值模拟时,简化了入射槽入口处对入射流的阻滞结构,使得模拟结果比试验值大。

4 结 论

为满足植保作业变量喷雾的需求,本文设计了一种变几何特性离心喷嘴,并基于 CFD 软件的 VOF 模型对喷嘴内外部流场进行三维全尺寸数值模拟,对喷嘴内部流场特性、空气涡存在条件以及喷雾角预测等进行分析和试验验证,主要结论如下:

1) 通过对喷嘴稳定喷雾时内流场速度及压力特性数值分析发现,流场在旋流室呈近似兰金涡分布,而在喷口段具有明显强迫涡结构。

2) 喷口旋流强度是离心喷嘴内部形成空气涡的重要判据,数值研究表明本算例中喷口旋流强度还不足以产生逆向流,无法形成空气涡。

3) 通过对外流场数值模拟和试验图像的数字处理,实现喷雾角预测和测量,并佐以经验公式计算结果,验证了图像法求取喷雾角的合理性,同时分析了数值模拟与试验结果产生较大偏差的原因,为喷头结构改进和连续变量喷雾施药装置的研究提供新的设计思路。

参考文献:

- [1] DATTA A, SOM S K. Numerical Prediction of Air Core Diameter, Coefficient of Discharge and Spray Cone Angle of a Swirl Spray Pressure Nozzle [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2000, 21(4): 412-419.
- [2] 陈艳巧, 张晓辉, 常金丽, 等. 轻型电动弥雾机喷头的设计 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 58-61.
- [3] 戴 星. 可变喷射范围的喷药装置的仿真与实现 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [4] 鲍安红, 谢守勇, 邱振宇. 可变喷射范围的旋水芯喷嘴设计 [J]. 农机化研究, 2011(9): 113-116.
- [5] 曹建明. 液体喷雾学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
- [6] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [7] 刘观伟, 王顺森, 毛靖儒, 等. 小流量离心式喷嘴雾化特性的实验研究 [J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(1): 30-34.
- [8] 张新桥, 沈赤兵, 李清廉, 等. 切向孔单/双排布局对离心式喷嘴锥形液膜雾化特性影响 [J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2142-2149.
- [9] 徐 顺, 康忠涛, 成 鹏, 等. 喷注压降对液液同轴离心式喷嘴喷雾锥角的影响研究 [J]. 推进技术, 2017, 38(7): 1556-1562.
- [10] 潘华辰, 周泽磊, 刘 雷. 关键结构参数对离心式雾化喷嘴雾化效果的影响研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 199-206.
- [11] 岳 明, 徐 行, 杨茂林. 离心式喷嘴内气液两相流动的数值模拟 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 888-890.
- [12] 刘 娟, 孙明波, 李清廉, 等. 基于 VOF 方法分析离心式喷嘴结构参数对性能影响 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2826-2832.
- [13] 邱庆刚, 刘丽娜, 尹晓奇. 一种中空离心式喷嘴流场特性的研究 [J]. 热能动力工程, 2011, 26(5): 599-603.
- [14] 范文宏, 凌宗余, 富庆飞, 等. 小几何特性小孔径细水雾离心喷嘴的数值模拟 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5): 538-544.
- [15] 文 晟, 兰玉彬, 张建桃, 等. 农用无人机超低容量旋流喷嘴的雾化特性分析与试验 [J]. 农业工程学报, 2014, 32(20): 85-93.
- [16] 刘国库, 潘 刚, 郑洪涛. 结构参数对喷嘴性能影响的数值研究 [J]. 航空发动机, 2015, 41(5): 28-32.
- [17] 马 朝, 黎 明, 索建秦, 等. 某离心式喷嘴雾化特性及优化设计研究 [J]. 航空工程进展, 2017, 8(1): 58-67.
- [18] NOURI-BORUJERDI A, KEBRIAEE A. Numerical Simulation of Laminar and Turbulent Two-Phase Flow in Pressure-Swirl Atomizers [J]. AIAA JOURNAL, 2012, 50(10): 2091-2101.
- [19] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

[20] 董志勇. 射流力学 [M]. 北京：科学出版社，2005.

[21] 黄 勇. 燃烧与燃烧室 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009.

[22] 刘志林，黄 勇，林宇震. 单腔离心喷嘴出口空心涡直径和平均液雾锥角的半理论预测 [J]. 航空动力学报，2017，32(4)：926-931.

[23] RIZK N K, LEFEBVRE A H. Prediction of Velocity Coefficient and Spray Cone Angle for Simplex Swirl Atomizers [J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1986, 4(1-2)：65-74.

[24] 刘 娟，李清廉，刘卫东，等. 离心式喷嘴液膜破碎过程实验 [J]. 推进技术，2011，32(4)：539-543.

Structure-Design and Flow-field Analysis of a Centrifugal Nozzle with Variable Geometry Characteristic

CHEN Bing, XIE Shou-yong

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to meet the need of variable spraying in plant protection operation, a centrifugal nozzle with variable geometry characteristic has been designed in this paper, and three-dimensional full-size numerical research of the flow-field inside and outside the nozzle has been conducted based on the VOF model of Fluent software. The characteristics of radial distribution and the change rule along the axial direction of the internal flow-field of the nozzle have been researched, and the swirl condition at the nozzle section when air vortex is generated inside the nozzle is analyzed. The spray angle is obtained by digital image processing of the simulation and test data of the outflow field, and the accuracy of the results is compared and analyzed with the results calculated by empirical formula. This study provides a theoretical basis for the optimization of nozzle configuration and the further R & D of continuous variable spray devices.

Key words: centrifugal nozzle; numerical simulation; flow characteristics; air vortex; spray angle

责任编辑 汤振金