

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.09.003

# 基于 VLES 的横向射流喷雾数值模拟研究

周涛涛, 钱玉荣, 唐志全, 王辰, 张郁

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章使用超大涡模拟(very large eddy simulation, VLES)方法耦合离散相模型对液体射流在横向气流中雾化过程进行模拟,并对比多套网格尺度下不同湍流模型的预测结果。结果表明,VLES 方法能够较为准确地预测横向射流的基本形态及参数。相对其他湍流模型在不同网格尺度下模拟结果波动明显,VLES 方法对网格尺寸敏感度较低,并在模拟流场流动细节方面能够捕捉到更多液柱破碎的表面结构,较雷诺平均(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)模拟方法有显著优势,且计算量比大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法大大降低,在工程实际运用中是一种颇具潜力的数值研究方法。

**关键词:**横向射流;数值模拟;超大涡模拟(VLES);雾化;湍流模型

**中图分类号:**V231.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)09-1168-08

## Numerical simulation study of transverse jet spray based on VLES

ZHOU Taotao, QIAN Yurong, TANG Zhiquan, WANG Chen, ZHANG Yu

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In this paper, the very large eddy simulation(VLES) method coupled with the discrete phase model(DPM) is used to simulate the atomization process of the liquid jet in the transverse gas flow. The prediction results of different turbulence models at multiple grid scales are compared. The results show that the VLES method can predict the basic morphology and parameters of the transverse jet accurately. Compared to other turbulence models that show significant fluctuation in the simulation results across different grid scales, the VLES model is less sensitive to grid size and captures more intricate surface structures of liquid column fragmentation in flow field simulation. It has a significant advantage over the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) simulation method and greatly reduces computational cost compared to large eddy simulation(LES) method. It is a promising numerical research method in engineering practice.

**Key words:** transverse jet; numerical simulation; very large eddy simulation (VLES); atomization; turbulence model

## 0 引言

横向射流是航空发动机燃烧室燃料供给的常见方式,液态燃料的雾化效果将会直接影响后续液滴的蒸发和燃烧特性。长期以来,学者们采用实验和数值模拟手段对横向射流开展了大量

研究。

实验发现,横向射流在气流中从喷嘴喷出到完全雾化会经历 2 个阶段<sup>[1-3]</sup>,过程如图 1 所示,即液柱到液块的一次雾化以及液块到液滴的二次破碎。射流雾化是一个极其复杂的过程,是空气动力、液体表面张力及黏性力共同作用的结果。

**收稿日期:**2023-11-22;**修回日期:**2024-02-01

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52106138);安徽省自然科学基金资助项目(2008085ME166);中国博士后科学基金资助项目(2021M690181)和合肥工业大学学术新人提升 B 计划资助项目(JZ2021HG7B0085)

**作者简介:**周涛涛(1992—),男,山东菏泽人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

张郁(1989—),男,河南洛阳人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:yuzhang2020@sina.com.

实验研究方法主要有阴影法、纹影法、PDPA (phase doppler particle analyzer)法、PIV (particle image velocimetry)法、高速摄影法等<sup>[4-7]</sup>, 可以获取射流的穿透高度、射流宽度、液滴尺寸等宏观参数。而对于射流柱界面破碎的精细结构、流场涡旋结构的演变规律等信息则需采用数值模拟手段进行研究。

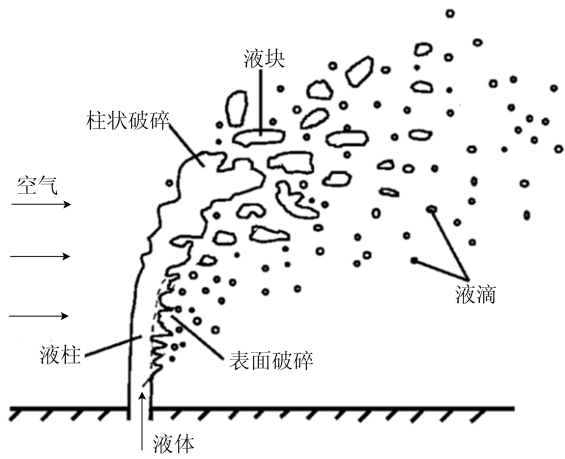


图1 横向射流的雾化过程

目前的数值模拟方法主要有雷诺平均 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 模拟、直接数值模拟 (direct numerical simulation, DNS) 和大涡模拟 (large eddy simulation, LES)<sup>[8-12]</sup>等。其中,RANS 方法是以雷诺平均方程与脉动运动方程为基础并引进一系列假设模型进行封闭,将流动控制方程进行了系综平均,得到的预测结果与真实流场有一定差异。直接数值模拟利用三维非定常 N-S 方程直接求解所有尺度内的瞬时量,这种方法需要网格尺度小于流场内最小的湍流尺度,在计算复杂湍流流动时需要极短的时间和空间步长,对计算资源的消耗极大,目前不适用于工程实际运用中。LES 方法则采用空间滤波器过滤掉流场中的小尺度脉动,并对其建立亚格子应力模型来模拟小尺度脉动对可解尺度的影响,在复杂的流场模拟中可以取得不错的计算结果,但对网格的精细度也有很高要求<sup>[13]</sup>,应用于工程实际问题时仍需要很大的计算量。因此研究精准高效的湍流数值模型具有非常重要的工程学意义。

近年来有学者提出联合 RANS/LES 的计算方法,如自适应湍流模化的超大涡模拟 (very large eddy simulation, VLES) 方法<sup>[14-20]</sup>,通过施加控制函数可以根据当地网格尺度和湍流尺度,

自适应地设置分辨率参数调整模化比例,实现在 RANS 方法和 DNS 方法中自动切换,在不额外大幅增加计算量的同时可以更加真实模拟流场的分布情况。

本文基于文献[1]的实验研究,使用 VLES 数值模拟方法耦合离散相模型对横向气流中的液体射流进行数值模拟,分析射流的穿透深度、液滴直径以及流场涡旋结构。此外,VLES 方法中由于施加了分辨率因子,可以根据当地网格尺度和湍流尺度自适应地调节湍流模化比例,在一定程度上降低了模拟结果对网格尺度的敏感度。考虑到这一点,下文将使用不同的网格密度对横向射流雾化进行数值模拟研究,并对比不同湍流模型的预测结果。

## 1 数学物理模型

### 1.1 气相控制方程

气相流体控制方程形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = \mu \Delta u - \frac{\partial p}{\partial x} + \left[ -\frac{\partial (\rho \overline{u^2})}{\partial x} - \frac{\partial (\rho \overline{u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial (\rho \overline{u'w'})}{\partial z} \right] + S_u;$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = \mu \Delta v - \frac{\partial p}{\partial y} + \left[ -\frac{\partial (\rho \overline{u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial (\rho \overline{v^2})}{\partial y} - \frac{\partial (\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] + S_v;$$

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = \mu \Delta w - \frac{\partial p}{\partial z} + \left[ -\frac{\partial (\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial (\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial (\rho \overline{w^2})}{\partial z} \right] + S_w \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (3)$$

其中, $\rho$  为密度; $t$  为时间; $\mathbf{u}$  为速度矢量; $u, v, w$  为速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $x, y, z$  轴方向的分量,'表示脉动值; $p$  为压力; $c_p$  为比热容; $T$  为温度; $k$  为流体的传热系数; $S_T$  为黏性耗散项。还需联系  $p$  和  $\rho$  的状态方程将方程组进行封闭,即

$$p = p(\rho, T) \quad (4)$$

### 1.2 湍流模型

本文基于文献提出的 VLES  $\kappa\omega$  模型<sup>[21]</sup>,其通过引入分辨率函数  $F_r$ ,对 RANS 模型中的湍流黏度  $\mu_t$  进行修正。 $F_r$  值可在  $0 \sim 1$  之间变化,通过控制湍流的模化程度,自适应在 RANS、LES

及 DNS 模型中切换。控制函数的形式为:

$$F_r = \min \left\{ 1, 0, \left[ \frac{1 - \exp\left(-\frac{\beta L_c}{L_k}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\beta L_i}{L_k}\right)} \right]^n \right\} \quad (5)$$

$F_r$  函数中包含 3 个湍流长度尺度  $L_c, L_k, L_i$ , 其对应的分别是湍流过滤长度尺度、最小长度尺度(即 kolmogorov 长度尺度)和湍流积分长度尺度,求解形式为:

$$\begin{cases} L_c = C_X (\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}}, \\ L_k = \frac{\nu^{\frac{3}{4}}}{\beta_1^* k \omega^{\frac{1}{4}}}, \\ L_i = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\beta_1^* k \omega} \end{cases} \quad (6)$$

由控制函数的形式可知,  $F_r$  表示解析的湍流应力张量与建模的应力张量的比例。当  $L_c > L_i$  时,  $F_r$  在近壁区域趋向于 1, 混合模型表现为 RANS 模型; 在远离壁面区域,  $F_r$  值位于 0~1 之间, 湍流被建模为 VLES 模态。

在 VLES 框架下, 湍流动能  $k$  和湍流耗散率  $\epsilon$  的输运方程与标准  $k-\omega$  模型中方程相同, 方程形式为:

$$\frac{d\rho k}{dt} = P_k - \beta_1^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

$$\frac{d\rho \omega}{dt} = \frac{\gamma \omega}{k} P_k - \beta_2^* \rho k \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

$$\mu_t = F_r \frac{\rho k}{\omega} \quad (9)$$

其中,  $P_k$  为亚格子尺度湍动能生成项, 且  $P_k = \mu_t |S|^2$ ,  $|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$ ,  $S_{ij}$  为应变率张量,  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ 。

其他模型参数见表 1 所列。

表 1  $k-\omega$  模型参数

参数	数值
$\beta$	$2.0 \times 10^{-3}$
$n$	2
$C_X$	0.61
$\beta_1^*$	0.09
$\beta_2^*$	3/40

### 1.3 液滴计算模型

本文以离散相模型 (discrete phase model, DPM) 耦合液滴破碎模型对横向射流的雾化过程

进行模拟。在横向射流的雾化过程中, 液滴在流场中的受力遵循牛顿第二定律, 通过对离散相液滴颗粒的受力进行积分来预测其行动轨迹, 在拉格朗日坐标系中进行描述, 其平衡方程为:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{(u - u_p)}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (10)$$

其中:  $m_p$  为颗粒的质量;  $u$  为连续相的速度大小,  $u_p$  为颗粒速度大小;  $\rho_p, \rho$  分别为颗粒密度和连续相的密度;  $F$  为附加力;  $m_p \frac{(u - u_p)}{\tau_r}$  为颗粒阻力;  $\tau_r$  为颗粒的弛豫时间。

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (11)$$

其中:  $\mu$  为连续相分子黏度;  $d_p$  为颗粒直径;  $Re$  为相对雷诺数。

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (12)$$

在液滴颗粒的运动过程中还需考虑一些其他的力, 如 Basset 力、布朗力、热泳力、Saffman 升力等。本文由于气相密度比液相密度小很多, 其他力可忽略不计, 因此  $F=0$ 。

在横向射流的雾化过程中, 采用离散随机游走模型考虑粒子在流场中的湍流扩散。选用的一次雾化模型为平口喷嘴雾化模型, 同时采用 KH-RT (Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor) 模型作为二次雾化模型。

### 1.4 几何模型与计算工况

将实验装置简化, 其示意图如图 2 所示, 计算域尺寸(长×宽×高)为 130.0 mm×28.9 mm×25.8 mm 的立方体。其中喷口距离空气入口边界 30 mm, 喷口下游长度为 100 mm, 喷口直径 0.254 mm。喷嘴位置位于 X-Y 平面, 定义液体入口方向为 Z 轴正方向。

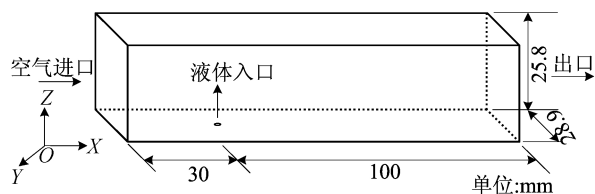


图 2 计算域示意图

采用网格工具 ICEM 对计算域进行结构化网格划分, 射流喷口区域进行网格加密, 如图 3 所示。

根据 Stenzler 等人的试验条件, 列出横向来流空气及液体射流的参数见表 2 所列。

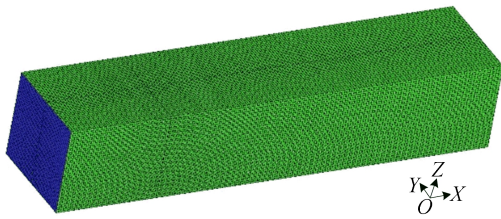


图 3 网格划分示意图

表 2 液相及气相初始条件

参数变量	数值
气流温度/K	573
气流速度/(m/s)	166
动量比	18
液体速度/(m/s)	17.48
空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	0.62
气体黏性系数/(N·s/m <sup>2</sup> )	2.98×10 <sup>-5</sup>
韦伯数	72.25
表面张力/(N/m)	0.072 8

选择通用仿真软件 ANSYS Fluent 进行数值模拟研究,并编写用户自定义函数(user defined function,UDF)导入求解器中,实现 VLES 方法的植入。

由于湍流是一种极其复杂的流动现象,其流场内部包含多个不同尺度的涡旋。网格密度较低时,模型无法捕捉到更小尺度的涡旋结构,而网格密度增加将导致计算量增加,累积误差也会增大,因此网格尺度将直接影响解析这些涡旋结构的精度和效率。而 VLES 方法中施加了分辨率因子,可以根据当地网格尺度和湍流尺度自适应地调节湍流模化比例,在一定程度上降低了模拟结果对网格尺度的敏感度,为了验证这一点,下文将使用不同的网格密度并对比不同湍流模型对预测结果的影响。

本文共使用 3 套网格分别对射流在不同湍流模型下的数值模拟结果进行对比分析,以验证模型的有效性。具体网格数量信息见表 3 所列。

计算采用的是基于瞬态问题的速度压力耦合

的 PISO 算法,动量方程中的对流项和扩散项均为二阶迎风格式离散。初始条件为给定来流空气参数,计算采用速度入口、压力出口的边界条件,壁面边界为无滑移,基于上述 3 套网格对 RANS 模型和 LES 模型均使用相同的边界条件,以对比不同工况下不同湍流模型的预测精度。统计 3 种湍流模型的计算时长,见表 4 所列。

表 3 网格信息

网格	网格数量/10 <sup>6</sup>
Mesh1	41
Mesh2	80
Mesh3	155

表 4 计算时长

网格	单位:h		
	RANS	LES	VLES
Mesh1	8.1	8.3	8.0
Mesh2	8.3	8.6	8.7
Mesh3	8.8	9.1	9.2

## 2 计算结果及分析

### 2.1 射流轨迹

液体射流在横向气流中的穿透高度是表征液体与空气混合程度的重要参数之一。本文根据模拟实验给出的经验相关性方程与本研究的数值模拟结果进行对比分析,射流轨迹经验关系表达式为:

$$\frac{z}{d} = 2.29q^{0.417} \left(\frac{x}{d}\right)^{0.429} \quad (13)$$

鉴于前人的众多用于预测横流中射流轨迹的经验相关性的研究是基于不同实验条件的,因此按照大多数的惯例,将  $x, z$  值通过喷嘴直径  $d$  标准化,射流穿透深度模拟值与经验关系式实验值对比如图 4~图 6 所示,数值计算的射流轨迹模拟结果与经验方程实验结果基本相似,可以描绘出流场中射流的基本形态。

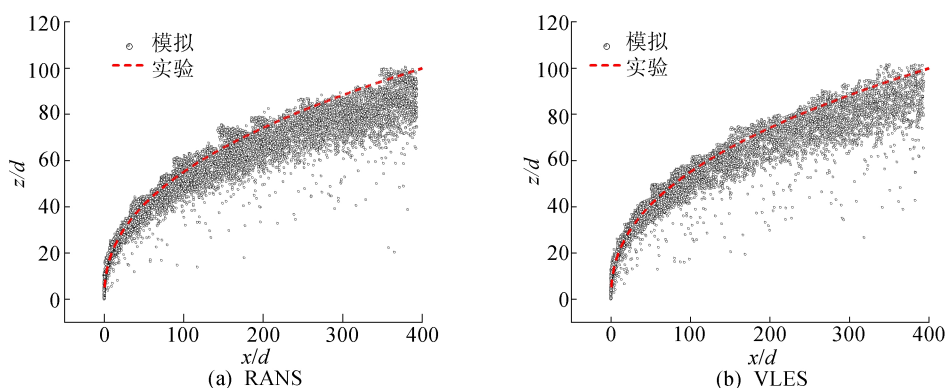


图 4 Mesh1 射流穿透深度模拟值与经验关系式实验值对比

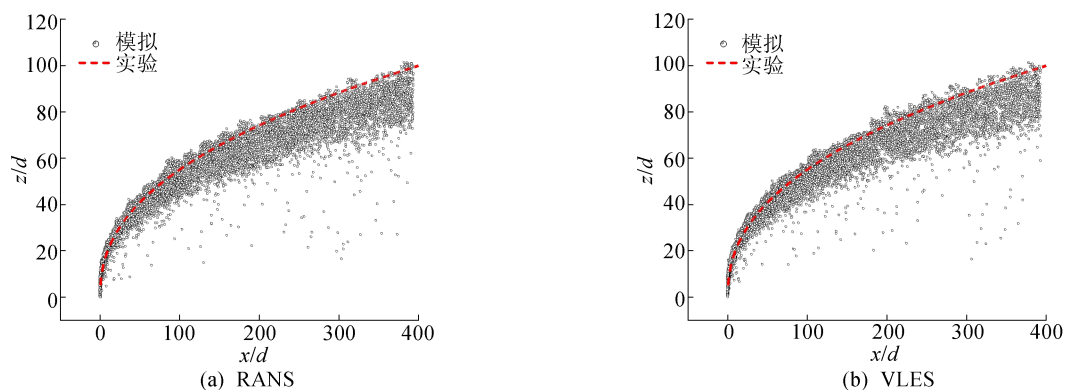


图 5 Mesh2 射流穿透深度模拟值与经验关系式实验值对比

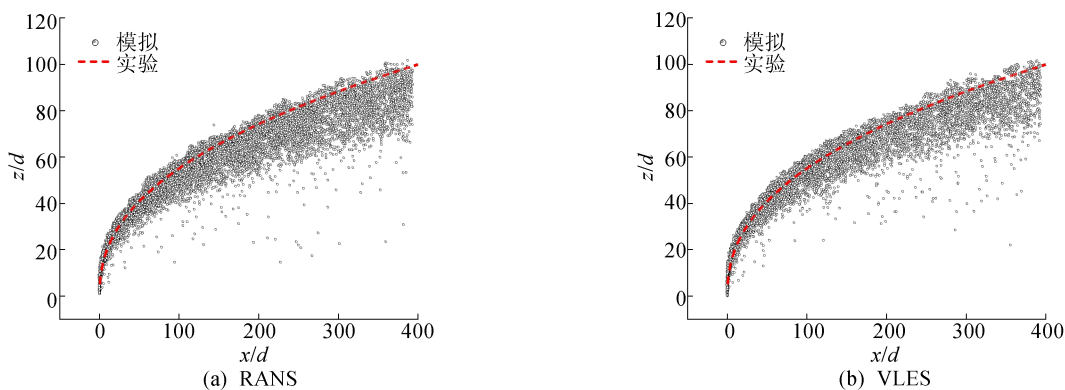


图 6 Mesh3 射流穿透深度模拟值与经验关系式实验值对比

从图 4~图 6 可以看出,在 3 套网格下不同湍流模型计算得出的射流穿透轨迹均与经验关系式计算的差别不大。但对比可发现,在网格粗糙时,VLES 模型模拟得出的穿透轨迹比 RANS 模型和经验关系式得出的更为贴合。

由文献[1]的研究已知,射流的穿透力主要受动量、通量比等因素的影响,但是不同网格及湍流模型对穿透轨迹的预测误差也不可忽略。而 VLES 模型区别于 RANS 模型采用了分辨率控制函数,在一定范围内可以更好地处理流场中的流动细节,使得射流轨迹的预测精度有较为明显的提升,即使在相当粗糙的网格下也能比 RANS 模型有更好的预测结果。

## 2.2 液滴平均直径

射流雾化的模拟效果也可通过液滴直径对比来反映。雾化过程中直径较小的液滴具有较大的表面积,更容易与气体相互作用发生蒸发或化学反应过程,同时也与雾化的喷嘴结构、液体性质等有关。

液滴直径与雾化之间存在密切联系,其大小对雾化过程的应用有重要影响,是雾化过程的重要特征。本文采用索特平均直径来计算液滴直径大小,其计算公式为:

$$D = \frac{\sum_i (N_i d_i^3)}{\sum_i (N_i d_i^2)} \quad (14)$$

其中: $D$  为索特平均直径; $d$  为颗粒的直径; $N$  为直径为  $d$  的颗粒数量;下标  $i$  表示不同颗粒。

将 3 套网格在 3 种湍流模型下的液滴平均直径与实验的拟合公式进行对比分析,公式为:

$$D = 3.9dReWe^{-0.25} \quad (15)$$

不同模型对液滴索特平均直径的预测对比如图 7 所示,可以看出,预测液滴直径与实验结果基本保持一致,但 3 套网格中均为 VLES 模型与实验结果更为接近。

随着网格尺寸的细化,RANS 模型和 LES 模型预测结果波动比较明显,而 VLES 模型预测结果波动相对较小,说明 VLES 模型相对于另外 2 种模型对网格的敏感度更低一些,受网格尺度影响较小。对于像横侧射流这样的复杂湍流场,由于各区域的湍流尺度变化较大,不同区域对网格尺度的要求不同,使用大涡模拟时很难保证所有区域的网格都能满足尺度要求,此时 VLES 模型因采用了需模化比例的分辨率控制函数体现出了其特有的优势。因此在不明确合适的网格尺度时,选用 VLES 模型可能比 RANS、LES 模型能取得更为真实的预测结果。

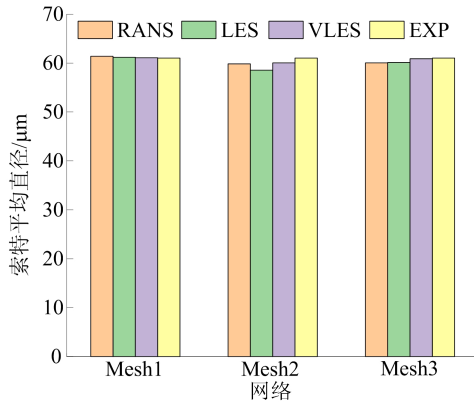


图 7 不同模型对液滴索特平均直径的预测对比

### 2.3 $F_r$ 值分布

对比不同湍流模型, VLES 模型取得不错的预测效果,这是由于 VLES 模型采用了区别于其他模型的分辨率控制函数  $F_r$ ,因此本节将对  $F_r$  值的分布进行分析,结果如图 8 所示。

从图 8a 可以看出, Mesh1 中网格较为稀疏,而空气进口区域流速较大扰动强烈,需要进行模化的湍流尺度占总的湍流尺度的比例较大,  $F_r$  值

趋向于 1,在进口区域附近表现为 RANS 模型。从图 8b 可以看出, Mesh2 网格尺寸细化,此时的网格尺度可以捕捉到较多的湍流尺度,需要模化的湍流尺度占比降低,因此  $F_r$  值整体较图 8a 降低。随着向下游发展,可以看到  $F_r$  值均位于 0~1.0 之间,表明此时模化了部分湍流尺度,表现类似于 LES 模型。从图 8c 可以看出, Mesh3 网格尺寸进一步细化,有利于直接求解,因此模化的湍流尺度占比更低,  $F_r$  值较小且整体稳定, VLES 模型表现为直接数值求解。由此可见对于针对不同的网格尺度, VLES 模型通过施加分辨率函数,可以自适应地根据当地网格尺度和湍流尺度在 RANS、LES 和 DNS 中选择合适的求解模型,节省计算资源的同时也提高了计算精度。

上文比较了穿透深度和液滴平均直径等宏观参数,而 VLES 模型的优势在于以较少的网格更精确地模拟湍流瞬时流场结构,因此下文将对不同网格下不同模型预测的涡旋结构进行进一步比较分析。

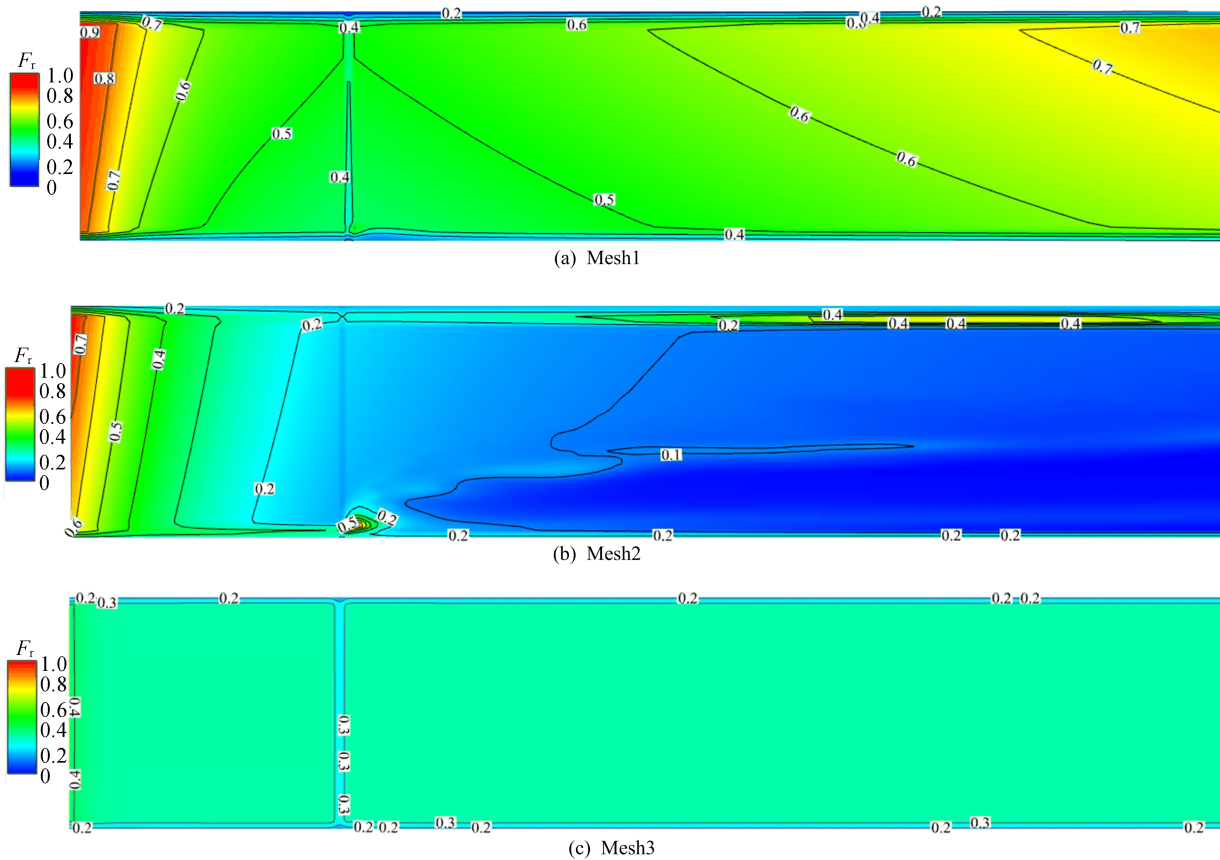


图 8 不同网格中分辨率控制函数分布

### 2.4 流场涡旋结构

本节使用  $Q$  准则<sup>[22]</sup>分析 3 种湍流模型下预测的流场涡结构。  $Q$  定义为:

$$Q = \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\Omega}\|^2 - \|\mathbf{S}\|^2 \quad (16)$$

其中,  $\boldsymbol{\Omega}$  和  $\mathbf{S}$  分别为旋转速率张量和应变速率张

量,  $Q > 0$  表示流场中存在涡旋结构。3 种湍流模型下在  $Q = 3 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$  等值面的分布如图 9~图 11 所示。

由图 9~图 11 可知, 在不同网格尺度下, 射流进口区域 3 种模型均捕捉到大尺度涡旋结构, RANS 模型随着网格加密能捕捉到更多的细部结构, 而 VLES 模型在不同网格密度下均可以捕捉到比 RANS 模型更多的细小涡旋结构, 这是由于 VLES 模型在模拟湍流黏性力时充分考虑了网格的疏密程度。随着流动向下游发展, VLES 模型相较于 RANS 模型可以更好地捕捉流场中

的大尺度涡旋结构, 这是由于 RANS 模型通过对流动进行时间平均来获得平均流场的性质, 对于稳态流动和涡旋小的情况可能较好, 但在处理大尺度流动结构和涡旋时可能会失效。LES 模型整体预测结果与 VLES 模型几乎一致, 但 LES 模型按照空间尺度对流场进行过滤, 对大尺度紊流结构保留并直接求解, 对小尺度湍动简化建模, 这种方法对计算资源需求很大。而 VLES 结合了 LES 和 RANS 模型的优势, 使得 VLES 模型在模拟较高雷诺数的复杂湍流以及涡旋的空间、时间演化过程中更具有优势。

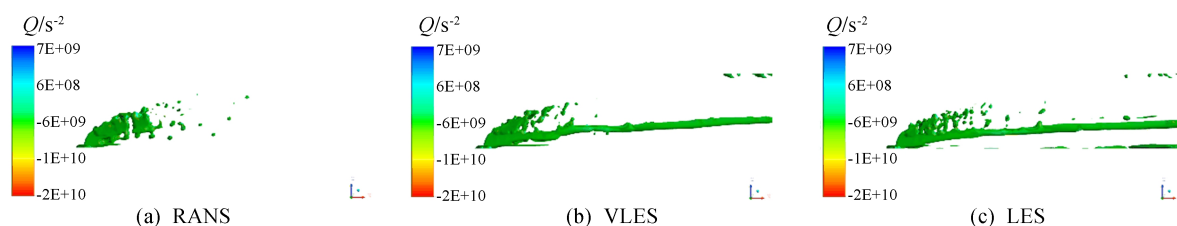


图 9 Mesh1 网格尺度下 3 种湍流模型预测的流场涡旋结构对比

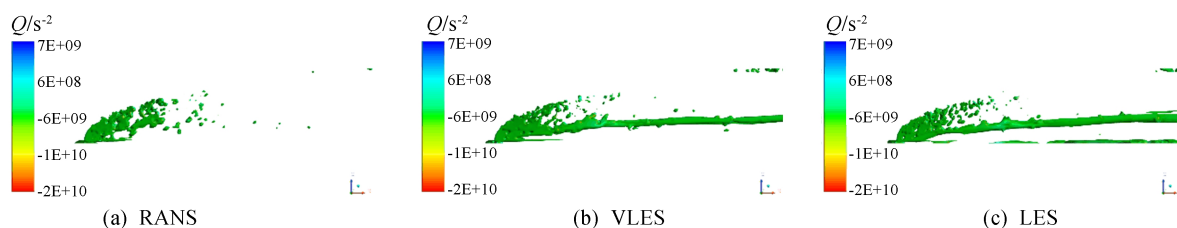


图 10 Mesh2 网格尺度下 3 种湍流模型预测的流场涡旋结构对比

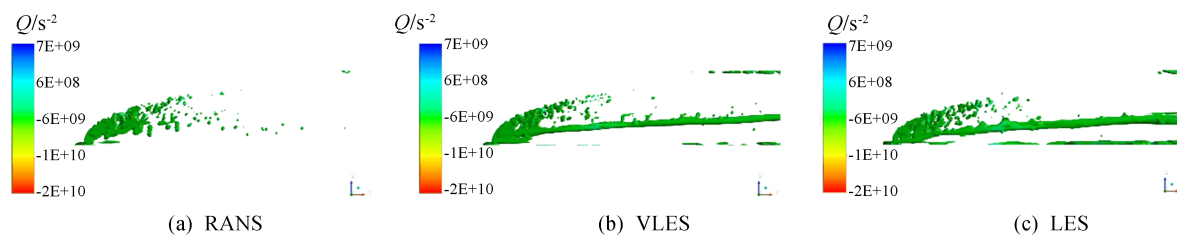


图 11 Mesh3 网格尺度下 3 种湍流模型预测的流场涡旋结构对比

### 3 结 论

本文采用 VLES 模型对横向射流在来流空气中的雾化现象进行数值模拟, 得出如下结论:

1) VLES 模型可以预测流场中射流雾化的基本形态, 通过对比多套网格尺度下不同湍流模型的预测结果, 发现 VLES 模型均表现出不错的预测效果, 比 RANS 模型预测结果精度更高。

2) 结合  $F_r$  值分布状况与流场涡旋结构的分析, 发现 VLES 模型能够根据当地网格尺度和湍流尺度自适应切换不同的模型进行求解, 相比

RANS 模型能捕捉到更多流动细节。另外, 相对于 RANS 模型误差明显, LES 模型需要非常细密的网格, VLES 模型对网格分辨率敏感度最低, 即使在相当粗糙的网格中也能表现出较高的准确性, 在工程运用中具有广泛的前景。

### [参 考 文 献]

- [1] STENZLER J N, LEE J G, SANTAVICCA D A, et al. Penetration of liquid jets in a crossflow[J]. *Atomization & Sprays*, 2013, 16(8): 887-906.

- [2] LIN K C, KENNEDY P, JACKSON T. Penetration heights of liquid jets in high-speed crossflows[C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. [S. l. : s. n. ], 2015:1-10.
- [3] SCHETZ J A, PADHYE A. Penetration and breakup of liquids in subsonic airstreams [J]. AIAA Journal, 1977, 15(10):1385-1390.
- [4] CAMUSSI R, GUJ G, STELLA A. Experimental study of a jet in a crossflow at very low Reynolds number[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002, 454:113-144.
- [5] ESLAMIAN M, AMIGHI A, ASHGRIZ N. Atomization of liquid jet in high-pressure and high-temperature subsonic crossflow[J]. AIAA Journal, 2014, 52(7):1374-1385.
- [6] SPRING C R A N. An experimental and numerical study of the isothermal flowfield behind a bluff body flameholder [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 119:1-15.
- [7] WU P, KIRKENDALL K A, FULLER R P, et al. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows[J]. Journal of Propulsion and Power, 1997, 13(1):64-73.
- [8] PRAKASH S R, JAIN S S, LOVETT J A, et al. Detailed numerical simulations of atomization of a liquid jet in a swirling gas crossflow[J]. Atomization and Sprays, 2019, 29(7):577-603.
- [9] MEI Y, ZHANG P, YAN Y W. Numerical simulation on spray characteristics of fuel jet in a crossflow[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 37(Suppl):18-27.
- [10] 何园源,于小兵,王智华,等. 横向射流中煤油雾化特性的数值研究[J]. 推进技术, 2023, 44(3):149-159.
- [11] 张权,刘玉英,刘坤霖,等. 时变来流条件下横向射流燃油破碎和雾化特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(8):57-66.
- [12] 王雄,李德波,罗坤. 圆孔射流近场湍流特性 DNS 与 RANS 模拟的对比研究[J]. 能源工程, 2010(5):1-6.
- [13] ZHANG Q, SCHRODER W, MEINKE M. A zonal RANS-LES method to determine the flow over a high-lift configuration[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(7):1241-1253.
- [14] 孙明波,汪洪波,梁剑寒,等. 复杂湍流流动的混合 RANS/LES 方法研究[J]. 航空计算技术, 2011, 41(1):24-29.
- [15] WAN P, HAN X, MAO J. Very large eddy simulation of turbulent flow and heat transfer for single cylinder and cylindrical pin matrix [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 169:114972.
- [16] XIA Z, CHENG Z, HAN X, et al. VLES turbulence modeling for separated flow simulation with OpenFOAM[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198:104077.
- [17] WANG T, XUAN Y, HAN X. The effects of tip gap variation on transonic turbine blade tip leakage flow based on VLES approach[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 111:106542.
- [18] 宛鹏翔,范俊,韩省思,等. 冲击射流流动换热超大涡模拟研究[J]. 推进技术, 2020, 41(10):2237-2247.
- [19] 周洁,宛鹏翔,韩省思,等. 燃烧室-涡轮耦合流动传热超大涡模拟研究[J]. 推进技术, 2022, 43(3):238-248.
- [20] HSIEH K, LIEN F, YEE E. Towards a unified turbulence simulation approach for wall-bounded flows [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2010, 84(2):193-218.
- [21] HAN X, KRAJNOVIC S. Very large eddy simulation based on  $k-\omega$  model [J]. AIAA Journal, 2015, 53(4):1103-1108.
- [22] HUNT J C R. Studying turbulence using direct numerical simulation; 1987 Center for Turbulence Research NASA Ames/Stanford Summer Programme[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 190:375-392.

(责任编辑 吴亮)

## (上接第 1167 页)

- [3] 姜典卓,高玲,林芹兰. 老年人跌倒危险因素研究[J]. 求医问药, 2013, 11(10):7-9.
- [4] 宋利娜,张洪斌. 脑卒中偏瘫患者平衡功能康复方法研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2012, 27(8):781-783.
- [5] 宋杨杨,陈校云,张曙欣,等. 虚拟现实技术在我国康复医学领域中的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(1):128-132.
- [6] 韦启航,陆文莲,傅祖芸,等. 人体步态分析系统—足底压力测量系统的研制[J]. 中国生物医学工程学报, 2000, 19(1):32-40.
- [7] LUNA-PEREJÓN F, SALVADOR-DOMÍNGUEZ B, PEREZ-PEÑA F, et al. Smart shoe insole based on polydimethylsiloxane composite capacitive sensors[J]. Sensors, 2023, 23(3):1298.
- [8] 马小凡. 基于足底支撑面扰动的平衡能力评估系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2023.
- [9] 汪金龙. 基于足底力与姿态信息的平衡训练交互系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2023.
- [10] 张智宇. 人体平衡能力测试系统设计[D]. 太原:中北大学, 2019.
- [11] 袁刚,张木勋,张建华,等. 足底压力分布测量系统及临床应用[J]. 中国康复, 2003, 18(1):22-25.
- [12] 刘琨. 人体站立平衡系统建模与平衡能力评价方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
- [13] SAHLI S, GHROUBI S, REBAI H, et al. The effect of circus activity training on postural control of 5-6-year-old children[J]. Science & Sports, 2013, 28(1):11-16.
- [14] ETERKA R J. Sensorimotor Integration in Human Postural Control[J]. Journal of Neurophysiology, 2002, 88(3):1097-1118.

(责任编辑 胡亚敏)