

喷嘴内云空化瞬态特性的湍流模型适用性研究

程西怡¹, 李红梅^{2,3}, 韩丹³, 赵文涛¹, 郭根苗¹, 何志霞¹

(1. 江苏大学能源研究院, 212013, 江苏镇江; 2. 上海交通大学动力机械及工程教育部重点实验室, 200240, 上海; 3. 中国船舶集团有限公司第七一一研究所先进船舶发动机技术全国重点实验室, 201108, 上海)

摘要: 为评估不同湍流模型对喷嘴内云空化瞬态演化特性的解析能力与适用性, 基于数值模拟方法, 结合空化多相流模型, 对剪切应力输运 $k-\omega$ 雷诺平均模型、大涡模拟、延迟分离涡模拟和超大涡模拟的解析能力对比分析。结果表明: 剪切应力输运 $k-\omega$ 雷诺平均模型计算效率高, 但由于采用时均化处理, 难以准确捕捉云空化脱落与溃灭等瞬态行为; 大涡模拟模型可精确解析小尺度涡结构与瞬态压力脉动, 能够再现云空化全周期演化过程, 模拟结果与可视化试验吻合良好, 但计算资源消耗为剪切应力输运 $k-\omega$ 模型的 4 倍以上; 延迟分离涡模拟因近壁面与弱旋区域仍采用雷诺时均方法, 导致对脱落过程、回射流及高频压力响应的预测精度受限; 超大涡模拟基于尺度自适应的动态混合雷诺时均-大涡方法, 在保障脱落细节解析能力的同时, 显著降低了计算资源消耗, 相较于大涡模拟节省约 30%。此外, 基于压力脉动的傅里叶变换分析显示, 超大涡模拟预测的云空化脱落主频与试验偏差小于 5%, 验证了其在云空化建模中的准确性与高效性, 具备一定的工程应用潜力。

关键词: 湍流模型; 喷嘴; 云空化; 脱落; 解析能力

中图分类号: TK422 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202510015 **文章编号:** 0253-987X(2025)10-0160-10

Study on the Applicability of Turbulence Model to Transient Evolution Characteristics of Cloud Cavitation in Nozzle

CHENG Xiyi¹, LI Hongmei^{2,3}, HAN Dan³, ZHAO Wentao¹, GUO Genmiao¹, HE Zhixia¹

(1. Institute of Energy Research, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. National Key Laboratory of Marine Engine Science and Technology, Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: To evaluate the resolution capability and applicability of different turbulence models in analyzing the transient evolution characteristics of cloud cavitation in nozzles, this study employs numerical simulations combined with a cavitation multiphase flow model to compare the performance of the shear stress transport (SST) $k-\omega$ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) model, large eddy simulation (LES), delayed detached-eddy simulation (DDES), and very large eddy simulation (VLES). The results show that the SST $k-\omega$ model offers high computational efficiency but fails to accurately capture transient behaviors such as cloud cavitation shedding and collapse due to its time-averaged treatment. In contrast, the LES model precisely resolves small-scale vortex structures and

transient pressure fluctuations, reproducing the full-cycle evolution of cloud cavitation, with simulation results closely matching visual experimental data. However, its computational cost exceeds that of the SST $k-\omega$ model by more than four times. DDES, due to the employment of RANS in near-wall and low-vorticity regions, exhibits limited accuracy in predicting shedding processes, re-entrant jets and high-frequency pressure responses. VLES, based on a scale-adaptive dynamic hybrid RANS-LES approach, significantly reduces computational costs, approximately 30% less than LES, while maintaining high resolution of shedding details. Furthermore, Fourier transform analysis based on pressure fluctuations reveals that VLES predicts the dominant shedding frequency of cloud cavitation with less than 5% deviation from experimental data, validating its accuracy and efficiency in cloud cavitation modeling and demonstrating its potential for engineering applications.

Keywords: turbulence model; nozzle; cloud cavitation; shedding; resolving capability

在汽车、船舶、航空动力装置的高压微尺度喷嘴系统中,空化现象作为伴随气液相变的跨相态高速湍流运动,具有显著的瞬态特性和多尺度湍流结构特征。该现象不仅显著影响燃料雾化质量,更是导致喷嘴空蚀失效的关键诱因^[1-2]。其中,云空化作为空化流动的典型形态,其非定常脱落过程中伴随的微气泡溃灭行为会引发局部超高压脉冲,可达 GPa 量级,由此产生的空蚀效应、压力脉动及宽频噪声已成为制约动力系统可靠性的重要因素^[3-4]。当前研究面临的主要挑战在于:喷嘴内部空化流场具有毫米级特征尺度、微秒级动态特性及复杂相间作用,受限于现有测试技术的时空分辨率,难以通过试验手段完整解析瞬态空化流场的特性^[5-6]。因此,需要采用数值模拟方法对其内部流动规律进行研究。

目前,雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方法仍为空化模拟的主流手段。相关研究验证了多种 RANS 模型的适用性:Miltner 等^[7]评估了 RANS 在喷流速度预测中的准确性,Chebli 等^[8]运用 SST $k-\omega$ 模拟文丘里型流道和水翼结构中云空化的基本演化过程。

文献[9-10]在工程条件下重构了喷嘴壁面空化云与液力变矩器内空化形态。RANS 的时均化处理难以捕捉空化云演化过程中的瞬态细节。直接模拟计算(DNS)虽能解析全尺度湍流结构,但计算成本巨大,不适用于工程模拟^[11]。相比之下,大涡模拟(LES)通过解析大尺度涡结构并对小尺度湍流建模,适用于动态流场与空化演化过程研究。Yang 等^[12]揭示了高雷诺数下非定常湍流与平均场之间的耦合机制。文献[13-14]分别重建了再入射流触发机制与空化泡动态演变过程,结果与试验高度一致。程怀玉等^[15]将 LES 应用于水翼泄漏涡空化模式识别。

虽然 LES 方法在捕捉复杂流动和空化现象方

面具有明显优势,但高计算成本和对高分辨率网格的需求限制了其广泛应用。为此,混合湍流模型应运而生,旨在兼顾计算效率与模拟精度。该方法通过分区求解策略,即 RANS 处理近壁区流动、LES 解析主流区大尺度涡结构,在保证计算效率的同时提高模拟的准确性。在高压水射流剪切空化研究中,Yang 等^[16]对比延迟分离涡模拟(DDES)与应力混合涡模拟(SBES),证实两者均能有效捕捉剪切层内涡旋演化及空化云动态。Shen 等^[17]基于 DDES 方法成功模拟了涡核区空化初生与压力脉动特征,预测结果与高速摄影观测数据吻合良好。Xia 等^[18]通过超大涡模拟(VLES)对突扩管强旋流的研究表明,即使在低网格密度条件下,该方法仍能精确重构涡核进动与剪切层失稳现象,同时有效捕捉雷诺应力各向异性演化特征。He 等^[19]采用 VLES 研究喷嘴油器内涡诱导空化,验证了该方法在较粗网格上对 Rankine 涡切向速度分布的预测能力,其空化形态模拟结果与试验观测一致性显著。研究表明,DDES、SBES 方法虽精度优异,但对自由剪切流仍需维持 LES 级别网格分辨率,而 VLES 通过亚网格应力模型优化,可突破此限制。

鉴于各湍流模型的理论局限性,本文系统评估了 RANS、LES、DDES 及 VLES 方法在喷孔空化脱落过程模拟中的预测能力,重点分析了在小尺度涡结构捕捉、相变过程解析与云空化演化特征还原中的差异与适用范围,研究结果可为高精度空化模拟与湍流模型优化应用提供参考。

1 数值模型及方法

1.1 喷嘴几何与边界条件

本模拟中方孔喷嘴的几何形状如图 1 所示。该

孔的入口直径为 2 mm, 收缩比为 4, 孔口长度 L 与孔口直径 d 之比为 2。与试验中使用的孔口一样, 孔口的入口边缘没有任何圆角, 研究的重点是孔内的部分空化阶段。为降低计算成本, 下游边界设置在孔口出口处, 上游边界设置在孔入口前 6 mm 处, 边界条件包括压力入口、压力出口和无滑动壁。

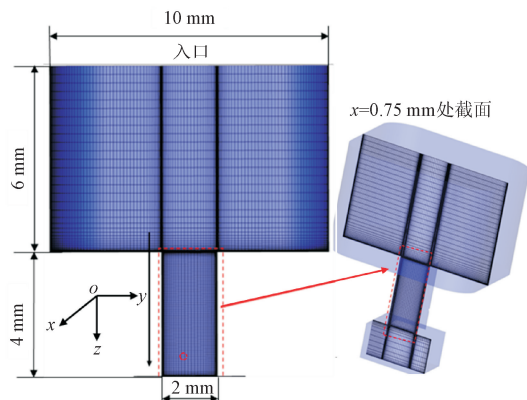


图 1 喷嘴几何结构及计算网格 $x=0.75$ mm 截面

Fig. 1 Nozzle geometry and calculation grid $x=0.75$ mm section

本研究引用文献[20]的网格设置, 数值模拟结果与试验数据表现出良好的一致性, 验证了网格配置的合理性。文献[21]在相同网格条件下对比了纯 RANS、LES 及混合湍流模型的模拟效果, 结果表明混合模型在精度上具有显著优势, 而纯 LES 模型因网格分辨率不足导致失效。为确保模型对比的公平性, 采用如下配置: LES 模型网格数为 1 369 467, RANS、DDES 和 VLES 模型网格数均为 896 358。4 种湍流模型中所有计算网格均确保壁面 $Y^+ \approx 1$, 远壁面时 LES 模型 $Y^+ \leq 5$, 其他 3 种模型的 Y^+ 介于 1 ~ 10 之间, 数值符合标准湍流模型要求, 能有效捕捉近壁面湍流现象, 并确保湍流动能与黏度的准确计算, 从而保证模拟结果的可靠性与准确性。

本研究基于商用软件 FLUENT 进行数值模拟, 网格生成采用 ICEM 软件完成, 计算域采用六面体结构网格离散, 以确保模拟精度与计算效率。针对收缩段与喉部等空化关键区域进行了网格加密, 如图 1 所示。考虑到四角区域为空化高发区, 中心截面无法全面反映空化特征, 选取距离喷孔中截面 0.75 mm 处作为分析基准, 以更好捕捉剧烈空化区域的动态特性。为研究空化流动与压力脉动的耦合关系, 在该截面距喷孔入口 3 mm 处设置压力监测

点, 入口边界设置为恒定压力 0.26 MPa, 出口压力设定为标准大气压。流动介质选用柴油, 物性参数设置如下: 密度为 830 kg/m³, 饱和蒸汽压为 2 kPa, 温度为 25 °C。数值模拟采用瞬态求解器, 时间步长设定为 1×10^{-6} s。

1.2 多相流模型与空化模型

考虑到计算精度、收敛性和计算效率的要求, 选择流体体积法 (VOF) 多相流模型和空化模型结合 4 种湍流模型进行孔内流动的计算, 在 VOF 多相流模型中, 流体域内每一点都包含一种或多种流体相, 通过求解每相体积分数的连续性方程来跟踪相之间的界面, 适用于涉及复杂界面运动和变形的流动问题, 同时 VOF 模型与湍流、空化模型具有很好的兼容性。

1.3 湍流模型

由于喷嘴内具有复杂的多相现象、湍流行为和显著的雷诺数延迟, 选择合适的湍流模型进行数值模拟至关重要。本文主要比较 RANS、LES、VLES、DDES 模型对喷嘴内流场瞬态特性的模拟精度。

SST $k-\omega$ 模型在涡结构计算方面表现较为优秀, 是 VLES 混合湍流模型的基础模型。该模型适用于稳态或弱瞬态工况下空化区域的大尺度分布预测, 具备较高的计算效率, 适合用于工程初步设计及参数敏感性分析。

大涡模拟 (LES) 方法通过引入空间滤波函数, 将瞬时湍流运动分离为可解析的大尺度涡旋运动和需建模的小尺度湍流结构。该方法适用于研究尺度较小、非定常特征显著的空化相变过程, 能够解析小尺度涡结构与局部压力波动, 计算资源消耗相对较高, 通常要求较高的网格分辨率与时间步精度。LES 方法使用了自适应壁面的局部涡流黏度 (WALE) 模型。

超大涡模拟方法 (VLES) 是根据计算网格的分辨率, 实现从 RANS、LES 到 DNS 之间光滑过渡的自适应湍流建模方法。在 VLES 模拟过程中, 可以选择大于 LES 网格尺度小于计算域宏观特征尺度的任何长度, 因此时间步长可以更大且允许以隐式时间格式推进。考虑到喷嘴内流动处于受限空间内, 壁面附近处的流动影响不容忽视, 因此采用文献[22]所提新型 VLES 模化方法, 发展基于 SST $k-\omega$ 湍流模型框架的 VLES 模型, 湍流黏度定义为

$$\mu_t = F_r \frac{\rho k}{\omega \theta} \quad (1)$$

式中: F_r 为区域混合函数; ρ 为流体密度; k 为湍动能; ω 为比耗散率; θ 为黏度限制因子。

式(1)与 SST $k-\omega$ 的区别在于分辨率控制函数 F_r , 该函数的模化是 VLES 湍流模型的核心。文献[23-24]中 F_r 被模化为未求解的湍流动能与总的湍流动能之比, 表达式如下

$$F_r = \frac{\int_{L_i}^{L_c} E(L) dL}{\int_{L_i}^{L_k} E(L) dL} \quad (2)$$

$$L_c = 0.61(\Delta x \Delta y \Delta z)^{\frac{1}{3}};$$

$$L_i = k^{\frac{3}{2}} / (0.09k\omega); L_k = v^{\frac{3}{4}} / (0.09k\omega)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中: L_c, L_i, L_k 分别为湍流过滤、湍流积分、Kolmogorov 长度尺度; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为 3 个空间方向上的网格尺寸; v 为层流运动黏度。

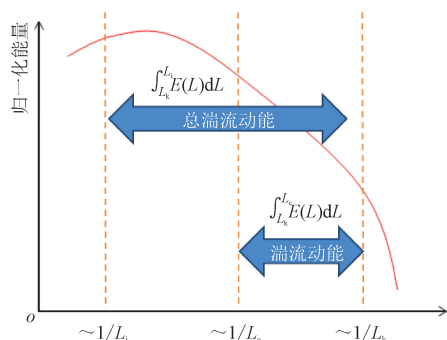


图 2 分辨率控制函数能谱分布图

Fig. 2 Energy spectrum of the resolution control function

第一个 DES 模型 DES97 的主要思想是重新定义 RANS 模型的湍流特征长度尺度, 其定义的湍流长度尺度如下

$$L_L = \min(L_R, L_L) \quad (4)$$

式中: L_R 为 RANS 湍流特征长度尺度; L_L 为 LES 模型湍流特征长度尺度。在近壁面区域, RANS 模型主导计算, 保证边界层建模的稳定性; 远离壁面时, 网格精度足以支持 LES, 模型自动切换以解析小尺度涡结构。为避免模式切换过早, DDES 引入延迟函数修正湍流特征长度尺度, 该方法适用于大涡结构与附壁区共存的复杂空化流场, 在保持一定精度的同时提升计算效率, 但在近壁及无旋区域的预测精度有限。在原湍流特征长度尺度增加了一个延迟函数 f_d , 由此 DDES 的湍流特征长度尺度定义为

$$L_D = L_R f_d \max(0, L_R - L_L) \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 不同湍流模型下喷嘴内云空化周期性脱落特性分析

在云空化发展阶段, 尽管上游压力保持恒定, 喷嘴内空化结构仍受到大尺度湍流涡和局部流动不稳定性的显著影响, 呈现出强烈的瞬态非稳态特征。试验结果表明, 在湍流扰动作用下, 空化团块周期性发生脱落、破碎, 从周期起始时刻 t_0 开始的演化过程, 最终形成了典型的云空化形态。通过高速摄像技术捕捉瞬态空化结构演化序列, 试验分析的脱落频率约为 2 600 Hz, 清晰揭示了云空化从脱落至溃灭的动态过程, 其中云空化的断裂与再发展特征尤为显著, 如图 3 所示。上述现象进一步印证了湍流涡结构与局部压力波动对云空化形态演化的主导作用, 试验结果与 4 种湍流模型喷嘴流量的对比如图 4 所示, 图中矩形为片空化(A), 圆形为云空化(B)。可以看出, 4 种湍流模型的预测结果与试验数据均保持良好吻合, 相对偏差小于 5%, 进一步验证了数值模拟方法预测的可靠性和精度。

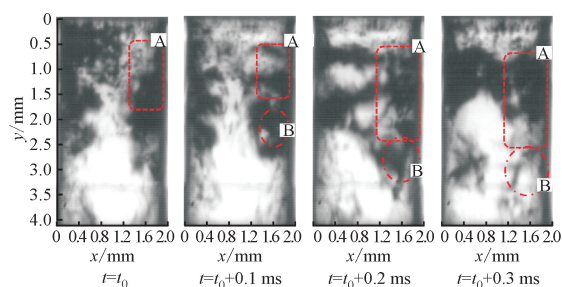


图 3 试验空化流动图

Fig. 3 Experimental cavitation flow diagram

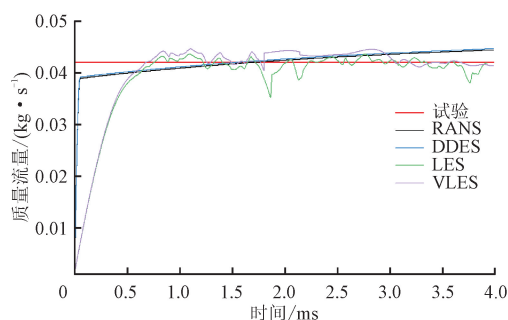


图 4 试验与 4 种湍流模型的质量流量对比

Fig. 4 Comparison of experimental and four turbulence models for mass flow rate

不同湍流模型下云空化周期脱落瞬态特性如图 5 所示。从计算效率分析, RANS 模型消耗约 250

核时, LES 模型的计算成本增至 4 倍, 而 VLES、DDES 模型的计算成本则分别降至 LES 的 70%、50%。对空化周期性演化过程分析可得, 初始阶段, 片空化(A)沿壁面扩展至最大长度后, 受湍流与回射流耦合作用, 尾部发生涡团振荡脱落。数值模拟表明: LES 模型凭借对小尺度涡结构及瞬态压力脉动的高分辨率解析, 能精确捕捉空化核演化与局部溃灭细节; VLES 模型虽在微观尺度解析上稍显不足, 但仍能准确呈现空化脱落的宏观形态演变, 其涡团运动特征与试验观测一致。相比之下, RANS、DDES 模型仅能识别空化初生阶段, 对动态脱落过程的表征显著缺失。约 0.1 ms 后, 逆向传播的回射流导致片空化断裂为离散云空化团(B), 同时新生片空化(A)持续发育。LES 模型能够清晰地展示回射流引发的局部压力变化, 以及云空化破碎与片空

化再生的动态过程, 而 VLES 模型可以完整解析云空化脱落的瞬态趋势、局部压分布及涡核迁移路径的演变。相较之下, DDES、RANS 对流动细节的再现能力相对有限, 随着流动发展, 脱落的涡团引发片状空化尾部微尺度溃灭, 产生的压力脉冲与微射流进一步加剧云空化脱落。在此过程中, LES、VLES 均能有效表征导致涡团脱落与空化塌缩的流动过程: LES 精确再现了空化核心区湍流涡的瞬态演化过程, 速度波动特征与试验观测高度一致; VLES 虽在小尺度湍流结构解析上稍显不足, 但对大尺度涡动特征的捕捉能力与 LES 相当。RANS 因时均化方法无法解析旋流涡团的动态特性, DDES 虽能预法无法解析旋流涡团的动态特性, DDES 虽能预测回射流区域, 但对涡团脱落频率的模拟存在明显偏差, 导致其难以准确复现试验中的高频速度脉动及复杂涡流细节。

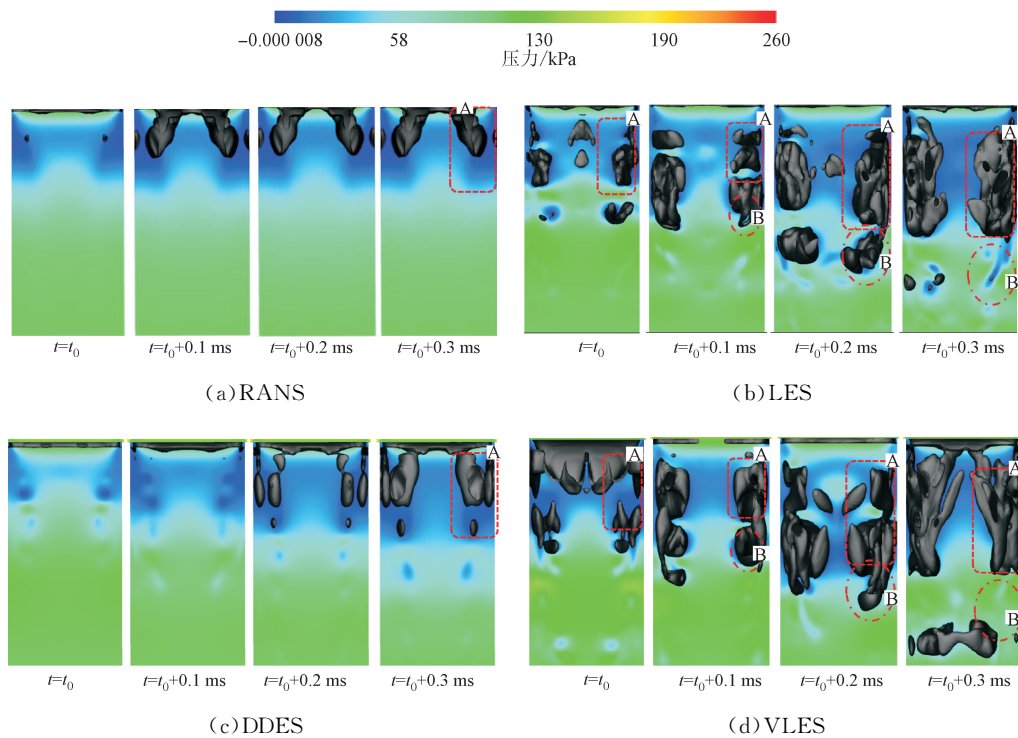


图 5 不同湍流模型下云空化周期脱落瞬态特性

Fig. 5 Transient properties of cloud cavitation cycle shedding under different turbulence models

2.2 不同湍流模型下喷嘴内流场特性

不同湍流模型下瞬时速度矢量图如图 6 所示, 可知这 3 种模型在速度场细节、涡流结构以及空化核心区的动态特性存在显著差异。在流动初始阶段, 4 种湍流模型的压力场宏观预测一致。喷孔入口截面积突变引发流动加速, 导致壁面锐边区域出现显著压降, 同时出口方向形成持续低于饱和蒸汽

压的临界区域, 为空化初生提供必要条件。在此阶段, LES、VLES 模型均展现出对小尺度涡诱导压力脉动的解析能力: LES 模型精确复现了试验中的压力波动时空特征, 而 VLES 模型虽在脉动幅值解析上存在局限, 仍能有效捕捉大尺度压力场演变趋势。相比之下, RANS、DDES 模型因低压区形态预测过度平滑, 难以表征局部压力突变。当空化发展至脱

落阶段,LES、VLES 模型成功揭示了涡脱落与空化瞬态特性。LES 模型精细呈现了回射流诱导的瞬态压力振荡及云空化破碎-再生的周期性过程,而 VLES 模型虽没 LES 模型捕捉的精细但仍可准确

预测压力恢复区与空化溃灭路径,两种模型共同阐释了空化界面运动与压力场演化的动态关联性,DDES、RANS 模型的压力场响应呈现显著平滑化特征,无法有效捕捉空化脱落的高频动态特性。

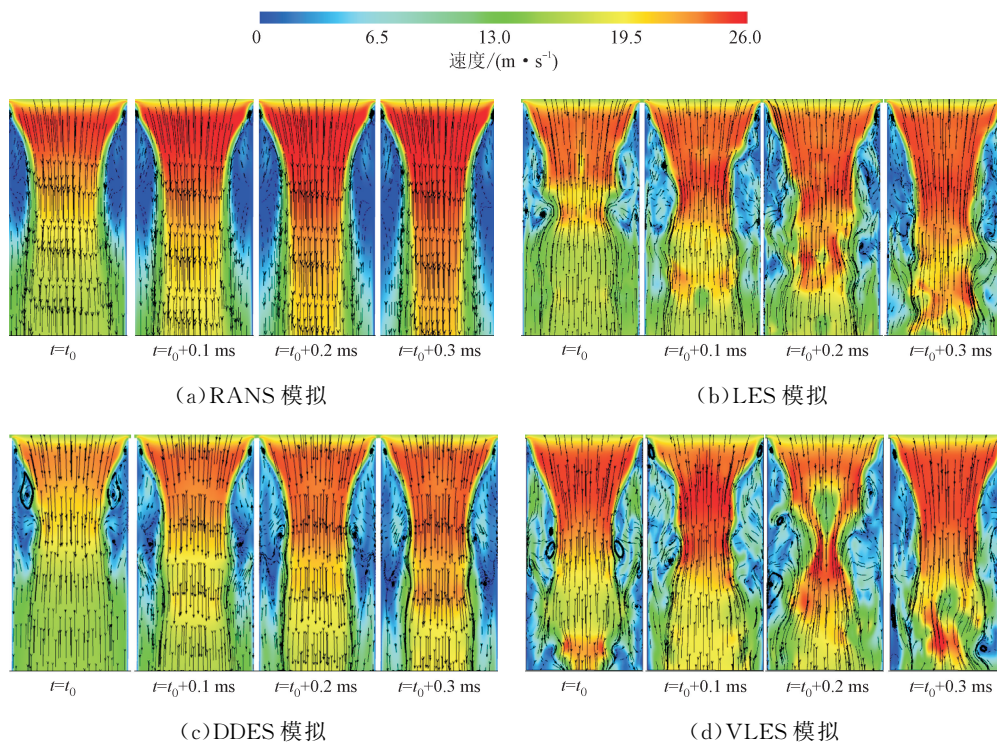


图 6 不同湍流模型下瞬时速度矢量图

Fig. 6 Instantaneous velocity vectors for different turbulence models

在初期空化发展阶段,燃油进入方孔时产生显著的剪切分离现象,入口下方形成回流区。该区域与剪切流交界处的剧烈速度梯度触发涡团脱落,此时各模型均能捕捉大、小尺度涡团的生成。LES、VLES 模型在复杂速度梯度的动态演化方面表现更为突出,能够细致解析流体分离后的流动特征,尤其是剪切层内的涡量分布及涡核迁移路径,而 DDDES、RANS 模型对局部细节的再现能力相对不足。随着流动发展,脱落涡团引发片状空化尾部的微尺度溃灭,所产生的压力脉冲与微射流进一步加剧云空化的脱落。在此过程中,LES、VLES 均能有效表征涡团脱落及空化塌缩过程。LES 精确再现了空化核心区湍流涡的瞬态演化,速度波动特征与试验观测高度一致;VLES 虽在小尺度结构解析上略逊于 LES,但在大尺度涡动特征捕捉方面表现相近。RANS 因采用时均化处理,无法解析旋流涡团的动态演化特性,而 DDDES 虽能预测回射流区域,但在涡团脱落频率模拟上存在偏差,难以准确复现试验中的高频速度脉动与复杂涡流结构。

2.3 喷嘴内云空化流动与大尺度涡团脱落分析

由于 DDDES、RANS 模型对瞬态流动特性的模拟存在显著偏差,本研究聚焦 LES、VLES 模型的流动-空化耦合机制解析能力。通过空化脱落周期(初始脱落至溃灭阶段)的轴向速度场演变分析,沿喷嘴 Z 轴设置入口 1、2、3 mm 及出口 4 mm 这 4 个特征截面,结合气相体积分等值面($\alpha=0.1$,灰色半透明区域),系统揭示了空化云团与流场动态的相互作用规律,并在溃灭关键阶段 $t = t_0 + 0.3 \text{ ms}$ 、0.75 mm 截面的速度分布,进一步分析在空化溃灭时的喷嘴中心高速剪切流特征。

LES、VLES 在不同时刻、不同位置截面速度和空化区域如图 7 所示,在空化初生时($t = t_0$),流场速度分布整体较均匀(回流区外),片空化导致入口附近流通截面收缩形成局部高速区。LES 模型精准解析了回流区内的复杂湍流结构与速度梯度,而 VLES 模型虽对湍流脉动存在平滑化处理,但仍能准确捕捉片空化引发的整流动趋势及涡团诱导的空化特征。

随空化结构发展至云空化阶段($t = t_0 + 0.2 \text{ ms}$),

脱落的云空化团迁移至距出口 1 mm 区域,各截面速度场因空化影响呈显著非定常特性。LES 模型以高分辨率再现了湍流涡的瞬态演化及速度场高频

波动,VLES 模型虽对小尺度湍流细节解析稍显不足,但对大尺度涡动特征与空化演化趋势的捕捉能力与 LES 一致,为流场宏观分析提供可靠依据。

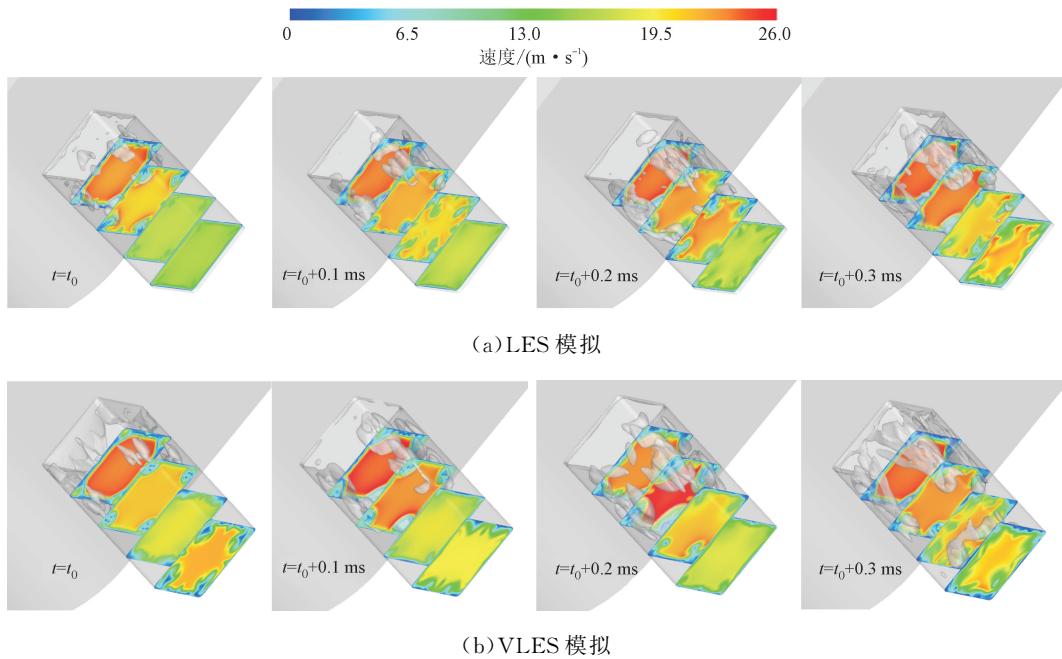


图 7 LES、VLES 模型在不同时刻不同位置截面速度图和空化区域

Fig. 7 Velocity maps of LES and VLES cross sections at different locations at different moments and cavitation regions

溃灭阶段 ($t = t_0 + 0.3$ ms), 云空化在出口附近溃灭引发剧烈压力脉动, 导致出口流速分布剧烈波动。LES 模型精细刻画了小涡团溃灭过程及瞬态压力脉动特征, 揭示了空化溃灭对射流初次破碎的强化机制; VLES 模型虽在溃灭细节解析精度上有所降低, 但仍能有效表征压力脉动主频及流速波动趋势。

由于溃灭阶段的瞬态特性更为剧烈, 因此对溃灭时刻、0.75 mm 截面的速度分布进行分析, 以揭示喷嘴中心的高速剪切流特征, 如图 8 所示。沿 Z 轴

方向 4 个截面的速度曲线均呈现中心流速显著高于壁面区域的典型剪切流分布, LES 模型通过高分辨率捕捉小尺度涡团与瞬态压力脉动, 在 3、4 mm 截面处展现出剧烈的局部峰谷波动, 清晰揭示了高速流与低速区交替、回流与射流并存的瞬态复杂流动特性; VLES 模型虽能复现整体流速骤变趋势, 但其平滑化处理导致对空化溃灭细节的解析受限, 尤其在小涡团塌缩引发的局部变速效应表征上存在不足, 致使出口区域平均流速预测值略高于 LES 模型。

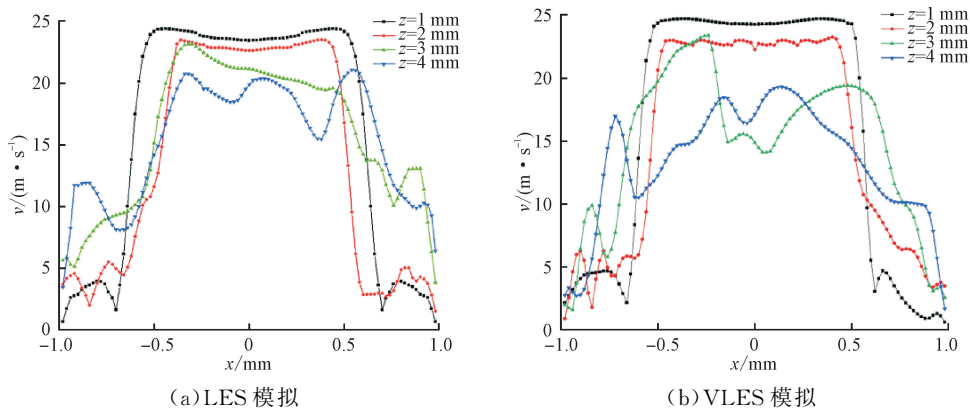


图 8 LES、VLES 模型在 $t = t_0 + 0.3$ ms 时刻下沿纵向的速度分布

Fig. 8 Velocity distribution along the longitudinal direction for LES and VLES models at the moment $t = t_0 + 0.3$ ms

图 9 展示了上游压力 $P_{in} = 0.26 \text{ MPa}$ 工况下,基于涡核判据 $Q = 1.3 \times 10^9 \text{ s}^{-2}$ 的瞬态流场演化特征,其中等值面通过速度场着色。在演化过程中,LES、VLES 模型对湍流结构的动态响应呈显著差异。

中期阶段($t_0 + 0.02 \sim 0.04 \text{ ms}$):LES 模型中微射流诱导的瞬态高速带频繁出现,伴随涡团分裂-合并过程,速度脉动幅度显著;VLES 模型虽能够维持大涡结构的连续扩散,但相比于 LES 模型,对强剪切区速度跳变的解析能力稍弱。

后期阶段($t_0 + 0.04 \sim 0.06 \text{ ms}$):LES 模型中的涡团结构进一步复杂化,许多局部高速涡流或湍流

块体在空化溃灭可能发生的区域剧烈波动,等值面之间的颜色过渡变得更加破碎;而 VLES 模型虽在整体流动趋势及大涡演化上与 LES 模型保持一致,但对这些剧烈的局部变化依然缺乏足够的分辨能力,出现更大尺度、相对平滑的涡旋块体,较难展现小涡团塌缩或微射流冲击时的瞬态速度尖峰。总体而言,LES 模型对微尺度旋涡、局部速度梯度以及高频脉动的追踪更为细腻,能够揭示极端流动事件的瞬态过程;VLES 模型则对流场中的大涡与主流结构刻画较为准确,对小尺度流动细节解析较差,但不影响整体的流动分析。

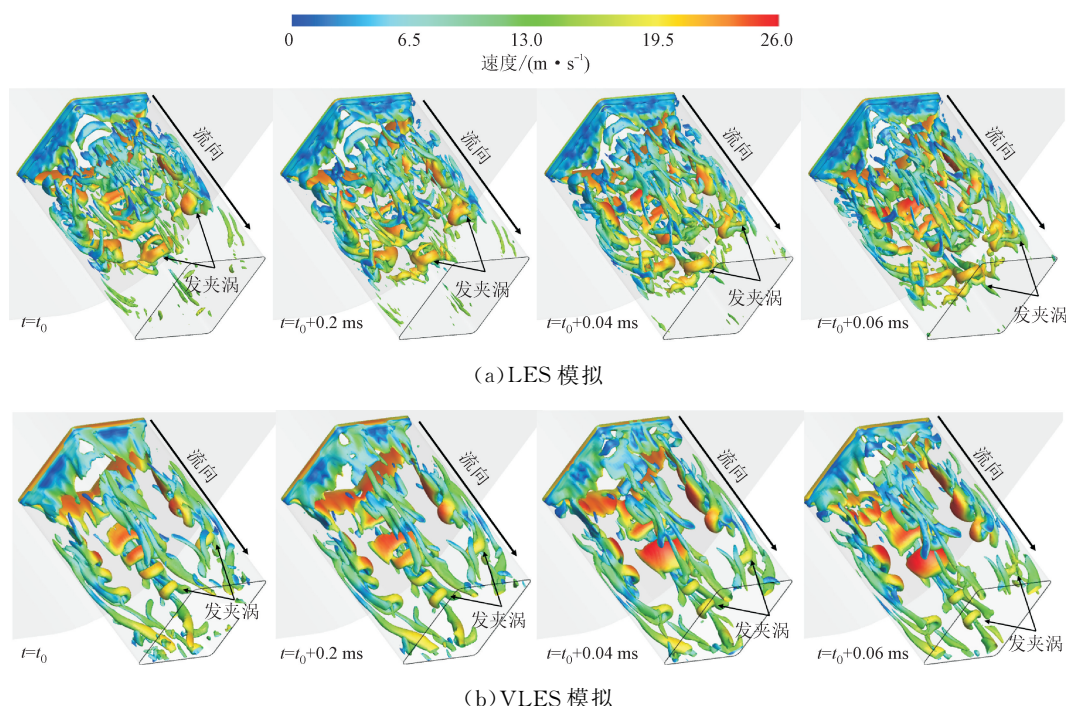


图 9 LES、VLES 模型喷嘴内瞬态涡核 Q 等值面

Fig. 9 Q -equivalent surfaces of transient vortex nuclei in LES and VLES model nozzles

为验证 VLES 模型适用性与试验的一致性,选取近出口监测点开展压力脉动频谱对比分析,如图 10 所示,LES、VLES 模型在空化结构脱落主导频率均在 2600 Hz 与试验相对应,误差在 5% 以内,表明二者对振荡周期的预测具有一致性,捕捉了主导脱落频率及其周期性特征,该模型能够有效表征空化云团的非定常脱落过程。在更复杂的旋流环境中,VLES 模型同样可准确模拟出涡结构的非定常脱落,与高保真 LES 模型结果相当。因此,在预测空化泡脱落和流场不稳定性方面,VLES 模型对主要不稳定行为具有良好的趋势捕捉能力^[25-26]。与此同时,VLES 模型解析了流动中的主要大尺度涡结

构,能够再现流场的周期性规律,体现在空化区域随时间的周期性增长与破裂,以及对周围流场产生的周期性影响。

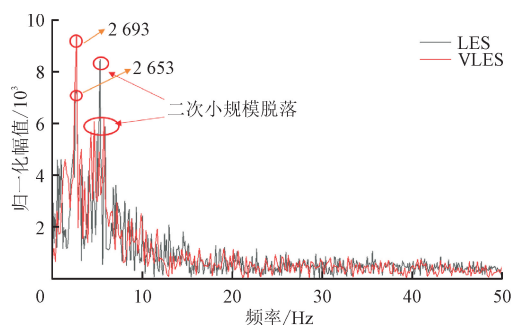


图 10 空化脱落的傅里叶变换分析图

Fig. 10 FFT plot of cavitation shedding

频谱中主频与低阶谐波的出现,表明 VLES 模型可以刻画流场的周期性特征,从而为分析宏观流场的演化提供依据。与 LES 模型相比,VLES 模型在捕捉主要流动结构的同时,所需网格更为粗糙,计算成本更低,但仍能保持对非定常特性和主要流动结构的准确模拟。

3 结 论

本研究围绕喷嘴内云空化流动的形成与演化机制,结合试验观测与数值模拟结果,对比分析了 LES、VLES、DDES 和 RANS 湍流模型在捕捉空化结构、涡脱落及瞬态压力脉动方面的差异,得到如下主要结论。

(1)RANS、DDES 模型虽节省计算资源但难以捕捉空化脱落瞬态特性,VLES 模型通过动态混合方法在准确捕捉空化脱落特性的同时,较 LES 模拟节省约 30% 计算量。

(2)LES、VLES 模型在空化初生、脱落及涡团脱落过程中表现优异,能有效捕捉压力脉动和流动细节,尤其是小尺度涡的演变。RANS、DDES 模型在动态特性和涡团脱落预测上存在明显不足,难以解析高频压力脉动和流动细节。

(3)VLES 模型相比于 LES 虽解析小尺度细节不足,但对涡团演化、主要脱落频率及周期性特征的捕捉与其一致,并且计算成本更低,适用于工程空化不稳定性及涡脱落机理研究。

参考文献:

- [1] 张文权,王谦,何志霞,等. 柴油机模型喷孔内空化与空蚀特性试验研究 [J]. 内燃机工程, 2018, 39(5): 14-20.
ZHANG Wenquan, WANG Qian, HE Zhixia, et al. Experiment on characteristics of cavitation and erosion in diesel engine nozzle orifice [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2018, 39(5): 14-20.
- [2] WANG Guoyu, WU Qin, HUANG Biao. Dynamics of cavitation-structure interaction [J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(4): 685-708.
- [3] GE Mingming, PETKOVŠEK M, ZHANG Guangjian, et al. Cavitation dynamics and thermodynamic effects at elevated temperatures in a small Venturi channel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 120970.
- [4] DESANTES J M, PAYRI R, SALVADOR F J, et al. Influence of cavitation phenomenon on primary break-up and spray behavior at stationary conditions [J]. Fuel, 2010, 89(10): 3033-3041.
- [5] LONG Yun, AN Ce, ZHU Rongsheng, et al. Research on hydrodynamics of high velocity regions in a water-jet pump based on experimental and numerical calculations at different cavitation conditions [J]. Physics of Fluids, 2021, 33(4): 045124.
- [6] ZHAO Xiaoyang, LIU Taotao, HUANG Biao, et al. Combined experimental and numerical analysis of cavitating flow characteristics in an axial flow waterjet pump [J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107450.
- [7] MILTNER M, JORDAN C, HARASEK M. CFD simulation of straight and slightly swirling turbulent free jets using different RANS-turbulence models [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 1117-1126.
- [8] CHEBLI R, AUDEBERT B, ZHANG G, et al. Influence of the turbulence modeling on the simulation of unsteady cavitating flows [J]. Computers & Fluids, 2021, 221: 104898.
- [9] DONG Wenqiang, YAO Ligang, LUO Weilin. Numerical simulation of flow field of submerged angular cavitation nozzle [J]. Applied Sciences, 2023, 13(1): 613.
- [10] RAN Zilin, MA Wenxing, LIU Chunbao. 3D cavitation shedding dynamics: cavitation flow-fluid vortex formation interaction in a hydrodynamic torque converter [J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2798.
- [11] ZHANG Desheng, WANG Haiyu, SHI Weidong, et al. Numerical analysis of the unsteady behavior of cloud cavitation around a hydrofoil based on an improved filter-based model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(5): 795-808.
- [12] YANG Yongfei, WANG Gaowei, SHI Weidong, et al. Turbulence characteristics in the mixing layer of a submerged cavitating jet at high Reynolds numbers [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 11963.
- [13] DAI Xiaoyu, WANG Ziman, LIU Fushui, et al. Simulation of throttling effect on cavitation for nozzle internal flow [J]. Fuel, 2019, 243: 277-287.
- [14] 严晨祎,陈瑛. 旋转圆球入水空泡特性与流场结构的大涡模拟研究 [J]. 力学学报, 2022, 54(4): 1012-1025.
YAN Chenyi, CHEN Ying. Numerical investigation on the water-entry cavity feature and flow structure of a spinning sphere based on large-eddy simulation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(4): 1012-1025.
- [15] 程怀玉,季斌,龙新平,等. 空化对叶顶间隙泄漏涡

- 演变特性及特征参数影响的大涡模拟研究 [J]. 力学学报, 2021, 53(5): 1268-1287.
- CHENG Huaiyu, JI Bin, LONG Xinping, et al. LES investigation on the influence of cavitation on the evolution and characteristics of tip leakage vortex [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(5): 1268-1287.
- [16] YANG Yongfei, SHI Weidong, TAN Linwei, et al. Numerical research of the submerged high-pressure cavitation water jet based on the RANS-LES hybrid model [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021(1): 6616718.
- [17] SHEN Xi, ZHANG Desheng, XU Bin, et al. Experimental and numerical investigation on the effect of tip leakage vortex induced cavitating flow on pressure fluctuation in an axial flow pump [J]. Renewable Energy, 2021, 163: 1195-1209.
- [18] XIA Zhaoyang, HAN Xingsi, MAO Junkui. Assessment and validation of very-large-eddy simulation turbulence modeling for strongly swirling turbulent flow [J]. AIAA Journal, 2020, 58(1): 148-163.
- [19] HE Zhixia, GUAN Wei, WANG Chuqiao, et al. Assessment of turbulence and cavitation models in prediction of vortex induced cavitating flow in fuel injector nozzles [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2022, 157: 104251.
- [20] HE Zhixia, CHEN Yuhang, LENG Xianyin, et al. Experimental visualization and LES investigations on cloud cavitation shedding in a rectangular nozzle orifice [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 76: 108-116.
- [21] ABE K I, OHTSUKA T. An investigation of LES and hybrid LES/RANS models for predicting 3-D diffuser flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(5): 833-844.
- [22] HAN Xingsi, KRAJNOVIC S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model [J]. AIAA Journal, 2015, 53(4): 1103-1108.
- [23] HAN Xingsi, KRAJNOVIC S. Very large eddy simulation of passive drag control for a D-shaped cylinder [J]. Journal of Fluids Engineering, 2013, 135(10): 101102.
- [24] HAN Xingsi, KRAJNOVIC S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 71(11): 1341-1360.
- [25] TIWARI P, XIA Zhaoyang, HAN Xingsi. Comparison of VLES and LES turbulence modeling for swirling turbulent Flow [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2020, 13(4): 1107-1116.
- [26] XIA Zhaoyang, CHENG Zhongyu, HAN Xingsi, et al. VLES turbulence modelling for separated flow simulation with OpenFOAM [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104077.
- (编辑 赵炜)