

基于三方程 VLES 模型的进水池吸气涡数值模拟

黄先北 郭 嫱 仇宝云

(扬州大学电气与能源动力工程学院, 扬州 225127)

摘要: 开敞式进水池在大流量、低水位情况下易出现表面涡,严重时将发展为吸气涡,影响泵站安全稳定运行。为准确模拟吸气涡流动结构,采用 S-CLSVOF 方法捕捉水气交界面,并基于混合 RANS/LES 方法中的 VLES 方法解析湍流场结构,分析了网格与计算时间对计算结果的影响,同时研究了 VLES 模型的特性。结果表明:VLES 模型可以准确地预测吸气涡流场中的速度分布;不同网格数量级对速度分布与相对吸气率的变化规律影响较小,为降低计算资源消耗,网格数量级达到 $O(10^6)$ 即可;根据相对吸气率随时间的变化规律可判断吸气涡达到稳定的时刻,在该时刻之后计算 10 s 即满足相关标准的要求,进一步延长计算时间不改变吸气涡位置与相对吸气率的变化规律;在本算例中,VLES 模型的解析度主要受湍流积分尺度的影响,在近壁面为 RANS 模式以降低近壁面网格要求,而在湍流核心区为混合 RANS/LES 以提高计算精度。

关键词: 进水池; 吸气涡; VLES; S-CLSVOF; 数值模拟

中图分类号: TV671 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0183-06 OSID: 

Numerical Simulation of Air-entrained Vortex in Intake Based on Three-equation VLES Model

HUANG Xianbei GUO Qiang QIU Baoyun

(College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Under the condition of large flow rate and low water level, the free surface vortices vortex is easy to appear in the open intake, which will develop into suction vortices when it is serious, affecting the safe and stable operation of pump station. In order to accurately simulate the flow structure of the vortex, the S-CLSVOF method was adopted for capturing the water-air interface and the VLES, one of the hybrid RANS/LES methods, was used to resolve the turbulence. The effects of mesh and computational time on the results were analyzed in detail, together with the characteristics of the VLES model. The results showed that the VLES model can accurately predict the velocity distributions in the air-entrained vortex flow field. The effect of different grid order of magnitude on the velocity distribution and relative air-entrainment rate was small. To decrease the required computational resources, it was recommended to adopt the mesh with an order of magnitude equals to $O(10^6)$. According to the variation of relative air-entrainment rate with time, the time when the air-entrained vortex reached stability can be judged. After that, another computation of 10 s was necessary to satisfy the corresponding standard for clearly identifying the free surface vortex. Further prolonging the calculation time did not change the variation of the position of the air-entrained vortex and the relative air-entrainment rate. In this case, the resolution of VLES was mainly affected by the turbulent integral length scale. In the near wall region, VLES behaved as RANS to decrease the demand on the mesh resolution near the wall, while in the turbulence core region, it turned to hybrid RANS/LES to increase the accuracy of the simulation. The research results can be used to guide the simulation of the air-entrained vortex in hydraulic intakes.

Key words: intake; air-entrained vortex; VLES; S-CLSVOF; numerical simulation

收稿日期: 2021-03-08 修回日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51909231、51806187)、国家自然科学基金面上项目(51679208)和江苏省水利科技项目(2019019)

作者简介: 黄先北(1991—),男,讲师,博士,主要从事机械内部流动和 CFD 理论研究,E-mail: znhuang@163.com

通信作者: 郭嫱(1988—),女,讲师,博士,主要从事泵站和流体机械研究,E-mail: znguoqiang@163.com

0 引言

开敞式进水池(后文简称进水池)是轴流泵站常用的进水形式,主要特征在于水面上方与空气直接接触,形成典型的自由界面。受进水池结构以及水位变动的影响,喇叭管淹没深度往往不足而导致池内存在明显的漩涡,引起振动、噪声以及泵效率下降^[1-4]。若漩涡将水面上方空气吸入,轴流泵站进水池则形成吸气涡,进一步加剧了泵的振动与噪声,同时易导致空化与气蚀^[5-6]。因此,研究进水池吸气涡意义重大。

分析吸气涡特征及机理,关键在于准确获取吸气涡流场结构。随着计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术的快速发展,近年来已有不少研究采用该技术^[7-13]对吸气涡进行数值模拟。影响模拟精度的因素主要有湍流模型、网格数和模拟时间^[7-16]。

除上述因素之外,还应考虑吸气涡现象中水与空气的交界面捕捉方法。根据现有研究,耦合水平集与流体体积(Coupled level-set and volume-of-fluid, CLSVOF)方法较优^[10,14,17-18]。

本文以文献[19]的进水池为研究对象,基于非常大涡模拟(Very large eddy simulation, VLES)模型,从网格数量级以及模拟的物理时间两方面进行分析,为进水池吸气涡的准确模拟提供参考。

1 数学模型

1.1 非常大涡模拟

基于涡粘假设,不可压流动的雷诺平均 Navier - Stokes 方程形式为

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \mathbf{u} + 2\nu_t \nabla \cdot \mathbf{S} + \mathbf{S}_t \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u}$ ——速度矢量, m/s t ——时间, s
 ρ ——密度, kg/m³ p ——压力, Pa
 ν ——流体的动力粘度, Pa·s
 ν_t ——涡粘系数, Pa·s
 $\mathbf{S}$ ——应变率张量, s⁻¹
 $\mathbf{S}_t$ ——动量源项, m/s²

考虑到吸气涡有局部旋转效应,应在模型中加以体现。为计算 ν_t ,文献[20]提出的三方程 $k-\omega-v^2$ 模型为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k\mathbf{u}) = P_k + (\nu + \sigma_k \nu_t) \Delta k - \beta^* k \omega \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\omega \mathbf{u}) = \frac{\alpha P_k}{\nu_t} + (\nu + \sigma_\omega \nu_t) \Delta \omega - \beta_\omega \omega^2 - (F_1 - 1) CD_{k\omega} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v^2}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2 \mathbf{u}) = \frac{v^2 P_k}{k} - \beta^* v^2 \omega + \psi (\eta^2 k - v^2) + (\nu + \sigma_k \nu_t) \Delta v^2 \quad (4)$$

其中 $\alpha = 0.44 - 0.116 F_1$
 $\sigma_\omega = 0.856 - 0.356 F_1$
 $\beta_\omega = 0.0828 - 0.0078 F_1$
 $\psi = 0.162 \omega$
 $\sigma_k = 1 - 0.15 F_1$

式中 k ——湍动能, m²/s²
 P_k ——湍动能生成率, m²/s³
 F_1 ——耦合函数
 ω ——湍动能比耗散率, s⁻¹
 β^* ——模型系数,取 0.09
 $CD_{k\omega}$ ——交叉耗散项, s⁻²
 v^2 ——垂直于壁面方向的雷诺正应力, m²/s²
 ψ ——修正的比耗散率
 η ——涡粘系数修正率

涡粘系数定义为

$$\nu_t = a_1 \sqrt{k} \sqrt{v^2} / \max(a_1 \omega, SF_2) \quad (5)$$

式中 a_1 ——模型系数,取 0.31
 S ——应变率张量的模, s⁻¹
 F_2 ——模型转换函数

为了实现混合 RANS/LES,基于文献[15]的方法,将涡粘系数修正为

$$\nu_t^* = \frac{a_1 \sqrt{k} \sqrt{v^2} F_r}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (6)$$

其中 $F_r = \min\left(1, \left(\frac{1 - e^{-\gamma L_c/L_k}}{1 - e^{-\gamma L_c'/L_k}}\right)^n\right)$

$$\begin{cases} L_c = 0.61 (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \\ L_i = \sqrt{k} / (\beta^* \omega) \\ L_k = \nu^{3/4} / (\beta^* k \omega)^{1/4} \end{cases} \quad (7)$$

式中 γ ——模型系数,取 0.002
 n ——模型系数,取 2
 L_c ——截断尺度, m
 L_i ——湍流积分尺度, m
 L_k ——Kolmogorov 尺度, m
 Δx ——网格在 x 方向的尺度, m
 Δy ——网格在 y 方向的尺度, m
 Δz ——网格在 z 方向的尺度, m

1.2 S - CLSVOF

本文采用文献[21-22]简化后的版本,命名为 Simple coupled level-set and volume-of-fluid(简称 S - CLSVOF)。为便于编译该方法,本文选用开源 CFD 软件 OpenFOAM - 2.2.x,其中液相体积分数的输运方程为

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\alpha_l (1 - \alpha_l) \mathbf{u}_c] = 0 \quad (8)$$

式中 α_l ——液相体积分数, %
 $\mathbf{u}_c$ ——压缩速度, m/s

采用均相流模型处理液相、气相, 即两相的速度与压力相等。

为了将体积分数与动量方程相耦合, 将表面张力作为式(1)的动量源项, 定义为

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \kappa(\phi) \delta(\phi) \nabla \phi \quad (9)$$

其中

$$\kappa(\phi) = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (10)$$

$$\delta(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\gamma} \left(1 + \cos \frac{\pi \phi}{\gamma} \right) & (|\phi| < \varepsilon) \\ 0 & (|\phi| \geq \varepsilon) \end{cases} \quad (11)$$

$$\gamma = 1.5 x_\Delta \quad (12)$$

式中 σ ——表面张力系数, N/m
 ϕ ——流场中某点至交界面的无量纲距离
 x_Δ ——距离交界面最近的网格尺度, m

2 进水池算例描述

2.1 几何与网格

进水池的几何如图 1 所示。为便于模拟, 将进水池分为进水管域、空气域以及水域, 各域之间采用交界面连接。除图 1 所示的几何参数外, 喇叭口直径为 0.15 m, 同时, 进水管中心偏离进水池中心线, 距离两侧壁面分别为 0.14 m 与 0.16 m, 水位为 0.23 m。

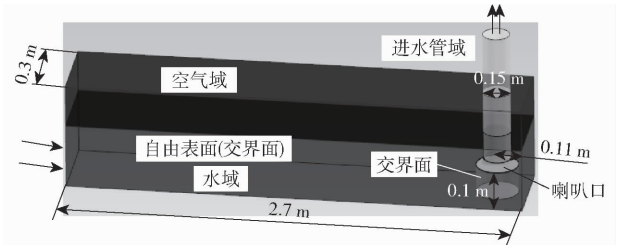


图 1 进水池几何与计算域划分

Fig. 1 Geometry and calculation domain division of intake

为了分析网格数量级对计算结果的影响, 本文采用网格数分别为 1.61×10^6 (M1) 与 1.03×10^7 (M2) 的两套网格, 如图 2 所示, 对应的平均 y^+ 分别为 13~40、9~20。

2.2 边界条件与数值算法

由于进水池被划分为 3 个域, 不同域之间采用任意网格交界面 (Arbitrary mesh interface, AMI)^[23] 进行处理。进口采用均匀来流速度, 设定为 0.241 5 m/s; 出口采用流量出口, 设定为 0.016 7 m³/s, 空气域上边界为总压边界, 等于大气压; 其余边界为

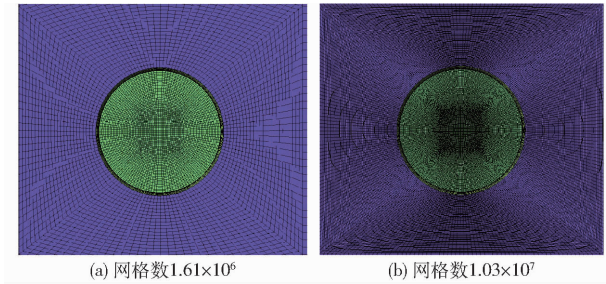


图 2 进水管附近的网格分布 (俯视图)

Fig. 2 Grid distribution near intake pipe (bottom view)

固壁, 采用壁面函数处理近壁面流动。

压力-速度求解采用 PISO (Pressure-implicit with splitting of operators) 算法, 梯度与散度项采用二阶精度的“Gauss linear”格式进行离散, 时间离散采用二阶精度的“backward”格式, 时间步长为 1×10^{-4} s。

3 结果分析

3.1 网格的影响

本文以如下步骤对两套网格进行计算: 基于 M1 计算 14 s (此时吸气涡达到稳定); 以上一步的结果作为初始条件, 基于 M1 与 M2 进行计算, 2 000 步 (即 0.2 s) 后开始求平均, 采用 5.5 s 内的结果作时间平均。

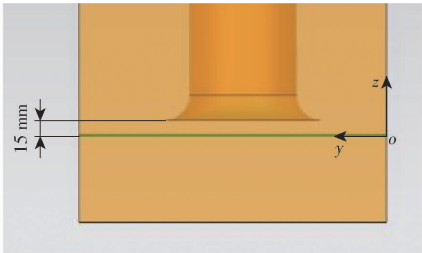
图 3 所示为喇叭口下方 15 mm 的线段上的速度分布, 该线段与喇叭口中心线位于同一平面, 如图 3a 所示。

由图 3b、3c 可见, 两套网格均可捕捉到与试验^[19] 较为一致的速度分布规律。图 3b 所示的速度峰值与试验值之间存在错位, 这与文献[19, 24] 中的 CFD 结果相似, 推测该错位是试验中存在数值模拟中未体现的外界扰动。

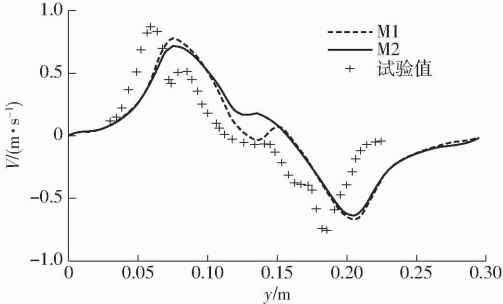
图 4 所示为基于两网格预测的瞬时流线与水的体积分数等值面, 其中流线的起点位于水面, 等值面根据文献[12] 的研究取 $\alpha_l = 95\%$ 。为便于分析, 图中还用箭头显示了吸气涡附近流线的总体趋势。

显然, 尽管位置略有差异, 但两套网格均预测到了水面附近的吸气涡。此外, 与 M1 不同的是, M2 所得吸气涡更加破碎, 这是因为随着网格密度的增加, 原本表征同一体积分数的网格被分成多个更小的网格, 在迭代与插值算法的作用下, 这些更小网格上的体积分数不再是同一数值, 从而导致等值面变得更加零碎。为了更好地显示吸气涡, 应发展一种可同时体现水面凹陷 (体积分数) 与漩涡的吸气涡识别准则。

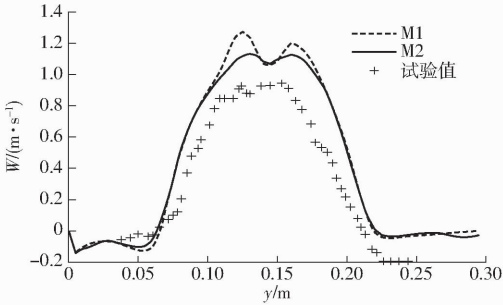
为了更好地表征吸气涡的程度, 采用相对吸气率, 定义为



(a) 线段位置



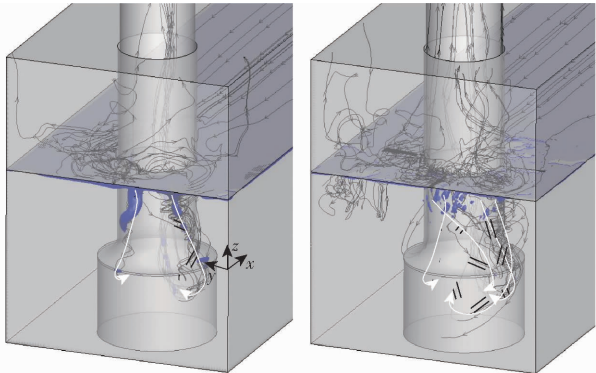
(b) y向速度沿y轴的分布



(c) z向速度沿y轴的分布

图 3 喇叭口下方的速度分布

Fig. 3 Velocity distribution below bell mouth



(a) M1

(b) M2

图 4 瞬时吸气涡形态与流对比($t=19.7\text{ s}$)

Fig. 4 Comparison of instantaneous air-entrained vortex shape and streamlines

$$\beta = \frac{1 - \alpha_{l,ave}}{\alpha_{l,ave}} \quad (13)$$

式中 $\alpha_{l,ave}$ ——计算域出口的平均液相体积分数, %

图 5 所示为相对吸气率随时间的变化, 为便于显示, 图中曲线上两点之间的时间间隔为 200 时间步, 即 0.02 s。由图 5 可见, M1 所得 β 的变化幅度高于 M2, 但二者的变化规律相近。计算时间平均相对吸气率, M1 为 2.59×10^{-4} , M2 为 2.44×10^{-4} , 二

者差异不大。

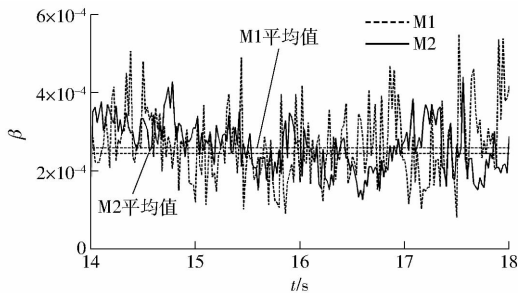


图 5 不同网格计算所得相对吸气率随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation of relative air-entrainment rate along with time on different meshes

综合以上分析, 网格数量级达到 $O(10^6)$ 时可以较好地捕捉到吸气涡流场的速度分布, 同时也可以体现吸气涡的程度。后文将基于 M1 作进一步分析。

3.2 计算时间的影响

为检验计算时间的影响, 基于 M1 网格计算至 60 s。图 6 所示为 β 从 $t=0\text{ s}$ 至 $t=60\text{ s}$ 的变化情况。从图中可见, 吸气率在 0 ~ 3 s 内逐渐增大, 这是因为吸气涡逐步形成, 具体见文献[12]。此外, 由图 6 可知, 尽管将计算延长至 60 s, 吸气率的变化从 $t=3\text{ s}$ 开始并未出现明显的上升或下降, 而是呈现出类似周期性的变化规律。

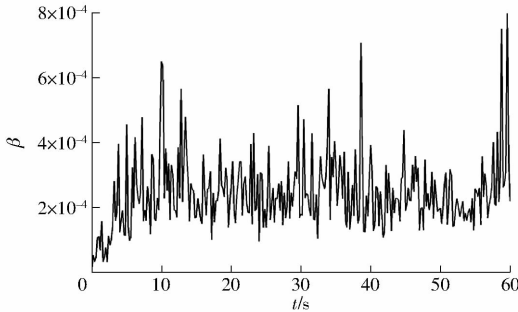


图 6 M1 计算所得相对吸气率随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation of relative air-entrainment rate along with time on M1

为验证吸气涡在 $t=14\text{ s}$ 以内是否已达到稳定, 分析不同时刻下吸气涡的位置, 如图 7 所示, 吸气涡位置取自其中心坐标。从图 7 可见, 预测得到的吸气涡存在两个集中区域, 其一位于 $(-0.06\text{ m}, 0.08\text{ m})$ 附近, 与试验值一致, 但 CFD 预测到了另一个位于 $(-0.05\text{ m}, 0.15\text{ m})$ 附近的吸气涡。文献[19,24]中的 CFD 结果同样出现了该现象, 推测与上文一致, 是因为试验中存在数值模拟中未体现的外界扰动。对比 3 ~ 14 s 以及 14 ~ 60 s 之间的吸气涡位置可知, 计算时间的延长并未改变吸气涡的分布规律。因此, 吸气涡从 $t=3\text{ s}$ 开始处于稳定变化的状态, 与图 6 吸气率的变化规律一致, 而延长计算时间不会

改变吸气涡的程度(相对吸气率)以及位置。

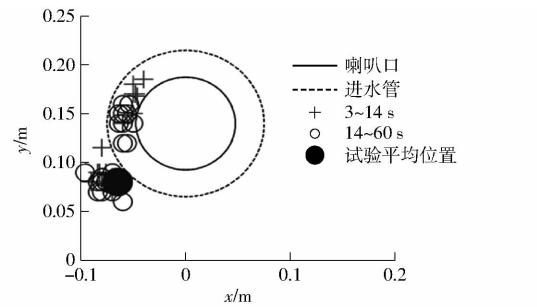


图 7 自由水面上吸气涡的位置示意

Fig. 7 Sketch of air-entrained vortex locations on free surface

根据进水池设计标准^[25],特定形式的表面涡需至少观测 10 s。因此,对于本算例而言,吸气涡稳定之后再计算 10 s 即可满足要求(即 $t = 13$ s)。

3.3 VLES 模型特性分析

由前文结果可见,VLES $k-\omega-v^2$ 预测结果与试验及文献[19,24]基本一致。为分析该模型的特性,有必要分析吸气涡附近的 F_r 与 L_i ,这两个变量分别代表了解析程度与湍流积分尺度。

图 8 所示为自由水面上 L_i 与 F_r 的分布。由图 8a 可见,湍流尺度沿流动方向有降低的趋势,且涡心附近的值略低于周围区域。由图 8b 可见,进水管附近的 F_r 为 1,说明此处为 RANS 模式。对于 VLES 或其它混合 RANS/LES 方法而言,降低计算量最有效的方法就是保证近壁区为 RANS 模式,因为 RANS 对近壁面网格要求较低,可以极大地降低近壁面网格密度。

对比图 8a 与图 8b 可见,二者的分布规律基本相反,即 L_i 较高的位置则 F_r 较低。根据式(6), L_i 越高,则 F_r 越低。图 8 所示的规律表明,在既定网格下, F_r 主要受 L_i 的影响,此时湍流积分尺度越大,则 F_r 越低,表明湍流的解析度越高。观察图 8b 可见, F_r 在流动的上游较低(除壁面附近以外),说明此时湍流基本被解析,而在进水管附近, F_r 总体高于上游,这是因为存在流动分离而存在小尺度湍流结构,模型难以完全解析。

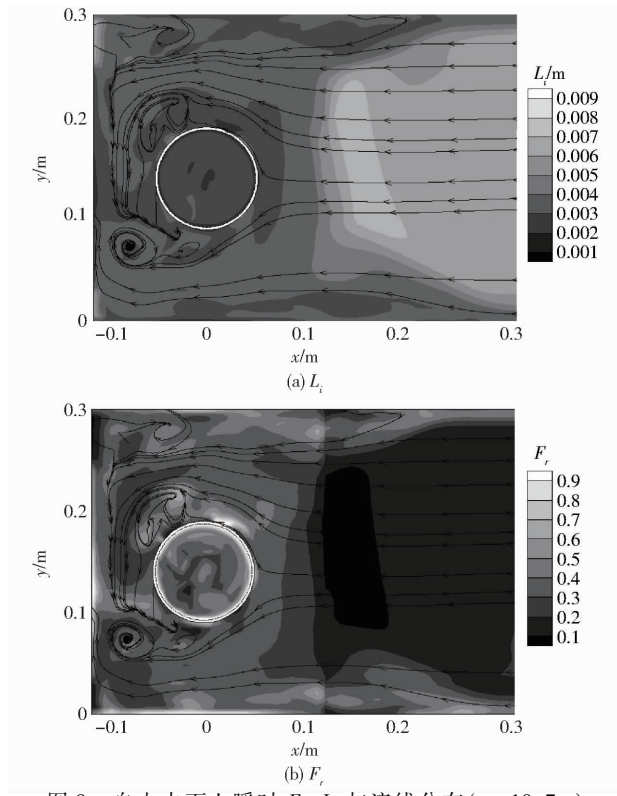


图 8 自由水面上瞬时 F_r 、 L_i 与流线分布 ($t = 19.7$ s)

Fig. 8 Instantaneous F_r and L_i and streamline distributions on free surface

总体而言,本文采用的 VLES 模型在 L_i 的主导下,保证了近壁区的 RANS 模式以及湍流核心区的混合 RANS/LES 模式。

4 结论

(1) VLES 所得结果与试验值基本一致,且网格数量级达到 $O(10^6)$ 时即可较好地捕捉到吸气涡的流场结构与程度。

(2) 数值计算可以由相对吸气率随时间的变化规律判断吸气涡是否达到稳定,根据标准要求,在此之后计算 10 s 即可,进一步延长计算时间并不影响吸气涡的程度与位置。

(3) 既定网格下,VLES 模型的解析度主要受湍流积分尺度的影响,近壁面为 RANS 模式,保证了相对较低的计算量,而在湍流核心区为混合 RANS/LES。

参 考 文 献

[1] 肖若富, 李宁宁. 进水池形状对吸入涡影响试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(11): 953-958. XIAO Ruofu, LI Ningning. Experimental investigation into effects of sump shape on suction vortex[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(11): 953-958. (in Chinese)

[2] 何耘. 水泵进水池旋涡研究的主要进展[J]. 水力发电学报, 2004, 23(5): 92-96. HE Yun. Main advances of research on vortices in pump sumps[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(5): 92-96. (in Chinese)

[3] 何耘, 陈惠泉, 李玉梁. 前后串列布置的吸水管周围流场 PIV 实验研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 38-41. HE Yun, CHEN Huiquan, LI Yuliang. Experimental research on flow field with PIV measurements around the intake arranged in cascade suction pipes[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 38-41. (in Chinese)

- [4] 王自明, 王月华, 韩晓维, 等. 泵站进水池自由表面漩涡研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 158 – 164.
WANG Ziming, WANG Yuehua, HAN Xiaowei, et al. Research on the free surface vortex in suction sump of pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 158 – 164. (in Chinese)
- [5] KELLER J, MOLLER G, BOES R M. PIV measurements of air-core intake vortices [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 40: 74 – 81.
- [6] 高传昌, 曾新乐, 解克宇, 等. 泵站进水池超低水位下组合整流方案与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 101 – 108.
GAO Chuanchang, ZENG Xinle, XIE Keyu, et al. Combined rectification scheme of pump intake sump in ultra-low water level and its verification[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 101 – 108. (in Chinese)
- [7] 吴鹏飞, 郭志伟, 钱忠东, 等. 进水池表面吸气涡数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 120 – 125.
WU Pengfei, GUO Zhiwei, QIAN Zhongdong, et al. Numerical simulation and experiment on free-surface air-entraining vortices in pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 120 – 125. (in Chinese)
- [8] 丛国辉, 王福军. 湍流模型在泵站进水池漩涡模拟中的适用性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 31 – 35.
CONG Guohui, WANG Fujun. Applicability of turbulence models in numerical simulation of vortex flow in pump sump[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 31 – 35. (in Chinese)
- [9] 张德胜, 李普熙, 赵睿杰, 等. 泵站进水池吸入口涡旋结构及湍流特性的大涡模拟[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 134 – 141.
ZHANG Desheng, LI Puxi, ZHAO Ruijie, et al. Large eddy simulation of vortex structure and turbulence characteristics in pump sump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 134 – 141. (in Chinese)
- [10] HUANG X B, GUO Q, QIU B Y, et al. Prediction of air-entrained vortex in pump sump: influence of turbulence models and interface-tracking methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(4): 04020010.
- [11] GUO Z W, CHEN F, WU P F, et al. Three-dimensional simulation of air entrainment in a sump pump [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143 (9): 04017024.
- [12] GUO Q, HUANG X B, QIU B Y, et al. The formation of the steady and unsteady air-entrained vortices in pump sump[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 129: 103312.
- [13] PARK Y K, DEY M K, CHOI Y H. Numerical visualization of air intake induced by free surface vortex [J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(6): 540 – 544.
- [14] ZI D, XUAN A Q, WANG F J, et al. Numerical study of mechanisms of air-core vortex evolution in an intake flow [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 81: 108517.
- [15] HAN X S, KRAJNOVIC S. Validation of a novel very large eddy simulation method for simulation of turbulent separated flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 73(5): 436 – 461.
- [16] JIN Y, CHENG Z Y, HAN X S, et al. VLES of drag reduction for high Reynolds number flow past a square cylinder based on OpenFOAM [J]. Ocean Engineering, 2019, 190: 106450.
- [17] SUSSMAN M, PUCKETT E G. A coupled level set and volume-of fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 162(2): 301 – 337.
- [18] 宋云超, 王春海, 宁智. 追踪不可压缩两相流相界面的 CLSVOF 方法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 26 – 31, 60.
SONG Yunchao, WANG Chunhai, NING Zhi. Computation of incompressible two-phase flows by using CLSVOF method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 26 – 31, 60. (in Chinese)
- [19] OKAMURA T, KAMEMOTO K, MATSUI J. CFD prediction and model experiment on suction vortices in pump sump [C] // Proceedings of 9th Asian International Conference on Fluid Machinery. Berlin: Springer, 2007: 1 – 10.
- [20] DHAKAL T P, WALTERS D K. A three-equation variant of the SST $k - \omega$ model sensitized to rotation and curvature effects [J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(11): 111201.
- [21] ALBADAWI A, DONOGHUE D B, ROBINSON A J, et al. Influence of surface tension implementation in volume of fluid and coupled volume of fluid with level set methods for bubble growth and detachment [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 53: 11 – 28.
- [22] YAMAMOTO T, OKANO Y, DOST S. Validation of the S – CLSVOF method with the density-scaled balanced continuum surface force model in multiphase systems coupled with thermocapillary flows [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2017, 83(3): 223 – 244.
- [23] FARRELL P E, MADDISON J R. Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(1 – 4): 89 – 100.
- [24] ZHAO L J, NOHMI M. Numerical simulation of free water surface in pump intake [C] // 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Bristol: IOP Publishing, 2012: 1 – 6.
- [25] American National Standards Institute. ANSI/HI 9.8 – 2012 American national standard for pump intake design [S]. New York: Hydraulic Institute, 2012.