

基于 PANS 方法的水下热射流数值仿真与试验验证

毛德龙, 王康硕, 何 凜, 沙 江, 王 奔, 王怡豪

(中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 随着水下热射流的浮升, 其动量逐渐衰减进而演变为羽流, 采用常规的雷诺时均方法进行模拟容易出现涡粘过大导致仿真结果失真的问题。针对这一问题, 文中以水下热射流出口为研究对象, 运用 PANS (Partially-Averaged Navier-Stokes) 方法改进了水下热射流的计算模型, 对其在静止和运动工况下的浮升扩散过程进行数值模拟, 分析了水下热射流的浮升扩散规律。然后搭建了全透明的拖曳式试验水槽, 采用平面激光诱导荧光 (PLIF) 方法测得的热射流在静止和运动工况下的浮升扩散图像与数值仿真结果进行对比验证。结果表明: 基于 PANS 方法的水下热射流预测模型精度较高, 所有误差均在 15% 以内, 且绝大部分误差控制在 10% 以内。

关键词: 热射流; 浮升过程; 部分平均雷诺时均; 平面激光诱导荧光

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210104

Numerical simulation and experimental verification of underwater thermal jet based on PANS method

Mao Delong, Wang Kangshuo, He Lin, Sha Jiang, Wang Ben, Wang Yihao

(System Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: With the rise of the underwater thermal jet, its momentum gradually decays and evolves into a plume. Using the conventional Reynolds-averaged method for simulation is prone to the problem of excessive eddy viscosity leading to the distortion of simulation results. In order to solve this problem, the outlet of an underwater thermal jet as the research object was taken, the calculation model of an underwater thermal jet by using Partially-Averaged Navier-Stokes (PANS) method was improved, the floating-up and diffusion process under static and moving conditions were simulated, and the floating-up and diffusion law of underwater thermal jet were analyzed. A fully transparent towing tank was built, and the floating-up diffusion images of the thermal jet measured by the PLIF method under static and moving conditions were compared with the numerical simulation results. The results show that the prediction model of underwater thermal jet based on PANS method has high accuracy, all errors are within 15 %, and most of the errors are controlled within 10%.

Key words: thermal jet; floating-up process; PANS; PLIF

收稿日期:2021-01-14; 修订日期:2021-04-18

作者简介:毛德龙,男,工程师,硕士,主要研究方向为舰船红外测试技术。

0 引言

水下热射流是水下射流在温差和密度差驱动下向水面方向扩散浮升流动的一种物理现象。水下热射流的流动现象是水面红外尾迹、内波尾迹等尾迹特征形成的重要因素,也是当前尾迹特征机理研究的热点之一。

国内外学者针对水下热射流进行了大量研究,并取得了一系列成果^[1]。在数值仿真方面,David^[2]等采用直接模拟法对分层及均匀流体中水下目标射流进行了仿真研究,结果表明,水体温度分层不仅会抑制热射流在垂直方向上的震荡,同时还会导致水体内部产生内波现象。吴猛猛^[3]等与张昊春^[4]等在二维空间内采用 VOF 法对海水-空气两相环境中水下目标热射流浮升与扩散过程进行了仿真研究,指出热射流在浮升到水面后,由于受自由面的影响,其在垂直方向的发展受到抑制,将与气液交界面发生掺混,并在表面逐渐扩散和衰减。在试验研究方面,张健^[5]等分别在温度均匀及线性分层海水中对匀速运动的水下航行目标的热射流温度分布特性进行了试验研究,结果表明,冷却水出口的水温、目标航行产生的尾涡和海水温度分层均会对热射流温度分布产生影响。杨卫平^[6-7]等基于密度弗劳德数相似的条件设计相似模化试验,在实验室水槽内对静止热射流和拖曳热射流两种情况水下目标热尾流进行实验研究,获得了水下目标红外射流可探测性的影响因素以及红外射流的变化规律。

水下热射流是带浮力的湍流射流与换热过程,其在初始段属于高湍流度的射流流动,而在热浮升段属于低湍流度的羽流流动。在数值仿真方面,目前针对该类研究大多采用的是雷诺时均方法的湍流模型,比如常用的 $k-\varepsilon$ 湍流模型。实际上,雷诺时均方法可以准确地求解高雷诺数的湍流流动,但在求解低雷诺数的羽流流动时会出现涡粘过大的问题。对此,文中利用部分平均雷诺时均 (Partially-Averaged Navier-Stokes, PANS) 方法对羽流进行求解,而高湍流度的射流则使用雷诺时均方法的湍流模型进行模拟。PANS 模型最初由 Girimaji 提出,基本思想为:根据网格的尺度判断出能够直接求解的湍动能 k 的分量以

及必须使用湍流模型模拟的 k 分量。PANS 模型对速度场的分解基于湍动能,模型的滤波宽度取决于模化湍动能比例 f_k 和模化耗散率比例 f_ε 这两个控制参数。当 f_k 和 f_ε 取值为 1 时,PANS 模型回归到雷诺时均 (RANS) 方法求解;当 f_k 和 f_ε 取值趋于 0 时,PANS 方法趋于层流直接数值模拟;调节 f_k 和 f_ε 的取值,PANS 方法可以从 RANS 连续过渡到层流方程。

在试验研究方面,以往大多采用在水下布设温度传感器阵列的方式直接记录射流区域的温度变化情况。然而利用该方法对水下热射流进行测量时有点值得考虑;(1) 在热射流浮升区域布放温度传感器阵列,容易破坏热射流的浮升形态;(2) 热射流在浮升至自由液面时,其与周围环境温度存在换热,周围环境的变化会影响试验结果。针对该问题,文中采用平面激光诱导荧光 (PLIF) 的方法对热浮升区域的温度分布进行测量,其主要方式是通过在射流液体中添加微量荧光剂,而荧光剂在激光的照射下,发射的荧光光强随温度和浓度发生变化,由此可以推测温度或者浓度值。这种方法是基于光谱的非侵入式测量技术,其优点在于通常采用光束或片光探测流场中的参数分布,对流场无任何干扰,不会导致流场参数失真,同时由于无需在流场中布置探头,使其不再受流场中高温、高压、高速和湍流等恶劣条件的限制,大大拓宽了测量范围。目前 PLIF 方法在传热和传质测量中已经比较成熟:如 Shao^[8] 等通过 PLIF 方法测量了浮力射流的射流体浓度分布,实验中使用了盐水作为射流流体,以密度差的形式来产生浮力效应;Su^[9] 等通过使用氦气来模拟浮力射流,利用 PLIF 方法定量地测得了射流在浮力作用下的流动状态;Das^[10] 等使用 PLIF 方法测量了射流体的密度分布。

文中针对热射流浮升阶段动量逐渐衰减进而演变为羽流时,采用常规的雷诺时均方法模拟导致出现涡粘过大的问题,创新性地利用 PANS 方法来解决,并且搭建了全透明的试验水槽,采用 PLIF 方法对 PANS 模型进行验证和校核。结果表明,PANS 模型能够较为准确地预测水下热射流的浮升过程。

1 数学模型理论

以水下热射流出口(喷嘴)为研究对象,对其在实

验室水槽中热射流浮升过程进行模拟仿真。根据研究的需要,下述理论根据 $k-\epsilon$ 模型来推导。对于含体积力的 NS 方程:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_j} + F \quad (1)$$

类似于 RANS 方法,在 PANS 方法中,速度场和压力场可以分解为求解部分 U_i 和非求解部分 u_i :

$$V_i = U_i + u_i \quad (2)$$

$$U_i = \langle V_i \rangle, p_U = \langle p \rangle, \langle u_i \rangle \neq 0 \quad (3)$$

此处 $\langle \rangle$ 表示一个任意的滤波器,可以是空间上的滤波,也可以是时间上的滤波。代入公式 (1) 得滤波后的方程为:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_U}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau(V_i, V_j)}{\partial x_i} \quad (4)$$

部分平均的目的是为任何介于 RANS 和层流方程中的网格分辨率提供封闭模型,可以通过对原 RANS 湍流模型修改系数得到,而这些修改中必须含有一个用户可改变的参数,并且计算结果对这个参数敏感。这样,调节合适的参数就可以改变模型的特性,以此改变所解析的湍动能占总湍动能的比重。在 PANS 方法中,这些参数定义为未求解的湍动能和总湍动能的比值 f_k 和未求解的湍流耗散速率和总湍动能耗散速率的比值 f_ϵ :

$$f_k = \frac{k_u}{k} \quad f_\epsilon = \frac{\epsilon_u}{\epsilon} \quad (5)$$

假设这两个参数在空间和时间均为常数,可得:

$$\frac{\partial k_u}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k_u}{\partial x_j} = f_k \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

以下方程提供了 RANS 方程到 PANS 方程演变过程的详细推导:

$$\frac{\partial k_u}{\partial t} + U_j \frac{\partial k_u}{\partial x_j} = f_k \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + (U_j - \overline{U_j}) \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\frac{\partial k_u}{\partial t} + U_j \frac{\partial k_u}{\partial x_j} = f_k \left(P - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + (U_j - \overline{U_j}) \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$P_u - \epsilon_u + T_{ku} = f_k \left(P - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + (U_j - \overline{U_j}) \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \quad (9)$$

类比 RANS 模型,可得:

$$P_u - \epsilon_u = f_k (P - \epsilon) \quad (10)$$

$$T_{ku} = f_k \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right) + (U_j - \overline{U_j}) \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \quad (11)$$

式中: T_{ku} 为未求解湍流脉动引起的未求解部分的湍动能的传输。与 PANS k 方程类似,推导出 PANS ϵ 方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_u}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial \epsilon_u}{\partial x_j} &= f_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \overline{U_j} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \\ f_\epsilon \left(C_{\epsilon 1} \frac{P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

将上述方程进行适当变形后得:

$$\frac{\partial \epsilon_u}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon_u}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} f_k \left(\frac{P_u}{f_k} - \frac{\epsilon_u}{f_\epsilon f_k} (f_\epsilon - f_k) \right) \frac{\epsilon_u}{k_u} - C_{\epsilon 2} \frac{f_k}{f_\epsilon} \frac{\epsilon_u^2}{k_u} + T_{\epsilon u} \quad (13)$$

通过观察上述方程可以发现,对湍动能传输项 T_{ku} 和湍动能耗散率传输项 $T_{\epsilon u}$ 的封闭是 PANS 模型的关键所在。

2 试验原理及试验方案

把能量当成以温度的形式呈现时,温度作为一个标量,符合标量传输的规律。而当两种不同物质掺混时,浓度的传输也符合标量传输规律。因此,可用质量传输的方式来模拟热量传输。采用类比试验的优势在于:(1)若采用传热方式进行热射流试验需要一个能提供恒温热水的水箱,目前市面上的恒温水箱加热时间较长,从而导致整个试验周期较长;(2)热水从恒温水箱到模型的排放口需要经过管路的传输,即使管路做好保温措施,热水在传输的过程中也不可避免地会出现热量损失,从而对试验结果造成较大影响;(3)若采用传质方式进行热射流试验,荧光材料根据荧光的浓度或者温度不同而散发出不用光强的荧光,但 PLIF 荧光对浓度比对温度更敏感。综上,试验的思路为使用一种溶于水但密度比水小的液体,调制成合适密度的溶液作为射流介质。预先在该溶液中掺入适当浓度的罗丹明 6 g 药品作为荧光材料。

2.1 试验原理

基于传热过程,对 Boussinesq 假设下带浮力项的传热 NS 方程进行无量纲化,见公式 (14) 和 (15)。为

表示方便,无量纲略去了上标“~”符号。

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{Re^2} \cdot Gr \cdot T \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (15)$$

其中,雷诺数为:

$$Re = \frac{U_0 L}{\nu} \quad (16)$$

式中: U_0 为喷嘴射流速度; L 为喷嘴直径。

格拉晓夫数为:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2} \quad (17)$$

式中: β 为介质热膨胀系数; g 为重力加速度。

普朗特数定义为:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (18)$$

式中: C_p 为定压比热容; k 为物质热导率。

基于传质过程对其 NS 方程进行无量纲化,见公式 (19) 和 (20):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{Re^2} \cdot Ar \cdot f \quad (19)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + U_j \frac{\partial f}{\partial x_j} = \frac{1}{Re \cdot Sc} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_j} \quad (20)$$

其中,阿基米德数为:

$$Ar = \frac{g\rho_{Ref}(\rho - \rho_{Ref})L^3}{\mu^2} \quad (21)$$

斯密德数定义为:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (22)$$

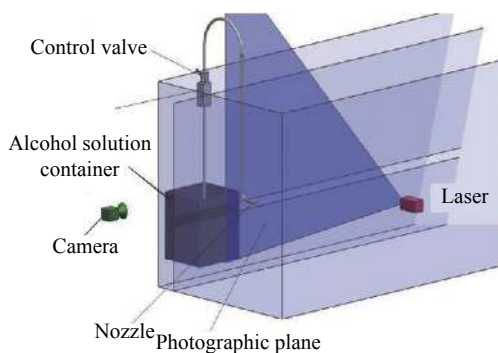
流动相似的先决条件是所有无量纲数相等,即雷诺数相等,普朗特数等于斯密德数,格拉晓夫数等于阿基米德数。基于 Boussinesq 假设,所有物质参数都取参考状态下物质的参数,保证几何相同和进口速度一样的条件下,雷诺数自然就相等了。传质试验的工质为酒精和水的溶液,调节浓度,可以使阿基米德数等于相应传热实验的格拉晓夫数。然而水的普朗特数和酒精在水中的斯密德数无法保证相等,但是在传热或传质流动中,对流项对标量传输的影响远大于标量自身的扩散。因此,即使普朗特数和阿基米德数不一样,还是能够保证流动的相似性,用传质试验来代替传热试验是可行的。

为了进行类比试验,在保持几何尺寸和进口速度相同的情况下,有格拉晓夫数和阿基米德数相等,得密度-温度比拟方程 $\Delta T = 420f$, 即温差等效于材料浓度乘以 420。

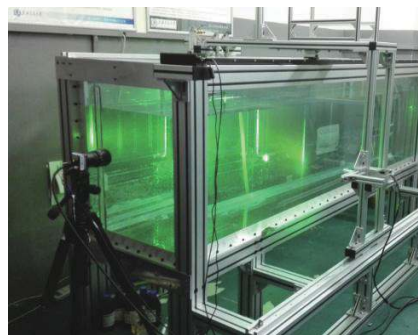
根据 PLIF 测试方法要求,在进行试验前需要对荧光材料进行标定,记录荧光材料光强与荧光材料浓度之间得关系曲线,并根据密度-温度方程,最终转化为荧光材料光强与等效热射流温度之间的关系曲线。

2.2 试验方案

根据 PLIF 测量原理,搭建一个全透明且六面无遮挡的拖曳式水槽试验台,并配备高速相机、激光器、数字控制线性导轨、高精度同步电机等机构,如图 1 所示,用以精确控制喷嘴的移动来模拟水下目标



(a) 拖曳式水槽示意图
(a) Schematic diagram of towing tank



(b) 拖曳式水槽实物图
(b) Physical map of towing tank

图 1 拖曳式水槽

Fig.1 Towing tank

的航行。

在静止射流情况下,调整激光器和相机如图 1 所示,可以得到热射流在纵向切面上浮升过程的准三维画面。在运动射流情况下,调整激光器平射,相机俯视拍摄,可以测量其在运动过程中不同高度位置处热射流的漂浮形态和扩散面积的大小。

3 数值计算与试验验证

3.1 静止工况数值计算与试验验证

数值计算采用 Boussinesq 假设,即忽略密度变化在非稳态项和对流项中的影响。计算网格如图 2 所示,采用结构化六面体网格,并采用 O 型网格对喷嘴附近进行辐射结构处理。计算流域在宽度方向上大于 50 倍出口直径,长度方向为 5 倍热射流的渗透距离,网格数量在 300~500 万之间。喷嘴深度为 350 mm,进口速度为 0.2 m/s,温度为 50 °C,流域中的初始条件为静止状态,温度为 25 °C。对流项采用二阶中心差分格式,湍流项采用一阶迎风格式,非稳态项采用二阶后向差分格式,时间步长为 0.025 s。应用 PANS 方法,设置 $f_k=0.7$ 。

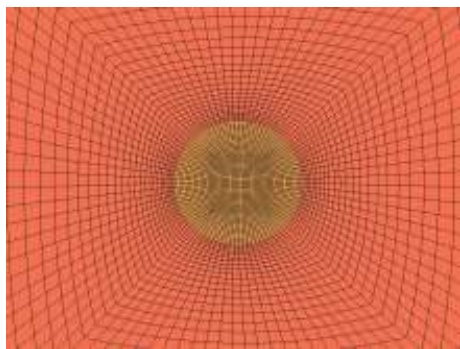


图 2 喷嘴附近的网格

Fig.2 Grid near nozzle

通过 PANS 方法计算得到热射流在不同时刻的温度分布结果与通过 PLIF 方法测量得到相同时刻的温度分布结果进行比较,见表 1。其中,测量结果图片上的白色曲线为根据计算结果描绘出的温差为 0.1 °C 的等值线,即代表数值计算中的射流轮廓。

通过表 1 可以看出,数值计算结果与试验测量结果吻合较好,但以热射流的浮升高度进行比较,数值计算结果比试验测量结果稍大,这可能是由于试验值中温度为 0.1 °C 的阈值与试验中能够测量到的最小酒精浓度不匹配造成的。

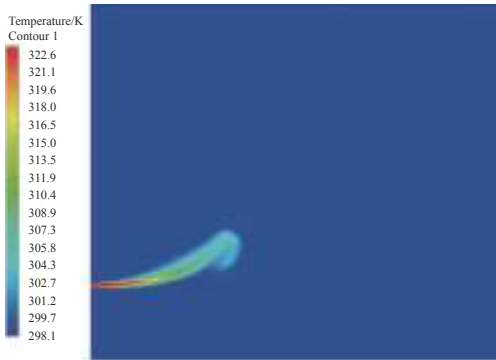

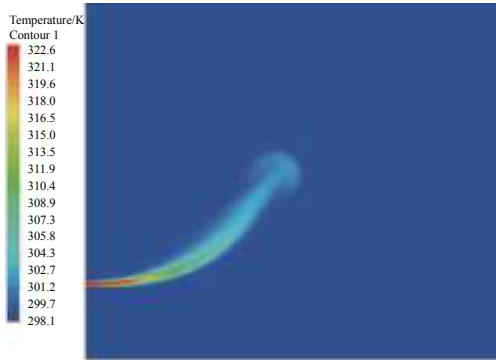
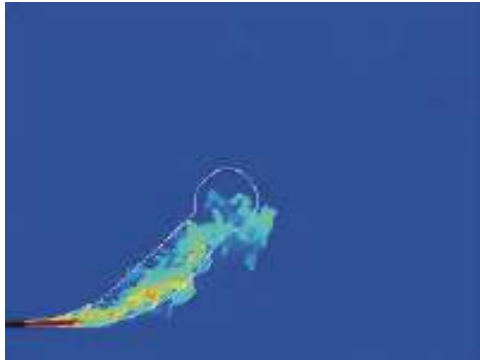
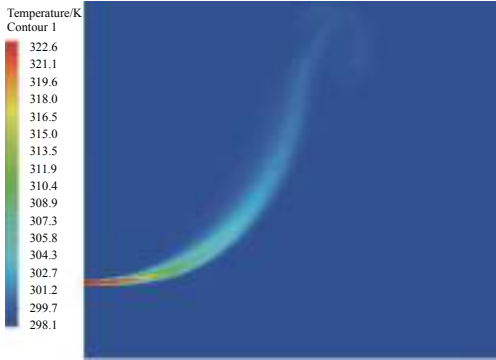
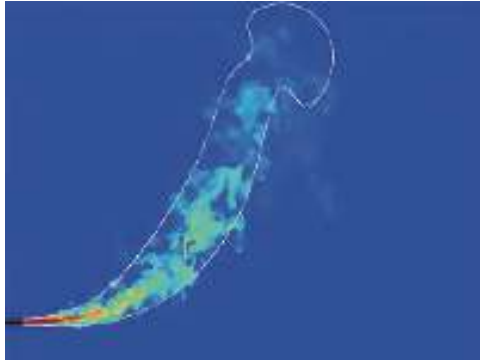
值得一提的是,对比表 1 中的计算结果与测量结果,可以发现两者的温度分布在空间形态上有着较大差异,即数值计算得到的射流形态要比试验测量得到的射流形态要均匀。这主要在于试验中再现了射流的真实流动情况,所有的涡结构都能呈现出来,而数值计算是通过 PANS 方法所得。PANS 是 RANS 和层流方程的混合模型,给定 $f_k=0.7$,表明有含 70% 的湍动能的涡结构被平均了,因此数值计算的射流形态是一个分布更加均匀的流场形态。

图 3 为射流浮升高度随时间变化曲线,从图中可以发现计算结果与试验结果吻合较好,也从另一个角度进一步说明了数值计算和试验测试得到的射流空间轮廓是相吻合的。

为了与文中用 PANS 方法计算的射流形态特征进行对比,将试验测量图像进行时均处理,即从射流浮升到自由液面开始,1 min 内所有拍摄的图像求时均,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,时均后射流的形态和计算结果很相像。然后勾勒出射流中心曲线,沿着这条曲线提取出温度数据,绘制成图 5 的曲线,横坐标为数据提取点距离喷嘴的曲线长度,纵坐标为温差,可以发现计算结果与试验结果吻合得很好。此外,温度分布在靠近喷嘴的区域降低得比较慢,原因在于该区域属于射流的初始段,射流速度较快,湍流混合不是很充分,随着射流的浮升,其温度急剧降低。但是温度的降低速率会越来越慢,在射流浮升高度越大时,温度的变化越不明显,这是由于射流的动能基本消失,温度的传输只靠扩散的作用。在射流中心曲线的中间位置,计算值和试验值的误差比其他位置要大,相对于试验结果,最大误差控制在 15% 左右,并且绝大部分区域的误差控制在 10% 以内。

表 1 静止工况计算结果与测量结果比较

Tab.1 Comparison of calculation and measurement results under static condition

Time/s	Simulation result	Measuring result
4		
8		
16		

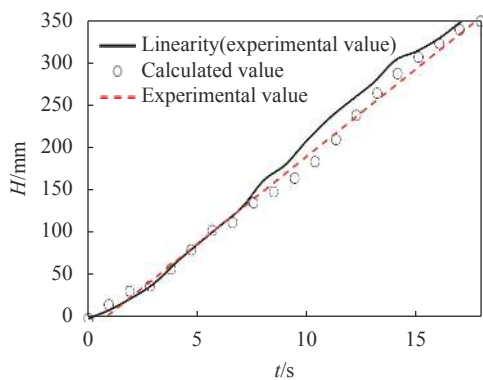


图 3 射流浮升高度随时间变化曲线

Fig.3 Variation curve of jet floating-up height with time

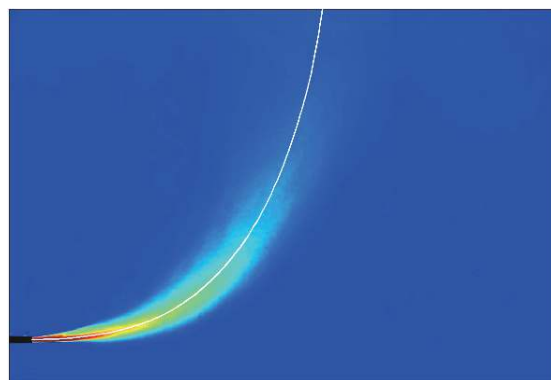


图 4 射流试验结果的时均值

Fig.4 Time mean of jet experimental results

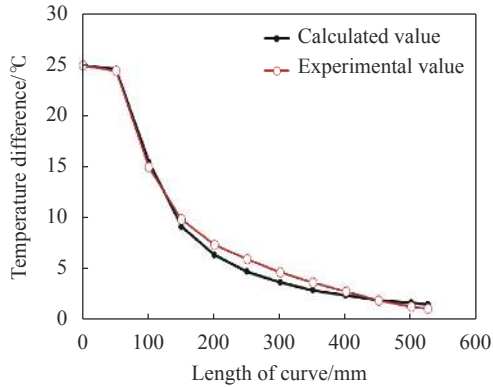


图 5 射流中心曲线上的温度分布

Fig.5 Temperature distribution on jet center curve

3.2 运动工况数值计算与试验验证

运动工况下射流是由拖曳机构带动喷嘴以一定

的速度移动,该工况可以较好地检验基于 PANS 方法的热射流预报模型对于水下目标热射流排放问题的准确性。运动工况参数如表 2 所示。

表 3 为在不同高度下将所拍摄的 1000 张图像去

表 2 运动工况参数

Tab.2 Parameters of moving conditions

Serial number	Parameter	Set value
1	Emission temperature difference/°C	25
2	Discharge rate/m·s ⁻¹	0.2
3	Travel speed/m·s ⁻¹	0.01
4	Velocity of surrounding water	0
5	Emission depth/mm	350
6	Measuring plane height/mm	100, 200, 350

表 3 不同浮升高度下热射流温度分布的计算结果和试验结果对比

Tab.3 Comparison of calculation results and experimental results of thermal jet temperature distribution at different floating-up heights

Height/mm	Simulation result	Measuring result
100		
200		
350		

掉前 200 张流动还没有充分发展的, 然后对后 800 张图像进行时均处理, 并与数值计算结果进行对比。其中, H 为射流浮升高度, $H=350\text{ mm}$ 为液面附近。

从表 3 可以看出, 在射流浮升高度 H 较小时, 不同高度上的射流痕迹的位置与形状比较吻合, 并且呈明显的 V 字形。这是由于热射流在射出后, 受横流的影响, 射流流体会出现分叉现象。如果横流比较强烈, 分叉会形成两股射流体。喷嘴移动速度仅 0.01 m/s , 对应的横流比较微弱, 所以射流只出现分叉, 没有分开成两股流体。在浮升高度较大时, 试验中射流流体混合得比较均匀, V 字形状消失, 而在数值计算中, 虽然使用了 RANS 和层流方程的混合算法 PANS, 但是由于 RANS 模型本身的缺陷, 相对于试验结果, 尾流体混合得不太均匀, V 字形状没有完全消失, 但是有 V 字形往椭圆形转变的趋势, 且基本范围和温差分布是一致的。

图 6 为不同高度 H 下, 试验和数值计算的热射流局部平均温差分布。因为试验值比较离散, 而且噪音没法完全消除, 所以在最高温差附近, 对直径为 50 mm 的范围内做平均处理, 计算值也做同样的处理。可以看出数值计算值和试验值吻合得较好, 相对误差小于 10% 。

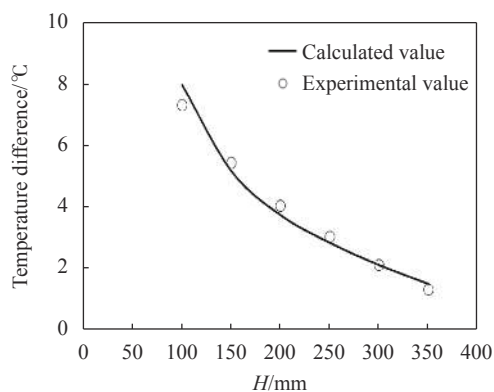


图 6 不同浮升高度下热射流局部平均温差分布

Fig.6 Local average temperature difference distribution of thermal jet at different floating-up heights

图 7 为数值计算中射流温差为 0.5 °C 的等值面, 颜色值表示速度的大小。当浮升高度较小时, 可以明显地看到流动分叉现象, 即 V 字形; 而当浮升高度较大时, V 字形衰退, 逐渐变为椭圆状。这种趋势与试验结果吻合较好。

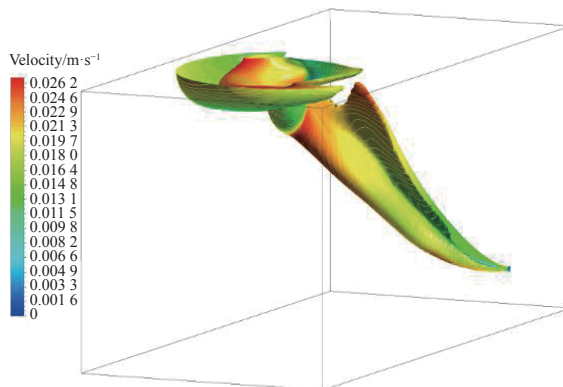


图 7 温差 0.5 °C 的等值面

Fig.7 Isosurface of temperature difference in 0.5 °C

4 结 论

文中基于 PANS 方法对水下静止热射流和运动热射流两种工况进行了数值模拟, 并分别与基于 PLIF 方法测量得到的模型试验结果进行对比验证。得到结论如下:

(1) 静止射流中, 通过试验验证了射流体的空间轮廓和热射流浮升高度随时间的变化关系。轮廓空间分布显示, 数值计算和试验结果吻合得较好, 且在热射流的空间分布尺度和不同时刻下的浮升高度预测得也比较准确。

(2) 运动射流是测量热射流在不同高度下的时均分布, 并与计算结果对比发现: 在较大深度下, 预报的热射流空间分布及形态与试验结果非常吻合, 而靠近自由液面的位置, 由于湍流模型和网格的原因, 对湍流的掺混模拟有些偏差, 导致热射流的空间形态发展不充分, 但热射流的大体空间位置 and 不同深度下的温差, 计算值与试验值吻合得较好。

(3) 相对于雷诺时均方法仅适用于充分发展的高雷诺数湍流流动, 而对于低雷诺数流动和转捩流动适用性较差。PANS 方法作为雷诺时均方法和层流方程的混合算法, 可以很好地解决雷诺时均方法涡粘过大的问题。模型试验验证结果表明, 基于 PANS 方法的预报模型准确性较高, 所有误差均在 15% 以内, 且绝大部分误差控制在 10% 以内。

参考文献:

[1] Zhou Zhe, Bai Zongliang, Zhao Detao, et al. Structure optimization and simulation analysis of submarine discharge

- port based on CFD [J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(5): 66-70. (in Chinese)
- [2] David F, Michael G, Orlando W, et al. Numerical simulation of late wakes in Stratified and sheared flows [C]//Proceedings of the 2003 User Group Conference, IEEE, 2003(6): 206-210.
- [3] Wu Mengmeng, Chen Boyi, Zhang Xiufeng, et al. The study on the varied laws of surface feature parameters caused by a going body underwater in the temperature stratification ocean [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(4): 242-246. (in Chinese)
- [4] Zhang Haochun, Ji Yu, Ma Rui, et al. Buoyant characteristics of thermal wakes discharged by underwater vehicles [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(7): 24-28. (in Chinese)
- [5] Zhang Jian, Yang Li, Yuan Jiangtao, et al. Experimental research of underwater vehicle thermal wakes [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(3): 7-14. (in Chinese)
- [6] Yang Weiping, Zhang Zhilong, Li Jicheng. Experimental test system design for thermal wakes of submerged vehicle based on scale model [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(4): 107-112. (in Chinese)
- [7] Yang Weiping, Zhang Zhilong, Li Jicheng, et al. Thermal wakes detectability of submerged objects based on scale model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 28-35. (in Chinese)
- [8] Shao D, Huang D, Jiang B, et al. Flow patterns and mixing characteristics of horizontal buoyant jets at low and moderate reynolds numbers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 105: 831-846.
- [9] Su L K, Helmer D B, Brownell C J. Quantitative planar imaging of turbulent buoyant jet mixing [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, 643: 59-95.
- [10] Bharadwaj K K, Das D, Sharma P K. Near field characteristics of buoyant helium plumes [J]. *Sadhana Academy Proceedings in Engineering Science*, 2015, 40(3): 757-768.