文章编号: 1672-8785(2011)09-0029-06

水下航行体热尾流水面温度特征的研究

吴猛猛 龚文超 袁宝吉

(海军潜艇学院培训系,山东青岛 266044)

摘 要:采用 FLUENT 数值仿真和实验模拟的方法,对在温度均匀和温度分层的海水 中排放热水的水下航行体的热尾流浮升过程及其与自由表面的相互作用进行了计算和 模拟,获得了由水下航行体引起的自由表面的温度变化规律。在此基础上,将热尾流 的试验结果与理论数值模拟结果进行了比较。此外,还得到了热尾流的浮升和自由表 面的红外图像,为水下航行体探测提供了一定的理论基础。

关键词:水下航行体;热尾流;水面特征

中图分类号: TN215 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.09.007

Study of Surface Temperature Features of Thermal Wake Caused by Underwater Vehicle

WU Meng-meng, GONG Wen-chao, YUAN Bao-ji

(Department of Training, Naval Submarine Academy, Qingdao 266044, China)

Abstract: Both FLUENT numerical simulation and experimental simulation are used to calculate and simulate the thermal wake buoyant process of an underwater vehicle discharging hot water in the sea water with uniform and vertical temperature gradient and the correlation of it with the surface. The laws of the surface temperature change caused by the underwater vehicle are obtained. Then, the test result of the thermal wake is compared with the numerical simulation result. In addition, the infrared images of thermal wake buoyant process and surface are obtained. This study provides a certain theoretical basis for the detection of underwater vehicles.

Key words: underwater vehicle; thermal wake; surface features

0 引言

随着减振降噪和隐身材料技术的发展,传统的声纳技术对水下航行体的探测能力已濒临极限。于是人们开始探索一种全新的潜艇探测方法,即非声学潜艇探测方法^[1]。该方法利用卫星或飞机上的合成孔径雷达观测海面,试图由此探测到潜艇在水下运动时水面上产生的特殊

"痕迹"(如冷热特征、水力特征等),从而确定 潜艇的位置^[2]。2003年,David等人^[3]采用高 精度紊流直接数值模拟方法对分层和均匀流体 中的潜艇尾流进行了数值模拟研究。他们分析 了潜艇尾流的水动力特性、能量和结构特点, 并在考虑环境剪切和层化情况下对潜艇自航和 拖行时的尾迹进行了数值分析和比较。分析结 果表明,流源和环境情况都会影响尾流的结构

作者简介:吴猛猛(1986-),男,江苏徐州人,助教,硕士,主要研究方向为潜艇红外探测与隐身。

E-mail: caozewolong2006@163.com

收稿日期: 2011–08–05

基金项目: 国防预研项目

和发展。2004年, Thomas S. Lund 等人^[4] 对潜 水体的尾流场进行了数值模拟研究。他们是用 直接数值模拟方法模拟尾流近区,并用大旋涡 模拟方法模拟尾流远区的。2005年,洪方文等 人^[5] 分别通过 RANS 方程和 VOF 方法的非定常 粘性数值方法对潜艇在温度均匀的水下运动时 产生的表面尾迹特征进行了研究。2008年,张 健等人^[6] 通过实验分析了水下运动体排放冷却 水时所形成的热尾流温度分布特征。他们通过 对匀速运动的水下运动体排放热水时所形成的 热尾流温度分布进行温度测量及红外摄像,得 到了水下运动体热尾流的温度分布特性。

综上所述,国内外学者虽然对热尾流的产 生和扩展进行了大量研究,但对于由水下航行 体运动引起水面特征参数变化的规律的研究尚 不多见。本文在温度线性分层的海水中,利用有 限体积法对排放热水的水下航行体的尾流浮升 及其与自由表面的相互作用进行了数值模拟。 然后在分层水槽中对自由表面的温度特征的变 化规律进行了实验,验证了该模型的正确性,并 具体分析了热尾流的温度变化分布特点,为水 下航行体的红外探测提供了科学的理论与实验 依据。

1 水下航行体尾流与水面相互作用的 模型

图 1 给出了在温度分层海洋中排放热水的 水下航行体的热尾流浮升及其与自由表面的相 互作用所经历的 3 个阶段。第一阶段为热尾流的 浮升阶段 (其纵向长度为 $\tau_0 u_\infty$,其中 τ_0 为热尾 流的浮升时间, u_∞ 为水下航行体的航速);第 二阶段为热尾流与自由表面的掺混阶段;第三 阶段为热尾流在自由面上的扩散阶段。图中,h为航深, $\Delta x = \Delta \tau \times u_\infty$ 为水下航行体从初始位 置 a 到实际位置 b 的航行距离 (其中 $\Delta \tau$ 为航行 时间)。



图 1 水下航行体热尾流的浮升及其水面扩展过程的示意图

2 数值模拟

基于有限体积法的 FLUENT 软件适用于计 算流体流动和传热问题。针对分层流体中排放热 水的水下航行体所形成的热尾流浮升及其与自 由表面相互作用的数学模型,运用 FLUENT 软件 求解 N-S 控制方程,采用 Standard 湍流模型模拟 热尾流浮升这一流动问题,然后利用 VOF(Volume of fluid) 来跟踪自由表面的变化。

运用 GAMBIT 生成网格。采用非结构化网格结构,并利用 FLUENT 软件进行计算求解。 采用一阶非稳态分离计算。湍流模型采用标准 k-epsilon 模型,多相流模型采用依赖时间的隐式 VOF 模型。操作环境考虑重力的影响。压力的 差分格式为 PRESTO!,压力与速度耦合格式选 用 PISO 。同时,将松弛因子设为 0.7 ~ 0.8,以 保证求解的稳定性。

实际上,海水密度和温度的垂向分布大多 是随机的,但在自由表面附近可近似为线性分 布。因此,在计算中将海水密度和温度近似成线 性分布,并取海水在垂直方向上的温度分布^[9] 为

$$T(y) = 292.5 - 0.1667(h - y) \tag{1}$$

式中, *h* 为水深, *T*(*y*) 的单位为 K, *y* 的单位 为 m。

本文的计算对象是排放热水的水下航行体 所形成的热尾流的浮升及其水面扩展过程,计 算区域为 220 m×42 m (分别为纵向 X 和垂直方 向 Y 上的尺寸)。在图 2 中,水气交界面 (即自 由表面)为f, x 轴与自由表面 f 的距离 (即水下 航行体的航深) h=5 m、10 m、15 m;水下航 行体近似为椭圆体,其尺寸为长 L=8.7 m,最大 宽度 D=0.5 m;水下航行体排放热水时可近似 为一个圆形截面的倾斜浮力射流,热水排放口 的直径 D₀ =0.1 m, 排放口 e 到上边界 c 的距离 为 20.35 m, 到左边界 a 的距离为 15.65 m。

边界条件如下: 左边界 a、上边界 c、下边 界 d、水下航行体的热水排放口 e 都给定速度 大小和方向、温度分布、水相的容积比率; 右边 界 b 为自由出流边界条件。左边界 a 的流速近 似为水下航行体的航速 $u_{\infty} = 1$ m/s、 3 m/s 和 9 m/s,水下航行体排放热水设为速度边界条件 $u_0 = 1$ m/s,排水口温度 $t_0 = 303$ K。边界条件中 的温度分布、水相的容积比率以及流体的温度 梯度由自定义的 UDF 设定,自由表面非扰动区 的温度 $T_{\infty} = 292.5$ K。

3 模拟实验

3.1 实验设备与测量仪器

图3给出了尾流实验的组织结构图。实验装置由尾流发生装置、尾流测试装置和尾流显示 装置三部分组成。

图 4 为温度传感器的布置示意图。实验采用 pt100 电阻温度传感器来测量热尾流的温度分布。





图 4 温度传感器的布置示意图

将 pt100 与安吉仑数据采集仪 (Agilent 34970A) 结合使用可使测温精度达到 0.001 ℃。将4个直 径为4 mm 的 pt100 固定在直径为5 mm 的钢杆 上,然后再固定在潜艇模型后部的中轴线上, 其间距为 180 mm,距离潜艇模型 80 mm。同时 将钢杆连接在拖车上,使其可以随拖车一起运 动。因此,这4个热电偶相对于潜艇是静止的。 将一个热电偶固定在潜艇模型中轴线后 550 mm 处,因此5号热电偶的位置不改变。热电阻布置 完毕后,接入安吉伦数据采集仪。

3.2 实验方法及步骤

3.2.1 尾流的产生

实验采用美国洛杉矶号核潜艇的缩小模型,其艇体长 L_m =350 mm,最大外径 D_m =60 mm。艇模固定在拖车中央,保持水平,以保证艇模位于水槽的中轴线上。在艇模的底部固定内径 d_m =5 mm 的细软管,细软管的另一端连接热水排放装置。通过推动活塞排放其中的热水,以模拟潜艇航行时排放热水所形成的热尾流。 3.2.2 尾流测试

潜艇模型固定在拖车上,因此通过确定拖 车的拖曳速度即可确定潜艇模型的速度。用电 机带动拖车,同时通过调节调压器改变驱动拖 车的电动机的输入电压,从而达到控制艇模速 度的目的。本实验所取输入电压为150 V,对应 的艇模速度为0.15 m/s。排放热水装置的容积为 125 mL,排水管的直径为50 mm,平均排放速 率为10 mL/s,排放热水的出口温度为65 ℃。 由于热电阻支架固定在拖车上,在艇模运 动过程中,图4中的1~7号热电阻可以记录下 尾流纵向温度的变化规律;同时1~4号热电阻 可以横向穿越尾流区,即可以得到表层的横向 温度分布。

3.2.3 尾流显示

本实验采用一定浓度的高锰酸钾溶液,并 加入少量的酒精作为尾流示踪剂。因为高锰酸 钾与酒精混合后其比重与水一致,因而可以忽 略浮力的影响;同时高锰酸钾溶液呈红色,稳定 性好,可见度高,便于观察。

4 实验结果分析

图 5 给出了温度梯度为 0.04 ℃ /mm、航速 为 1.5 m/s 时,温度分层流体中不同深度自由表 面横截面的温度变化曲线。当潜艇模型的潜深 为 80 mm 时,自由表面上尾流区与非尾流区的 最大温差为 1.2 ℃;当潜艇模型的潜深为 120 mm 时,自由表面上尾流区与非尾流区的最大温差



图 5 温度分层流体中自由表面横截面的温 度变化

红外

为 0.5 ℃。可以看出,随着水下航行体潜深的增加,自由表面上尾流区与非尾流区的温差减小。 潜艇的航行深度对自由表面的温度变化具有十 分重要的影响。因此,潜深的增加会给潜艇探测 带来一定的困难。

图 6 给出了水下航行体热尾流在自由表面 上的红外图像。可以看出,由于自由面上冷热水 团掺混会形成冷热交替的 V 字形水面特征, 尾 流区中轴线的温度与非尾流区的相差最大。因 为水下航行体尾流在浮升过程中将下层的冷尾 流卷吸到上层表面, 冷水团与自由表面发生掺 混, 从而形成低于周围环境温度的冷尾流。随着 尾流的延伸和扩展, 自由表面的冷尾流温度趋 于周围环境温度。



图 6 自由表面尾流的红外图像

5 计算结果与实验结果分析

图7给出了温度均匀与温度分层海水中自由 表面尾流中轴线的温度变化规律的对比情况。 其中,横坐标为自由面上尾流的纵向扩展距离 X(单位为 cm),纵坐标为自由表面上的尾流区 与非尾流区的温差 ΔT (单位为 C)。在数值模拟 中,航速 u_{∞} =3 m/s,航行深度 h=15 m,温度梯 度为 0.167 C/m;在实验模拟时,航速 u_{∞} =1.5 m/s,航行深度 h=80 mm,温度梯度为 0.2 C /m。图 7(a)所示为均匀流体中自由表面的纵向 温度分布,图 7(b)所示为温度分层流体中自由表 面的纵向温度变化。两者共同表明,自由表面的 温度都是随着时间的增大而先升高后降低的, 但温度分层时自由表面的温升明显低于温度均 匀时的温升。同时由图 7(a) 与图 7(b) 的对比可 知,实验结果与数值模拟结果具有较好的一致 性,证明了建构模型的正确性。但是由于实验过 程中固定热电阻的垂直杆运动所产生的涡会对 自由表面和表层空气产生影响,实验结果与数 值模拟结果之间存在一定的误差。

图 8 形象地反映了热尾流的浮升及其与自由表面相互作用的过程。在初始阶段,热尾流处



图 7 温度均匀与分层流体中自由表面尾流中轴线的温度变化的比较

水



模拟实验结果 图 8 水下航行体尾流的浮升图像

于浮升过程,与自由表面不发生相互作用。当热 尾流浮升至自由面后,热尾流与自由表面上的 水及其交界面上的空气都发生掺混。这种掺混 会引起自由表面的剧烈扰动,但随着时间的推 移,扰动趋于平缓,热尾流也将在自由面上逐渐 扩散。

6 结论

当水下航行体在海水中航行时,在温度均 匀的海水中,自由表面会形成高于环境温度的 热尾流;在温度分层的海水中,自由表面的温度 分布比较复杂,此时影响表面温度分布的因素 较多。当热排水的热量大于艇体绕团卷吸的冷 水团的冷量时,自由表面尾流区的温度比非尾 流区的高;当热排水的热量小于艇体绕团卷吸 的冷水团的冷量时,自由表面尾流区的温度比 非尾流区的低。现实中,海洋通常存在较大的垂 直温度梯度,而且一般潜艇在航行中的航行深 度较大,所以其形成的尾流实际上以冷尾流居 多,这也应该是我们今后的研究重点。

无论是在温度均匀的流体中还是在温度分 层的流体中,由于水下航行体的推进器和艇体 效应及其排放热水会形成与周围海水温度不同 的热尾流,热尾流的浮升及其与自由表面的相 互作用可以分为3个阶段:第一阶段为热尾流的 浮升阶段;第二阶段为热尾流与自由表面的掺 混阶段;第三阶段为热尾流在自由面上的扩散 与衰减阶段。

在温度分层的流体中,水下航行体的尾流 由于自由面上的冷热水团掺混会形成冷热交替 的 V 字形温度分布,其中尾流区中轴线的温度 与非尾流区的相差最大。因为水下航行体运动 时形成的尾流在浮升过程中会将下层的冷尾流 卷吸到上层表面,涡的作用又会使冷水团与自 由表面发生掺混,因而会形成冷热交替的温度 特征。随着尾流的延伸和扩展,自由表面的冷尾 流温度会接近周围环境温度。

参考文献

- [1] 王永刚, 刘玉文. **军事卫星及应用概论** [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 李蓉芳. 探测潜艇的非声纳方法 [J]. 光机情报, 1991, **20**(7): 1-7.
- [3] David F, Michael G, Wendy O, et al. Numerical Simulation of Late Wakes in Stratified and Sheared Flows [C]. // IEEE Proceedings of the 2003 User Group Conference, 2003: 206–210.
- [4] Thomas S L, David C F, Joseph A W. Application of Direct and Large-Eddy Simulation Methods to Late Wakes of Submerged Bodies [C]. // IEEE Proceedings of the Users Group Conference, 2004: 112–118.
- [5] 洪方文,常煜.均匀流中潜艇水下运动表面尾迹的 数值模拟[J].船舶力学,2005,9(4):9-17.
- [6] 张健,杨立,袁江涛,等.水下航行器热尾流试验 研究 [J]. **实验流体力学**, 2008, **22**(3): 7–14.