avionicstech@avic.com

D01:10.12175/j.issn.1006-141X.2022.03.09

水下航行潜艇尾流特征仿真建模方法

成建波,李 涛

(中国人民解放军 92728 部队,上海 200436)

[摘 要]潜艇的物理特征是航空反潜传感器搜索潜艇的主要依据,对潜艇特征进行准确的仿真建模能够实现 对潜艇的有效分析。本文以水下航行状态下的潜艇为背景,基于潜艇外部环境和内部工况因素,提出了一种尾 流特征仿真建模方法。通过仿真建立了潜艇内波尾流特征仿真模型和热尾流模型,仿真结果表明,所得模型从 雷达目视和红外探测两个维度模拟了水下潜艇的尾流特征,能够有效反映水下航行潜艇尾流特征。 [关键词]潜艇;尾流特征;光谱;内波

[中图分类号]U666.7, V271.4 [文献标识码]A

[文章编号]1006-141X(2022)03-0059-06

Simulation Modeling Method for Underwater Submarine Wake Characteristics

CHENG Jian-bo, LI Tao

(Unit 92728 of PLA, Shanghai 200436, China)

Abstract: The physical characteristics of submarines are the main basis of aerial anti- submarine sensors to search submarines. Accurate simulation modeling of submarine characteristics can enable an effective analysis of submarines. With the submarine in underwater navigation as the background, based on the external environment and internal working conditions of the submarine, a simulation modeling method of wake characteristics is proposed. The simulation model and thermal wake model of submarine internal wave wake characteristics are established by simulation. The simulation results show that the obtained model simulates the wake characteristics of underwater submarines from the two dimensions of radar visual and infrared detection, which can effectively reflect the wake characteristics of underwater submarines.

Key words: submarine; wake characteristics; spectrum; internal wave

目前反潜巡逻飞机针对水下航行状态潜艇的主 要探测手段包括:声呐浮标探测、磁异常探测、搜 潜雷达探测、红外/电视与高光谱探测等。探测手 段的多样性,对潜艇的特征仿真技术也提出了更高 的要求。潜艇的特征仿真建模技术在航空反潜训练 的搜索跟踪、模拟攻潜等科目中可起到重要作用, 同时也可为航空反潜武器设计与传感器设计提供有 效指导,因此,有必要根据潜艇的特征信息进行准 确有效的仿真建模。

近年来国内外对潜艇噪声特征、声反射特征和 艇身红外特征等物理特征进行了较为深入的研究, 具备成熟的仿真模型。但在实际应用过程中,由于

收稿日期: 2022-02-07

引用格式:成建波,李涛.水下航行潜艇尾流特征仿真建模方法 [J]. 航空电子技术, 2022, 53(3): 59-64.

海况及海洋背景的复杂性,以及海面的分层特性等, 在一定程度上限制了这些探测手段。例如声反射特 征存在着潜艇及背景噪声干扰等问题;潜艇表面消 磁材料的使用,也为磁异常探测手段带来干扰。

尾流特征是潜艇航行过程中在其尾部一定区域 内留下的具有特殊功能的海水区,与周围毗邻海水 具有明显不同的特性并形成较大差别。通过对潜艇 尾流特征进行仿真研究,对于研究潜艇特征性能、 鱼雷检测性能等具有重要意义。但对潜艇尾流特征 的研究相对较少,目前常规的尾流分析模型较为复 杂,存在着一定的局限性。如张效慈采用 Tuck 公 式^[1] 计算了外军潜艇内波尾迹上传到海面映波的 测量值^[2],杜充等采用由物理光学法推导得到的 Stratton-Chu 积分方程对潜艇内波尾迹的 RCS 进行 了计算,为 SAR 成像提供了仿真依据^[3],张修峰 等通过水槽实验的方式研究了螺旋桨推进潜艇时在 有、无温度分层流体中的尾流温度分布和信号衰减 规律^[4],这些采用基本原理方法进行的尾流仿真过 于单一,在一定程度上影响了模型的准确性。张旭 升等通过有限体积法建立潜艇外流域的三维计算模 型,通过 SIMPLE 算法和 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型计算 流体三维 Navier-Stokes 方程,分析了潜艇航行速度 对热尾流的浮升扩散规律和海表温度特性的影响^[5], 但模型在计算时占用资源过多,影响了计算效率。

为了准确概括潜艇尾流特征信息、实现对尾流的准确建模,本文提出了一种便于实现仿真加速的 近似尾流仿真建模方法,通过源汇分布模型和 Wilson 公式分别构建潜艇内波尾流高度仿真和潜艇热 尾流红外强度仿真模型,经过仿真分析,该模型可 以准确描述潜艇尾流特征信息,同时具有较高的计 算效率,能够满足仿真过程的实时性。

1 潜艇内波尾流仿真

潜艇在水下航行时会产生内波,内波传播到海 面形成类似于三角形的波纹即内波尾迹,该尾迹可 被 SAR 雷达或肉眼观测到,是反潜机搜索潜艇的 一种重要目标特征^[6]。该特征仿真模型主要包括点 源内波模型和源汇分布模型^[7]。

1.1 点源内波模型

潜艇点源内波模型的基础为运动相对性,为了

准确描述该模型,一般将运动点源(即潜艇目标) 视为处于运动流体(海流)背景下的静止点源^[8]。 建立在自由平面上的惯性坐标系如图1所示。

图 1 中, 点源 A 处于均匀来流中,其中来流 速度方向为 x 轴正向,其大小为 U。流体矢量为 $\vec{V} = (U + u, v, w)$,其 中 u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)为点源 A 在三个方向上产生的扰动速度,一般视为 来流速度 U 的微小量。点源 A 的坐标为 A(0,0,-h), 其中 h 为当前潜艇所在位置的深度。



图 1 运动点源坐标系

点源产生的自由面波高为:

$$\zeta = \frac{U}{g}\varphi_x$$

式中,g为重力加速度, φ_x 为外界引入的标量 函数,该标量函数同时满足:

$$u = \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial x} , v = \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial y}$$

由此可得到点源产生的扰动速度场为:

$$u = \frac{2}{\pi} \sum_{j=0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(K_{j}x\cos\theta)\cos(K_{j}y\sin\theta) \frac{W_{0}}{D_{k}}\cos\theta d\theta$$

式 中,W 为 w(x,y,z) 的 傅 里 叶 变 换, $D=D(k,\sigma)$,为 Wronskian 行列式在 z = -h 时的值, D_k 为 $D(k,\sigma)$ 对 k 的偏导, $k = \frac{g}{U^2}$, $K_j = K_j(\sigma)$ 为自由 面边界条件和底部边界条件 g构成的 Sturm-Liouville 型边值问题的本征值。

将上式用稳定相法进行近似求解时可得到等效 点源在均匀流场中产生的扰动速度场为:

$$u = -\frac{2k^2}{\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{2}} \cos(kx \sec\theta) \cos(ky \sec^2\theta \sin\theta) e^{k(z-h)\sec^2\theta} \sec^4\theta \sin\theta d\theta$$

第3期

1.2 源汇分布模型

海洋动力学的势流理论指出,位于密度均匀的 流场中的点源可产生封闭流线,且近似于点源所等 效的物体的形状。根据势流理论,在仿真建模过程 中,通过使用分布在不同位置的点源,可以近似代 替目标对海水的作用,进而代替潜艇目标。在实际 场景中,潜艇的体积直接影响着对远场的扰动强度, 所以可采用回转体等效代替潜艇的方式进行模型简 化,并将点源布置在回转体的中轴线上,如图2所示。



图 2 均匀来流中潜艇等效点源图

假设海水的密度为已知常量,将潜艇艇身近似 等效为椭球体,然后用轴线上两个强度相等的点源 来等效代替椭球体在均匀流体中的扰动来源,这两 个等效点源分别为源点和汇点。设海流流速大小为 *U*,源点为*A*(-*a*,-*b*),汇点为*B*(*a*,-*b*),两点源的扰 动强度均为*Q*。则源点和汇点的合成流动的流函数 *ψ*(*x*,*r*)可表示为:

$$\psi(x,r) = \frac{1}{2}Ur^{2} + \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^{2}+r^{2}}} - \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^{2}+r^{2}}} \right]$$

根据势流理论,椭球体边界线上的流函数值应为 0。由于 OC=OD=L 且 OE=R,其中 L 与 R 分别为椭球体长轴、短轴的一半,即分别为潜艇长度和 高度的 1/2。

则 $\psi(x,r)$ 函数式可表示为:

$$\psi(x,r) = \frac{1}{2}UR^2 + \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{-a}{\sqrt{b^2 - a^2}} - \frac{a}{\sqrt{b^2 + a^2}} \right] = 0$$

由于椭球体上的C点为零速度驻点,则根据 $\psi(x,r)$ 函数可求出速度,得:

$$U - \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{1}{(L-a)^2} - \frac{1}{(L+a)^2} \right] = 0$$

整理上述三式:

$$(L^{2} - a^{2})^{2} - 2ab^{2}L = 0$$
$$R^{2}\sqrt{R^{2} + a^{2}} - 2ab^{2} = 0$$

 $b^2 = \frac{Q}{2\pi U}$

由上述过程可知,若已知海流来流速度和潜艇 尺寸参数即可求解出潜艇当前状态等效点源点汇位 置和等效扰动强度。

1.3 等效内波解算

式中

在已知潜艇点源点汇位置和扰动强度后,将二 者线性叠加即可求得潜艇内波的速度场。图中的源 汇点在运动方向上的叠加扰动速度 *u*(*x*,*y*,*z*) 为:

$$u(x, y, z) = Q[u_s(x-a, y, z) - u_s(x+a, y, z)]$$

式中, *u_s(x,y,z)* 为单位源强的扰动速度, *S* 为速度的阶数,表征潜艇速度由多种分量叠加而成。将 点源产生的扰动速度场算式带入上式后计算可得:

 $u = -\frac{k^2 Q}{\pi} \int_0^2 \sin(kx \sec\theta) \cos(ky \sec^2 \sin\theta) \sin(ka \sec\theta) e^{-hk \sec^2\theta} \sec^4\theta d\theta$

式中, *Q* 为点源强度, *h* 为下潜深度, *a*, *b* 为 源汇点的位置*x*, *y*确定了海面的位置, *U* 为潜艇航速, $k = \frac{g}{U^2}$ 。由 $\zeta = \frac{U}{g} \varphi_x$ 式可得到潜艇内波尾迹高度为: $\zeta = \frac{Uu}{g}$

2 潜艇热尾流仿真

潜艇在水下航行时,经过动力系统排出的热废 气和热冷却水会在水中留下热踪迹,该异常温度轨 迹具有高于正常海水温度、持续时间长等特征。此外, 潜艇在水下航行时会引起周围的海流波动,形成具 有红外可见特征的特性波纹,上述两种具有红外特 征的尾迹被称为潜艇的热尾流。

潜艇热尾流的红外辐射强度一般分为两部分: 一部分来自于海面的光谱辐射强度,一部分为探测 器到海面之间的大气光谱辐射强度。其中海面光谱 辐射强度包括海面自身辐射和海面对天空背景的反 射,计算如下:

$$N_{\lambda}^{s} = \varepsilon N_{\lambda}^{b}(T_{s}) + \rho N_{\lambda}^{sk}$$

式中, \mathcal{E} 为海面发射率, ρ 为海面反射率, $N_{\lambda}^{b}(T_{s})$ 为表面温度为海面平均温度 T_{s} 的黑体光谱辐射强度, N_{λ}^{sky} 为天空光谱辐射强度。

根据 Wilson 的五次方公式,海面平均红外发射率可由下式计算:

$$\varepsilon = 0.98 \left[1 - (1 - \cos \theta)^5 \right]$$

式中, *θ*为探测器观测方向与海面法线方向的 夹角:

$$\cos\theta = \frac{(\sin\varphi - S_x\cos\varphi)}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2 + 1}}$$

式中, φ 为探测器观测方向的高低角, S_x , S_y 为海面微小薄面在x和y方向上的坡度,且满足:

$$\begin{cases} S_x = \tan \beta \cos \alpha \\ S_y = \tan \beta \sin \alpha \end{cases}$$
$$P(S_x, S_y) = \frac{e^{\left(-\frac{S_x^2 + S_y^2}{\sigma^2}\right)}}{(\pi \sigma^2)}$$

天空光谱辐射强度一般以天空对海面的总辐照 强度表示,假设天气为晴朗天空,则天空光谱辐射 强度计算可表示为:

$E_{skv} = g(a + b\sqrt{e})\sigma T_a^4$

式中, g为海面法向上的计算因子, e为空气中水蒸气压力, T_a为大气温度 a, b为常数, 一般取 a=0.58, b=0.061。由此可得到天空光谱辐射强度为:

$$N_{\lambda}^{sky} = \frac{\eta_{\lambda} E_{sky}}{\pi}$$

探测器至海面之间的辐射强度一般可近似为第 1 层大气辐射:

$$N_{\lambda}^{a} = (1 - \tau_{\lambda}^{1}) N_{\lambda}^{b}(T_{1})$$

式中, τ_{λ}^{1} 为表面温度为第1层大气平均温度 T_{I} 的光谱透射率, $N_{\lambda}^{b}(T_{1})$ 为表面温度为第1层大 气平均温度 T_{I} 的黑体光谱辐射强度。

综合上述各种辐射强度计算可得到探测器考虑 与潜艇之间距离下的热尾流红外总辐射强度为:

$$N_{\lambda} = N_{\lambda}^{s} + N_{\lambda}^{a}$$

将与海面相关的辐射强度以及探测器至潜艇所在的 海面之间的大气辐射强度代入综合后可得到探测器处可接 收到的综合潜艇热尾流红外辐射强度为:

$$N_{\lambda} = \frac{\tau_{\lambda}}{\sin \varphi} \iint \left[\varepsilon N_{\lambda}^{b}(T_{s}) + (1 - \varepsilon) N_{\lambda}^{sky} \right] P(S_{x}, S_{y}) \frac{\cos \theta}{\cos(\arctan \sqrt{S_{x}^{2} + S_{y}^{2}})} dS_{x} dS_{y}$$

其中 au_{λ} 表示为探测器至海面之间的大气透射率参数。

3 测试分析

本节针对外军三型典型潜艇,通过设定环境参数建立模拟仿真环境并将仿真计算的潜艇尾流特征结果予以图像化显示,经过本文源汇内波模型计算得到的上述三种潜艇内波尾迹分布如图3所示。其中潜艇深度均设为15m,由于潜艇之间实际操作性能存在差异,本节测试中设定A型潜艇水下航速8节,B型潜艇水下航速6节,C型潜艇水下航速4节,可见本文源汇内波模型计算得出的潜艇内波尾迹满足一般Kelvin舰艇内波尾迹特征,且内波高度和尾迹宽度随潜艇尺寸参数和水下航速变化,符合水下航行器尾迹特征和其他研究得到结果。



图3 源汇内波仿真尾迹图像(从上至下: A型、B型、C型)

经过本文潜艇热尾流仿真模型计算得到的上述 三种潜艇热尾流红外特征图像如图4所示。其中设 定探测器观测角度为 70 度,天气晴朗,风速 3 m/s, 海面温度 20 度。可见仿真得到的潜艇热尾流红外特 征图像同样满足一般 Kelvin 舰艇内波尾迹特征,且 红外特征强度和红外尾迹宽度随潜艇尺寸参数和水 下航速变化,能够满足潜艇物理特征仿真功能性能 需求。

由于目前尚无公开的真实带有潜艇尾流的光谱 图像,本文通过选用带有舰船尾流的实拍光谱图像 用作验证性对比分析,使用的光谱原始图像如图 5 所示。经过与图 3 仿真内波尾迹的目视观察,两组 图像间具有相似一致性。

采用光谱下采样技术,将光谱原始图像的波段 数进行调整,共选取典型热特性波段作为基准,将 对应波段的辐射亮度通过邻近波段的辐射亮度求均 值近似代替。然后对采样所得的光谱图像进行尾流 异常检测,定位尾流光学特征,结果图如图6所示。 经过与图4仿真热尾流仿真尾迹的目视观察,两组 图像间具有相似一致性。



图 4 热尾流仿真尾迹图像(从上至下: A 型、B 型、C 型)



图 5 舰船尾流光谱原始图像



图 6 尾迹检测结果图像

水面舰艇在航速和尺寸上与水下航行状态 潜艇具有一定差异,验证分析中的尾流空间形 态与本文仿真得到的潜艇尾流特征具有一定的 区别,但在光谱分析级别上可以得到本文的潜 艇热尾流红外特征仿真计算模型生成的尾流光 谱特征与一般舰艇的尾流光谱特征基本相符, 具有外推工程实用价值。

4 结论

本文针对潜艇物理特征仿真加速性需求,根据 点源点汇模型和源汇分布模型建立了水下航行状态 潜艇内波高度仿真计算模型,并根据海面光谱辐射 模型和大气光谱辐射模型建立了水下航行状态潜艇 热尾流红外特征仿真计算模型。通过对实装的A、B、 C型潜艇建立尾迹仿真模型分析可知:

(1)潜艇内波仿真模型所得到的内波高度和尾 迹宽度能够随动反映潜艇外形参数及水下航速变化, 符合水下航行器尾迹特征;

(2)所构建的热尾流红外特征满足一般 Kelvin 舰艇内波尾迹特征,满足仿真需求。

(3)所建立的仿真计算模型公式简单、运算资源占用相对较小,具有一定的工程应用价值。

参考文献

[1]Tuck E O. Submarine internal waves [R]. AD-A264080, 1993.

[2] 张效慈. 潜艇内波尾迹物理场在海面映波量值的确定[J]. 船舶力学, 2005, 9(4):25-30.

[3] 杜充,杨伟,齐聪慧.潜艇内波建模中电磁散射方法分析 [J]. 电子质量, 2013, (10):78-82.

[4] 张修峰,杨立,吴猛猛,杜永成.温度梯度环境中潜艇 尾流热特征的试验研究 [J].实验流体力学,2011,25(2):45-53.

[5] 张旭升, 郭亮, 胡日查, 常雯娟. 潜艇热尾流的浮升扩 算规律及海表温度特性 [J]. 红外技术, 2016, 38(8): 678-682.

[6] 曹庆刚, 毛秋丹, 房毅. 某型潜艇尾流自导鱼雷命中概 率方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2015, 35(3): 132-136.

[7] 翟朔, 刘志华. 局部等厚度的共翼型舵对潜艇尾流场优 化效果研究 [J]. 推进技术, 2020, 41(7):1660-1669.

[8] 翟朔, 刘志华. 艇尾共翼型舵水动力和尾流场特征的数 值计算研究 [J]. 中国造船, 2019, 60(1): 109-119.