

文章编号: 1007—7294(2003)02—0121—08

源于水动力学的潜艇尾迹非声探测 技术研究之进展

张 军, 张效慈, 赵 峰, 洪方文

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 伯努利“水丘”、开尔文尾流、涡尾迹、内波尾迹都起源于潜艇水动力学, 对于潜艇的非声探测具有重要的应用意义。本文对国内外此方面的研究与应用状况作了介绍。

关键词: 潜艇尾迹; 非声探测; 内波; 开尔文尾流; 旋涡尾迹; 分层流

中图分类号: O352 文献标识码: A

1 引 言

潜艇以其极强的隐蔽性, 成为现代战争中的极具威胁的突袭手段, 具有巨大的战略和战术威慑意义。战争中, 及时有效地发现敌方潜艇的位置、下潜深度、航速及航行姿态等特征参数, 是建立反潜作战系统(ASW)的先决条件之一。目前, 声学方法仍是探测潜艇的主要手段。但随着降噪技术的发展, 在海洋 200—300m 的深度, 要发现潜艇变得十分困难。此外, 潜艇进入海洋跃层之下, 探潜声呐的声波会发生折射, 这种“声盲区”犹如潜艇隐身的“青纱帐”。因此, 传统的声学探测方法的应用也具有相当的局限性。适应现代化水下战场军事对抗形势的要求, 发展立体化的, 涉及太空、空中、海面、水下和海底的多层空间的潜艇探测系统是大势所趋^[1]。事实上, 对潜艇的探测, 美国等西方发达国家早在 30 多年前就已经重视并开展多种探测手段的研究。

潜艇自身壳体及潜艇的热尾迹、气泡尾迹、电磁扰动、以及水动力学尾迹, 都可以被用作潜艇探测的信号源。利用激光雷达直接探测壳体; 利用红外线探测仪探测潜艇热尾迹; 利用电磁仪测量潜艇的磁尾迹; 利用声、光方法针对气泡尾迹可进行鱼雷制导。利用水动力学尾迹同样可以检测、识别、定位和跟踪水下潜艇。其中, 水动力学尾迹又包括: 伯努利“水丘”、开尔文尾流、涡尾迹、内波尾迹、湍流尾迹等。这些尾迹相互联系, 各有特点, 都可以采用各种机载、星载雷达等遥感遥测手段进行探测。下文分别作一些介绍。

在上世纪 70 年代, 针对前苏联的潜艇, 美国就开始了利用机载 SAR 及星载 SAR 进行海上试验, 获取各种海况下潜艇尾迹的表现特征, 建立目标特征数据库。根据推测, 在 90 年代初, 美国就完成了技术可行性试验。目前, 大多美国侦察情报卫星与侦察机都载有 SAR。与此同时, 美国一直在深入进行潜艇尾迹的生成机制及其反演技术研究。

潜艇尾迹与水面舰艇尾迹两者在形成机理、表现特征及探测方法上都具有很多相同或相似之处。只不过, 潜艇由于其下潜深度大, 在水面上的表现特征相对弱小。当然, 潜艇尾迹探测的技术难度更大, 军事意义也更大。另一方面, 由于军事保密方面的原因, 关于潜艇尾迹探测的文献、图片要少得多。本文在表达上也引用了部分水面舰艇尾迹及其探测的资料。

收稿日期: 2002—07—03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172059); 水动力学国家级重点实验室基金资助项目(514430501JW0301);
中国舰船研究院青年科技基金资助项目(01QJ02)

作者简介: 张 军(1967—), 男, 博士, 中国船舶科学研究中心高级工程师。

2 源于水动力学的潜艇非声探测方法

下文分别介绍了伯努利“水丘”、开尔文尾流、旋涡尾迹、内波尾迹及其探测应用。

2.1 伯努利效应

潜艇运动产生的近场表面波，引起潜艇上方水面隆起，也称为“伯努利水丘”。其波高取决于潜艇的速度与下潜深度。表 1 给出 Ohio 级潜艇的水面隆起高度的数值计算结果。从中可见，可以通过降低速度或增加下潜深度，来减小潜艇水面隆起高度^[2]。

2.2 开尔文尾迹

潜艇水下运动，远场水面依然存在着由横波和散波组成的、包络在 19.5°的夹角内的 Kelving 尾迹。潜艇远场最大波高的计算结果^[2] 见表 2。

表 1 潜艇近场水面隆起高度与速度、下潜深度的关系

Tab. 1 “Water hill” height at near field of submarine via its velocity and depth

下潜深度 (m)	速度 (knots)	隆起高度 (cm)
30	5	1.1
	12	6.5
	20	19.0
100	5	0.10
	12	0.59
	20	1.60
300	5	0.01
	12	0.07
	20	0.18

表 2 Ohio 级潜艇远场最大波高
Tab. 2 Wave height at far field of Ohio
— class submarine

单位: cm

深度 (m)	速度 (knots)	下游距离 (m)		
		100	500	10000
30	5	0	0	0
	12	0.13	0.10	0.02
	20	12.0	8.3	2.0
100	5	0	0	0
	12	0.001	0.001	0.0001
	20	1.9	1.3	0.32
300	5	0	0	0
	12	0	0	0
	20	0.02	0.01	0.003

很明显，潜艇越小，则表面效果越弱。但即使是一个小潜艇，在近水面加速也可以引起水面相当大的干扰。

与风生重力波的效果相比，上述潜艇干扰产生的表面效果无疑是比较小的。风生表面波可以引起雷达后散射特性的变化。随着计算机等技术的发展，通过对一系列气象数据分析，风生表面波已经可以识别。在此基础上进一步发展，潜艇 Kelvin 尾迹也可以识别。

图 1(a) 是海洋卫星 SAR 在西欧北海南部海湾附近 (51°10′21″ N, 1°50′15″ E) 观测到的后散射局部放大图。图 1(b) 是 SAR 图像尾迹检测后的结果^[3]，其中包含了一水面舰艇的湍流尾迹和 Kelvin 尾迹 (夹角较大者)。据称，如果再能检测出横波，则可计算出其航行速度。

2.3 旋涡尾迹

潜艇航行中会产生很多旋涡，一直是非声探测的研究目标。1985 年，Sarpkaya 等的实验解释了一对旋涡由水下上升到水面所形成的沟槽。1989 年，Bernal 等对垂直涡环与水面作用进行了实验研究。1990 年，Tyvann 等找到一些关键参数及其对旋涡水面相互作用的影响。1991 年，Fish 等则发现了旋涡对水面波有一定的调制作用，改变了原有的波形，而雷达波可获取响应的图像。1992 年，Song 等观察了水平涡环与水面正撞过程，发现对应于不同强度的涡环强度，在水面产生不同的波型。

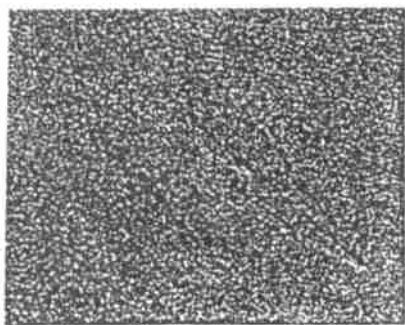


图 1(a) 海洋卫星 SAR 图像
Fig. 1(a) SEASAT image

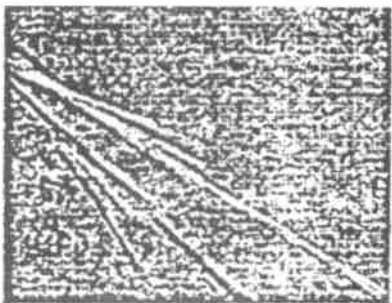


图 1(b) SAR 图像尾迹检测后的结果
Fig. 1(b) SEASA image after wake inspection

上述涡尾迹的模拟与实际潜艇运动还有一定距离。下文主要介绍潜艇操纵运动过程中的旋涡尾迹。

2. 3. 1 垂向操纵运动

潜艇通常在正浮力下运动, 为此一般要利用控制面, 产生方向向下的升力与之平衡。控制面类似于机翼, 上表面是高压, 下表面是低压, 旋涡从翼尾端泄出, 然后上升至水面。涡的水平运动速度由下式估算^[2]:

$$v_h = c \frac{\Delta B}{\rho u d w}$$

其中, ΔB 是浮力, u 是潜艇运动速度。 d 是下潜深度, w 是控制面的宽度。假使正浮力为 $1.0 \times 10^5 \text{ N}$ (相当于 Ohio 级潜艇排水量的 $1/10$), 控制面宽度为 10m , 潜艇航行速度为 $10(\text{knots})$, 潜艇下潜深度为 50m , 则旋涡的水平运动速度为 0.006m/s 。

涡的垂向运动速度是:

$$v_v = c \frac{\Delta B}{\rho u w^3}$$

对于上述情况, 涡的垂向速度达到 0.03m/s 。由此容易估算, 这种旋涡需要花费 $1.7 \times 10^3 \text{ s}$ 的时间, 才能传递到水面, 并出现在潜艇后方 8.3km 处。

2. 3. 2 回转、加速/减速运动

不难发现, 一度时期, 国际上潜艇水动力学尾迹研究的焦点从旋涡尾迹转移到内波尾迹, 其主要的原因是考虑到流体的粘性引起旋涡的耗散, 旋涡在向上传播过程中强度的削弱。最新的旋涡尾迹研究则考虑到海洋的分层特性以及潜艇操纵运动的过程。

Arizona 国立大学的研究表明, 潜艇操纵运动会产生大涡^[4]。实际上, 潜艇在其运行中会频繁加速/减速或改变方向。试验与理论研究都表明, 分层流中的潜艇操纵运动时, 加速/减速、或改变方向, 将巨大的动量传递给周围的流体, 导致异乎寻常的大涡产生(参见图 2), 远大于和不同于稳态运动时尾流中产生的旋涡, 其尺度有数公里之巨, 其衰减也需

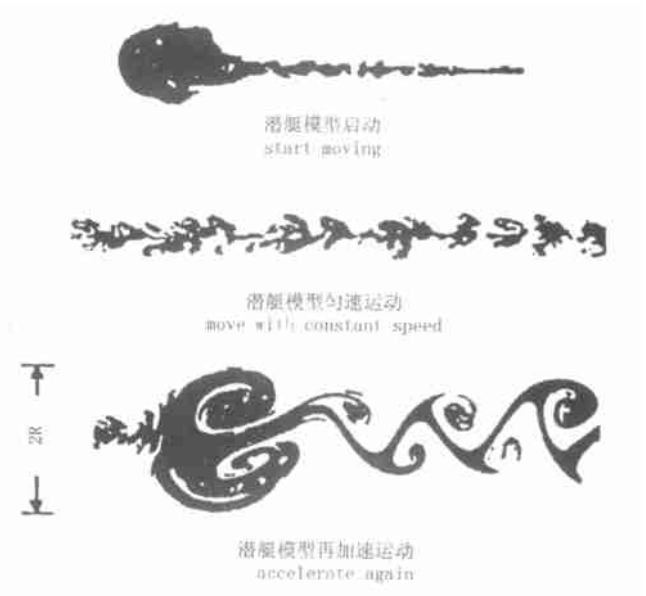


图 2 分层流体中潜艇模型操纵运动产生的涡
Fig. 2 Large eddies generated by submarine—model maneuvering in stratified fluid

要几天时间。据估计,当海洋中的潜艇速度变化 10%,或方向改变 5°时,大涡的尺度可以达到 2km,衰减的时间可以达到 2 天。

研究也表明,上层海洋中存在的垂向背景剪切层,其本身只能部分抑制涡的形成及减小衰减时间,但旋涡仍然很大。这种旋涡尾迹对于潜艇探测来说,具有重大的应用潜力,这在以前还没有人进行过研究。

该研究成果的直接应用包括两个方面:第一,探测和监视大涡作为潜艇尾流中的特征信号;第二,减小潜艇尾迹,控制大涡的生成。

2.4 内波尾迹研究与应用

1978 年,海洋卫星 Seasat 利用波长为 23cm 的 L-band SAR 监视某一海域,从监视图像中判读出舰艇尾部拖出的长达 24km 的暗线^[5]。分析表明,这种暗线绝对不是水面舰艇的 Kelvin 波,因为 Kelvin 波不可能延伸数十公里,而且 Kelvin 波夹角也不可能如此之小(参见图 3)。这种尾迹的形成原因是什么?

经研究发现,这是水面舰艇的内波尾迹。此后,美国 ONR 每年都资助舰船内波尾迹水动力学研究。目前,国际上对于潜艇水动力学尾迹的研究,其力量主要投入在内波尾迹上。

2.4.1 舰艇内波的基础研究

实际海洋是密度、温度和盐度分层的流体,潜艇航行在其中会产生内波。内波也称为重力内波。主要通过实验室模拟、海洋实测^[5,6]和理论分析^[7-9]、数值模拟^[10-13]来研究。实验室试验设备主要是拖曳(或循环)分层水槽,主要测试手段有:流动显示、PIV 技术、纹影仪、波高仪、高分辨率相干雷达、X 射线和高频声纳等^[14]。

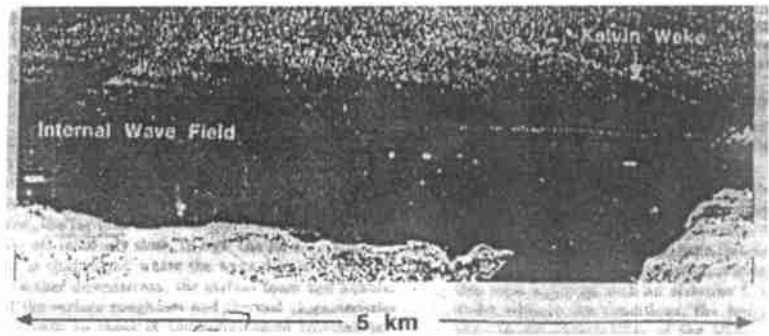


图 3 X-Band 机载 SAR 图像(入射角 25°, Canada)
Fig. 3 Ship-generated internal waves imaged by an airborne X-Band SAR
(operating at an incidence angle of 25 degrees)

2.4.1.1 理论研究

1970 年 Keller & Munk 进行了分层流体中物体生成的内波尾迹的理论研究,给出了任意色散介质中运动源生成的尾流方程式。根据色散关系式,给出了尾流的远场和近场的运动学几何图案。在长波和短波近似下,得到了波峰线方程。

1971 年 Miles 利用小扰动假设、Boussinesq 近似和薄船近似,计算了源致内波的远场。
1986 年, Hughes 研究了表面船生成的表面尾迹和内波尾迹,并提供了内波尾迹的形式。这是“死水”问题的一个研究。

1990 年, Tulin 等人进行了超临界情况下浅跃层的船内波研究。这是对“死水”问题的又一理论研究,这一理论提供了分层流体中运动物体近场与远场的运动学图案及由船致内波的振幅谱表示内波振幅的理论方法。

2.4.1.2 数值研究

1983 年 Shaman & Wurtele 利用直接的数值模拟方法计算了分层流体中由表面压力扰动生成的内波场。

对直线航行舰船内波尾迹,一般基于两条基本假设将 NS 方程作 Boussinesq 线性化,即:第一、舰艇

为细长体;第二、沿正 x 轴运动的舰艇速度远大于内波的最大群速。Lardan 的研究表明,水面波和内波的传播特性基本上不会产生耦合作用^[2],即内波的水面边界条件可以不考虑水面波的影响。

计算中将尾迹分成近场和远场,近场范围大体与舰艇宽度或直径相当,此外流动与分层无关,内波幅度最大。计算方法采用 Green 函数。

1993 年, Tuck. E. O 的数值计算表明,在典型的潜艇运动条件下,所产生的重力内波在水面所形成的干扰比较小,速度量级在每秒几个厘米,在水面上垂向扰动速度基本上为零。尽管其量很小,但速度交替变化具有一定的规律性。其特定的形态,仍然可以被观测到^[12, 17]。

E. Avtital 数值预报的 V 形波相线与实验观察的相一致。其研究结论为:对于温跃内波,长内波与温跃层厚度无关,短内波与温跃层深度无关。航速越大, V 形内波夹角越小, V 形顶点离船尾越远^[18]。

2000 年 M. P. Tulin 等的研究认为,内波是一种带旋涡的耗散波。研究表明,内波在远场是非线性传播,典型的线性内波速度为 $30-70\text{cm/s}$,甚至可达 250cm/s ^[19]。此外,在距船体中心约 2 倍船长处呈现中央叶瓣,深槽叶瓣传向船后约 40 倍船长,缓慢衰减,造成大量的水面流动。

2.4.1.3 实验室研究

1985 年 Gilbeach 等人在 Johns Hopkins 大学应用物理实验室进行了分层流体中螺旋桨推进自航体的内波生成实验。研究表明,在物体长度尺度小于分层特征长度尺度情况下,在尾流中短随机内波与湍流发生强烈的耦合;在强分层的条件下,非线性强烈地影响尾迹中内波的传播,从而导致内孤立波的生成^[15]。

1993 年 Chomaz 等人进行了均匀流体和分层流体中运动球体的尾流结构实验。

美籍华人吴京对潜艇内波的研究证实了,分层流中内波的传播是三维、非各向同性和耗散的。垂向破碎的混合流体团是内波产生的有效来源^[9]。混合流体破碎是内波产生的首要源泉。艇体对流场的影响和尾流破碎是生成内波的两个方面。重力迫使混合流体团恢复到它自身密度所处的水平。

2.4.2 舰艇内波与海洋学内波

舰艇内波与海洋学内波是两种性质不同的内波,海洋学内波成为潜艇运动的一种外部环境。

海洋学内波是海底地貌、海洋暖流、海中固定障碍物等产生的内波。与舰艇内波相比,海洋学内波有明显不同的特点。第一是范围相当广;第二是出现区域相对固定,相对“静态”;第三是内波所含的能量比较大,相对“巨型”。海洋学内波既要研究特定类型内波性质(生成、演变和衰减),又要对海洋内波场进行统计分析。目前,海洋学内波的研究,包括间断分层介质中的内孤立波等非线性内波的研究,可谓成果累累。

2.4.3 SAR 探测内波尾迹的机制

SAR 是一种合成孔径雷达。由于微波能穿透云层,甚至雨雾对它的影响也很小,因而 SAR 可用于全天候观察。电磁微波穿越水面的深度不会超过其波长的一半。当用于探测船尾迹的电磁频率波长为 23cm 时,电磁波能量穿入水面不会超过 12cm 。SAR 的一幅图像覆盖范围可以达到 1000km^2 。通过多个星载 SAR 的不间断扫描,就可以实时监测全球范围内海洋舰艇的活动。

Reed(1990 年)等人对表面船波遥感动力学进行了研究,船引起的表面毛细波^[5]和微尺度重力波的调制由 SAR 来检测,给出了理论和数值预报相一致的结果。

根据目前的认知水平, SAR 探测具有三种调制机理^[20],即:流力调制—流体力作用、倾斜调制—电磁力作用和速度调制—运动作用。其中,速度调制是其它雷达成像所不具备的。

内波在密度—温度界面处水下传播,并引发了海面水面流动,调制了水面水波的图像,影响了入射微波的水面后散射性质,引起 SAR 图像的明显像变,从而可以为合成孔径雷达 SAR 所探测。SAR 的微波向后散射能力极强,目前最高空间分辨率达到 0.3m ,瞬间采样可达 0.006s ,对水面曲率和水面糙度非常敏感。

海面上对内波图像干扰最大的是阵风。SAR 灵敏度取决于雷达的波频,调到低风速档位, SAR 就能感知到舰艇产生的内波。

改变盐度、水温、水面泡沫和水面活性材料会改变水面流动,从而影响内波尾迹特性。水面泡沫和水面活性材料的存在都会影响尾迹表面的后散射性能^[5, 17]。

舰艇内波尾迹特征与 SAR 雷达图像关系的研究仍在进行之中^[13, 14]。

2. 4. 4 舰艇内波尾迹的海洋实测

据称,美国曾利用内波讯号探测到在 300m 水深下航行的前苏联潜艇。由于高度的军事保密性,潜艇实艇尾迹探测方面有价值的资料很难见到,而关于水面舰艇探测的文章公开发表的已有很多。

美国 1983 年 7 月在 Georgia Bay 海湾专门进行船生内波海上试验,明显发现内波尾迹亮窄 V 形的特点是比 Kelvin 尾迹窄^[21]。

资料分析表明,水面舰艇内波尾迹 SAR 图像的特点是: V 形窄亮线加上暗中央尾线。最长内波尾迹已延伸到船后 100km^[5]。温跃引起的内波尾迹可以在舰艇路径上存在 1 小时以上。密跃内波的最大速度一般比舰速小得多。Kelvin 波夹角的一半约为 20°,而内波 V 形线夹角的一半一般为 2~8°,而且这种亮 V 线有时可能只出现在船的一侧。据观察,近船尾处尾迹很窄,由高频扰动分量组成,横断面由三叶瓣组成,中间是升高的叶瓣,两侧是下降的叶瓣^[19],详见图 4。

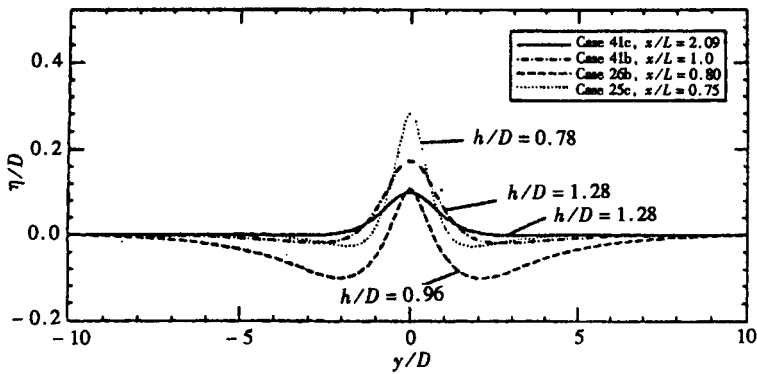


图 4 紧贴船尾内波尾迹的三叶瓣形
Fig. 4 Internal wave wake near ship stem

据美国泰勒水池和密执安大学的研究报道,现阶段从舰载、机载或星载的合成孔径雷达监测以水面起伏为主要信息的海洋表面,可以捕捉到大型水面舰船的亮 V 型尾流和暗中心线,而且可以区分船型、航行状态。

图 5 为卫星 ERS2 载 SAR 获取的潜艇尾迹图像(白色方框内)^[19]。经分析,尾迹夹角约为 15°,潜艇航行速度约在 3 节左右。

2. 4. 5 内波在潜艇其它探测方法上的应用

此外,潜艇在海洋中运动产生的内波会与声波相互作用,从而改变声学特征,使潜艇深控装置无法确定潜艇的下潜深度。而通过对运动潜艇产生的内波的探测却可能判断潜艇的存在和所处位置。据报道,俄罗斯潜艇上已经装备了可用于探测水下潜艇航行尾迹的传感器。

T. Sarpkaya 等进行了线性分层下的潜艇模型自航试验研究^[22]。其研究表明,尾流塌陷(在下游 400 倍直径处)引起电导率变化率的大幅增加,所引起磁场的变化足以探测,从而有望为潜艇的磁探测提供了又一条技术途径。

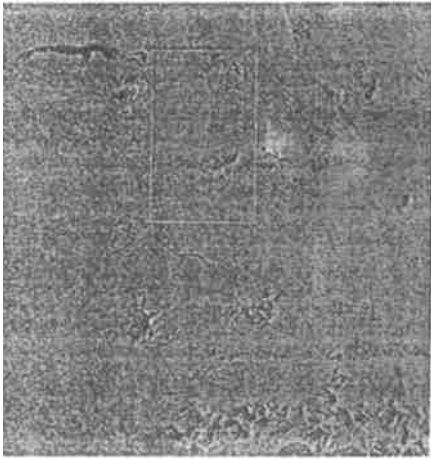


图 5 星载 SAR 获得的潜艇尾迹图像
Fig. 5 Submarine wake imaged by satellite SAR

3 国内在潜艇水动力学尾迹探测方面的研究

我国在此领域的研究工作已有十多年了。早在“八五”初期,中国船舶科学研究程贯一教授就率先在国内跟踪国际最新动态,对潜体近场尾流场进行过开创性理论和数值研究,并采用潜艇自航模型在水池进行水表面旋涡尾迹试验,拍摄出许多旋涡图像。与国外三角翼或其它人造涡装置相比,所模拟的旋涡尾迹更接近于实际潜艇。

1999年,中国船舶科学研究程贯一教授建立了 $5\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的分层水槽试验系统,并进行了分层流体中水下潜艇的内波增阻试验研究^[23]。试验表明,在分层流体中在内付氏数为 $0.58 \sim 0.65$ 之间确有内波的产生(图6),且引起内波增阻,最大可达19%。

目前,中国船舶科学研究中心和兄弟单位正进行分层流体中运动潜体内波生成机理及其在洋面上表现特征的探索研究^[24]。

中国船舶科学研究程贯一教授是国内从事船舶及水中兵器水动力研究的重要基地,拥有大、中型深水拖曳水池、露天水池、大型循环水槽和分层水槽系统,以及LDV、PIV、HWA等先进测试技术。这为潜艇内波尾迹的实验室研究提供了良好条件。此外,她还长期从事舰艇流场的理论及数值计算研究,其技术积累也为潜艇内波尾迹的理论及数值分析研究打下了基础。

90年代初,中国科技大学曾利用VOF方法数值研究了旋涡与自由面的相互作用;并采用Rankine卵形体模拟潜艇,数值模拟了两层流体中运动物体与自由面的相互作用;并针对水-盐水和柴油-盐水两种分层,进行了球体拖曳试验,观测了自由面及密度突跃层的变形特征。

青岛海洋大学和上海大学等都比较早地开展了海洋学内波的研究,包括间断分层中的内孤立波和连续分层的温跃层内波。近年来,青岛海洋大学又开展了海浪谱的SAR观测及其反演的理论与数值方法研究。

天津大学曾应用Laplace变换方法和基元波叠加的概念对两层流体中孤立点源和细长潜体的不定常兴波问题进行了探讨。

复旦大学、北京理工大学等单位都开展了SAR图像的处理与目标识别的研究。中国科学院电子所等单位也将潜艇尾迹探测纳入未来SAR的应用方向之一。

4 结 语

潜艇的水动力学尾迹与海浪相比比较小,但潜艇尾迹能否被探测主要看其能否调制洋面流动图像,能否调制海面的毛细波。

从前文可见,潜艇的伯努利效应及Kelvin尾迹的水面波高与风生表面波相比的确比较小,但仍具有被探测的可能。而利用潜艇内波尾迹或潜艇加/减速或回转操纵运动产生的大涡尾迹,借助于现代遥感技术,潜艇的非声探测在技术上是可行的。美国已经将其应用于海洋军事情报的侦察中。这应该是今后我国研究的重点。

研究内容主要包括:分层流中运动物体内波的生成与垂向传播机理;内波或旋涡与自由面相互作用机制及其在水面上表现特征;水下目标水面尾迹遥感探测机理;水下目标与尾迹特征相互关系。在具备一定的基础后,再进一步开展潜艇海洋遥感探测与隐身技术研究。

总之,潜艇水动力学尾迹的非声探测技术研究是一项大的系统工程,前景非常诱人,需要潜艇水动力学、海洋学、遥感技术多学科交叉、紧密协作和联合攻关。

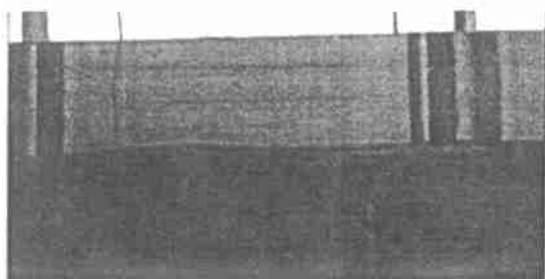


图6 水下回转体运动产生的内波

Fig. 6 Internal waves generated by submarine model

参 考 文 献:

- [1] Robey N F. Resonant interaction of a submarine's wake with a stratified fluid[R] .AD—A273/046/3/xad, 1999.
- [2] Daly D G. A limited analysis of some non—acoustic anti—submarine warfare system[R] . AD—A281 747, 1994.
- [3] 金亚秋 . 环境杂波与军事海洋高科技信息技术[J] . 遥感技术, 2000(4).
- [4] Lillberg E, Alin N, Fureby C. A computational study of wakes behind submarines and surface ships[Z] . Defence research establishment weapons and protection division, SE—147 25Tumba, Swden, 2000.
- [5] Reed A M, et al. Hydrodynamics of remotely sensed surface ship wakes[J] . SNAME Transactions, 1990, 98 :319—363.
- [6] Bonneton P. Internal waves produced by the turbulent wake of a sphere moving horizontally in stratified fluid[J] . JFM, 1994, 254 : 23—40.
- [7] 朱 勇 . 分层流体中混合流体团运动生成内波的研究现状[J] . 力学进展, 1993, 23(1) :34—41.
- [8] Koop C G, et al. An investigation of internal solitary waves in a two—fluid system[J] . JFM, 1981, 112 :225—251.
- [9] Keller J B, et al. Internal wave wakes of a body in a stratified fluid[J] . The Physics of Fluids, 1970, 3(6) :1425—1431.
- [10] Robey N F. The generation of internal waves by a towed sphere and its wake in a thermocline[J] . Phys Fluids, 1997, 9(11) : 3353—3367.
- [11] Hanazaki H. On the three—dimensional internal waves excited by topography in the flow of a stratified fluid[J] . JFM, 1994, 263 :293—318.
- [12] Hanazaki H. Upstream advancing columnar disturbance in two—dimensional stratified flow of finite depth[J] . Phys Fluids, 1989, A1(12) :1976—1987.
- [13] 沈国光, 王日新 . 两层流体中潜体的不定常兴波运动[A] . 第十三届全国水动力学研讨会文集[C] , 1999.
- [14] Coakley D B, Haldeman P M, et al. Electromagnetic scattering from large steady breaking waves[J] . Experiments in Fluids, 2001, 30 :479—487.
- [15] Tick E O. Submarine internal waves[R] . AD—A264 080, 1993.
- [16] 马晖杨, 麻柏坤, 张人杰 . 分层流体中物体运动尾迹的理论实验研究[J] . 中国科学技术大学学报, 2000, 30(6).
- [17] Gilheath H E, et al. Experiments on the generation of internal waves in a stratified fluid, AIAA[J] . 1985, 23(5) :693—700.
- [18] Avital E. On an inverse problem of ship—induced waves[J] . Ocean Eng, 1999, 26 :99—110.
- [19] Tulin M P, et al. The generation and propagation of ship internal waves in a generally stratified ocean at high densimetric Froude numbers[J] . JSR, 2000, 44(3) :197—227.
- [20] 曾 侃 . 卫星 SAR 反演海浪方向谱[D] . 青岛: 青岛海洋大学硕士论文, 1998.
- [21] Avital E, et al. On the determination of density profiles in stratified seas from kinematical patterns of ship—induced waves[J] . JSR, 1994, 38(4) :308—318.
- [22] Sarpkara T, Massidda T. Conductivity measurements in the wake of submerged bodies in density—stratified media[A] . The 21th Naval Hydrodynamics[C] , 1998.
- [23] 张 军, 赵 峰等 . 分层流体中水下回转体内波增阻试验[R] . 中国船舶科学研究中心科技报告, 2001.

Progress of Investigation on Non—acoustic Detection for Submarine Wake Originated from Naval Hydrodynamics

ZHANG Jun, ZHANG Xiao—ci, ZHAO Feng, HONG Fang—wen
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract : The Bernoulli hump, Kelvin wake, vortex wake and internal wave wake, etc. are generated, as the submarine moves in the ocean. These wake signatures may be used in remote sensing of submarine. The progress of researches on non—acoustic detection for submarine wake is presented in the paper.

Key words : submarine wake ; non—acoustic detection ; internal wave ; Kelvin wake ; stratified fluid ; vortex wake