



LW006880

# **The development and measurement of ship wake optical specialty**

**Zhang Jiansheng**

**Submitted for the Degree of**

**Doctor of Philosophy**

**Directed by Professor**

**Chen Liangyi**

**Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics**

**Academia Sinica**



**June 2001**

## 前 言

近几十年来，随着科学技术的飞速发展，现代战争敌对双方使用的不再是技术含量较低的武器，而是技术含量很高的智能型武器。这种武器不但可以自动跟踪、自动寻的，而且可以识别目标的类别、识别目标要害部位，精确导引，准确摧毁目标。因此，现代战争、特别是局部战争必将是一场高技术领域的战争，九十年代以来的海湾战争、科索沃战争已经充分印证了这一点。在这两场战争中，精确制导武器的广泛使用大大加快了战争的进程，并取得了赫赫战绩。战争的实践表明，在现代高技术战争中，精确制导武器的占有和使用在很大程度上决定着战争的进程和胜负。

被称为水下导弹的鱼雷是海军的主战武器之一，精确制导技术在鱼雷上的应用无疑是非常重要的，对于未来海战、特别是高技术条件下的局部战争的主动权和胜负必然起着决定性作用。

虽然鱼雷与导弹有许多相似之处，但两者也有着质的区别，主要表现在两个方面：

- a)使用的物理场不同。导弹使用的是电磁波或光波，而鱼雷使用的是超声波；
- b)使用的环境不同。导弹一般在大气层中飞行，信息的传播介质是空气，而鱼雷一般在水下航行，信息的传播介质是海水。

鱼雷的制导技术主要集中在自导系统和控制系统。就自导系统而言，我国现役的和在研鱼雷主要采用主动自导、被动自导、主/被动联合自导、尾流自导及线导；在控制方面，主要采用的是驾驶仪、气动陀螺和挠性陀螺。这些还远达不到精确制导的要求。

在鱼雷自导研究方面，突破现有的鱼雷自导作用距离及目标识别与反对抗是两个关键方面。提高鱼雷自导作用距离，需从现有水声基阵形式及阵列信号处理方面进行创新研究，同时发展新的探测场，这是提高鱼雷自导作用距离的重要方面。目标识别技术的研究主要涵盖了特征提

取和信息综合，这是提高目标识别能力的两个重要方面。

近几年，我国在自导方面进行了底视基阵、上视基阵及旁视基阵的研究，控制方面正在研究捷联式惯导系统及激光陀螺在鱼雷上的应用，并取得了一些预研成果，这些成果距产品化还有一些距离，当然更谈不上精确制导了。

精确制导技术是精确制导鱼雷的关键技术，主要包括目标探测、分类、识别技术、控制技术、信息处理技术、反对抗技术、弹道设计及优化技术、作战袭用研究等多个方面。就鱼雷武器而言，为了使其发展适应打赢一场现代条件下特别是高技术条件下的局部战争的战略要求，作为精确制导武器的核心，精确制导技术的发展和中带内主要包括以下几个方面：

- a) 总体技术研究。主要包括目标特性研究、作战环境研究、仿真技术研究、自动测试技术研究、最优弹道设计技术以及评估技术的研究，总体技术是精确制导技术进一步深入研究的基础。没有大量的、可靠的数据和手段，就无法保证研究工作的深入及发展乃至成功。
- b) 信息处理技术研究。包括目标的分类及识别技术、反对抗技术、信息融合技术及先进的信息处理平台的开发和研究。精确制导是针对被攻击目标的某一特征而言的，如果不能对目标进行准确的分类以及对其特征进行识别，反对抗技术就无从谈起、精确制导技术就无从谈起。所以目标的分类以及识别技术非常重要，它也是精确制导的基础。
- c) 先进控制技术研究。包括远航程、高精度、快反应(启动速度快)控制技术，高精度、大容量、低误码线导技术，以及先进伺服技术和智能控制技术等。
- d) 末制导技术研究。包括部阵技术、末弹道设计技术及定向爆破技术等。
- e) 关键元器件和先进材料技术。包括先进信号处理芯片、大功率器件、高精度长寿命小型陀螺及先进压电材料和信号传输材料等。

世界上一些发达国家投入了大量的人力、物力进行鱼雷精确制导技术的研究,并且在型号上有所使用,如美国的 MK48ADCAP、MK48-6、法国的“海鳗”、意大利的 MU90 鱼雷等等,都具有较好的目标识别和精确制导能力,美国已在研制大于 100km 航程的光纤制导鱼雷,意大利近期已完成了 100km 光纤线导鱼雷的试验。从这些情况来看,在精确制导技术的研究方面,发达国家已比我们领先了一步。

用尾流的声学特性(尤其是声散射和声吸收)与周围海水介质的声学特性存在的差异来导引鱼雷去跟踪、命中目标是尾流自导通常采用的方法。与声波比较,光波的波长小许多数量级,在水中的衰减要比声波大的多,即使在传播损失最小的蓝-绿通道,光波在海水中的传播距离也很难超过 200m,但正是这一点决定了光波对传播介质变化的感知比声波灵敏的多。

基于尾流光学特性的自导鱼雷是国外秘密研究的最先进的武器之一,但未见实际应用的报道。光尾流自导鱼雷摆脱了常规的声场以光波作为探测目标的手段,使得尾流自导的作用距离大幅度地提高,使常规的声学干扰和对抗手段失去作用,也使鱼雷自噪声的干扰大大减小。而且,利用尾流的光学特性,不但可以探测尾流较强的水面舰船,也可以用来探测尾流较弱的潜艇目标,这是尾流的声探测所达不到的。

就物理场而言,尾流具有声学特性、光学特性、磁特性以及热特性等。舰船尾流的这些物理特性,是进行尾流探测、跟踪和识别的基础。本文“尾流的光学特性研究与测量”,主要在实验室对气泡模拟器产生之气泡、气泡幕的光学特性进行研究与测量,为光尾流自导的可行性方案研究提供可靠的实验数据及实验基础。

## 摘 要

关于尾流的直接文献基于军事秘密而极少见到。国外从二战以来就对尾流的特性着手进行研究，但研究内容主要是尾流的声学特性、尾流的几何特性、尾流中气泡形成和溶解及其在尾流声学特性中所起的作用等。

本文对舰船尾流具有的多种特性进行了概括和总结，同时，为了便于将尾流的光学特性从横向与声学特性进行比较，对尾流气泡幕的声学理论进行了详细的描述。在此基础上，对光在水中的特性、水对光的散射中气泡的影响等内容较为细致的阐述。目的是希望为该研究方向的可能读者提供一个较为完整的参考资料，也便于将光通过纯净水、海水、尾流气泡幕的特性做出对比，并在比较中促进该研究方向的成长和发展。

为了系统地完成研究内容，利用高速摄影技术对实验室模拟的尾流气泡幕进行了研究，初步掌握气泡的运动和动力学规律，并对水中气泡的分布得出了粗略的认识。

关于尾流光学特性的研究，分为两个阶段进行了实验研究。第一阶段是在实验室对气泡模拟器产生的气泡幕进行定量研究，实验使用自行设计、组装的实验系统；第二阶段是对真实尾流的光学特性进行研究，并自行设计了适合于水下测试的实验系统。

在第一阶段实验的基础上，建立了激光通过气泡幕散射的物理模型，并利用模型进行了相应的计算。经与实验结果比较，证实所建立的理论模型可定量描述实验结果，同时还说明了理论结果与实验结果存在一定的差异，并对差异的原由提出了初步看法。

本文的特点以及创新点主要表现在以下四个方面：

- (1) “尾流光学特性的研究与测量”属国内首次研究课题。
- (2) 在课题进行过程中，对大量有关文献做了整理和总结，首次将舰船尾流的多种特性进行了阐述，并对尾流气泡幕的声学特性、气泡的运动及动力学规律给出了较为系统的说明。
- (3) 在实验室研究的基础上，提出了尾流气泡幕光散射特性的物理模型，

经与实验结果对比分析，证实该理论模型在对尾流气泡幕光学特性的研究中是合理、适用的。

(4) 自行设计了用于实验室和真实尾流光学特性研究的实验系统，实际使用的结果表明，所设计的实验系统是可靠的，并能够满足实验要求。

**关键词：**尾流，气泡，气泡幕，光学特性，照度，散射

## ABSTRACT

There is few direct reference on ship wakes duo to military secrets. The characteristics of ship wakes have been studied from the Second Word War in other countries where the main research is focused on the acoustic and geometrical specialty, along with the formation and dissolution of bubbles in wakes. The action of bubbles in wake acoustics is another subject investigated.

In this present paper different properties of ship wakes are discussed and summarized. The acoustic theory of bubble film in wakes is described in detail in order to compare with wake optical properties conveniently. In addition, light transmission through water and influence of bubbles on scattering of light in the ocean and etc are mentioned in greater detail too. All as mentioned above is focused on providing an intact reference for possible readers to a certain degree, and comparing the light specialty through pure water and sea water and bubble film conveniently. By the comparison, the research growth and development will be accelerated.

To accomplish the study items systematically, high-speed photographic technology is used in researching the bubble film. Kinematics and dynamics of bubbles or bubble film are estimated, distribution of bubble in water is roughly cognized.

The optical specialty of ship wakes is investigated in two steps: firstly, investigation, on the bubble film produced by bubble worker, is taken with the scheme designed by ourselves in laboratory; secondly, investigation on the real wakes in situ is made with the under water system made.

Based on the experiment of first step, physical model for light scattered by film of bubbles is established and related calculation is made. Comparison with the results of experiment gives that the model is applicable and has definite error discussed in the paper.

The main research work and the creative ideas in this thesis are as follows:

(1) “The development and measurement of ship wake optical specialty” is the first-time task in the country.

(2) During studying lots of references is obtained and fixed, different specialties are discussed for the first time. The acoustics of bubble film and kinematics and dynamics of bubbles are made out systematically.

(3) Physical model for light scattered by film of bubbles is established and related calculation is made based on the first step laboratory investigation, and the rationality is supported by comparing with experiments.

(4) Schemes for lab and detecting real wakes underwater, used in practice and approved to be reliable, are designed and manufactured by ourselves.

**KEYWORDS:** Wake, Bubble, Film of bubble, Optical specialty, Illumination, scattering

# 目 录

前言

摘要

ABSTRACT

<b>第一章 尾流概述</b> .....	1
1.1 概述.....	1
1.1.1 尾流概念.....	1
1.1.2 尾流对于海军的重要性.....	2
1.1.3 声学尾流研究的目的.....	3
1.2 尾流中气泡的形成与分解.....	4
1.2.1 空化形成的气泡.....	4
1.2.1.1 螺旋桨的空化机制.....	4
1.2.1.2 气泡的扩张和收缩.....	5
1.2.2 尾流中气泡所受浮力和上升速度.....	6
1.2.3 连带的空气.....	7
1.3 尾流的速度和温度场.....	8
1.3.1 尾流的速度场.....	8
1.3.2 尾流的温度场.....	9
1.3.3 温度和速度场引起的散射.....	11
1.3.3.1 温度场的效应.....	13
1.3.3.2 速度场的效应.....	15
1.4 尾流的几何特性.....	15
<b>第二章 气泡的声学理论</b> .....	20
2.1 单个理想气泡的散射.....	20
2.2 实际气泡的散射和吸收.....	27
2.2.1 衰减系数的测量.....	34
2.3 含有很多气泡的液体中声波的传播.....	34

2.3.1 一般理论	35
2.3.2 透射	36
2.3.3 散射	40
2.3.4 反射和折射	44
2.3.5 气泡声学效应的观测结果	46
<b>第三章 气泡运动规律及其高速摄影技术研究</b>	<b>52</b>
3.1 海水中气泡的密度	52
3.2 气泡的动力和运动学	53
3.2.1 气泡的一般运动规律	53
3.2.2 流体力学对气泡上升速度的求解	54
3.2.2.1 一般小气泡的末速度	54
3.2.2.2 中等大小气泡的附加运动	56
3.2.2.3 大气泡的理论	56
3.3 气泡输运方程	59
3.3.1 气泡输运方程的提出	59
3.3.2 气泡输运方程的特征解	62
3.3.3 单个气泡的运动学	63
3.3.3.1 气泡的加速度	64
3.3.3.2 气泡在水中所受的阻力	64
3.3.3.3 半径变化率	65
3.3.3.4 气体扩散	66
3.3.4 气泡输运方程的运用	67
3.3.4.1 特征曲线	68
3.3.4.2 气泡分布	71
3.3.4.3 计算实例	72
3.4 高速摄影技术对于气泡的研究	76
3.4.1 实验装置及实验条件	76
3.4.2 实验结果	77
3.4.2.1 同一气体压强下气泡的特征及其运动规律	78

7.1 实验系统简介	140
7.2 激光通过实验室模拟尾流的衰减特性	141
7.2.1 无气泡幕时激光的衰减特性	143
7.2.2 不同气体压强下激光透射光的照度	145
7.2.3 有气泡幕与无气泡幕时透射激光的照度随时间变化特性	146
7.3 He-Ne 激光通过模拟尾流气泡幕的散射特性	147
7.3.1 无水池时前向散射光照度	147
7.3.2 水池无水时前向散射光照度	150
7.3.3 水池静水时前向散射光照度	152
7.3.4 不同气体压强下通过气泡幕的前向散射	154
7.3.5 不同气体压强下散射光照度的变化	158
<b>第八章 真实尾流光学特性的研究与测量</b>	<b>164</b>
8.1 水下实验系统的设计	164
8.2 尾流的外貌特征	165
8.3 尾流中激光的透射特性	167
8.3.1 不同航速下尾流不同几何位置激光的透射特性	167
8.3.2 尾流深度的估计	170
8.4 分析讨论	171
<b>结语：研究项目的总结与展望</b>	<b>173</b>
<b>参考文献</b>	<b>175</b>
<b>发表论文</b>	<b>181</b>
<b>致谢</b>	<b>182</b>

# 第一章 尾流概述

## 1.1 概述

### 1.1.1 尾流概念

舰船在航行过程中，由于螺旋桨的旋转产生空化、海面的波浪破碎、以及从吃水线部分大量空气的卷入，在舰船尾部的海水中形成的一条含有大量气泡的气泡幕带，就是通常所说的尾流。因为尾流将会沿着航行方向延伸到舰船长度的很多倍，即使在船桥和桅杆顶端，对尾流的轮廓也很难有一个整体视野。

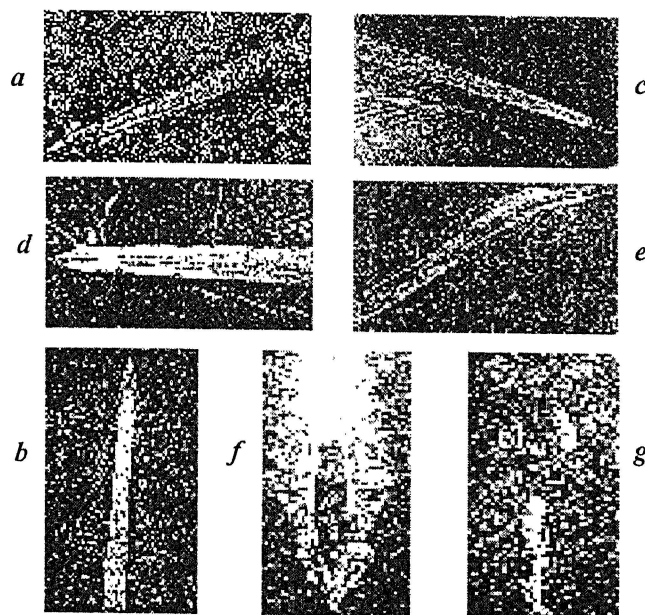


图 1-1 几种不同的尾流

图 1-1 显示了在高空观察到的尾流形态，前四个即 *a*、*b*、*c*、*d* 是在 2500-3000ft 高度、水平飞行情况下观察到的一艘驱逐舰-the USS *Moale*(DD693)-的尾流情况，驱逐舰沿直线做匀速运动，对应的速率为 16、20、25 和 33knots，其外形尺度为长 376ft、宽 41ft、吃水深度 13ft，图 1-1*e* 给出了当船转弯时产生的尾流，在弯曲部位、尤其在尾流的外侧泡沫明显地较浓，直行加速时同转弯处一样，也会增加尾流的可见强度。图 1-1*c*、*d*、*e* 中的不规则白条是偶然出现的水沫。

所有照片都显示出弓箭形波纹，并呈扇形展开，展开的角度大于实际尾流。图 1-1f 是另一艘驱逐舰-the USS *Ringgold*(DD500)-的弓箭形波纹及其从 300ft 高度拍摄尾流的近景。从直观的外观结构来看，大型船只的尾流与驱逐舰级的船只的尾流没有明显区别，这一点可从图 1-1g 看出，该图是从 4000ft 高度得到的一艘大型航空母舰-the USS *Salatoga*(CV3)-的尾流。

除了明显的泡沫和湍流特性，肉眼的直观观测不能揭示尾流的任何物理特性。尾流可能影响声能量在水中的传播，因此在研究中提出了一个新的概念即声尾流，指的是由于船只通过而改变声吸收和声散射特性的海水体积。因声尾流存在垂直方向的扩展，且通常有一个明显的边界，所以这里的“海水体积”是明确的。因为位于潜望镜深度尾流的水平扩展，从螺旋桨体带出的尾流上层在潜水艇后几百码才能够到达海面，所以水面以下、由下潜的潜水艇产生的声尾流与水面船只的尾流具有不同的声学特性。

尾流也会影响海水表层的温度分布，从而产生所谓的热尾流，通过敏感热偶可以探测到热尾流。尾流的声和热特性可持续半个小时或更长时间，通常在舰船的可视尾迹消失后很长时间，尾流仍然具有这些特性。

### 1.1.2 尾流对于海军的重要性

尾流在海战中起着重要作用，这主要体现在两个方面：首先，由于对声波的吸收和散射作用，尾流可能干扰声学设备的有效使用和操作；其次，尾流的存在可能提供一种探测、跟踪、或识别产生尾流的舰船的方法。尾流在海战中的应用也包括从空气介质的可视探测以及从水面船只或潜水艇实施的热探测，此外还包括声探测。

由尾流产生的声学影响在声纳设备的工作过程中经常出现，从潜水艇反射的错误回声会使反潜艇上的声纳操作员真假难辨，甚至会向尾流节点（当潜水艇突然加速和急转弯时产生的干扰）发起攻击，而潜水艇却可以安全逃逸。在 1944 年美国反潜舰对潜艇的 30 次攻击失败中，每一次受攻击目标都能确定，但没有杀伤目标，这其中尾流的影响占 12%左右，其余大部分是由于个别的偶然因素造成的。

水面舰只的尾流还会影响反潜战，在某一区域攻击一次或多次后，水面舰只

产生的原有尾流极有可能被掩盖。而且，较为新的尾流的吸收很强，可能使处于尾流某一侧的浅水目标被屏蔽而使位于尾流另一侧的水面舰船无法探测到它。事实上，被尾流包围的发射器几乎完全无用，因为透射出尾流的声能量极小，因此，水面舰只会经常发现在通过新尾流过程中，它的回波探测仪器会出现死机现象。

放置于岸上的探测仪器在工作过程中也会受到尾流存在的影响，如当一艘驱逐舰以中等速度通过放置于海底的超声探测器周围时，紧跟其后的船只就不能被超声探测器探测到。与此相似，暗中行驶在水面大型船只尾流中的小船，回声探测仪非常难以探测到。在攻击潜艇时，为了更有效地利用这种效应，减小其影响，必须对不同条件下尾流的反射、吸收的性质做出细致的研究。

利用尾流特性来进攻能够产生尾流的船只是一个相对新的领域。作为应用尾流的一个例子，有人提出通过探测船只尾流、然后跟踪它直到杀伤为止，按照这一思路来实施对舰艇的进攻是研究尾流性质的根本出发点。水面舰只尾流的反射声非常强、而且持续时间很长，所以声学方法可用于攻击水面敌舰，但要求对舰只在不同条件下尾流的散射和吸收特性有清楚的认识。在深水中慢速行驶潜艇尾流的散射能量非常低，所以用这一思路来进攻潜艇难度较大。

### 1.1.3 声学尾流的研究目的

声学尾流的研究主要有两个目的：一是深入研究尾流的声学特性，以论证其可能的战术应用；二是对尾流的结构和物理性质做深入的基础研究。与第一个目的比较而言，第二个问题更具有学术性。但到目前为止，因为缺少对尾流物理性质的全面认识，海战提出的很多问题仍不能得到满意的答复。因此要发展尾流在海战中的应用这样一个学科，在很长一段时间里，需要进行大量的基础研究。

尾流性质在应用中的基本问题大致依赖于声学测量，对尾流的研究尚处在起步阶段，而且所掌握的观察资料并不全面，所以无法将研究的两个目的严格区分开来，因实验数据常常与战术应用、基础研究都有关联。因此，无论在实践还是理论方面都有待于做出更深入的研究。

为了对尾流的声学性质进行测量，首先必须对声学尾流特性对尾流基本参数

的依赖关系做出合理的假设。目前已经提出了引起声波在海水中的吸收和散射效应的物理解释,吸收和散射暂时被认为是由于以下三个因素,即(1)各种不同大小的气泡;(2)海水中的小范围湍流(与舰船的尺度相比);(3)海水中小尺度范围的温度不均匀性。

声学尾流的气泡理论还没有被广泛接受,也很难将其应用于实质性实验,尽管如此,声学尾流的气泡理论仍然被大量使用,因为没有更完善的理论。气泡理论较为合乎逻辑,且能对海水中湍流、温度场并不能很好地解释的尾流声学特性提出一定根据。为了简单地说明这一理论,首先应对气泡的形成和溶解的物理机制及其声学特性进行讨论,而后简单介绍其温度和速度场。

## 1.2 尾流中气泡的形成与分解

空气可以被机械地束缚在海洋表面或者以气泡的形式被分散,最常见的一个现象就是白浪现象,大量的空气还会沿着行进中的舰船的吃水线被束缚,从帆船尾流的实验研究中发现这样被束缚的空气能够产生声学尾流。然而绝大部分气泡源于高速旋转的螺旋桨的空化作用。

### 1.2.1 空化形成的气泡

空化现象会在水中产生“空穴”,一旦在溶解有空气的水中产生了这样的空穴,空气就会通过扩散作用进入空穴,而当这些空穴瓦解时,气体便以气泡的形式存在下来。因此,水下气泡的形成过程包含两个截然不同的机制:空化机理以及气体在液体中扩散和溶解的热力学。

#### 1.2.1.1 螺旋桨的空化机制

根据流体动力学的理论,空化源于螺旋桨附近所产生的负压区,这些区域产生于螺旋桨尖端的旋涡(假设其速度超过某一临界极限),还会产生于螺旋桨叶片背面,习惯上称为尖端旋涡空化和螺旋桨叶片空化。对这些现象的理论抽象,已在水面下旋转螺旋桨的高速摄影实验中得到证实。

通过在水池中对螺旋桨旋转而产生的空化现象的实验,发现当逐渐增加螺旋桨的转速时,可观察到气泡首先在螺旋桨的尖端部位产生,并螺旋形地在尾流中向后运动;然后气泡开始覆盖螺旋桨叶片最靠近尖端的部分,并在叶片上形

成一层薄膜。为了与更高的转速下接近桨毂处叶片上产生的较大气泡的旋涡空化 (*burbling cavitation*) 相区别, 上面的现象有时称为层状空化 (*laminar cavitation*)。从物理角度来看, 二者没有严格的区别, 或许把它们一块称为叶片空化更为合适。

除了螺旋桨可产生持续的空化现象, 空化现象也出现在船体外的尖锐突出部分周围, 尤其当舰船突然加速时更是如此。例如从浅水航行的潜艇上方的游艇上观察到白色的泡沫, 白色泡沫的出现并不是束缚空气的释放, 因此可认为是由于潜艇上层结构处的空化所产生的。但这一结果不能认为是普遍的, 因为潜艇下潜的时间还不够长, 在下潜过程拖带的所有表面束缚空气在观察时间内有可能没有被驱逐干净。

### 1.2.1.2 气泡的扩张和收缩

当外界压强为一个大气压时, 饱和的海水(对空气)中产生空穴后, 气体从周围的水中扩散入空穴, 因为氧、氮的扩散系数接近相等, 因此空穴中的气体组分与溶解在海水中的气体组分是相同的。这一组分与空气中气体的组分明显不同, 因为氮的溶解度是氧的两倍, 就是说空穴中气体组分为  $1/3$  的氧和  $2/3$  的氮。在运动过程中, 气泡每秒聚集的气体量正比于气泡的表面积、周围水中的溶解压, 与温度和水压基本无关, 比例系数粗略估计为  $4 \times 10^{-9} \text{mol/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm}$ 。

当空穴瓦解后, 扩散在其中的气体将被压缩, 一定半径的气泡将会形成, 由叶片空化产生的空穴瓦解得非常迅速, 所形成的气泡非常小。由叶片尖端的旋涡造成的空穴持续时间要长一些, 因为有时螺旋性旋涡中的离心力较大。如此推测, 螺旋桨尾流中大部分的气泡是由于叶片尖端的旋涡空化产生的。海水中不同深度都有溶解的氧和氮, 数量大致与海面的饱和度相联系, 正因如此, 表面以下各处的气泡或空穴气体都是不饱和的, 而且当气体重新进入水中时, 气泡将会消失, 溶解速度与空穴中当气体聚集时的扩散理论相一致。单位时间内从气泡逃逸出的气体的分子的量近似地正比于气泡的表面积、正比于气泡内和空气溶解在水中的分压力之差, 比例系数仍然是  $4 \times 10^{-9} \text{mol/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm}$ 。另一种说法是用球形气泡每秒减小的直径来描述的, 在表面空气饱和的水中, 这一速度从深度为 5m 时的  $8 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  增加到深度为 100~200m 时的  $18 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ , 超

出这些深度范围再没有明显的增加。

与气泡的形成和在溶解有关的这些理论在一系列实验中得到了证实，实验结果同理论的一致性较好，但这些结论在多大程度上能够应用于真实尾流不能确定。实验表明，半径为 0.1cm(3kc 声波的共振尺寸)的气泡，大约在 20 分钟内会完全溶解。如果尾流中起始气泡的线度(半径) $\geq 10^{-2}$ cm，则随着较小气泡的收缩，较大气泡的线度也在减小，那些最小线度的气泡在尾流形成 20 分钟以后仍然存在，粗略地估计，用超声频率观察时，尾流的声学效应能够维持 15~45 分钟。在尾流中，气泡在湍流场中运动，并且逐渐上升到海面而消失，这一过程构成了限制尾流生存期的重要因素。为了对这一过程有一个更为清楚的认识，需要对尾流中气泡所受的浮力以及气泡上升速度进行分析。

### 1.2.2 尾流中气泡所受浮力和上升速度

有关文献对静水中气泡的自由上升情况作料详细的分析，从这些分析和有效的实验数据以及一些理论结果得到了水中气泡上升速度与其半径的关系曲线，该曲线重绘于图 1-2。从图中可注意到，上升速度在气泡半径约为 0.1cm 时达到最大值，之后随着气泡半径缓慢地变化，另外将几种不同类型的气泡运动形式和气泡的不同形状进行了划分，并将其在图中表示出来，然而这样划分的气泡半径间隔并无严格的界限。所有的观察者都一致认为，对于非常小的气泡，其

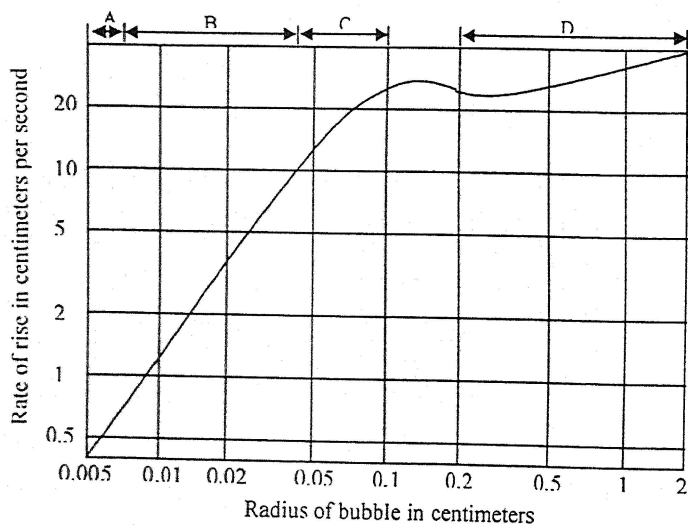


图 1-2 水中气泡上升速度与半径的关系

运动的速度曲线是线性的；对于大气泡而言，运动也近似地呈线性，但也不排除个别例外情况。该曲线有一个明显特点，就是一直到 0.04cm 半径范围，速度曲线同关于一定引力场中水珠下降速度的经验曲线相一致。与关于气泡幕的实验相联系，气泡半径与速度的这种关系已经得到实验验证，在 0.01~0.1cm 半径范围符合的相当好。像纯引力理论的预言一样，从气泡在静水中的这些速度值得出结论：所有能引起声学效应的气泡将在较短的时间内到达海水表面，而且该时间远小于通常观察到的声学尾流生存期。

然而船体及其螺旋桨的运动持续地产生强内部湍流运动，该运动要受到浮力作用下气泡的运动的影响，这个现象类似于河流中悬浮物质的运动。大部分悬浮物质的密度大于水的密度，因此在无湍流的水中将会沉淀出来，但在湍流中这些物质仍将处于悬浮状态。类似地，尾流中的气泡要上升到水面，而湍流会阻碍这种趋势。与河流中的运输的相似性并不是完全的，因任何一个固定位置的湍流是渐渐衰弱，而气泡一旦到达水面就可能消失。

文献提出了尾流生存期的半理论化分析，其主要目的是要较为准确地得到解释声学尾流的生存期的湍流情况。在这个半理论化的分析中，湍流的强度用几个经验参数来表示，从中也给出了尾流生存期的理论值存在一个宽的、明确的极大值范围（如果湍流参数稳定地增加）。

从物理角度出发，可给出这个理论极大值简单的定性解释。当弱、中等强度的湍流趋于延长尾流的生存期时，一个非常强的湍流将通过增加气泡到达海水表面而破裂的可能性而加速尾流的衰弱，也就是说，当湍流运动的竖直向上分量的平均值大于仅仅有引力作用下气泡的上升速度时会出现上述情况。非常小和大的湍流所表现出的这种对立效应，是因为最大生存期到达湍流参数的某些中间值，所预言的极大值恰好与观察到的平均声学尾流的生存期一致，即从 15 到 45min. 该结果的成功之处是尾流中有关湍流的所有测量、即湍流参量的真实值都具有明确的物理含义。

### 1.2.3 连带的空气

帆船有明显的尾流这一事实说明，任何行驶中的船只沿吃水线都连带着大量的空气，这些气体是发动机驱动的船只尾流中出现的气泡的主要来源。

定性的实验表明从一艘驳船尾流的回声可以由通过其尾流的游艇放置于其下的 NH-1 型浅深度记录仪探测到，同时也发现该尾流的透声性强于由螺旋桨驱动的船只，因而其生存期较短。

在圣地亚哥海湾由风帆提供动力的实验验证了这些结论，实验使用的是 104 英尺长的快艇。当使用风帆做为动力时，实验发现尾流的透声性能较强，甚至于透过尾流能够探测到底部。尾流的厚度同观察到的、同一艘艇在相似的天气条件下仅由引擎驱动时的情况没有明显区别，平均厚度在引擎驱动时为 12.4ft，在风帆驱动时为 13.0ft。从这些现象来看，尾流的几何形式基本由船体的外形以及其航行速度决定，与气泡是由气体进入水面、还是螺旋桨的空化所产生并没有太大关系。

通过高速摄影技术发现，高速行驶的舰船的螺旋桨引起的尖端旋涡空化与实验室由水流推动的螺旋桨表现出相同的现象。

### 1.3 尾流的速度和温度场

相对于周围的水体，船舶尾流中的水通常是运动的，而且，尾流中不同点的温度与尾流外的温度有显著的区别。温度和速度的变化是尾流的重要物理特性，可望为尾流的探测提供依据，而且对于这些特性的研究在军事上也有用途。气泡在所观测尾流的声学效应中起重要作用，关于气泡产生、延续的分析都应和已有的关于尾流温度与速度场理论相一致。

#### 1.3.1 尾流的速度场

最简单的尾流是由流体通过一个平行于溪流的薄板产生的，这种情况下薄板将仅影响其附近的一个狭窄区域的流迹，如边界层的情况，流体速度逐渐减小。这种效应如图 1-3 所示，图中不同点速度的大小用箭头表示出来，为了简化，仅把流迹的上半部分表示出来。薄板后方远处的速度分布也显示出与通过薄板时相同的效应，因为通过边界层的流体流速比其它部分的流速较慢。图 1-3 中箭头表示流体相对于薄板的平均速度。这些结论可直接用于相应的、即当薄板（或船体）在静水中移动时的情况，这种情况下尾流中的水体在薄板后的流动方向与薄板平行。值得注意的是在多数情况下，边界层内的流迹是紊流，而且这时尾流中的流迹也是紊流。

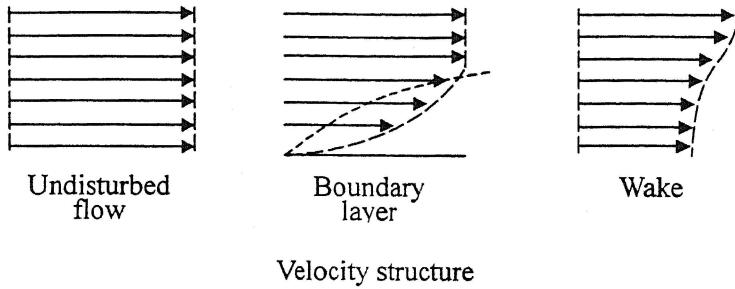


图 1-3 尾流的速度场示意图

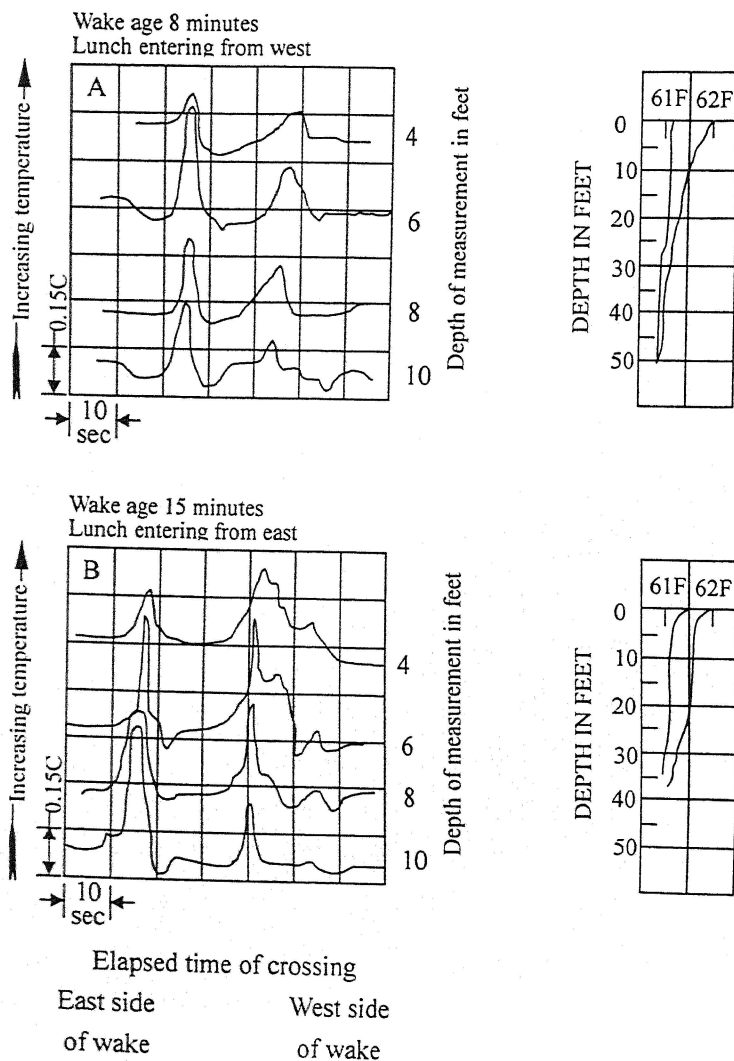
船舶在水中航行时除了这种情况产生的尾流以外，还有螺旋桨产生的效应。为了推动船舶前进，螺旋桨要产生一个向前的力，这个力比通过船体的水产生的要大，二者的差值恰好等于由于波浪和空气所产生的阻碍力。而对于水面下的潜水艇，推进力正好等于其周围水流产生的阻力。为了给水面船舶或潜水艇产生推动力，螺旋桨对水将产生一个与其相等的、向后的反作用力，结果是流过和在螺旋桨周围的水将沿着与船相反的方向流动。

这样，靠近船体的尾流由几个部分组成：一个或几个螺旋桨产生的流迹，通常称为“冲流”（slipstream），它是螺旋桨旋转产生的并跑离船体；船体尾迹，跟随船体，是由于船体表面的摩擦力所产生的。冲流的反向动量基本与船体尾迹的前向动量互相抵消，除非水面船体的速度非常高以至于波阻成为船舶重要的反作用力，对于潜水艇而言这种抵消是精确的。

在船尾中等近距离，或许远小于船体长度，这些不同的流迹互相搀杂混合，使得紊流水体的质量增加，在紊流中任何方向的速度都可能相等。超出一个小距离（称为 patch size），任何时刻速度都是确定的常数，但任何点的速度都在迅速地变化。有关紊流的运动信息还很不完善，对于水面船只和潜水艇还没有实用的速度测量结果。

### 1.3.2 尾流的温度场

尾流中不同点的水温比流速在更多的研究中成为研究主题，这其中的部分原因是因为很小的温度差别可以比小的流速进行更加稳定的测量。将敏感的温差电堆固定于水面船体，小到 0.01F 的温度变化可以被稳定地记录下来，在美国海军微波及声学实验室 (the U.S. Navy Radio and Sound Laboratory) 和其它地方利用这种技术所获得的数据表明，尾流中可观察的温度结构存在与否依赖于海洋中船只通过前垂直温度梯度的存在。



Horizontal temperature structure of a destroyer wake  
图 1-4 尾流的温度场测量结果

当船只在均匀温度的水中通过时，就象通常观察到的海洋最上层的 50ft 中的情况（尤其在冬天是这样），在尾流中观察不到热不均匀结构，这些情况下重复的尾流交叉点也不能够显示出任何温度场。在这些等温的水中，温度场只是由过往船只的热作用产生，而实验证实，这种热效应通常可以不予考虑。

一个极限情况下的例子，假设以 30 节的速度行驶的一艘船的动力为 30,000hp，而且假定所有的能量都用来加热截面积为 20 平方英尺的尾流，在这种极限情况下，温度升高为 0.015F。在大多数真实情况下，温度变化将会非常小，虽然局部小范围的水体可能被由冷却系统排出的水、强烈旋涡中的能量消散、或者由于类似的过程所加热，恒温水中位于船只之后的尾流的大部分的温度与周围海水的温度基本相同。

当海洋最上层的 20ft 内观察到有垂直的温度梯度存在时，船只的通过会干扰其温度结构，在尾流中引起一个可测量的温度场。

图 1-4 是文献给出的一个具体测量结果，测量是从一条驱逐舰的 8、15 分钟尾流中进行的，同时，深海温度测量器的记录也显示出来。容易看出，纯粹的尾流是由分布于两侧的较热的水和分布于中间的较冷的水组成，这样的分布可能是因为侧面的涌流下降、而中间涌流增加而引起的，涌流可能由来自两个螺旋桨的冲流的旋转产生。

从其它形式的船舶尾流所观察到的热结构常常与图 1-4 显示的情况有明显的不同，有时出现的是单个峰值而不是双峰值，然而一般情况下尾流的表层较周围同一深度的水要冷。令人感兴趣的是，在尾流以外的温度梯度很小以至于在深海温度测量器的记录上难以引起注意的情况下，热尾流信号仍然被稳定地探测到。

### 1.3.3 温度和速度场引起的散射

任何声不均匀区域都将对通过该区域的声波产生影响，理论预言在不同温度的两部分水体的界面上会产生显著的反射现象。如果海水中出现的不均匀结构与波长相比不很大，则会显著地引起声波向各个方向的散射。虽然对这些现象的精确分析非常复杂，但可从中相对简单地得出一些定性的结论，下面给出的结论可指出速度和温度场对声波散射的数量级。

假设在有些区域  $S$  内声速有一个不确定值, 即  $c + \Delta c$ , 而周围水体中的声速为一常数  $c$ , 再假设一列强度为  $I_0$ 、波长为  $\lambda$  的平面声波, 沿着  $x$  轴方向通过介质, 由  $S$  引起的散射波在不同方向上的强度  $I_s$  可能不同, 但与径向距离  $r$  的平方成反比, 即

$$I_s = \frac{k}{r^2} I_0 \quad (1-01)$$

其中  $k$  是常数, 它依赖于所考虑的散射声方向。

现在来寻找  $k$  与  $\Delta c$  的关系。考虑到实际应用的目的, 仅需要考虑背向散射声, 同时还可以假定散射足够弱,  $S$  内各点的声强近似地等于无散射时对应的声强, 这一假定会导致对  $k$  的估计过大。如果散射较强, 在声波通过区域  $S$  时将会衰减, 因在通过  $S$  的过程中由于散射而存在能量损失。

因散射是由于声速的相对变化而产生的, 所以可以合理地假定  $S$  内任一体元  $dx dy dz$  散射的声压  $d p_s$  正比于值  $\Delta c/c$ , 要对不同体元来的所有散射声进行迭加, 必须考虑各自的相位。因声波必须传到散射体元而后再沿着  $x$  轴回来, 所以沿着  $x$  轴方向距离为  $x$  的两体元引起的位相差为  $4\pi x/\lambda$ , 因此在计算声压时, 必须给  $\Delta c/c$  乘以一项  $\cos(4\pi x/\lambda + 2\pi ft)$ , 这里  $f$  是声波频率, 然后对整个散射区域  $S$  积分。散射声强度正比于这一积分的平方, 所以方程式 (1-01) 中的常数  $k$  由下式给出

$$k = \left[ \frac{2\pi}{\lambda^2} \iiint_S \frac{\Delta c}{c} \cos\left(4\pi \frac{x}{\lambda} + 2\pi ft\right) dx dy dz \right]^2 \quad (1-02)$$

因为

$$\cos\left(4\pi \frac{x}{\lambda} + 2\pi ft\right) = \cos 4\pi \frac{x}{\lambda} \cos 2\pi ft - \sin 4\pi \frac{x}{\lambda} \sin 2\pi ft \quad (1-03)$$

(1-02) 式的积分可看作两个积分之和, 平方并取其时间平均值, 再利用关系

$$\begin{aligned} \overline{\cos^2 2\pi ft} &= \overline{\sin^2 2\pi ft} = \frac{1}{2} \\ \overline{\cos 2\pi ft \sin 2\pi ft} &= 0 \end{aligned} \quad (1-04)$$

式中横线表示对时间的平均。这样  $k$  便成为

$$k = \left[ \frac{2\pi}{\lambda^2} \iiint \frac{\Delta c}{c} \sin\left(4\pi \frac{x}{\lambda}\right) dx dy dz \right]^2 + \left[ \frac{2\pi}{\lambda^2} \iiint \frac{\Delta c}{c} \cos\left(4\pi \frac{x}{\lambda}\right) dx dy dz \right]^2 \quad (1-05)$$

散射区的目标强度为  $10 \log k$ ；当散射区域的线度远小于波长时，(1-05) 中的三角函数近似为常数，因其平方和等于 1，所以有

$$k = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \left( \iiint \frac{\Delta c}{c} dx dy dz \right)^2 \quad (1-06)$$

当  $\Delta c/c$  在散射区内为一常数，该方程又可以简化为

$$k = \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \left( \frac{\Delta c}{c} \right)^2 V^2$$

其中  $V$  是散射区的体积。方程式 (1-06) 仅能预言散射声的一小部分；另一方面，当  $c$  在与波长相比大的区域内为常数时， $k$  又会变小。

### 1.3.3.1 温度场的效应

方程 (1-05) 可用来计算各点温度迅速变化的水体对声波的散射。为了简化计算，假设  $\Delta c$  的正负值出现的可能性相等，也就是说，该部分水体的平均温度正好等于散射区外的温度。虽然各点温度的分布是随机的，但总有一些小区域 (patch size) 的温度变化并不显著，这在数学上用函数  $\rho(\zeta)$  来表示，该函数定义为

$$\rho(\zeta) = \frac{\overline{\Delta c(x+\zeta, y, z) \Delta c(x, y, z)}}{\overline{\Delta c(x, y, z)}} \quad (1-07)$$

这里的平均是对空间进行的，对散射区的所有  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值取平均，而公式中的

$\zeta$  是  $x$  方向的位移, 这一位移有可以推广到其它方向上, 而函数  $\rho(\zeta)$  的值取决于  $\zeta$  的大小和方向。如果该位移非常大, 距离为  $r$  的点之间的  $\Delta c$  值正负是随机的, 因而是无关的, 因此对于大的  $\zeta$ ,  $\rho$  趋近于零; 小区域是指这样的  $\zeta$  值, 它使函数  $\rho$  有一小值, 或者说小于  $1/3$ ; 函数  $\rho$  成为自恰系数。如果函数  $\rho(\zeta)$  与  $\zeta$  的方向无关, 则可以说温度场是各向同性的。

利用某些数学变换关系, 等式 (1-05) 可以表示为  $\rho(\zeta)$  的函数。对于各向同性介质, 所得结果如下

$$k = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \overline{\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2} V \int \rho(\zeta) \zeta^2 \frac{\sin(4\pi\zeta/\lambda)}{4\pi\zeta/\lambda} d\zeta \quad (1-08)$$

其中  $V$  表示散射区的体积。作为一般形式, 可以假定

$$\rho(\zeta) = e^{-\zeta/A} \quad (1-09)$$

将这一表达式代入方程 (1-08), 积分得

$$\frac{k}{V} = \frac{1}{8\pi A} \overline{\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda^2}{16\pi^2 A^2}\right)^2} \quad (1-10)$$

在实际情况下, 波长  $\lambda$  通常小于距离  $A$ , 分母上的最后一项可忽略不计。

在小距离 0.6in. 内 0.5F 的波动可能是一个极端的假设, 在这种情况下,  $k/V$  约为  $3 \times 10^{-7}/\text{yd}$ , 这一体积内的体积散射系数  $m$  与  $k$  的关系由下式给出

$$m = \frac{4\pi k}{V} \quad (1-11)$$

因此这种情况下  $m$  约为  $4 \times 10^{-7}/\text{yd}$ , 如果所有方向的散射能量都相等, 则  $m$  表

示声波通过散射介质每码散射的能量分数。

显然即使是这样特殊的假设，给出的散射系数仍然非常小。即使散射体积为 10yd 厚、30yd 宽、100yd 长（与尾流相联系、沿声波传播的方向）， $k$  约为  $10^{-3}\text{yd}^2$ （与有效目标强度-30db 相联系）。通过这样一个区域的透射损失将会很小，因此温度微观结构不能够解释尾流所引起的强回声以及高透射损失。

### 1.3.3.2 速度场的效应

以下分析水介质中各点速度不同而引起的效应。这种情况比温度场引起的效应更为复杂，因为流体速度是矢量，它既有大小又有方向。然而，如果用流体速度的  $x$  分量  $v_x$  代替  $\Delta c$ ，则方程（1-05）仍是实用的。

为了计算  $k$ ，须对下式积分

$$\int \sin(4\pi x \lambda) dx \iint v_x dy dz \quad (1-12)$$

如果首先沿着  $y$ 、 $z$  积分，容易看出整个积分为零。 $v_x$  沿  $yz$  平面的积分简单地等于流体流过该平面的净流量；任何时刻，流体流过  $yz$  平面的流量必然等于其他方向的流量，因而净流量为零，因此，随机的速度分布对声波的背散射无贡献。

在 San Diego 和 Orlando 的测量与该结果是一致的，对速度微观结构的测量中，声波的背散射非常弱。测量和理论结果一致指出，速度微观结构对声波的散射在实际情况下可以忽略不计。

## 1.4 尾流的几何特性

图 1-1a、b、c、d、e 所示驱逐舰尾流图片是从大量的系列照片中选择出来的。这些图片显示出驱逐舰 USS *Moale* (DD693) 匀速直线行驶时的尾流情况，其速度从 16 到 34.5knots。在每一个速度下对 3 次或更多次拍摄的照片进行了分析，所以结果表示一种平均效果。下面的结论是从原始照片的分析中得出的。

紧靠螺旋桨后面的尾流以约 50 度的角分散开，从不同照片的单次测量看，这一角度在 40~60 度之间，但是没有显示出与航速明确的依赖关系，这些现象极有可能是一种假象。一个位置固定的螺旋桨的尾流散开角度约为 20 度，在船尾后的一定距离处，驱逐舰尾流的大面积分散部分会迅速衰灭，因此尾流仅仅

在约为 1 度的角度内散开，这一角度也表现出与其对应的速度无关。然而散开角从 50 度到 1 度范围所对应的船尾后的相应距离会随着驱逐舰速度的增加显著地增加。航速为 16knots 时，这一距离约为 65ft；在全速航行时，该距离约为 280ft；这一距离的变化并不是线性的。对其它不同类型舰船尾流的观测，也指出紧靠船体后面，尾流以大的角度分散开，而在船尾后超过 100yd 的距离处，尾流以非常小的角度散开，大约在 1 度的数量级。尾流的大初始散开角在图 1-1f、g 中可清楚地看到。

航空照片也为尾流的截面形态提供了一定的信息，在图 1-1 中显示出，当航速小于 25knots 时，驱逐舰尾流在紧靠船尾的后面有一个密集的核心以及明显的边界；随着距离的增加，内部结构逐渐淡出。当航速达 30knots 以上时，驱逐舰尾流表现为非常强的湍流，其核心基本被冲刷掉了。

驱逐舰和水面潜水艇相比，其尾流的大致轮廓是非常相似的。

鱼雷快艇（PT boat—patrol torpedo boat）的尾流特征是窄而且紧密的，除冲击波外无其它可见的外观形态，冲击波位于船体后几个船身距离处，它比尾流的可见持续时间长得多。

在美国海军微波和声学实验室（the U.S. Navy Radio and Sound Laboratory），用回音测深仪对很多不同的水面舰只和潜水艇的尾流进行了研究。其中对有些尾流进行了系统的研究，得到了尾流的宽度和深度与到船只的距离和船速的函数关系。

对于水面船只，用了两种方法测量其尾流宽度。当载有回声探测仪的探测船近可能垂直地穿过尾流时，同时测量出速度及其距离参数。当离船只的距离较远时，穿过尾流时的角度的判断会产生一定的误差，然而如果假设测量船垂直穿过尾流，则由此引起的宽度测量的误差通常可忽略不计。当测量船仍位于船尾后较远距离，在确定是否进入尾流方面会出现较大误差。

另一种方法适用于近距离，测量船由待测尾流船拖动。此种情况下尾流寿命是一个常数，换句话说，对于如果船速为常数，测量船在各个时刻都处在相同寿命的尾流中。当尾流船沿着直线航行时，被拖动的测量船转舵使其在尾流的两侧进出尾流。

在船尾后的 50 到 500ft 距离范围，用这第二种方法研究了 the *Jasper*（总长

度 127ft, 吃水 12ft, 最大宽度 23ft) 的尾流, 所有宽度测量数据 (ft) 与下式一致

$$w = w_0 + 0.0625vt \quad (1-13)$$

这里  $w_0$  为尾流船尾后一点的宽度,  $v$  为船速 (ft/sec),  $t$  为尾流时间 (sec)。将其对时间微分, 得

$$\frac{1}{v} \frac{dw}{dt} = 0.0625 = \sin\alpha \quad (1-14)$$

其中  $\alpha$  为尾流边缘的整体岔开角, 等于 3.5 度。对于前述驱逐舰、距离相近的情况, 尾流边缘的散开角约 50 度。二者之间存在的显著区别无疑是由于船只的不同结构造成的。公式 (1-13) 中  $w_0$  的推算值为  $w_0=10\text{ft}$ , 这与船宽度的一半非常接近。在距离约超过 5 个船身处, the *Jasper* 的尾流宽度约在 2~2.5 倍的船体宽度。然而这一区域的测量只有第一种方法的个别测量结果是有效的, 因此不能排除与远距离 (the *Jasper* 后) 对应约 1 度的岔开角。

厚度的测量是在测量距离和速度的同时进行的。一个给定的尾流沿其宽度方向的不同点将会有不同的声学传输特性, 有些情况下, 沿着宽度方向尾流的厚度是相同的, 而其边缘处的透射较强是由于具有较弱的散射特性; 还有一些情况是, 尾流边缘的厚度较小。有些尾流底部相当平坦, 有些在顶部和底部呈圆形, 或者是在顶部和底部都呈梯形状。

尾流截面在垂直于船只宽度方向的面上的不对称是经常出现的, 这明显地与风向有关。这现象最初是在双螺旋桨发动机驱动的船只中发现的, 当初认为是由于动力不均匀造成的。之后研究了帆船的尾流, 发现了更为明显的不对称。帆船在航行中相当倾斜, 船两侧与水接触部位的变化被认为是引起不对称的原因。二螺旋桨都在运转, 且风力明显时, 对双桨船的尾流进行了观测, 再一次发现了不对称的结果, 这一效应与测量船通过尾流的方向无关。一个不对称尾流的典型的底部倾斜角为 18 度 (帆船长 125ft)。当风向由舰船的左弦变到右弦时, 尾流截面的几何形状应变为前面形状的镜像效果, 但大部分情况并不能完全证实这一点。也许在这一行为中还有没有被发现的参数在起作用。

对大量的水面大型船只的散射测量表明, 平均的尾流厚度与最大宽度之比为 2.02, 而小船的尾流厚度相对较厚, 与最大宽度之比为约为 4; 发现的唯一深度

小于最大宽度的尾流是从一艘拖船后 4000yd 处测得的；对于快艇而言，尾流厚度随着速度的增加显著增大。

所有的这些观测都是通过置于测量船上、方向向下的回音探测仪测量的，后来还有将回音探测仪置于潜水艇上、方向向上的测量。表 1-1 是实际测量的尾流几何形态参数。

关于潜水艇尾流形态的研究还不够充分。NDRC (National Defense Research Committee) 利用回音探测仪对长度为 309ft 的一艘在编型潜水艇 (fleet-type submarine) 的尾流进行了研究。在潜望镜深度龙骨的下潜深度为 60ft，螺旋桨深度为 48ft，甲板深度为 35ft；速度为 5.5knots。表 1-2 给出相应的观测资料。同一级别的水面上的潜艇以 7knots 航行时相应的数据在表 1-3 给出。

表 1-2 中的最大距离 450yd 并不是龙骨深度为 60ft 情况下可探测尾流的上限。一艘 S 级潜艇 (S-class submarine) 以 6knots 航行时，其水下尾流的长度约为 1000yd (深度 45ft)、235yd (深度 90ft)、100yd (深度 125ft)，这些数据指出了实验测量时尾流变得不可测前潜艇后尾流的距离。

表 1-1 尾流厚度

	USS <i>Rathburne</i> (ex-DD113)	USS <i>Hopewell</i> (DD681)	USCGC <i>Ewing</i>
Speed in knots	10-12	10	13
Thickness of wake in feet for average distance astern of 400 yd	19.5 ± 3.4	23.1 ± 3.6	13.7 ± 3.3
Range of thickness in feet	12-16	10-32	8-20
Ratio of wake thickness to ship draft	1.63	1.85	1.52

从表 1-2 的数据来看，一艘潜水艇在潜望镜深度、航速为 5.5knots 下的尾流，在潜艇后超过 100yd 处扩展至海面；一个较小的距离为 67yd，此时的尾流应完全在海面以下，所以是不确切的。后来的试验利用相同的回音探测仪对潜水艇 USS *Trepang* 的尾流进行了研究，结果进一步正式了前面的结论。该潜艇的龙骨深度为 60ft，航速 8knots，而尾流在艇后 600ft 处到达水面。假设该斜率为一常数，从这个数据可计算其尾流顶部的倾斜角或斜率；螺旋桨深度 48ft 与尾流的浸水长度 600ft 之比为 48/600、即 0.08，该值对应于相对螺旋桨的整体散开角约为 9 度，然而这一值仅以一次记录为准。

表 1-2 潜望镜深度潜水艇的尾流深度

表 1-3 水面上潜水艇的尾流

Distance from periscope in yards	Wake top in feet	Depth of wake bottom in feet	Distance astern in yards	Wake bottom depth in feet
67	39	70		
100	0	27	100	32
117	0	40	145	24
152	0	36	180	29
215	0	31	300	26
315	0	25	480	18
319	0	28	660	26
350	0	30	800	21
450	0	23	950	22