

尾流后向散射光功率衰减特性研究*

李增荣 刘继芳 邓仲芳

(西安电子科技大学技术物理学院 501 教研室, 西安 710071)

摘要 依据 Mie 理论光散射在 0° 和 180° 有明显增强的结论, 应用自行设计的模拟尾流后向散射光功率实验系统在 632.8 nm He-Ne 激光器直接照明和扩束后照明两种条件下, 对模拟尾流后向散射光功率衰减特性进行了研究。结果表明, 用后向散射光功率进行探测时, 考虑到散射光在水中传播的衰减, 对近距离分布的气泡, 使用扩束光照明效果较好; 对较远距离分布的气泡, 使用细光束照明效果较好, 其可探测的距离要比扩束光远。

关键词 尾流; 气泡; 后向光散射; 光功率

中图分类号 TN249

文献标识码 A

0 引言

水中运动目标会产生尾流, 而尾流是由于运动目标推进器高速运动时空化机制以及与水的摩擦作用所产生大量的、各种尺寸的气泡幕、气泡带。水中所含气泡的尺寸不同、密度不同, 对光的透射、吸收和散射性能也不同。因此就可以利用尾流对光的透射、吸收和散射等特性相对周围无气泡海水介质的差异来进行水下目标探测^[1,2]。尾流的探测是近年来国内外研究的热点。

为了研究在一定照明光功率条件下后向散射可探测的气泡距离, 本文建立了基于后向散射光功率探测的模拟尾流实验系统。在扩束光和细光束照明两种情况下, 并考虑后向散射光功率在水中传播衰减, 研究了尾流的后向光散射特性。

1 理论依据

舰船尾流中气泡的尺寸分布是 Poisson 分布^[3], 但大气泡由于在水中所受的浮力大, 上升为近似直线加速上升, 大气泡迅速上升到水面破裂, 所以其寿命很短, 在水中存在的量少; 而小气泡的上升为近似于螺旋式上升, 上升速度较慢, 且由于海水中存在蛋白质和油脂, 小气泡一旦产生, 表面会很快形成有机膜, 这使得小气泡的寿命进一步延长。水下目标跟踪主要是通过对目标本身产生的小气泡的探测实现的。

水中的气泡对入射的光波会产生散射, 散射角大于 90° 的散射光称为后向散射光。受气泡密度和大小的影响, 后向光散射的强度不同。为了应用 Mie 理论计算尾流的后向光散射的体积散射函数(VSF), 考虑到实际尾流气泡场的气泡大小和密度分布, 可以认

为: 1) 气泡(散射体)是被均匀电介质(水)包围的球形体; 2) 在海洋中的气泡表面会有一层有机薄膜。但有研究表明, 当该薄膜厚度小于几微米时, 除了布儒斯特角散射外的其他散射现象受气泡表面薄膜的影响较小, 因此, 忽略附着在气泡表面的有机薄膜的影响; 3) 水中气泡都表现出较弱的吸收特性, 认为气泡是无吸收的, 所以其折射率的虚部为零; 4) 水中气泡随机分布, 且满足不相关散射条件。

由 Mie 理论可以给出气泡的 VSF. VSF 定义为每单位体积沿给定方向上发出的辐射强度^[4]

$$\sigma(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E_0 dV} \quad (1)$$

当直径为 D 的各向同性均匀球形粒子在波长为 λ 的线偏振准直光束的照射下, 根据 Mie 理论, 散射光强为

$$I(\theta) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 r^2} (i_1 + i_2) \quad (2)$$

式中 $r(r \gg D)$ 为观测点到球形粒子中心的距离; θ 为散射角; $I(\theta)$ 为单位强度的入射偏振光在散射角 θ 方向上的散射光强; i 为单位强度入射偏振光束由单个球形粒子的散射强度, 下标 1 表示入射偏振光束的电矢量垂直于观察平面, 下标 2 表示入射波的电矢量在观察平面内。具体可表示为

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{dP_n(x)}{dx} A_n + B_n \right\} x \frac{dP_n(x)}{dx} - (1-x^2) \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} \right|^2 \quad (3)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{dP_n(x)}{dx} B_n + A_n \right\} x \frac{dP_n(x)}{dx} - (1-x^2) \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} \right|^2 \quad (4)$$

式中 $P_n(x)$ 为勒让德多项式; A_n 和 B_n 为米氏散射系数, 根据 C. F. Bohren 和 D. R. Hoffman 理论有如下形式^[5]

$$A_n = \frac{m\Psi_n(\beta)\Psi'_n(\alpha) - \Psi_n(\alpha)\Psi'_n(\beta)}{m\Psi_n(\beta)\xi'_n(\alpha) - \xi_n(\alpha)\Psi'_n(\beta)} \quad (5)$$

* 水下信息处理与控制国家重点实验室资助

Tel: 029-88202561 Email: zhenlongzi@sohu.com

收稿日期: 2005-06-11

$$B_n = \frac{\Psi_n(\beta)\Psi'_n(\alpha) - m\Psi_n(\alpha)\Psi'_n(\beta)}{\Psi_n(\beta)\xi'_n(\alpha) - m\xi_n(\alpha)\Psi'_n(\beta)} \quad (6)$$

$$x = -\cos(\theta) \quad (7)$$

式中: $\alpha = \frac{\pi n_w D}{\lambda}$, $\beta = \frac{\pi n_p D}{\lambda}$, $m = \frac{n_p}{n_w}$; $\Psi_n(\cdot)$ 和 $\xi_n(\cdot)$

分别为雷卡提—贝塞尔函数和雷卡提—汉克尔函数; m 为气泡折射率 n_p 与水的折射率 n_w 的比值。由以上公式即可求得气泡光散射的 VSF 量值。

考虑两种不同的尾流, 其一, 气泡直径分布在 $0.01\sim 80 \mu\text{m}$; 其二, 气泡直径分布在 $0.01\sim 2000 \mu\text{m}$ 。为了得到尾流光散射的 VSF 随散射角的变化曲线, 把第一种尾流气泡按直径划分为 38 个小区间, 而把第二种尾流气泡按直径划分为 60 个小区间, 分别算出每个区间的 VSF, 然后叠加得到的两种不同大小分布尾流光散射 VSF 值如图 1。

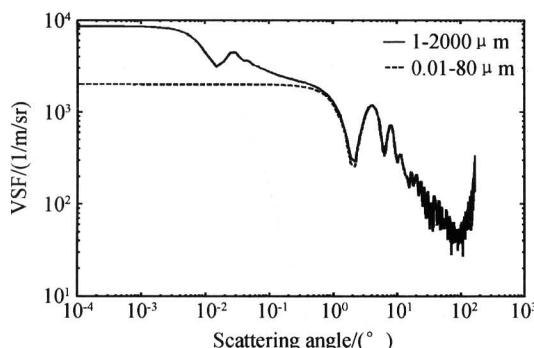


图 1 由 Mie 理论计算得到的气泡的 VSF

Fig. 1 The VSF of the bubble based on Mie theory calculated value

由图 1 可见, 气泡的后向散射光强在接近 180° 时有明显增强。所以尾流的后向散射探测倾向于测量散射角 180° 附近小角度范围内的散射光强。实验测量的散射光必然要在水中传播一段距离, 故而测量到的是经过水衰减影响后散射光强值。设入射在厚度为 dx 均匀水体前表面的激光强度为 I'_0 , 则在出射端的光强 $I = I'_0 - dI$, dI/I'_0 应与 dx 成正比, 即 $(dI/I'_0) = -\sigma dx$

解上面的微分方程可得: $I = I'_0 e^{-\sigma x}$ 。式中的 σ 为水的衰减系数, 其值与水体的浊度密切相关。在低浊度的水体中短波的衰减系数小, 即蓝绿光的衰减系数小; 在高浊度水体中长波的衰减系数小, 即红光的衰减系数小。在浊度 12° 左右时^[6], 激光各个波长的衰减系数基本相同, 这是一个临界的浊度。远洋深海水接近于光学纯度, 蓝绿光衰减系数很小。但是尾流探测一般在表层海水中进行, 水中的有机物蛋白质的凝聚颗粒及浮游微生物使得海水表层的浊度较高, 一般在 $10\sim 150^\circ$ 之间。实验中虽然使用普通自来水(我国卫生法规定普通自来水的浊度不超过 5°), 但为了模拟大洋表层海水浊度, 搁置时间较长, 水中的灰尘和微生物使得水浊度增加。为此, 使用

He-Ne 激光器输出的 632.8 nm 波长作为照明源进行实验。

2 实验装置

实验系统由照明、气泡产生器和散射光探测三部分组成, 如图 2。置于 $100 \times 50 \times 40 \text{ cm}$ 水槽的底部微孔陶瓷管阵列, 通过软管、调节气压阀门和气压表与空气压缩机相连。通过调节进入微孔陶瓷管阵列空气压强来控制产生气泡的大小和密度, 模拟不同的尾流。由于实验中采用的是一个开放的气压调节系统, 所以气压表示数越大, 加在陶瓷管阵列上的气压越小, 产生的气泡尺寸越小, 密度越少。微孔陶瓷管阵列由 6 只管并列组成, 微孔孔径为 $1\sim 10 \mu\text{m}$, 平均孔径为 $2 \mu\text{m}$ 。可产生气泡幕最大厚度为 30.5 cm , 最大宽度为 11.6 cm 。

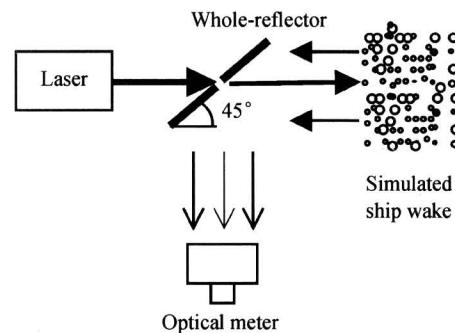


图 2 直接照明的试验装置

Fig. 2 Experimental set-up in slim beam illumination

输出功率 20 mW 的 He-Ne 激光直接(扩束后)照明尾流气泡区域, 尾流的后向散射(散射角在 180° 左右)光强由 Newport 公司的 Model 1835-C 多功能光功率计测出, Model 1835-C 探头直径 2.0 cm , 准确度 100 fW 。为了消除水槽各表面反射光对测量结果的影响, 水槽内侧以黑纸覆盖, 后向散射光经带有小孔的 45° 全反射镜后入射到功率计探头。这样在玻璃水槽侧面垂直于激光传播方向处即可接收到模拟尾流 180° 左右后向散射光强。

扩束光照明时, 在全反射镜前放置 $\times 40$ 的扩束镜, 并使其焦点位于全反射镜小孔处。其余装置同细光束照明。

3 实验结果及分析

实际测量时, 由于气泡的运动, 在有限的光照范围内, 气泡的分布不是恒定不变的, 结果导致照明范围内气泡散射光强随时间的起伏。测量时, 后向散射光在水中的传播要比前向远得多, 受外界影响比前向大, 散射光强随时间的起伏更大^[7]。为了减小光强由于照明区内气泡密度和运动变化所带来的影响, 在实验中把功率计的采集模式设定为 10 个采样的均值模式, 再对均值模式的示数取 20 个进行平

均,读数间隔约为1 s,即对20 s内200个点的采样进行平均得到该测量条件下的后向散射光强值.

3.1 两种照明条件下小气泡群后向散射光强对比

在固定激光入射功率20 mW(考虑玻璃表面损失后为18.43 mW),固定功率计探头到全反射镜距离为34.5 cm条件下,改变微孔陶瓷管中气压,对直接照明和扩束照明两种情况下的后向散射光强测量.该实验总耗时小于3 h,故忽略浊度变化,认为实验中水体浊度不变.

图3(a),(b)分别为气泡产生装置前端距全反射镜10 cm和15 cm时后向散射光强随气压变化曲线.可以看出:气泡距探测点较近时,细光束和扩束光照明条件的后向散射光强都可以反映气泡群的变化.细光束的动态范围大,当气压从0.26 MPa变化到0.34 MPa时,散射光强由36.0增加到49.0 nW.而扩束光照明时,散射光强仅由30.5 nW增加到37.0 nW.即细光束照明时后向散射光强随气泡大小、密度变化明显.

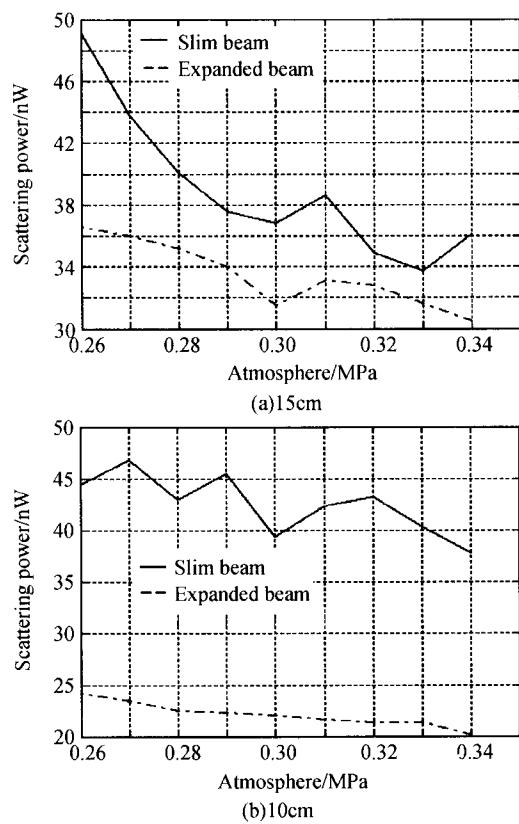


图3 后向散射光强随气压的变化曲线

Fig. 3 The scattered light intensity as a function of atmosphere

气泡距探测点较远时,当气压从0.26 MPa变化到0.34 MPa,扩束光照明下散射光强变化的范围只有不足5.0 nW,但其随气压变化的曲线仍可以反映出气泡大小、密度变化趋势.细光束照明下的散射光强绝对值较大,变化范围也较大,但已不能反映气泡群的变化趋势.

3.2 散射光强随传播距离的变化

为了研究尾流后向散射光强受传播距离带来衰减的影响,实验时在固定气压值0.31 MPa,固定激光入射功率20 mW条件下,改变微孔陶瓷管前端到全反射镜之间的距离,分别对细光束照明和扩束光照明下的散射光强进行测量.

探头到微孔陶瓷管前端间的距离改变时,一是散射光在水中由于传播距离不同,衰减不同,二是探测器接收到散射光角度范围不同.

3.2.1 尾流和全反射镜之间的距离对光强的影响

固定光功率计探头和全反射镜之间距离为34.5 cm,后向散射光功率P与反射镜距气泡幕前端距离D₁之间的关系如表1.实验中水体浊度比3.1节中大.

表1 散射光与反射镜距气泡幕前端距离的关系

D ₁ /cm	4.0	6.0	8.0	10.0	
P/nW	扩束光	48.3	43.6	40.0	35.6
	细光束	70.5	57.8	42.8	39.3
D ₁ /cm	12.0	14.0	16.0	18.0	
P/nW	扩束光	36.1	35.9	35.4	35.3
	细光束	36.2	33.3	35.9	28.2

从表1可以看出,扩束光照明条件下,接收到的后向散射光强受水衰减影响小.这是因为虽然扩束光照明时,随反射镜到距气泡幕前端距离增大,照明范围在加大,对散射光强有贡献的气泡数目增多,这可以抵消一部分由于水衰减造成的功率值降低,表现在12.0 cm之后的散射光强要比细光束来得大,受水中由于传播距离造成的影响小.但此时由于水质浊度的影响,光照区内水中杂质粒子也对后向散射光强贡献明显,致使12.0 cm之后的散射光强值变化很小,即受水质影响很大.

细光束照明时,随反射镜到距气泡幕前端距离增大,接收到的后向散射光强迅速减小.在水中传播衰减比扩束光照明大得多.当距离大于18 cm后,接收到散射光功率小于扩束光照明情况.其原因在于随距离增大,照明范围内的气泡数目基本保持不变.

表1与图3(b)对应条件下的测量相比可见,扩束光照明下,由于水浊度的不同,相同气压下的散射光强值相差仍然较大.在浊度大的水体中,扩束光只能在很近的距离内对气泡的变化进行识别,距离稍远,即被杂质粒子引起的散射光噪音淹没.而细光束照明可探测距离远,受水质影响小.

3.2.2 全反射镜与探头之间的距离对光强的影响

固定全反射镜与气泡幕前端距离8.0 cm时,后向散射光功率P与反射镜距探头距离D₂之间的关系如表2.

表2 散射光与反射镜距探头距离的关系

D_2/cm	28.0	30.0	32.0	34.0
P/nW	扩束光	54.2	50.2	42.9
	细光束	81.6	59.7	53.0
D_2/cm	36.0	38.0	40.0	42.0
P/nW	扩束光	36.2	36.8	31.2
	细光束	34.2	31.8	31.2
				26.6

实际测量中,在水槽外面移动探头,由于散射光在水中传播距离不变,散射光在大气中传播衰减很小,引起接收到的散射光衰减原因主要是功率计探头尺寸一定,增大 D_2 会使接收到的散射角减小。表2可见,扩束光照明条件下,散射光强受杂散光影响大。而细光束照明时受杂散光影响较小。

4 结论

水下目标光探测主要目的是研究分辨密度较少的小气泡。设计了尾流的后向散射光强探测实验,并在暗室条件下,分扩束光和细光束两种照明条件,研究了小气泡分布的尾流后向散射光强随传播距离的衰减特性。结果表明,在检测气泡密度和大小变化时,扩束光照明效果要好于细光束,探测距离也比细光束的远。对高浊度水体中某一固定分布的小气泡群,扩束光在近距离探测较好,远距离探测时,受水质浊度影响大。细激光束在探测大密度分布的小气泡群时,受水质影响小,但对密度变化的区分能力弱。

由于实验条件限制,水中气泡密度的定量测量很困难,定量的分析还有待于进一步实验及外场测量。

参考文献

- 张建生,吕青,冀邦杰,等.实验室模拟尾流的光学研究.光子学报,2001,30(9):1146~1149
Zhang J S, Lv Q, Ji B J, et al. Acta Photonica Sinica, 2001,30(9):1146~1149
- 张建生,刘健康,冀邦杰,等.尾流气泡幕光学特性的数理模型.光子学报,2002,31(8):1032~1036
Zhang J S, Liu J K, Ji B J, et al. Acta Photonica Sinica, 2002,31(8):1032~1036
- David N, Thurston E G. The acoustical impedance of a bubbly mixture and its size distribution function. J O S A, 1950,22(1):20~23
- Bogucki D J, Domaradzki J A, Stramski D, et al. Comparison of near-forward light scattering on oceanic turbulence and particles. Appl Opt, 1996,37(1):4669~4677
- Bohren C F, Hoffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley, 1983. 530~531
- 陈养渭.天然水体中激光衰减的现场测量.舰船科学技术,2000,1:3~7
Chen Y W. Ship Science and Technology, 2000,1:3~7
- 纪延俊,何俊华,董晓娜,等.尾流气泡幕散射光的性质.光子学报,2004,33(8):1018~1020
Ji Y J, He J H, Dong X N, et al. Acta Photonica Sinica, 2004,33(8):1018~1020

Study of Attenuation Characteristic of Ship Wake's Backward Scattered Light Based on the Detection of Optical Power

Li Zengrong, Liu Jifang, Deng Zhongfang

School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-06-11

Abstract According to the Mie scattering theory, the backward light scattering power of air bubble appears as clear enhancement near 180° in the condition that the air bubbles are not relevant to each other. The experiment was done with the simulative ship wake. The attenuation characteristic of air bubbles' backward scattered light power was studied with 632.8 nm laser illumination in two conditions-slim beam illumination and expanded beam illumination. The experiment results indicate that considering the attenuation of light intensity as backward scattered light propagating in the water, expanded beam illumination has advantage when air bubbles is nearer and slim beam illumination is adapt to detect farther bubbles.

Keywords Ship wake; Air bubble; Backward scattered light; Backward scattered light power



Li Zengrong was born in Shanxi Province in 1981. He received his bachelor degree from Xidian University in 2003. Now he is a master candidate at the school of technical physics of Xidian University. His current research concentrate primarily on optical information processing.