

成,即气泡模拟装置、光源、数据采集系统。

气泡模拟装置在第三章中已经介绍过,其构成如图 3-7 所示。此外,该部分还应该包括实验用水槽,水槽的外形尺度在制作方面以鱼雷的外径为依据,其长度为 60cm,宽度、高度根据实验环境的要求确定,分别为 20cm 和 50cm,微孔陶瓷管置于水槽底部。

根据实用、廉价、便利等因素,以及气泡幕中气泡的尺度分布规律,选择的光源为 He-Ne 激光器,激光波长为 632.8nm。该激光器是从西北大学光学仪器厂采购的,激光管长度为 450mm,输出激光束的直径为 2.0mm,输出功率 $\geq 5\text{mW}$,漂移 $\pm 10\%$,发散角 $< 1.8\text{mrad}$,激光器使用 MSHN5-A-B 型氦氖激光器电源。该电源是一种高精度稳流高压电源,可点燃 250mm 和 450mm 两种规格的氦氖激光器,其尾流精度 $\leq 5\mu\text{A/V}$,输出电流为 4~12mA 连续可调,连续工作时间 > 8 小时,消耗功率 $< 50\text{W}$,采用市电供电电压。

表 7-1 照度计灵敏度

档 位	$\times 1$	$\times 10$	$\times 100$	$\times 1000$
灵敏度 (lx/mV)	0.173	1.37	13.7	137

信号采集系统主要由照度计、模拟数据采集卡、计算机等组成。为了方便地对照度计的测量数据进行读取和分析计算,与北京师范大学光电仪器厂的张保洲同志合作设计了一套在 Windows 界面运行的照度计数据采集程序。该程序的运行界面如图 7-1 所示程序中将采集频率(采集时间间隔)、量程等设置为可变参数。该程序将照度计探头采集的模拟数据以数字形式显示出来,并可对所采集的数据进行浏览、绘图等。照度计是北京师范大学光电仪器厂生产的 ST-80C 型照度计,带有液晶数字显示屏,在模拟输出状态下的灵敏度在表 7-1 给出。其光谱响应特性与相对视见函数(图 7-2)相同,在可见光范围的总体误差 $\leq 5\%$,响应时间 $> 0.1\text{s}$ 。数据采集卡采用 K-812 模入接口卡。实验系统的整体框图如图 7-3 给出,在该图中,实验使用的扩束镜没有表示出来。扩束镜是一个放大率为三倍的望远镜筒,它可将输出激光束的直径扩大为 6mm。

7.2. 激光通过实验室模拟尾流的衰减特性

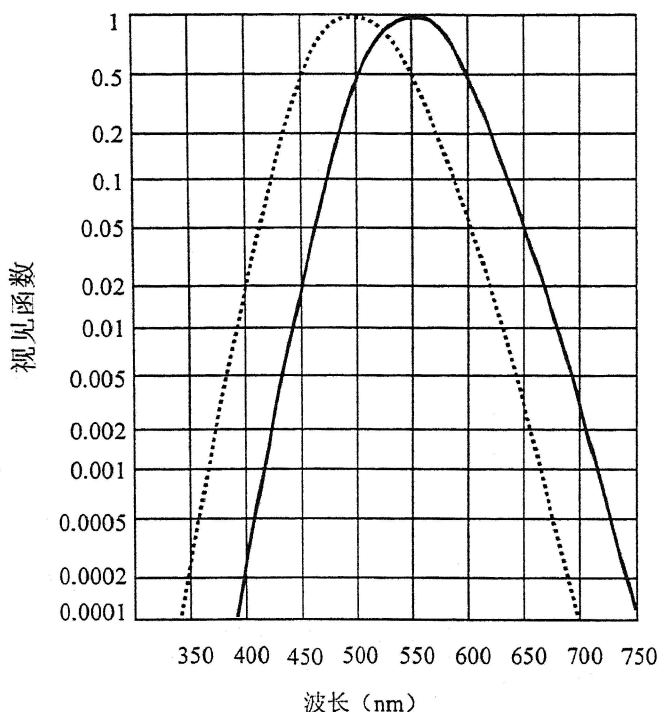


图 7-2 相对视觉函数实验曲线（虚线为夜间视觉，实线为日间视觉）

H_2-N_2 激光的波长为 632.8nm，显然这一波长比声波的波长短很多数量级。激光在水中的衰减比声波大得多，即使在传播损失最小的蓝—绿通道，激光在海水中的传播距离也很难超过 200m。正因如此，决定了激光对传播介质变化的感知要比声波灵敏得多，可望实现尾流的远距离探测和基于尾流光学特性的鱼

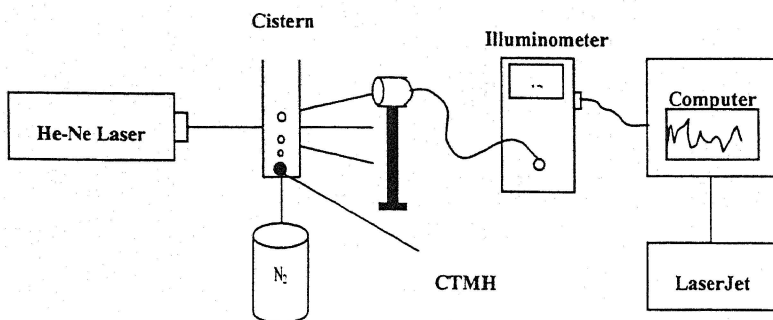


图 7-3 气幕的光学特性实验系统装置图
Fig.7-3 Scheme of experimental apparatus

雷制导，使尾流自导鱼雷的作用距离与传统的声波、超声波自导鱼雷的作用距

离相比，将会显著地增加。

舰船尾流中含有大量不同直径的气泡，这些气泡组成了连续的气泡幕。其中较大的气泡会很快上升至海面破裂、消失，较小的气泡在海水中的存活时间达几十分钟，随着时间的进一步延长，这些气泡也会被海水溶化或上升到海面破裂消失。单位体积内气泡体积之和称为气泡的体积分数，通常气泡的体积分数非常小。由于空气的密度和压缩率明显地与海水不同，且尾流介质中的湍流运动影响着气泡具体结构的动力学特性，从而导致了尾流的不均匀，这些因素无疑对声、光波在水中的传播将产生明显的影响。因此，对激光通过实验室模拟尾流的特性进行研究具有十分重要理论和实际意义。

7.2.1 无气泡幕时激光的衰减特性

为了对激光在模拟尾流中的特性做出较为全面的认识，首先对实验用激光器的输出激光在实验室条件下、在空气介质中的传输特性进行了实验。无水池时，对于激光器激发电流为饱和（10.0mA）与次饱和（7.0mA）、对光束扩束（ $\times 3$ ）与不扩束等情况进行了研究。实验时照度值可以从照度计本身的窗口读取，

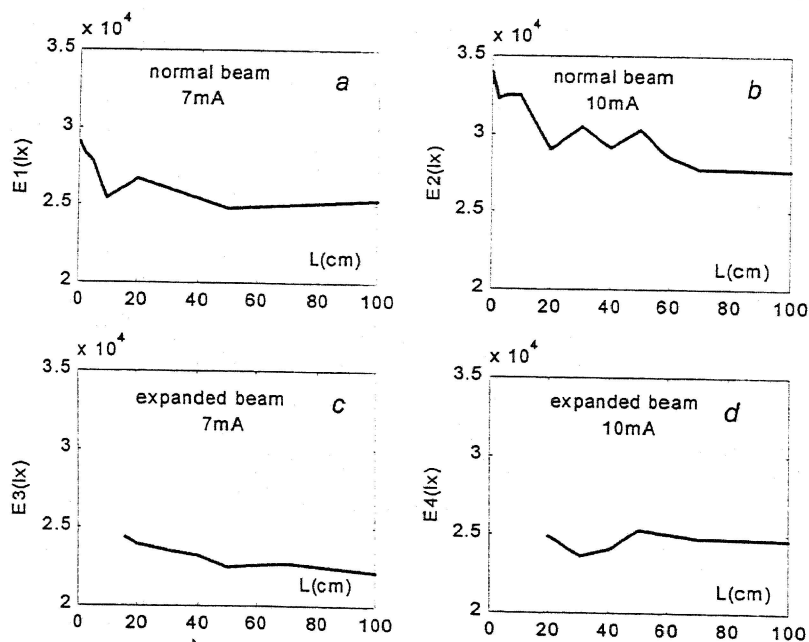


图 7-4 空气中激光随 L 的衰减曲线

也可以通过采集数据取其平均值获得。我们的数据是通过采集数据并取平均值

而得到的。

用 L 表示激光器输出窗口到照度计探头的距离，单位 cm ； E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 分别表示不扩束时激发电流为次饱和（7.0mA）与饱和（10.0mA）情况下的照度以及扩束时相应的照度，单位均为 lx 。图 7-4 给出了 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 随 L 变化关系。 a 、 b 、 c 、 d 分别表示不扩束时激光器激发电流为 7.0mA 和 10.0mA、扩束时激发电流为 7.0mA 和 10.0mA 的照度变化。

从图 7-4 容易看出，在相同的激发电流下，无扩束时的输出所引起的照度明显地大于有扩束时的情况，这是由于存在着散射的影响，使得宽光束在介质中的衰减较窄光束更为明显。不同的激发电流下，激光器的输出不同；照度随 L 的增加而减小；无扩束时曲线的斜率大于有扩束时的斜率。其原因是照度计的探头并非是一个几何点，其受光面为直径 10mm 的圆形，所以采集的光信息除了透射部分，还包含着散射角不大于 5° 的散射光，扩束后探头接收到的光信号中透射光占的比例远大于不扩束时的情况，这样无扩束时的曲线就要比有扩束时的曲线要陡。

但是不管是扩束还是不扩束的情况，光的强度（这里是照度）随光束离开光源的距离的变化具有

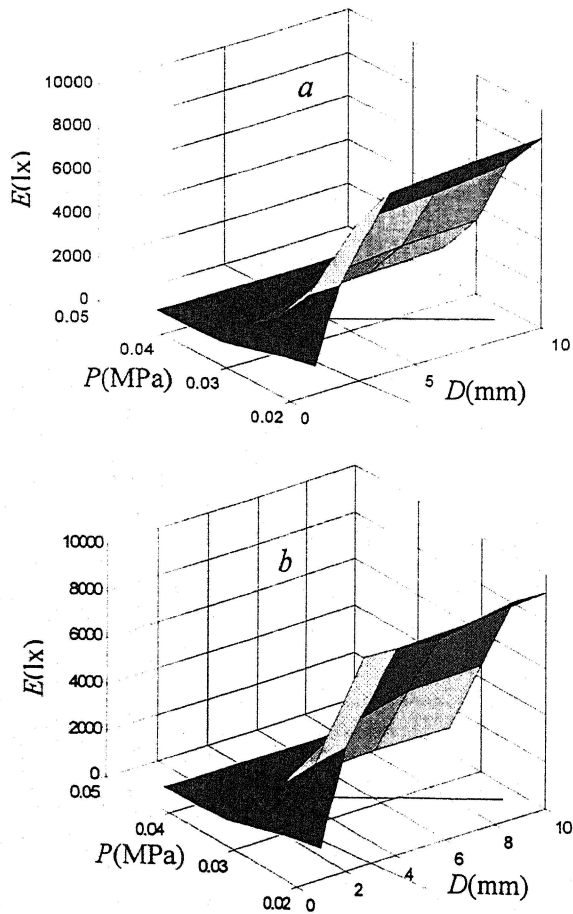


图 7-5 照度-气压-光阑孔径的三维图
(a 有扩束时； b 无扩束时)

相似的规律，都可以归结为朗伯定律的表示形式，如(4-01)所示，只是衰减系数的大小稍有不同。

在水槽中的水为静态情况下，进行了与上面相同的测量，测量结果与上述情况相比，照度的绝对值减小，然而随着 L 的衰减规律基本相同。照度绝对值的减小是容易理解的，因为水中激光的衰减系数大于空气介质中的衰减。考虑到实验时激光要穿过水槽的两侧玻璃壁，无疑使得衰减加大；且玻璃壁表面可能存在附着物，同样会使得衰减增加，这些附着物还有可能具有流动性，从而使得衰减出现一定范围的波动。正因为如此，在盛水的水槽在位情况下，与空气中的情况相比有个别测量数据的畸变是可能的和合理的。

7.2.2 不同气体压强下激光透射光的照度

激光器激发电流为饱和值10mA，对不同气压下所产生的气泡幕分别在对光束进行扩束和不扩束两种情况下进行了激光的穿透实验。我们测量了扩束($\times 3$)和不扩束情况下光阑孔径(圆孔直径)分别为1、2、4、7、10mm，气压为0.020、0.025、0.030、0.035、0.040、0.045MPa时透射光的照度值，其中照度值是通过采集数据并取其平均值得到的。由此可以绘制出照度-气压-光阑孔径的三维图如图7-5所示。图7-5a为有扩束时的三维图，图7-5b为无扩束时的三维图。图7-5中 E 、 P 、 D 分别表示透射光照度、气体压强和光阑孔径，单位分别为lx、MPa和mm。

从图7-5可看出，在一定气体压强下，照度随着光阑孔径的增大而增加，当光阑孔径小于4mm，基本呈线性增加，当光阑孔径大于4mm，增加较为缓慢，并在光阑孔径等于10mm时接近饱和。这是因为经扩束后，激光光束的束宽约为 $2 \times 3\text{mm} = 6\text{mm}$ ，当光阑孔径小的时候，照度计探头收集的光信号仅为透射光束的一部分，而当光阑孔径较大时，照度计探头收集的光信号包含了透射光束的全部，还包含了能量远小于透射光的散射角 $< 5^\circ$ 的散射光。

在一定的光阑孔径下，随着气体压强的增加，照度迅速减小，当气体压强大于0.035MPa时，照度减小到很小的值。这一减小容易理解，随着气体压力的增加，气泡幕的强度增加很快，强烈的反射、折射以及散射效应使得透射光的能量迅速减少。有扩束时的照度大于无扩束时的照度(个别值除外)，这是由于当

光束通过气泡幕时，光束遇到通过光束的气泡会产生反射和折射现象，对于窄光束反射和折射所损失的能量必然高于宽光束的情况。对于窄光束，如遇到较大的气泡，反射和折射使其透射光能量可能损失极大比例，甚至于发生全反射现象；宽光束遇到同样大小的气泡时，光束的反射和折射损失就会小得多，因其中的一部分会以很小的入射角照射到气泡表面。

这里得到的照度随压强的变化关系可用下式近似表示出来：

$$E = e^{-(100P-2)^2} \quad (7-01)$$

其中气体压强 P 的单位仍然用 MPa,

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

利用数据采集系统对不同情况进行数据采集，采集时的采样时间间隔均为 0.1s，每次采样的总数据不少于 500 个，即总采样时间均在 50s 以上。图 7-6 是气体压力为 0.035MPa 时所得透射光照度随时间变化的曲线，此时水池中有强气泡幕。图中横坐标为时间轴，单位是 $10^{-1}s$ ，纵坐标为照度值，单位勒克司 (lx)。若不特别强调，以下照度随时间的变化曲线中坐标轴的含义以及单位与此相同。

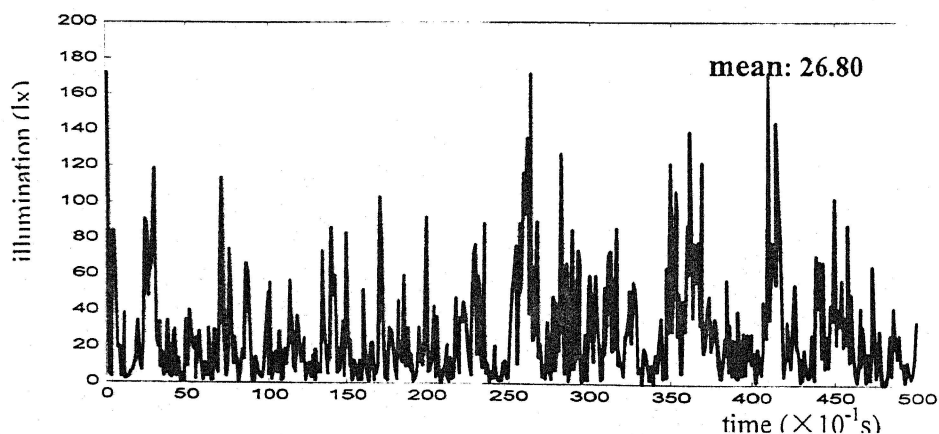


图 7-6 有气幕时透射光照度随时间的变化

实验测量结果表明，无气泡幕时照度基本不随时间发生变化，照度平均值为 $2.7080 \times 10^4 \text{lx}$ ，而图 7-6 中的平均值为 26.80lx，前者约等于后者的 1010 多倍，从能量的角度看，有无气幕时的区别是十分明显的；拿工程惯用的计量单位分

贝来说, 两种情况下平均能量的差别为 $10 \log \frac{2.7080 \times 10^4}{26.8} \cong 30 \text{ dB}$, 这一差别用于检测无疑足够大。

为了从多种途径来判断气泡幕的存在与否, 我们可定义一个特征量:

$$\zeta = \frac{\sigma}{\bar{E}} \quad (7-02)$$

其中 σ 、 \bar{E} 分别表示透射光照度采样数据的标准差和平均值, ζ 我们可称为相对标准差, 式中标准差、平均值指的是透射光照度的标准差和平均值。无气泡幕的情形里, 相对标准差 $\zeta=0.0983$, 而在图 7-6 的情形里相对标准差 $\zeta=1.0722$, 后者是前者的 10 倍以上。显然, 利用相对标准差这一特征量来判断气泡幕的存在与否也是可行的。

7.3 He-Ne 激光通过模拟尾流气泡幕的散射特性

实验表明, He-Ne 激光通过模拟尾流的散射光能量主要集中在前向散射, 而且随着散射角的增加迅速减小; 90° 散射以及背散射光的强度非常弱, 所引起的照度 $< 0.173 \text{ lx}$, 所以对散射特性观测与测量主要针对前向散射光。实验时, 激光器到聚光透镜的总距离为 90.0 cm , 实验所使用聚光透镜的焦距为 $f=10.0 \text{ cm}$, 激光器的输出电流为 10 mA 。对于各种情况下的散射特性, 分别作了对激光束进行扩束($\times 3$)、不扩束两种不同光束宽度条件下的测量。

7.3.1 无水池时前向散射光照度

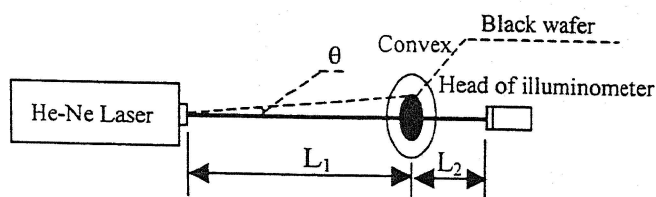


图 7-7 无水池时的光路图

当光路中无水池时, 实验光路图如图 7-7 所示。图中 θ 为激光器的出光口到黑色光阑(紧贴聚光透镜)边缘的连线与光轴之间的夹角, $L_1=90.0 \text{ cm}$ 、 $L_2=10.0 \text{ cm}$ 分别为激光器到聚光透镜的距离和透镜到照度计探头的距离。由于黑色光阑的

线度远大于光波之波长，所以衍射效应可不予考虑，也就是说照度计探头采集的光信号主要为散射光。实验用黑色光阑的直径为 $D=0.510、0.834、1.028、1.118、1.334、2.000、2.500、3.000、3.500\text{cm}$ ，对应于角度 $\theta=0.162、0.265、0.327、0.356、0.425、0.636、0.796、0.955、1.114^\circ$ ；照度计采样间隔 $\Delta t=0.1\text{s}$ 。图 7-8 显示了对应于不同散射角度 θ 时散射光照度随时间的变化，图中 $a、b、c、d、e、f$ 分别对应于 $\theta=0.162、0.327、0.636、0.796、0.955$ 和 1.114° 六个散射角不扩束时散射光照度随时间的变化，图 7-9 $a、b、c、d、e、f$ 分别是对应于该六个散射角在扩束条件下散射光随时间的变化。从图 7-8、9 可以得到对应于不同散射角的散射光平均照度，不扩束、扩束两种情况下平均照度随角度的变化关系绘于图 7-9，其中 $a、b$ 分别对应于不扩束和扩束的情况。

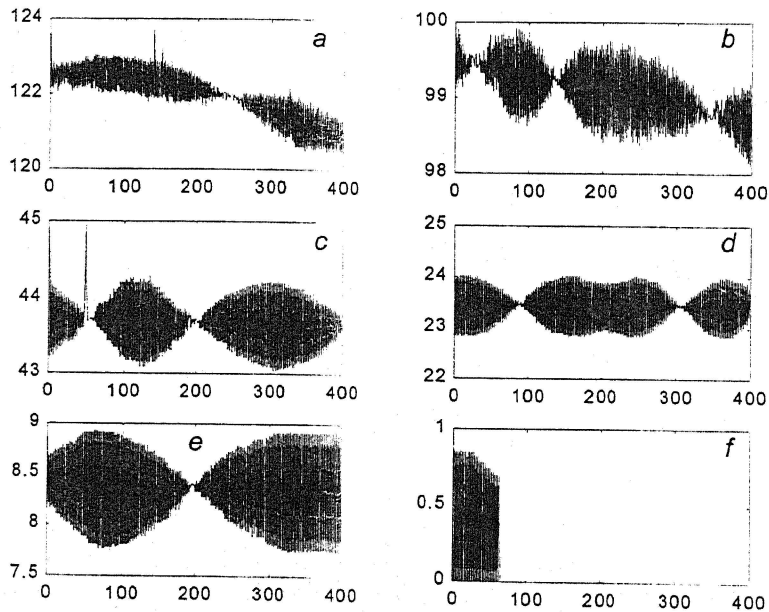


图 7-8 无水槽时不扩束条件下前向散射光随时间的变化

由图 7-8 可以看出，对应于一定的散射角 θ ，散射光的照度随时间呈缓慢的周期变化，变化周期在 $5\sim 15\text{s}$ 范围，变化的幅度 $\leq 10\%$ ，如果将第六章中的表达式 (6-16) 应用于空气介质的散射，按照散射光强度对于散射角的周期性分布，不能够直接解释此处出现的对于时间的周期性。在此可以认为，是散射光强度随时间的变化受关于散射角分布周期性的调制，从而出现散射光照度随时间的周期性变化。再考虑到激光器电源的稳流精度、以及激光管的稳定性，这

种周期性是不难理解的。此外，当角度 θ 较小时，散射光照度的相对标准差较

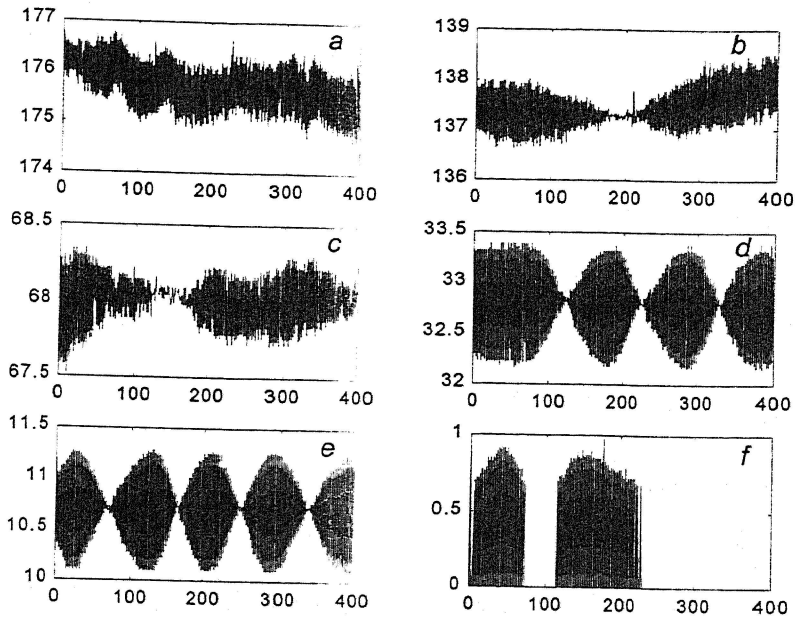


图 7-9 无水槽时扩束条件下前向散射光随时间的变化

小，随着 θ 的增加，相对标准差逐渐增加（从 0.0056~3.3488），这是因为随着角度 θ 的增大，照度计采集到的光信号仅包含较大散射角范围的散射信号，故其平均散射光照度会响应地减小，而且所采集的光信号中叠加了激光器外壳的透光信号，这一透光信号虽然很小，但作为一个仅决定于电源和激光管特性的

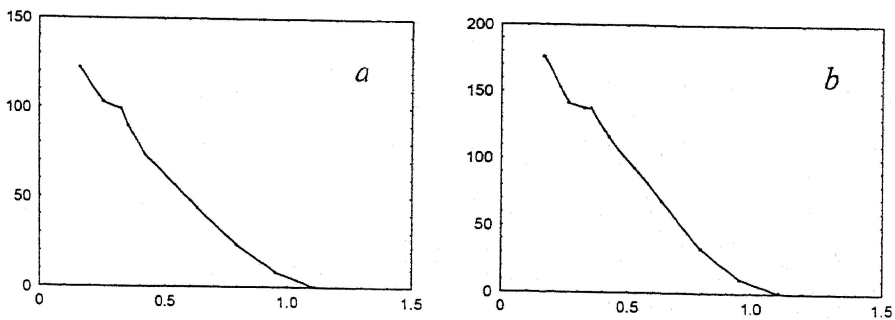


图 7-10 无水槽时散射光平均强度随角度 θ 的变化 a)不扩束； b)扩束

影响因素，它是一个常量，从而使得相对标准差随着角度 θ 的增大而增加。由图 7-8、9 均可看出，随着角度 θ 的增大激光扩束与不扩束两种情况下的散射光

照度都在减小；对于相同直径的黑光阑，扩束时散射光的照度大于不扩束时散射光的照度。图 7-10 是从图 7-8、9 得到的不扩束、扩束两种情况下散射光照度随散射角 θ （黑光阑孔径）的变化关系，图中 *a*、*b* 分别对应于不扩束和扩束的情况。从图 7-10 中可直观地看出，两种情况下散射光照度随散射角 θ （或黑光阑直径）变化的快慢接近。

7.3.2 水池无水时前向散射光照度

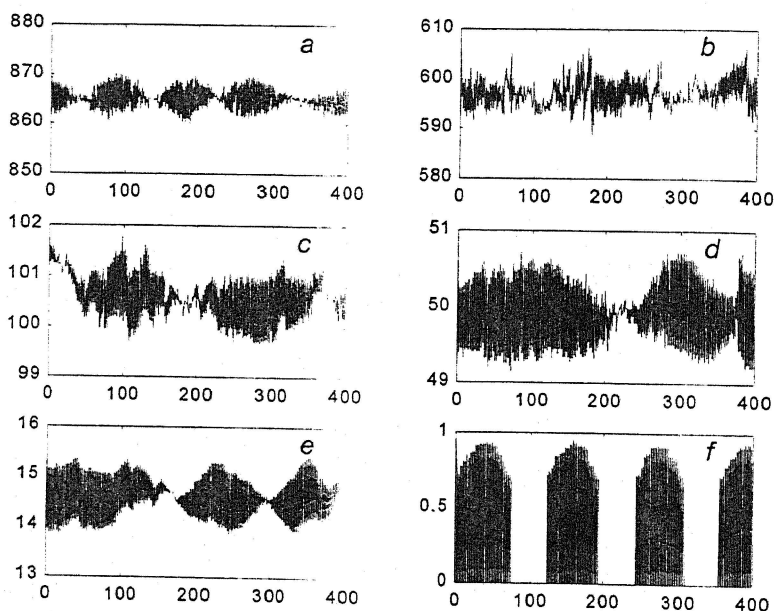


图 7-11 水槽无水时不扩束条件下前向散射光随时间的变化

在水池无水状态下，对应于不同角度 θ 、不扩束时散射光照度随时间的变化由图 7-11 给出，图中横坐标为时间（单位 $10^{-1}s$ ），纵坐标为照度值（单位 lx），图中 *a*、*b*、*c*、*d*、*e*、*f* 分别对应于 $\theta = 0.162$ 、 0.327 、 0.636 、 0.796 、 0.955 和 1.114 ° 六个散射角；而图 7-12 给出的是扩束条件下对应的散射光照度随时间的变化。在水槽无水情况下，不同不同散射角散射光的平均照度随散射角的变化关系则由图 7-13 给出，该图是根据图 7-11、12 中得出的数据划出的。实验条件与上相同，水池置于 L_1 间，水池为长方体形，无色玻璃厚 5mm，其外尺度为长 \times 宽 \times 高 = $60 \times 20 \times 50 \text{cm}^3$ ，水池纵放，即沿光轴方向为 60cm。

由图 7-11、12、13 容易看出，水池无水时散射光照度的变化规律同无水池

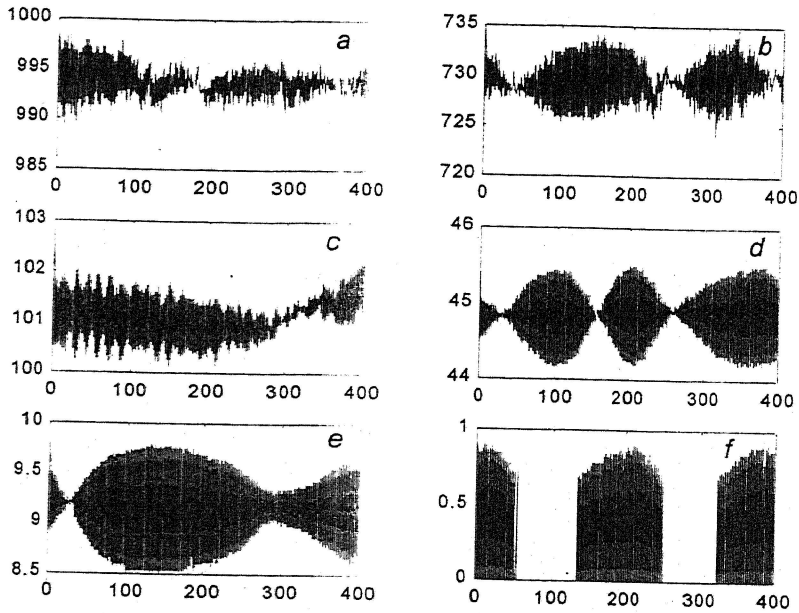


图 7-12 水槽无水时扩束条件下前向散射光随时间的变化

时的情况基本相同，但就绝对数值而言，有水池时的照度大于无水池时的照度约一个数量级，这是因为水池本身的玻璃壁对激光的散射所造成的。其次，有水池时散射光照度随角度 θ 的变化较快，而当 $\theta = 1.114^\circ$ 时散射光照度不等于

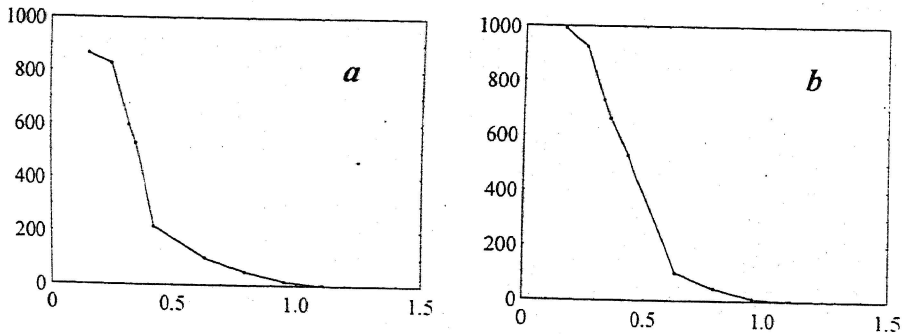


图 7-13 水槽无水时散射光平均强度随散射角 θ 的变化
a)不扩束; b)扩束

零，这与无水池时该 θ 角对应的散射光照度接近于零不同。之所以产生这一结果，是因为当光路中放置有水池时，由于水池玻璃壁的作用，产生较强的散射光，而且分布在较大的散射角范围。

7.3.3 水池静水时前向散射光照度

当水池有水而不产生气泡幕时,我们在与 7.3.2 同样的条件下对散射光照度进行了测量,图 7-14、15 分别是该条件下对应于不同散射角 θ 时、不扩束与扩束两种情形下散射光强度随时间的变化,散射光平均照度随散射角的变化则在图 7-16 给出。

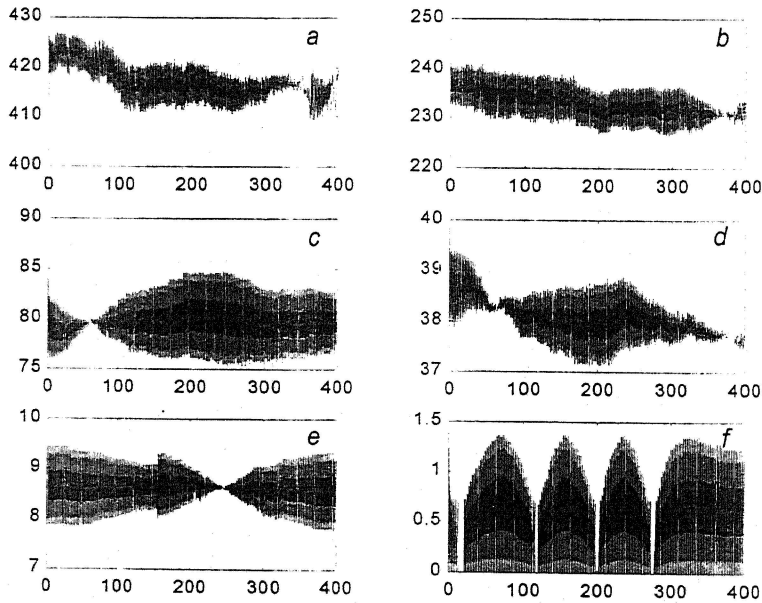


图 7-14 水槽中水在静态时、无扩束条件下散射光照度随时间的变化

从图 7-14、15、16 中容易看出,当水池有水时,对应于一定的散射角 θ ,散射光照度大于无水池时的照度而小于水池无水时的照度。如当 $\theta = 0.162^\circ$ 时,无水池时照度平均值为 121.7lx (不扩束) 和 175.6lx (扩束),水池无水时等于 865.0lx (不扩束) 和 993.7lx (扩束),而水池有水而不产生气泡幕时等于 416.6lx (不扩束) 和 510.5lx (扩束)。一方面水池有水时,水对激光束的衰减(包括吸收、散射等)占主要部分,在加上水池的玻璃壁对激光束的衰减外,所以在这种情况下对激光束的散射肯定强于上述两种情况,当 $\theta = 1.114^\circ$ 时散射光照度大于其它两种情况下的照度值,这种情形下散射光的能量分布在更大一些的角度范围;另一方面,水介质对激光束的衰减(吸收、散射)很强,远大于空

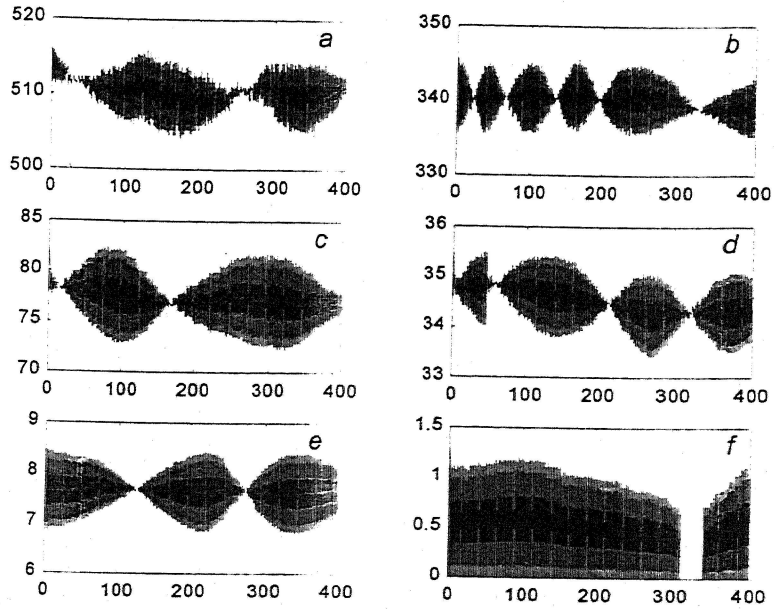


图 7-15 水槽中水在静态时、扩束情况下散射光照度随时间的变化

气介质对其衰减，所以在一定角度 θ 下，散射光照度小于相同角度 θ 时水池无水的情况。

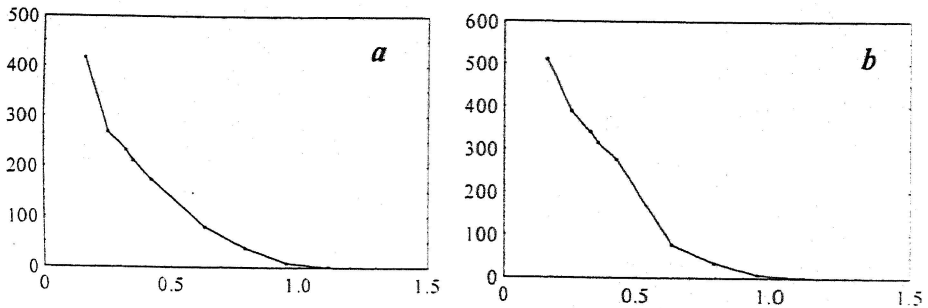


图 7-16 水池水为静态时散射光平均强度随散射角 θ 的变化
a) 不扩束: b) 扩束

对比图 7-10、13、16，明显地在图 7-10 的情形里，散射光照度随散射角的变化在 θ 较大时快一些，而在图 7-13、16 中，对应的变化要缓慢一些。这是由于只有空气介质时，散射光的能量分布在较小的散射角范围，而在光路中插入

水池时，由于水池玻璃壁、水介质的存在，使得散射光的能量分布于较大的散射角范围，除了数量级以外，粗略看来图 7-13、16 并无大的区别，但仔细观察仍能看出当 θ 较大时图 7-16 中散射光照度的变化比图 7-13 的情形快一些，这也可以从实验数据直接看出。

7.3.4 不同气体压强下通过气泡幕的前向散射

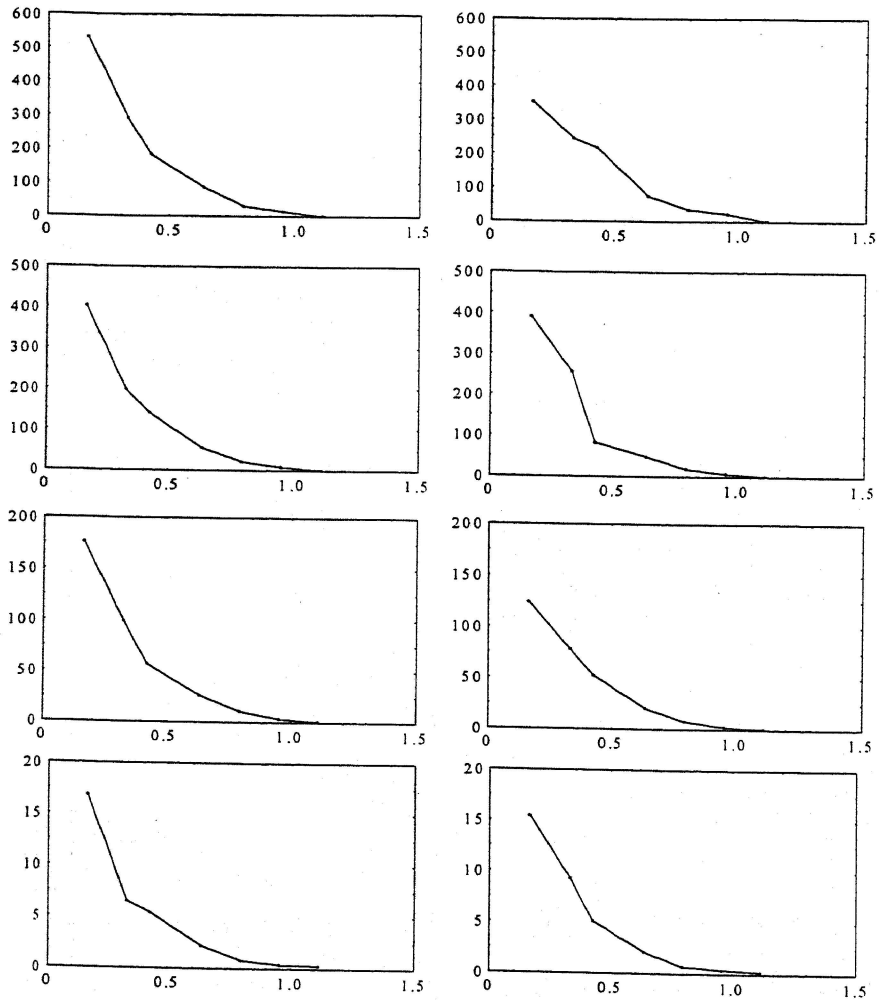


图 7-25 不同气体压强下散射光平均照度随散射角的变化，从上到下压强分别对应于气体压强 0.025、0.030、0.035、0.040MPa，左) 不扩束；右) 扩束。

调节减压阀，可以在不同的气体压强下产生气泡幕。在气体压强为 0.025、

0.030、0.035、0.040MPa 下，对激光束通过气泡幕的散射光照度进行了测量，图 7-17、19、21、23 分别是不同气体压强下对应于不同散射角 $\theta = 0.162$ 、 0.327 、 0.636 、 0.796 、 0.955 和 1.114° 、不扩束条件下散射光照度随时间的变化曲线，图 7-18、20、22、24 则是上述散射角对应的扩束条件下散射光引起的照度随时间的变化曲线。

由图 7-17~24 可清楚地看出，在某一气体压强下，随着黑光阑直径的增加，散射光照度的平均值基本单调减小，出现这一结果的原因如 7.3.2、7.3.3 所述；在不同压强下，对应于相同的黑光阑直径散射光照度随着气体压强的增加而减小；对于前面的几种情况，扩束、不扩束两种条件下散射光照度的平均值有明显的区别，对应于所有的黑光阑直径，扩束时散射光照度的平均值都大于不扩束时散射光照度的平均值，而通过气泡幕的情形有所不同，扩束与不扩束时散射光照度的平均值并无明显的大小关系，这可从图 7-25 容易观察到。而且，随着气体压强的增大，散射光照度随散射角 θ 的减小速率变缓。

为了对几种气体压强下

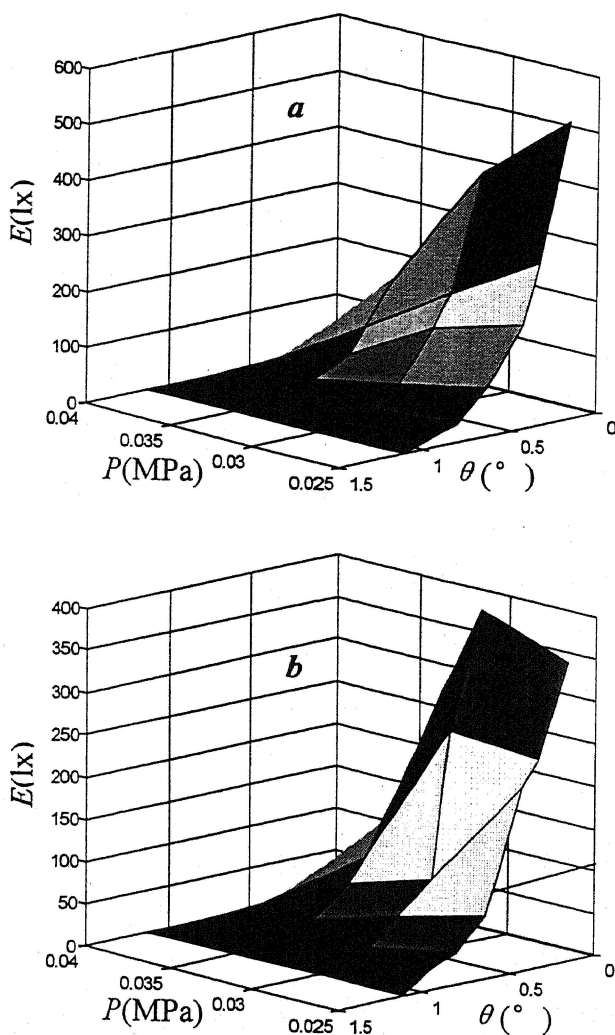


图 7-26 照度-气压-光阑孔径的三维图
(a 无扩束时；b 有扩束时)

不同黑光阑直径对应的散射光照度进行对比分析,还可以绘出散射光照度-黑光阑直径-气体压强的三维图,图 7-26 即是由此绘制的该三维图,图中 E 、 P 、 D 分别表示散射光照度、气体压强和黑光阑孔径,单位分别为 lx、MPa 和 mm.

从原始数据以及所绘制图形的分析中,还可以发现当黑光阑直径逐渐增加时,散射光照度中相当于不变量的周期性散射光信号在总照度中的效应越来越明显,并当黑光阑直径达到 3.5mm (相当于角度 $\theta = 1.114^\circ$) 时在总的散射光照度中仅保留了这一部分,这与前面的分析是相同的。

与第六章的计算结果图 6-6、7 对比分析,该二图给出了散射光的强度随散射角的变化关系,图中给出的散射光强度为相对强度。图 7-17~24 是四个不同气体压强下散射光引起照度的测量曲线,经多次重复测量,所得结果的一致性非常好;这些图中对应于每一个散射角的照度事实上是该散射角 θ 到散射角 $\theta_{max} = 1.114^\circ$ 范围的散射光引起的照度,所以随着散射角的增大照度单调减小是必然的。从相邻散射角照度的差值来看,照度同样是随着散射角的增加而单调减小,这与计算结果的周期性变化的结论有区别。这种差异一方面是由于在计算的过程中采用了很多近似算法,且在最终计算散射光强度时算法工具忽略了虚数项引起的;另一方面,计算过程中忽略了 $p > 1$ 的光线,而这些光线对散射的贡献将会在与 $p = 0、1$ 光线的干涉过程中对散射光的强度产生影响;第三个因素是在所建立的理论模型中,气泡数密度对气体压强的依赖关系取线性关系,从而造成了气泡数密度对于压强的依赖成为弱依赖,气泡数密度对于气体压强的真实依赖关系可能是非线性关系,但这一因素对仅对散射光的相对强度大小产生影响,对周期性不产生效果,而且,气泡数密度随气体压强的变化主要是由微孔陶瓷管的特性决定的。

图 6-6、7 给出的是强度随散射角的变化。如果借用量子力学中有关能量与时间关系(能量与时间相联系,能量是时间的指数函数,具体形式如定态薛定谔方程)的概念,则能够定性地理解散射光引起的照度随时间的周期性变化,以及同一散射角下强度随时间变化中出现的周期不等的现象。

在一定的气体压强下, a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 分别给出了不同散射角对应的散射光强度, 并按 $a\sim f$ 的顺序散射角依次增大, 从图中 $a\sim f$ 的顺序变化, 散射光强度随时间的周期性逐渐显现出来。当散射角较小时, 照度计探头接受到的信号即包括大于该散射角的散射光线的能量, 同时还包含小入射角光线的折射光。虽然沿着光束很短长度范围 (图 6-2) 的气泡数具有一定的统计分布规律, 但对于 60cm 长度范围而言, 某一时刻光束中有多少气泡却存在着极大的涨落, 所以与小散射角对应的照度呈现出剧烈的振荡起伏, 随着散射角的增大, 照度计探头接收到的信号逐渐由散射光占主导, 因而在较大散射角时散射光照度随时间的变化在不同气体压强下、不扩束与扩束两种条件下都呈现出相似的、极强的周期性。这种周期性可认为是散射光强度对散射角的周期性对其时间周期性的调制作用产生的。

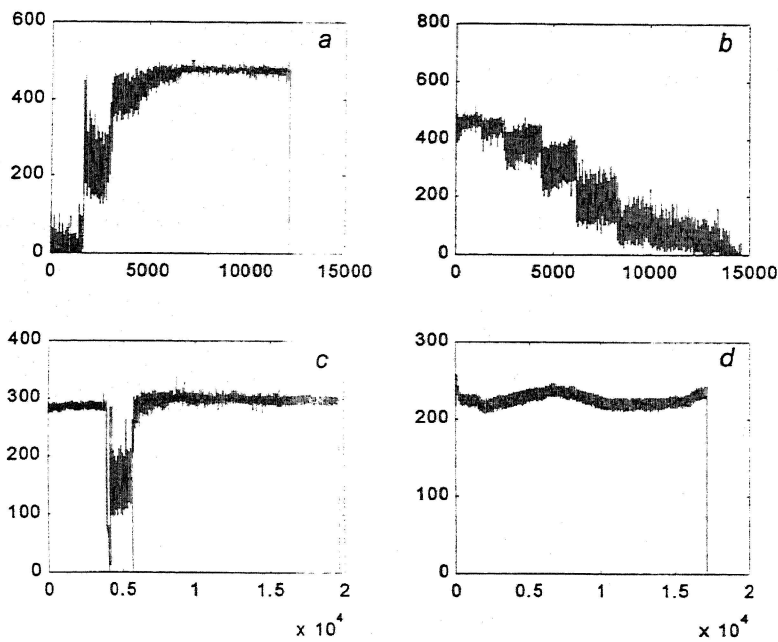


图 7-27 散射光照度随时间的变化关系

a 气体压强由 0.030MPa 减小到 0; b 气体压强由 0 增加到 0.045MPa; c 气体压强由 0 增加到 0.030MPa 再减小到 0; d 气泡幕关闭足够长时间后。

对应于不同的散射角, 所反映出的周期性具有不同的周期, 这应该与散射光计算结果中出现的不同精细结构有关。

为了对不同气体压强下散射光照度的变化有一个更为清楚的反映，做了同一散射角、不同气体压强条件下散射光照度的测量。

7.3.5 不同气体压强下散射光照度的变化

图 7-27 给出了扩束情况下前向散射光照度随时间的变化关系，图中横坐标为时间，纵坐标为照度（单位 lx），其中 a 是所使用的气体压强从 0.030MPa 阶梯形减小到零的过程中散射光照度的变化，实验时黑光阑的直径用 0.510cm，采集数据的频率为 0.1s，图中横坐标单位 $10^{-1}s$ ； b 是气体压强从零阶梯形增加到 0.045MPa 条件下得到的相应变化曲线，其它实验条件与 a 相同，图中横坐标单位 $10^{-1}s$ ； c 是气体压强由 0 增加到 0.030MPa 后再减小到零的散射光照度曲线，实验使用 0.834cm 的黑光阑（对应于散射角 0.265° ），采集频率为 0.5s，图中横坐标单位 0.5s； d 是在气源关闭近 20 小时之后开始测量的散射光照度，黑光阑直径为 0.834cm，数据采集频率 5s，总采样时间持续为 $17116 \times 5s$ ，即持续约一天，图中横坐标时间单位是 5s。

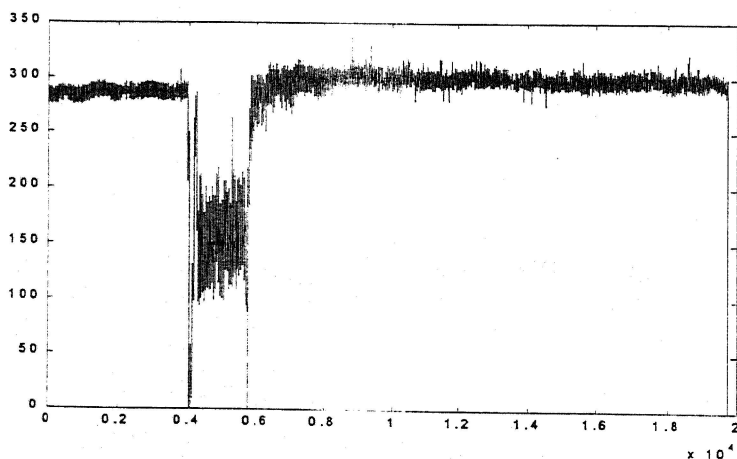


图 7-28 采样频率为 1/0.1s 下散射光照度

在图 7-27 中可以很清楚地看到，随着气体压强的变化，散射光照度的变化是非常明显的，气体压强越大，散射光照度越小，反之亦然。从图中 c 看来，在关闭气源之后，散射光照度在 2500~4500 点（对应的时间间隔为 $2000 \times 0.5s=1000s$ ）期间缓慢地减小，之后基本保持不变，这说明水池中气泡幕的存活时间约为 1000s 左右，类似的情况也可以在图 7-28 中看到。图 7-28 是在与图

7-27c 相同条件下采集频率为 0.1s 时得到的散射光照度, 图中横坐标为时间轴 (单位 $10^{-1}s$), 纵坐标为照度值 (单位 lx), 从中也可以看到, 在关闭气源后的约 1000s ($0.6\sim 1.6\times 10^4$ 点) 内, 散射光照度呈缓慢的下降趋势, 之后基本保持为常数。

为了进一步证实关闭气源足够时间后散射光照度的变化, 实验在关闭气源 20 小时之后对散射光照度继续进行测量, 利用 0.834cm 的黑光阑、数据采集频率为 5s 的条件连续近 24 小时测量, 所得到的结果如图 7-27d 所示。从测量结果来看, 在测量期间, 除了光源、电源本身的波动造成散射光照度的缓慢起伏, 再无明显变化, 所以可以肯定, 在关闭气源之后经较长时间, 水中基本不再存在气泡, 响应地散射光的照度也不再有明显变化。

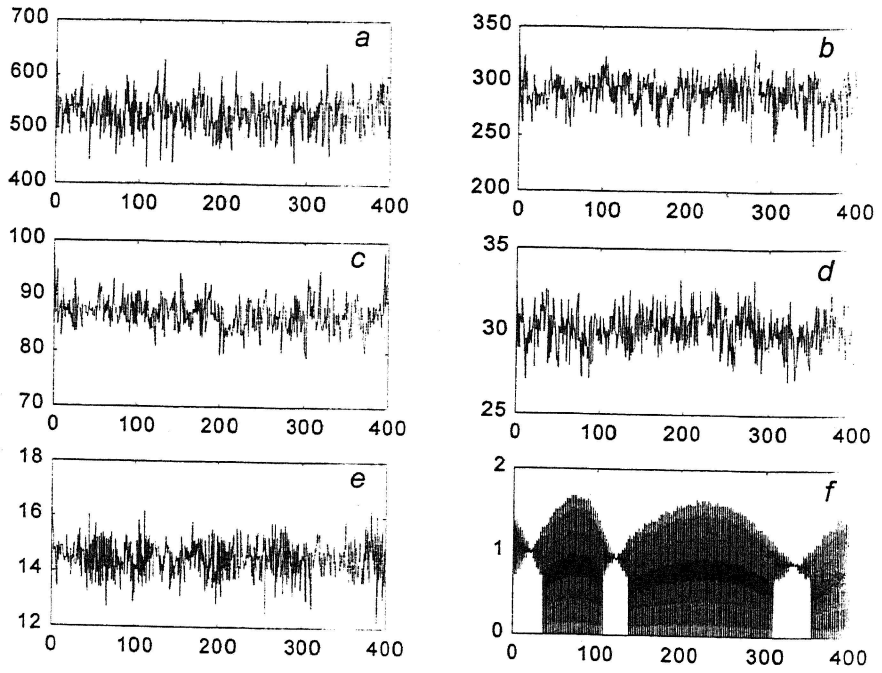


图 7-17 气体压强为 0.025MPa、不扩束情况下前向散射光引起的照度

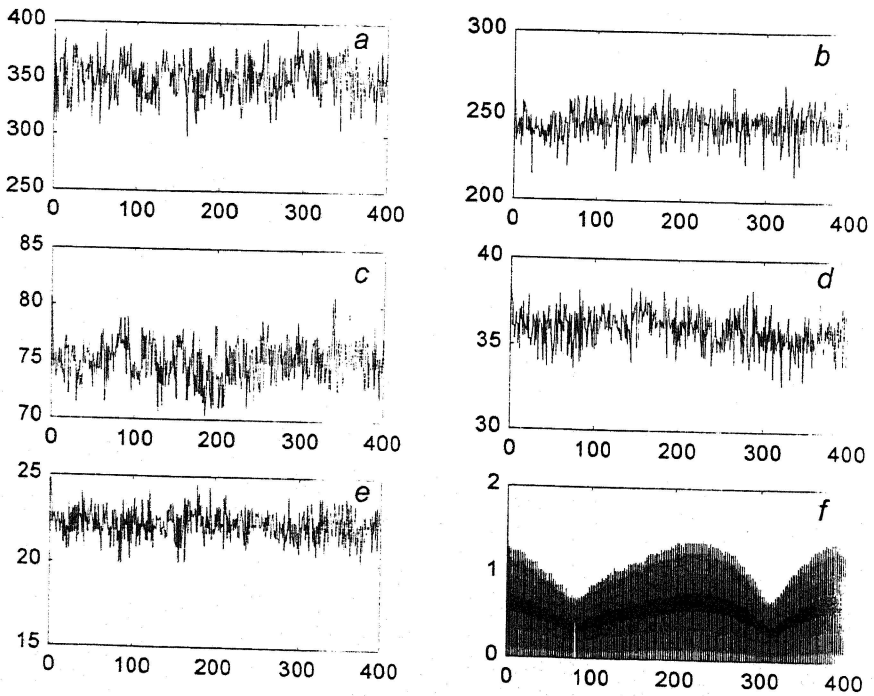


图 7-18 气体压强为 0.025MPa、扩束情况下前向散射光引起的照度

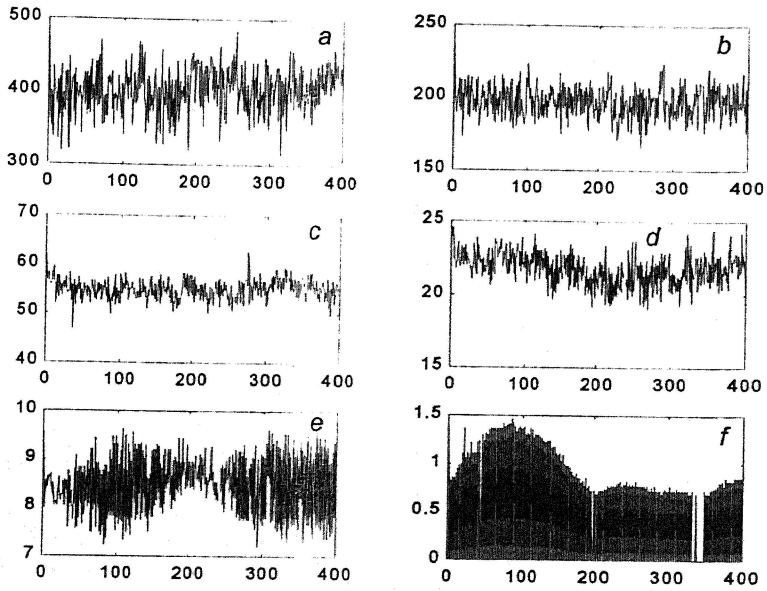


图 7-19 气体压强为 0.030MPa、不扩束情况下前向散射光引起的照度

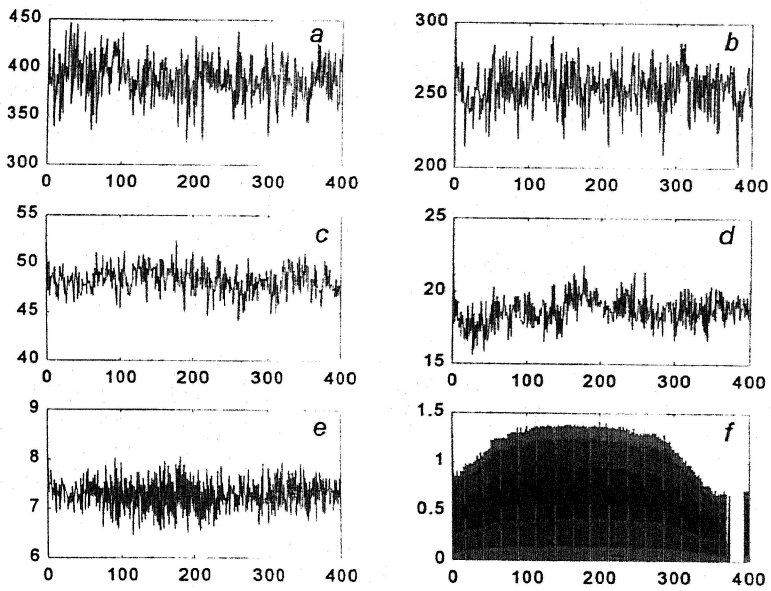


图 7-20 气体压强为 0.030MPa、扩束情况下前向散射光引起的照度

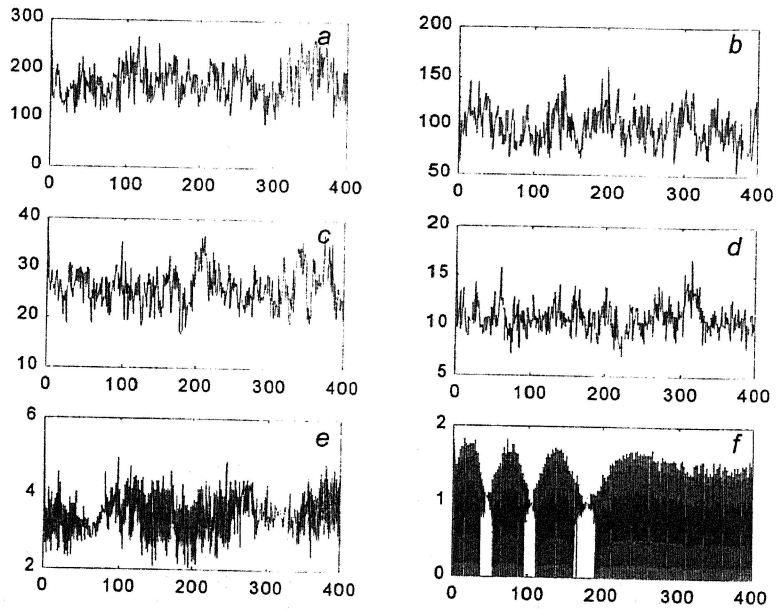


图 7-21 气体压强为 0.035MPa、不扩束情况下前向散射光引起的照度

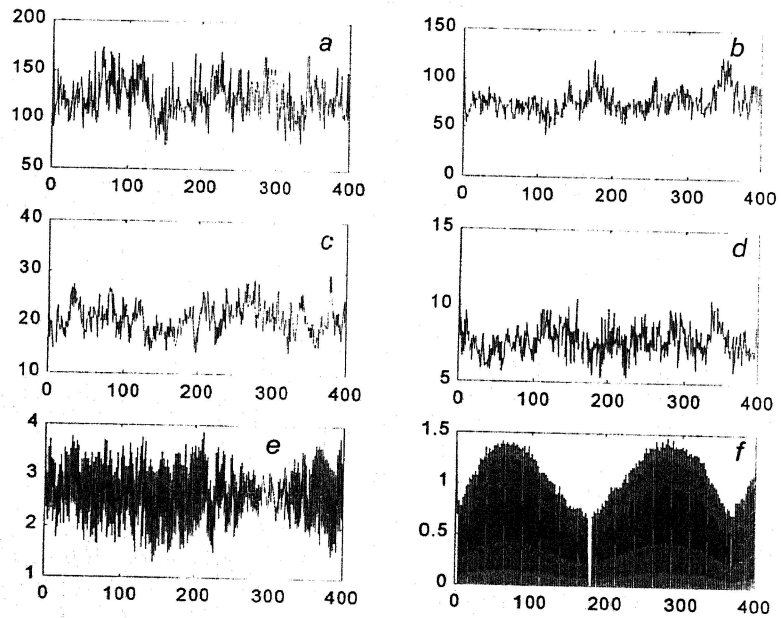


图 7-22 气体压强为 0.035MPa、扩束情况下前向散射光引起的照度

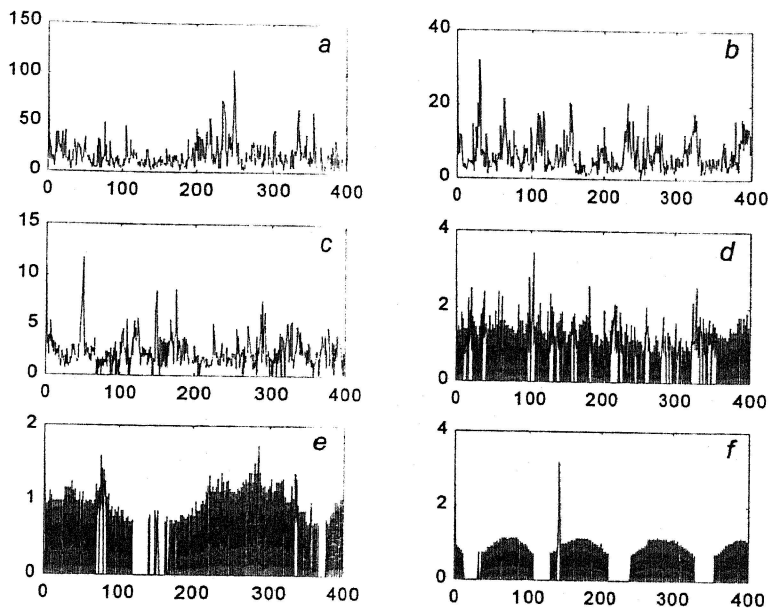


图 7-23 气体压强为 0.040MPa、不扩束情况下
前向散射光引起的照度

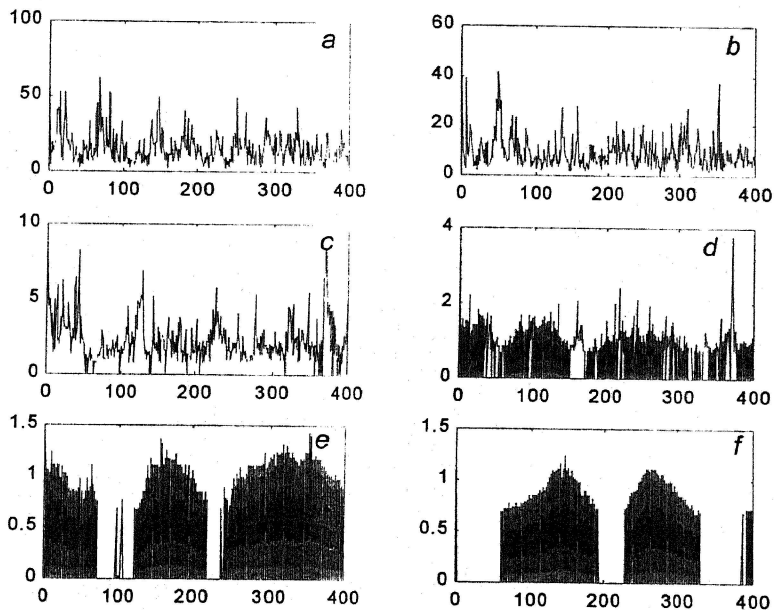


图 7-24 气体压强为 0.040MPa、不扩束情况下
前向散射光引起的照度

第八章 真实尾流光学特性的研究与测量

在第七章中对实验室模拟尾流气泡幕光学特性的研究与测量中，所使用的仪器与设备是以实验室的要求而采购和设计加工的。如图 7-3 所示，实验使用的光源（激光器）、照度计探头等均放置于水槽之外，且激光器体积较大（外部尺度为 $12 \times 12 \times 500 \text{cm}$ ），照度计探头不仅要求防水，其外引线长度只有约一米。要将这些设备仪器用于水下实验测试无疑是非常困难的，所以，对真实尾流光学特性的研究与测量要求设计适合于水下的测量系统。

8.1 水下实验系统的设计

水下实验系统的设计需要满足三个必要条件，第一个条件是防水密封特性必须好，其次是必须能够保证光源与照度计探头共光轴，再次是便于在水中操作。按照这样的要求条件，分别设计加工了激光器密封壳体、照度计探头密封壳体和二者的固定结构架。

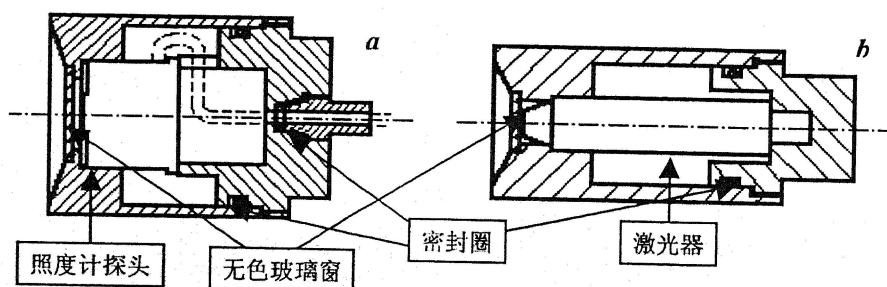


图 8-1 照度计探头及激光器密封壳体
a 探头密封壳体, b 激光器密封壳体

照度计仍采用前面使用的照度计；而光源选用的是笔形半导体激光器，激光器使用纽扣式电池为电源，这使得激光器的密封设计变得较为容易。激光波长为 $630 \sim 680 \text{nm}$ ，输出功率约为 1mW ，输出光束为圆偏振光，光束直径约为 2mm 。照度计探头的密封设计稍微要复杂一些，在保证防水密封的基础上，还要考虑外部引线的接出问题。图 8-1 是照度计探头以及激光器的密封壳体的结

构图, a 、 b 分别是探头密封壳体和激光器的密封壳体。

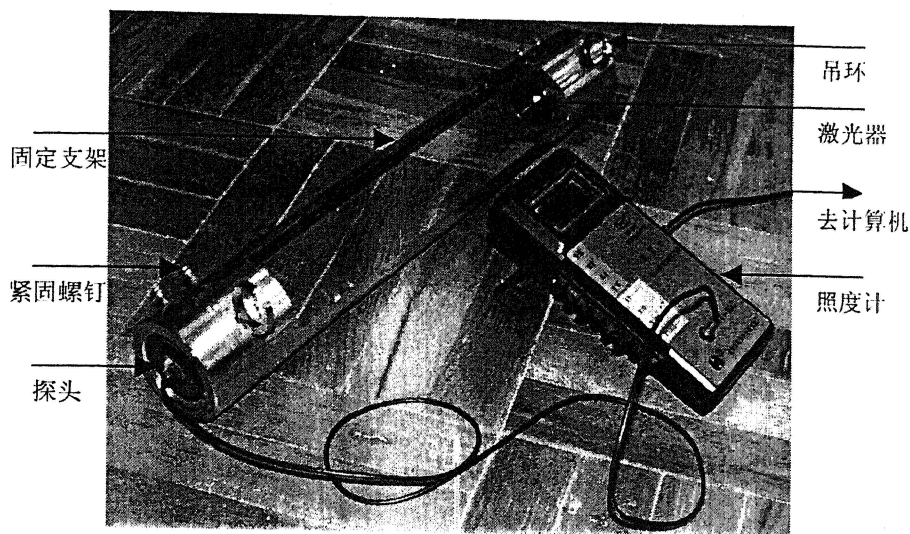


图 8-2 用于水下测试的实验系统

固定支架是一个同轴刚性的柱状结构, 将激光器和照度计密封壳体固定后, 保证二者共光轴。其具体结构如图 8-2 所示。固定支架两端开口用于激光器以及照度计探头的固定, 中部开宽槽以使尾流气泡幕通过, 并尽量减小支架对尾流的影响。支架两端各有一吊环用于固定支架在水中的操作, 在与吊环成 90° 的位置各有两个紧固螺钉, 用于探头以及激光器的固定。

8.2 尾流的外貌特征

经实验室测试和湖上测试, 表明所设计的水下系统可靠耐用, 且易于操作。实验是在第七〇五所鱼雷制导技术国防科技重点实验室协助下完成的, 实验在宝鸡冯家山水库进行, 时间是 2001 年 4 月 24~26 日。

实验时用升降竿来完成固定支架连同照度计探头和激光器的入水操作。用于产生尾流的船(下称尾流船)是千湖 1 号, 排水量 5 吨, 螺旋桨深度 60cm, 船长 60m、宽 3m、柴油发动机功率 40 匹马力、龙骨宽 2.5m, 最大航行速度为 15km/h。实验时的环境参数为气温 15°C 、湿度 80%、风速约 2 级。

在三种尾流船航行速度下对尾流的外貌进行了拍摄, 并对相应速度下尾流的光学特性进行了测量。图 8-3 是千湖 1 号在航行速度分别为 5km/h、10km/h 和

15km/h 下拍摄的尾流外貌。肉眼观察来看，尾流的持续时间与航速有关，并且随着航速的增大，持续时间显著增加，在三航速下，尾流持续时间依次为约 20、15、7min，因此可以近似地认为，尾流的持续时间是航速的线性函数，这一线性函数可表示为

$$T = kv + b$$

其中 k 为比例系数，其单位为 $\text{min}\cdot\text{h}/\text{km}$ ，在上述实验条件下近似等于 $7/5=1.4$ ， b 是一个小的修正量，对应与上述三种航速的情况分别等于 0、1、-1min。

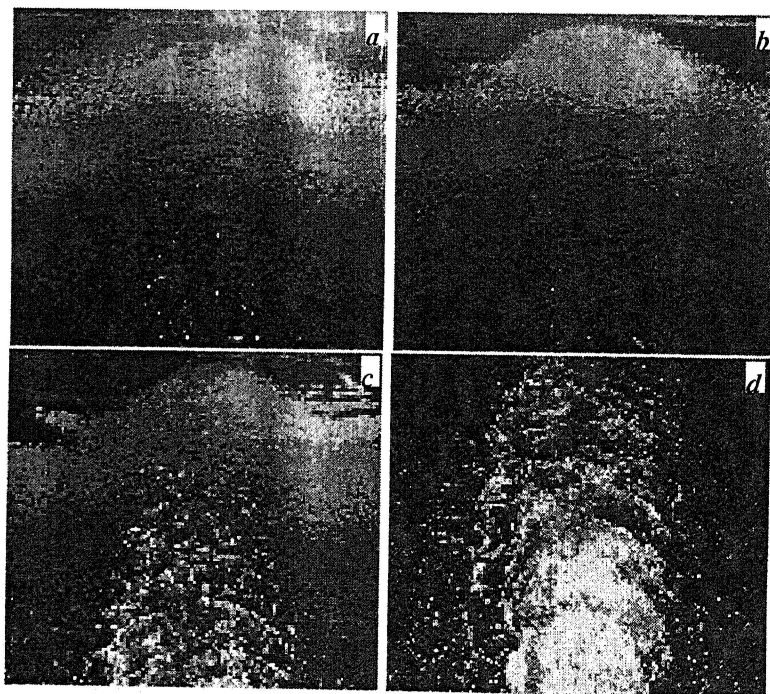


图 8-3 不同航速下的尾流外貌图
 a 、 b 、 c 对应的航速分别为 5km/h、10km/h 和 15km/h，
 d 是航速为 15km/h 时紧靠船尾的尾流近景

关于尾流的深度，用肉眼无法观测，所以没有有效的数据。

在尾流的宽度方面，紧靠尾流船后部分有较大的散开角，这一角度的大小与尾流船的航速关系不大，在三种航速下散开角大致相等，约为 40° ；而从尾流的整体来看，在船身后 3 倍船体长度以远，尾流的散开角很小，目测和照片显示这一散开角小于 5° ，而在更远处，约船尾后 10 倍船体长度以远，散开角接近于 0° ；这里谈到的距船尾的距离与散开角的粗略关系因航速的区别而有所不

同，观测和照片都显示出，尾流船的航速较小时，船尾后等距离位置尾流的岔开角小与航速较大时的情况，如在航速为 5km/h 时，船尾后散开角较大的范围仅约为 5m，而航速为 15km/h 时，这一距离范围增大到约一个船身长度。

8.3 尾流中激光的透射特性

考虑到尾流的几何性质，即尾流的深度、宽度、持续时间等因素，在三种航速下分别对尾流的不同几何位置进行了激光的透射测量。

8.3.1 不同航速下尾流不同几何位置激光的透射特性

在尾流船航速为 5km/h 时，激光通过尾流不同部位的投射特性如图 8-4 所示，图中横坐标表示时间（单位 s），纵坐标表示照度（单位 lx）。图 8-4a、b、c 分别是尾流中距离螺旋桨 0.5、2.0、5.0m 处，探头深度为 30cm（距离水面的深度）

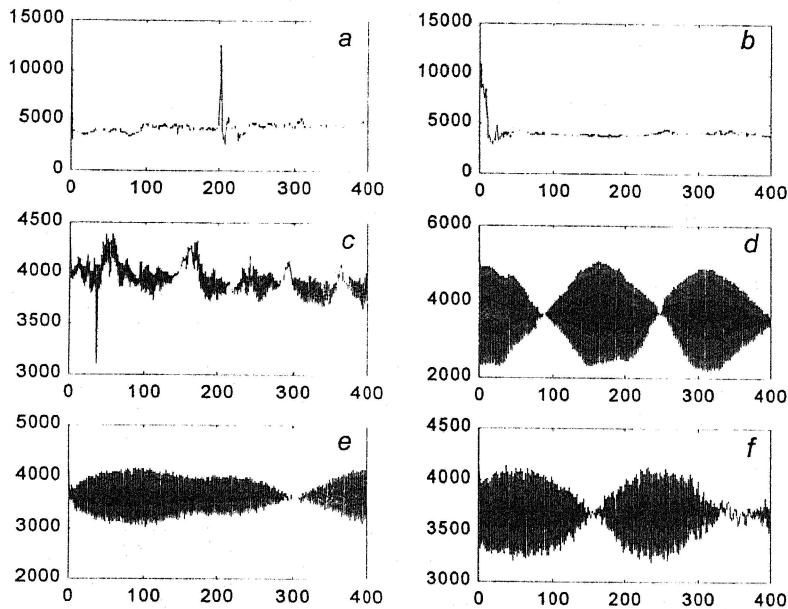


图 8-4 尾流船航速为 5km/h 时
尾流不同部位的激光透射特性

时的透射光照度随时间的变化关系曲线；图 8-4d 是探头深度为 1.0m 时距离螺旋桨 2.0m 处的投射光照度；图 8-4e、f 分别是探头深度为 30cm、螺旋桨后 1.0m、尾流船尾右侧 1.0m 和 2.0m 处的激光透射特性曲线。图 8-5 给出了 a、b、c、d、

e、*f*在尾流中的对应方位。

对比图 8-3*a*、*b*、*c*，除了由于探头在水中的上下抖动所造成的个别信号畸变（*a*中 0 和 $200 \times 0.1s$ 附近、*b* 中 0s 附近、*c* 中 $40 \times 0.1s$ 附近）外，照度幅度随时间的变化与实验室关于模拟气泡幕的测量结果相似。在 *b* 中显示出微弱的周期性，而这种周期性在 *c* 中更明显地表现出来。这些情况说明，尾流中的气泡幕随着到螺旋桨距离的增大而减弱，同时，探头所在处散射光的比例增加，尾流气泡幕中气泡平均尺度变小，单位体积内气泡数量增大。*c* 中照度随时间呈减小的趋势，这可能是由于光源使用的纽扣式电池在较长时间使用中内阻增加造成的。

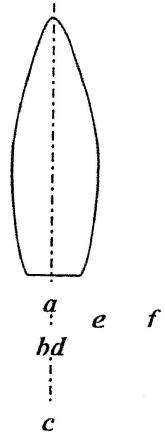


图 8-5 尾流中的测量点位置

d 是探头深度为 1.0m、与螺旋桨距离为 2.0m 处的透射光照度，从图中的完美周期性来看，在此深度上已没有尾流的痕迹，也就是说在该航速下，尾流深度小于 2.0m。

e、*f*的结果表明，在该航速下，距离螺旋桨 1.0m 后，尾流对其侧面 1.0m 处

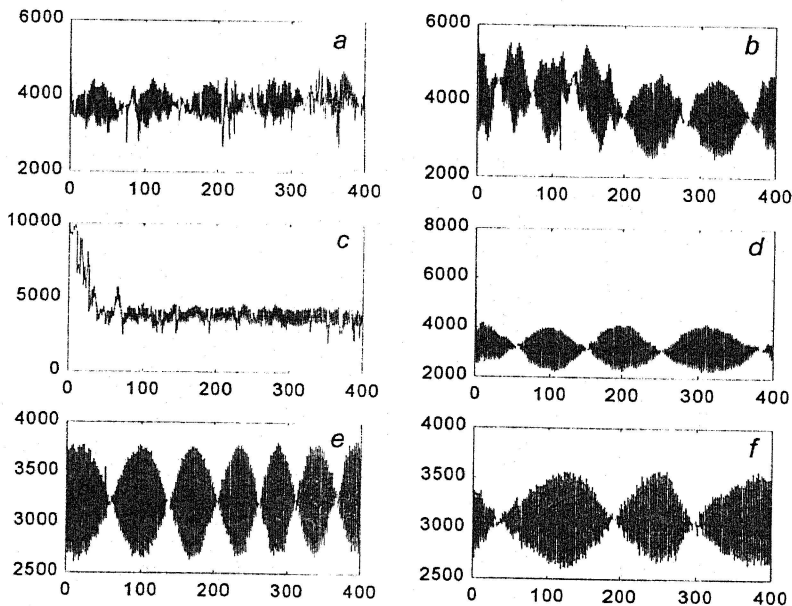


图 8-6 尾流船航速为 10km/h 时
尾流不同部位的激光透射特性

的影响依然存在,但当这一距离增加到 2.0m 时,基本没有尾流的痕迹。即就是说,该位置处尾流的半宽度约为 2.0m。在尾流左侧的测量结果与右侧并无可见的差异,可以认为,尾流宽度对于尾流船的航行方向而言是左右对称的。

图 8-6 是尾流船航速为 10km/h 时,激光通过为路不同部位的透射光照度随时间的变化图,图 8-6a、b 分别是距离螺旋桨 1m、探头深度分别为 40cm 和 1.0m 处的测量结果;图 8-6c、d 分别是距离螺旋桨 5m、探头深度分别为 30cm 和 1.0m 处的测量结果;图 8-6e、f 分别是探头深度 30cm、紧靠尾流船尾右侧 1.0m 以及距离螺旋桨 5.0m 的右侧 2.0m 处的测量结果。

图 8-6a、b 说明,距离螺旋桨距离为 1.0m 远处尾流的深度超过 1.0m,这与文献中尾流的深度约为螺旋桨深度的 1.5 倍的结论相一致。而图 8-6c 中 0~100 × 0.1s 范围的下降是由于在探头入水过程中已开始信号采集,对应于探头深度范围 0~30cm,该图表明,在距离螺旋桨 5.0m 处、30cm 深度尾流的光学性质仍然存在,但从 d 的情况来看,在 1.0m 深度尾流对激光的影响已不显著,即在螺旋桨后 5.0m 处,尾流的深度约为 1.0m。

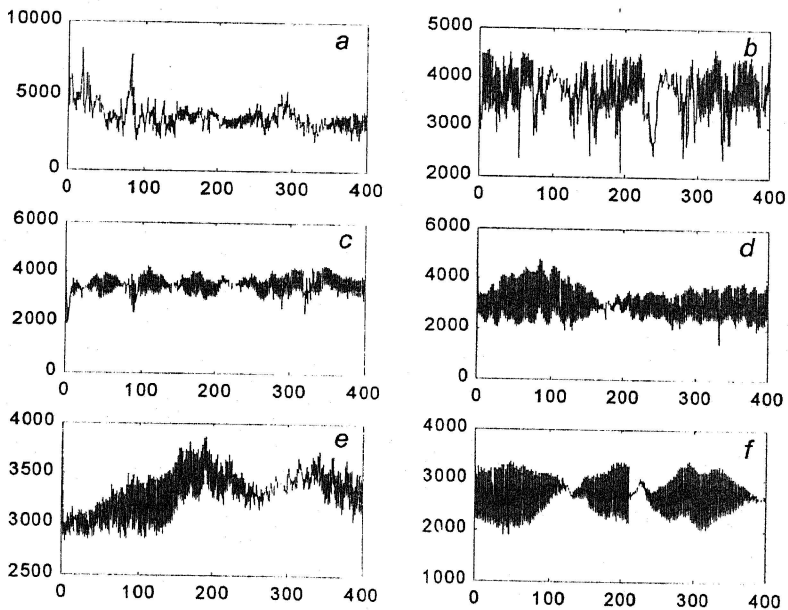


图 8-7 尾流船航速为 15km/h 时
尾流不同部位的激光透射特性

图 8-6e 出现完整周期性,但其周期与其它周期(图 8-4b、c、d,图 8-6a、b、

d、*f*) 相比要小一些, 因此不能说明在该航速下尾流船右侧 1.0m、深度为 30cm 处没有尾流的影响。而 *f* 的结果表明尾流中的气泡幕在螺旋桨后 5.0m 右侧 2.0m 处被衰减成小气泡, 从而散射光在探头处占有主导地位。

图 8-7 是尾流船航速为 15km/h 时尾流中不同部位的激光透射情况。图 8-7*a*、*b*、*c* 分别是探头深度为 30cm、螺旋桨后 2.0m、5.0m 和 8.0m 的测量结果; 图 8-7*d* 是螺旋桨后 3.0m 探头深度为 1.0m 处的测量照度随时间的变化曲线; 图 8-7*e* 是尾流船右侧 1.0m (螺旋桨后 1.0m 处) 处照度的变化; 图 8-7*f* 是船右侧 2.0m (螺旋桨后 6.0m) 处的照度。

图 8-7*a*、*b*、*c* 中照度的幅度相继减小, 说明尾流气泡幕中的大气泡逐渐减少, 气泡幕逐渐衰减, 并在 *c* 中可见已展示出一定的周期性。*d* 的结果是螺旋桨后 3.0m、探头深度 1.0m 的测量照度, 该照度随显示出具有周期性, 但从精细结构来看, 仍然存在气泡的影响, 所以可以认为, 该距离处尾流的深度应大于 1.0m; *e* 的情况与 *d* 的情况有些相似, 这一相似性说明在尾流船航速较高条件下尾流的几何分布会更向尾流船靠近, 在船尾后 1.0m 处、深度 30cm 有较弱的气泡分布。*f* 说明了与图 8-6*f* 相同的结论, 但这里的气泡按尺度的分布与图 8-6*f* 相比, 气泡的平均尺度较大。

8.3.2 尾流深度的估计

在图 8-4、6、7 的对比中不难发现, 虽然尾流相对于尾流船的航行方向而言具有对称性, 但在不同的航速下, 尾流的几何特征存在明显差异。这一点在尾流不同部位的激光透射特性中体现出来。图 8-4*c*、8-6*c*、8-7*b* 是不同航速下同一相对部位的透射光照度测量结果, 三个图中照度随时间的变化有明显的不同, 随着航速的增大, 照度变化的幅度明显增加。这说明随着尾流船航速的增大, 尾流中气泡幕在螺旋桨后延续的距离会显著增加 (但不能由此确定气泡幕的持续时间增加)。

在来看图 8-4*d*、8-6*b*、*d*、8-7*d*, 都反映了探头深度为 1.0m 时不同航速下、不同相对部位的照度随时间变化规律, 在上面的分析中已经有所涉及。航速为 5km/h 条件下, 距离螺旋桨 2.0m 处尾流深度小于 2.0m; 当航速为 10km/h 时, 距离螺旋桨距离为 1.0m 远处尾流的深度超过 1.0m, 在螺旋桨后 5.0m 处, 尾流