

用同轴型全息摄影对海水中悬浮沉积物 进行观测的初步探讨*

钱正绪 陈开曜 张勇

(中国科学院海洋研究所)

全息术自从激光器发明以来,已经得到广泛的应用,其中的一个重要分支,是用于颗粒的观测与分析,1963年Thompson^[1,2]研究了空气中雾滴的Fraunhofer衍射与背景相干光形成的全息图;1964年制出了第一套激光雾滴分析设备^[3],拍摄与分析了空气中雾滴的粒径分布。由于这种方法能够真实地拍摄雾滴的形成过程,并且不破坏测量的环境,所以要比其它方法可靠,自那时以来已用于原子核物理的云雾室研究^[4]、超微粒子的检测^[5]、冰的结晶过程^[6]以及其他许多有关颗粒分析方面的研究。

这种颗粒观测分析方法,大都是用同轴型Fraunhofer全息术(或称同轴型远场全息术)。由于同轴型全息术对光源的相干性要求低、光路简单、不要求高分辨率的感光片,因而被广泛采用。1969年,Knox曾用于对海洋中浮游生物的研究^[7];1973年,Scripps海洋研究所将Knox的工作用于对海上浮游生物的现场观察^[8],取得了在自然环境下一些浮游生物真实情况的资料。用全息术来研究粒径分布、运动状态以及密度等,正在成为全息学应用的一个分支而迅速发展着^[9]。

从原理上讲,全息术能够把颗粒运动的现场状况不受干扰地记录下来,然后方便地、立体地予以再现。这好象是把颗粒运动的真实情形“冻结”起来,然后搬进实验室,让研究人员的眼睛与仪器来观察。由于全息干涉术的发展,被“冻结”的不只是运动着的颗粒的一瞬间的情形,而可以是一段时间内的平均值或两个瞬间的干涉图。所以,颗粒运动状态的本身也被完整地记录下来,使得在一张全息图上能取得颗粒密度、粒径分布、运动速度等许多重要资料。

用同轴型全息摄影的方法来研究海水中悬浮沉积物的运动,将是这方面应用的一个发展。海水中的悬浮沉积物包含大量的泥沙、有机物颗粒等,需要对它们的含量、粒径分布、速度分布等作出描述,目前这方面的研究还是很不完美的。本文试图解决全息术用于这方面研究的可能性,并提出了初步的分析。由于泥沙是悬浮沉积物中比较大量存在的典型颗粒,所以下面的讨论,都是假定对泥沙颗粒进行的。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第395号。

本文中的脉冲同轴型全息摄影拍摄工作由中山大学物理系光学教研组提供设备,郑顺旋同志指导,郭斯淦同志参加实验工作;再现部分由上海实验生物研究所提供设备,谢世栋同志指导。在工作过程中曾得到复旦大学王兆永、山东海洋学院关福民以及本所范守志、齐孟鸢等同志的指导和帮助。

一、同轴型全息术原理

同轴型全息摄影是 Gabor 于 1948 年首先提出的, 他当时的工作是在被摄物体的近场中进行的, 因此也叫做 Fresnel 全息图, 由于孪生共轭虚象的存在, 使波前的再现质量很差。Thompson 引入了远场同轴型全息图的概念, 它是一个不透明或半透明的衍射孔径 (在这里是被摄颗粒) 在明亮的相干参考背景中, 离开此衍射孔径足够远的距离上所形成的衍射花样与参考光的干涉图, 此图上能看到被摄物体的清楚衍射象, 由于远场的条件, 共轭虚象的影响就可以忽略了。

设被摄颗粒到底片上的距离为 Z , 到照明光源的距离为 Z' , 为满足远场条件, 必须有:

$$Z \gg \frac{(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{\lambda}, \quad Z' \gg \frac{(\xi^2 + \eta^2)_{\max}}{\lambda} \quad (1)$$

其中 $(\xi, \eta)_{\max}$ 为固定在被摄颗粒上粒子座标尺度的最大值, λ 为入射光波波长。当颗粒为球体时(1)式的条件也可近似为:

$$Z \geq \frac{d^2}{\lambda}, \quad Z' \geq \frac{d^2}{\lambda} \quad (2)$$

d 为颗粒的直径。

Fraunhofer 同轴全息摄影的拍摄示意图中 (见图 1), 所有的颗粒均满足远场条件(2), 但整个样品盒 (即参考光的面积) 则仍处于近场中。用 $D(\xi)$ 表示在平行光照射下粒子的截面分布。为讨论方便起见, 假定入射光源为平行光, 但实际上对于非平行光也是完全适用的。单个颗粒在记录平面上的强度分布为^[10]:

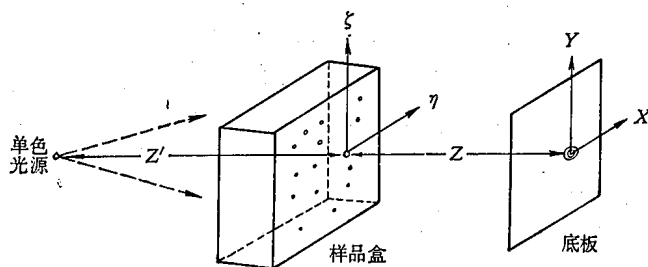


图 1 同轴型全息图拍摄原理

$$I(X, Z) = c^2 - \frac{k|c|}{\pi Z} \sin \frac{kX^2}{2Z} \tilde{D}\left(\frac{X}{\lambda Z}\right) + \frac{k^2}{4\pi^2 Z^2} \left[\tilde{D}\left(\frac{X}{\lambda Z}\right) \right]^2 \quad (3)$$

式中 $\tilde{D}\left(\frac{X}{\lambda Z}\right)$ 是 $D(\xi)$ 的富里埃变换, ξ 为衍射物体上的位置向量, X 为底板上的位置向量, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, c 为参考光的振幅。

由(3)式可见, 强度 $I(X, Z)$ 包含有三项, 第一项是常数项, 第三项是颗粒本身的衍射图, 而第二项则是衍射图与一个与颗粒位置向量 ξ 无关的正弦函数的乘积。表示物体衍射图样与参考背景的相干, 正是这一项, 在相干光源照射下, 能实现波前的再现。

记录底板上的全息图, 如用图 2 所示的单色光源照射, 便能在 Z_1 处再现原来物体的象。此时, 观察到的强度分布 $I(\xi)$ 为^[10]:

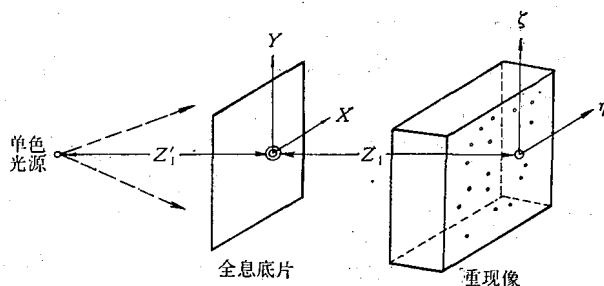


图 2 全息图的重现原理

$$I(\xi) = |c|^4 + \gamma |c|^3 \frac{k^2}{\pi^2 Z^2} D(\xi) \cos \left(\frac{kX^2}{2Z} + \phi \right) + \gamma^2 |c|^2 \frac{k^4}{4\pi^4 Z^2} |D(\xi)|^2 \quad (4)$$

式中 γ 为底片 $H-D$ 曲线的斜率, ϕ 为固定的相位差。(4) 式中间一项表示物体的再现象, 虽然它是 $D(\xi)$ 与一个余弦函数的乘积, 但分析表明 $D(\xi)$ 存在的区间里余弦项保持基本恒定; 在这里虚象产生的效应已经忽略, 因为在远场条件下, 它仅为一小的常数项。

二、应用于泥沙分析的研究

应用 Fraunhofer 同轴型全息摄影的场合, 除必须满足远场条件 (2) 外, 还必须使参考光的强度远大于衍射光的强度。这两个条件, 对于水中泥沙颗粒的观察来说, 是可以满足的。第一个条件是设计要求问题; 第二个条件, 将在下面进行讨论。

参考光的强度必须大于衍射光的强度, 即

$$I = I_R + \Delta I_0 \quad (5)$$

式中 I 为总光强, I_R 为参考光强度, ΔI_0 为物光强度, 这表示 ΔI_0 仅为 I_R 的一个较小的部分。在具体过程上来说, 必须使拍摄空间大部分是透明的, 颗粒所占的总体积必须相当小于拍摄空间的总体积。现在来分析当光通过一定厚度的样品盒后的光强 I_R (即参考光强度) 与单位体积中颗粒密度 n 的关系。

假定水中颗粒的吸收作用可以忽略不计, 并且最细的颗粒直径 d 与波长 λ 之比足够大 ($\rho = \frac{\pi d}{\lambda} > 10$), 设直径为 d 的粒子数为 P_d , 则总粒子数为:

$$n = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} P_d d(d)$$

其中 $d_{\max}$, $d_{\min}$ 表示最大与最小粒径, 为行文方便起见, 下面略去积分的上、下限。

粒子总重量应等于泥沙含量 Q :

$$Q = \frac{\pi}{6} A \int P_d d^3 d(d)$$

其中 A 为泥沙比重, 令 $D = \frac{\frac{\pi}{6} \int P_d d^3 d(d)}{\int P_d d(d)}$ 为平均体积, 则:

或

$$Q = ADn$$

$$n = Q/AD \quad (6)$$

根据 Mie 散射理论, 并假定所有的粒子的散射都是独立的, 则由 n 个不同粒径的粒子所引起的总散射系数为:

$$\alpha = \int P_d \alpha_d d(d) \quad (7)$$

其中 α_d 为直径为 d 的粒子的散射系数, 有:

$$\alpha_d = \frac{\pi}{4} k d^2$$

其中 k 为与 d 有关的系数。代入(7)式得

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \int P_d k d^2 d(d)$$

令 $L = \frac{\frac{\pi}{4} \int P_d k d^2 d(d)}{\int P_d d(d)}$ 为平均散射系数, 则

$$\alpha = n \cdot L \quad (8)$$

由此可以求出, 入射光线在经过距离 l 后的透射量为

$$\ln \frac{I_R}{I} = -\alpha l$$

将(8)式代入可得:

$$n = \frac{1}{lL} \ln \frac{I}{I_R} \quad (9)$$

注意到(6)式则有:

$$Q = \frac{DA}{Ll} \ln \frac{I}{I_R} \quad (10)$$

此两式即为由散射理论导出的基本关系式, 根据这些关系式可对具体的情况加以分析。

我国港口、河流、水库中的泥沙含量与粒径分布相差甚大, 这里选几个一般的数据, 作为初步分析的依据, 列表于下:

表 1 泥沙含量参考数据

	泥 沙 含 量	平均粒径	比 重	n 个/厘米 ³
塘沽新港	~4公斤/米 ³ (4×10^{-3} 克/厘米 ³)	~5微米	1.17	~ 5×10^7
营 口 港	~3公斤/米 ³ (3×10^{-3} 克/厘米 ³)	~0.1毫米	~2.65	~ 2×10^3
官厅水库	~10公斤/米 ³ (1×10^{-2} 克/厘米 ³)	~0.05毫米	~2.65	~ 6×10^4

从表 1 的数据看来, 当取 $l = 1$ 厘米时, I_R 光强的变化很大, n 不太大时, 同轴型全息摄影是可以实现的, 但如果 n 很大时, 则应该考虑采取离轴型全息摄影的方法。

要在实地拍摄水中颗粒运动,还必须对允许的运动速度 v 作一估计。根据 Thompson 的理论,在曝光时间 Δt 内,颗粒的位移不能超过其直径 d 的 $1/10$, 即:

$$v \leq \frac{1}{10} \frac{d}{\Delta t}$$

或在 v 已知的条件下确定 Δt :

$$\Delta t \leq \frac{1}{10} \frac{d}{v}$$

现列出一些港口的典型流速如下:

表 2 流速与曝光时间参考数据

塘沽新港	$d = 5$ 微米	$v \leq 50$ 厘米/秒	$\Delta t \leq 10^{-6}$ 秒
营口港	$d = 0.1$ 毫米	$v \leq 2.5$ 米/秒	$\Delta t \leq 4 \times 10^{-6}$ 秒
宣厅水库	$d = 0.05$ 毫米	$v \leq 50$ 厘米/秒	$\Delta t < 10^{-5}$ 秒

如果用调 Q 的脉冲激光器作光源,其 Δt 约为 10^{-6} — 10^{-9} 秒的量级,因而完全可以满足现场的实际需要。

根据上面的讨论,可以认为全息摄影的方法用于水中泥沙运动的研究,从原理上讲是可行的。

三、实 验

试验性拍摄工作是在实验室条件下,用红宝石脉冲激光器进行的。样品盒的体积为 $12 \times 12 \times 5$ 立方厘米,沙样先用分样筛按粒径大小予以分选,共用 $\phi 0.025$ — $\phi 0.5$ 毫米砂样四种,拍摄时将沙样徐徐地倒入盛水的样品盒中,任其自由下落,同时使底板曝光,此时砂样的下降速度约在 1 — 10 毫米/秒范围内,激光器未经调 Q ,其输出宽度为毫秒级,能够保证在曝光时间内粒子的移动小于 $1/10d$ 。具体装置见图 3:

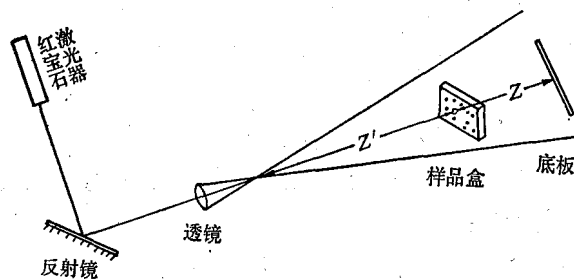


图 3 拍摄实验装置示意图

所用装置参数如下:

红宝石棒	长	140 毫米
	直径	$\phi 12$ 毫米
氙灯	长	170 毫米
	直径	$\phi 15$ 毫米

氙灯电压	1,200V
电容量	4,000 μ f
透 镜	10 $\times$ 显微目镜

选择 $Z = 70$ 厘米, $Z' = 63$ 厘米, 保证即使是最大的颗粒也能满足远场条件。拍摄时的撒沙量为 20—30 克, 相当于 50—100 公斤/米³ 的含沙量 (部分拍摄结果见图 4)。

重现工作是用工业电视系统进行的, 其装置如图 5 所示:

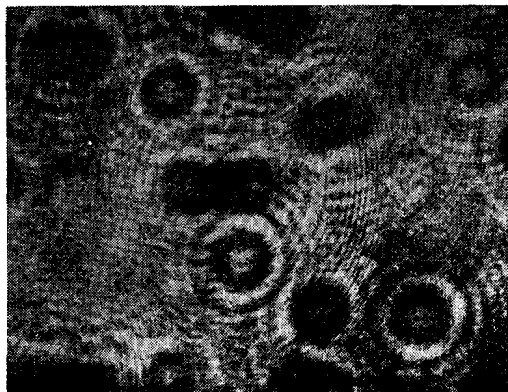


图 4 泥沙颗粒的同轴型全息图

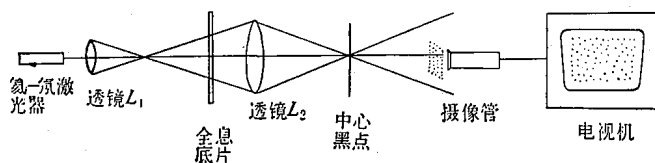


图 5 全息图重现装置

由于用透镜 L_2 将零级光波聚焦, 并在焦点上放置中心黑点, 阻止它进入电视摄像管的光路, 这样, 在焦点后的一定距离上就能清楚地看到全息图的实象; 当移动底片的位置时, 在电视机屏幕上就能清楚地看到不同层次的泥沙颗粒图象。采用电视机作为重现的手段, 不但观察方便, 而且可用其对比度调节, 在屏幕上仅看到聚焦的泥沙颗粒, 而其他不在焦面上的粒子则不予显示 (重现泥沙颗粒象见图 6)。

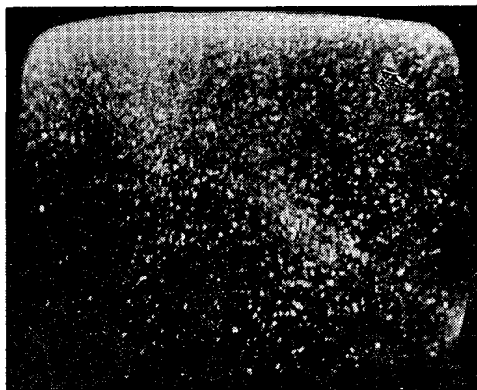


图 6 重现在电视屏幕上的泥沙颗粒象 ($\phi 0.5$ 毫米)

四、讨 论

从原理与初步的实验看,用全息术的方法来研究海水中悬浮沉积物的运动是可能的。但用于实际环境中,还要进行相当的工作,涉及的问题是很多的。

比较现实的方面,是用来作为实验室内的粒径分析装置,与模型试验中作为观察与分析颗粒运动的方法。现在已经有人用图象识别装置对全息图的再现进行自动检读,使分析过程自动化。

速度的研究,利用两次曝光的方法是完全可能的,在两次曝光的时间间隔内,粒子的移动距离反映为再现全息图中的条纹数,而速度的方向,则可由再现现象时追踪某个待测定颗粒的位置来决定。因此,各颗粒的运动速度与运动轨迹都能得到观测,这对于湍流的研究将有较大的价值。

用全息摄影与散射理论结合的光电测沙装置,有可能较快地应用于含沙量中等的现场使用。

本文的初步分析与估计,对于研究海水中悬浮沉积物的运动来说,可能是一条新的途径。

参 考 文 献

- [1] Thompson, B. J., 1963. Diffraction by opaque and transparent particles. *Jour. Soc. of Photo. Instr. Eng.*, 2: 43.
- [2] Thompson, B. J., 1963. Fraunhofer diffraction patterns of opaque objects with coherent background. *Jour. Opt. Soc. Amer.*, 53: 1350 (a).
- [3] Silverman, B. A., B. J. Thompson, J. H. Ward. 1964. A Laser fog disdrometer. *J. of Appl. Meteorol.* 3, 792.
- [4] Thompson, B. J., and T. H. Ward, 1967. Fraunhofer holography for bubble chamber photography, *Proc. Symposium on modern Optic polytechnical Inst. of Brooklyn*, pp. 649—654.
- [5] Thompson, B. J. and W. R. Zinky, 1968. Holographic detection of submicron particles. *Jour. Opt. Soc. Amer.*, 58: 723.
- [6] Ward, H. J. and W. Dyes, Ice crystal hologram camera. *Proc. Soc. Photo-optical Instr. Eng. Seminar-in-Depth on Holography*.
- [7] Knox, C. and R. E. Brooks, 1969. Holographic Motion picture Microscopy. *Proc. Roy. Soc. London B.* 174: 115—121.
- [8] Stewart, G. Beers, J. and C. Knox, 1973. Application of Holographic Technique to the study of marine plankton in the field and in the laboratory. *SPIE Sem. Dev. Laser-Tech.*, 41: 183—188.
- [9] Chubb, T. W. and J. B. Abbiss 1968. Particle Size measurement by in-line holography. (AD-768178/6GA).
- [10] Thompson, B. J., 1968. Particle size examination. *Proc. Conf. Eng. uses of Holography.*, pp. 249—59.

THE PRELIMINARY OBSERVATION OF SUSPENDED DEPOSIT IN SEA WATER WITH IN-LINE HOLOGRAPHY*

Qian Zhengxu, Chen Kaiyao and Zhang Yong

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

This paper proposes to use the method of in-line holography to study the motion of suspended deposit in sea water. Data of particle size distribution of deposit in water and its content can be obtained, and a quantitative description of velocity of such particles can also be made by this method. The paper discusses the general relation of the in-line holography and the particle density in water and the velocity of water movement, and describes the in-line hologram of sand particles with diameters between 0.025 to 0.5 mm obtained by pulsed ruby laser, and the experimental results of wavefront reconstruction with industrial television.

* Contribution No. 395 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.