

浑水流速的激光测量

赵景瑞 赵泉河 姚凤仙 杨秀贤

(郑州黄河水利委员会水利科学研究所)

提要: 实验获得了激光穿过浑水的功率衰减系数和相干性变化。动态下测量了浑水流动速度和多普勒信号特性。得出激光测速的浑水最佳浓度和极限浓度。并用一简化模型对动态实验进行分析, 所得结果与实验一致。

Velocity measurement of sediment-laden flow by means of laser Doppler anemometer

Zhao Jingrui, Zhao Quanhe, Yao Fengxian, Yang Xiuxian

(The Yellow River Conservancy Commission, Institute of Hydraulic Research)

Abstract: The power attenuation coefficient and the change of the coherence of the laser through the sediment-laden water are obtained in the experiment. In dynamic state the velocity of the sediment-laden flow and Doppler signal characteristics are measured. The optimum concentration and the limitation concentration of the sediment-laden flow for laser Doppler anemometer are obtained. The analysis of dynamic experiment using a simple model is connected and the results of the analysis agree with those of the experiment.

前 言

为开拓激光测速应用领域及有效范围, 我们做了激光在浊水中传输功率衰减和激光测速在浊水中信号特性的实验研究。前者有“激光的水中传输特性”报导^[1], 它是细颗粒低浓度模拟海水实验结果。后者有“激光多普勒速度计实验研究”报导^[2], 它是塑料粉悬浮液中的结果。我们的静态、动态两组实验是在颗粒粗、浓度大的模拟河水中作出的。

实 验 概 要

静态实验在激光速度计装置上进行(图1), 6328埃50毫瓦氦-氖激光器光束经分束器变成两束等强度对称平行光, 由透镜聚焦于P点, 透镜与焦点间置一定宽度透明有机玻璃容器, 内盛粒径浓度一定的石英沙水混合物($d_{50}=0.021$ 毫米, 即单位体积内粒径在此值之下的沙粒重量占百分之五十)。在模型前后测量光束功率, 减去有机玻璃的衰减, 即

收稿日期: 1983年2月17日。

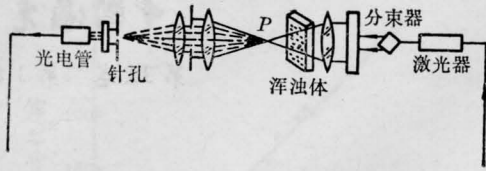


图1 激光传输静态实验

表 1

浊水厚度	20 毫米			
含沙量(公斤/米 ³)	0.5	1	1.5	2~2.5
衰减系数	90.09	144.93	188.68	277.78
$\alpha \left(\frac{1}{米} \right)$	86.21	135.14	181.82	256.41
衰减长度 A, L (米)	11.1~ 11.6	6.9~ 7.4	5.3~ 5.5	3.6~ 3.9
干涉条纹照片	清晰	清晰	较暗	更暗

得水沙体前后激光功率比。另外，于焦点处置 60 倍放大镜，将光束交点区干涉条纹投于照相底板得其照片。再置光电倍增管针孔于条纹暗区及亮区测量得出电流幅度比值。后两项可观察光束相干性变化。

假定激光在浊水中传播按指数律衰减： $P_L = P_0 e^{-\alpha L}$ ，其中 P_L 为穿过浊水后激光功率， P_0 为原激光功率， L 为水沙体厚度， α 为衰减系数， A, L 为衰减长度，即功率衰减 e 倍的水沙体厚度。据此将测量结果列入表 1 中。在 $P=2$ 公斤/米³ 浓度仍有极暗的干涉条纹，表明有可能进行测速。

应用最小二乘法得水沙体浓度 P (公斤/米³) 与衰减系数 $\alpha \left(\frac{1}{米} \right)$ 的关系为：

$$\alpha \left(\frac{1}{米} \right) = 48.569 + 88.380 P \text{ (公斤/米}^3\text{)},$$

(浊水厚度 20 毫米时)

与三浦秀一模拟海水实验公式：

$$\alpha \left(\frac{1}{米} \right) = 0.194 + 0.593 P \text{ (毫克/升)}$$

相比，浓度衰减系数增大约 250 倍，单位浓度衰减系数增长减小约 7 倍。后者是利用 5145 埃 200 毫瓦氩离子激光器，拌入 $d_{50}=1$

微米高岭土颗粒，在 $P=5\sim 30$ 毫克/升浓度范围内作出的。

动态实验利用本装置差分多普勒前向接收方式进行 (图 2)，光束夹角 $\theta=7^\circ 50'$ ，接收孔径 $\Phi=2\sim 80$ 毫米，频移~流速关系式：

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos \varphi \sin \frac{\theta}{2} = \frac{2u}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2},$$

其中 v 为真实流速， u 为 v 在垂直光束对称轴方向上的分流速， u 和 v 的夹角为 φ 。用光电倍增管接收频率跟踪器处理信号，并用选频电平表监视。

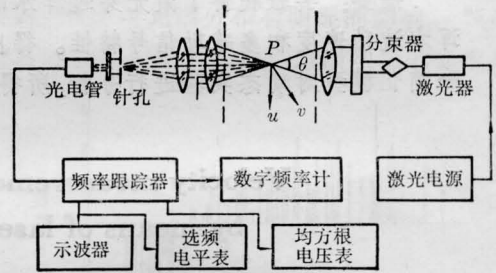


图2 激光速度计原理

水沙体循环系统示于图 3，测量段尺寸 $40 \times 40 \times 1000$ 毫米，用有机玻璃制作。选用沙样同前，实验浓度 $P=0.365\sim 2$ 公斤/米³，流速 $u=0.94\sim 1.45$ 米/秒，以城市自来水为准，测点选于模型中部中心位置上。

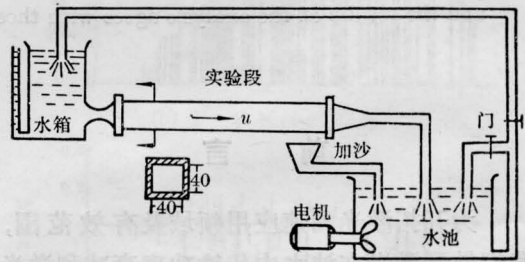


图3 循环系统示意

测试表明随含沙量增加，多普勒信号峰值降低，变化平缓，噪声增高，谱宽增大。频率跟踪器模拟输出及压控频率摆动增大，脱落指示增高。典型频谱变化如图 4 所示。 $P \approx 2$ 公斤/米³ 以上激光功率衰减和散射光增强，信号已掉入噪声之中，使用窄带滤波

表 2

含沙量(公斤/米 ³)	自来水	0.365	0.55	0.66	0.96	1.91	1.98
信噪比(分贝)	12	17.3	15.9	16.2	6.2	2	
相对谱宽(%)	19.5	17.1	15.6	15.4	31.5		
平均流速(米/秒) 以 H=300 毫米为例	1.25	1.26	1.27	1.27	1.28	1.26	1.27

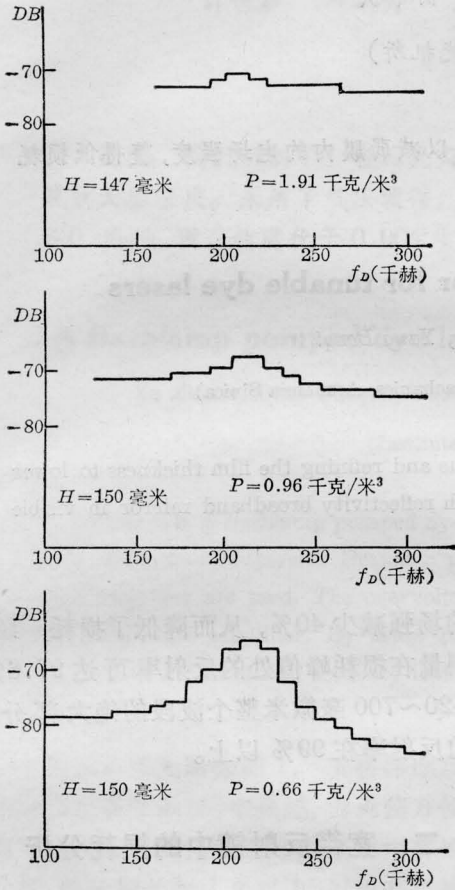


图 4 多普勒信号的频谱

的频率跟踪器难于检测信号, 测量误差增大。数据列于表 2。

结 果

应用 6328 埃 50 毫瓦氦-氖激光器差分型前向工作方式及频率跟踪检测信号, 能够测量小模型低浓度浊水流速。在 40 毫米水

沙体厚度 $d_{50} = 0.021$ 毫米石英沙悬浮颗粒模型上应用最佳浓度为 $P = 0.5 \sim 0.7$ 公斤/米³, 极限浓度 $P_{\max} \leq 2$ 公斤/米³。

1974 年 C. P. Wang 及 D. Snyder 利用 6328 埃 3 毫瓦氦-氖激光器差分型前向工作方式测量 $d = 5.7$ 微米聚苯乙烯悬浮颗粒流体速度, 得最佳浓度 100 PPM。本实验最佳体积浓度为 200 PPM, 上限浓度 700 PPM。

动 态 分 析

上述动态实验可用一简化模型进行最佳浓度、粒径、模宽和浓度上限的计算, 以作为激光测量浊水流体工作的预估。

物理模型: 设泥沙颗粒为不透明圆球体, 等效粒径 d , 在流体中均匀分布。设激光束进入模型之后到达相交区之前在浊水内形成光束通道, 通道截面上光束呈等强度分布。设凡被泥沙向四周散射之光因频率相位不同不再具有相干性, 即通道截面内凡被泥沙掩蔽的光变成背景光噪声。只有未被泥沙散射的直接光才有相干性, 并在光束相交区形成有效的明暗相间的干涉条纹。

定义光束通道内被遮掩面积与通道截面积之比为直接光消光比 γ 。通过简单计算可得模型光束通道内消光比为:

$$\gamma = \frac{3}{2} \frac{P}{gd} L \quad (1)$$

光束相交区内平均颗粒数为:

$$n = 2 \frac{\lambda^3}{D^3} \frac{f^4}{S} \frac{P}{gd^3} \quad (2)$$

式中 P 为含沙量 (公斤/米³), g 为泥沙比重

(下转第 50 页)

四、结 论

1. 6328 埃激光的衰减系数与大气气溶胶粒子数不仅有密切的线性相关, 而且大气气溶胶引起 6328 埃和 5500 埃的衰减又具有相当好的一致性, 因此利用测量的 6328 埃的衰减系数, 可以比较客观且定量地确定水平能见度。

2. 在合肥地区, 根据大粒子气溶胶浓度与相对湿度关系不密切这一点, 可推断该地区的大气气溶胶粒子主要由非吸湿性气溶胶

粒子组成。

3. 与我们的观测结果相比, 在同一能见度下, 文献[5]给出的半径大于 0.25 微米的气溶胶粒子数似乎偏大。

参 考 文 献

- [1] M. Bertolotti *et al.*; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 285.
- [2] 吴际华等;《光学学报》, 1983, **3**, No. 6, 536.
- [3] 吕达仁, 魏重;《大气科学》, 1978, **2**, 145.
- [4] E. D. Hinkley ed.; *Laser Monitoring of the Atmosphere*, Chapter III, Springer, Berlin, 1976.
- [5] R. A. McClatchey *et al.*; "Optical Properties of the Atmosphere", AD 715270, 1970.

(上接第 53 页)

(公斤/米³), d 为泥沙等效粒径(米), L 为模型半宽(米), λ 为激光波长(米), D 为光束直径(米), f 为透镜焦距(米), S 为平行光束间距离(米)。

据(1)式讨论浓度上限: 若 $\gamma \ll 1$, 直接光强散射光弱, 相交区干涉条纹清晰, 但微粒太少信号弱不利于测量。 $\gamma \approx 1$ 时散射光强而直接光弱, 干涉条纹模糊, 信号掉入背景光噪声中。用峰值检测信号已达到极限, 对确定的 g 、 d 和 L , 此时已达到浓度上限 P_{\max} 。

将上述实验数据代入, $g=2.7$ 吨/米³, $d_{50}=0.021$ 毫米。 $L=\frac{1}{2} \times 40$ 毫米, 并令 $\gamma=1$, 则得计算含沙量极限为 $P_{\max} \approx 1.89$ 公斤/米³, 与实验结果相符。

据(2)式讨论最佳浓度: 若 $n \ll 1$, 表示相交区内颗粒数太少, 信号断续, 信噪比低。 $n \gg 1$ 颗粒过多, 信号重迭, 降低信噪比。当 $n \approx 1$ 时颗粒数恰好, 信号近于连续又不重迭, 信噪比较高, 此为最佳浓度。将实验

数据代入: $\lambda=0.6328$ 微米, $D=2.5$ 毫米, $S=75$ 毫米, $f=560$ 毫米, 并令 $n=1$, 得最佳计算浓度 $P_{\text{最佳}} \approx 0.612$ 公斤/米³, 此时消光比 $\gamma=0.32$ 仍有较高信噪比, 这也与实验结果一致。

结合(1)和(2)式既可为激光测量浑浊流体作出预估, 也可为激光速度计最佳光路设计提供依据。

探索激光多普勒技术测量浊水流速我们做了一点工作, 实验与分析表明在小模型低浓度上应用是可行的。浓度增高面临功率衰减、多重散射增强的困难。若能改进信号检测方法、利用散射光特性及提高单光子能量, 还能进一步提高浓度范围。

参 考 文 献

- [1] 三浦秀一等; 电子通信学会 A, P. 72-45.
- [2] C. P. Wang, D. Snyder; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 1, 1.