

# 非牛顿流体高含沙水流 治理黄河的理论基础<sup>\*1)</sup>

黄河水利委员会水利科学研究所 方宗岱

## 一、前言

根治黄河水害,开发黄河水利,都需要修建巨型水库。但在黄河干支流修建水库,都遇到严重的淤积问题。三门峡水库就是一例。此水库虽经两次改建,采取蓄清排浑措施,但上述两个宏伟目标都比原设计打了折扣。这就迫使另一个水库——小浪底水库采取高含沙水流调沙放淤方案,即采取蓄浑排清措施。这个方案的特点,不论排沙输沙,都涉及高含沙水流,而且输沙与输水是分别处理的。它抓住了治理黄河的主要矛盾是处理泥沙,所以其效果显著,基本上能达到上述两个宏伟目标。

## 二、高含沙水流特性探讨

因为高含沙水流(非牛顿流体)治理黄河是新的方向,所以有必要对高含沙水流的一些主要特性进行理论上的探讨。

1、高含沙悬液的物理特性 低含沙量悬液是牛顿流体( $\tau = \mu du/dy$ )。单颗粒泥沙沉降速度 $w$ 可按 Stokes 公式计算,即

$$w = \frac{g}{18\nu} \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) d^2 \quad (1)$$

式(1)中的 $\nu$ (悬液的粘性系数)与 $\gamma$ (悬液的比重)都跟含沙量 $\rho$ 成正比。因而 $\rho$ 越大, $w$ 值就越小。用低含沙悬液做沉降试验时,呈分选沉降和干扰沉降现象。水与沙和粗细沙间具有相对运动。泥沙的输送是靠水流的湍动垂向分速 $v_z'$ 使泥沙下沉而远送的。

高含沙水流是当含沙量 $\rho$ 不断增加,达到某一定程度时,悬液起了质的变化,悬液本身已成为一种有结构的流体,以致悬液与泥沙没有相对运动,呈现群

体沉降现象。

高含沙量悬液的流变曲线如图1所示。其流变方程为:

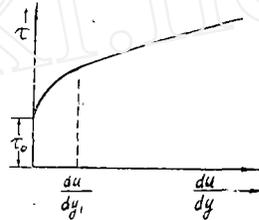


图 1

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_0 + 2\eta_1 \left( \frac{du}{dy_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{du}{dy} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ \text{当 } \frac{du}{dy} &< \frac{du}{dy_1} \text{ 时} \\ \tau &= \tau_0 + \eta_1 \left( \frac{du}{dy_1} + \frac{du}{dy} \right), \\ \text{当 } \frac{du}{dy} &> \frac{du}{dy_1} \text{ 时} \end{aligned} \right\} (2)$$

从式(2)可以看出,任何一颗泥沙受 $\tau_0$ 值影响而处于静止状态,其方程为

$$\tau_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\pi d_0^2}{4} \sin\theta \sin\phi d\theta d\phi = \frac{\pi d_0^3}{6} (\gamma_s - \gamma)$$

$$\tau_0 \pi^2 \frac{d_0^2}{4} = \frac{\pi d_0^3}{6} (\gamma_s - \gamma)$$

$$d_0 = \frac{3\pi}{2} \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)} = \frac{4.7\tau_0}{\gamma_s - \gamma} \quad (3)$$

苏联希辛柯的试验结果是 $d_0 = 6\tau_0 / (\gamma_s - \gamma)$ , 这可

\* 1979年12月24日收到。

1) 本文曾在第2届全国流体力学学术会议(1979年11月9—16日,无锡)分组会上宣读,这次发表时略有修改。

能是由于天然泥沙不是球状，仪器没有测准确的缘故。事实上，用一般仪器测 $\tau_0$ 是很难测得准确的。 $d_0$ 可称为临界粒径，小于 $d_0$ 的泥沙是静止不下沉的，大于 $d_0$ 的仍将下沉，其下沉速度仍可按 Stokes 公式计算。该公式中 $\nu$ 值将清水的粘性系数改为浑水的粘性系数即可。

低含沙水流与高含沙水流的判别式为：

$$\text{低含沙水流 } d_{\text{细}} < d_0 = 4.7\tau_0 / (\gamma_s - \gamma) < d_{\text{粗}}$$

$$\text{高含沙水流 } d_{\text{细}} < d_{\text{粗}} < d_0 = 4.7\tau_0 / (\gamma_s - \gamma)$$

由此看出，高含沙水流不仅与含沙量 $\rho$ 有关，而且与悬液的屈服值 $\tau_0$ 和悬液的颗粒组成有关，即与式(3)

的 $d_0$ ， $\gamma_s$ ， $\tau_0$ 有关。黄河含沙量一般为 $400\text{kg/m}^3$ ，是高含沙水流；而细沙含沙量约 $100\text{kg/m}^3$ 时就属高含沙水流的范围了。

高含沙量悬液做沉降试验时，它没有个体沉降，而只有液面沉降，亦即群体沉降。这种群体沉降与分选沉降或干扰沉降的物理意义是不同的。它属于拥挤沉降。拥挤结果使液面发生一层清水层。

高含沙悬液的物理特性可用一句话来表达：它是形式上的二相流，实质上是一相流。其特征列于表1。

2、高含沙水流运动特性 由公式(2)可绘出图2。

表1 低高含沙水流特征

水流类别	清水挟沙	浑水挟沙	高含沙水流
悬液体型	牛顿流体 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$	非牛顿流体 $\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dy}$	多粘性非牛顿流体 $\tau = \tau_0 + 2\eta \left(\frac{du}{dy}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{du}{dy}\right)^{\frac{1}{2}}$
沉降情况	分选沉降	局部分选沉降	群体沉降
屈服值( $\tau_0$ )	0	$\tau_0 \propto \rho^m, m < 5$	$\tau_0 \propto \rho^5$
静止粒径	0	$d_{\text{细}} < d_0 = \frac{4.7\tau_0}{\gamma_s - \gamma}$	全部粒径 $< d_0$
含沙量分布	上小下大		上下一致
粒径级配分布	上小下大		上下一致
相流级别	二相流	二相流	一相流
层流挟沙能力	没有	部分	有
湍流能量损失	大于清水的能量损失		一般小于清水能量损失

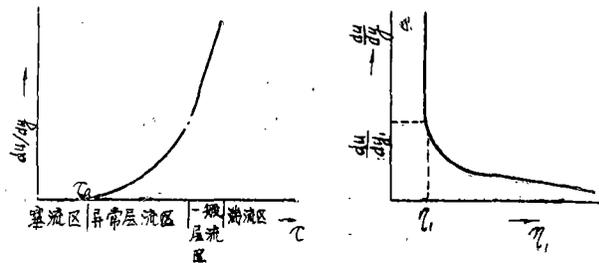


图 2

高含沙水流可分为四个流态：

I、塞流区  $\tau < \tau_0$

II、异常层流区

$$\tau = \tau_0 + 2\eta \left(\frac{du}{dy_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{du}{dy}\right)^{\frac{1}{2}}$$

III、一般层流区

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(\frac{du}{dy_1} + \frac{du}{dy}\right)$$

IV、湍流区  $\tau = \rho l^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$ ， $l$  为湍流的混

合长度

因高含沙水流态变化，在高含沙水流运动时，除能量方程及连续方程外，尚需考虑悬液物理性质的变化，特别是在异常层流区，即不同粘性系数的层流 (Bingham fluid with varying degree of viscosity)，问题就复杂了，我们采取悬液物理特性与水流特性分解的方式，以便解释高含沙水流运动中的一些特殊现象。

在异常层流区，因其流变方程

$$\tau = \tau_0 + 2\eta \left(\frac{du}{dy_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{du}{dy}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{亦即 } \frac{du}{dy} = \frac{(\gamma y J - \tau_0)}{4\eta \frac{du}{dy_1}}$$

经积分其变速部分的流量 $q_F$ 为

$$q_F = \frac{\gamma^2 J^2}{12\eta^2 \frac{du}{dy_1}} \left(-\frac{3}{4}H^4 - \frac{y_0^4}{4} + H^3 y_0\right)$$

$$+ \frac{\gamma J \tau_0}{4\eta^2 \frac{du}{dy_1}} \left(-\frac{3}{8}H^3 - \frac{y_0^3}{8} + H^2 y_0\right)$$

$$+ \frac{\tau_0}{4\eta^2 \frac{du}{dy_1}} \left(-\frac{H^2}{2} - \frac{y_0^2}{2} + H y_0\right)$$

设  $y_0/H = a$ ，亦即  $\tau_0/\tau_w = a$ ，代入上式得

$$q_F = \frac{\tau_0^2 H^2}{4\eta^2 \frac{du}{dy_1}} \left(\frac{-17 + 20a + 8a^2 - 11a^3}{12a}\right)$$

其均速层的流量为

$$q_L = y_0 u_{max} = \frac{-\gamma^2 J^2 y_0}{12\eta \frac{du}{dy_1}} (y_0^3 - H^3)$$

$$- \frac{\gamma y_0 J \tau_0}{4\eta^2 \frac{du}{dy_1}} (y_0^2 - H^2)$$

$$+ \frac{\tau_0^2 y_0}{4\eta \frac{du}{dy_1}} (y_0 - H)$$

$$q_L = \frac{-\tau_0^2 H^2}{12\eta^2 \frac{du}{dy_1}} \left(\frac{a^3 - 1 + 3a - 3a^2}{a}\right)$$

全断面的总流量为  $q_{总} = q_L + q_F$ ：

$$q_{总} = \frac{-\tau_0^2 H^2}{12\eta \frac{du}{dy_1}} \left(\frac{-29 + 56a + 28a^2 + a^3}{12a}\right)$$

$$= \frac{\tau_0^2 H^2}{144\eta^2 \frac{du}{dy_1}} M \quad (4)$$

从式(4)可以看出，流量与高含沙悬液的物理特性  $\tau_0$ ， $\eta$ ， $du/dy_1$  和水流特性  $H$ ， $a$  有关。因同一高含沙水流且在同一流态下，其物理特性是不变的，因此高含沙水流的流量与水流特性有关，即与  $H$  及  $M$  有关。 $M$  值可称为高含沙水塞流程度  $a$  的参变数，与塞流程度  $a$  有关。其互相间的数值关系列入表 2。

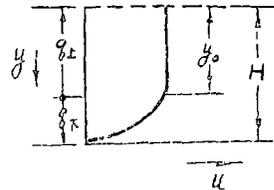


图 3

从表 2 可以解释在峡谷中运行的高含沙水流“ $a$ ” ( $y_0/H$ ) 是较少的。流出山口进入平原，因比降变小，即  $\tau_0/\tau_w = a$  变大，亦即  $H$  不断增大，不断壅水，向浆沙河态发展，当  $a = y_0/H = \tau_0/\tau_w \approx 1$  时，即  $\gamma H J \approx \tau_0$  时，就发生浆河<sup>[1]</sup>。

上断面水面上涨，下断面水面必然下降，上下两

表 2

a 值	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0
M 值	$\infty$	246.8	95.56	27.5	8.95	1.43	0.555	0
H 值 ( $\frac{q \times 144 \eta^2 \frac{du}{dy_1}}{\tau_0^2 M}$ )	0	0.064	0.102	0.191	0.335	0.825	1.35	$\infty$

断面产生了附加剪切力。这使上断面面积水骤然下泄，发生溃坝流量，较之正常来水流量 $q_{上}$ 大得多。即 $q_{max} = Kq_{上}$ ，K值尚不能计算得出，仅从实测资料中列举如下：

- a. 黄委会水科所试验室资料  $K = 3.4 - 30$
- b. 苏联泥石流资料  $K = 25 - 106$
- c. 黄河资料 ①吴堡  $Q_{max} = 24000 \text{ cm} \cdot \text{s}$ ，而上游150km仅有 $16000 \text{ cm} \cdot \text{s}$ ；②花园口  $Q_{max} = 10700 \text{ cm} \cdot \text{s}$ ，而上游130km仅有 $8000 \text{ cm} \cdot \text{s}$ 。

溃泄大流量对防洪和施工都是不利的。而含沙水流在异常层流区却必然发生阵流或间歇流，即周期性的猛涨猛落现象。这都是与屈服值 $\tau_0$ 有密切关系的。

高含沙水流在湍流区的特征是 $\partial \rho / \partial y = 0$ ， $\partial \rho / \partial x = 0$ （图4）及冲刷力强，遇到粘土层时会发生揭底现象。在黄河的龙门-潼关段，渭口-交口吊桥段，高含沙量超过 $500 \text{ kg/m}^3$ 的情况经常发生，黄河下游在1933年及1977年也曾发生揭底现象（图5）。

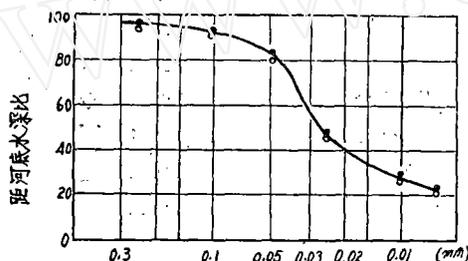


图4 渭河华县1977年8月测线含沙量颗粒级配曲线  
· 水面 ○ 近底层

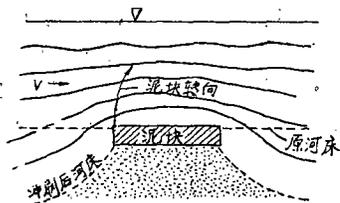


图 5

因高含沙水流实质上是一相流，即 $\rho$ 是不变的而且大于1，所以可根据 Shields 公式计算：

$$u_* = \left( 0.05 \frac{\rho_* - \rho}{\rho} g d \right)^{\frac{1}{2}}$$

这说明泥沙粒径的起动流速远远小于在清水中的起动流速。

高含沙水流明渠的近底层流速梯度 $du/dy$ 较一般

含沙水流的大，亦即作用于河床沙粒的推移力大。根据国内大量实测资料（图6）可以验证。结果是：床沙的起动流速小，作用于床沙的流速梯度大，所以冲刷是十分激烈的。经过一段时间，两端河床冲刷到一定深度，使高含沙水流发生绕流作用，而使泥块上举并转动，导致产生揭底现象。揭底现象的基本方程为[2]：

$$u^2 = \frac{1}{K} h \left( \frac{\rho_* - \rho}{\rho} \right) \left( \frac{\rho_*' - \rho}{\rho} \right) \quad (5)$$

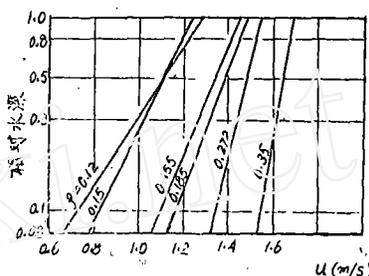


图6a 资料来源：引渭兰区高含沙渠道输沙规律小结（1977）

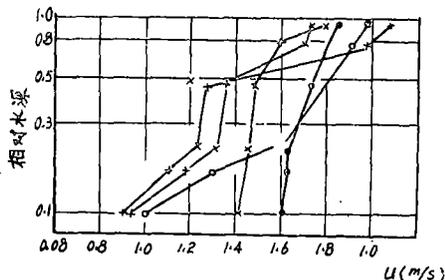


图6b 资料来源：渭河华县1974, 1975年当 $H = 4 \text{ m}$ 时资料（孟庆梅）

**3、高含沙水流的输沙特性** 因为高含沙水流形式上是二相流，实质上是一相流，所以它的输沙能力与一般低含沙水流的输沙能力有本质的不同。

在层流区，根据 $d_0 = 4.7 \tau_0 / (\gamma_* - \gamma) > d_{粗} > d_{细}$ ，高含沙水流是能够输沙的。低含沙水流则不同，因为层流 $u'_y = 0$ 。这是不能输沙的。假如当 $u'_y = 0$ 时仍能输沙，就说明悬液已不是牛顿流体了。

在湍流区，不论是管流还是明渠流，试验和测量的结果都表明，摩阻系数 $f$ 在 $f-Re$ 曲线上都是较小的，略低于光滑湍流曲线（Blasius曲线）。 $f$ 值为什么这样小，而且在光滑湍流曲线以下，按高含沙水流的物理特性及一般水力学概念，是容易解释的：

- ①稠度系数 $\eta$ 很大,使湍动损失小;
- ②底部颗粒组成细,摩擦损失小;
- ③因系一相流,且 $\rho > 1$ ,所以在输沙运动中,泥沙本身重量具有自动输沙能力。

但是没有从减阻去解释。流体力学中减阻问题发展很快。下列几种情况均有减阻作用:

- ①高分子化合物,如聚氧化乙烯,分子结构是长链型,且分子量较大;
- ②纤维悬液,如石棉纤维悬液,含有纤维性物体;
- ③粘弹性悬液,如蛋白液,具有伸长粘性(elongational viscosity) [3]。

具有细泥的悬液,早就有人发现是蜂窝状结构。最近Gust [4]在电子显微镜下观察到细泥凝聚是长链型。参照①②两项减阻悬液,凡具有长链型特性的悬液,都有减阻作用。这是因为长链型结构有抑制湍流的效应。

人们以往研究水流阻力损失时,多注意流体外部影响,例如管径大小、管道光洁度等。从流体内部结构影响湍流结构、影响阻力损失来进行研究,还是近年来发展的新课题。减阻效应可用Virk模式 $U^+ - y^+$ 表示,或Kármán公式 $1/\sqrt{f} = A \log Re \sqrt{f} - B$ 表示,或从 $f - Re$ 曲线直接求得(如图7,8)。

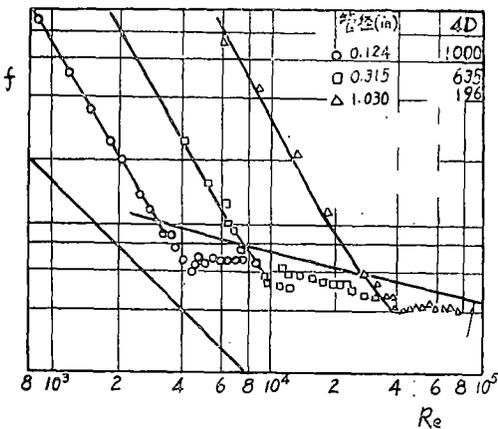


图7 资料来源: J. Wasp, Solid flow slurry pipeline transportation

至于弯道损失,国内外资料都很少。因为有 $\tau_0$ 值和较大的 $\eta$ 值,肯定这种损失是很大的。山西省田家湾水库排泥时,堵塞均发生在弯道附近。人脑血管细而弯,所以容易发生脑溢血现象。因此,要进一步研究高含沙水流在弯道处的损失。这可能对化工、冶

金、煤炭、医学、水利等部门都很有好处。

#### 4、屈服值 $\tau_0$ 的成因分析 从高含沙水流的物理

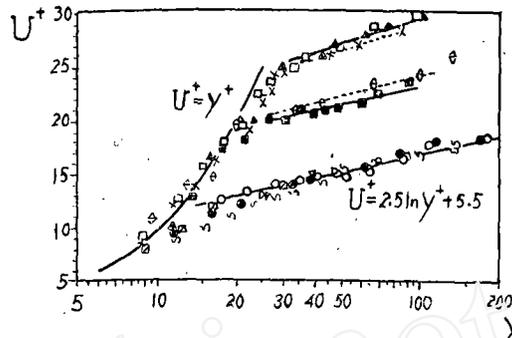


图8 资料来源: Gust (May 1976), JFM, 13.

牛顿流体	非牛顿流体
闪长岩砂/清水	闪长岩砂/粘土悬液
15300 ○	11600 ×
石英砂/清水	13100 ◇
12600 ∞	13900 □
12900 ⊠	17000 ■
15300 ●	21600 ▲

特性 $d_0 = 4.7\tau_0 / (\gamma_s - \gamma)$ ,高含沙水流特性与流变特性的密切关系,和输沙特性的 $\partial \rho / \partial y = 0$ ,  $\partial \rho / \partial x = 0$ 等等来看,屈服值 $\tau_0$ 在高含沙水流运动中有特殊作用。

屈服值与悬液的内部结构有关,水利部门是用毛细管法测定的。这方面,黄委会水科所和西北所的实验研究是有成效的。这些工作在钱意颖编写的《有关浑水群体沉降的特性》一稿中曾给出 $\tau_0 - \rho$ 曲线,并以 $d_{50}$ 及含0.01mm细泥百分比为参数(如图9)。从图9看出:

①屈服值 $\tau_0$ 以往国内外仅写成 $\tau_0 \propto \rho^5$ ,这是不够严格的。西北所提出 $\tau_0 \propto \rho^5 / d_{50}^5$ 比较合适。根据图9,应写成 $\tau_0 \propto a^2 \rho^5 / d_{50}^5$ ;  $\alpha, \beta$ 值尚待进一步研究决定,  $a$ 为细泥百分比。还有水质对屈服值的影响也尚待进一步研究。

②另一点也很有意义。在 $\tau_0 - \rho$ 曲线上有一个拐点,拐点以下虽有 $\tau_0$ 值,但属于分选沉降区, $\tau_0 \propto \rho^m$ ,  $m < 5$ ,亦即 $d_{细} < d_0 < d_{粗}$ 的情况。在拐点以上属于群体沉降区, $\tau_0 \propto \rho^5$ ,亦即 $d_{粗} < d_0$ 的情况。因此将来在治黄中可设法多产生高含沙水流。

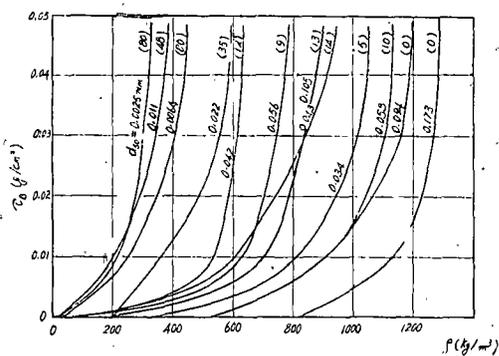


图9 (括弧内表示含0.01mm细泥的百分比)

### 三、高含沙水流在治理黄河中的应用

黄河天然的高含沙水流不是经常发生的，但能利用小浪底峡谷型水库淤沙调沙而产生人为的高含沙水流。调出的高含沙水流用以放淤。腾出清水用以发电、灌溉和冲刷下游河床，利用高含沙水流明渠输

沙，水和沙分别运行。其优点和效益是：节约输沙用的水量200多亿 $m^3$ ，可用以代替南水北调的北调工程；消除黄河下游洪水危害；均匀放淤，改造华北平原；最大限度利用黄河水沙资源。世界闻名难治的黄河将为高含沙水流所控制。但这有待于高含沙水流理论上的论证和探讨。

### 参考文献

- [1] 方宗岱、郭耀华，浆沙形成条件的重新论证（油印资料）。
- [2] 缪凤举、方宗岱，揭底冲刷现象机理探讨（油印资料）。
- [3] 陈文芳，非牛顿流体力学（英文讲稿），第2届全国流体力学学术会议（1979年11月9—16日，无锡）全体会上报告。
- [4] Gust, G., Observations on turbulent-drag reduction in a dilute suspension of clay in sea-water, *JFM*, Part I (May 1976).

## 流场显示中的全息照相方法 及其灵敏度提高技术\*

中国科学院力学研究所 李华煜 束继祖

### 一、前言

在电子计算机十分发达的今天，流体测量技术仍然是流体力学发展最基本、最活跃的因素。流场显示中的全息照相方法是流体测量技术中较新和发展非常快的方法之一。

全息照相概念于1948年由英国D. Gabor提出，并由很困难的实验所证明。由于技术上的困难，这个课题停顿十多年，未引起人们的注意。1962年美国E. N. Leith等用通讯理论来处理全息术，提出离轴法全息照相概念，解决了全息术的一个重大技术问题，重新吸引了人们对这个领域的兴趣。1963年Leith等把激光引入全息术，使全息术有了革命性

的推动力，激起迅猛发展的高潮。1964年左右开始发展的全息干涉术，更是全息术迅猛发展的关键。R. J. Powell等（美，1965）的时间平均法（简称TAHI）<sup>[1]</sup>，J. M. Burch（1965）的实时法（SBHI）<sup>[2]</sup>，L. O. Heflinger（1966）等的双曝光法<sup>[3]</sup>（DEHI）先后发表后，全息干涉术趋于成熟。很快地全息术在各个领域中得到了越来越广泛的应用，并且形成一个很有前途的学科。由于其重要性受到公认，D. Gabor在提出这方法23年以后，于1971年获得了诺贝尔物理学奖金。

全息照相应用于流场显示，开始于全息干涉发明之后，早期工作者有Tanner（1966）<sup>[4]</sup>，Philbert等（1968）<sup>[5]</sup>，Smigielski等（1968）<sup>[6]</sup>，Reinheimer等（1970）<sup>[7]</sup>等。全息术现已发展到定量测

\* 1979年12月17日收到。