

# 两相流译文集

云南省力学学会流体力学学组  
两相流译文集编译组

1984.12.

# 前 言

矿冶、机械、运输、化工、轻工、石油、热能、核能、航空、航天等许多工程领域广泛地涉及气固、气液、液固两相流问题。愈来愈多的科技人员对两相流感到兴趣。在教学科研中我们积累了些技术资料，其中包括英、日、法等语种文献的译文，现编辑成册以供参考。

译文集主要内容是大家所关心的两相流测量问题的综述及专论，也有少量关于计标和数值试验方面的文献。由于编译者水平有限，加以时间仓促，谬误在所难免，请读者不吝赐教，以便进一步作订正。

3K527/15

云南尚力学学会流体力学学组

两相流译文集编译小组

一九八四年十二月

# 目 录

一、二相流(液体、固体)的测试技术 (I)(II)-----	1
二、气液两相流的测试技术-----	22
三、水平管道气固两相流的LDV测量-----	38
四 测量二相悬浮流中大球形颗粒瞬时速度和颗粒大小的 一种激光技术-----	68
五 BCURA 旋风分离器探头-----	84
六、在水平管路内用双孔板测量两相流-----	96
七、静压管在紊流中的响应-----	110
八、单组分两相流的多相力学-----	136
九、固体颗粒在水平管路中的最小输送风速(浓度在特别 高的情况)-----	144
十、气力输送数值试验(水平管道情况)-----	162
十一、一维非定常两相流平均方程的一个数值解法-----	176
十二、一种简单的两相摩擦压降计算法-----	190

# 二相流(流体-固体)的测试技术(上)

过裕 日本 大阪大学大学院  
产业机械工程系

## 1. 前言

通常，含有固体粒子的二相流分为气固二相流和液固二相流。此类流动在工业上变得重要，主要是因为最近与管道内固体物料输送有关的研究发展很快。但是，有关流动机理的理论一般地说还是落后的。由于近来才探讨内部构造，所以含固体粒子的二相流理论还较贫乏。固体粒子二相流理论落后的主要原因象热线风速仪那样的适合于研究流动精细结构的测试手段在这里还用不上。而同样是二相流，气液二相流的测试方法就较多，且二者共同可用的办法也不少，由于平泽浩已经对气液、液固测试进行了阐明。(1,2) 感兴趣的读者，在阅读本文时，可参改有关文章。

本文深入介绍已往研究过的方法，并按以下分类顺序进行说明

- (1) 光学测试 I (摄影、高速电影摄影、磁带录像机)
- (2) 光学测试 II (光反射线的衰减)
- (3) 光学测试 III (图像传志 II)
- (4) 光学测试 IV (光的反射)
- (5) 光学测试 V (激光)
- (6) 相关法
- (7) 示踪法
- (8) 其它 (超声波、差压法、钢球探针 II)

这次先说明(1)~(4)其余的下次继续叙述

### 2. 光学测试 I (摄影、高速电影、VTR)

由于摄影是我们日常生活中熟悉的，所以比较容易着手，很

久以前就被应用于二相流的测试，1924年就报道了管内高速运行粒子的瞬时摄影。迄今，它们是记录流动状态的最一般手段。如果粒子浓度不那么高，就能进行粒子浓度的正确测量。但它的缺点及局限性也较多，特别是要有一定的分析时间，当场处理就比较难，应用于自动装置的路也给堵死了。如果不要求测试的精密性，可以预先检定快门（透镜快门）速度并从粒子飞行轨迹中比较简单地求得粒子速度。在快门式快门的情况下，因为粒子运动方向和摄影行走方向不同，飞行轨迹长度就会变动，所以有必要同时拍摄速度已知的适当物体和运动粒子，并根据相互比较来求粒子速度。在旋转的圆盘上印上了粒子大体上形状、颜色相同的斑点。在图1中我们表示了用快门式快门的照相机同时拍出旋转圆盘和圆管内粒子的例子。

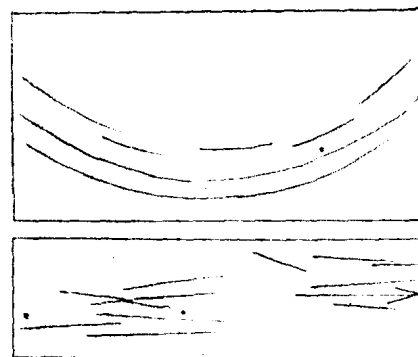


图1 粒子的飞行轨迹

(圆盘旋转数: 900rpm 快门速度: 1/250, 空气速度: 13m/s)

我们还研究了调查频闪放电管的发光时间，来求轨迹。通常在频闪放电管里摄影图像很快，但由于缓慢的衰减，将造成像的顶端模糊，从而得不到正确的飞行轨迹长度。解决这个问题的方法，称为二次曝光方法。让频闪放电管在一定时间间隔内二次闪光，从一张胶片上所得到的—对粒子像的距离就可以求速度。但普通的频闪放电管由于不能在任意时间间隔内使之二次闪光，所以有必要准备二台频闪放电管并联成正回路。二次曝光法的光学系统如图2所示。二次曝光法的缺点是粒子浓度会增加，大多数粒子被照像时，粒子对的判别就变得困难。因此，准备3台频闪放电管，使得最初、最后发光时间短，中间发光时间稍长，这样就有了以实线来抓住粒子轨迹的方法。家用的极普通的频闪放电管的闪光

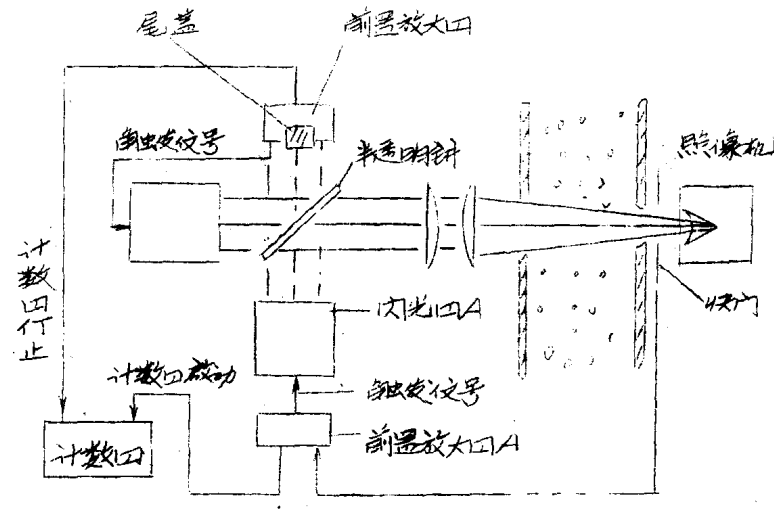


图2 二次曝光法

时间可推迟到大约1毫秒，而高速摄影用的频闪放电管的闪光时间是微秒数量级，所以最好是将两者配合在一起使用。或者，用频闪放电管的断续光和比它强度小的连续光组合起来，亦可容易判别粒子，并可测到正确的速度。由后面一种方法，不仅可以测粒子速度，而且可以测粒子旋转速度。有这样的实例。(8) 在像气的表面上拍摄出用涂料上色的粒子飞行轨迹，如图3那样，则呈现出随粒子旋转而产生的波。计数此波数可求得旋转速度。图4表示按此法测定的粒子旋转速度的频度分布。另一方面，用一个没有切口的旋转圆盘断续地逐断照相光，则可得到多次曝光的粒子飞行轨迹，从而可求出粒子速度。

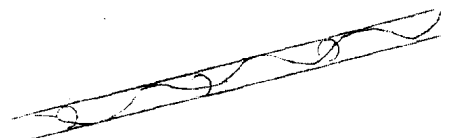


图3 粒子的飞行轨迹

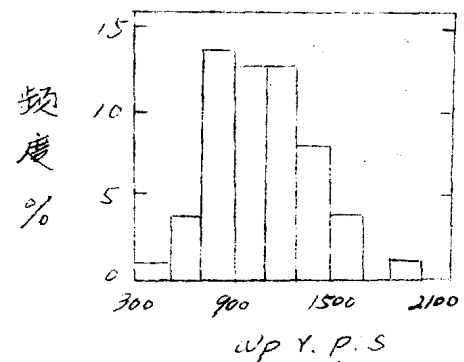


图4 旋转速度的频度分布  
粒径: 0.5mm  
空气速度: 7.4 m/s

其次，谈一下拍摄从断面正面所得到的气力输送粒子分布的

的方法。取所拍摄的断面后的一根管子，如图5那样设置镜头和暗箱。为了清晰地拍出测试断面内的粒子，用来自管出口处上面的变速喷流，将管内飞出的粒子吹到下面。这样做的话，在细长切口的光照下可以摄得出口处的粒子分布，图6所示为拍摄到的粒子分布像片。

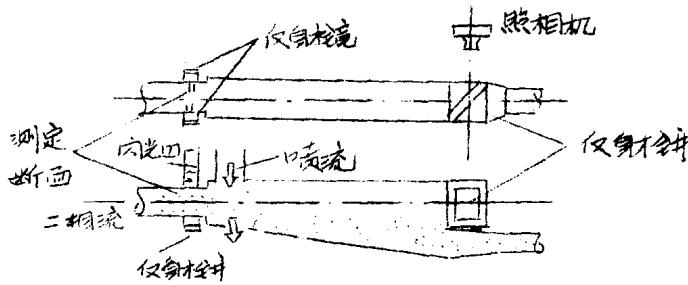


图5：下吹法



(a)  $u = 7\text{m/s}$                       (b)  $u = 20\text{m/s}$   
(粒径  $1.1\text{mm}$ ，混合比：1~1.4)

图6：粒子分布的像片（手摹图）

还有滚筒式摄影机，但在不可压缩流体的二相流中，不需要这样高速的设备。变速电影摄影机拍出来的粒子坐标，可用照片分析出逐次读数，并修改时间指示出计称速度。最近，自动读数装置的研究盛行，但要拍出多数粒子的踪跡，我想只有手动才行。若尽可能使用记录装置及读数，那以后的计称就变得很轻松了。

最近，利用VTR（磁带记录机）的方法也普及了。但目前作为工业测试用的仪器来说，最大速度只是  $1/2000$  秒，用于高速粒子的仪器市场上还买不到。

以上诸法，只能得到二元的粒子位置和运动参数，而如果用

比起照像摄影来高速电影摄影机出的优美是在既使浓度稍高的情况下也有利于得到定量数据。关于高速摄影机的种类，有间断下吹式和旋转棱镜式。间断下吹式拍出的像片很清晰，但时间仅限于  $1/600$  秒。至于旋转棱镜式，市场上可买到甚至于数万转/秒的产品，要想谋求更高的速度则

立体摄影则可以得到三元的信息，图 7、8 表示按立体摄影摄制的管内粒子行为，特别是图 7 所示的方法捕捉了管壁附近的粒子情况，由于  $d_1$  与  $(a_1 + a_2)$  成正比，可以求出粒子与壁面的距离。

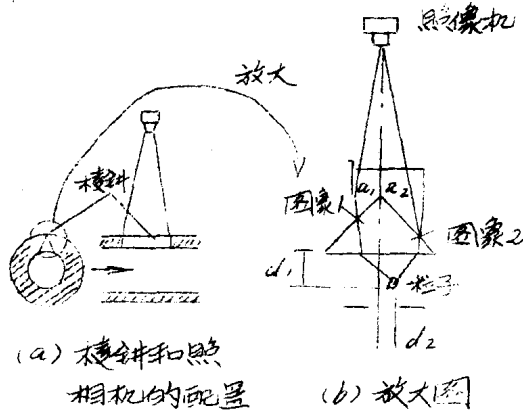


图 7 立体摄影<sup>(2)</sup>

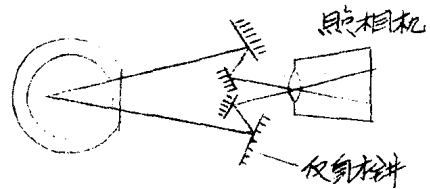


图 8 立体摄影

### 3. 光学测试 II (光和放射线的衰减)

基于光线和放射线衰减的方法主要是关系到粒子浓度的测定。光除通常的白光外，也用激光。用激光的好处是，除由于射线的直进性使透镜系统变简单外，加上还可按多普勒效应测试速度，这样就可以同时测定速度和浓度。混相流中，它如下式那样在粒子分散密度  $P_p$  增加的同时按指数衰减。

$$I/I_0 = e^{-K P_p l} \quad (1)$$

这里， $I_0$ 、 $I$  分别为发光部和受光部的光强， $l$  为受光部到发光部的距离， $K$  为衰减，它依赖于粒径和其它的量。

最简单的光衰减测定法，是通过从管的外侧接触白光进行的。但也须利用图 9 所示的透镜系统，光线要保持平行，在光轴的横断面内，光轴越接近管道内壁平面，就越不能无视折射的影响。所以，在有关从外侧接触光进行测试的例子中，多半用正方形或长方形断面作为测试用的断面。

上述的方法还不能求局部的粒子浓度，而最近的光导纤维和



小型发光和受光单元都比较容易着手进行局部浓度的测定，我们曾经介绍过用光纤纤维求局部粒子浓度的较特殊方法。(16) 在图10中，将由光源发出的一束光导入到测试部位。(称这个光为光I) 另一束光(光II) 直接导入光电管，光I通过测试部位以后同样又导入光电管。这里，用一个设有切口的旋转圆盘将光I和光II交替地输入到光电管里去，首先为了使单相状态光I和光II的强度一致，则用调节口进行调节。这时的波形示于图11的(a) 在混相状态，由于光I衰减，就如图11(b)所示。I和II的强度不一样。为此，在一个透明板上分散与待测粒子相同的颗粒，予制一块模拟混相流粒子分散情况的切片，如图10那样，插到光电管前面。如果予制大量的不同粒子浓度的模拟切片，则如图11所示，可以平衡光电管接收到的I和II的强度。平衡时，模拟切片的浓度可以认为与测试部位的浓度相当。

其次，图12显示了用小型发光和受光单元进行浓度的测试探头。这个探头的特点，比起用光纤纤维的探头来，横断面的自由度大，图13示出了用图12的小型探头求粒子浓度分布的测试实例。在一般光衰减法中，有一个在微粒子场合下发光和受光面的粒子附着问题。若一旦附着影响饱和，在一定时间后进行测试，此时在某种程度上不考虑

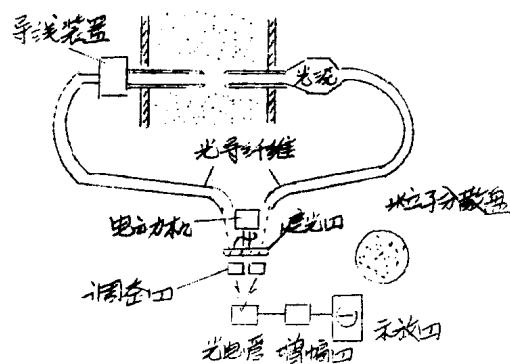


图10. 用光纤纤维测定粒子浓度

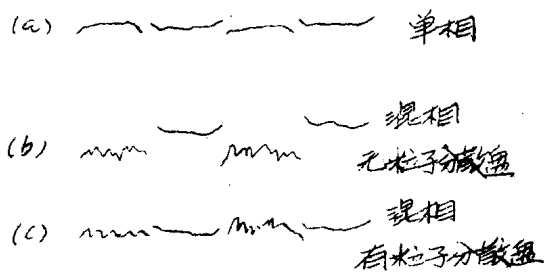


图11 示波口波形

附着影响的几率也是有的。但一般来说则要注意。气固二相流的情况下，为了防止附着影响，实用的办法是充气清洗。

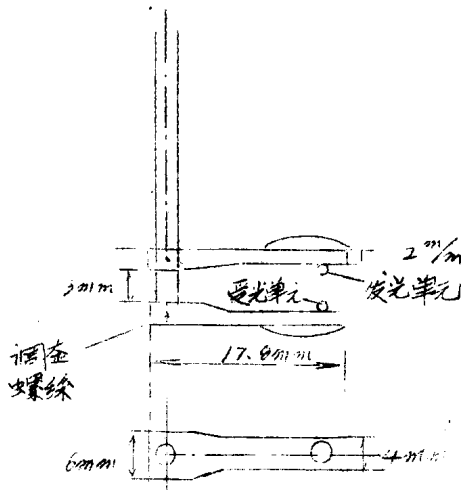


图12 小型探头

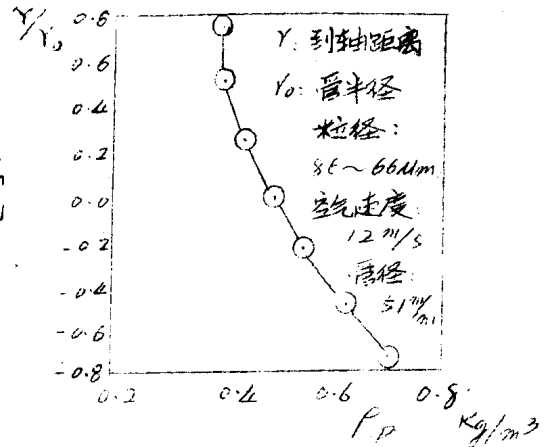


图13 粒子浓度测定例

下面介绍一下由激光透断的时间差来测试粗大粒子的速度和浓度的方法。如图14那样用正方形断面导管代替管的一部分，在相对的侧壁上设置缝窗，一面为发光部，相对的一面为受光部。若发出定向性好的单色光，并根据因粒子通过而得到的信号变化时间差即可求速度，从通过的次数可求浓度，由于没有限制管内粒子运动要与管轴平行，为了判别粒

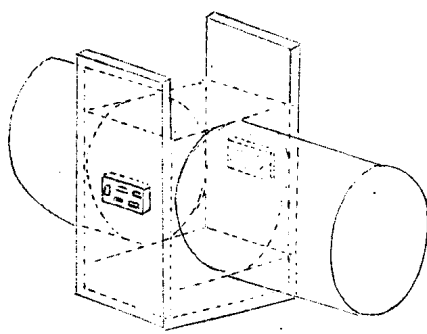


图14 用透断光测定粒子速度

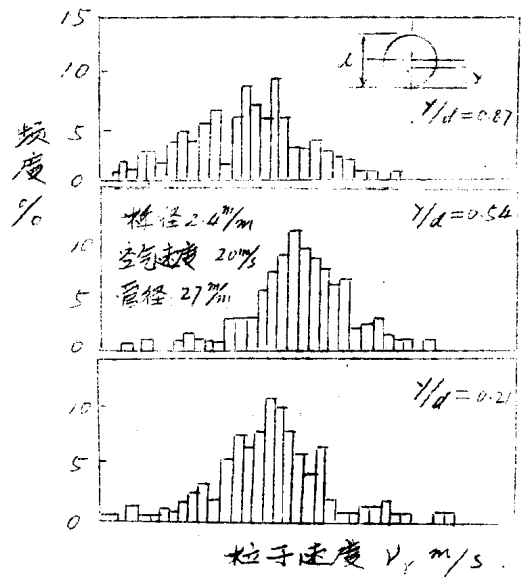


图15 粒子速度的频度分布

子的运动。如图所示设置了许多缝隙，用图14的装置求管轴方向粒子速度的频度分布示于图15。

放射线方法，与下一次第8节所述的示踪法有关，在二相流测试中广泛应用，通常用的是 $\gamma$ 射线。使用 $\gamma$ 射线是因为在实用装置中大多粒子浓度过高，所以往之光通不过边又不能受透明观测。在利用 $\gamma$ 射线的衰减法中，如图16那样安放密封的 $\gamma$ 射线源于一侧，并在相对着的一侧插入铅准直管放置闪光口就可以了，闪光口是将放射线能转变为光能的放射检测口。从光电管得到与发光量（它与由放射线产生的吸收能成正比）成比例的电输出量。该检测口由于比起其它检测口：来响应时间短，所以它经常被用来作为8节所述的用放射线同位素而识别的粒子通过的检测口。无论对绝固或是气固二相流， $\gamma$ 射线应用的例子是很多的。但为了防止放射线危害，有必要设立种种防护法令。

为了测定粒子的浓度，除上述方法外，从很早起就用了流速吸引探头的方法，但这里省略不叙了。

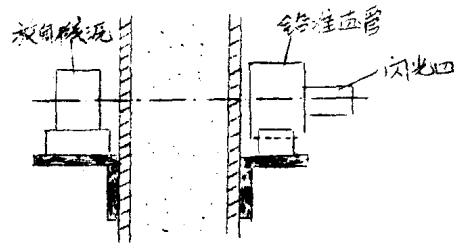


图16 放射线源和闪光口的配置

#### 4. 光学测试 II

(图象传志口)

在相当于摄影机闪光仪的位置，若设置一个图象传志口，则可以根据直接的电气信号得到关于粒子的大小和运动的信息。通常所用的是固体撮象传志口。这是一种将大量能变光输入为电信号的光电二极管並列起来的传志口集合体，它也是把能读出电信号的移位寄存口组合起来的一种仪口。放大传志口的受光部示于图17中。图中的传志口有64个光电二极管挨个排着，从而它的长度为3.2mm。其它，也有2048个光电二极管排列的，市场上能买到的光电二极管每个大小约为 $12 \times 12.11\text{mm}$ 。可以根据测试条件相应选择。

来自光电二极管的信号作为连续的脉冲被读出来，这对扫描频率最多可达到  $MHz$ 。但根据这个扫描频率的界限，则速度测定范围自然相应也产生一定界限。

一般图像传芯口对速度快的情况就不适用。当球形粒子的光像核

穿过如图18那样的二排传芯口的上面，则就可以从下面的公式得到粒径和粒子速度。

当粒子中心正好通过图像传芯口上面时，输出的电压变化为最大。读取此情况下的光电二极管数  $m$ 。若一个光电二极管的长度为  $l$ ，粒子光像的直径  $d'$  由

$$d' = m \cdot l \quad (2)$$

给出。实际的粒径按光学系统的倍数  $n$  除  $d'$  即得。设扫描频率为  $f$ ，光像通过的时间为  $x$ ，区间的扫描次数为  $N$ ，粒子通过时间  $x$  所要的时间为  $N/f$ ，所以  $x$  方向的速度为

$$V_x = x / (N/f) \quad (3)$$

同样， $y$  方向的光像速度为

$$V_y = w / (N/f) \quad (4)$$

实际速度分别按

$$V_x = V_x' / n, \quad V_y = V_y' / n \quad (5)$$

计算。

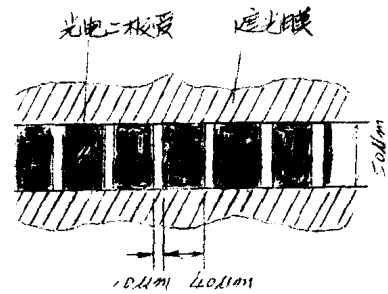


图17 图像传芯口的受光部

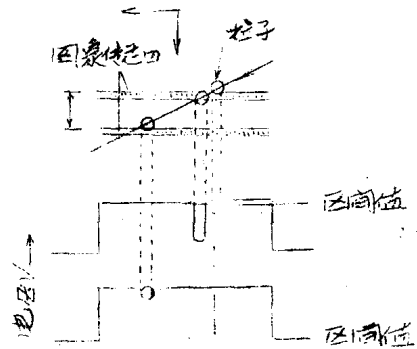


图18 通过图像传芯口的粒子像和输出

上面叙述了用二个图象传志口的情况。但即使用一个图象传志口，也可求粒子速度，从以上的原理亦可知，由于从离散值可以计算粒度和速度，所以也须注意测量误差和测量界限。文献(19)~(22)详细报告了用二根光电管按矩阵排列的图象传志口。

### 5 光学测试 IV (光的反射)

在二相流测试中，一般来说光导纤维是可在粒子浓度高的场合中进行光学测试的仪口。事实上，除了这里所说的用光导纤维反射的方法外，还谈不上有其它适合于浓度局部粒子速度的测试方法。该法的原理示于图19，使二对光导纤维间隔为L，每对光导纤维由连接到光线一侧的光导纤维和连接到处理光信号一侧的光导纤维组成。当粒子通过光导纤维上面时，照在粒表面的一部分光线反射，得到如图示的脉冲信号。从二个脉冲信号的时间差即可求粒子速度，最近光导纤维和图象传志口的组合仪口也有报导。

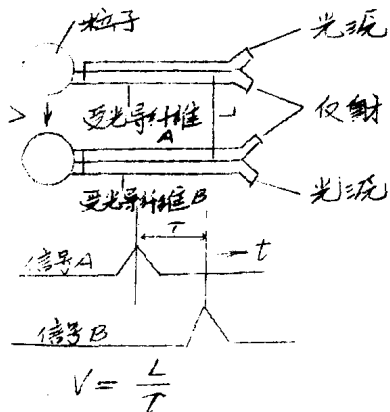


图 19 光导纤维探头

文献(略)

(机械研究第 35 卷第 1 号 1983)

陶关潮译 袁宝洲校

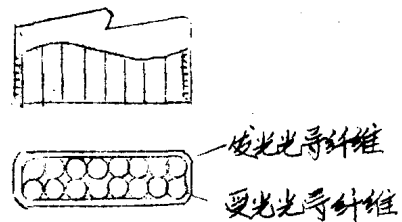


图 20 光导纤维探头

# 二相流(流床、固体)的测试技术(II)

## 6. 光学测试V (激光)

在有关二相流的测试中,近年来发展得最快的要算是利用激光的测试方法了。激光多普勒流速计(以后略记为LDV),照字面上看,是一种为了测量流体速度的仪器。但由于仪器测试常要有散射粒子,所以从本质上讲,LDV适用于含有极小粒子的二相流。它刚一研制出来,就圆满地完成了非接触式局部流体速度的测试。但是在二相流的情况下,如果不能同时测定跟随流体一起运动的微粒子和作为构成二相流的比较粗大的粒子的话就不能发挥LDV的作用。即使是混有固体粒子的运动,在流体平均速度的测试中,用普通的毕托管的情况也相当多,事实上也已经确认毕托管和LDV的结果是一致的。现在,大家变得关心流体和粒子,以及粒径和粒子速度的同时测定,还特别关心粒子浓度的测定了。粒子速度可以从多普勒频率数得到,将粒子速度直接表示为速度信号的计数器和跟踪仪也已买得到,且很好用。所以,这里仅限于讨论粒径与参数的同时测定。

粗略地说,粒径若在数十 $\mu m$ 以下,可以利用散射光的强度来测定粒径。这样如图21所示,若粒径 $d$ 变大,散射光的强度 $I$ 也相应要适当变大,且有 $I \propto \alpha^n$ 的关系,粒径和粒子速度的同时测定大都要用到这个原理。例如,达斯特(DARST)本人的光学系统示于图22。图示装置的特点是,作为测

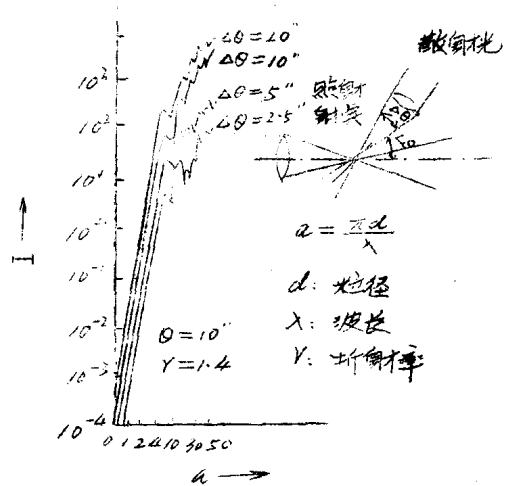


图 21 散射光强度和粒径的关系

定粒径的光路不用激光而用白色光。这是因为在白光的情况下，对于不同粒径，散射光强度单调增加的范围广，从而粒径测定的范围亦广。

在用激光同时测定粒径和粒子速度时，必须要注意由于在测定点中粒子通过的位置不同所引起的散射光强度的变化。通过测定点中部的粒子散射光较强，通过边缘的粒子散射光较弱。好在由通过测定点中部的粒子得到的信号是行有多普勒信号中波的分支数多的信号。因此利用这个波分支数的信息，仅仅处理上面所说的分支数多的信号，粒径的测量精度就可以提高。

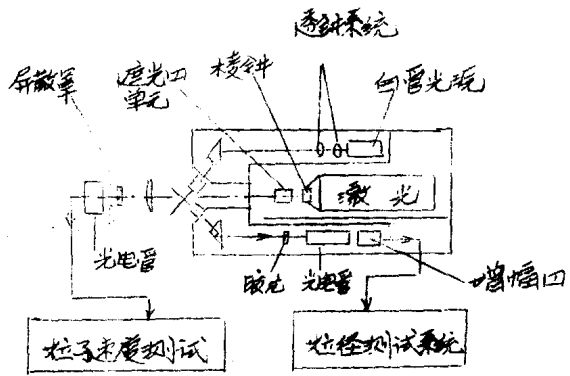


图 22 粒子速度和粒径同时测试系统

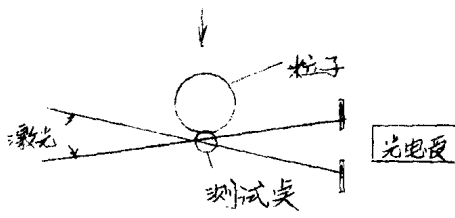


图 23

进入测试点的粒大粒子

最近，测试了  $100 \mu m$  以上的粗大粒径，如图 23 所示，在测定点，当粒子粒子进入和离开的一瞬间，即发出多普勒信号。利用这个原理，按图 24 所示的方法可同时测定粒径和粒子速度。也就是说，从前方散射方式得到的散射光可测定体积的已知粒子进入和离开测定点时间的光信号，而从后方散射光可得到给出粒子速度的多普勒信号，从上面两时间的时间差和粒子速度可求得粒径。在粒子是气泡和液滴的情况下，激光束被粒子折射，而未通过粒子内部，那仅是前方散射光，也可得到显示出三个显著峰的多普勒信号。基于和上面同样的想法，对粒径和粒子速度的同时测定来说，也可使用多波激光束的方式进行。上面介绍了粒径和粒子速度同时测定的例子。但在实际的含固体粒子的

二相流中，必须用激光定量测定粒径的情况是少的。例如，在要进行固体粒子管道输送的时候，大多已知粒径分布或者可以用其它办法更正确地获得粒径值。上述的测试技术是在向气体中的道槽和道体中的气泡那样的流动条件下

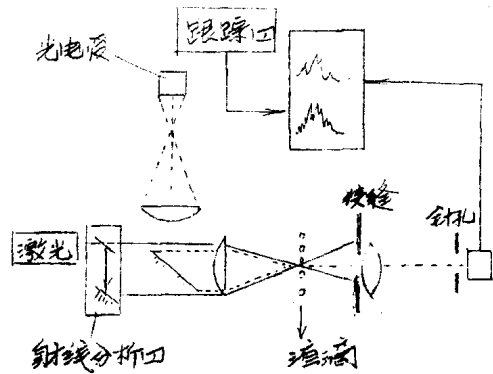


图24 粗大粒子的速度和粒径的同时测定

粒径要发生变化的情况中才发挥作用。在固体系二相流的LDV测试中，只要能判别随流体一起运动的粒子和粗大粒子，也往往就足够了。这里，为了提高测量精度有必要注意通过测定中央的粒子。此情况下，按照设定的散射光强度和多普勒信号振幅的双方界限值，两相信号就能分离。图25表示了该原理。图中A为光电管的输出，在直流（慢变脉冲电平）中重叠了高频部分（多普勒信号）。B为用低通滤波器滤取直流成分的输出。在这里，相应设定了二个门样限定值  $T_1$ 、 $T_2$ 。对于直流成分的振幅超过  $T_1$  的特大信号，由于此时不会有微粒子的散射光，所以可判断为是粗大粒子的信号。而对  $T_2$  以下直流成分特小的信号，由于是从微粒子和通过测定点边缘的粗大粒子得到，因而对此直流成分的信号，就不能区别粒子和粗大粒子。因此对来自A的波形，按串联滤波器的方式取出多普勒频率信号C，并对C设一限定值。在多普勒信号中，振幅大的部分可以认为是通过测定点中央的粗大粒子信号，而对大的多普勒信号并维持小的直流成分的信号可判断为来自微粒子的信号。在图26、27中，显示了基于图中方法求得有关水平管道气流输送气流的紊流分布。由图可知，按被输送粒子的尺寸，显示出气流紊流强度的完全不同。

另一个引人注意的好方法是二模激光流速计。它的原理



示于图 28。用激光分束器分激光为二束后，在测定处的一定间隔连接各自的焦点。结果，在一个粒子通过二束光的集合处，得到二个散射光脉冲。由脉冲的时间差可求得粒子速度。如果粒子的运动方向和激光束焦点结合线的方向不一致，就得不到一对脉冲。这是造成此类流速计噪声的原因。由于具有比 LDV 更方便于测量高速流动的优良；该仪器已经在市场上销售了。

激光测式仪的普及是很惊人的，但对它的应用范围也必须十分注意。首先，由于从原理上它要求

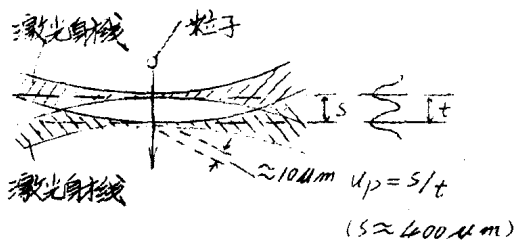


图 28 二焦点激光流速计原理

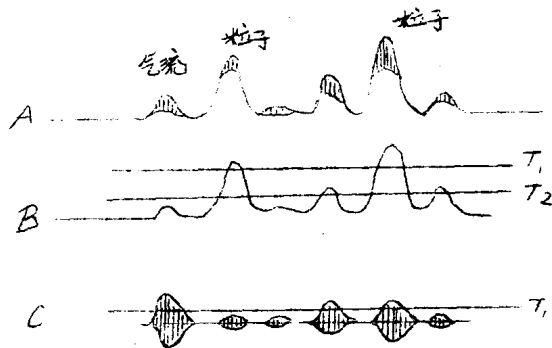


图 25 判别气流(微粒子)和粗大粒子的信号的原理

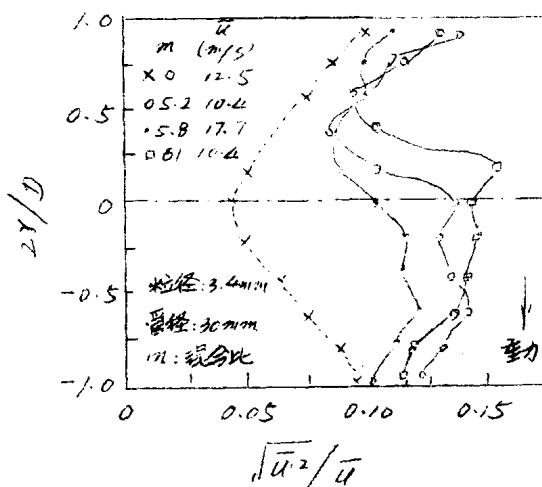


图 26 气流的紊流强度

