

激光多普勒测速的原理、装置及应用

武汉水利电力学院激光组

应用激光测量流体的流速,是六十年代迅速发展起来的一种新的测速方法。它和过去应用的传统的测速仪器,如皮托管、旋浆式流速仪、热线式风速仪等相比,有如下几个主要优点:无接触测量,不干扰流场;测速范围广($4 \times 10^{-5} \sim 10^4$ 米/秒);空间分辨率高;动态响应快。特别是对高速流体、恶性(如:酸性、碱性、高温等)流体、狭窄流场、湍流、紊流边界层等的测量方面,显示出传统方法无法比拟的优点。目前已在航空、动力机械、气象、水工、化工、电力、医疗、国防、科研等部门得到应用。

原 理

激光多普勒测速的原理,是利用光学多普勒效应。即当激光照射运动着的流体时,激光被跟随流体运动的粒子所散射,散射光的频率将发生变化,它和入射激光的频率之差称为多普勒频差或多普勒拍频。这个频差正比于流速,所以测出多普勒频差,就测得了流体的速度。

如图1所示,设两束相干的激光,其波矢量分别为 K_1 和 K_2 , 照射到随流体以速度 v 运动的微粒子 P 上,被粒子所散射,其散射光在观察方向的波矢量分别为 K_3 和 K_4 。 K_1 和 K_2 与 v 的夹角分别为 α_1 和 α_2 , K_3 和 K_4 与 v 的夹角分别为 β_1 和 β_2 。显见,两散射激光束与入射激光的多普勒频差分别为:

$$f_{D_1} = \frac{v}{2\pi} \cdot (K_3 - K_1) \quad (1)$$

$$f_{D_2} = \frac{v}{2\pi} \cdot (K_4 - K_2) \quad (2)$$

于是,可以求得两束散射激光的多普勒频差为:

$$f_D = |f_{D_1} - f_{D_2}| = \left| \frac{v}{\lambda} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 - \cos \beta_2) \right| \quad (3)$$

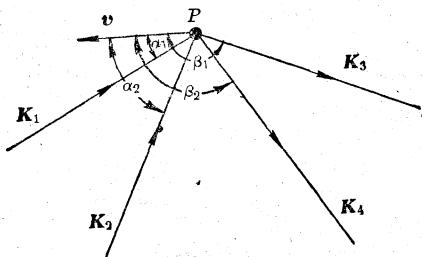


图1 激光被运动粒子散射产生多普勒频差

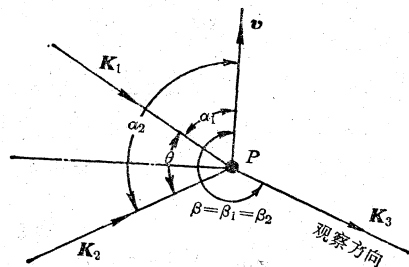


图2 双散射前向散射光路原理

式中, λ 是入射激光的波长。对于下文所要介绍的双散射光学系统, 设被测流速 v 的方向垂直于 K_1 与 K_2 夹角的平分线, 其光路原理如图 2 所示。显然, $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, 由式 (3) 可得多普勒频差的表达式:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \cos \alpha_1 \quad (4)$$

令两个入射激光束 K_1 和 K_2 的夹角为 θ , 由图 2 可见, $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}$, 则式 (4) 变为:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

式 (5) 即为多普勒频差的数学表达式。从式 (5) 中可知, 若测得多普勒频差 f_D , 即可求得流速 v 。

光 路

激光多普勒测速的光学系统, 按光接收器的位置而言, 可以分为前向接收和后向接收型两类。若光接收器对准入射激光的前进方向, 在被测流体的另一侧接收, 称为前向接收型。在入射激光的反方向, 即接收器与激光器在被测流体的同侧接收, 称为后向接收型。按入射到测量位置的激光束数目而言, 可分为单束激光入射的单束散射型和两束激光入射的双散射型。按光接收器接收频差的方法而言, 可分为参考光法和外差法两类。若光接收器接收的是一束参考光 (即未经过测量体积或未经粒子散射的入射激光) 和一束散射光的频差, 称为参考光型。若接收的是两束散射光的频差, 称为外差型。

下面分析几种前向接收型的典型光路, 如图 3, 并作简单的比较。

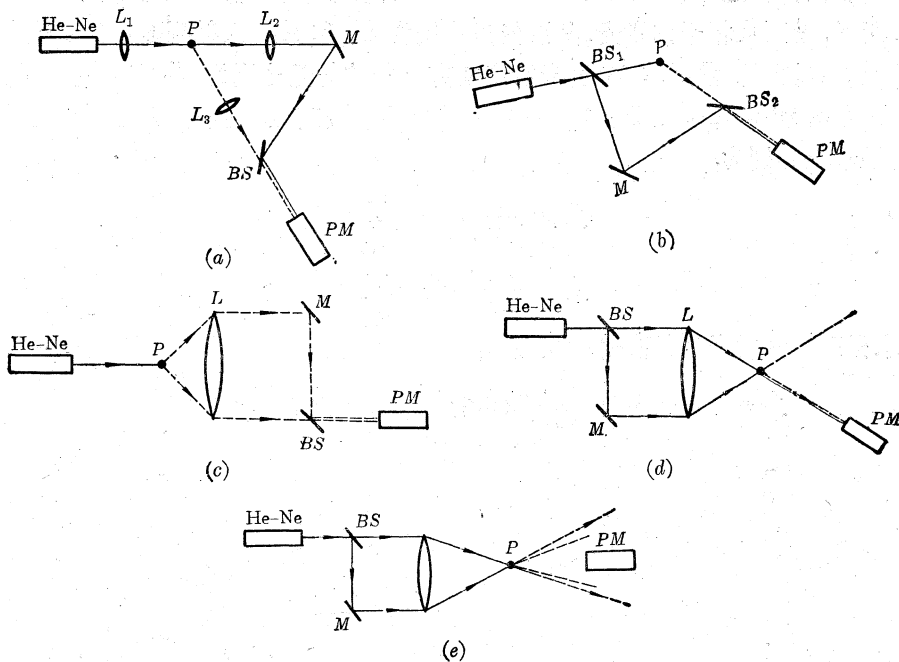


图 3 几种典型光路

图中: He-Ne: 氦-氖激光器 BS: 半反射半透射镜 M: 全反射镜
 L: 透镜 PM: 光电倍增管 P: 散射微粒

图 3(a) 所示的是单束散射参考型。自氩-氦激光器射出的激光, 经透镜 L_1 聚焦到流体中要测的散射粒子 P 点上, 这束光继续前进, 经过透镜 L_2 , 并经反射镜 M 到半反射镜 BS , 此为参考光。另外流体中散射粒子的散射光, 经过 L_3 并透过半反射镜 BS , 恰好与参考光准直, 并在光电倍增管 PM 的阴极上产生频差, 即为多普勒频差。图 3(b) 所示的亦是单束散射型, 不同的是参考光在进入流体之前就被分束了。

单束散射参考型的光路系统, 是激光多普勒测速早期所采用的光路, 它们有二个较大的缺点。一个是所谓准直问题, 根据电磁理论, 可以证明在这种光路中, 参考光和散射光必须准直, 即接近于平行地射到光电倍增管的阴极表面, 否则光电倍增管产生的交流信号将减弱甚至消失。然而要做到接近于平行, 比较困难。即使达到接近于平行, 光电倍增管阴极表面的使用面积就小了, 接收孔径也小, 使接收到的总光能少, 信噪比很低。另一个缺点是散射光的角扩散会引起多普勒频差的频带加宽。可以证明, 散射光的相对角扩散是和多普勒频带加宽的百分比接近于相等的。即假如散射光的相对角扩散为 25% 时, 引起的多普勒频带加宽也几乎达 25%, 这样大大地影响对多普勒频差的测量精度。如果设法减小角扩散, 那么接收的散射光就狭窄, 也会使信噪比降低。

图 3(c) 所示的是单束散射外差型的典型光路。它的主要特点是单束激光入射, 但在接收时对称地选取两束散射光, 即多普勒频差不是散射光与参考光的差, 而是两束散射光的差, 故称为单束散射外差型, 或称为单束散射微分型、单束散射对称型。理论和实验都证明, 此种光路的最大优点在于, 接收孔径的大小对多普勒频带加宽的影响较小, 即可以选用较大的接收孔径, 而不引起多普勒频带的显著加宽。

图 3(d)、(e) 都是两束入射光的典型光路。这两种光路的共同点是, 从氩-氦激光器发出的光, 经过半反射镜 BS 和全反射镜 M 后, 分成两束平行光, 再经过透镜 L 聚集成一光斑, 我们称它为探测体积, 在探测体积内随流体运动的微粒把光散射到各方。图 3(d) 所示的是光电倍增管对准其中一束接收, 称为双散射参考型。图 3(e) 所示的是光电倍增管对称地接收两束散射光, 称为双散射外差型, 或称为双散射微分型或双散射对称型。双散射型的光路比单束散射型光路有一个显著优点, 是较好地克服了准直问题。因为只要两束入射光严格平行, 通过透镜 L 后就能自动地在焦平面会聚成一光斑。而且两束散射光, 在散射时就能互相混合而产生多普勒频差, 故不论光电倍增管置于何方向, 不会影响这个频差的接收。对于图 3(d) 的光路而言, 仍然有一个频带随接收孔径加大而加宽的问题, 但图 3(e) 的光路和单束散射外差型光路一样, 还具有接收孔径增大对多普勒频带加宽无显著影响的优点。因此双散射外差型是目前优点最多的一种光路, 广泛地被采用。

双散射型光路中, 把入射激光分成两束平行光的装置, 称为分束器。除了在图 3 中介绍用的半反射镜 BS 和全反射镜 M 组成分束器外, 还可以用其他方法组成, 如图 4 所示。

图 4(a) 所示的是用光学晶片作的分束器。图 4(b) 所示的是用一个直角三角形棱镜和平行四边形棱镜的组合组成的分束器。图 4(c) 所示的是用四个直角三角形棱镜组合而成的分束器。图 4(d) 所示的是用两个全反射镜和科斯特棱镜组合组成的分束器。其中图 4(c)、(d) 所示的分束器, 比 (a)、(b) 分束器有两个优点: 一是分束器旋转, 两束光的焦点位置不移动, 因此能很方便地测量任意方向的分速度; 二是当 (c) 中两块直角三角形棱镜组合成的复合棱镜或 (d) 中的科斯特棱镜沿光轴方向前后移动时, 两束光的间距可连续变化, 从而使两束光的交叉角 θ 连续变化, 这样便于根据不同流速, 选择不同的交叉角 θ 。另外, (d) 所示的分束器, 还有一

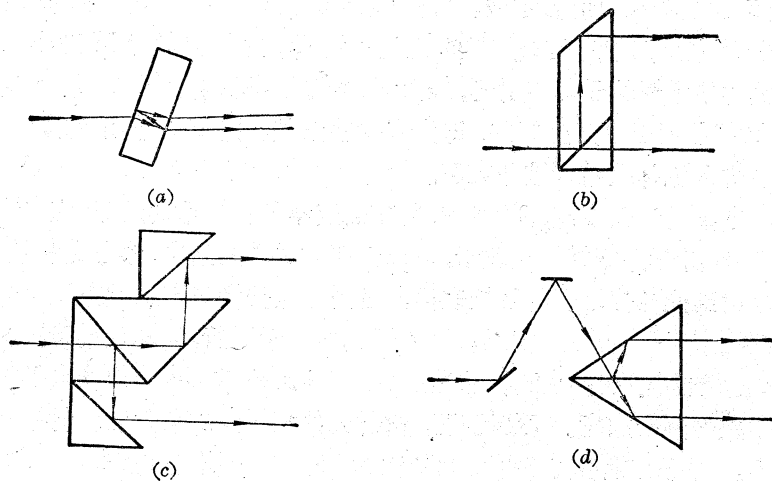


图4 各种分束器

个优点是被分的两束光没有光程差,有助于提高信噪比。

以上介绍的均是前向接收型光路,下面介绍两种后向接收型的典型光路,如图5(a)和(b)所示。

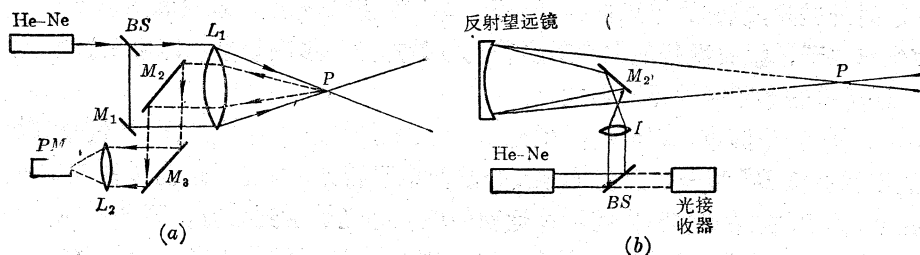


图5 两种后向接收型光路

后向接收型光路,由于光接收器和所有测量仪器可放在被测流体的同一侧,因此在很多场合是特别有利的,可测量不透明的固体、浑浊液体的流速,图5(b)的光路还可测量远距离的烟及云等的速度。

多普勒信号处理装置

实际接收到的多普勒信号,是包含有各种各样噪声的信号。例如,由光电倍增管带来的信号散粒噪声,暗电流散粒噪声,背景光噪声,热噪声,以及其他测量仪器带来的噪声等。同时,多普勒信号还是一个调制信号,由于各种原因,使多普勒频带加宽。例如,振幅调制,散射粒子受布朗运动影响,散射粒子通过探测体积所需要的渡越时间,多粒子进入探测体积初位相的不同,激光束的角扩散及速度梯度等原因,都会引起多普勒频带的加宽。为了尽量减小噪声和带宽,以及从具有一定的噪声和带宽的信号中,取出反映流速的“有用”信号,必须选择合适的信号处理装置,对多普勒信号进行处理。

一种信号处理装置,是利用高分辨率的法布里-珀罗干涉仪,直接跟踪光学信号。此种干涉仪调整比较简单,在大散射角工作时空间分辨率较高,但在测低速时受到限制,一般能测的

下限速度为 25 厘米/秒。另一种信号处理装置是频谱分析仪，它实际上是通过调谐窄带滤波器，把信号用示波器显示出来，其中心频率在频谱范围内缓慢地扫描。由于使用滤波器，在任一瞬时只能观察到全部信号的很少一部分，浪费了有用的信息和时间。近来信号处理装置都采用能跟踪可变频率的振荡器，称为自动跟踪可变频率跟踪器，简称频率跟踪器。

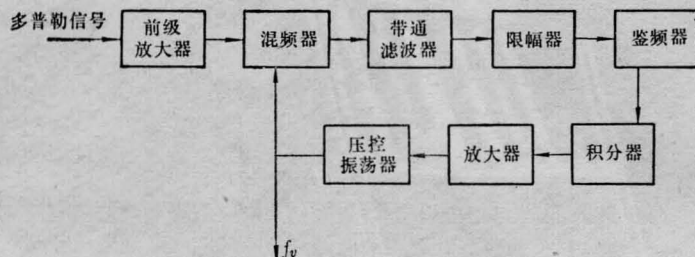


图 6 频率跟踪器方框图

典型的频率跟踪器的示意图如图 6 所示。它的原理是，从光电倍增管输出的随时间变化的多普勒频率信号，加以放大后，和电压控制振荡器（简称压控振荡器）的输出频率用混频器混频，从混频器输出的信号频率是这两个频率的差。为了消除这个频率中附加的噪音，通过一个带通滤波器（中频滤波器）。为了控制振幅的脉动，通过限幅器调整。限幅器输出后，通过鉴频器产生一个直流信号，这个直流信号正比于调频信号的频率与带通滤波器中心频率 f_h 的频率偏移，并经长时间常数的积分器平滑化，再经放大器放大后的电压反馈到压控振荡器的控制输入端。假设 K 表示回路增益， f_h 表示频率跟踪器的带通滤波器的中心频率， f_0 表示跟踪范围的中心频率，则压控振荡器的输出频率 f_v 用式(6)表示：

$$f_v = \frac{K}{1+K} f_a + f_h + \frac{1}{1+K} f_0 \quad (6)$$

如果回路增益高，多普勒频率和频率跟踪器的中心频率接近，就如式(7)那样，压控振荡器的输出频率 f_v 成了多普勒频率 f_a 和带通滤波器的中心频率 f_h 之和：

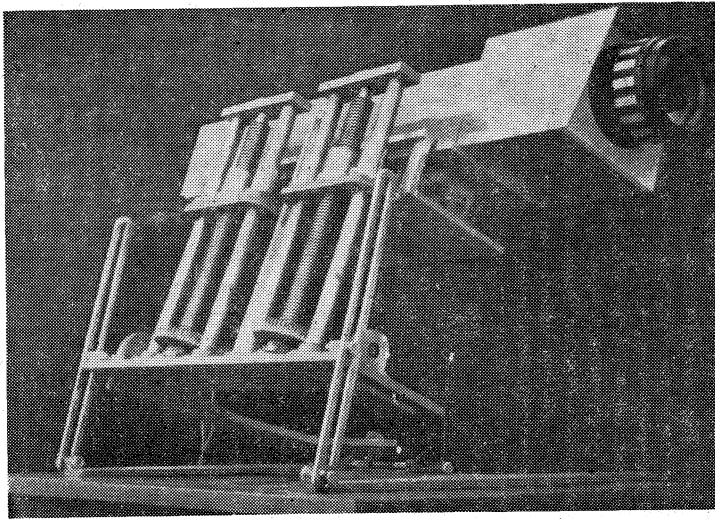
$$f_v = f_a + f_h \quad (7)$$

因此测定压控振荡器的输出频率，从中减去带通滤波器的中心频率，就能正确地测得平均多普勒频差。因为压控振荡器的输出频率是受控制输入端电压控制的，故控制电压也成了“瞬时”多普勒频率的电模拟量。

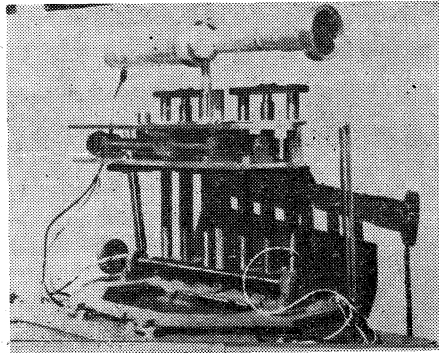
溢流坝面流速分布的测量

最近我们应用本组试制的 JDV-1 型激光流速仪，测量了溢流坝面水流的流速分布，并对测量结果作了初步分析。

JDV-1 型激光流速仪，由发射、接收和信号处理装置等三部分组成。发射部分如照片 1 所示，接收部分如照片 2 所示。流速仪光路，采用典型的双散射外差前向接收型，细部构造如图 7 所示。发射和接收部分分别固定在两个支架上，这两个仪器支架由蜗轮蜗杆传动，能在水平方向和垂直方向作微小移动，以便调节测点位置。移动距离用游标尺读数，读数精度为 2/100 毫米。同时发射部分和接收部分的支架，分别可绕平行于激光管的轴线，在 $0 \sim 90^\circ$ 的范围内旋转，如照片 1 所示，以便测量各种管道和水工模型的曲线部分的流速。



照片 1 发射部分



照片 2 接收部分

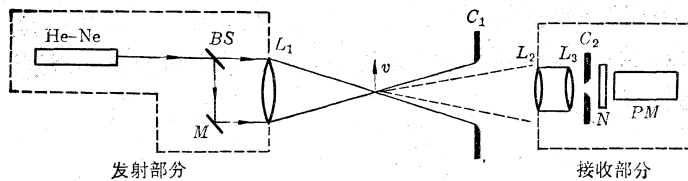
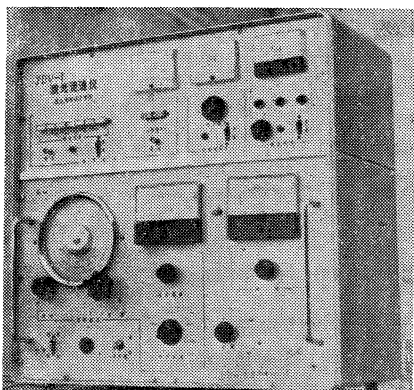


图 7 JDV-1 型激光流速仪的发射和接收部分

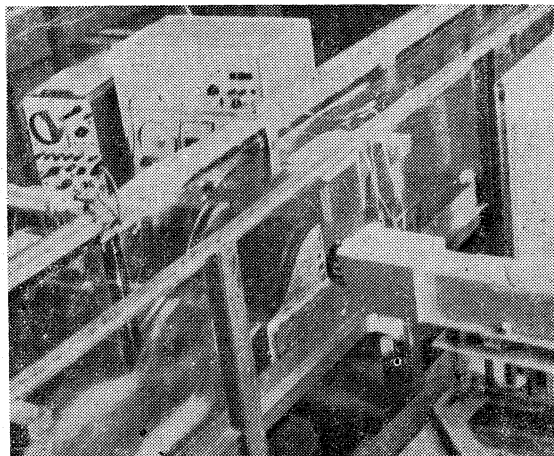
图中: He-Ne: 氦-氖激光器 L_1, L_2, L_3 : 透镜
 BS: 半反射半透射镜 M: 全反射镜
 C_1 : 光阑(垂直狭缝) C_2 : 光阑(针孔)
 N: 干涉滤光片 PM: 光电倍增管

仪器的信号处理装置部分如照片 3 所示, 是由射极跟随器、滤波器、放大器以及经改装的高频微伏计组成。整个电子仪器包括激光电源、光电倍增管电源一起, 组装在一个仪器柜内, 便于操作。另外备有信号监视插孔, 供使用示波器观察多普勒信号波形。

测量现场如照片 4 所示。玻璃水槽宽度 30 厘米, 剖面为奥菲采罗夫标准 I 型的溢流坝模型, 用混凝土制成, 坝高 16 厘米, 流量为 20.92 公升/秒。一共测量了沿坝面中心线上七个断



照片 3 信号处理装置



照片 4 测量现场全貌

面上沿垂线的纵向时均流速分布,其流速分布如图 8 所示。据我们所知,过去对于这样的流速分布图,因缺乏适当的测速仪器,只有近似的理论分析,尚未进行过实际测量,这次测量发现了过去理论分析不够完善和没有引起注意的关于边界层发展的某些新的问题。

使用激光流速仪在水中测量流速时,影响信噪比和信号带宽的因素很多,我们在实际测量中感到有一些问题,需要引起注意。

(1) 由于激光在水中传播,其功率将随着传播距离按指数规律衰减,会引起信噪比降低。此时需要适当提高激光发射功率,我们选择激光器的功率为 3 毫瓦,满足了测量要求。

(2) 必须注意选择合适的两束激光束的夹角 θ 。当夹角 θ 增大时,对散射光功率分布来说,会使信噪比降低。从信号带宽而言, θ 角增大时,可使带宽减小。因此增加夹角 θ 有利有弊,综合考虑的结果,选择较大的 θ 角比选择较小 θ 角更为有利。但是 θ 角也不能太大,因为从(5)式可知,多普勒频差 f_D 随着 θ 角的增加而增高,当测速范围较广时,很难使信号处理装置做到具有很宽的接收带宽。因此 θ 角不能选得太大或太小,一般可在 $5\sim 20^\circ$ 范围内,我们曾经在 12×12 毫米²的管道和 300 毫米宽的水槽中,用同一接收透镜,分别用 $6^\circ 20'$ 、 $7^\circ 20'$ 、 $10^\circ 34'$ 和 $15^\circ 30'$ 进行了试验,其中 $6^\circ 20'$ 信噪比较高,但空间分辨率较差。在本测量中对应于 300 毫米宽的水槽,选择 $10^\circ 40'$,效果良好。

(3) 当测量水流边界附近时,由于流速梯度较大,引起观察到的信号频带显著加宽。我们在测量过程中,根据不同断面的具体情况,在接收透镜之前分别加 1~3 毫米宽的垂直狭缝,使信号带宽有所减小。

(4) 由于激光多普勒测速是利用流体中运动微粒的散射光产生的频差间接测定的,因此,流体中所含微粒的大小和数量,直接影响散射光的强度,因而也就影响信噪比和测量精度。对于一般的水,大多数情况下,不需要人为地再加入微粒,仍含有适当的散射粒子。我们使用实验室地下水库的循环水,含有较丰富的微粒,微粒大小,除混有个别较大的微粒外,基本适宜,故没有人工再掺入微粒,取得了较满意的结果。

(5) 光学系统必须很细致地调整。使两束发射激光很好地平行,同时使它们通过发射头的会聚透镜后,准确地聚在焦点上。另外,使散射激光经接收透镜会聚后,焦点准确地落在光电倍增管前的针孔上。针孔一般以小为好,我们用 0.15~0.35 毫米大小的针孔进行了比较试

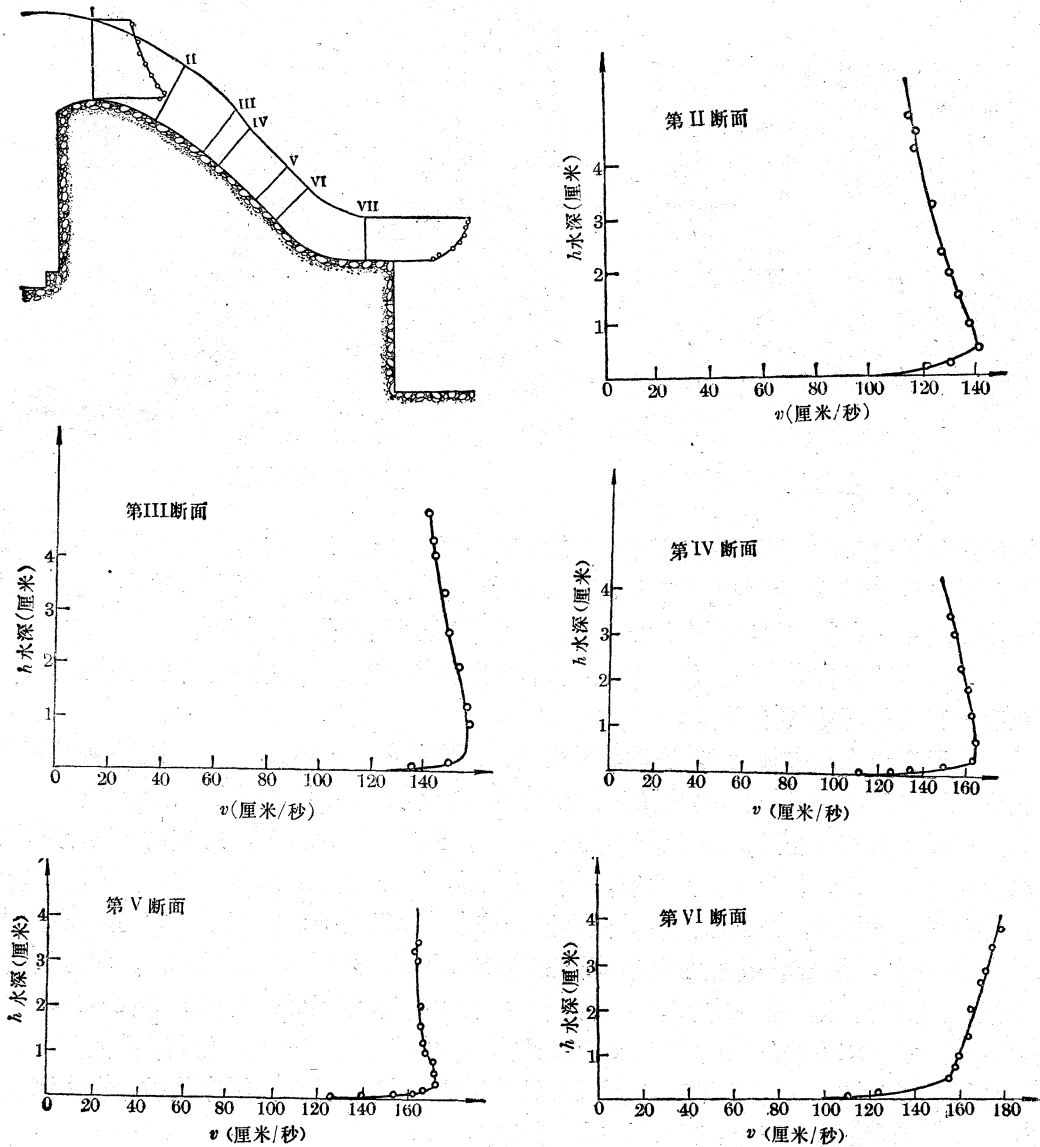


图8 流速分布图

- 说明: 1. 坝的比例 1:2
 2. 第 I、III 断面流速比例是 1 厘米等于 40 厘米/秒
 3. II-VI 断面比例, 水深 1:1, 流速 1 厘米等于 20 厘米/秒

验, 在 300 毫米水槽里进行测量时, 选用的针孔直径为 0.3 毫米。

应用激光测速, 是流速测量技术的一次革新, 但目前尚在发展之中, 还存在一定的问题, 比如要求被测流体有一定程度的透明度, 暂时还未能应用于天然河道的测量, 今后要尽早解决工程现场的使用, 以便更好地为社会主义革命和建设事业服务。