

孙渝生 编著

激光多普勒测量技术及其应用

上海科学技术文献出版社

激光多普勒测量技术 及其应用

孙渝生 编著

上海科学技术文献出版社

(沪)新登字 301 号

激光多普勒测量技术及其应用

孙渝生 编著

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号 邮政编码 200031)

全国新华书店经销

上海市印刷十二厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7 字数 169,000

1995年5月第1版 1995年5月第1次印刷

印数: 1—500

ISBN 7-5439-0557-4/T·348

定价: 14.50元

《科技新书目》335-279

前 言

激光多普勒测量技术,特别是测量速度的技术,从60年代问世以来,因其属于非接触测量,并具有测量精度高,空间分辨率高,测量范围广,动态响应快等优点,从而得到飞快的发展。现今,这一技术不仅在流体力学、空气动力学等方面得到了广泛的应用,而且还延伸到测量固体运动速度、运动物体的瞬态速度变化、振动及长度等各科技和工业领域。近年来,这一技术又有许多新发展,在仪器光路、电路及信号处理方面都有新的进步。国内外对这一技术都相当重视,并以此为专题多次召开国际学术讨论会。

本书叙述了激光多普勒测量技术的原理,该类仪器在光、机、电各方面的设计基础以及结构和有关的技术方法,例举了该项技术的典型应用和一些实践经验,并对这一技术的最新发展作了介绍。作者希望本书能对这一技术感兴趣的读者有所帮助,为这一技术的发展和推广应用尽一些微薄之力。

由于水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1994.4

目 录

第一章 激光多普勒测速的基本原理和特点	1
第一节 光波领域中的多普勒效应	1
第二节 光外差(光混频)	3
第三节 激光多普勒频移的首次测量	5
第四节 双光束型光路和条纹模型	6
第五节 激光多普勒测速的特点	8
第二章 激光多普勒测速仪的光学系统	10
第一节 激光器的基本原理及气体激光器	10
第二节 光束分裂器	33
第三节 光学发送系统	36
第四节 光学接收系统	49
第五节 激光多普勒测速仪的光路	63
第六节 光路设置的考虑	70
第三章 激光多普勒测速的信号处理	76
第一节 多普勒信号的特点	76
第二节 频谱分析法	78
第三节 滤波器组分析法	82
第四节 光子计数相关法	84
第五节 $F-P$ 扫描干涉法	86
第六节 计数型处理机	89
第七节 频率跟踪器	97
第八节 频率跟踪器的环路分析	102
第九节 信号处理方式的选择	118
第四章 散射微粒	120

第一节	对散射微粒的要求	120
第二节	散射微粒的直径	121
第三节	散射微粒的浓度	125
第四节	散射微粒的种类	127
第五节	散射微粒的产生	128
第五章	激光多普勒测速仪设计、调整以及使用中的	
	若干问题	132
第一节	测速窗口及测点定位	132
第二节	流场扫描装置	134
第三节	多普勒信号的加宽	139
第四节	测控区、测量区及空间分辨率	146
第五节	基波的去除	149
第六节	仪器的调整与使用	151
第六章	可辨别流向的激光多普勒测速仪和多维	
	激光多普勒测速仪	156
第一节	光频移	156
第二节	声光调制	163
第三节	旋转光栅频移法	165
第四节	电光调制法	167
第五节	频率综合器	168
第六节	多维激光多普勒测速	169
第七章	激光多普勒测速技术的应用举例	174
第一节	空泡水筒中速度场的测定	174
第二节	核堆燃料组件棒束间隙中流速分布的测量	178
第三节	微电机启动特性的测试	180
第四节	测量瞬态速度的多普勒测速仪	183
第五节	激光多普勒显微镜	185
第八章	激光多普勒测速技术的发展动向	187
第一节	概述	187

第二节	光纤激光多普勒测速仪	187
第三节	半导体激光器和半导体接收器	189
第四节	利用半导体激光器自混频效应的小型测速仪	193
第五节	脉冲半导体激光测速仪	194
第六节	新型小型化信号处理器	197
第七节	包络波数字相关器	199
第八节	新型自动化激光测速信号处理器	201
第九章	激光多普勒技术的其他应用	206
第一节	激光外差测振	206
第二节	激光测长仪	210
参考文献		214

第一章 激光多普勒测速的 基本原理和特点

第一节 光波领域中的多普勒效应

在声学领域内,多普勒效应早为人们熟知,它是19世纪德国物理学家多普勒首先发现的。一个向着声源运动的观察者所遇到的声波频率比他静止不动时所遇到的声波频率要高。相反,对于一个离开声源运动的观察者来说,所遇到的声波频率就比他静止不动时所遇到的低。同样,如果声源运动,而观察者静止,也会产生类似的效应。在日常生活中,站在火车站台上,当火车鸣着汽笛从身边经过的一瞬间,所听到的汽笛声音调突然由高变低了,这就是多普勒效应的一种表现。

爱因斯坦在他的狭义相对论中早就指出:在光波领域中也存在着类似的多普勒效应,而且可以利用这一效应来测量运动物体的速度。当光射向一个运动着的物体时,从观察者(或光电接收器)看来,由运动物体散射的光将产生频率变化,它与物体的运动速度、方向、入射光的波长、方向和观察者的位置有关,如果后几个因素都是已知的,那末只要测得其频率变化,就能推算出物体的运动速度。利用这一原理来测量运动物体、流体和气体速度的技术就被称为多普勒测速技术。此外,用这一技术还可以测量振动、长度等物理参数。由于激光具有亮度高、单色性好等优点,所以很自然地成为一种比较理想的光源,而被测流体和气体中自然存在(或者人为加入)并以相同速度随它们一起流动

的微粒就成为流速测量的媒介，只要测出这些散射微粒的运动速度，就等于测出了流体的速度。

当频率为 f_i (波长为 λ) 的单色光照射到随流体运动着的微粒上时，由于 Mie 散射，使微粒成为一个散射中心，散射光的频率 f_P 将不同于入射光的频率，而产生一个频移，用一个位置固定的光电接收器接收这些散射光，那末在光电接收器上得到的散射光频率又产生一个频移，最终得到的频差与流体运动的速度有一定的关系。见图 1-1。

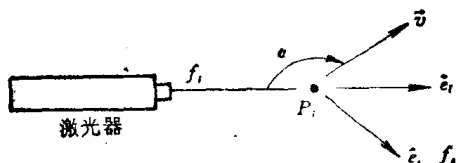


图 1-1 多普勒效应原理图

$$f_P = \frac{(c - \vec{v} \cdot \vec{e}_i)}{\lambda} = f_i \left(1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{e}_i}{c} \right) \quad (1-1)$$

$$f_s = \frac{c}{(c - \vec{v} \cdot \vec{e}_s)} \cdot f_P = f_i \left(1 + \frac{\vec{v} \cdot \vec{e}_s}{c} \right) \quad (1-2)$$

式中： $\vec{e}_i$ ——入射光传播方向上的单位矢量，其取向是从光源指向运动粒子；

$\vec{e}_s$ ——散射光传播方向上的单位矢量，它的取向是从运动粒子 P 指向光电接收器；

$\vec{v}$ ——运动粒子 P 的速度矢量；

f_i ——激光源射出的激光频率；

f_P ——微粒 P 感受到的入射光频率；

f_s ——光电接收器接收到的散射光频率；

λ ——激光束波长；

c ——光速。

将式(1-2)代入式(1-1), 并由于 $c \gg |v|$, 忽略高次项后, 得

$$\begin{aligned} f_s &= f_0 \left(1 - \frac{v \cdot e_i}{c} \right) \left(1 + \frac{v \cdot e_s}{c} \right) \\ &= f_0 \left[1 + \frac{1}{c} v \cdot (e_s - e_i) \right] \end{aligned}$$

而

$$f_D = f_s - f_i = \frac{f_i}{c} v \cdot (e_s - e_i) = \frac{1}{\lambda} v \cdot (e_s - e_i) \quad (1-3)$$

式中: f_D ——多普勒频移量, 称为多普勒频率;

$(e_s - e_i)$ ——多普勒强度方向。

公式(1-3)表示多普勒频移的大小, 等于运动微粒的速度在多普勒强度方向上的分量与入射光的波长之比。

第二节 光外差(光混频)

光波的频率是很高的, 约为 500 THz ($5 \times 10^{14} \text{ Hz}$), 但由于物体运动而产生的光波的相对频移却不超过 $2v/c$ [参见式(1-3)]。如果物体以 1 m/s 的速度运动, 其最大频移也只不过 3.3 MHz 。目前, 世界上还没有一种仪器能直接准确地测量光的频率, 更不用说分别测量两束如此相近的光的频率再进行相减了, 那末怎样才能测出这一多普勒频移量呢?

在此, 不妨让我们先看一看日常生活中的无线电接收机, 它所接收的在空中传播的无线电波信号也是极其微弱的, 但它采用了超外差的接收技术, 得到了满意的收效。在无线电接收机中, 将微弱的输入信号与接收机中产生的另一个频率与它相近的信号进行混频(后一信号称为本机振荡信号)。这两个信号被同时送到一个具有平方律检波特性的器件(通常是一个两极管)

上,然后就会产生一个新的信号,它的频率等于两个输入信号频率之差。设输入信号为 $A \cos \omega_1 t$, 本机振荡信号为 $B \cos \omega_2 t$, 那末平方律器件的输出为:

$$\begin{aligned} i(t) &= (A \cos \omega_1 t + B \cos \omega_2 t)^2 \\ &= A^2 \cos^2 \omega_1 t + 2AB \cos \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t + B^2 \cos^2 \omega_2 t \\ &= A^2 \cos^2 \omega_1 t + B^2 \cos^2 \omega_2 t + AB[\cos(\omega_1 + \omega_2)t \\ &\quad + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] \end{aligned}$$

把这一电流信号送入低通滤波器,滤去频率为 ω_1 、 ω_2 和 $(\omega_1 + \omega_2)$ 的高频成份,得到如下的输出:

$$i(t) = \frac{1}{2}(A^2 + B^2) + AB \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad (1-4)$$

于是电流信号中只包括输入两频率的差频分量和一个直流分量。

现在让我们仍回到光波领域中来,利用与无线电接收机外差技术相同的原理,可以把频移后的散射光与激光器原先射出的没有产生频移的激光束(相当于本机振荡,称为参考光)同时送到一个具有平方律检波特性的光电接收器件上去,就能使光电接收器的输出电流随两束光的频率差发生变化,这就是光外差,或称光混频。巧的是,目前所使用的光电接收器,如光电倍增管、硅光二极管、雪崩二极管等都是理想的平方律检波器,利用它们来收集散射光,就能把光学多普勒频移变为电流的变化,然后采用各种方式对这一信号进行处理,就能取得速度信息。

以激光作光源,利用光射到运动物体上的多普勒效应,并使用光外差技术及各种信号处理的方法,就能测出运动物体的速度,用这种方法来进行速度测定的仪器就称为激光多普勒测速仪。

• • •

第三节 激光多普勒频移的首次测量

1964 年, Yeh 和 Oummins^[1] 首先通过测量激光的多普勒频移得到流体的速度信息, 其装置示于图 1-2, 氦氖激光器射出波长为 $0.633\mu\text{m}$ 的红光, 它的一部分照到被测水流中间, 而悬浮在水中随流体流动的直径约为 $0.5\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微粒对激

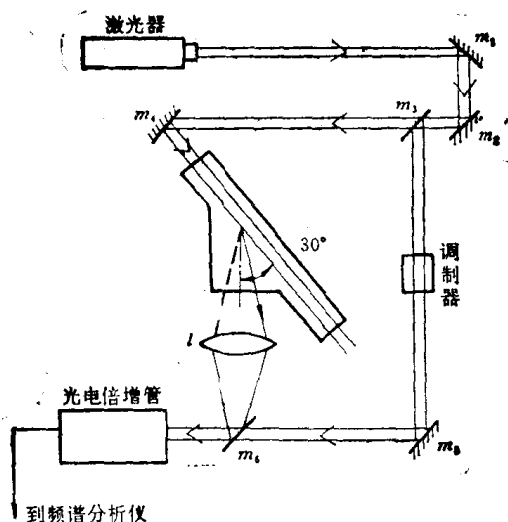


图 1-2 首次利用多普勒频移测量流体流速的装置

光产生散射, 被半透半反镜 m_1 分出的另一部分激光束通过声光调制晶体(布拉格盒)被预先频移了 30 MHz , 并用作为参考光, 它由 m_2 反射后通过半透半反镜 m_3 与由透镜 l 收集的带有多普勒频移的散射光同时射入光电倍增管的阴极面, 并经平行光混频。光电倍增管输出的电流除了包含正比于信号光和参考光强度的直流分量外, 还包括了一个交流分量, 其频率等于两束入射

光的频差, 用一个电子频谱分析仪就可测出多普勒频移。由于参考光束预先被频移了 30 MHz , 所以一个 30 MHz 的输出频率相当于零速度, 而多普勒频移则叠加在这一 30 MHz 的频率上。Yeh 和 Cummins 用这一测速仪测量了管道中层流的速度剖面, 其测量结果与理论上计算的抛物线剖面很好地吻合。用这一装置测量了低至 0.007 cm/s 的流速, 其相应的多普勒频移是 17.5 Hz ; 被测的最高流速是 0.05 cm/s , 相应的多普勒频率是 125 Hz 。它们的测试证明了用光外差技术可以测量非常小的频移, 他们的装置可测的最小频移是 10 Hz 。

第四节 双光束型光路和条纹模型

在第三节中介绍的 Yeh 和 Cummins 所采用的光路通常称为以参考束方式工作的测速仪光路。另一种普遍使用的测速仪光学系统是双光束型(也称差动式), 其原理图如图 1-3 所示。由激光器射出的激光束被分束器分成两束强度相等、相互平行的光束, 通过聚焦透镜会聚于流体中的被测点, 其向前散射的光由流体另一边的收集透镜组会聚于光电接收器前的小孔光阑上, 由接收器把散射光的光强变化转变为电信号, 送信号处理器处理。

在图 1-3 中, 若 $\alpha = \frac{\pi}{2}$, 则接收器在任一 e_s 方向上接收到

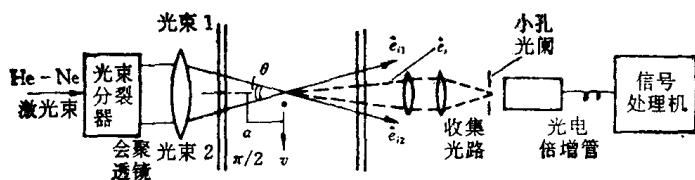


图 1-3 双光束测速仪光路

的多普勒频率可依式(1-8)推导如下:

$$f_D = \underbrace{\frac{1}{\lambda} \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_{i1} - \mathbf{e}_s)}_{\text{光束 2 的散射光引起的 } f_{D2}} + \underbrace{\frac{1}{\lambda} \mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_{i2})}_{\text{光束 1 的散射光引起的 } f_{D1}}$$

$$= \frac{v}{\lambda} (\mathbf{e}_{i2} - \mathbf{e}_{i1}) = \frac{v}{\lambda} \cdot 2 \sin \frac{\theta}{2} \quad (1-5)$$

式中 θ 为两束入射光之间的夹角。

对于这种双光束激光多普勒测速仪的工作原理,也可以用一种更为直观的物理模型——干涉条纹模型来解释,得出的结果与用多普勒模型得到的一样。这一模型是由 Rudd^[2]在 1969 年提出来的,它对激光多普勒测速仪的许多参数提供了定性和定量的分析。

为简化起见,把激光束看作为平面波,当聚焦透镜把两束入射光以 θ 角会聚后,由于激光束良好的相干性,在会聚的交点上将形成明暗相间的干涉条纹如图 1-4 所示。从图中可推算,条纹间隔正比于光波波长,而反比于半交角的正弦值:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (1-6)$$

当流体中以相同速度随流体流动的微粒从垂直于条纹区的

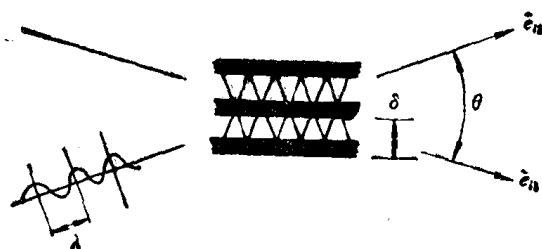


图 1-4 干涉条纹的形成

方向流过时,会依次散射出光强随时间变化的一系列散射光波,如图 1-5 所示。我们把它称之为多普勒信号,并把这列光波光强变化的频率称为多普勒频率。可以很容易地想象到:经过条纹

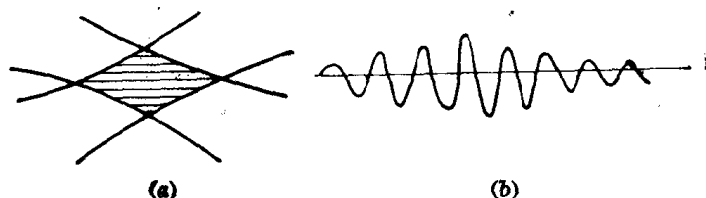


图 1-5 (a) 干涉条纹区 (b) 多普勒信号

区粒子的速度愈高,多普勒频率就愈高;当经过的粒子速度变低,则多普勒频率也就变低了。事实上,只要将垂直于条纹方向上的粒子速度 v 除以条纹间隔 δ ,就能得到多普勒频率与流体速度之间的表达式:

$$f_D = \frac{v}{\delta} = \left(\frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v \quad (1-7)$$

这一公式正好与用参考束模型得到的式 (1-5) 相一致。式 (1-7) 表明:多普勒频率与被测速度(即粒子速度)成线性正比关系。如果考虑到流体的折射率,式 (1-5) 和式 (1-7) 将变为:

$$f_D = \left(\frac{2n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v \quad (1-8)$$

式中 n 为流体的折射率。

第五节 激光多普勒测速的特点

了解了激光多普勒测速的光学原理,就不难理解这一测试技术的特点,与传统的测量方法如毕脱管、热线风速仪相比,它具有以下优点:

(1) 属于非接触测量。激光束的交点就是测量探头,它不

影响流场分布,可以方便地用以测定有毒、高温或具有腐蚀性的气、液体的速度场,利用激光良好的传输特性,还可以测量较远距离的速度场分布,或狭窄流道中的速度场。

(2) 测速精度高。光路中的一些参数一经确定,多普勒频率与速度的关系就被精确地确定,基本上与流体的其他特性如温度、压力、密度等参数无关。其速度测定精度主要取决于多普勒信号的处理。目前,已研制出的二次仪表精度一般都可达1%~2%。由于激光多普勒测速装置一般都没有机械磨损部分,所以只要光学元件的相对位置一经固定,就不必经常进行校正。

(3) 空间分辨率高。由于激光束可以聚焦在很小的区域之内,所以可以测量很小体积内的流速,目前的技术已可测直径10 μm 、深度几十微米的小体积流速。这十分适合边界层、细小管道中的流速测量。经过特殊设计,可以用来测量微血管中血流的速度。

(4) 测速范围广。从光路系统看,可测的速度范围可称是“无限大”。实际上,其测速范围主要取决于信号处理机。目前世界上已有的产品和实验装置的测速范围低至每秒百分之几毫米,高达每秒几个马赫。

(5) 动态响应快。速度信息以光速传播,惯性极小,采用性能较好的信号处理机,如频率跟踪器等,可以进行实时测量,是研究湍流、测量脉动速度的有效手段。

(6) 具有良好的方向灵敏度,并可进行多维测量。在光路中加入频移装置,可以方便地辨别被测流体的流向。光学系统的设计,可以满足二维或三维流场的测量,这些都是其他传统的测速方法难以解决的。

第二章 激光多普勒测速仪 的光学系统

激光多普勒测速仪或测量装置的光学系统主要由激光源、光束分裂器、光学发送系统和光电接收系统(包括光电接收器)几大部件组成。本章以图 1-8 所示用氦氖激光器作为光源的双光束光路为主导,兼顾其他,先依次介绍各部件的结构及基本原理,然后介绍各种类型的光路系统,它们的性能以及典型光路有关的计算公式。

第一节 激光器的基本原理及气体激光器

在英文中,“激光”(laser)是“受激激发辐射的光放大”即“light amplification by stimulated emission of radiation”中各单字第一个字母拼起来的缩写词。激光器是一种新型的光源,可以把它看成相当于电子振荡电路的光波振荡器。在电子振荡电路中,振荡器输出的一部分以正反馈的方式再度返回振荡放大器的输入端,其相位与原输入端的信号同相。经放大后以维持振荡,由于电路中存在耗能元件(如电阻等),所以为了维持振荡,必须从电源补充能量。同样地,也可以用相似的原理来说明激光器的工作过程。为了比较,图 2-1 和图 2-2 分别示出了电子振荡电路和光波振荡器的示意图。在激光器中,放大器就是指受泵浦的激活介质(或称激光工作物质),而反馈则由光学腔体提供,放大器就装在腔内,所以整个激光器包括三个主要的组