

〔英〕B. M. 瓦切西威克兹

M. J. 鲁德著

徐枋同等译

激光多普勒测速

JIGUANG DUOPULEIGELIANG

水利出版社

内 容 提 要

本书较精练地叙述了利用激光多普勒效应测量流速的理论及其在流体动力学中的应用。内容包括激光流速仪发展简史；激光的产生、多普勒频移、光的混频和检测等有关物理现象；激光流速仪的工作原理；信号处理；湍流参数测量以及激光流速仪的应用。

本书对光电流、信噪比、多普勒频率的非单值性等问题有较详细的理论分析和数学描述。对几种不同型式的激光流速仪之间的等效性作了比较和论证。

参加翻译本书的有华中工学院自动化仪表教研室徐枋同（第一、三章）、汪素尊（前言及第二章）、樊鑫瑞（第四章及附录）、肖庆光（第五章）、蒋宗文（第六章），由徐枋同统一校订。

本书可供从事检测仪表以及在流体力学、水利、航空、气象、化工等领域中与流速测量技术有关的科技工作者阅读，也可作为高等院校有关专业师生的教学参考。

B.M.Watrasiewicz, M.J.Rudd
Laser Doppler Measurements
Butterworths & Co.Ltd.1976

激 光 多 普 勒 测 量

(英)B.M.瓦切西威克兹 M.J.鲁德著

徐枋同等译

*

水利出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5印张 108千字

1980年8月第一版 1980年8月北京第一次印刷

印数 0001—2820册 定价 0.70元

书号 15047·4081

前 言

为了对激光多普勒测量能有一个正确的认识,本书先介绍它的历史。象其他许多领域一样,六十年代初期,激光的发明对多普勒测量是一个很大的推动。正如本书所指出的那样,虽然用光的多普勒频移来测量正在运动中的微粒的速度并不一定要用激光,但是在1964年还是用激光进行了第一次测量。从那以后,人们对激光多普勒测量就更关心了。

本书既是为在这方面尚不熟悉的读者写的,同时也是为从事这方面工作的人们写的。读者读了第二章、第三章(第3·1节到第3·4节)和第六章之后,对此课题可以有一个良好的入门。第二章阐述有关的物理现象,第三章的第3·1节至3·4节讨论多普勒测量的简化理论,第六章叙述激光多普勒仪器的一些应用。熟悉这方面内容的读者应集中注意第三章的其余部分以及第五章和第六章,这些章节详尽地讨论激光多普勒测量的理论以及在流体动力学方面的应用。

从1967年以来,在下列四个方面的课题上发表了很多有争论的论文,即:多普勒模糊(*ambiguity*)、多普勒频移的相对论研究方法与古典研究方法之间的差别、条纹模型与多普勒模型比较、以及带宽比多普勒频移要宽的光源是否能用来检测多普勒频移。我们已经指出(第3·10节),无论人们想采用什么样的定义,所谓多普勒非单值性系等效于海森堡测不准原理。多普勒频移的相对论方法与古典方法之不同(2·3·2节)仅在于散射中心的速度是否接近于光速,因

而对于所有的实际应用来说，其区别是无关紧要的。在第3·11节中概略地说明了激光多普勒流速仪模型的等效条件。最后，在第1·7节中指出，之所以采用激光作为光源的真正原因，是由于它固有的高亮度，而不在于它的谱线很窄。

目 录

前 言

第一章 激光风速计发展简史	1
1.1 引言	1
1.2 激光多普勒频移的首次测量	3
1.3 单光束激光风速计	5
1.4 激光风速计的准直	7
1.5 标准的双光束激光风速计	8
1.6 自准直双光束激光风速计	9
1.7 激光风速计的干涉条纹模型	10
第二章 有关的物理现象	12
2.1 引言	12
2.2 激光原理	12
2.3 运动的散射中心引起的多普勒频移	20
2.4 光学混频	24
2.5 光的检测	27
2.6 散射光强度	34
第三章 激光多普勒流速仪的工作原理	39
3.1 引言	39
3.2 以散射光多普勒频移为基础的激光风速计简化原理	40
3.3 干涉条纹模型	44
3.4 滤波模型	45
3.5 激光风速计原理详述	49
3.6 参考光束系统	63
3.7 采样体积	66
3.8 速度矢量的确定	68

35455

3.9	光电流的功率谱	72
3.10	多普勒频率的不确定性	79
3.11	激光风速计模型的等效性	85
第四章	信号处理	90
4.1	引言	90
4.2	频域信号分析	91
4.3	时域分析	93
4.4	相关法	101
4.5	信号分析的直接光学法	104
4.6	速度跟踪的某些实际情况	107
4.7	改善信噪比的方法	109
第五章	湍流参数的测量	112
5.1	引言	112
5.2	湍流参数的定义	113
5.3	湍流速度的测量	115
5.4	雷诺应力的测量	118
5.5	湍流频谱测量	121
5.6	湍流相关性的测量	122
5.7	靠近管壁的测量	123
5.8	在牛顿管流和非牛顿管流中湍流的速度分布和湍 流强度	125
第六章	激光风速计的应用	128
6.1	引言	128
6.2	激光风速计在风洞中的使用	128
6.3	大气风速测量	131
6.4	系统中的噪声	138
6.5	大气湍流的影响	140
附录3A	(3.26)式的推导	141
附录3B	恒等式 $2\langle \sum_{m=1}^{m < n} a_m^2 a_n^2 \rangle = \langle \sum a_n^2 \rangle^2$ 的推导	143

附录3C	单位圆内两点间距离为 ε 的概率分布的计算	144
附录M1	高斯光束的传播	146
附录M2	随机过程的自相关函数及其功率谱	148
附录M3	泊松统计	150

第一章 激光风速计发展简史

1.1 引言

1960年随着激光的发明,人们自然地开始考虑利用“多普勒效应”来测量物质的速度。如所周知,在声学中所谓“多普勒效应”是由十九世纪德国物理学家多普勒首先发现的。当观察者向着声源运动时,他所接收到的声波会较他在静止不动的情况下来得频繁,因此,听到的是较高的音调。相反地,如果观察者背着声源运动,听到的音调就较低。假如声源运动而观察者静止不动,其效应也相同。声音的多普勒效应通常可由高速行驶的火车或竞赛汽车的声音听到。当火车或汽车急驶而过时,噪声的音调便骤然降低。

爱因斯坦1905年在他的狭义相对论中指出,光波也具有类似的多普勒效应。只要物体会散射光线,就可以利用多普勒效应来测量其速度。光源发出的光照射到向着光源运动的物体上,从该物体上所接收到的光将较光源本来的频率为高(蓝色频移)。当物体散射光线时,由物体发射出去的散射光的频率与它所接收到的光的频率是相同的。在光源处的观察者看来,由于物体是向着他运动的,所以看到的是具有更高频率的光。频率相对偏移约为 $2v/c$,其中 v 为物体的运动速度, c 为光速。于是物体速度如为1米/秒,光速为 3×10^8 米/秒,则相对偏移为 150×10^8 分之一。这个数值是太小了,即便采用最好的光谱技术现在也只能检测出有此偏移存在,而不能精确地测出其数值大小。然而光波的频率约为500 埃

赫 (5×10^{14} 赫)，所以它的 150×10^6 分之一 即对应于频移 3.3兆赫，这是一个相当大的频率。

我们稍许离点题来考虑一下家庭日常用的收音机。收音机利用超外差技术检出无线电信号，接收到的外来无线电信号与另一个由本机产生且与该频率相近但不相同的信号相混合，后者称为本振。两种信号均被馈送入平方律检波器件（二极管），该器件产生的信号，其频率为上述两输入信号的频率差。设外来信号为 $A \cos \omega_1 t$ ，本振信号为 $B \cos \omega_2 t$ ，则平方律检波器的输出由下式给出：

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

此信号再通过一个滤波器。滤波器的设计应使得频率高于 $\omega_1 - \omega_2$ 的分量不能通过，于是滤波器的输出为：

$$i(t) = \frac{1}{2}A^2 + AB \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{1}{2}B^2 \quad (1.1)$$

此电流信号系由二个直流分量 $(\frac{1}{2}A^2, \frac{1}{2}B^2)$ 和一个交流分量 $AB \cos(\omega_1 - \omega_2)t$ 所组成。还要注意，如果 A 远小于 B ，即无线电信号微弱，那么信号的功率由 $A^2/2$ 增至 AB ，即增加到 $2B/A$ 倍而不相应地增大噪声，这是超外差或仅是简单的外差技术的重要特性。

现在我们试看将同样的技术用于光波。将多普勒频移信号与本振信号（可以是原来的激光）相混合，然后使两者通过一平方律器件。碰巧所有的光学敏感元件都是平方律器件，因为这些器件都是对光强敏感的，而光强是光波幅值的

平方。于是光电检测器的输出可由式(1.1)得出。这里 A 与 B 分别代表信号光束和参考光束(即称为本振)的幅值。因此光电检测器的输出是由直流和交流两部分所组成。其中直流部分是由总光线所产生,而交流部分的频率则为两信号的频率差。如果参考光束频率和原来的激光频率相同,那么这个频率差正好就是多普勒频移。这样,应用外差技术能够很容易地测量小的频移。所要做的只是测量光电检测器输出中的交流分量的频率就行了。

人们最初认为,只有利用激光光源,才可能应用多普勒频移来测量物体的速度,并认为光源的自然谱线宽度必须远小于所要测量的多普勒频移才行。但是鲁德(Rudd)于1969年指出这种观点是十分错误的。通常之所以应用激光,是因为它是一种极为明亮的光源。

1.2 激光多普勒频移的首次测量

1964年,叶(Yeh)和康迈斯(Cummins)是第一个应用激光多普勒频移来测量流体速度的人。他们所用的仪器示于图1.1中。使用波长为632.8毫微米的氦-氖激光器,发射的是红光。光线被悬浮于水中直径约为0.5微米的聚苯乙烯球状微粒所散射,按体积计微粒的浓度为三万分之一。由于仅仅靠水本身不能产生足够的散射光,所以必须在水中加入某些物质。

激光器输出的光由镀银半反射镜分成两束光,其中一束沿水管轴向。此激光束被水流所散射后,通过在管子上的观测孔将其收集起来,并聚焦到光电倍增管的光阴极上。另一束光通过一个单边带调制器将其频率偏移30兆赫,调制是由

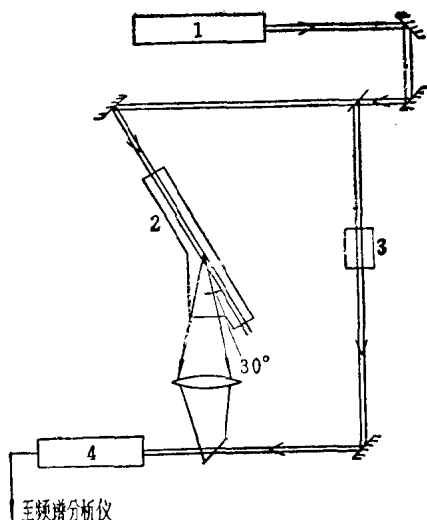


图 1·1 第一次利用多普勒频移测量流体速度的装置简图
(叶和康迈斯, 1964)

1—激光器；2—流管；3—调制器；4—光电倍增管

在水中传播的频率为30兆赫的声波所产生的布喇格 (Bragg) 反射来实现的。然后将此“参考光束”照射到光电倍增管上并与信号光束进行混合。光电倍增管输出的是电流，其中两个直流分量分别与信号光束及参考光束的强度成正比。输出电流中还有交流分量，其频率等于两支光束的频率差，而幅值是两支光束幅值的几何平均。光电倍增管输出的交流分量的频谱可用电子频谱分析仪测出。零速度对应于频率30兆赫，原因是参考光束的频率已被偏移30兆赫，而多普勒频率是与30兆赫相加的。

叶和康迈斯应用此激光流速仪测量了流过水管的流体层流速度分布，其结果与理论的抛物线分布相当符合。用此仪器可以测量低至0.007厘米/秒的极低流速，此时所对应的多

普勒频率为17.5赫。所测的最大流速为0.05厘米/秒，相应的多普勒频率为125赫。

因之，证明了外差技术可以用来检测很小的频移。叶和康迈斯所测到的最小频移为10赫，或约为光频的 10^{-14} 。

1.3 单光束激光风速计

1966年，福里曼 (Foreman)、乔治 (George)、路易士 (Lewis)、桑顿 (Thornton)、费尔顿 (Felton) 和沃特生 (Watson) 等人首先撰写了广泛论述激光风速计的论文。这些研究者所使用的是现在所谓的“单光束风速计” (图1.2)。之所以这样称呼是因为系将一束激光聚焦至欲测速度的流体上。一部分光被散射而成为信号光束，另一部分则透射过去作为参考光束。信号光束用透镜 L_1 准直后穿过窗口 A ，此窗口即确定了散射角。然后用反射镜 M_1 将该光束反射到光电倍增管上。参考光束用透镜 L_2 准直后，利用反射镜 M_2 和分光器使其与信号光束重迭。于是两束光一起照射在光电倍增管感光面上，并产生差拍。

此系统的工作是十分令人满意的，它可测量液体层流和测量气流。测量液流时，不需要向液体中加散射微粒就能获得足够强度的信号。但在测气流时，则必须加烟灰微粒。所测量的空气流速可达1000英尺/秒，对应于多普勒频率约为33兆赫。因此，此仪器是用于风洞的一种实用工具。

福里曼及其同事们对激光的散射性质进行了广泛的研究。他们测量了为散射角的函数的散射光强度，发现即使由非常小的微粒所散射的光，小角度的前向散射比后向散射强得多。散射角小于 10° (即光线偏转小于 10°) 时，散射强度是

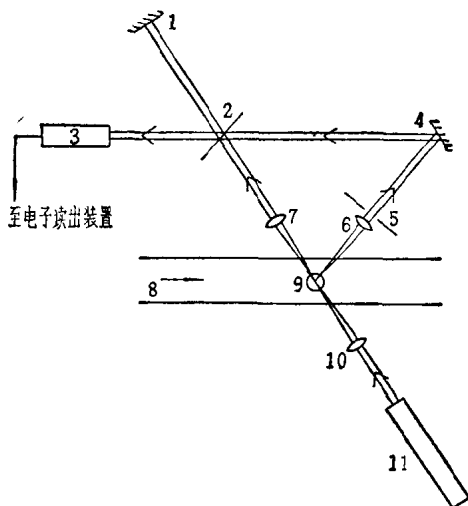


图 1·2 单光束激光风速计图

1—反射镜 M_2 ；2—分光器；3—光电倍增管；4—反射镜 M_1 ；5—窗口
A；6—接收透镜 L_1 ；7—接收透镜 L_2 ；8—液流；9—散射体；10—聚
焦透镜；11—激光器

散射角为 180° （即光线沿其入射方向反向散射回去）时的数百倍。因此他们采用的系统以及差不多后来所有的系统都只采用小散射角的散射光。这种系统的缺点是风速计要由分别装在被测流体两侧的发射机和接收机两部分组成。

1966年曾对散射中心的性质产生过某些怀疑。由流体分子本身所产生的瑞利（Rayleigh）散射已证明是很微弱的（2·6节）。曾有人认为散射可能是由于流体的密度或温度波动所造成，因为从未加散射微粒的液体中也得到了多普勒信号。福里曼及其同事们尝试测量一种光谱纯液体（*Spectroscopic-grade liquid*）的多普勒讯号，结果什么也没有测到。但是过一会儿，当液体已经污染之后，他们就测到了信

号，这说明散射源就是污染大多数液体的尘埃微粒。

福里曼和他的同事们第一次采用跟踪滤波器来测量多普勒频移。测量电子信号频率的标准方法是用频谱分析仪，它基本上是由一个调谐电子滤波器所组成。滤波器的调谐频率应能扫描所需要的频段。改变调谐频率可由电子学或机械的方法来进行。如同无线电接收机一样，转动拨盘从刻度的一端开始均匀地移动至刻度的另一端，当经过多普勒频率所在的那个位置时，输出信号会出现峰值。

跟踪滤波器会自动地将其本身频率锁住在多普勒频率处并固定下来，它是调频无线电接收机中“自动频率控制”（ $a.f.c$ ）的一种更复杂变型。对于跟踪滤波器将在后面（第四章）作更详细的讨论。福里曼和他的同事们将跟踪滤波器的频率变换为与多普勒频移成正比的模拟电压并将它记录下来。这些仪器不仅可用以测量稳定流速，还可以测量湍流的脉动流速。

1.4 激光风速计的准直

当信号光束和参考光束射到一起产生差拍时，为了获得良好的“外差效率”，也就是说为获得满意的输出，对于单光束激光风速计中的一个问题，是需要很好地将其准直。在两束光重叠、平行以及波阵面曲率相同的情况下，或者说，当两束光完全重合时可以做到这一点。如果我们在光电检测器的位置上设置一块毛玻璃屏来进行观察，上述原因就看得最为清楚。即便信号光束和参考光束具有相同的频率，即没有多普勒频移，但是，如果信号光束与参考光束不十分平行，那就会观察到一组平行的干涉条纹。如果两支光束的波

阵面曲率不完全相同，就会观察到一组圆形干涉条纹。两支光束愈是不相重合，出现的干涉条纹就愈多。现在如果我们改变信号光束的相位，对应于运动的微粒来说，将看到这些条纹是在移动。平行的干涉条纹是向着一边移动，而圆形的条纹是从圆心扩展开来或者是聚向圆心而消失。光电检测器输出信号的大小刚好是当这些条纹中的一条进入或离开视场时所产生的波纹的大小。如视场中有 n 条条纹（ n 不一定是整数），波纹的幅值系与 $\sin 2\pi n$ 成正比。由于总的光的幅值系与 $2\pi n$ 成正比，因此波纹的幅值与 $\sin 2\pi n / 2\pi n$ 成正比，而外差信号的强度与 $[(\sin 2\pi n) / 2\pi n]^2$ 成正比。对于 $n = 0$ 的情况，此函数最大值为 1（100% 外差效率）。当 n 增加时，外差效率迅速下降，因此，为取得最高效率，在光电检测器上必须看不到干涉条纹。

这是一个十分严格的准直准则，等效于要求在迈克尔逊（Michelson）干涉仪的输出中看不到干涉条纹，此要求本身就是一个难以达到的目标。这就要求对整台仪器非常仔细地进行准直并装置在一个很坚固的基础上。因此，现在已经设计出了一些更为容易安装的系统。

1.5 标准的双光束激光风速计

这种型式的激光风速计是 1967 年由哥德斯廷（Goldstein）和哈根（Hagen）首先提出来的（图 1.3）。该系统用一分光器将激光器发出的光束在进入被测流体之前分成两束。用反射镜将两支光束偏转并聚焦到流体的同一点上。其中一支光束即参考光束系直接穿过流体射至光电倍增管，另一支信号光束则被流体部分地散射。于是散射光中的一部分

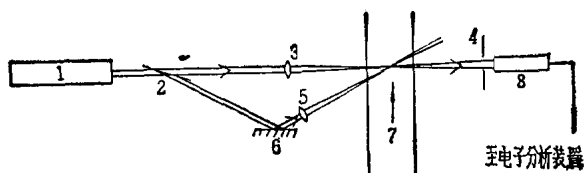


图 1·3 哥德斯廷和哈根的双光束激光风速计图

1—激光器；2—分光器；3—透镜 L_1 ；4—窗口A；5—透镜 L_2 ；6—反射镜；7—液流；8—光电倍增管

就以与参考光束相同的方向行进，此散射光束穿过窗口A并与参考光束在光电倍增管上进行混合。窗口A是用来限制被观察的散射体积的。值得注意的是，除了激光器和光电倍增管互相对换位置之外，此系统与单光束系统完全相似。

准直此系统要比激光单光束风速计容易得多，其准直则为两支光束必须共焦点，即聚焦和重迭在同一个焦点上。主要的散射发生在参考光束的焦点处，在该处散射光与参考光束本身完全重合。由于信号光束可能会稍微偏离焦点，故设置窗口A用以删去从别处散射来的光线。

哥德斯廷和克雷德 (Kreid) 于1967年成功地用此系统来测量方形管入口处的流速分布。用休累特-帕卡德 (Hewlett-Packard) 波形分析仪测量其多普勒频移。

1·6 自准直双光束激光风速计

倘若将分光器和两支光束的聚焦器件结合在同一个光学器件中，则激光风速计的准直还可以更容易些。这样的系统称为自准直系统，是1969年鲁德首先阐述的(图1·4)。激光束由显微物镜 L_1 、 L_2 扩展后覆盖于遮光框M上，通过遮光框

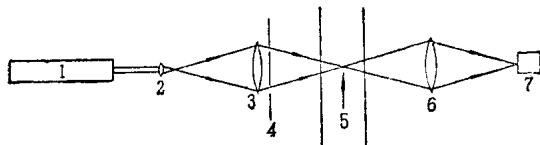


图 1·4 自准直激光风速计图 (鲁德, 1969)

1—激光器; 2—透镜 L_1 ; 3—透镜 L_2 ; 4—遮光框 M ; 5—液流; 6—透镜 L_3 ; 7—光电二极管

上的两条缝产生两支光束。由于这两支光束是由同一个光学部件即遮光框所产生的, 因此它们的间隔保持固定。而且用单透镜 L_2 ^①将两支光束聚焦到被测流体上。两光束用同一个元件聚焦, 只要透镜没有象差, 它们必定聚焦在同一个体积上。因此系统是自动准直的, 并且从本质上不受振动或温度变化的影响。

由于两束光是相同的 (两者中的任一束可作为参考光, 而另一束即为信号光), 由透镜 L_3 收集并聚焦到光电检测器上。因为该系统始终能做到完全准直, 所以其多普勒信号总是较前述的两种系统为强。因此检测光线可以使用简单的固体光电二极管来替代前述系统所用的光电倍增管。

鲁德1969年成功地应用此系统测量了管中的湍流流动。

1·7 激光风速计的干涉条纹模型

1969年鲁德发现, 用最通用的等效的条纹模型来代替前面所述的用多普勒频移来阐述激光风速计的工作情况也是很有效的 (3·3节)。如果我们研究双光束系统中两束光相交的

① 原文误为 L_3 。——译者