

激 光 多 普 勒 技 术

[英]L.E.特瑞恩 著

王仕康 沈 熊 周作元 译

清 华 大 学 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍了利用多普勒效应检测速度的基本原理和应用。主要内容包括光学及激光基本知识、光学差拍原理、参考光技术及差动多普勒技术光学系统、有关多普勒信号处理及流向判别技术,最后简要介绍了一些应用问题。

本书可供实验流体力学、热物理工程、燃烧测量等专业的科技人员以及高等

The Laser Doppler Technique

L.E.Drain

John Wiley & Sons 1980

激光多普勒技术

〔英〕L.E.特瑞恩 著

王仕康 沈 熊 周作元 译

*

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京京辉印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 9¹/₄ 字数: 200千字

1985年8月第一版 1985年8月第一次印刷

印数: 00001—7000

统一书号: 15235·170 定价: 2.10元

译 者 的 话

激光多普勒流速计是检测流动速度的得力工具。其原理性实验于 1964 年完成，发展至今已成为一门比较成熟的近代测量技术。它涉及光学、激光、光电检测和信号处理以及实验流体力学等学科的知识，因此是一门既有理论又有广泛实际应用的综合性技术。一般简称为 LDA 或 LDV 技术。经验告诉我们，只有了解了 LDA 的原理后，利用它进行流动测量时，才能扬长避短，运用自如。翻译出版本书的目的，就是为了适应上述需要，向使用 LDA 的科技工作者提供一本较系统介绍该技术基本原理的参考书。

正如作者在前言中所指出的，本书着重于问题物理本质的阐述，对不必要的数学推演予以从略，至使在不大的篇幅中容纳了 LDA 技术中所涉及的主要问题。因此对初学者来说，这是一本很好的入门书。此外，作者在叙述过程中引用了一些主要文献，因而对从事 LDA 研究的人员来说也是有参考价值的。

参加本书翻译工作的有天津大学王仕康（前言及第一、二、三章）；吴文林（第四章）；清华大学沈熊（第六、七章）；周作元（第五、八、九章）等同志，限于译者水平，不妥之处，敬希读者指正。

目 录

序 言	1
第一章 引 论	2
1.1 多普勒频移	2
1.2 光学差拍	3
1.3 差动多普勒技术	4
1.4 应用概况	6
第二章 光学与激光	8
2.1 可视作电磁辐射的光	8
2.2 几何光学	9
2.3 波动光学	11
2.4 干涉	13
2.5 光程长度	14
2.6 迈克尔逊干涉仪	15
2.7 反射光之间的干涉	16
2.8 法布里-珀罗干涉仪	17
2.9 衍射	19
2.10 焦点处的衍射	20
2.11 高斯光束光学	23
2.12 偏振光	24
2.13 偏振棱镜	25
2.14 延迟片	27
2.15 由反射产生的偏振	28
2.16 激光器	30
2.17 光放大	30
2.18 激光振荡器系统	32

2.19	激光模式	35
2.20	激光的相干长度	37
2.21	LDA 的光检测器	38
2.22	光电倍增管	38
2.23	光电二极管	40
2.24	光子量子化	41
2.25	光电发射统计学	41
第三章 多普勒频移		44
3.1	多普勒频移的由来	44
3.2	移动源的多普勒频移	45
3.3	相对论多普勒频移	46
3.4	散射物的多普勒频移	49
3.5	散射多普勒频移的另一种推导	51
3.6	频移的几何推导	53
3.7	散射的能量守恒及动量守恒	55
3.8	由反射引起的多普勒频移	56
3.9	衍射光栅产生的多普勒频移	57
3.10	声波产生衍射	59
3.11	布朗运动和多普勒频移	61
3.12	用光谱方法测量多普勒频移	62
第四章 光学差拍及参考光技术		65
4.1	光学外差原理	65
4.2	光学差拍中的信噪比	67
4.3	光学差拍中的相干性	68
4.4	相干锥	70
4.5	相干性的几何说明	72
4.6	激光散斑	73
4.7	相干因子	75
4.8	参考光束外差	79
4.9	参考光实验装置	80
4.10	一种有用的参考光装置	82
4.11	多普勒信号	84

4.12	渡越时间加宽	86
4.13	加宽机理	87
4.14	线宽对精度的限制	90
4.15	自调准光学装置	91
4.16	后向散射实验	93
4.17	参考光实验的信噪比	94
4.18	信噪比计算	96
4.19	典型实验的信噪比	98
4.20	后向散射的信噪比	101
4.21	灵敏度的极限	102
第五章 差动多普勒技术		105
5.1	差动多普勒频差	105
5.2	依照干涉条纹的解释	106
5.3	探头体	108
5.4	差动多普勒技术的光学装置	109
5.5	偏振分光	113
5.6	自准棱镜装置	115
5.7	光收集装置	116
5.8	双散射技术	117
5.9	多个粒子穿过条纹区时的信号	119
5.10	信噪比	121
5.11	相干和非相干信号	123
5.12	差动多普勒技术的分析	124
5.13	路德技术中的信号	130
5.14	速度测量的精度	132
5.15	消除基底	133
5.16	光学缺陷	135
5.17	球差问题	135
5.18	透镜特性的评定标准	139
5.19	窗口的象差	142
5.20	检测器的调准	143
5.21	光学系统的选择	144

第六章 信号处理技术	146
6.1 LDA 信号的类型	148
6.2 频谱分析	148
6.3 用频谱分析测量漏流	152
6.4 频率跟踪	155
6.5 自差跟踪	157
6.6 随机相位脉动	159
6.7 频率解调信号的频谱分析	160
6.8 相位去相关信号的多普勒信号	162
6.9 计数技术	166
6.10 计数有效性	167
6.11 速度偏置	168
6.12 偏置误差的修正	170
6.13 滤波器库处理法	175
6.14 光子相关	179
6.15 相关函数的转换	184
6.16 光子相关技术的灵敏度	187
6.17 计算机处理和其他技术	187
6.18 信号处理器的选择	189
第七章 方向鉴别和频移	192
7.1 方向模糊	192
7.2 双相检测	192
7.3 高频相位调制	198
7.4 单个粒子渡越的方向鉴别	198
7.5 频移	201
7.6 频移的技术	203
7.7 旋转衍射光栅	203
7.8 声-光器件	206
7.9 利用电-光技术的频移	208
7.10 旋转的半波片	209
7.11 多器件电-光频移装置	213
7.12 电-光相位调制	218

7.13	频移的实际应用	220
7.14	频移使用中的问题	221
第八章	散射粒子的性质	224
8.1	对散射粒子的要求	224
8.2	流体动力学条件	225
8.3	小粒子的散射光	227
8.4	球形粒子的散射	229
8.5	液体流动中的播粒	234
8.6	气体的散播粒子	235
8.7	散射光偏振方向的变化	239
8.8	粒子尺寸对 LDA 信号的影响	241
第九章	应用	245
9.1	速度剖面 and 湍流强度剖面的测量	245
9.2	多维速度分量的测量	247
9.3	二维分量的差动多普勒系统	250
9.4	湍流的研究	253
9.5	空气动力学方面的应用	257
9.6	风速测量	259
9.7	燃烧的研究	283
9.8	生物学的显微测量	267
9.9	固体表面的速度测量	269
9.10	激光干涉技术	273
9.11	有关的技术	276
9.12	结论	278
	参考文献	279
	参考书和会议录	285

序 言

激光是一种高强度相干光源，它的发展使很多以前不能实现的光学测量技术得以实现。本书的主题是用确定来自运动粒子或物体的散射光的多普勒频移来进行速度测量的光学技术。近年来激光多普勒技术已有很大的发展，目前使用得也很多，特别是用于研究流体的流动。对于希望使用激光多普勒技术测量速度和湍流的读者来说，本书是该技术原理的一个入门。

本书着重解释基本物理原理，由于一些从事工程技术的读者不熟悉光学，专门安排一章简述基本的光学概念以及与激光多普勒测量有关的激光特性。虽然书中给出了很多数学的分析，读者可以不予深究。如果承认其中的结果，只要具备数学的基本知识就能理解该技术的原理。

已经发表的有关激光多普勒技术的文章已超出一千篇，在此没有把所有的参考文献都列出来，已列出的文献对于从事某些专题的读者来说已足够了。

我愉快地对哈韦尔(Harwell*)的同事们：P.J.Bourke 博士，C.G.Brown 先生，W.Dalzell先生，A.B.Gillespie 先生，B.C.Moss 先生，C.R.Negus 博士，A.Taylor 先生，G.Wigley 博士和 M.Y.Yeoman 博士的资料及意见表示谢意。我特别要感谢 P.Hutchinson 博士，B.T.M.Willis 博士和 N.Lightfoot 先生，他们阅读并评论了书的手稿。

* 英国原子能研究中心

第一章 引 论

1.1 多普勒频移

1964年叶(Yeh)和库明斯(Cummins)⁽¹⁾首次观察了水流中粒子的散射光频移,证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流动速度。紧接着又有人利用该技术测量了气体流速⁽²⁾。激光所产生的强单色光用于这类测量极为适宜。这种技术的形式很多,都被称为激光多普勒测速技术,一般缩写为‘LDA’。

任何形式的波传播,由于波源、接收器、传播介质或中间反射器或散射体的运动,会使频率发生变化。奥地利科学家多普勒(Doppler)于1842年首次研究了这个现象,后来就把这种频率变化称作多普勒频移。声学中所熟悉的多普勒频移起因于声源和接收器的相对运动,包括光在内的电磁波也有这种形式的频移。由于银河系以极高的运动速度离开我们,从遥远的银河系传到地球的‘红光’频率向下偏移了一个值。实验室里用穆斯堡尔(Mössbauer)效应所得到的极好的共振吸收谱线及发射谱线,证明了移动的放射源产生 γ 射线频移。

在我们所关心的实验中并不存在光源和接收器之间的相对运动,频移是由粒子或较大物体的运动产生的,它们把光源的光向着接收器反射或散射。这和在非常低的电磁波频段中使用雷达的原理是一样的。通常遇到的物体速度和光速

相比要小得多，相应的多普勒频移也很小。例如，若光源为氦-氖激光器的红光，物体以 10m/s 的速度运动时，散射光最大频移为 32MHz ，即为光频 $4.7 \times 10^{14}\text{Hz}$ 的 $7/10^8$ 。要分辨这样小的频移，已超出了光谱仪的最高分辨率，因此流速没有达到超音速时，就不能直接使用光谱作为实用的测量方法。

1.2 光学差拍

唯一适合于测量非常小的多普勒频移的技术，利用了外差原理，它让两个频率不同的波在具有非线性响应的器件中进行差拍。这个原理在无线电电路中很有用，也可应用于光束同时照射光检测器时的外差。检测器输出中包含了频率差或外差频率的分量。

用光学方法测量流速时，含有多普勒频移的散射光可以同直接来自光源的没有频移的光进行外差，也可以同具有不同频移量的另一散射光进行外差，这后一部分散射光可以从另一角度产生的，也可以是由另一个粒子产生的。

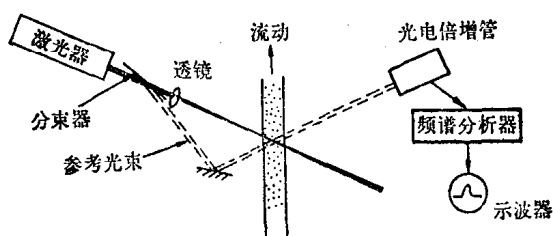


图1.1 利用参考光和散射光进行外差的基本激光多普勒实验

图1.1 是利用激光多普勒差拍测量透明管道内流速的一个简

单示意图。由氦-氖激光器发出的光束被分束器分开,其中绝大部分由透镜聚焦到管道中需要测量流速的那个点处。随流体运动的粒子产生的散射光由光电倍增管接收。从分束器出来的较弱的那部分光是没有频移的参考光,它被反射镜直接反射到检测器,且希望参考光和散射光以相同的光路入射到检测器。为方便起见,参考光路中设置了可调衰减器,以保证检测器上参考光与散射光的强度不会相差太大。光电倍增管的输出包含了两种光束的差频信号,这就是多普勒频移。如图所示,信号的存在及其频率可用谱分析很方便地显示出来。

对于图 1.1 所示的实验装置,多普勒频移为

$$\nu_D = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

其中 v 是管道中流体的速度, λ 是光的波长, α 是照明光与散射光接收方向之间的夹角(在第三章中将推导此公式)。当然,实验的成功取决于散射光粒子的存在,可以选择适当的粒子加到流体中去,但常常是天然杂质的散射就足够了。

必须认识到,当光学差拍技术用于具有良好的光学表面,且物体是静止或运动速度很低时,则它的原理和早已确立的干涉测量技术一样是人们所熟悉的。实际上,光学多普勒差拍和暂态干涉之间没有真正的区别。虽然原则上可以把任何激光差拍装置都看作一个干涉仪,但是干涉仪这个术语往往只用于具有光学镜面反射的装置,而不用于具有随机散射光的场合。

1.3 差动多普勒技术

虽然参考光方法十分有用,而且特别适用于实验室里的

液体流动测量以及散射光来自固体表面的情况，但大多数使用的装置并不包含参考光，而是将两束等强度光聚焦并相交在测量点处。许多实验室都采用了这个基本思想〔3〕-〔7〕，一般称之为‘双光束’或‘差动多普勒’技术。这个方法的优点是，当流动中的粒子很少（例如气体流动）时信噪比相当高，若是没有这种差动技术，激光多普勒速度测量确实不会在这么多重要场合得到实用，其应用会受到相当大的限制。

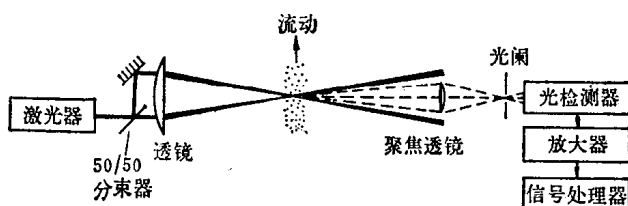


图1.2 简单的差动多普勒速度测量系统

图1.2是一个简单的差动多普勒装置，来自激光器的两束照明光由单透镜聚焦到一个小的区域。从该区域发出的散射光被聚焦到光检测器上。由于两部分散射光同时到达检测器，差拍后得到和两个散射角相对应的多普勒频移。应该指出，差拍频率和接收散射光的方向无关，它由下式给出：

$$v_D = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

其中 v 是通过测量区的粒子速度， α 是两束照明光之间的夹角， λ 是光的波长。检测器输出的信号可以用频谱分析或更先进的方法进行处理。

该方法的优点很多，不仅收集散射光时检测光阑的范围宽，散射粒子浓度可以低，而且全部散射光对信号都发挥了

作用。参考光技术就并不如此，它的可用光阑受到严格的限制。光路安排、接收光阑、粒子浓度与可达到的信噪比之间的相互关系十分密切，这将在第四章和第五章详细讨论。

熟悉光学干涉的人们会容易地看出，差动多普勒‘差拍’频率可作如下简单的解释：两束光相交的区域存在干涉条纹，当粒子通过干涉条纹时，粒子被明暗交替地照明，检测器上就产生了光强的调制。

1.4 应用概况

激光多普勒技术已迅速地在很多场合得到应用，尤其是对流体动力学的研究更显示了它的优越性。测量时只要把光传送到测量点处，对流动没有任何干扰，激光可在被测速度处聚焦成很小的一个测量体，因此空间分辨率很高，典型的分辨率为 $20-100\mu\text{m}$ ，超过了任何其他方法。

LDA 具有输出信号的频率和速度是线性关系的优点，并能覆盖一个很宽的流速范围，从每秒几毫米的速度到超音速。可由光路的几何关系来计算校正因子。在液体及有散射粒子的气体流动中多普勒信号是连续的，本质上 LDA 的响应没有滞后，能跟得上湍流的快速脉动。因此，在某些应用中这种技术是首屈一指的。

LDA 能同时测定流速的大小和方向，当研究复杂流动时，这是一个宝贵的特点，大多数其他流速测量技术做不到这一点。

必须指出，这是一种分辨率高响应快的技术，只有在湍流场中才能充分发挥它的潜力。有些测量对它并不适宜，例如用 LDA 测量管道的流量时，需先测量管截面上各点流速，积分后才能得流量值，对于一般应用说来这太麻烦了。

用风洞模型试验或实体流动测定作设计研究时，往往需要知道流速和湍流的截面分布，这时 LDA 技术就十分得力，它能迅速地提供详尽的数据。不必插入探头就能在恶劣的环境（例如腐蚀性液体或火焰）下进行测量。除了有很长一段光路从热气体中通过的情况以外，一般不必考虑温度的影响。

LDA 的主要局限性是流动中必须存在散射粒子，若天然存在的粒子数不够，则会使信噪比差，这时需要昂贵的信号处理设备和长的测量时间。向流动中添加散射粒子不总是可能或允许的。当然用 LDA 研究的流体必需是透明的，一般能满足这一要求，但液态金属或者有很长一段光路从混浊水中通过的情况就做不到这一点。为了使激光进入流体中，需要透明的管道或窗口，但并不要求它具有很高的光学质量。

表 1.1 中列出了激光多普勒技术的优缺点。

表 1.1 LDA 优缺点对照

优 点	缺 点
对流动没有干扰	被测介质必须透明
分辨率高	需要散射粒子：可能要人为地添加
响 应 快	要有进光通路：必须设置窗口
线性响应及校正方便	当信噪比低时，需要昂贵的信号处理设备
能判别流动方向	不适合于流量测量，因这时需要沿管
运行不受温度的严重影响	截面作繁琐的积分运算

第二章 光学与激光

本章要回顾一下若干光学的基本原理和激光的基本性质，侧重于与激光多普勒技术实际应用有关的那些方面。详细而严格的讨论，读者可参阅标准的光学教科书。这里所作的论述，使具备一些普通光学知识的读者对 LDA 仪器的设计和局限性能有个恰当的评价。

熟悉光学的读者可先不读这一章，当需要某些专门的结果和公式时再回过来查阅。

2.1 可视作电磁辐射的光

光是由电磁场相互作用引起的一般形式辐射的一种特殊情况。电磁波的频谱由无线电长波扩展到核物理中的 γ -射线，这些波在真空中都以相同的波速传播，即 $c_0 = 2.99776 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。波长或频率范围习惯上是按产生或观测它们的方法来划分的。图 2.1 中是主要的波段。取决于颜色的可见辐射波长大约在 $0.40\text{---}0.70\mu\text{m}$ 范围内。

多普勒频移的速度测量技术在整个电磁波区域上都可应用，本书所讨论的实用方法主要应用于可见光区域附近的波长，邻近紫外和红外的区域也包括在内，可把这些波看作为‘光’。

光的传播和所有电磁波一样，遵守麦克斯韦尔 (Maxwell) 方程，这是全面了解光学的基础。然而在实际的光学问题中很少用到麦克斯韦尔方程的精确解，本书不讨论其全部

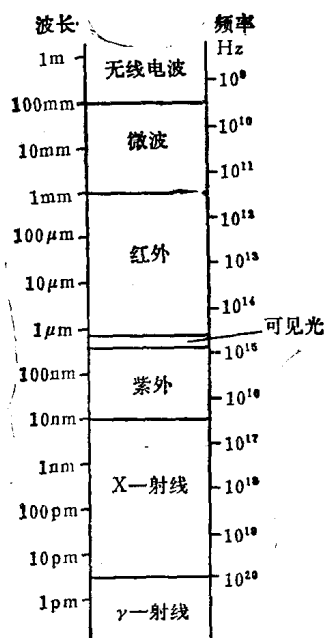


图2.1 电磁波谱

理论，而采用传播距离比波长大得多的近似结果。在很多情况中只需简单的几何光学，再可补充一些简单的波动光学概念和利用惠更斯原理所作的较精确的计算。在此假定读者对这些概念是完全熟悉的，因此在这一章里仅简单地叙述一下这些概念，讨论激光多普勒技术中最需要的光学理论。

2.2 几何光学

在许多情况中，确定光线的传播只需用基本的几何光学，LDA 系统的许多设计是根据这些原理的。在这种近似中遵守如下定律。