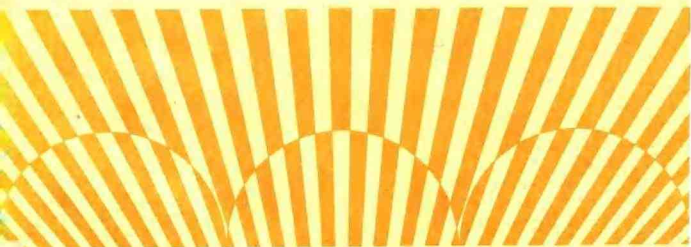


高等学校教材

燃烧诊断学

张平 编著

747801



兵器工业出版社

747801

TK16/04

燃烧诊断学

张平 编著

HK22/09



C0226245

兵器工业出版社

燃烧诊断学

张平 编著

*

兵器工业出版社出版

(北京海淀区车道沟10号)

新华书店总店北京科技发行所经销

兵器工业出版社印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张 10.56 字数 260 千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数: 2000 定价: 2.40元

ISBN 7-80038-052-1/TJ·7 (课)

747801

内容简介

本书较系统而全面地介绍燃烧流场，特别是固体推进剂燃烧流场参数诊断和测量方面的新概念、新知识和新技术。着重讲述以激光为光源的非接触式光学流场诊断技术的原理及其应用实例。内容包括：燃烧流场的速度诊断、温度诊断、密度诊断、燃烧产物的成分和浓度诊断、凝相颗粒的尺寸和尺寸分布诊断，以及燃烧流场的其他综合诊断技术。

本书可作为国防高等院校有关专业本科生或研究生课程的教材，也可供从事燃烧、流体力学、气体动力学、环境保护和化学分析等方面的科研测试人员、大专院校师生和广大工程技术人员参考。

本书由黄骏、冯文澜主审，经原兵器工业部第二教材编审委员会测试技术编审小组于1986年6月召开的全体会议审定，同意作为教材出版。原兵器工业部教材编审室责任编辑：宋筱平。

前 言

现代科学技术的发展十分迅速，新的实验技术则是科学技术进步的重要标志，也是教学、科研和生产持续发展的一种必要手段。对于流体力学这门古老学科，其流场参数的实验测量在过去很长时期内，都习惯地应用传感器测压、皮托管测速和热电偶测温等传统技术。但是由于各种条件的限制，它们已远远不能适应现代科学技术的发展对流场测试和流场显示的要求，特别是无法解决象高温、高压和高速的燃烧流场测试的要求。六十年代初激光器的出现，开辟了光学测量技术的新纪元。它与高分辨率的光谱技术、高灵敏度高频响的光电检测技术以及先进的电子信号处理系统相结合，促进了非接触式的光学流场诊断技术的迅速发展，并可逐步实现对一些复杂流场（含燃烧流场）参数的正确测量和显示，因而给古老的流体力学测试方法增添了新的活力。到目前为止，国内外已经发表的大量论文和资料反映了这方面的研究成果，但遗憾的是关于固体推进剂燃烧方面的实际内容并不多，更没有一本系统的专著可供学习使用，因而深感有编写一本论述燃烧流场测试方面教材的迫切需要，本书就是在这思想的指导下问世的。

本书的目的是试图向读者较系统而又重点地介绍在燃烧流场测试方面，特别是固体推进剂燃烧流场测试方面的新思想、新知识和新技术，着重从应用的角度介绍它们的原理和使用方法。希望能帮助读者在浩瀚的知识和资料的海洋中仅花较短的时间即可了解到它们的梗概，从而在今后的工作中进一步去熟悉、消化、研究、应用和发展这些新技术。使有关领域内的测试技术和研究水平能跟上时代的前进步伐。

燃烧流场诊断技术所涉及的知识面较广，且有一定深度，需要懂得各种近代学科（如物理光学、物理化学、统计热力学、激光光谱学、仪器分析和信息处理等）的知识，但由于编者水平所限以及教材篇幅和讲授时间的限制，不可能将各种原理和内容一一详细阐明。读者如对某一方面需作进一步的了解和研究，可参阅与此有关的各种论著和文献资料。

鉴于压力测量技术的普遍性和成熟性，本书中基本上未涉及燃烧流场的压力诊断问题。

在本书各章的末尾均附有复习思考题和主要的参考书目，以便读者进一步巩固所学内容和查找有关资料。

本书中的单位一律采用法定计量单位。在说明同一含义的“压力”和“压强”这两个术语时，仍按工程习惯采用前者。

本书由北京航空学院黄骏、冯文澜同志主审，太原机械学院王德祥同志复审，中国科学技术大学李殊芬同志和北航魏福清同志对书中的若干章节提出了不少宝贵的意见，还有很多同志为本书提供了各种素材，在此谨向他们致以深切的谢意。

本书在广泛收集和筛选材料的基础上，于1983年9月完成初稿，经过连续三届研究生课程的教学实践，对初稿又作了进一步的修改和补充。尽管如此，由于水平、经验、资料和时间所限，书中肯定有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

一九八五年十二月于北京

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 火箭发动机燃烧气体的一般性质和测量要求	(1)
§ 0-2 燃烧诊断的内容和方法	(1)
第一章 燃烧流场的速度诊断	(3)
§ 1-1 概述	(3)
§ 1-2 有关测速的预备知识	(7)
一、多普勒效应及多普勒频移	(7)
二、光的混频检测	(7)
三、光的散射	(8)
§ 1-3 激光多普勒测速的基本原理	(9)
一、测速的基本关系式	(10)
二、等效条纹模型	(14)
三、采样区体积	(15)
四、散射粒子的跟随性	(17)
五、测速方向正反的判别	(18)
六、多普勒信号的质量	(19)
§ 1-4 激光多普勒测速仪的主要组成部件	(24)
一、光机系统	(25)
二、信号处理系统	(32)
三、数据处理系统	(36)
四、粒子发生器	(37)
五、二维和三维测速系统	(39)
§ 1-5 激光双焦点测速	(41)
一、激光双焦点测速原理	(41)
二、激光双焦点测速的信号处理装置	(43)
三、激光双焦点测速与激光多普勒测速的比较	(44)
§ 1-6 激光法布里-珀罗干涉仪测速	(44)
§ 1-7 激光测速仪在燃烧测量中的应用	(48)
一、燃烧流场的特点和测量中要注意的问题	(48)
二、激光测速仪用于固体推进剂燃烧流场诊断举例	(49)
思考题	(53)
主要参考资料	(53)
第二章 燃烧流场的温度诊断	(55)
§ 2-1 概述	(55)

§ 2-2 发射-吸收光谱测温	(56)
一、 谱线隐现法测温	(56)
二、 发射-吸收法测温	(57)
§ 2-3 有关喇曼散射的基本知识	(62)
一、 何谓喇曼散射	(62)
二、 喇曼散射中的能量交换	(63)
三、 喇曼散射光谱的形式	(64)
四、 喇曼光谱的发展	(65)
§ 2-4 喇曼散射光谱测温	(67)
一、 纯转动喇曼散射光谱测温	(68)
二、 振动-转动喇曼散射光谱测温	(69)
三、 相干反斯托克斯喇曼散射 (CARS) 光谱测温	(77)
§ 2-5 微波衰减测温原理	(85)
思考题	(87)
主要参考资料	(88)
第三章 燃烧流场的密度和燃气成分及其浓度诊断	(89)
§ 3-1 燃烧流场的密度诊断	(89)
一、 流场密度非接触测量的原理和方法	(89)
二、 阴影法	(90)
三、 纹影法	(91)
四、 干涉法	(95)
§ 3-2 燃烧产物的成分及其浓度诊断	(102)
一、 受激荧光光谱 (LEF 或 LIF) 检测	(103)
二、 CARS 检测	(106)
思考题	(107)
主要参考资料	(108)
第四章 燃烧产物中颗粒尺寸和尺寸分布诊断	(109)
§ 4-1 燃气流场中颗粒尺寸分析的重要性	(109)
§ 4-2 颗粒尺寸分析的方法	(109)
§ 4-3 显微测量技术用于粒度分析	(111)
一、 光学显微镜	(111)
二、 扫描电子显微镜	(112)
三、 透射电子显微镜	(114)
四、 利用显微技术进行粒度分析举例	(115)
§ 4-4 激光测速仪用于粒度分析	(116)
§ 4-5 激光透射仪用于粒度分析	(117)
一、 流场中悬浮粒子的挡光理论	(117)
二、 透射仪用于粒度测量的工作原理	(118)
§ 4-6 激光散射强度比较技术用于粒度分析	(118)

§ 4-7	激光夫琅和费衍射粒度分析仪用于粒度分析	(119)
§ 4-8	激光衍射散射光技术用于固体火箭发动机凝相颗粒的尺寸分析	(120)
§ 4-9	喷管排气羽焰中颗粒性质的分析	(123)
	一、在排气羽焰中可检测出的最小颗粒尺寸	(123)
	二、在排气羽焰中颗粒数量密度的空间分布	(125)
§ 4-10	用于颗粒参数诊断的仪器综述	(128)
	思考题	(128)
	主要参考资料	(129)
第五章	燃烧流场参数的其他诊断技术	(130)
§ 5-1	高速摄影在固体推进剂燃烧研究中的应用	(130)
	一、高速摄影用于燃烧研究的基本方法	(130)
	二、高速摄影技术所用的基本设备	(131)
	三、高速摄影在固体推进剂燃烧研究中的应用举例	(135)
§ 5-2	全息技术在固体推进剂燃烧研究中的应用	(137)
	一、全息摄影的基本原理和特点	(138)
	二、全息摄影在固体推进剂燃烧研究中的应用	(139)
§ 5-3	X射线光谱术在固体推进剂燃烧研究中的应用	(146)
	一、基本原理	(147)
	二、利用颗粒的瞬时荧光测定颗粒中各元素原子的总数以及颗粒的 直径和速度	(150)
	三、颗粒相态和温度诊断的可能性	(151)
§ 5-4	激波管技术在固体推进剂燃烧研究中的应用	(155)
	一、激波管的基础知识	(155)
	二、激波管在固体推进剂燃烧研究中的应用举例	(158)
	思考题	(162)
	主要参考资料	(163)

绪 论

由于能源、交通、国防和宇宙航行的日益发展，人们对如何充分地发掘和利用高能燃料，如何使燃烧过程具有较高的能量转换效率越来越感兴趣。对于火箭推进系统来说，这一点尤为重要。

为了有效地提高火箭发动机的推进效率，正确分析和预估发动机的性能，建立合理的推进剂燃烧模型，就必须观察和了解燃烧过程、燃烧流场和燃烧产物的内在特性，对表征这些特性的各种物理参量按照时间和空间进行定性的、甚至是定量的测定。

§ 0-1 火箭发动机燃烧气体的一般性质和测量要求

在火箭推进剂的高温燃烧产物中，既有气相成分，也有凝相（包括液相和固相）成分。燃烧产物的成分及其物理性态取决于发动机内外流场的位置（如发动机燃烧室、喷管和喷管外的排气羽焰流场）和所用推进剂的种类。

表 0-1 列出了在火箭发动机燃烧过程中产生的燃烧产物的主要成分。除此以外，还有一些次要成分、中间产物和不完全燃烧的推进剂组分。可以看出，火箭推进剂特别是固体推进剂的燃气成分中，凝相颗粒的影响是不容忽视的。

表 0-1 火箭推进剂燃烧产物的主要成分

火箭推进剂	燃烧特点	主要气相成分 (包含全部气相成分的 90% 以上)	主要凝相成分 (颗粒直径)
液体	有些推进剂生成的几乎完全是气相成分，有些推进剂会生成烟状的颗粒。	H_2O , H_2 , N_2 , CO_2 , CO	Cn ($0.01 \sim 0.1 \mu m$)
固体	多数推进剂（特别是含铝推进剂）会生成大量凝相颗粒，新型的无烟推进剂只有很少的凝相颗粒	N_2 , H_2O , HCl , CO , H_2 , (CO_2)	Al_2O_3 ($0.01 \sim 100 \mu m$)

§ 0-2 燃烧诊断的内容和方法

通常，人们把与高温气体和气-凝两相流有关的测量领域称为“诊断”。“诊断”不是简单的“测量”，它的意思是要在各种错综复杂的因素里找出问题，以便更好地解决问题。

燃烧流场的诊断不同于一般的流体测量，它具有高温燃烧的火焰辐射和气-凝两相的复杂流动这两个特点。因此一般的流场测量方法不能直接适用于燃烧流场诊断。

关于固体火箭发动机的推进系统，过去常规的测量项目只有发动机的推力和燃烧室的压力这两项。燃烧室内的温度是用热力计算得到的，喷管出口的排气速度是靠计算得到燃烧温

度后再一次计算出来的。没有直接的测量手段可以正确测出燃烧流场内除压力以外的其它主要的气相参量（如温度、速度和密度等），更谈不上测量流场中凝相颗粒的各种特征参量了。

近年来，由于激光技术、光谱技术和电子信息技术的良好结合，以光学测量为特征的燃烧流场诊断技术得到了迅速发展，使人们有可能对很多燃烧流场的参数进行测量，有的参量不仅可以进行定性观察，而且还可以作出定量分析。

燃烧流场的诊断技术，就诊断的内容来分，大体可分成纯气相诊断技术和两相流诊断技术两大类。纯气相诊断技术包括红外发射-吸收光谱、激光喇曼散射、激光和电子束的荧光辐射以及光的相干技术等，可以诊断纯气相的温度、密度和气相成分等。它们可用于离子化的气体、燃烧火焰、燃气轮中的热气及火箭推进系统的气态参数测量。对于它们，目前应努力的已不是探索这些诊断方法可用与否的问题，而是如何进一步改进测试仪表和数据处理系统，改善它们的测量灵敏度、精度、可靠性和经济性的问题。

两相流诊断技术比纯气相诊断技术要困难得多，除了能够应用光的多普勒频移、光学散射和光学全息技术等测量颗粒的尺寸和速度外，还没有其他很成功的技术可用来测量颗粒的成分、温度、质量和物理状态等信息。

很难说上面提到的纯气相诊断技术能用于两相流诊断，但如果颗粒的存在并不明显地影响气相成分的发射、吸收、透射或散射等功能，也许纯气相诊断技术也可用于两相流中的气相诊断，但这还未很好得到实验的验证。颗粒存在所引起的诊断上的困难在于：

- (1) 热气体的辐射远小于较大的凝相粒子的辐射，因而可能使气体辐射检测不出来。
- (2) 高浓度颗粒对光源的多次吸收和散射，可能会使光源的辐射无法透过两相流。
- (3) 激光光源的辐射可能被颗粒吸收，从而提高了颗粒的温度，产生热辐射，使光谱检测时的背景噪声增大。

目前用于两相流的技术有激光测速、全息照相、X射线光谱和扩散相关光谱等。但所有这些技术中，除了激光测速比较成熟外，其余各种技术还不知道对于固体颗粒的上述影响如何避免，如何定量估计，以及测量到何种精度。它们还处于继续探索的阶段。

上述燃烧流场的诊断技术，都不是专门针对固体推进剂的燃烧流场的，因而对它的诊断就更没有成熟的经验。有关这方面的诊断可以按发动机的工作部位分成两部分，即发动机内的内流场诊断和喷管出口处的外流场（即排气羽焰）诊断。应该说，真实发动机内部的现场（在线）诊断以目前的光学技术而论还难以实现（主要用于研究阶段，采用开窗的缩尺发动机来模拟真实发动机），比较现实的是采用喷管外羽焰流场的诊断。如果能够测定出羽焰流场内的主要参量，也就反映出了发动机内部燃烧和气动力流动历程的最终结果。迄今为止，对于喷管出口平面处的羽焰流场，可测量的或可能测量的参数有：

气相参数——速度、温度、密度、气体成分（以上四项均可测量）；

凝相参数——颗粒尺寸、速度、数量密度（以上三项可测量）、温度、成分、质量、相态（以上四项有可能测量）。

对于羽焰测量的主要困难在于：

- (1) 颗粒和气体都能在相当宽的电磁波谱范围内主动发光；
- (2) 颗粒的温度高、粒度小、数量密度大、速度高；
- (3) 工作环境恶劣（噪声、热辐射、振动等）。

第一章 燃烧流场的速度诊断

§ 1-1 概 述

测量流体速度的传统方法和常规技术是采用皮托管（第一代测速技术）和热线风速仪（第二代测速技术）。

皮托管又称风速管，是一种专门设计的测压探针。把它放在流场内，可同时测量出流体在该点处的总压 p_0 和静压 p ，或该两者之差 $(p_0 - p)$ 。皮托管的简图如图 1-1 所示。

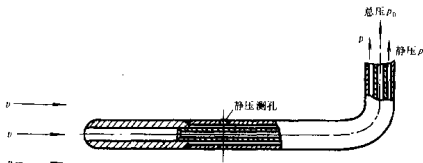


图 1-1 皮托管简图

根据伯努利方程，可用下式求出流体在该点处的流速 v

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p)K} \quad (\text{m/s}) \quad (1-1)$$

式中 ρ ——测点处流体的密度 (kg/m^3)；

p_0 和 p ——测点处流体的总压和静压 (Pa)；

K ——考虑到探针类型和气流可压缩性的修正系数。

皮托管的测压孔很小，易被污物堵塞，需要经常用氮气吹扫测孔。另外，皮托管的频率响应和灵敏度不高。对于脉动气流和湍流强度高于 20% 的流场，皮托管不能给出满意的测量效果。

热线风速仪有较高的频响和灵敏度，可测高湍流气流的平均速度和瞬时脉动速度（低于 500kHz）。热线风速仪的工作原理是：将一个热线探针头置于待测流场中，气流速度的变化会改变热线被冷却的速率，因而可利用热线的瞬时热量损失来度量流场内该点的瞬时速度。

热线探针（见图 1-2）的敏感元件是一根直径很小的金属丝（例如直径为 3.8~50 μm

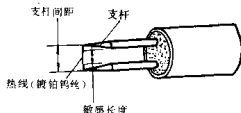


图 1-2 热线风速仪的热线探针示意图

长度为1~2mm的铂丝、镀铂钨丝或铂铱合金丝)，它由电流加热，其温度高于周围流体介质的温度，通常是在强迫对流散热状态下工作。测量散热损失有等温度（等电阻）法和等电流法两种。前者是使金属丝的温度保持不变，此时所需的加热电流反映了气流的速度；后者则是使加热电流保持不变，而热线电阻的变化反映出气流速度的变化。目前等温度法的风速仪用得比较广泛，因为它可测量高频速度脉动而不需复杂的补偿电路，操作简单，工作可靠，使用寿命较长。

由于热线探针的金属丝十分脆弱，它只能在清洁的空气和其他气体中应用，对于液体和非清洁气体的速度测量，宜采用热膜探针，它比热线要耐用得多。热膜探针的敏感元件是一片高纯度的铂膜，测量气体流速时，在铂膜的外面覆盖一薄层铝，以提高耐磨性和具有高的热传导系数。测量液体流速时，则在铂膜外面涂一薄层致密石英，以提高防电绝缘性能。

热线或热膜探针的几何尺寸各不相同，因此在使用前必须对每台待用的热线或热膜风速仪进行单独标定。但动态标定又不易做得准确，这是采用热线或热膜风速仪测速的一个主要缺点。

激光测速技术（第三代测速技术）是六十年代初期激光诞生以后出现的一门新型的诊断流体速度的先进技术，它与皮托管和热线风速仪相比，有如下优点：

(1) **非接触式测量** 不必将任何形式的机械探头插入流场内，因而丝毫不会干扰流场的特性。

(2) **原理上不需任何标定** 可不用比较地直接测出所求的流速。

(3) **测速方向灵敏，精度高** 低速稳态流场中平均误差可控制在1%以内。

(4) **具有很高的空间和时间分辨率** 平均采样体积小于 0.1mm^3 ，每点统计采样时间小于几毫秒。

(5) **测速范围极宽** 可测每秒几百微米的超低速到每秒几千米的超高速流动。

(6) **仅对速度敏感** 与流体的温度、密度和组份等基本无关。

正因为如此，激光测速技术特别适用于很多特殊的流体力学课题的研究，例如燃烧火焰、旋转叶轮、狭窄通道、化学反应流、高强度湍流、激波、粘性边界层、各种风洞和水洞以及那些无法用皮托管和热线风速仪测量的其他场合。

应当注意的是，各种激光测速技术都是通过测量被测流体介质中所携带的粒子运动速度来实现对流体速度测量的。因此，只有当粒子的尺寸足够小时，粒子的运动速度才能代表流体的流速。

激光测速仪不仅可测流体（包括液体和气体）的速度，而且还可成功地用于固体运动的测量，因而其应用范围日益广泛。目前已用于航空、水利、化工、纺织、海洋、核能、冶金、石油、车辆和气象等各个科研领域及生产部门，而且越来越显示出它巨大的生命力。

当前激光测速的主要缺点是：

(1) 测量不够方便，对测量环境需有一定的要求。如必须有观察窗，流体中必须有符合要求的散射粒子，光路必须洁净等。

(2) 价格昂贵。

(3) 使用经验不足。

表1-1列出了三种流速测量技术的情况比较。

表 1-1 三种流速测量技术的比较

测速类型	工作方式	工作原理	测速范围	标定	空间和时间分辨率	价格	使用中的问题
皮托管	接触	压差 $\propto v^2$	窄, 约 10~80m/s	一次标定	低	低	测压孔易堵塞
热线风速仪	接触	热损失 $\propto v^{1/2}$	较宽约 1~300m/s	每次使用前标定	较高	较高	热线头易损坏
激光测速仪	非接触	频差 $\propto v$ 时差 $\propto v^{-1}$	宽, 约 100 μ m/s ~2000m/s	不需标定	高	高	使用不够可靠方便

根据测速原理的不同, 激光测速可分为激光多普勒测速、激光双焦点测速和激光干涉仪测速等几种。目前普遍采用的是多普勒测速。按照不同的分类方法, 又可将多普勒测速系统分为若干类型。图 1-3 是激光测速的分类示意图。

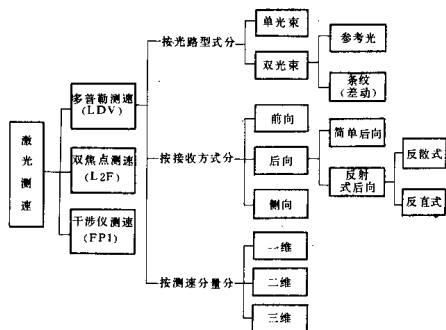


图 1-3 激光测速分类示意图

多普勒测速在光路形式上可分为单光束型和双光束型(见图 1-4)。双光束型光路有自动准直作用, 不易受振动和温度变化的影响, 调节和使用都较方便。在双光束光路中, 条纹型(有时也称差动型)优点较多。例如它的信号频率与接收方向无关, 因而允许大口径接收, 提高了信号的质量和激光功率的利用率, 也为系统的结构布局带来了方便。另外, 此种光路的对称性好, 对振动不敏感, 更易于调整和使用。所以目前大多数产品采用这种光路形式。

在接收方式上, 又可分为前向接收、后向接收和侧向接收。侧向接收的信号最弱, 所以一般多采用前向或后向接收的方式。

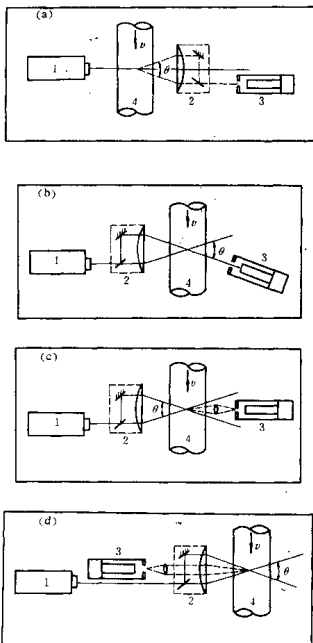


图 1-4 多普勒测速的几种典型的光路形式

- (a) 单光束双散射型; (b) 双光束参考光型;
 (c) 双光束条纹型 (前向散射); (d) 双光束条纹型 (后向散射)
- 1—激光器; 2—光学组件;
 3—光电倍增管; 4—试验部位

在测速分量上, 一维是主要的。若在一维的基础上再加上第二套 (二维) 或第二、三套 (三维) 互不相干的光路和信号处理系统, 即可同时测出被测点在二维或三维坐标轴上的速度分量, 不过每一维的测速原理都相同。

根据以上分析, 在本章内将重点讨论激光多普勒双光束条纹型前向和后向接收的一维测速系统。

§ 1-2 有关测速的预备知识

一、多普勒效应及多普勒频移

众所周知,当高速行驶着的火车从我们身旁疾驶而过时,我们听到的音调由高尖而骤然降低(即声频由高突然变低)。这种由于在波源和观察者之间有相对运动时使观察者接收到的波的频率发生变化的现象称为“多普勒效应”。在声学中,这一效应是奥地利物理学家多普勒(Doppler)在1842年首先发现的。

爱因斯坦于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。但光波(电磁波)传播与声波(机械波)传播的一个本质差别是后者的传播必须依靠介质,但前者却无此必要。因此,只要光源与观察者有相对运动时,就有光学多普勒效应存在。

当具有一定频率的光波照射到运动物体(通常是运动着的微粒)上时,物体将发出散射光。由于多普勒效应,散射光的频率会发生变化,它和入射光频率之差称为“多普勒频移(或频差)”。

根据物理光学知识,光的多普勒效应的相对论公式为

$$v_1 = v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \pm \frac{v^3}{c^3} + \frac{1}{2} \frac{v^4}{c^4} \pm \dots \right) \quad (1-2)$$

式中 v_1 ——观察者接收到的光波频率 (H_z);

v_0 ——光源发出的光波频率 (H_z);

v ——相对运动速度 (m/s), 正或负号分别表示相对移近或移远;

c ——介质中的光速 (m/s)。

显然,在我们的测速范围内, $v \ll c$, 因而式(1-2)中的高阶微量可以忽略。其公式为

$$v_1 = v_0 \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (1-3)$$

二、光的混频检测

我们知道,光波的频率约为 $5 \times 10^{14} Hz$, 散射光的频率也很高(因为 $v \ll c$)。因此,即使采用目前最先进的光谱技术也无法直接检测出它们的精确数值,只能借助类似于电子学中的外差技术测得两者的差频。

设收音机接收到的外来无线电信号为 $A \cos \omega_1 t$, 由本机产生的、与外来信号频率相近但不相同的本振信号为 $B \cos \omega_2 t$ 。该两种信号混频后送入平方律检波器件(二极管)中,则该器件的输出由下式给出

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

$$+ B^2 \cos^2 \omega_2 t \quad (1-4)$$

将上述输出通过一个低通滤波器，使频率高于 $(\omega_1 - \omega_2)$ 的分量不能通过。这样，滤波器的输出为

$$I(t) = \frac{A^2}{2} + AB \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{B^2}{2} \quad (1-5)$$

该电流信号由两个直流分量 $A^2/2$ 和 $B^2/2$ 加上一个交流分量 $AB \cos(\omega_1 - \omega_2)t$ 所组成。若外来信号的振幅 A 远小于本振信号的振幅 B ，则信号功率由 $A^2/2$ 增至 AB ，即放大了 $2B/A$ 倍而不相应地增大噪声，这是外差技术的一个重要特性。图 1-5 是这一过程的示意图。

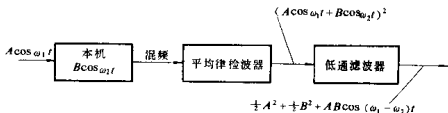


图 1-5 利用外差技术检测差频的过程

将同样的外差技术用于光波。将散射光频率（外来信号）和入射光频率（本振信号）相混合，然后通过一个光电检测器。光电检测器是对光强敏感的光学敏感元件，而光强则是光波幅值的平方，因而光电检测器也是平方律检波器件。任何一种现有的光电检测器，都不能直接测量频率很高的光频及它们的和频，而只能测出频率较低和很低的差频，因而它又充当了低通滤波器的作用。此时光电检测器的输出也由直流和交流两部分组成，其中直流部分由总光线所产生，而交流部分的频率正好就是入射光和散射光频率之差，即多普勒频差。因此，为了测量流体速度只要测出光电检测器输出中的交流分量的频率就行了（直流分量可用电容器将其隔去）。

三、光的散射

光的散射现象指的是由于介质中存在的微粒（气态、液态或固态）对光束的影响使光波偏离原来的传播方向而向四周散射的现象。一般可按散射粒子的大小把散射分成两类：

(1) 散射粒子的线度在 $1/5 \sim 1/10$ 光波波长以下的散射称分子散射，如瑞利 (Rayleigh) 散射和喇曼 (Raman) 散射。

(2) 散射粒子的线度大于或与光波波长为同一数量级的散射称大粒子散射，如米氏 (Mic) 散射。

根据米氏散射理论（导电小球的衍射理论），散射光的频率不随散射角的位置而变，但散射光的光强却与散射方向有很大关系。另外，散射光的光强与入射光束波长的关系不很显著（较短的光波波产生较强的散射光强），但却与入射光束的光强以及散射粒子的线度有很大关系。入射光强越强，散射光强也越强；粒子越大，散射光强越强，而且越向入射光的方向集中（见图 1-6）。从图中还可看出，前向散射光强比后向大，有时甚至可达二至三个数量级，而侧向散射光强则最弱。

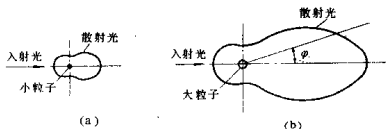


图 1-6 颗粒散射光分布的极坐标示意图

(a) 小粒子的散射; (b) 较大粒子的散射

φ —散射角

因此, 为了获得较强的散射光信号, 应该:

- (1) 使系统尽可能以前向散射状态工作 ($\varphi < 20^\circ$)。
- (2) 将入射光聚焦到尽可能高的光强去照射粒子。
- (3) 在其他条件允许的情况下, 选择足够大的粒子作为散射中心。
- (4) 采用尽可能大的透镜收集散射光。

应该说明的是, 图 1-6 仅为散射光强分布的示意图, 实际的光强分布形状要比图示的复杂得多 (特别对于大粒子), 因为散射光强不仅与粒子的大小、形状以及入射光的光强有关, 而且还与入射光的偏振方向有关。

§ 1-3 激光多普勒测速的基本原理

图 1-7 和图 1-8 分别为二维双光束条纹型 (以后简称双光束型) 前向和后向接收的光路示意图。激光器发出的一束光, 经分束器分为光强相等的两束相干的平行光, 经发射透镜相交于测点 (即透镜焦点)。流体中的运动粒子经过该两光相交区 (亦称“采样区”) 时会发

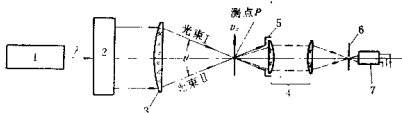


图 1-7 二维双光束 (条纹) 系统前向接收光路示意图

- 1 — 激光器; 2 — 分束器;
- 3 — 发射透镜; 4 — 前向接收透镜组;
- 5 — 可调光阑; 6 — 针孔光阑;
- 7 — 光电倍增管