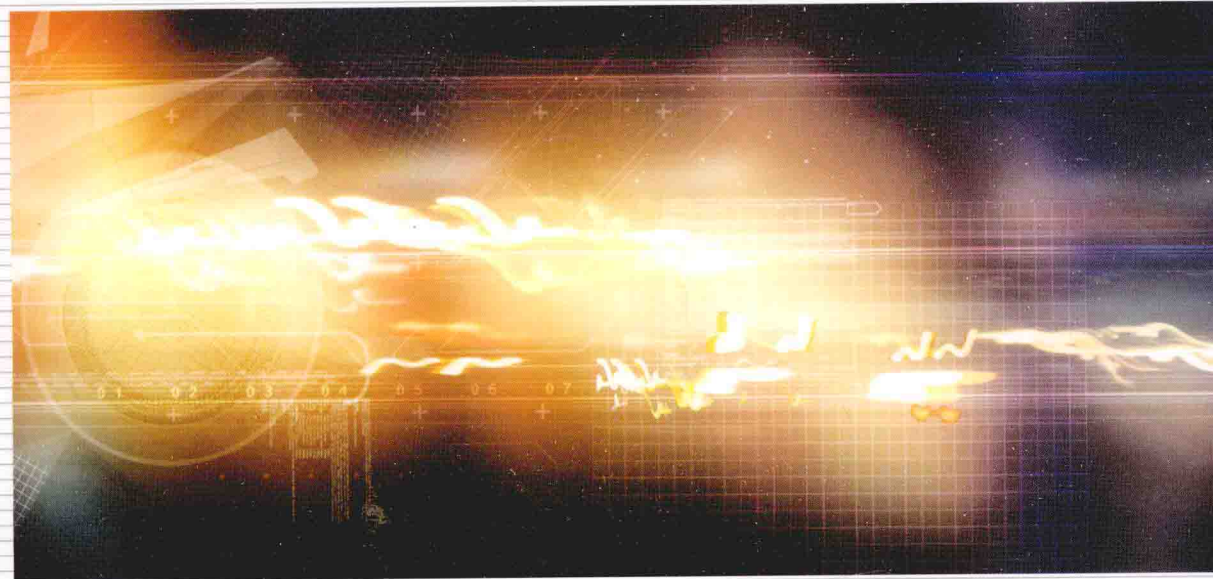


—◆ 研究生规划教材 ◆—

# 应用燃烧诊断学



熊姸 范玮◎编

西北工业大学出版社



研 究 生 规 划 教 材

# 应用燃烧诊断学

熊 姁 范 玮 编

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书系统而全面地介绍了与燃烧流场参数的诊断和测量有关的技术,着重讲述了基于光学测量为主的燃烧诊断技术的工作原理、测量方法、主要仪器设备及其应用。全书共分8章,主要内容围绕燃烧流场中的速度、温度、密度、燃烧产物的组分和浓度以及燃烧流场中的颗粒尺寸等参数展开,并且在最后一章增加了对燃烧流场的其他综合诊断技术的介绍。

本书可作为工程热物理、热能动力、航空宇航推进理论与工程等专业的研究生教材或者参考书,也可供从事燃烧、流体力学、气体动力学、环境保护等行业的测试人员或工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

应用燃烧诊断学/熊焱,范玮编. —西安:西北工业大学出版社,2014.1  
ISBN 978-7-5612-3893-6

I. ①应… II. ①熊… ②范… III. ①燃烧学—诊断学 IV. ①O643.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 008368 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:13

字 数:315 千字

版 次:2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价:32.00 元

# 前 言

燃烧是一门人类最古老的技术,火是人类最早发现和应用的自然现象之一。各行各业(动力、冶金、建材、化工、交通等)乃至人们的日常生活均离不开能源,能源是国民经济的基础与龙头,而世界能源供应大约 80% 都是由燃烧产生的,因此燃烧的作用非常重要。但是,人类对燃烧现象和火焰的认识还在持续地深入,在许多工程领域仍有大量的与燃烧有关的课题亟待研究。

随着科学技术的迅猛发展,以前在燃烧诊断中常用的接触式测量方法已经不能很好地满足复杂燃烧流场测量的要求,需要通过非接触式的实验诊断方法来获得燃烧流场的速度、温度、密度、组分浓度、火焰结构等参数。激光器及光谱相关测量技术的出现,促进了非接触式光学流场诊断技术的迅速发展。因此,本书编写的思路是简单介绍已有的成熟的接触式燃烧诊断技术,着重介绍基于光学测量的新方法和新技术,让读者比较全面地了解燃烧流场中某个参数诊断时可用的方法和技术,并且结合实际选择一个较优的测量方法。通过阐述各测量技术的工作原理、优缺点以及未来的发展方向,为研究生了解和应用燃烧诊断技术提供必需的基本知识。

在本书的编写过程中,承蒙恩师严传俊教授的热情鼓励,笔者丈夫邱华和女儿邱麟越的理解和支持,西北核物理研究院陶波博士的修订,硕士研究生陈帆帮助收集资料,在此一并表示衷心的感谢。

本书在写作过程中参考了国内外有关教材和文献,由于水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 1 月于西安

# 目 录

第一章 绪论 .....	1
第二章 燃烧流场的速度测量 .....	4
第一节 皮托管测速 .....	4
第二节 热线风速仪 .....	5
第三节 激光多普勒测速 .....	8
第四节 相位多普勒粒子分析仪 .....	28
第五节 激光双焦点测速 .....	33
第六节 二维平面流场的测速技术 .....	37
第三章 光谱学基础 .....	47
第一节 跃迁和能级布局数 .....	47
第二节 线型和谱线增宽 .....	48
第三节 跃迁的选择规律 .....	54
第四节 电子、转动、振动与振动-转动光谱 .....	55
第五节 常用激光器 .....	58
第四章 燃烧流场的温度测量 .....	66
第一节 接触式测温法 .....	66
第二节 非接触式测温法 .....	74
第五章 燃烧流场的密度测量 .....	110
第一节 流场密度测量原理和方法 .....	110
第二节 阴影法 .....	110
第三节 纹影法 .....	113
第四节 干涉法 .....	118
第五节 激光全息干涉仪 .....	123
第六节 非接触式测量方法总结 .....	127
第六章 燃烧产物的成分及浓度测量 .....	128
第一节 直接测量法 .....	128
第二节 激光诱导荧光法 .....	138
第三节 CARS 检测法 .....	150



<b>第七章 燃烧产物中颗粒尺寸和颗粒分布测量</b> .....	152
第一节 颗粒的基本特性.....	152
第二节 光衍射和散射的基本理论.....	154
第三节 散射光能颗粒测量技术.....	160
第四节 透射光能颗粒测量技术.....	167
第五节 其他测量技术.....	169
<b>第八章 燃烧流场参数的其他诊断技术</b> .....	170
第一节 高速摄影技术.....	170
第二节 激波管技术.....	176
第三节 基于吸收光谱技术的可调节二极管激光测量(TDLAS)技术 .....	186
<b>参考文献</b> .....	200



# 第一章 绪 论

一般将强烈放热和发光的快速化学反应过程称为燃烧。随着国民经济的快速发展,能源、交通、航空航天等行业也得以快速发展,这些行业都与燃烧息息相关,人们对燃烧过程中高效率热量的转换越来越重视,这也要求对燃烧未知领域开展更进一步的探索。任何科学研究都需要实验数据作为支撑,因此对燃烧现象的观察和相关实验数据的采集、记录和分析变得非常重要。

燃烧流场的诊断不同于一般的流体测量,它具有高温的火焰辐射和气-凝两相的复杂流动的这个特点。燃烧流场参数的实验测量在过去很长的时间内都是用传感器测压力、皮托管测速度、热电偶测温度,但是它们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,特别是无法解决高温、高压和高速的燃烧流场测试的要求。随着激光技术和光谱知识的发展,各种非接触式测量方法显示出其优越性,它们可以减少或者避免气动、热或者化学扰动,并且能在恶劣的条件下工作。各种光谱实验诊断技术不仅为反应流提供了瞬时流动和热力学性质,并具有必要的时间和空间分辨率;而且人们有可能对很多燃烧流场的参数同时进行测量。

燃烧流场诊断技术所涉及的知识面比较广,且有一定的深度,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方面的知识。本书旨在系统而有效地介绍各个燃烧诊断技术的测量原理,测量相关仪器及其应用,以帮助读者在短时间内能了解其各燃烧诊断技术的大致工作过程。

本书按照测量对象进行讲述,分别介绍了燃烧流场的速度、温度、密度、组分、颗粒等重要参数的测量技术。在第二章中,不仅简单介绍了皮托管测速及热线风速仪等经典测量方法,而且详细介绍了多种非接触式测速方法。基于多普勒频移的激光多普勒测速仪(简称 LDV)和基于“飞行时间”测速的激光双焦点测速(简称 L2F)主要用于流场的单点测量。若要了解预混火焰中的湍流结构,需要测量若干点的流速,可采用如平面多普勒测试技术以及激光相位多普勒测径测速技术(简称 PDPA)。由于激光的相位差与入射光强度或散射光振幅无关,仅随粒子直径  $d$  而变,所以 PDPA 不仅可以得到流速,还可以得到粒子尺寸。粒子成像测速技术(简称 PIV)通过处理连续两次曝光或多次曝光的粒子图像而获得流场中各点的二维或者三维流速矢量。

由于本书中很多内容都涉及光谱学知识,所以在第三章中简单介绍了光谱学基础知识以及常用的激光器。在第四章涉及的内容是燃烧流场的温度测量,各种温度测量的方法见表 1-1。辐射式测温法和光谱测温法是目前比较常用的非接触式测温方法。其中涉及的各种测温技术很多,辐射测温法的测量原理是宏观的光学知识,而光谱测温法更偏重分子内部振动能级和转动能级的跃迁等知识。

第五章主要介绍的是密度场的测量。阴影法和纹影法是定性测量密度变化的最简单有效



的方法,它们是根据光线在流场中的偏转来确定折射率分布的。而干涉法是利用光的波动性,根据光线穿越流场后相位的变化来研究气体折射率的空间分布的,它是定量测量流场的理想方法。而激光全息能同时记录物光的相位和光强,并且能获得三维全息图。根据理想气体状态方程  $\rho = P/(RT)$  还可以推导出温度与折射率的变化关系,因此利用干涉法或者全息干涉法可以定量获得温度的变化。

表 1-1 各种温度测量方法的分类

温度测量方法		
接触式测温	膨胀式测温	玻璃液体温度计、双金属温度计、压力式温度计
	电量式测温	热电偶测温、电阻式测温、半导体测温、集成芯片测温
	接触式光电、热色测温	示温漆、光纤测温、光导管测温
非接触式测温	辐射式测温	亮温高温计、色温高温计、全辐射高温计、多光谱测温、热像仪测温
	光谱法测温	CARS 测温、瑞利、拉曼散射光谱、激光诱导荧光、光谱吸收法测温
	激光干涉测温	激光全息照相测温、干涉仪法测温、纹影法测温、激光散斑照相法测温
	声波、微波法测温	超声波法测温、微波衰减法测温

第六章主要介绍与燃烧有关的气体成分分析,包括燃烧过程生成物的测量和各种排放物的检测,常见的成分有  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  和  $\text{O}_2$  等。从燃烧产物的测量可以判断燃烧情况的优劣。常用的诊断方法是利用采样探头直接将反应区内物质迅速取出,利用不同的物理效应或者质谱技术对燃烧产物进行分析。不过这种直接取样法都必须将被测分子从气相过程中抽出来,放入一定的容器内才能进行分析。但在抽样过程中化学反应可能在继续发生,或者因为抽样使得试样冷却而发生凝聚,或者在抽样时分子穿过激波并发生离解。应用光谱技术可以避免直接抽样带来的影响。不论是发射-吸收光谱(无频移)还是拉曼散射光谱(有频移),测量燃烧流场的温度,都是通过检测燃烧产物中的某种组分(元素、分子或原子团,例如  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CO}$  等)的转动、振动和电子能级谱线随温度的变化规律而得到的。因此,应用光谱法不仅可以得到燃烧的温度场,还可以获得组分场。

燃烧过程是由燃料和氧化剂的混合情况控制的,且火焰中总是存在颗粒的形成、增长和燃烧完全的过程。燃烧流场中颗粒测量主要涉及两个方面:燃烧产物中的颗粒(炭粒)以及燃油雾化过程中颗粒的测量。炭粒参数的测量是颗粒参数测量中一个重要的课题,可用散射光原理,通过颗粒尺寸与测得的各种散射光比值之间的关系来获得。测量悬浮于气相介质或液相介质中颗粒的特性有助于优化燃烧过程,提高燃烧效率。基于散射光的颗粒测量技术和基于透射光的颗粒测量技术将在第七章中详细介绍。

第八章中介绍的是一些其他的燃烧诊断技术,高速摄影技术是研究高速运动过程的一种行之有效的办法。它与阴影仪、纹影仪等光学测量系统结合形成高速阴影或者高速阴影系统,是一个非常实用的测量手段。激波管是利用激波压缩实验气体,以模拟所需实验条件的装置,





它很容易在实验室内产生一个瞬时加温、加压和加速的气流的物理环境,以满足各种科学实验的要求,在研究化学反应动力学中具有重要的用途。基于吸收光谱技术的可调节二极管激光测量(TDLAS)技术是近年发展起来的一种复合型测量技术,它可以同时测量燃烧流场的温度、组分浓度等参数,且简单、廉价。

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,相信未来若干年后,许多大型的实验室测量仪器将会走向小型化和工程化,促进它们在工业领域内的应用。

## 第二章 燃烧流场的速度测量

气流速度是燃烧流场中工质运动状态的重要参数之一。流体速度是指流体质点(或微团)的速度,速度是矢量,它具有大小和方向。流体速度的测量包括流体质点的平均速度和方向,流体脉动速度的均方根以及相关参数的测量。流体速度的测量方法很多,大致可以分为测量速度的力学、电学和光学方法。

### 第一节 皮托管测速

速度测量的力学方法实质上是将以较快速度流动的流体所呈现出的压力用测压管表现出来,并通过微压计上液柱的高低示值测量出来。这种将速度质量转换为液柱差的方法称为速度测量的力学方法。皮托管又称为风速管,是一种专门设计的测压探针。皮托管是由总压管和静压管同心地套在一起组成的,利用流体总压与静压之差,即动压来测量流速,故也称为动压管。皮托管是一根弯成直角形的金属细管,其内部构成如图 2-1 所示。

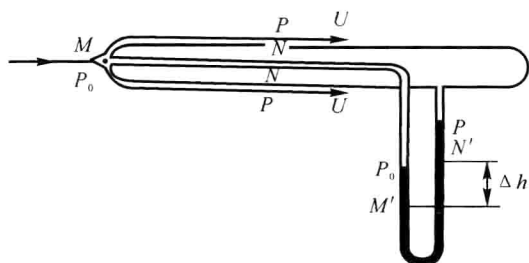


图 2-1 皮托管的内部构成

忽略流体的黏性、压缩性,并假设流体为流动时不随时间变化的定常流动,根据理想不可压缩流体的伯努利方程,有如下关系:

$$\frac{1}{2}u^2 + \frac{p}{\rho} = \frac{1}{2}u_i^2 + \frac{p_i}{\rho} = \text{const} \quad (2-1)$$

$$p_i = \frac{1}{2}u^2\rho + p = \frac{1}{2}u_i^2\rho + p_i \quad (2-2)$$

式中, $p$ 和 $p_i$ 为静压; $u^2\rho/2$ 为动压; $p_i$ 为总压。未受扰动的流体到达 $t$ 点时,部分流体质点完全滞止,即速度为零,这时 $t$ 点称为临界点或驻点,驻点上的静压就是总压。总压是垂直于流体流动方向单位面积上的作用力。如果在驻点处沿着流体方向放一个小管,管口所感受的压力就是总压。扰动较小的情况下,在与未扰动有一定距离的合适位置上,即垂直作用于流体流动方向的物体上开孔,或者放置一个管口与流体方向垂直的小管,它们所感受到的压力就是静压。通过测量获得了静压和总压,就可以计算出流体的速度为



$$u = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho}} \quad (2-3)$$

可见,在流体的密度  $\rho$  已知后,只要测得流体的总压和静压,或者它们的差,就可以计算出流体的速度,这就是皮托管测速的基本原理。当流体流动马赫数为  $0.3 < Ma < 1.0$  时,应该考虑气体的压缩效应,这时流速表达式为

$$u = \sqrt{\frac{2(p_t - p)}{\rho(1 + \epsilon)}} \quad (2-4)$$

式中,  $\epsilon$  为气体的压缩性修正系数,可以通过查表 2-1 获取。当流体流动的马赫数  $Ma > 1.0$  时,气流会在测速管的前端产生一个头部激波,因此必须将所测得的激波后的亚声速流的压力换算成激波前的再计算。

表 2-1  $\epsilon$  与  $Ma$  的关系

$Ma$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\epsilon$	0.002 5	0.01	0.022 5	0.04	0.062 5	0.09	0.128	0.173	0.219	0.275

皮托管测量的是流场空间某点的平均速度,由于是接触式测量,因而探头的头部尺寸决定了皮托管测速的空间分辨率。受工艺、强度、刚度和仪器惯性等因素的限制,目前最小的皮托管头部直径为  $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 。皮托管结构简单,使用方便,造价低廉,在一定的速度范围内可以达到较高的测量精度。由于皮托管的测压孔很小,容易被污物堵塞,需要经常用氮气吹扫测压孔。此外,因其频率响应和灵敏度不高,对于脉动气流和强度高于 20% 的流场,使用皮托管不能取得满意的测量效果。

## 第二节 热线风速仪

热线风速仪是利用热线或热膜的热损失来测量流体流速的。常见的热线风速仪探头如图 2-2 所示。将直径为  $1 \sim 5\mu\text{m}$ ,长度为  $0.2 \sim 2\text{mm}$  的金属丝作为热线,点焊在两根支杆的端面上,支杆固定在绝缘体上,通过绝缘座引出导线就构成了一根热线探针。加热这根金属探针,并将其置于流场中,流体沿垂直方向流过金属丝时,将带走金属丝一部分热量。当风速发生变化时,金属丝的温度随之变化,通过风速仪内相应的电路中间转换器将金属丝的温度变化转化成电信号输出,电信号与风速之间存在一一对应的关系,从而可以测出流体的速度。

热线的机械强度低,不适合在液体或者带有颗粒的气体中工作,这时可以用热膜代替热线。热膜由铂或铬制成金属薄膜,厚度低于  $0.1\mu\text{m}$ 。热线风速仪可以测量平均流动的速度和方向;测量来流的脉动速度及频谱;测量湍流中的雷诺应力即两点的速度相关性及时空相关性;测量壁面切应力等。其流速测量范围可达  $500\text{m/s}$ ,脉动频率上限可达  $1\text{MHz}$ 。

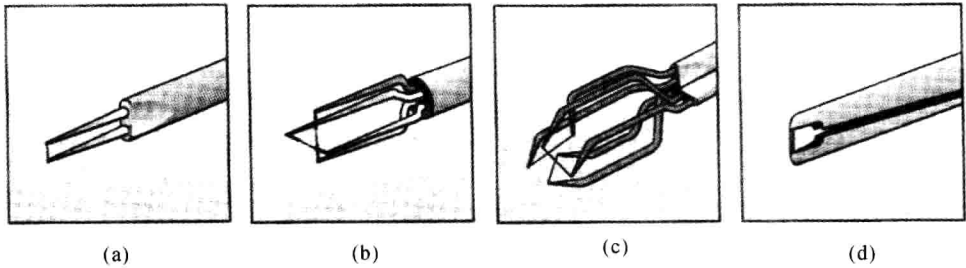


图 2-2 典型的热线风速仪探头

(a) 一元热线探头; (b) 二元热线探头; (c) 三元热线探头; (d) 热膜探头

## 一、测量原理

假定热线在流体中的散热损失主要为对流换热,不考虑热传导和热辐射损失,在热平衡条件下,有如下关系:

$$I^2 R = hF(t_w - t_f) \quad (2-5)$$

式中,  $I$  为通过热线的电流;  $R$  为热线的电阻,  $R = R_0[1 + \beta(t_w - t_0)]$ ,  $R_0$  为热线在温度  $t_0$  时刻的电阻,  $\beta$  为电阻温度系数;  $t_w$  为相应的热线温度;  $t_f$  为流体温度;  $h$  为热线与被测流体之间的对流换热系数,它与流体的流速、热导率、黏度等参数有关;  $F$  为热线的换热面积。

由传热学知识可知,对流换热系数通常可以由经验公式确定,即

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} \quad (2-6)$$

式中,  $Nu$  为努赛尔数;  $\lambda$  为流体的导热系数;  $d$  为热线的直径。对于不同流体,在不同的流动情况下,  $Nu$  常有不同的经验公式。常用的经验公式如下:

$$Nu = A + BRe^{0.5} \quad (2-7)$$

式中,  $A$  和  $B$  分别为与流体常数及探头结构有关的常数;  $Re$  为雷诺数。这样,当热线材料和几何尺寸已定,流体的物性已定时,流体的速度是通过热线的电流和热线电阻的温度来求得的,即

$$u = \left\{ \frac{I^2 R_0 [1 + \beta(t_w - t_f)] + \beta(t_f - t_0) - a'(t_w - t_f)}{b'(t_w - t_f)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2-8)$$

式中,  $a' = A\lambda F/d$ ,  $b' = B\lambda Fd^{-0.5}/\nu^{0.5}$ ,  $\nu$  为流体的运动黏度。该式中第三项可以看成温度  $t_f$  与热线标定电阻的温度  $t_0$  不同时的修正,当  $t_f = t_0$  时,修正值为 0,这时流体速度只是电流  $I$  和热线温度的函数。因此,只要固定  $I$  和  $t_w$  两个参数中的任何一个,就可以获得流体速度与另一个参数的单值函数。

从热线测速仪的工作原理可知,热线测速有两种工作模式:恒流式和恒温式。前者令热线电流  $I$  为常数,又称为等电流法;后者令热线温度  $t_w$  为常数,又称为等温度式。由于热线电阻是热线温度的单值函数,所以等温度法又称为等电阻法。无论哪种方法都需要对流体温度  $t_f$  进行修正。恒流式和恒温式测温分别采用如图 2-3 中的电路。

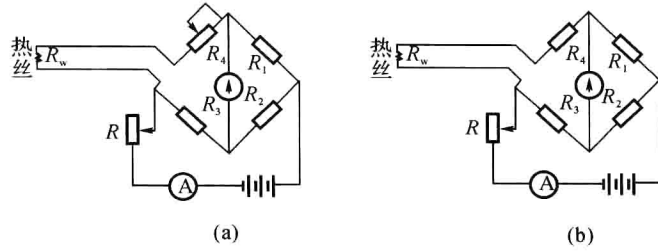


图 2-3 热线风速仪工作原理图

(a) 恒流式; (b) 恒温(恒电阻)式

## 二、热线风速仪的使用

热线探头在使用前必须进行校正,一般静态的校正是在专门的标准风洞里进行的,关键步骤是测量流速与输出电压之间的关系并画成标准曲线;动态校准是在已知的脉动流场中进行,或在测速仪加热电路中加上一个脉动电信号,校验热线风速仪的响应频率,若响应频率不佳可用相应的补偿电路加以改进。进口的热线风速仪常常附带一套标定装置,可以在室温和常压下对热线探针进行标定。

实际应用时,许多因素影响热线和流动介质之间的换热因素,为了提高热线探头的测量精度,还必须对热线的测量值进行修正。

首先是热线倾角的修正。从传热学可知,对流换热系数 $h$ 是流向角 $\theta$ 的函数。如图2-4所示,纵坐标为对流换热系数比 $\epsilon_\theta = h_\theta/h_{\theta=0}$ ,从曲线中可以看到, $\theta$ 在 $\pm 15^\circ$ 范围内, $\epsilon_\theta$ 变化不明显;但当 $\theta$ 继续增大时, $\epsilon_\theta$ 将急剧减小。在流速不变的情况下,随着 $h_\theta$ 的减小,热线风速仪的电桥压降也会下降。在此,将电桥电压与流速、流向角的关系称为方向特性。图2-5所示的是典型的热线探头方向特性,当 $\theta = 45^\circ$ 时方向灵敏度最大,所以测量流动方向时,可选择 $45^\circ$ 热线;当 $\theta = 0^\circ$ 时方向灵敏度最小,所以测量速度时,应选择 $0^\circ$ 的热线。

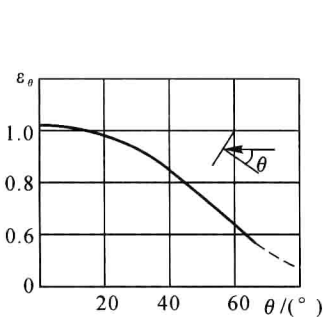
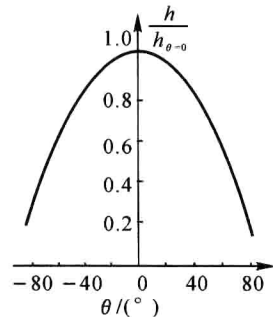
图 2-4 换热系数 $\epsilon_\theta$ 比与气流方向角 $\theta$ 的关系

图 2-5 方向特性曲线

其次,流体温度变化也会引起热线测量值的改变,这是因为温度变化会引起流体物性参数(如导热系数、密度和黏度等)以及流体与热线之间温度差的变化。此外,热线探头对流体中的悬浮飞尘、油雾、烟雾等污染物相当敏感,一般来说,当冷电阻没有明显变化而校准曲线发生



明显改变时,可认为是热线被污染所致。因此,还应该根据热线探头的工作条件定期对其进行清洁。

### 第三节 激光多普勒测速

皮托管和热线风速仪测量速度都是属于接触式测量方法,探头对流场不仅有影响,而且还限制了测量的频率响应速度和空间分辨率,其应用范围是有限的。流体速度测量的非接触式方法就是利用光学的方法进行测量。激光测试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、黏性边界层、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。表 2-2 列出了三种流速测量技术的比较。

表 2-2 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 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	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 $\sim u^2$	窄, 10 ~ 80	一次标定	低	低	测压孔 易堵塞
热线 风速仪	接触	热损失 $\propto u^{1/2}$	较宽, 1 ~ 300	每次使用 前标定	较高	较高	热线头 易损失
激光 测速仪	非接触	频差 $\propto u$ 时差 $\propto u^{-1}$	宽, $10^{-4}$ ~ 2 000	无须标定	高	高	使用不够 可靠、方便

#### 一、激光多普勒测速原理

##### 1. 光学中的多普勒效应

一般运动流体中有跟随流体一起运动的微粒,称为粒子。如,自来水中本身就带有粒子,其直径一般为  $d=10\mu\text{m}$ ;空气中的粒子相对较少,其直径一般为  $d=1\mu\text{m}$ 。测量其他流场时还可以添加粒子。这些粒子与流体一起运动,可以认为它们的运动速度就是流体的速度。如果将一束光照射在流动的流体上,由于粒子对照射光有散射作用,捕捉并测量包含有粒子速度信息的该散射光的频率,就能测出流体的速度。

激光多普勒测速仪(简称 LDV,也称 LDA,即激光多普勒风速仪)是基于多普勒效应工作的。声学中的多普勒效应是 1842 年由奥地利物理学家多普勒首先发现的。高速行驶的火车呼啸而过,我们听到的声调由高变低,这种由于波源和观察者之间有相对运动而使得观察者接收到的波源频率发生变化的现象称为多普勒效应。

爱因斯坦在狭义相对论中指出,光波也具有类似的多普勒效应。一束具有一定频率的激光,照射到具有一定速度  $u$  的运动粒子上,粒子对光有散射作用,散射光的频率与直射光的频率存在多普勒频差。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,但前者却不需要。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,其偏移量与运动粒子的速度(即流体的速度) $u$ 成正比,只要测得频移,就可以测得流速。

根据物理光学知识,光的多普勒效应的相对论公式为

$$f_1 = f_0 \left( 1 \pm \frac{u}{c} \pm \frac{1}{2} \frac{u^2}{c^2} \pm \frac{1}{3} \frac{u^3}{c^3} \pm \frac{1}{4} \frac{u^4}{c^4} \pm \dots \right) \quad (2-9)$$

式中, $f_1$ 为观察者接收到的光频率; $f_0$ 为光源发出的光频率; $u$ 为相对运动速度,正号或负号分别表示相对移近或移远; $c$ 为介质中的光速。由于相对运动速度远远小于介质中的光速,因此高阶项可以忽略,上式可以简写为

$$f_1 = f_0 \left( 1 \pm \frac{u}{c} \right) \quad (2-10)$$

## 2. 激光多普勒测速原理

图2-6为利用激光多普勒效应测量流速的原理示意图。图中LS为固定的激光光源,其发射的平面光波频率为 $f_i$ ,波长为 $\lambda_i$ ,传播方向为矢量 $\mathbf{K}_i$ 。P代表跟随流体一起运动的微粒,其运动速度为 $\mathbf{u}$ ,PD为固定波长的光波接收器(光电检测器),它接收运动微粒P的散射光波,接收方向用 $\mathbf{K}_s$ 表示。

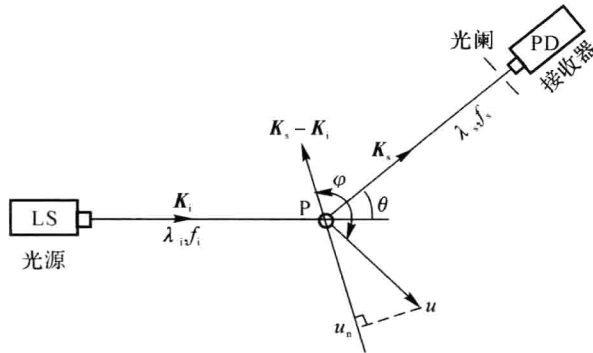


图2-6 激光多普勒效应测量流速的原理示意图

根据多普勒效应,对于固定光源LS发射的入射光,运动微粒P(相当于入射光的接收器)所接收到的光波频率为

$$f_p = f_i \left( 1 - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{K}_i}{c} \right) \quad (2-11)$$

式中, $c$ 为光速。对于运动微粒的散射光波(频率为 $f_p$ ),固定接收器PD接收到的光波频率

$$f_s = f_p \left[ \frac{1}{1 - \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{K}_s}{c}} \right] \quad (2-12)$$

将上面两个式子进行整理后,得

$$f_s = f_i \left[ 1 + \frac{\mathbf{u} \cdot (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i)}{c - \mathbf{u} \cdot \mathbf{K}_s} \right] \quad (2-13)$$

因此,固定接收器收到的光波频率与固定激光光源发射的光波频率之间的多普勒频移 $f_D$ 为



$$f_D = f_s - f_i = f_i \frac{\mathbf{u} \cdot (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i)}{c - \mathbf{u} \cdot \mathbf{K}_s} = \frac{f_i}{c} \left[ \frac{\mathbf{u} \cdot (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i)}{1 - \mathbf{u} \cdot \mathbf{K}_s/c} \right] \quad (2-14)$$

因为  $f_i = c/\lambda_i$ ，而颗粒的速度  $v = |\mathbf{u}| \ll c$ ，所以上式可以简写为

$$f_D = \frac{1}{\lambda_i} \mathbf{u} \cdot (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i) \quad (2-15)$$

假设入射光波的方向矢量  $\mathbf{K}_i$  与散射光波的接收方向  $\mathbf{K}_s$  之间的夹角为  $\theta$ ，速度矢量  $\mathbf{u}$  与合成矢量  $\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i$  之间的夹角为  $\varphi$ ，则有

$$f_D = \frac{2}{\lambda_i} u \sin \frac{\theta}{2} \cos \varphi \quad (2-16)$$

速度矢量  $\mathbf{u}$  在矢量  $\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i$  方向上的分量记为  $u_n$ ，即  $u_n = u \cos \varphi$ ，则有

$$u_n = \frac{\lambda_i}{2 \sin \frac{\theta}{2}} f_D \quad (2-17)$$

式(2-17)就是激光多普勒测速仪工作原理的基本表达式。可见，只要激光器发射的入射光波的方向  $\mathbf{K}_i$  与散射光接收方向  $\mathbf{K}_s$  的夹角  $\theta$  一定，则微粒运动速度在  $\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_i$  方向上的分量大小  $u_n$  与多普勒频移  $f_D$  呈简单的线性关系。这意味着通过改变光源与检测器的相对位置，就可以测量微粒速度在任意方向上的分量大小。值得注意的是，使用式(2-17)时检测器和光源必须在相同的介质中，否则要对波长和光束进行修正。图2-7为采用氦-氖激光器作为光源时典型的频率-速度特性。

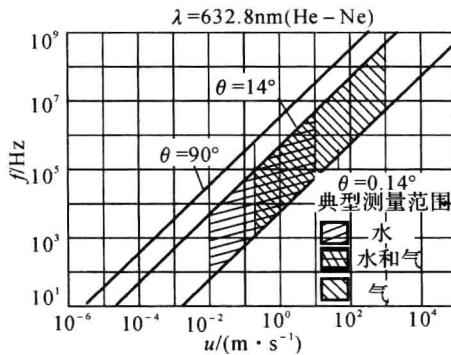


图 2-7 典型的频率-速度特性

### 3. 光的散射

若一束光射入采样区，在入射光子与介质中存在的粒子之间发生各种形式的相互作用，可能发生吸收和衍射，也可能以一种与入射光相同或不同的波长散射或再辐射，甚至还可能产生其他效应。将吸收以外的全部过程统称为散射，而衰减过程散射与吸收称为消光。光的散射现象是指由于介质中存在的微粒对光束的影响，使光波偏离原来的传播方向而向四周散射的现象。散射一般可按照散射粒子的大小分为两类：

(1) 散射粒子的线度在  $1/5 \sim 1/10$  光波波长以下的散射称为分子散射，如瑞利(Rayleigh)散射和拉曼(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为大粒子散射,如米氏(Mie)散射。

根据米氏散射理论,散射光的频率不随散射角位置的不同而改变,但散射光的强度与散射方向有关。另外,散射光的强度与入射光束的波长关系不大,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,散射光强越强;粒子越大,散射光强越强,而且越向入射光的方向集中,如图 2-8 所示。从图中还可以看出,前向散射光强比后向大,有时甚至相差 2~3 个数量级,而侧向散射光强最弱。因此,为了获得较强的散射信号,应该尽可能地采用前向散射系统,用高光强的入射光照射到大粒子上,并且尽可能用大的透镜收集散射光。

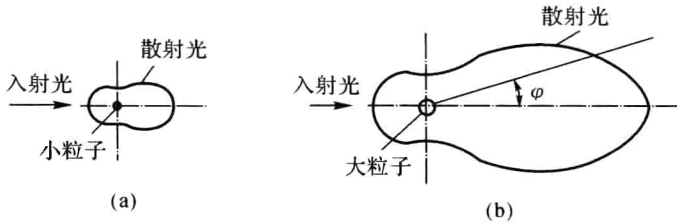


图 2-8 颗粒散射光分布示意图

(a) 小粒子的散射; (b) 大粒子的散射

#### 4. 外差检测技术

多普勒频移中包含有速度的信息,检测出多普勒频移即可求出粒子即流体的运动速度。检测的方法有直接检测和外差检测两种。直接检测通常采用法布里-珀罗干涉仪来检测光的多普勒频移,但这种方法的分辨率为  $10^6$  Hz,一般只适用于  $Ma > 0.5$  的速度测量。而可见光波的频率通常为  $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz,故用光电检测器直接检测散射光频率是十分困难的。

多普勒频移的频带很宽,从对应于毫米每秒级速度的几千赫兹到高超声速的  $10^8 \sim 10^9$  Hz。为了拓宽测速范围,获得运动粒子的散射光频移,必须通过光学外差检测。设收音机接收到的外来信号为  $E_1 \cos \omega_1 t$ ,和另一个由本机产生的频率相近但不同的本振信号为  $E_2 \cos \omega_2 t$ 。两种信号混频后送入平方律检波器件(如二极管)中,则该器件输出的信号为

$$I(t) = (E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t)^2 = E_1^2 \cos^2 \omega_1 t + E_1 E_2 [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] + E_2^2 \cos^2 \omega_2 t \quad (2-18)$$

将上述输出通过低通滤波器,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

$$I(t) = \frac{E_1^2}{2} + E_1 E_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{E_2^2}{2} \quad (2-19)$$

该电流信号由两个直流分量  $E_1^2/2, E_2^2/2$  和一个交流分量  $E_1 E_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t$  组成,若外来信号的振幅  $E_1$  远小于本振信号的振幅  $E_2$ ,则信号功率由  $E_1^2/2$  增加到  $E_1 E_2$ ,即放大了  $2E_2/E_1$  倍而不相应地增大噪声,这是外差技术的重要特性。

上述外差技术也可用于光波,恰好所有的光学敏感元件都是平方律器件,因为这些器件都对光强敏感,而光强与其自身幅值的平方有关。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,因而它又起到低通滤波器