

热物理激光测试技术

朱德忠 主编

科学出版社

内 容 简 介

热物理量的激光测试技术是一种新颖的测试技术。由于它特点显著，已受到人们的高度重视，其应用范围也在不断扩大。

本书主要阐述热物理学科中温度场、速度场、浓度场、密度场和颗粒分布特性的激光测试技术。全书共分三部分，第一部分为气流折射率的激光测试技术，第二部分为激光测速技术，第三部分为激光散射测量技术与相干反斯托克斯喇曼光谱测温技术。本书力求做到物理概念与数学分析相结合，深入浅出，通俗易懂，便于应用。

本书可供热能工程、工程热物理、计量测试、冶金、化工、动力工程等有关专业的大学生、研究生作为教材或教学参考书。亦可作为有关工程技术人员、科研人员的实用参考书。

热物理激光测试技术

朱德忠 主编

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 8 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1990 年 8 月第一次印刷 印张：15 1/4 插页：3

印数：0001—1 500 字数：399 000

ISBN 7-03-001908-3/TB·63

定价：11.00 元

前 言

在热物理现象的科学研究,以及在能源、动力、热工、化工、制冷、航空等工程技术部门的工程实践中,经常遇到对温度场、速度场、浓度场、密度场、颗粒大小和分布等热物理量的测量问题。自1960年激光器问世以来,激光技术为热物理量的测试开拓了一个崭新的研究领域。如今,热物理量的激光测试技术已发展成为一种新颖的专门测试技术。激光束作为光学探测器具有对试验件非接触,对流场无扰动,实时,快速,直观,信息量丰富等特点。因而,热物理量的激光测试技术日益受到国内外学者的重视。近年来,该领域内的新技术、新方法不断涌现。它不仅改造了传统的光学测试方法(如光学干涉法),使之扩大了测量范围,提高了测量精度,而且某些新技术(如激光全息、散斑、激光测速、CARS等)更为热物理量的测试提供了新的手段。

全书可分为三大部分:第一部分(第一章至第三章)为气流折射率场的激光测试技术。由此可以获得流体密度场、浓度场和温度场等信息。第二部分(第四、五章)为激光测速。第三部分(第六章至第八章)为激光散射测量技术与CARS测温技术。本书力求做到数学分析与物理概念相结合,激光技术与热物理量的测试相结合。对激光技术中必须了解的基本原理,尽可能结合热物理量的测试,做到深入浅出,通俗易懂,便于实用。本书不仅可供热能工程、动力工程、工程热物理等有关专业的大学生,研究生作为教材或教学参考书。也可供有关工程技术人员、科研人员作为实用参考书。

本书是编者在近十年来的教学、科研基础上编写而成的。由清华大学工程力学系朱德忠担任主编。参加编写工作的分别是:第一章为朱德忠;第二章为姚永庆(中国科学院工程热物理研究所)、

宋耀祖(清华大学工程力学系);第三章为宋耀祖;第四章为李荣先(清华大学工程力学系);第五章为宋耀祖;第六章为容文盛(清华大学热能工程系);第七、八章为董耕发(上海复旦大学物理系)。此外,在教学过程中,许多大学生、研究生对该教材提出了宝贵的修改意见。在此,顺致谢意!

编者
于清华大学

符号表

拉丁字母符号

A, a 衍射孔半径, 尺寸参数, 振幅常数, 距离, 面积, 孔径, 光阑, 光波实振幅, 光源尺寸	强度
b 光源尺寸, 条纹间距, 距离	J 转动量子数
C 截面积, 光速	K 散射系数, 衍射光栅级数, 格拉德斯通-戴尔常数, 干涉条纹对比度
C_n 颗粒数目浓度	k 波矢量
C_0 真空中的光速	k 波数, 导热系数, 玻尔兹曼常数
C_p 定容比热	L 腔长, 增益, 测试段长度, 聚焦长度
C_{sca} 散射截面	L_c 相干长度
c 气体中的光速	l 距离, 光程
D, d 漫射表面随机漫射函数, 衍射孔直径间距, 长度, 厚度, 孔径, 光阑, 直径, 条纹间距	l_{xx} 椭球体长轴长度
D_m 中间直径	M 气体分子量
D_s Sauter 平均直径	$M(\omega)$ 增益
D_{∞} 最大直径	M_i 成像透镜像放大率
D_e^{-2} 光斑尺寸	M_i 纹影透镜像放大率
d_e^{-2} 椭球体厚度	m 长度, 干涉条纹转移级次
d_f 干涉条纹的相对位移, 干涉条纹间距	N 颗粒数, 单位体积分子数, 粒子数, 噪音, 周期数, 电子数, 条纹数总的概率事件数, 条纹级次
d_m 椭球体短轴长度 (宽度)	N_{ij} 概率事件数
d_{mc} 光检测器中看到的测量体宽度	N_{jr} 测量体中干涉条纹数
E 电场强度, 光波电矢量, 电场, 电矢量, 光能, 分子能量	N_{ph} 进入光电接收器件的条纹数
e 电子电量, 单位矢量	Nu 努谢尔数
F F 数, 阻力	N_t 光栅总线数
f 频率, 焦距	n 系数, 光子数, 计数器输出, 角动量投影量子数, 气体折射率
f_c 时钟频率	n_c 标准状态下气体的折射率
f_d 多普勒频差	n_{∞} 环境状态下气体的折射率
G 光谱项	O 物光波复振幅
G_i 入射光波复振幅	P 功率, 光功率, 气压
G_t 透射光波复振幅	p 物距
g 重力加速度, 简并度	p_0 偶极矩
H_{ij} 概率事件数	Q 淬灭率, 热流量
h 普朗克常数	Q_R 转动配分函数
I 电流, 光电流, 光强, 辐射强度, 电流	q 介质吸收系数, 像距
	R 阿贝尔转换半径, 电阻, 散射系数的

修正系数,普适气体常数
 R 参考光波复振幅
 R_c 对比度
 R_n 雷诺应力
 r 半径
 r_0 光腰半径
 r_s 光斑尺寸半径
 S 双焦点间距,距离
 S_b 燃烧速度
 s 面积,距离
 T 湍流度,温度,流体温度,振动周期
 T_w 壁面温度
 T_∞ 环境温度
 t 时间,飞行时间,复振幅透射率
 t_0 全息干板透射率
 U 流体运动速度,振幅
 U 光波复振幅
 u_y y 方向分速度
 u_1, u_2, u_3 流体速度分量
 V 速度,跃迁几率,容积,光波复振幅
 V_{-} 一般平均速度
 $V_{\text{取}}$ 加权平均速度
 v 光在介质中的传播速度,振动量子数
 v_i 瞬时速度
 v_c 累积容积百分比
 w 速度,集合宽度
 x 无因次尺寸
 x, y, z 坐标方向
 Z 距离

希腊字母符号

α 光线偏转角
 β 角度,全息感光度,参物比
 Γ 喇曼线宽
 γ 位相因子,比热
 $\Delta\nu$ 谱线宽度
 Δl 相干长度

$\Delta\kappa$ 位相失配因子
 δ 光谱线位移,错位距,边界层厚度
 δ_m 条纹位移量的修正值
 η 光谱效率
 θ 衍射角,夹角
 λ 光在介质中的波长
 λ_0 光在真空中的波长
 s, ξ 坐标方向
 θ 散斑位移
 ϵ_0 真空中介电常数
 ν 光波频率
 ν_a 反斯托克斯光频率
 ν_s 斯托克斯光频率
 ν_0 光谱线型中心频率
 $\bar{\nu}$ 波数
 ξ 离焦量
 ρ 流体密度,概率密度,距离
 ρ_a 角度谱
 ρ_t 时间谱
 Φ 位相
 σ 投影面积,光阑孔面积,均方差
 τ 光强衰减系数,相干时间,曝光时间
 χ 非线性极化率
 χ_i 非谐常数
 Ω 空间角,常数(对于空气) = $MPK/R=7.87 \times 10^{-2}[K]$
 ω 光波角频率,半径张角
 ω_a 反斯托克斯光角频率
 ω_p 泵浦光角频率
 ω_s 斯托克斯光角频率

下角标

0 物光波参数
0 参考点参数
ref 参考点参数
r 参考光波参数
 ∞ 环境参数

目 录

前言.....	i
符号表.....	xi
第一章 光线在非均匀折射率场中的传播.....	1
§ 1-1 气体折射率	3
§ 1-2 格拉德斯通-戴尔公式	4
§ 1-3 在非均匀折射率场中光线受扰动的方式	8
§ 1-4 光线受扰动的解析分析法	12
§ 1-5 流场显示的阴影法和纹影法	17
§ 1-5-1 阴影法.....	17
§ 1-5-2 纹影法.....	21
参考文献.....	27
第二章 激光干涉法流场显示技术.....	28
§ 2-1 光干涉的基本原理	28
§ 2-1-1 光干涉的基本概念.....	28
§ 2-1-2 光源的相干性.....	31
§ 2-2 激光干涉仪	34
§ 2-2-1 激光干涉仪的特点.....	34
§ 2-2-2 干涉光路中的扩束-准直、平行光系统.....	35
§ 2-2-3 干涉光路中的分束器.....	37
§ 2-3 雅曼干涉仪和迈克尔逊-台曼干涉仪	44
§ 2-3-1 雅曼干涉仪.....	44
§ 2-3-2 迈克尔逊-台曼干涉仪	45
§ 2-4 差分干涉仪	47
§ 2-4-1 沃拉斯顿棱镜纹影干涉仪.....	47
§ 2-4-2 平晶错位干涉仪.....	55
§ 2-5 马赫-曾德干涉仪	60

§ 2-5-1 马赫—曾德干涉仪的基本原理·····	60
§ 2-5-2 马赫—曾德干涉仪的调整·····	63
§ 2-5-3 马赫—曾德干涉仪的质量要求·····	65
§ 2-5-4 改进型的马赫—曾德干涉仪·····	66
§ 2-6 双镜干涉仪 ·····	67
§ 2-6-1 双镜干涉仪的基本结构·····	67
§ 2-6-2 双镜干涉仪的测量原理·····	69
§ 2-7 干涉图上条纹的定量处理及其误差修正 ·····	71
§ 2-7-1 干涉条纹的选择·····	71
§ 2-7-2 参考点及坐标标志·····	74
§ 2-7-3 干涉条纹的判读及其常用设备·····	74
§ 2-7-4 实验数据处理的定量计算·····	76
§ 2-7-5 干涉仪的误差及其修正·····	80
§ 2-8 提高激光干涉仪测量精度的措施 ·····	88
§ 2-8-1 激光干涉法的测量极限·····	88
§ 2-8-2 提高干涉测量精度的措施·····	89
§ 2-8-3 提高干涉仪灵敏度的措施·····	93
参考文献·····	93
第三章 全息干涉与激光散斑流场测试技术·····	95
§ 3-1 全息照相的基本原理、特点与分类·····	95
§ 3-1-1 全息照相的基本原理·····	96
§ 3-1-2 全息照相的特点·····	99
§ 3-1-3 全息照相的分类·····	102
§ 3-2 全息照相的数学描述 ·····	111
§ 3-2-1 光波的复数表示及光波复振幅·····	111
§ 3-2-2 全息照相的基本方程·····	114
§ 3-3 全息干涉计量技术 ·····	119
§ 3-3-1 全息干涉计量技术的基本原理、特点及主要方法 ···	119
§ 3-3-2 双曝光全息干涉法·····	123
§ 3-3-3 实时全息干涉法·····	137
§ 3-3-4 双波长全息干涉法·····	144
§ 3-4 全息干涉条纹的实验数据处理 ·····	148

§ 3-4-1	全息干涉条纹的定位与解释	149
§ 3-4-2	折射率二维分布位相物体的数学反演	153
§ 3-4-3	折射率轴向对称分布位相物体的数学反演	157
§ 3-4-4	折射率三维分布位相物体的数学反演	164
§ 3-5	全息照相的实验装置与实验技术	171
§ 3-5-1	全息照相的实验装置	171
§ 3-5-2	全息照相的实验技术	180
§ 3-6	激光散斑计量技术的基本概念	185
§ 3-6-1	激光散斑现象与散斑位移的基本概念	186
§ 3-6-2	激光散斑计量技术的分类	188
§ 3-6-3	客观散斑照相与主观散斑照相	188
§ 3-7	激光散斑照相测量位相物体折射率分布的基本原理与方法	191
§ 3-7-1	基本原理——光束通过位相物体后空间散斑的运动规律	192
§ 3-7-2	记录位相物体空间散斑图的光路及其分析	200
§ 3-7-3	散斑图的再现方法与实验装置	208
§ 3-8	激光散斑照相测量流体密度场、温度场和浓度场	210
§ 3-8-1	二维密度场与温度场的测量	211
§ 3-8-2	存在端部效应时壁面热流量的测量	214
§ 3-8-3	轴对称温度场与浓度场的测量	216
§ 3-9	提高激光散斑照相测量灵敏度的两种实验技术	223
§ 3-9-1	反射式激光散斑照相法	223
§ 3-9-2	附加位移法	224

参考文献	225
------	-----

第四章 激光多普勒测速技术	227
---------------	-----

§ 4-1	激光多普勒测速的基本原理	228
§ 4-1-1	激光多普勒效应	228
§ 4-1-2	条纹模式	230

§ 4-1-3 外差检测.....	233
§ 4-2 激光多普勒测速仪的光路系统	238
§ 4-2-1 光路系统简介.....	238
§ 4-2-2 分光系统.....	240
§ 4-2-3 聚焦发射系统.....	242
§ 4-2-4 收集系统和光检测器.....	243
§ 4-2-5 LDV 光源	251
§ 4-2-6 频移装置.....	255
§ 4-3 激光多普勒测速的信号处理系统	261
§ 4-3-1 多普勒信号的主要特点.....	261
§ 4-3-2 频率跟踪器.....	263
§ 4-3-3 计数器.....	269
§ 4-4 激光多普勒测速仪的应用	277
§ 4-4-1 仪器的调试和参数的选择.....	277
§ 4-4-2 水流与气流流场的测量.....	281
§ 4-4-3 火焰传播速度的测量.....	286
§ 4-4-4 火焰喷涂枪的喷涂特性研究.....	288
§ 4-4-5 大速差同向射流突扩燃烧室的实验研究.....	289
§ 4-4-6 LDV 测量的误差分析	293
参考文献.....	303
第五章 激光双焦点测速技术.....	304
§ 5-1 激光双焦点测速仪的基本原理与仪器结构	305
§ 5-1-1 基本原理.....	305
§ 5-1-2 L2F 的光学系统.....	305
§ 5-1-3 电子信号处理系统.....	307
§ 5-2 激光双焦点测速技术数据处理的基本方法	314
§ 5-2-1 直接利用二维频谱确定流场参数的方法.....	314
§ 5-2-2 二维频谱的简化处理——利用边缘概率密度频谱确 定流场参数的方法.....	319
§ 5-2-3 实验数据随机误差的计算方法.....	323
§ 5-3 激光双焦点测速技术的应用特点	324
参考文献.....	326

第六章 激光散射法颗粒特性测量技术	327
§ 6-1 光的微粒散射现象	328
§ 6-1-1 振幅函数与光强函数	330
§ 6-1-2 散射截面与散射系数	331
§ 6-1-3 光强衰减方程	333
§ 6-2 球形颗粒的衍射散射	334
§ 6-2-1 菲涅耳-克希荷夫公式	335
§ 6-2-2 用菲涅耳-克希荷夫公式计算方和非衍射	340
§ 6-2-3 圆孔衍射	345
§ 6-2-4 巴比涅原理与球体衍射计算	348
§ 6-3 衍射孔的变化对衍射图形的影响	353
§ 6-3-1 衍射孔变化问题	354
§ 6-3-2 多孔衍射问题	355
§ 6-4 Mie 散射理论	357
§ 6-5 颗粒尺寸分布的数学描述	359
§ 6-5-1 颗粒尺寸分布曲线	360
§ 6-5-2 颗粒尺寸分布函数	361
§ 6-6 激光散射法测定颗粒的平均直径	365
§ 6-6-1 理论依据	365
§ 6-6-2 由光强分布确定 D_v	369
§ 6-6-3 数据处理方法	371
§ 6-6-4 应注意的问题及测量结果的准确度	375
§ 6-6-5 试验设备简介	378
§ 6-7 激光散射法测定颗粒的尺寸分布	380
参考文献	385
第七章 激光测温技术	386
§ 7-1 喇曼散射的基本原理	387
§ 7-1-1 喇曼散射的物理图像	387
§ 7-1-2 振动喇曼散射、转动喇曼散射和振动-转动喇曼散射	389
§ 7-2 利用喇曼光谱计算温度的几种方法	396
§ 7-2-1 转动喇曼光谱和振动-转动喇曼光谱	396

§ 7-2-2 自发喇曼散射光谱测温的基本原理·····	399
§ 7-2-3 计算体系温度的几种方法·····	402
§ 7-3 自发喇曼散射光谱测温技术的实验装置和实际 应用·····	404
§ 7-3-1 自发喇曼散射光谱测温的实验装置·····	404
§ 7-3-2 自发喇曼散射光谱测温技术的实际应用·····	408
§ 7-4 激光感生荧光测温技术 ·····	410
§ 7-4-1 激光感生荧光测温方法的基本原理·····	411
§ 7-4-2 激光感生荧光法的实验及应用·····	414
§ 7-5 光声光偏转法测温技术和其他激光测温技术 ···	414
§ 7-5-1 光声光偏转法测温原理·····	415
§ 7-5-2 光声光偏转法测温的实验装置和实验方法·····	416
§ 7-5-3 其他激光测温技术·····	418
参考文献 ·····	419
第八章 相干反斯托克斯喇曼光谱 (CARS) 测温技术·····	421
§ 8-1 CARS 光谱学的基本原理 ·····	421
§ 8-1-1 物理模型和数学表述·····	422
§ 8-1-2 三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 和 CARS 光谱的线型·····	424
§ 8-1-3 位相匹配条件和相干作用长度·····	426
§ 8-1-4 CARS 光谱的优缺点 ·····	428
§ 8-2 CARS 测温的基本公式与 N_2 的 CARS 理论谱 的计算·····	429
§ 8-2-1 CARS 测温的基本公式·····	429
§ 8-2-2 N_2 的理论 CARS 光谱的计算·····	431
§ 8-2-3 各参数对 CARS 光谱的影响 ·····	436
§ 8-3 CARS 实验装置和 CARS 测温的几种实验方案 ·····	440
§ 8-3-1 实验装置及调试方法·····	440
§ 8-3-2 共线 CARS 与交叉位相匹配 CARS ·····	447
§ 8-3-3 窄带扫描 CARS 与单脉冲宽带 CARS ·····	450
§ 8-3-4 偏振 CARS 与其他 CARS 方法·····	453
§ 8-4 利用 CARS 光谱计算温度的几种方法 ·····	456

§ 8-4-1	CARS 光谱的实验值与理论值拟合法	457
§ 8-4-2	CARS 谱线转动结构包络线斜率法	458
§ 8-4-3	不同频率的积分限内光谱面积比值法	459
§ 8-4-4	快速拟合法	460
§ 8-5	CARS 光谱测温技术的实际应用和 CARS 光谱 在热物理光测中的其他应用	461
§ 8-5-1	火焰温度分布测量	461
§ 8-5-2	内燃机燃烧过程的研究	463
§ 8-5-3	其他实际体系的温度测量	465
§ 8-5-4	CARS 光谱在热物理光测中的其他应用——利用 CARS 光谱测量浓度和组分	467
参考文献		469
索引		471

第一章 光线在非均匀 折射率场中的传播

在工程热物理学科领域中，对于气流的温度场和浓度场的测量和研究是十分重要的。通常利用气体的光学性质，由光学显示技术来测定气体热力学状态参数的空间分布。

气体的温度、压力、浓度和马赫数等状态参数与密度有确定的函数关系，而气体的光学折射率是其密度的函数。由于气流折射率场对通过气流的光线会产生扰动，因此有许多种光学方法可以通过鉴别光线被扰动的程度来确定气体折射率的空间分布。

光线透过不均匀的折射率场时，将会受到扰动。一般说来会发生两种类型的变化：（1）光线传播偏离原来的方向；（2）扰动光线相对于未扰动光线发生了位相差。光学显示技术的基本原理就是根据光线传播方向的偏离或位相差来确定气体的折射率变化，从而进一步确定气体的温度、浓度、压力、马赫数等状态参数。图 1-1 简略地给出了被测气体状态参数与各种光学方法之间的相互关系。

从图 1-1 可知，目前常用的方法大致可以分为三类：

- （1）根据光线的偏折角来确定折射率一阶导数的纹影法和散斑照相法。
- （2）根据光线在投影面上的偏移来确定折射率二阶导数的阴影法。
- （3）根据光线位相变化即光程长度的差值来确定折射率的干涉法。

这些光学显示技术和其它测量技术相比有许多优点，它们没有扰动流场的测试探头，光线对待测气体的温度场、浓度场和速度场无干扰作用，由于光线传播是十分迅速的，因此能用于研究变

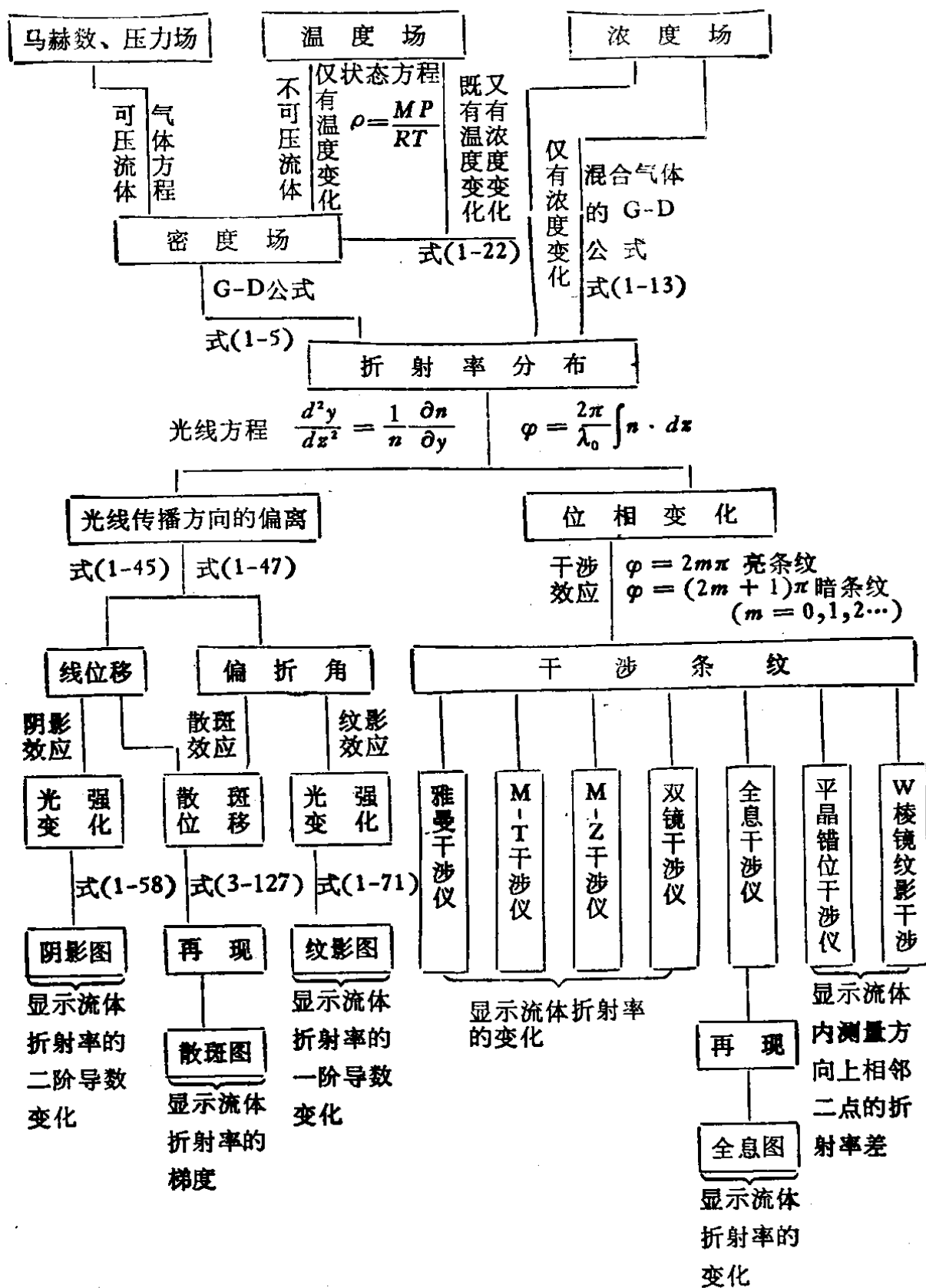


图 1-1 被测状态参数与光学测试方法之间的相互关系

化很快的动态过程。用光学显示技术可以把测试对象的图形记录下来,从而确定在某一瞬时、一定面积范围内各测量参数的空间分

布。上述三种光学显示方法本质上都是积分形式的，它们沿光束传播方向将待测物理量加以积分。由于此原因，它们通常适用于测量一维场或二维场。在这些场中，沿光线传播方向没有折射率的变化，只有在光线进出测试段时才有突然的不连续变化。对于三维场，一般只能测量沿光线路程的平均值，除非在一定的测试条件下，可以通过某种变换，来求得折射率在空间的分布。

§ 1-1 气体折射率

气体折射率是指真空中的光速和气体中的光速的比值。即

$$n = c_0/c \quad (1-1)$$

式中， n 为气体折射率， c_0 为真空中的光速， c 为气体中的光速。

当介质之间有明显的分界面时，光线从介质 1 投射至介质 2 会发生折射。如果入射角为 i ，折射角为 γ (见图 1-2)，则根据斯内尔 (Snell) 定律

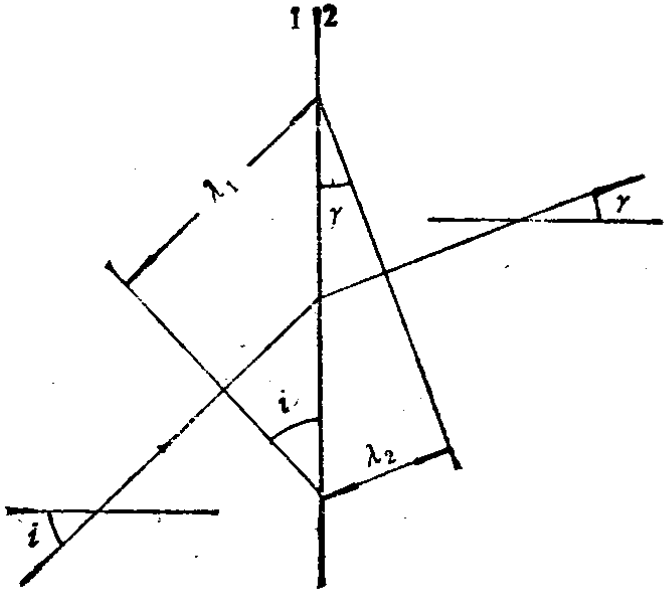


图 1-2 光线在两种介质分界面上的偏折

可知介质的相对折射率 n_2 为

$$n_2 = \sin i / \sin \gamma = c_1/c_2 = \lambda_1/\lambda_2 \quad (1-2)$$

式中， c_1, c_2 分别为光线在介质 1, 2 中的光速； λ_1, λ_2 分别为光线在介质 1, 2 中的波长。

通常称某种介质相对于真空的相对折射率为介质的绝对折射率，简称为介质的折射率。

根据介质的相对折射率 n_2 和介质 1 的绝对折射率 n_1 ，可以很容易求得介质 2 的绝对折射率 n_2 。

$n_2 = n_1 n_2$

(1-3)

§1-2 格拉德斯通-戴尔公式

对于均匀透明介质，根据经典电动力学的知识可以得到它的折射率是介质密度的函数，用洛伦茨-洛伦兹（Lorenz-Lorentz）关系式表示为

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \text{常数}$$

(1-4)

式中 ρ 为介质密度。

对于气体，折射率 n 都接近于 1，洛伦茨-洛伦兹关系式可以简化为格拉德斯通-戴尔（Gladstone-Dale）公式，简称 G-D 公式。即

$$\frac{n - 1}{\rho} = K$$

(1-5)

式中， K 为格拉德斯通-戴尔常数，简称 G-D 常数。 K 值随气体种类的不同而不同，且随波长略有变化。G-D 公式对气体符合得很好。空气在不同波长下的 K 值列于表 1-1 中。各种气体在温度

表 1-1 空气在温度为 288K 时,各种波长下的 K 值^[1]

$\lambda(\mu\text{m})$	$K(\text{cm}^3/\text{g})$
0.9125	0.2239
0.7034	0.2250
0.6440	0.2255
0.6074	0.2259
0.5677	0.2264
0.5097	0.2274
0.4801	0.2281
0.4472	0.2290
0.4079	0.2304
0.3803	0.2316
0.3562	0.2330