

高等院校光信息科学与技术专业系列教材

# 光学测量技术与应用

## Optical Measurement Techniques and Applications

冯其波 主编

Feng Qibo

谢芳 张斌 高瞻 邵双运 编著

Xie Fang Zhang Bin Gao Zhan Shao Shuangyun

清华大学出版社

7091

TB96/3

2008

高等院校光信息科学与技术专业系列教材

# 光学测量技术与应用

## Optical Measurement Techniques and Applications

冯其波 主编

Feng Qibo

谢芳 张斌 高瞻 邵双运 编著

Xie Fang Zhang Bin Gao Zhan Shao Shuangyun

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以光学测量方法与技术为中心,全面地介绍了光学测量所涉及的基本原理、测量原理、方法以及技术特点,既注重基本概念和基本原理的讲述,又注重将理论与应用紧密结合,并突出近年来光学测量技术上的最新科研成果以及相关领域发展态势。全书共分7章,第1章介绍了光学测量涉及的基本知识,第2章~第4章分别介绍了干涉测量技术、激光全息测量与散斑测量技术以及激光衍射测量和莫尔条纹技术;第5章讲述了宏观三维形状测量技术和微观三维形貌测量技术;第6章介绍了激光多普勒测速与激光测距技术;第7章介绍了光纤传感技术。本书可作为高等院校光信息科学与技术、光学工程、仪器仪表、机械电子工程、自动化等专业本科学生的教学用书,也可供从事相关专业的科研技术人员学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

光学测量技术与应用/冯其波主编;谢芳等编著. —北京:清华大学出版社,2008.5  
(高等院校光信息科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-17136-2

I. 光… II. ①冯… ②谢… III. 光学测量—高等学校—教材 IV. TB96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 032867 号

责任编辑:陈国新

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:14.25 字 数:344 千字

版 次:2008 年 5 月第 1 版 印 次:2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023065-01

# 前言

# PREFACE

光学测量技术给精密测试领域注入了新的活力,它将光学技术与现代电子技术相结合,具有非接触、自动化程度高、测量精度高、速度快、信息容量大、效率高等突出特点,已广泛应用于工业、农业、军事、医学或空间科学等领域,并展现出了独特的优势。

本书以光学测量方法与技术为中心,全面地介绍了光学测量所涉及的基本理论、测量原理、方法以及技术特点等,内容丰富。既注重基本概念和基本原理的讲述,又注重将理论与应用紧密结合,并突出近年来光学测量技术上的最新科研成果以及相关领域发展态势,具有较高的使用及参考价值。

全书共分7章,第1章从光学测量涉及的基本概念入手,讲述光学测量的发展现状与趋势、光学测量方法的分类以及测量系统的基本构成;第2章至第4章分别介绍了光干涉测量技术、激光全息测量与散斑测量技术以及激光衍射测量和莫尔条纹技术;第5章讲述了宏观三维形状测量技术和微观三维形貌测量技术;第6章介绍了激光多普勒测速与测距技术;第7章介绍了光纤传感技术。本书可作为高等院校光信息科学与技术、光学工程、仪器仪表、机械电子工程、自动化等专业本科学生的教学用书,也可供从事相关专业的科研技术人员学习阅读。

本书由北京交通大学冯其波教授主编,由吴重庆教授担任主审。第1、2章由冯其波编写;第3、4章由张斌编写;第5章宏观三维形状测量技术部分由邵双运编写,微观三维形貌测量技术部分由谢芳编写;第6章激光多普勒测速技术由高瞻编写,激光测距技术部分由邵双运编写;第7章由谢芳编写。翟玉生博士为本书的编写付出了辛勤的劳动,在此表示感谢。同时感谢清华大学出版社的热情帮助及辛勤的编辑出版工作。本书在编写过程中,参阅了大量的国内外文献,这些文献的研究成果,使本书内容更加丰富,在此向有关作者表示感谢。

限于水平,书中一定存在许多不足之处,敬请广大读者批评指正,以便再版时改进。

编者

2007年7月

qbfg@bjtu.edu.cn

# 目录

# CONTENTS

<b>第 1 章 光学测量的基础知识</b> .....	1
1.1 基本概念、基本方法、应用领域及发展趋势 .....	1
1.1.1 基本概念 .....	1
1.1.2 基本构成 .....	2
1.1.3 主要应用范围 .....	3
1.1.4 基本方法 .....	4
1.1.5 发展趋势 .....	5
1.2 光学测量中的常用光源 .....	7
1.2.1 光源选择的基本要求和光源的分类 .....	7
1.2.2 热光源 .....	8
1.2.3 气体放电光源 .....	9
1.2.4 固体发光光源 .....	9
1.2.5 激光光源 .....	10
1.3 光学测量中的常用光电探测器 .....	13
1.3.1 常用光电探测器的分类 .....	13
1.3.2 光电探测器的主要特性参数 .....	15
1.3.3 常用光电探测器的介绍 .....	17
1.4 光学测量系统中的噪声和常见处理电路 .....	26
1.4.1 光学测量系统中的噪声 .....	26
1.4.2 光学测量系统中的常用电路 .....	27
1.5 光学测量中常用调制方法与技术 .....	32
1.5.1 概述 .....	32
1.5.2 机械调制法 .....	33
1.5.3 利用物理光学原理实现的光调制技术 .....	33
本章参考文献 .....	38
<b>第 2 章 光干涉技术</b> .....	39
2.1 光干涉的基础知识 .....	39

2.1.1	光的干涉条件	39
2.1.2	干涉条纹的形状	40
2.1.3	干涉条纹的对比度	40
2.1.4	产生干涉的途径	43
2.2	干涉光学测量技术	44
2.2.1	概述	44
2.2.2	泰曼-格林干涉仪	47
2.2.3	移相干涉仪	47
2.2.4	共路干涉仪	49
2.3	激光干涉仪	57
2.3.1	迈克尔逊干涉仪	57
2.3.2	实用激光干涉仪主要构件的作用原理	58
2.4	白光干涉仪	75
2.5	外差式激光干涉仪	77
2.5.1	概述	77
2.5.2	双频激光干涉仪	78
2.5.3	激光测振仪	79
2.6	绝对长度干涉计量	81
2.6.1	柯氏绝对光波干涉仪	81
2.6.2	激光无导轨测量	83
2.6.3	激光跟踪测量	85
2.7	激光多自由度同时测量技术	86
2.7.1	概述	86
2.7.2	直线度测量	87
2.7.3	偏摆角和俯仰角度的测量	91
2.7.4	滚转角测量	93
2.7.5	多自由度同时测量	95
	本章参考文献	96

### 第3章 激光全息测量与散斑测量技术

3.1	全息术及其基本原理	97
3.1.1	全息术基本原理	97
3.1.2	全息图的类型	99
3.1.3	全息基本设备	101
3.2	激光全息干涉测量技术	102
3.2.1	全息干涉测量方法	102

3.2.2 激光全息干涉测量技术的应用·····	107
3.3 激光散斑干涉测量·····	111
3.3.1 散斑的概念·····	111
3.3.2 散斑照相测量原理及应用·····	111
3.3.3 散斑干涉测量原理及应用·····	113
3.3.4 电子散斑干涉测量(ESPI)·····	117
本章参考文献·····	118
<b>第4章 激光衍射测量和莫尔条纹技术</b> ·····	<b>119</b>
4.1 激光衍射测量基本原理·····	119
4.1.1 单缝衍射测量·····	120
4.1.2 圆孔衍射测量·····	124
4.1.3 光栅衍射测量·····	125
4.2 莫尔条纹测试技术·····	126
4.2.1 莫尔条纹的形成原理·····	126
4.2.2 莫尔条纹的基本性质·····	130
4.2.3 莫尔条纹测试技术·····	131
本章参考文献·····	139
<b>第5章 光学三维测量技术</b> ·····	<b>140</b>
5.1 物体宏观三维形状测量技术概述·····	140
5.1.1 接触式测量·····	140
5.1.2 非接触式测量法·····	141
5.1.3 主动宏观三维形状测量技术·····	143
5.2 激光三角法测量物体三维形状·····	145
5.2.1 激光三角法的测量原理·····	145
5.2.2 激光线光三维形状测量技术·····	146
5.2.3 激光同步扫描三维形状测量技术·····	148
5.3 基于光栅投射的三维形状测量技术·····	149
5.3.1 光栅投射法测量三维形状的基本原理·····	149
5.3.2 相位测量技术·····	151
5.4 光学三维形状测量技术的应用·····	154
5.5 微观表面三维形貌测量技术概述·····	157
5.5.1 微观表面形貌测量技术的发展·····	157
5.5.2 表面形貌二维评定参数·····	158

5.5.3	微观表面三维形貌测量的特点	160
5.6	微观表面三维形貌的机械式探针测量技术	162
5.7	微观表面三维形貌的光学式探针测量技术	164
5.7.1	焦点探测方法	165
5.7.2	干涉测量技术	170
5.7.3	微观表面三维形貌测量仪器的测量分辨率和量程	172
	本章参考文献	174
<b>第6章 激光测速与测距技术</b>		175
6.1	多普勒效应与多普勒频移	175
6.2	激光多普勒测速技术	179
6.2.1	激光多普勒测速的基本原理	179
6.2.2	激光多普勒测速技术	180
6.2.3	激光多普勒测速技术的进展	189
6.3	激光测距技术	190
6.3.1	脉冲激光测距	191
6.3.2	相位激光测距	192
	本章参考文献	196
<b>第7章 光纤传感技术</b>		197
7.1	光传输的基本理论	197
7.1.1	反射和折射	197
7.1.2	全反射	199
7.1.3	光的干涉	201
7.1.4	光波导	201
7.2	光纤传感技术	206
7.2.1	强度调制型光纤传感技术	206
7.2.2	相位调制型光纤传感技术	207
7.2.3	偏振调制型光纤传感技术	211
7.2.4	波长调制型光纤传感技术	212
7.2.5	光纤分布式传感技术	215
	本章参考文献	216



本章从光学测量涉及的基本概念入手,讲述光学测量方法的分类、光学测量系统的基本构成以及光学测量的发展现状与趋势,最终讲述构成一个完整光学测量系统的主要组成部分,包括常用光源、探测器与处理电路、调制方法等。各种具体的光学测量方法与技术将在以后的各个章节中进行介绍。

## 1.1 基本概念、基本方法、应用领域及发展趋势

### 1.1.1 基本概念

**计量学(metrology)**。是指研究测量、保证测量统一和准确的科学;计量泛指对物理量的标定、传递与控制。计量学研究的主要内容包括:计量单位及其基准,标准的建立、保存与使用,测量方法和计量器具,测量不确定度,观察者进行测量的能力以及计量法制与管理等。计量学也包括研究物理常数和物质标准,材料特性的准确测定。

**测量(measurement)**。是指将被测值和一个作为测量单位的标准量进行比较,求其比值的过。测量过程可以用一个基本公式

$$L = Ku \quad (1-1)$$

表示。式中, $L$ 为被测长度; $u$ 为长度单位; $K$ 为比值。

从计量学的定义和内容可以看出,计量的主要表现方式是测量。测量的目的是要得到一个具体的测量数值,这个测量数值还应包含测量的不确定度。一个完整的测量过程包括四个测量要素:测量对象和被测量,测量单位和标准量,测量方法,测量的不确定度。

**检验(inspection)**。是指判断测量是否合格的过程,通常不一定要要求具体数值。

**测试(measuring and testing)**。是指具有试验研究性质的测量,一般是测量、试验与检验的总称。测试是人们认识客观事物的方法。测试过程是从客观事物中摄取有关信息的认识过程。在测试过程中,需要借助专门的设备,通过合适的实验和必要的数据处理,求得所研究对象的有关信息量值。

**灵敏度(sensitivity)**。是指测量系统输出变化量 $\Delta y$ 与引起该变化量的输入变化量 $\Delta x$ 之比,其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

测量系统输出曲线的斜率就是其灵敏度。对于线性系统,其灵敏度是一个常数。

**分辨率(resolution power)**。是指测量系统能检测到的最小输入增量。

**误差(error)**。是指测得值与被测量的真值之间的差。误差可以分为系统误差、随机误差与粗大误差。

**精度(accuracy)**。是指反映测量结果与真值接近程度的量。在现代计量测试中,精度的概念逐步被测量的不确定度代替。

**测量不确定度(uncertainty of measurement)**。是表征合理赋予被测量的量值的分散性参数。主要包括:不确定度的 A 类评定——用对重复观察值的统计分析进行不确定度评定的方法;不确定度的 B 类评定——用不同于统计分析的其他方法进行不确定度评定的方法。

### 1.1.2 基本构成

所谓光学测量是指通过各种光学测量原理实现对被测物体的测量。近年来,随着科学技术的发展,出现了各种类型的激光器和各种新型的光电探测器,数据处理及图像处理方法与技术也得到了快速发展,使得光学测量的内容愈加丰富,应用领域越来越广,已渗透到几乎所有工业领域和科研部门。

实际上,任何一个测量系统,其基本组成部分可用如图 1-1 所示的原理方框图来表示。

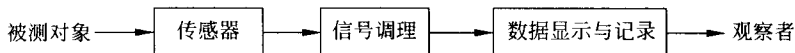


图 1-1 测量系统原理框图

传感器用于从被测对象获取有用的信息,并将其转换为适合于测量的信号。不同的被测物理量要采用不同的传感器,这些传感器的作用原理所依据的物理效应或其他效应是千差万别的。对于一个测量任务来说,第一步是能够有效地从被测对象取得能用于测量的信息,因此传感器在整个测量系统中的作用十分重要。

信号调理部分是对从传感器所输出的信号作进一步的加工和处理,包括对信号的转换、放大、滤波、储存和一些专门的信号处理。这是因为从传感器出来的信号往往除有用信号外还夹杂有各种干扰和噪声,因此在作进一步处理之前必须尽可能将干扰和噪声滤除掉。此外,传感器的输出信号往往具有光、机、电等多种形式,而对信号的后续处理通常采取电的方式和手段,因此必须把传感器的输出信号转换为适宜于电路处理的电信号。通过信号的调理,最终获得便于传输、显示、记录及可进一步后续处理的信号。

显示与记录部分是将调理和处理过的信号用便于人们观察和分析的介质与手段进行显示或记录。

图 1-1 所示的三个方框构成了测量系统的核心部分。但被测对象和观察者也是测量系统的组成部分,它们同传感器、信号调理部分以及数据显示与记录部分一起构成了一个完整的测量系统。这是因为在用传感器从被测对象获取信号时,被测对象通过不同的连接或耦合方式对传感器产生了影响和作用;同样,观察者通过自身的行为和方式直接或间接地影响着系统的特性。

一个光学测量系统的基本组成部分主要包括光源、被测对象与被测量、光信号的形成与获得、光信号的转换、信号或信息处理等部分。按照不同的需要,实际的光学测量系统可能简单些,也可能还要增加某些环节,或者由若干个不同的光学测量系统集成。下面对每一部分分别加以说明。

**光源。**光源是光学测量系统中必不可少的一部分。在许多光学测量系统中需要选择一定辐射功率、一定光谱范围和一定发光空间分布的光源,以此发出的光束作为携带被测信息的载体。

**被测对象与被测量。**被测对象主要是指具体要测量的物体或物质,被测量就是具体要测量的参数,被测量可以分为几何量、力学量、光学量、时间频率、电磁量、电学量,等等。

**光信号的形成与获得。**实际上就是光学传感部分,主要是利用各种光学效应,如干涉、衍射、偏振、反射、吸收、折射等,使光束携带上被测对象的特征信息,形成可以测量的光信号。能否使光束准确地携带上所要测量的信息,是决定光学测量系统成败的关键。

**光信号的转换。**就是通过一定的途径获得原始的光信号。目前主要通过各种光电接收器件将光信号转换为电信号,以利于采用目前最为成熟的电子技术进行信号的放大、处理和控制在等。也可采用信息光学或其他手段来获得光信号,并用光学或光子学方法对其进行直接处理。需要指出的是,最终观察者得到的是电信号、图像信息或数字信息。

**信号与信息处理。**根据获得的信号的类型不同,信号或信息处理主要包括模拟信号处理、数字信号处理、图像处理以及光信息处理。在当代光学测量系统中,大部分系统采用计算机来处理、分析和显示各种信息,也可以通过计算机形成闭环测量系统,对某些影响测量结果的参数进行控制。

在光学测量系统中,特别需要注意的是光信号的匹配处理。通常表征被测量的光信号可以是光强的变化、光谱的变化、偏振性的变化、各种干涉和衍射条纹的变化等。要使光源发出的光或产生携带各种待测信号的光与光电探测器等环节间实现合理的,甚至是最良好的匹配,经常需要对光信号进行必要的处理。例如,利用光电探测器进行光强信号测量时,当光信号过强时,需要进行中性减光处理;当入射信号光束不均匀时,则需要进行均匀化处理等。

### 1.1.3 主要应用范围

光学测量技术已应用到各个科技领域中,主要包括以下几个方面。

#### 1. 辐射度量和光度量的测量

光度量是以平均人眼视觉为基础的量,利用人眼的观测,通过对比的方法可以确定光度量的大小。至于辐射度量的测量,特别是对不可见光辐射的测量,是人眼所无能为力的。在光电方法没有发展起来之前,常利用照相底片感光法,根据感光底片的黑度来估计辐射量的大小。目前常用的这类仪器有光强度计、光亮度计、辐射计以及光测高温计和辐射测温仪等。

#### 2. 非光物理量的测量

非光物理量的测量是光学测量技术当前应用最广、发展最快且最为活跃的应用领域,也是本书要讲述的主要内容。

这类测量技术的核心是如何把非光物理量转换为光信号。主要方式有两种：一是通过一定手段将非光物理量转换为发光量,通过对发光量的测量,完成对非光物理量的检测;二是使光束通过被测对象,让其携带待测物理量的信息,通过对带有待测信息的光信号进行测量,完成对非光物理量的检测。

这类光学测量所能完成的检测对象十分广泛。如各种机械量的测量,包括重量、应力、压强、位移、速度、加速度、转速、振动、流量,以及材料的硬度和强度等参量;各种电量、磁量的测量;温度、湿度、材料浓度及成分等参量的测量。

### 3. 光电子器件与材料及光电子系统特性的测试

光电子器件与材料和光电子系统不仅包括各种类型的光电探测器、各种光谱区中的光电成像器件、各种光电子材料和各种光电成像系统,同时还包括近年来大量出现在光电子行业的各种器件和系统,如,发光器件、光检测器、复合光器件、光传输引接器、显示器件、太阳能电池、光纤、光连接器、光无源器件等光学元器件;光传输仪器、设备、光测量仪器、布线用设备、光传感器设备、光输入输出设备、医疗用激光设备、激光加工与印刷制版设备等光学仪器与设备。

对以上这些光电子器件与材料及光电子系统参数或性能的测试,往往需要使用光学测量方法,目前这一领域由于光电子业的发展变得越来越重要。

## 1.1.4 基本方法

### 1. 基本方法

由于激光技术、光波导技术、数字技术、计算机技术以及信息光学的出现,促使光学测量出现了许多新方法与新技术,其主要测量方法和涉及的主要内容如表 1-1 所示。

表 1-1 光学测量技术研究领域

方法分类	测量技术	主要内容
相位检测 (干涉法)	激光干涉技术	激光干涉,激光外差干涉,条纹扫描干涉,实时剪切干涉
	光全息技术	全息干涉,全息等高线技术,多频全息技术,计算机全息,实时全息技术
	光散斑技术	客观散斑法,散斑干涉法,散斑剪切法,白光散斑法,电子散斑法
	莫尔技术	莫尔条纹法,莫尔等高线法,拓扑技术
时间探测	光扫描技术	激光扫描,外差扫描,扫描定位,扫描频谱法,无定向扫描,三维扫描
谱探测	激光光谱技术	激光拉曼光谱,激光荧光光谱,激光原子吸收光谱,微区光谱,光声光谱
衍射法	光衍射技术	间隙法,反射衍射法,互补法,全场衍射测量
图像探测	CCD 成像技术	TV 法,CCD 法,PSD 法,数字图像法,光信息处理法
各种物理 效应	激光多普勒技术	多普勒测速,差动多普勒技术,激光多普勒技术
	光学诊断与无损检测	光伏效应,切剪术导法,光热偏转法,激光超声
	光学纳米技术	扫描激光显微术,光学隧道显微术,激光力显微术,原子力显微术

## 2. 方法的选择

面对一个计量测试任务,首先碰到的问题是如何合理地选择一种好的测量方法。选择光学测量方法主要依据以下五个方面来综合考虑:被测对象与被测量,测量范围,测量的灵敏度或精度,经济性,环境要求。

被测对象主要是指具体要测量的物体或物质,其大小、形状、材料差别很大;被测量是指被测参数的类型,例如是测量长度,还是测量角度,是测量速度还是测量位移,是测量温度还是测量湿度等。不同的被测对象和被测量,需要不同的测量方法。同样,同一被测量测定范围不同时,测量方法也需要变化。

选择测量方法的另一主要依据是灵敏度和精度的要求。图 1-2 是主要光学测量方法在尺寸上能达到的分辨率,而精度一般来说是测量分辨率的 1~3 倍。

测量方法的选择还要依据方法的经济性与使用时对环境的要求。表 1-2 大致列出主要光学测量方法的经济性和对环境的要求。

以上选择的依据是初步的,测量方法的最终确定应有具体设计方案,综合考虑以上各方面的因素。测量方法的确定往往是测量是否取得成功的关键。

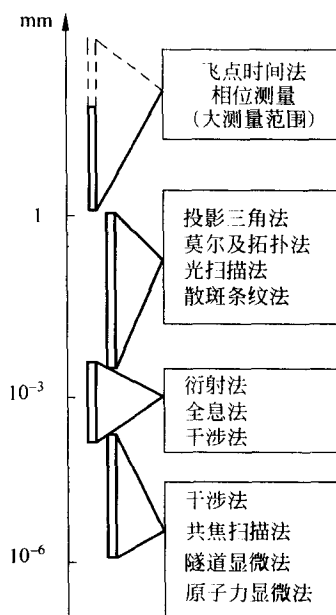


图 1-2 常用光学测试方法的分辨率

表 1-2 光学测量方法的相对经济性和环境要求

经济性好,环境要求低	经济性中等,环境要求一般	经济性偏高,有环境要求
衍射计量 扫描计量 散斑计量 光纤计量	莫尔与拓扑法 图像计测法 共路干涉计量	全息计量 光谱计量 纳米计量

### 1.1.5 发展趋势

#### 1. 技术特色

利用光学进行精密测量,一直是计量测试技术领域中的主要方法。由于光学测量方法具有非接触、高灵敏度和高精度等优点,在近代科学研究、工业生产、空间技术、国防技术等领域中得到广泛应用,成为一种无法取代的测量技术。概括起来,光学测量方法的主要特点如表 1-3 所示。

表 1-3 光学测量技术主要特点

主要特点	应用领域
非接触性	液面测量、柔性或弹性表面测量 高温表面测量 远距离监测 微深孔等特殊测量
高灵敏度	测量灵敏度: $0.1\text{nm} \sim 10\mu\text{m}$ 实时监测微变形、微振动、微位移
三维性	3D 测量
快速性与实时性	故障诊断, 在线检测质量监控, 生产自动化

随着微光学和集成光学的发展,光学测量系统向微型化、集成化方向发展,促使光学测量技术成为近代科学技术与工业生产的眼睛,是保证科学技术、工业生产发展的主要高新技术之一。

## 2. 技术现状

利用自然界存在的光线进行计量与测试最早开始于天文和地理测量中。望远镜和显微镜的出现,光学与精密机械的结合,使许多传统的光学计量与测试仪器广泛用于各级计量及工业测量部门。激光器的出现和信息光学的形成,特别是激光技术与微电子技术、计算机技术的结合,出现了光机电一体化光学测量技术。在光机电金字塔中,塔顶是光,光学是这个基本体系中的原理基础,而精密机械、电子技术与计算机技术构成塔底,是光学测量的支撑基础。相比传统的光学测量系统,近代光学测量系统的主要特点有:

- (1) 从主观光学发展成为客观光学,即用光电探测器取代人眼这个主观探测器,提高了测量精度与效率;
- (2) 用激光光源来取代常规光源,获得方向性极好的实际光线用于各种光学测量上;
- (3) 从光机结合的模式向光机电一体化的模式转换,实现测量与控制的一体化。

## 3. 技术发展方向

随着光电子产业的迅速发展,对光学测量技术提出了新的要求,促使光学测量技术向以下几个方向发展:

- (1) 亚微米级、纳米级的高精密光学测量方法首先得到优先发展,利用新的物理学原理和光电子学原理产生的光学测量方法将不断出现;
- (2) 以微细加工技术为基础的高精度、小尺寸、低成本的集成光学和其他微传感器将成为技术的主流方向,小型、微型非接触式光学传感器以及微光学这类微结构光学测量系统将崭露头角;
- (3) 快速、高效的 3D 测量技术将取得突破,发展带存储功能的全场动态测量仪器;
- (4) 发展闭环式光学测试技术,实现光学测量与控制的一体化;
- (5) 发展光学诊断和光学无损检测技术,以替代常规的无损检测方法手段。

## 1.2 光学测量中的常用光源

光源作为光学测量系统的一个重要组成部分,对光学测量起着重要作用。

### 1.2.1 光源选择的基本要求和光源的分类

为适应各种不同场合的实际需要,存在各种不同光学性质和结构特点的光源。在具体的光学测量系统中,应按实际工作的要求选择光源,这些要求主要包括以下几个方面。

#### 1. 对光源发光光谱特性的要求

光学测量系统中总是要求光源特性满足测量的需要。其中重要的要求之一,就是光源发光的光谱特性必须满足测量系统的需要。按照测量任务的不同,要求的光谱范围亦不同,如可见光区、紫外光区或红外光区等。系统对光谱范围的要求都应在选择光源时给予满足。

为增大测量系统的信噪比,引入光源和光电探测器之间光谱匹配系数的概念,以此描述两光谱特性间的重合程度或一致性。光谱匹配系数  $\alpha$  定义为

$$\alpha = \frac{A_1}{A_2} = \int_0^{\infty} W_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda / \int_0^{\infty} W_{\lambda} d\lambda \quad (1-3) \quad W_{\lambda}, S_{\lambda}$$

式中,  $W_{\lambda}$  为波长  $\lambda$  时光源光辐射通量的相对值;  
 $S_{\lambda}$  为波长  $\lambda$  时光电探测器灵敏度的相对值。

$A_1$  和  $A_2$  的物理意义如图 1-3 所示,它们分别表示  $W_{\lambda} S_{\lambda}$  和  $W_{\lambda}$  两曲线与横轴所围成的面积。由此可见,  $\alpha$  是光源与探测器配合工作时产生的光电信号与光源总通量的比值。实际选择时,应综合考虑二者的特性,使  $\alpha$  尽可能大些。

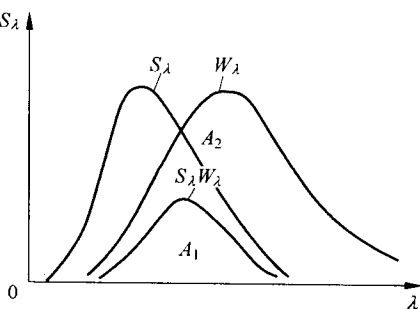


图 1-3 光谱匹配关系图

#### 2. 对光源发光强度的要求

为确保光学测量系统正常工作,通常对所采用的光源的强度有一定的要求。光源强度过低,系统获得信号过小,以致无法正常检测;光源强度过高,又会导致系统工作的非线性,有时可能损坏系统、待测物或光电探测器等。因此在设计时,必须对探测器所需获得的最大、最小光通量进行正确的估计,并按估计来选择光源。

#### 3. 对光源稳定性的要求

不同的测量系统对光源的稳定性有着不同的要求。通常对于以光强幅度变化来得到被测量的系统,对光源的稳定性要求很高;而对以光的相位、频率等参数来得到被测量的系统,对光源的稳定性要求可稍低些。稳定光源发光的方法很多,可采用稳压电源供电,也可采用稳流电源供电或采用反馈控制光源的输出。

#### 4. 对光源其他方面的要求

用于光学测量系统中的光源除上述基本要求外,还有一些具体要求。如使用激光波长作为测量时,主要要求激光器具有高的波长稳定性和复现性。

#### 5. 光源的种类

广义来说,任何发出光辐射的物体都可以叫做光辐射源。这里所指的光辐射包括紫外光、可见光和红外光的辐射。通常把能发出可见光的物体叫做光源,而能把发出非可见光的物体叫做辐射源。下面的介绍中统称为光源。

按照光辐射来源的不同,通常将光源分成两大类:自然光源和人工光源。自然光源主要包括太阳、月亮、恒星等,这些光源对地面辐射通常不稳定且无法控制,很少在光学测量系统中采用,通常作为杂散光需要予以消除或抑制它对测量的影响。在光学测量系统中,大量采用的是人工光源。按其工作原理不同,人工光源大致可以分为热光源、气体放电光源、固体光源和激光光源。

### 1.2.2 热光源

利用物体升温产生光辐射的原理制成的光源叫做热光源。常用热光源中主要是黑体源和以炽热钨发光为基础的各种白炽灯。

热光源发光或辐射的材料或是黑体,或是灰体,因此它们的发光特性可以利用普朗克公式进行精确的估算。也就是说,可以精确掌握和控制它们发光或辐射的性质。此外,它们发出的通量构成连续的光谱,且光谱范围很宽,因此适应性强。但是它们在通常温度或炽热温度下,发光光谱主要在红外区域中,少量在可见光区域中。只有在温度很高时,才会发出少量的紫外辐射。这类光源大多属于电热型,通过控制输入电量,可以按需要在一定范围内改变它们的发光特性。同时采用适当的稳压或稳流供电,可使这类光源的光输出获得很高的稳定度。

#### 1. 黑体

在任意温度条件下,能全部吸收入射在其表面上的任意波长辐射的物体叫做绝对黑体,或简称黑体。自然界不存在具有绝对黑体性质的物质,但是采用人工的方法可以制成十分接近黑体的模型。

黑体辐射的最基本公式是普朗克公式,它给出了绝对黑体在绝对温度为  $T$  时的光谱辐射出射度

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (\text{W/m}^3) \quad (1-4)$$

式中,  $M_{\lambda}$  为波长  $\lambda$  处的单色辐射出射度;  $\lambda$  为波长(m);  $h$  为普朗克常数,其值为  $6.626 \times 10^{-34}$  Js;  $c$  为真空中光速,其值为  $2.998 \times 10^8$  m/s;  $k$  为玻耳兹曼常数,其值为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为绝对温度(K)。

利用上述普朗克公式可以导出绝对黑体的全辐射出射度公式,即斯忒藩-玻耳兹曼公式



$$M = \sigma T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-5)$$

式中  $\sigma$  称为斯忒藩-玻耳兹曼常数, 其值为  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 。

黑体主要用作光度或辐射度测量中的标准光源或标准辐射源, 完成计量工作中的光度或辐射度标准的传递。

## 2. 白炽灯

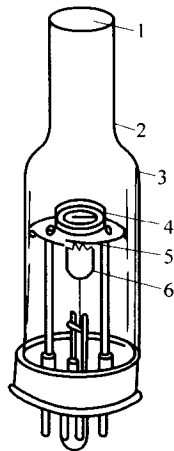
白炽灯在照明中仍是应用最广的光源, 主要有真空白炽灯、充气白炽灯和卤钨白炽灯等三类。目前使用最多的白炽灯是真空型白炽灯。泡壳内的真空条件是为了保护钨丝, 使其不被氧化。一般情况下, 当灯源电压增加时, 其电流、功率、光通量和发光效率等都相应增加, 但其寿命也随之迅速下降。

### 1.2.3 气体放电光源

利用置于气体中的两个电极间放电发光, 可构成气体放电光源。常见的光源是气体灯, 将电极间的放电过程密封在泡壳中进行, 所以又叫做封闭式电弧放电光源。气体灯的特点是辐射稳定, 功率大, 且发光效率高, 因此在照明、光度和光谱学中都起着很重要的作用。

气体灯的种类繁多, 灯内可充不同的气体或金属蒸气, 如氩、氖、氦、氙、氙等气体和汞、钠、金属卤化物等, 从而形成不同放电介质的多种光源。如图 1-4 所示为常用的原子光谱灯的结构。阳极和圆筒形阴极封在玻壳内, 玻壳上部有一透明石英窗。工作时窗口透射出放电辉光, 其中主要是阴极金属的原子光谱。空心阴极放电的电流密度可比正常辉光高出 100 倍以上, 电流虽大但温度不高, 因此发光的谱线不仅强度大, 而且波长宽度很小。

原子光谱灯的主要作用是引出标准谱线的光束, 确定标准谱线的分光位置, 以及确定吸收光谱中的特征波长等。



1—石英玻璃窗; 2—过渡玻璃;  
3—阳极; 4—云母片; 5—阴极;  
6—灯脚

图 1-4 原子光谱灯结构原理

### 1.2.4 固体发光光源

电致发光是电能直接转换为光能的发光现象, 利用电致发光现象制成的电致发光屏和发光二极管, 将完全脱离真空, 成为全固体化的发光器件。

发光二极管也叫做注入型电致发光器件。它是由 p 型和 n 型半导体组合而成的二极管, 当在 pn 结上施加正向电压时产生发光。其发光机理是: 在 p 型半导体与 n 型半导体接触时, 由于载流子的扩散运动和由此产生内电场作用下的漂移运动达到平衡而形成 pn 结。若在 pn 结上施加正向电压, 则促进了扩散运动的进行, 即从 n 区流向 p 区的电子和从 p 区流向 n 区的空穴同时增多, 于是有大量的电子和空穴在 pn 结中相遇复合, 并以光和热的形式放出能量。