

光学计量手册

——原理与应用

[日]Toru Yoshizawa 编

苏俊宏 徐均琪 田爱玲 杨利红 尚小燕 译

Handbook of
OPTICAL METROLOGY
Principles and Applications

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group



国防工业出版社
National Defense Industry Press

光学计量手册

——原理与应用

Handbook of OPTICAL METROLOGY
——Principles and Applications

[日] Toru Yoshizawa 编

苏俊宏 徐均琪 田爱玲 杨利红 尚小燕 译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-097号

图书在版编目(CIP)数据

光学计量手册:原理与应用/(日)吉泽彻编;苏
俊宏等译. —北京:国防工业出版社,2015.1

书名原文:Handbook of optical metrology
principles and applications

ISBN 978-7-118-09595-1

I. ①光... II. ①吉... ②苏... III. ①光学计量-手
册 IV. ①TB96-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第249766号

Handbook of OPTICAL METROLOGY—Principles and Applications Edited by Toru Yoshizawa
© 2009 by Taylor & Francis Group, LLC

CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。

版权所有, 侵权必究。

本书中文简体翻译版授权由国防工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。

未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/16 印张 29 字数 952 千字

2015年1月第1版第1次印刷 印数 1—2500 册 定价 120.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

《光学计量手册——原理与应用》是 Toru Yoshizawa 等编写的在光学计量领域的一本实用价值很高的技术手册。

光学计量技术应用光学原理,采用非接触式及光电转换技术,借助于计算机处理数据,可实现对被测量的快速测量。基于无损伤测量、获取信息丰富、测量速度快的特点,在各个领域得到广泛的应用,出现了大量的科研学术论文和技术报告,引起人们的高度关注。本书是在总结光学计量领域近年来的发展趋势下,不局限于特殊的领域或范畴,以光学基本原理为基础,汇集了光学计量技术的基础、设计、加工及应用中所需的多种相关技术,介绍了多种现代光学测试新原理、新技术和新方法。这本手册无论对工业领域的研究者和工程师来说,还是对于学者和学生来说,都是非常有用的。译者很高兴有机会将此书翻译出来奉献给读者,以供大家学习和参考。

本书第 1、2 和 3 章由苏俊宏教授翻译,第 14 章和第 23 章由徐均琪教授翻译,序言和第 19 章由田爱玲教授翻译,第 5、10 和 15 章由杨利红副教授翻译,第 16、17 和 18 章由尚小燕讲师翻译,第 7、21 和 22 章由王红军副教授翻译,第 6、9 和 13 章由刘丙才讲师翻译,第 11、12 和 20 章由王春慧翻译,第 27、28 和 29 章由惠迎雪副教授翻译,第 24、25 和 26 章由梁海锋副教授翻译,第 4 章、第 30 章由朱学亮翻译,第 8 章由朱昌教授翻译。全书由苏俊宏教授、徐均琪教授和田爱玲教授审校,由苏俊宏教授统稿。

在本书的翻译过程中,得到了西安工业大学光电工程学院、科技处等部门领导的大力支持,西安工业大学光电学院研究生葛锦蔓、刘胜利、韩锦涛等在文档图表整理上付出了辛勤劳动,在此表示感谢。本书在翻译过程中还得到了国防工业出版社的大力支持,译者在此向他们表示衷心感谢。

由于译者水平有限,难免有错误与不当之处,敬请读者批评指正。

2014 年 10 月于西安工业大学未央湖校区

前言

计量领域中应用了许多光学原理,并且相关的技术和设备也已开发出。基于这些原理和技术应用,在学术界引起了人们广泛的关注和报道。另外,一些光学设备和系统也已经商业化。

光学计量的特点是什么?首先,在计量学应用中的“非接触方式”应该是一个重要的特点。这个特点避免了测量力对样品造成的变形或者损伤。同时,非接触方式测量也使得测试系统变得更加灵活。其次,突破“逐点测量”限制的“全场测试”也已经实现。从本质上来说,这个特点是类似照相记录等光学方法的本质属性,目前已被总结为“成像”。带有大量信息的全场测试数据能够在一瞬间被成像设备捕获,并在极短的时间内得到计算并且分析。

另外,光与电的结合是光学技术转换成实际应用的又一重要因素。使用各种各样的探测器和传感设备,“光”很容易被转换为“电量(电流,电压等)”,这就意味着由于设备和计算机技术的显著发展,使得所捕获的数据很容易实现计算分析。在光学计量中,还有更多神奇的特点会被发现。

由于光或者光学方法的优越性及具有吸引力的特点,出现了大量的科研论文和技术报告,以及更宽范围的应用。然而,将这些结果编辑在一本光学计量的书中,绝非一件容易的事。这本书的名字,“光学计量手册——原理与应用”,是在总结了光学计量的最近发展趋势下确定的。编者的基本概念是受到了以下警句的启发:“学是一个寻常家饭,当随事而警惕”——出自洪应明的《菜根谭》第1600页。当这本书的编辑工作启动的时候,一些人提出,可能有一些类似的书已经出版。然而,据我所知,还没有任何书籍和我们的书意向相同。的确,名为“光学计量”的书已经出版上市,但是它们大多关注于特殊的领域或者较局限的范畴内。鉴于此,光学方法的应用除了基本原理和技术,还有更广泛的应用。

本书适用于初学者,但是除了引言部分,每个章节也包括一些暗示性的描述。每一章的编者都尽自己最大的努力,以达到学者们预期的特定的标准。

通过这么多人的合作出版了本书,达到了我的目标,我终于松了一口气。我要深深地感谢所有的编者和所有支持这本书出版的人,特别是在波士顿餐厅跟我讨论的 Dr. Michael Shribak;付出巨大努力完成两个章节的 Dr. Natalia Dushkina;以及非常令人鼓舞的并且用他的英式幽默感染我的 Dr. Peter Hall。Dr. Toshiyuki Takatsuji,编辑秘书,也给予了有关尺度计量方面的章节很多有用的建议。Dr. Toshitaka Wakayama,研究助理,Ms. Megumi Asano,私人秘书,也对编辑工作给予了很大的帮助。

本书无论对于工业领域的研究者和工程师来说,还是对于学者和学生来说,都是非常有用的。

编者
2014年6月

目 录

第一部分 光学元器件基础

第1章 光源	1	2.4 光学设计	55
1.1 辐射计量学和光度学	1	2.5 光学设计工具	55
1.1.1 辐射计量学和光度学的区别	1	2.6 光学设计理论	55
1.1.2 人眼	1	2.7 初级像差	56
1.1.3 辐射度及光度的量和单位	2	2.8 薄透镜塞德尔像差公式	57
1.1.4 光度测量技术	11	2.9 透镜	58
1.1.5 色度学	13	2.10 光学材料	59
1.2 光发射	15	2.11 常用工装	60
1.2.1 黑体辐射	15	2.12 制造公差	60
1.2.2 冷光	16	2.13 非球面	61
1.3 传统光源	21	2.14 单波长测试系统	61
1.3.1 白炽灯和卤钨灯	21	2.15 棱镜	61
1.3.2 气体放电灯	22	2.16 图像取向	62
1.4 发光二极管	24	2.17 波罗棱镜	63
1.4.1 LED 基础	24	2.18 展开图	63
1.4.2 发光二极管材料体系	28	2.19 佩肯棱镜和阿贝棱镜	64
1.4.3 白光二极管	29	2.20 中继透镜	65
1.4.4 面发射发光二极管和边发射 发光二极管	30	2.21 远心系统	65
1.4.5 有机发光二极管	32	2.22 结论	66
1.4.6 LED 计量	33	参考文献	66
1.4.7 LED 的应用	34		
1.5 激光器	40	第3章 光电传感器	67
1.5.1 受激辐射和光放大	41	3.1 引言	67
1.5.2 激光产生的必要元素	42	3.2 光电传感器的工作原理	67
1.5.3 激光的工作特性	44	3.2.1 光子到电子的转换	67
1.5.4 激光特性	45	3.2.2 光谱响应	68
1.5.5 激光系统	48	3.3 单点式传感器	70
参考文献	49	3.3.1 亮光半导体传感器	70
参考网页	53	3.3.2 微光点式传感器	71
		3.3.3 读出电路	73
第2章 透镜,棱镜和平面镜	54	3.4 多像元传感器及位置敏感型传感器	75
2.1 引言	54	3.4.1 多像元传感器	75
2.2 波前和波前像差	54	3.4.2 位置敏感型传感器	75
2.3 初级像差和设计出发点	54	3.5 图像传感器和摄像机	77
		3.5.1 图像传感器	77

3.5.2 用于微光的图像传感器和摄像机	79	4.9 空间光调制器	90
3.5.3 高速摄像机	80	4.10 光纤	90
3.6 X射线或 γ 射线传感器	82	4.11 偏光器和光扫描器	91
3.6.1 探测机理	82	4.12 光集成电路和光电集成电路	91
3.6.2 实用传感器	83	4.13 衰减片	92
3.7 光电传感器选用指南	85	4.14 快门	92
参考文献	85	4.14.1 相机快门	92
第4章 光学元件和光机元件	87	4.14.2 快门阵列	92
4.1 引言	87	4.15 机械元件	92
4.2 红外光学元件	87	4.16 夹持器	93
4.3 紫外光学元件	88	4.17 光具座	93
4.4 X射线光学元件	88	4.18 光学平台	94
4.5 滤光片	89	4.19 隔振系统	94
4.5.1 照相滤光片	89	4.20 微移动元件	95
4.5.2 空间滤光片,空间频率滤光片	89	4.21 定位元件	95
4.6 针孔	90	4.22 校准标样	96
4.7 光控制器件	90	4.23 光学样板	96
4.8 光调制器	90	4.24 光学平晶	97

第二部分 计量的基本原理和技术

第5章 光的传播	98	6.6 斐索干涉仪	124
5.1 光的特性	98	6.7 泰曼格林干涉仪	125
5.1.1 麦克斯韦方程组	98	6.7.1 马赫泽德干涉仪	125
5.1.2 谐波和波动方程	99	6.7.2 剪切干涉仪	126
5.1.3 光的本质	100	6.8 红外干涉仪	126
5.2 各向同性介质中光的传输	104	6.9 测量装置	128
5.2.1 电介质中光的传输	104	6.9.1 平面面形测量	128
5.2.2 反射和折射	104	6.9.2 材料测量	128
5.2.3 光波的全内反射	109	6.9.3 球面面形的测量	128
5.2.4 色散	112	6.9.4 透镜的测量	129
5.2.5 光在特异材料中的传输	114	6.9.5 拱形结构的测量	129
参考文献	116	6.9.6 望远镜的测量	129
第6章 干涉测量	119	6.10 条纹分析	130
6.1 引言	119	6.11 像差类型	131
6.2 干涉波	119	6.11.1 球差	131
6.3 早期的干涉实例	122	6.11.2 彗差	132
6.3.1 杨氏狭缝	122	6.11.3 像散	132
6.3.2 菲涅耳双棱镜	122	第7章 全息术	134
6.3.3 洛埃反射实验	122	7.1 引言	134
6.4 光源	123	7.2 记录和再现波前的基本装置	134
6.5 简单干涉仪	123	7.3 全息图的傅里叶分析	135

7.4 数字全息	137	10.2 外差法	174
7.4.1 历史回顾和技术发展	137	10.2.1 高精度测量法:原理和缺点	174
7.4.2 电光器件上全息记录的局限性	137	10.2.2 补偿光路的结构:双光束信号的介绍	175
7.4.3 全息图数字再现的数学工具	138	10.2.3 补偿光路结构:两光源的产生和选择	178
7.4.4 数字全息的一些装置	139	10.2.4 补偿光路结构:回路中的对称布局	179
7.5 数字全息应用	140	10.2.5 多普勒方法和外差法的关系	179
7.5.1 数字全息显微术	140	10.3 精度和噪声的减少	180
7.5.2 数字全息干涉	142	10.3.1 环境引起的精度降低	180
参考文献	144	10.3.2 光学元件引起的精度降低	180
第8章 散斑法及其应用	147	10.4 静态和动态测量注意点	183
8.1 散斑现象概述	147	10.4.1 静态测量	183
8.2 散斑照相法	147	10.4.2 动态测量	184
8.3 散斑干涉计量	148	10.5 应用	184
8.3.1 平面外位移测量	149	10.5.1 相移,振动频率和振幅	184
8.3.2 平面内位移测量	149	10.5.2 系统位置	184
8.4 散斑剪切干涉计量	150	10.5.3 厚度测量	185
8.4.1 倾斜测量	150	10.5.4 轮廓测定法	185
8.4.2 曲率测量	151	10.5.5 量测折射法	185
8.5 数字散斑和散斑剪切干涉计量	152	10.5.6 光热干涉法	185
8.5.1 条纹分析	152	10.5.7 热膨胀系数	186
8.5.2 数字散斑和散斑剪切干涉计量的光学系统	155	10.5.8 薄膜的杨氏模量	186
8.5.3 在微系统分析中的应用	157	10.5.9 双折射率和旋光计	187
8.6 结论	158	10.5.10 光纤传感器	187
参考文献	158	10.5.11 动态表面测量	187
第9章 莫尔测量	163	10.6 光学多普勒测量方法	187
9.1 引言	163	10.6.1 引言	187
9.2 面内莫尔条纹及其应变测量	163	10.6.2 原理和缺点	188
9.2.1 面内莫尔条纹形成	163	10.6.3 多普勒方法和外差法的比较	188
9.2.2 莫尔条纹在应变测量中的应用	164	参考文献	189
9.3 面外莫尔条纹及轮廓测量法	166	第11章 衍射	193
9.3.1 阴影莫尔条纹及莫尔轮廓	166	11.1 引言	193
9.3.2 阴影莫尔条纹的强度	167	11.2 衍射的基本原理	193
9.3.3 莫尔条纹在三维轮廓测量中的应用	168	11.3 衍射方法的应用	197
9.3.4 投影莫尔法	171	11.4 光栅衍射应用	198
9.4 反射莫尔法	171	11.5 结论	199
9.5 衍射光栅及干涉莫尔条纹的应用	172	参考文献	199
参考文献	173	第12章 光散射	200
第10章 光学外差测量方法	174	12.1 引言	200
10.1 引言	174		

12.2	光散射的基本原理	201	15.4	干涉仪精确测长的要求	231
12.3	光散射谱	202	15.4.1	光源	231
12.4	利用散射光谱法进行早期癌症诊断	203	15.4.2	平面波的产生和校正	232
12.5	基于光吸收和散射的共聚焦光谱显微术	206	15.4.3	空气反射率的计算	234
12.6	单个纳米粒子的散射光谱	208	15.4.4	温度测量的重要性	235
12.7	结论	209	15.5	棱镜的干涉测量	235
参考文献		209	15.5.1	物体的像素阵列图像	236
第13章 偏振		212	15.5.2	干涉图分析	236
13.1	引言	212	15.5.3	长度估算	238
13.2	简并偏振态	212	15.5.4	精密长度测量应用实例	238
13.3	椭圆偏振态	213	15.6	其他校正及其不确定度	242
13.4	椭圆偏振态的转换	215	15.6.1	光学误差校正	242
13.5	正交线偏振器和检偏器间的波片	216	15.6.2	表面粗糙度与反射相位变化	243
13.6	旋转起偏器和1/4波片产生全偏振态	217	15.6.3	物体和压板之间的胶合	243
13.7	旋转起偏器和可变波片产生全偏振态	218	15.6.4	平板挠曲	244
13.8	通过起偏器和两个可变波片产生全偏振态	218	15.7	结论	244
参考文献		219	第16章 位移测量		245
第14章 近场光学		220	16.1	引言	245
14.1	引言	220	16.2	激光干涉仪	245
14.2	倏逝场	220	16.2.1	单频激光干涉仪与外差激光干涉仪	245
14.3	测量仪器	221	16.2.2	干涉仪的光学系统	245
14.3.1	光学探针	221	16.2.3	影响测量结果及不确定度的因素	246
14.3.2	探针高度控制系统	222	16.2.4	其他类型的干涉仪	248
14.3.3	SNOM校准	223	16.3	线性编码器	248
14.4	应用	224	16.3.1	测量原理	249
14.4.1	基于FDTD方法的模拟	224	16.3.2	标尺标记探测方法	249
14.4.2	微聚焦斑轮廓测量	224	16.3.3	线性编码器的发展方向	251
14.4.3	超分辨率图像	225	16.3.4	线性编码器的校准	251
14.4.4	纳米光刻	225	16.4	距离测量	252
14.4.5	近场存储	226	16.4.1	简介	252
参考文献		227	16.4.2	脉冲测量法	252
第15章 长度与尺寸测量		228	16.4.3	调制测量法	253
15.1	引言	228	16.4.4	光频扫描法	254
15.2	干涉法长度测量的基本定律	228	16.4.5	距离测量的空气折射特性	254
15.3	测长干涉仪的基本类型	229	16.4.6	双色测量	254
15.3.1	泰曼—格林干涉仪	229	参考文献		255
15.3.2	斐索干涉仪	230	第17章 直线度测量及校准		257
15.3.3	条纹计数干涉仪	231	17.1	定义及参考规范	257
			17.2	直线度测量的主要方法	258

17.2.1 直线度基准比较	258	19.4.2 图形投影法	282
17.2.2 可逆技术	258	19.5 结论	292
17.2.3 斜率积分	258	参考文献	293
17.3 基于光束的直线度测量	258	第 20 章 三维形貌测量	295
17.3.1 光学对准系统	258	20.1 引言	295
17.3.2 激光束对准	259	20.2 光学三维测量技术	295
17.3.3 直线度干涉仪	259	20.2.1 飞行时间法	295
17.4 基于机械基准的直线度测量	260	20.2.2 激光扫描法	295
17.4.1 通过逆向法的误差分离	260	20.2.3 莫尔条纹法	296
17.4.2 实验结果	260	20.2.4 激光散斑切片法	296
17.5 基于测角仪的直线度测量	261	20.2.5 干涉法	296
17.5.1 电子水准仪	261	20.2.6 摄影测量法	296
17.5.2 自准直仪	262	20.2.7 激光跟踪法	297
17.5.3 角干涉仪	262	20.2.8 结构光法	297
17.6 机床的几何测量	262	20.3 物体三维形貌测量的一般方法	297
17.6.1 机床轴的直线度测量	263	20.4 全局坐标系和局部坐标系的转换	297
17.6.2 机床轴的旋转误差测量	263	20.5 结构光光源、图像传感器、摄像机模型和 标定	298
参考文献	263	20.6 绝对相位值测量和相位连续	299
第 18 章 平面度	264	20.7 图像拼接技术和 CAD 数据比较技术	299
18.1 引言	264	20.8 传感器的规划	300
18.2 平面度干涉测量	264	20.9 实例演示	300
18.2.1 斐索干涉仪	265	20.9.1 汽车形貌测量	301
18.2.2 斜入射式干涉仪	269	20.9.2 振动三维测量	301
18.3 采用角传感器的平面度测量	269	20.9.3 油漆缺陷检测	301
18.3.1 采用角传感器的接触型平面度测量 系统	269	20.10 结论和展望	303
18.3.2 采用角传感器的非接触型平面度测量 系统	270	20.10.1 实时计算	303
参考文献	271	20.10.2 直接测量镜面三维形貌	303
第 19 章 表面轮廓测量	272	20.10.3 阴影问题	303
19.1 引言	272	20.10.4 评估光学形貌测量系统的 标准方法	304
19.2 历史背景	273	20.10.5 大尺寸高精度的测量	304
19.3 点扫描技术	275	20.10.6 测量系统的标定和优化以及 传感器规划	304
19.3.1 光强检测方法	275	致谢	304
19.3.2 焦点误差检测方法	275	参考文献	304
19.3.3 共焦方法	278	第 21 章 条纹分析	312
19.3.4 对比度检测方法	279	21.1 引言	312
19.3.5 锥光偏振全息法	279	21.2 条纹分析基础	312
19.3.6 光谱共焦成像法	280	21.2.1 多幅图像法	313
19.4 全视场测量	281	21.2.2 单幅图像法	315
19.4.1 聚焦/散焦法	281		

21.3 相位解包裹	317	第 24 章 流体测量中的光学方法	346
21.4 轮廓测量中条纹分析实例	318	24.1 引言	346
21.5 结论	318	24.2 激光多普勒流速计(LDV)	346
参考文献	319	24.2.1 基本原理	346
第 22 章 摄影测量学	321	24.2.2 光学系统和信噪比	347
22.1 引言	321	24.2.3 LDV 系统	348
22.2 原理	321	24.3 粒子成像速率计	349
22.2.1 基本原理	321	24.3.1 PIV 测量的基本原理	349
22.2.2 摄像机标定	322	24.3.2 PIV 技术分类	350
22.2.3 摄影	323	24.3.3 PIV 系统	351
22.2.4 外部定位	323	24.3.4 典型应用:湍流边界测量	352
22.2.5 测量过程流程	323	24.4 立体 PIV	353
22.3 3D 测量和建模应用实例	324	24.4.1 原理	353
22.3.1 文化遗产、建筑和地形学中的 应用	324	24.4.2 典型应用:轴流风扇形成的流体	353
22.3.2 人体测量	328	24.5 全息 PIV	354
22.3.3 汽车测量	329	24.5.1 胶片全息 PIV	354
22.4 结论	331	24.5.2 数字全息 PTV	355
参考文献	332	24.6 显微 PIV	356
第 23 章 固体力学中的光学方法	334	参考文献	358
23.1 引言	334	第 25 章 偏振测量技术	359
23.2 固体力学基础	334	25.1 基本概念	359
23.3 数字图像相关及其应用	335	25.1.1 Stokes 参数、Stokes 向量和光偏振	359
23.3.1 二维数字图像相关原则	335	25.1.2 Muller 矩阵和光学器件	360
23.3.2 三维数字图像相关原则	336	25.1.3 延迟和衰减	360
23.3.3 残余应力测量应用	336	25.1.4 光弹调制器(PEM)	361
23.4 低双折射偏光器	337	25.2 Stokes 偏振测量仪	362
23.4.1 低双折射偏光器的原理	337	25.2.1 早期天文学中的基于 PEM 的 Stokes 偏振测量仪	362
23.4.2 四步相移法	338	25.2.2 用 PEM 实现成像 Stokes 偏振测量仪	362
23.4.3 基于液晶偏振旋转器的低双 折射偏光器	339	25.2.3 实验室双 PEM 的 Stokes 偏振测量仪	363
23.4.4 实验结果	340	25.2.4 托卡马克中应用的双 PEM Stokes 偏振测量仪	364
23.5 光学衍射应变传感器	340	25.2.5 商用双 PEM Stokes 偏振测量仪	365
23.5.1 光学衍射应变传感器的原理	340	25.3 Mueller 偏振测量仪	369
23.5.2 多点衍射应变传感器	341	25.3.1 双 PEM 的 Mueller 偏振测量仪	369
23.6 数字全息	342	25.3.2 四个调制器的 Mueller 偏振测量仪	370
23.6.1 介绍	342	25.4 特殊的偏振测量仪	371
23.6.2 反射数字全息	343	25.4.1 线性双折射偏振测量仪及其在光刻 中的应用	371
23.6.3 数字全息干涉测量	344		
23.7 结论	345		
参考文献	345		

25.4.2	Near - Normal 反射的双 PEM 偏振 测量仪及其在核聚变中的应用	380	28.2	基本理论	418
25.4.3	平板显示行业中应用的特殊 偏振测试仪	381	28.3	一些典型的滤光片及其设计原则	421
25.4.4	化学、生物化学和制药行业中应用的 特殊偏振测量仪	383	28.3.1	减反膜	421
参考文献		385	28.3.2	高反膜	421
第 26 章	双折射测量	387	28.3.3	长波通和短波通滤光膜	422
26.1	引言	387	28.3.4	带通滤光膜	422
26.2	迟滞性和双折射测量的应用	387	28.3.5	带阻滤光膜(梳状滤光膜)	423
26.3	关于偏振光	388	28.3.6	偏振膜	424
26.4	偏振态	389	28.4	光学监控	424
26.5	双折射	391	28.5	光学测量对薄膜的表征	426
26.6	偏振态的表示	392	参考文献		428
26.6.1	琼斯矢量	392	第 29 章	薄膜表面和厚度轮廓测量技术	429
26.6.2	斯托克斯参数	393	29.1	引言	429
26.6.3	庞加莱球	394	29.2	白光干涉仪测量不透明薄膜	429
26.7	琼斯法和穆勒法	394	29.2.1	白光干涉仪	429
26.8	双折射测量	395	29.2.2	KF 算法	430
26.8.1	线偏光器	395	29.2.3	采用 KF 算法的薄膜轮廓仪	431
26.8.2	圆偏光器	396	29.2.4	薄膜厚度测量范围	431
26.8.3	塞纳蒙法	397	29.2.5	测量实例	431
26.8.4	光弹调制器法	398	29.3	采用白光干涉仪测量透明薄膜	433
26.8.5	光学外差法	399	29.3.1	测量氧化物薄膜的台阶	433
26.8.6	采用相移法的二维双折射测量	401	29.3.2	测量 CMP 样品	434
参考文献		404	29.4	通过伪透射干涉仪测量薄膜厚度	435
第 27 章	椭圆偏振技术	405	29.4.1	TF 方法的原理	435
27.1	椭圆偏振技术的原理	405	29.4.2	实验	435
27.2	椭圆偏振测量技术	407	29.5	厚度和折射率的同时测量	435
27.3	光学模型	409	29.6	结论	436
27.4	介电函数	411	参考文献		436
27.5	数据分析实例	412	第 30 章	在机测量	438
参考文献		415	30.1	引言	438
第 28 章	光学薄膜和涂层	418	30.2	波带片干涉仪	438
28.1	引言	418	30.2.1	A 型波带片干涉仪	438
			30.2.2	B 型波带片干涉仪	440
			30.2.3	C 型波带片干涉仪	442
			30.3	横向剪切干涉仪	445
			参考文献		449

第一部分 光学元器件基础

第1章 光源

本章主要从与光学测量最相关的电磁辐射测量的基本概念和原理出发,对辐射计量学、光度学和光源进行了综述。解释了辐射计量学和光度学的区别,以及它们的量纲与单位,有关本课题的更多信息可以在相关专业文献中查找。本章也包括对传统光源的简述,特别关注了现代光源,如激光、发光二极管(LED)和超辐射发光二极管(SLD),这些已经广泛应用于现代光学计量中。虽然有关本主题有大量的文献报道,但读者也许更希望能够在一些介绍书籍中得到有关LED的细节评述。

1.1 辐射计量学和光度学

1.1.1 辐射计量学和光度学的区别

辐射计量学是一种对光频范围在 $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{16} \text{ Hz}$, 对应波长范围 $0.1 \sim 1000 \mu\text{m}$ 的电磁辐射测量的科学,这些电磁波的光学谱段包括紫外线(UV)、可见光以及红外线(IR)。辐射计量学研究的是电磁辐射的发射和检测,计量光电探测器所测得的绝对功率量。这里考虑的相关量包括能量和功率,这些量不依赖于波长。规定用这些量来表征辐射,它们的单位是焦耳的推导而来的。

光度学研究的是电磁波其谱段在人眼可视范围内的科学,因此电磁波被大概限定在频率为 $3.61 \times 10^{14} \sim 8.33 \times 10^{14} \text{ Hz}$ (波长在 $830 \sim 360 \text{ nm}$) 的范围内。这些可视谱段的范围是由国际照明委员会(CIE)所确定的。光的出射是由于原子和分子外侧的电子跃迁而发出的,这一点可以说明电磁波谱中仅有很窄范围频段所对应的为光波。光度学是一门对人眼所能接受到的光测量的科学;这样,它测量可见光的响应。因此,光度学考虑的是波长,而波长依赖于与辐射能及辐射量中引进的一些新单位联系的量。光度值被指定作为照度的单位,典型的光度计量单位有流明(lumen)、勒克斯(lux)和坎德拉(candela)。

当人眼被当做一种类似的探测器时,我们所研究的就是可见范围的光度学。物理光度学要么使用光辐射探测器来模拟人眼的光谱响应,要么对辐射量,如辐射功率进行测量。后者的重心在于对于每一个波长,都需要按照发光度函数来模拟人眼的亮度敏感性。光度学测量是天文学和照明工业中测量的基本方法,这里人眼的视觉特性决定着光源的数量和质量要求。比色法是关于颜色的测量科学,关于比色法的原理也在此给出介绍,例如参考文献[13,14]。

1.1.2 人眼

人眼对于光波波长的感知并非同样敏感。人眼对于黄绿色的光线最为敏感,这个波长段是太阳峰值能量发射波段,人眼的灵敏度曲线在比这个波段更高或更低的波段降低。眼睛对于光和颜色的响应也依赖光的环境并且决定于人眼的结构,具体的细节描述见《大英百科全书1994》。视网膜上有锥状细胞和杆状细胞作为光线感受器,锥状细胞负责人眼对于色彩的感知并且决定了视力可见的光线范围,这就是可见光视觉。锥状细胞位于视网膜的中央,有着很高的分辨率,它的中央凹部分具有最高的视锐度。有三种类型的锥状细胞,分别对于红色、绿色和蓝色光线敏感。另外,它们对于其他所有可视范围内的光线都很敏感并且在夜间视觉中扮演了非常重要的角色。它们决定着暗视觉,这是人眼在低亮度下的视觉。它们相对于中心凹锥体有着较低的分辨能力。杆状细胞位于中心凹区域之外,因此,它负责周边视觉。视杆细胞在高亮背景光下的

响应达到饱和,这样视觉完全是由锥状细胞所决定的。光度学是基于人眼所能接收到的光,因此光度学测量不会很精确地探查出暗背景下光源的感应。

人眼对不同波长的光线的灵敏度在图 1.1 中给出。人眼光适应的相关光谱范围被称作明视觉视效函数 $V(\lambda)$ 。人眼暗适应的相关光谱范围被称作暗视觉视效函数 $V'(\lambda)$,两者都是经验曲线。明视觉曲线 $V(\lambda)$ 首先是由 CIE 在 1924 年采用的。它在空气中在 550nm 达到唯一的峰值(在黄绿谱段),在接近 510nm 和 610nm 达到 50% 并且在大概 380nm 和 780nm 时减小到 10^{-5} 以下。暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 是由 CIE 在 1951 年采用的。暗适应光谱的峰值相对于光适应光谱移动到更小的波长。 $V'(\lambda)$ 曲线在 507nm 处到达峰值,在 455nm 和 550nm 处到达 50% ,并且在大约 380nm 和 645nm 处降低到 10^{-3} 以下。光适应锥体视觉作用在光亮度大于 3cd/m^2 时。暗适应棒体视觉作用在光亮度小于 0.01cd/m^2 。在这些值之间的视觉范围称为中间视觉,这是由于视锥细胞和视杆细胞数目的变化而引起的。

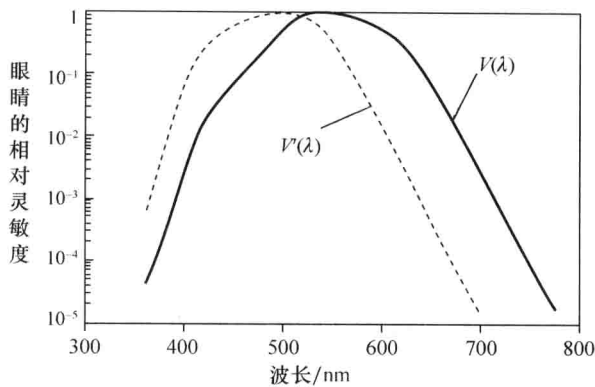


图 1.1 人眼对光谱的灵敏度
(实线表示的是明视觉曲线 $V(\lambda)$,1924CIE;虚线表示的是暗视觉曲线 $V'(\lambda)$,1951CIE)

由于大部分的人类活动是在高照度环境下进行的,因此有关明视觉的波长响应和色彩分辨率已经被人们进行了广泛研究。最近关于人眼对光线响应的测量与最初的 CIE 曲线相比已经有了很大改进,最初的 CIE 曲线低估了人眼对 460nm 以及更短的波长的响应。曲线 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 可以很容易地用非线性回归的方法拟合成一个高斯函数。最佳拟合后获得以下方程:

$$V(\lambda) \approx e^{-285.4(\lambda - 0.599)^2} \text{ (明视觉)}$$

$$V'(\lambda) \approx 0.992e^{-321.9(\lambda - 0.503)^2} \text{ (暗视觉)}$$

然而,暗视觉的拟合曲线不如明视觉的拟合曲线。高斯拟合函数仅适用于对光滑曲线进行近似的拟合但不适用于窄波段光源,如 LED 的拟合。

1.1.3 辐射度及光度的量和单位

辐射度量描述的是电磁波的辐射能量,光度量描述的是人眼对光线和色彩的响应。因此,光度量有着不同的名称和单位。某系统中的任一个量都在另外一个系统中有着类似的表述。光学文献中有许多辐射计量学和光度学的条件和单位,但是,我们在这里只讨论国际单位制。

这里给出一些最重要的光度量和单位以及与之相应的辐射度和单位,它们被概括如表 1.1 所示。文献中出现的辐射度量可能无下标或者用下标 e(电磁)表示。光度量一般标注下标 λ 或 v(可见的),表示的只在可见光谱范围内讨论。在本书中,我们用下标 λ 标注表示光度量的符号,不标注下标的表示辐射度量。随后,我们将详细定义更多表 1.1 中的概念和单位。

表 1.1 辐射度及光度的量和单位

	辐 射 量	单 位	光 度 量	单 位
能量	辐射能量 Q	J(焦耳)	光能 Q_λ	$\text{lm} \cdot \text{s}$ (或 talbot)
能量密度	辐射能量密度 $w = \frac{dQ}{dV}$	$\frac{1}{\text{m}^3}$	光密度 $w_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dV}$	$\frac{\text{lm} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$

(续)

	辐射量	单位	光度量	单位
功率	辐射通量或辐射功率 $\Phi = \frac{dQ}{dt}$	W 或 $\frac{1}{s}$	光通量 $\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt}$	lm = cd · sr
单位面积 内的功率	辐射度 $M = \frac{d\Phi}{da}$ (发射端) 或辐射功率 $E = \frac{d\Phi}{da}$ (接收端)	正向 $\frac{W}{m^2}$	光出射度 $M_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{da}$ (光发射) 或光照度 (光接收) $E_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{da}$	lux $\frac{lm}{m^2}$
单位立体角、 单位面积 的功率	辐射亮度 $L = \frac{d\Phi}{d\Omega da \cos\alpha} = \frac{dI}{da \cos\alpha}$	$\frac{W}{sr m^2}$	光亮度 $L_\lambda = \frac{dI_\lambda}{da \cos\alpha}$	$\frac{cd}{m^2} = \frac{lm}{m^2 sr}$ (或尼特)
强度	辐射强度 $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	$\frac{W}{sr}$	光照强度 $I_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega}$	坎德拉或 $\frac{lm}{sr}$

1.1.3.1 辐射度的量及单位

大部分理论模型建立在假定各个方向发光的点光源基础上的,我们必须先定义“立体角”的概念,它测量的是球面度,根据美国国家标准技术研究院 SP811 号,球面度(sr)被定义为:“单位球面度(sr)是指以球心为顶点,在球体表面截取一片区域面积等于 $1m^2$,再用长度等于球半径连接顶点和区域边界所包含的空间。”因此立体角是球面上的区域与球体半径的平方的比值。球面上的区域是指物体在单位球体上的投影面积,而立体角是指这部分表面区域的投影。如果将一个球体的表面按照半径的平方来划分,就会发现一个球体具有 4π 球面度,半个球体为 $2\pi sr$ 。立体角如图 1.2 所示,是由半径 $R=1$ 的球体中裁剪出的锥体所定义的。对于小的立体角,球形表面可以近似为平面,所以它的立体角就是

$$d\Omega(\alpha) = \pi \frac{(R \sin\alpha)^2}{R^2} = \pi \sin^2\alpha \quad (1.1)$$

辐射能量 Q 单位是焦耳(J)和辐射能量密度 $w(J/m^3)$,是无需更多说明的基本术语。辐射通量或辐射功率 Φ ,其单位为瓦特,它是辐射通量与时间的比值(J/s)。辐射能量可以被表面(就发射器来说)发射、散射或反射,或者入射进表面(就接收器来说)。因此对于发射器和接收器,不同的符号和名称会被用作相似的量。

辐射强度 I 的定义为,点光源在指定方向上的单位立体角 Ω 内发射的辐射通量:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.2)$$

它的单位是瓦特每球面度(W/sr)。例如,一个点光源发射的辐射通量是 Φ ,那么在各个方向上它的辐射强度就是 $\Phi/4\pi$ (W/sr)。

一般的,传播方向上的辐射能量一般可由玻印亭矢量给出。从表面区域面积为 da 的表面发出辐射通量密度(W/m^2),叫做辐射度 M :

$$M = \frac{d\Phi}{da} \quad (1.3a)$$

向给定的表面区域 da' 入射的电磁波辐射通量密度称为辐照度 E 。因此,辐照度的定义是电磁波入射垂直于玻印廷矢量的单位面积内的辐射通量密度。

$$E = \frac{d\Phi}{da'} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.3b)$$

对于一个已经给定了出射口径并且具有稳定的辐射通量的发射器,它的辐射照度是稳定的。例如,太阳的辐照度是 $E = 1.37 \times 10^3 W/m^2$ 。这个数值称作太阳常数。它描述了太阳在正入射情况下对大气上某一区域的电磁辐射。在太空中,太阳的辐射几乎是稳定不变的,虽然在地球上因为在一天中不同的时间或是一年

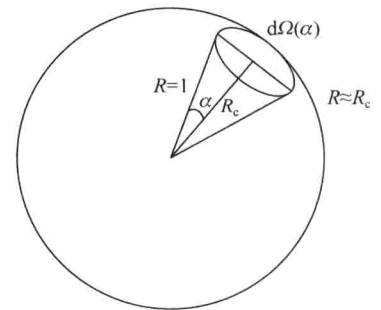


图 1.2 立体角的定义
(对于很小的立体角,
球面部分被近似为平面,并且 $R \approx R_c$)

中不同的时间以及天气和纬度的变化而发生变化。在地球上辐射度的最大值在 $0.8 \sim 1.0 \text{ kW/m}^2$ 之间。

辐射效率描述的是光源将消耗电功率(IV)转化为辐射通量 Φ 的能力:

$$\text{辐射效率} = \Phi / (IV) \quad (1.4)$$

这里的 I 和 V 分别指光源中通过的电流和不同的电势差,辐射效率无量纲,它的大概范围是 $0 \sim 1$ 。

图 1.3 描述的是一个平面圆形发射源,它的半径远小于它和接收器的距离 R 。如果发射源的面积是 da ,并且从发射源的各个地方发出锥形的光柱,锥形光柱的开口被接收器接收,接收器的面积为 da' (实线),锥形光柱的立体角 $d\Omega(\alpha)$ 以下式给出:

$$d\Omega(\alpha) = \frac{da'}{R^2} \quad (1.5)$$

式中, α 为锥形光柱的横截面顶角的 $1/2$; da' 为接收器的面积。

接收器上的每一个点都能对应接收到锥形的光柱,锥形光柱的开口被发射源的面积 da 确定(锥形光线用虚线在图 1.3 中表示)。锥形的立体角 $d\Omega(\alpha')$ 由下式给出:

$$d\Omega(\alpha') = \frac{da}{R^2} \quad (1.6)$$

式中, α' 为锥形光柱的横截面顶角的 $1/2$; da 为发射源的面积。

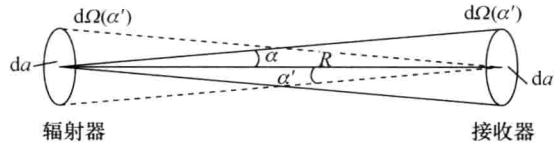


图 1.3 锥形光柱对应于接收器的立体角为 $d\Omega(\alpha) = da'/R^2$, 锥形光柱对应于发射源的立体角为 $d\Omega(\alpha') = da/R^2$

立体角 $d\Omega(\alpha)$ 和 $d\Omega(\alpha')$ 如图 1.3 所示,接收器和发射源都有锥形光柱相互对应。到达接收器的辐射通量与立体角和发射器的口径面积成正比,即

$$\Phi = L da d\Omega(\alpha) = L da \frac{da'}{R^2} [\text{W}] \quad (1.7)$$

式中, L 为发光度比例系数,它等于接收器在单位立体角和单位光源投影面积接收到的辐射通量:

$$L = \frac{\Phi}{da d\Omega(\alpha)} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{sr}} \right] \quad (1.8)$$

辐射亮度和辐照度经常被人们混淆,叫做强度。

如果发射源和接收器的大小相对于它们之间的距离来说很小,另外,如果它们的连线垂直,可以将式(1.1)和式(1.7)联立表示辐射通量:

$$\Phi = L(\pi \sin^2 \alpha) da \quad (1.9)$$

从发射端到接收端的辐射通量也可以表示为

$$\Phi = L da d\Omega(\alpha) = L da \frac{da'}{R^2} = L da' \frac{da}{R^2} = L da' d\Omega(\alpha') = \Phi' \quad (1.10)$$

式(1.10)左边表示辐射功率与发射器的面积 da 乘以立体角 $d\Omega(\alpha)$ 成正比,右边表示辐射功率与接收器的面积 da' 乘以立体角 $d\Omega(\alpha')$ 。两边在接收端和输入端之间没有能量损失的情况下是相等的。

辐射功率到达接收器的面积 da' 可以用式(1.3)和式(1.10)联立表示:

$$\Phi = E da' = L da' d\Omega(\alpha') \quad (1.11)$$

式(1.11)给出了辐射照度和辐射亮度的关系:

$$E = L d\Omega(\alpha') \quad (1.12)$$

发光度 $L (\text{W/m}^2 \cdot \text{sr})$ 乘以立体角得到辐照度 E 。如果我们将太阳看做一个很小而且是平面的发射源,太阳的发光度 L 用式(1.12)运算出来,并且已知从地球看太阳的俯仰角为 $\alpha = 0.25^\circ = 0.004 \text{ rad}$ 。对于小的角度, $\sin \cong \alpha$, 所以可以将其写成

$$\begin{aligned} d\Omega(\alpha) &= \pi \sin^2(0.25^\circ) = \pi(0.004 \text{ rad})^2 \\ &= 6 \times 10^{-5} \text{ sr} \end{aligned}$$

并且

$$L = \frac{E}{d\Omega} = \frac{1.35 \times 10^3 \text{ W/m}^2}{6 \times 10^{-5} \text{ sr}} = 2.25 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ sr}}$$

因此,太阳的发光度 L 是稳定的,且它的值是 $2.25 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ sr})$ 。

1.1.3.2 朗伯定律和朗伯源

当我们考虑一个发射源或一个接收器时,通常认为它们是迷向曲面和朗伯表面。这两个条件经常被混淆和乱用,因为两个条件都包括了能量在不用方向上相似的条件。

迷向曲面是指一个球体光源向各个方向发射的能量都相等,也就是说,它的强度 (W/sr) 在各个方向上相同。一个遥远的星星可以被当做是一个各向同性的点光源,虽然一个各向同性的点光源只是理想的而且这意味着它的能量密度必须是无穷大。小而均匀的球体,例如一个用乳白色的散射膜包裹着的球形钨灯,也是一个迷向曲面的很好的例子。

朗伯表面指的是一个辐射平面,可以是一个有效表面或者被动的反射面。根据朗伯定律,朗伯表面的强度随着观察角和表面法线夹角的余弦而降低,并且发光度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$) 不依赖于方向而变化。将一个表面涂上一层很好的白色漫反射涂料就是一个很好的例子。如果光源发光均匀,例如太阳,从各个角度观察它的亮度都是一样的。注意到辐射平面可以是辐射曲面的一部分。

朗伯定律定义了当发射源和接收器的表面相互倾斜时发射功率的分布,如图 1.4 所示。我们假设发射源和接收器的面积 da 和 da' 都很小。1769 年约翰·朗伯在实验中发现当发射源和接收器中的一个与另一个成 θ 角时,发射功率与 $\cos\theta$ 中的 θ 有关。这就是众所周知的朗伯余弦定律,朗伯定律的数学表达式是

$$\Phi(\theta) = L \frac{da'}{R^2} da \cos\theta = L \frac{da'}{R^2} da_{\perp} \quad (1.13)$$

式中, $da_{\perp} = da \cos\theta$ 为面积 da 在水平垂直于发射源和接收器的连线上的投影。根据朗伯定律,当从角度 θ 来看面积 da 时,它跟较小的面积 $da_{\perp}$ 具有相同的发光度 L 。

如果我们将太阳看做成球体,它是由多个在立体角 $d\Omega(\alpha) = da' R^2$ 上辐射功率为 $\Phi(\theta)$ 的小面积 da 组成的,我们可以用式 (1.13) 来表示太阳的发光度 $L = \Phi(\theta) / (d\Omega da)_{\perp}$ 。如果球面发射表面所有等面积的部分均满足朗伯定律,则每一个部分 $da_{\perp}$ 都会发射出相同的功率 $\Phi(\theta)$ 。这就是为什么我们看到太阳是一个发光均匀的圆盘。

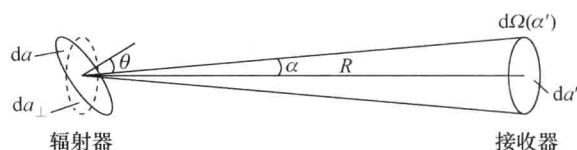


图 1.4 朗伯定律的图示,发射源与接收器成倾角

服从朗伯定律的光源被称为朗伯源。朗伯源最好的例子就是黑体发射源。相反,激光的定向波束就是一个非常弱的朗伯源。

到目前为止,我们都假设发射源和接收器的面积非常小。现在来讨论当发射源和接收器的面积都很大的情况。如果研究一个很小的发射源和一个面积很大的接收器,为了得到到达接收器的功率总量,必须对接收器的全部区域进行积分。于是有 $\Phi = L(\pi \sin^2 \alpha) da$,这与小发射源和接收器所得到的式 (1.9) 相同,两者都垂直于它们的连线。当我们研究大面积的发射源和小接收器时也得到相同的结果, $\Phi = L(\pi \sin^2 \alpha') da'$ 。这里的面积指的是接收器的面积,形成一个开口朝向发射源端的角, L 是发射源的发光度。因此,对于这两种情况,不必要考虑朗伯定律。更多具体的计算过程和例子可以在文献[22]中找到。

如果我们考虑一个朗伯球面被无穷远处的点光源照射,最大发光度可以在表面入射光束正入射的地方观察到。发光度将随着余弦角变化而降低为 0,这时的观察角接近 90° 。当从光源侧来看,如果辐射强度(整个范围的积分辐射率)为单位强度,那么在朗伯球面端的强度就是 $1/\pi$ 。实际上这就式 (1.3a) 所定义的辐射出射度。对于发光度,通过式 (1.12) 可知,朗伯面减少到 π 而不是 2π ,因为半球的球面度是 2π 。虽然发光度定义中出现的 $\cos\pi$ 比例结果是 π 。因为式 (1.13) 包括的 $\cos\alpha$ 的平均值是 $1/2$ 。

1.1.3.3 光度值和单位

光度学将测量功率为每一波长赋予了一个因子,而这一系数描述了人眼在该波长的敏感度。光通量 ϕ_{λ} (也叫做光功率或发光度),是人眼感觉到的光源的发光功率,光通量的国际标准单位是流明,它的定义是