

计量测试技术手册

第10卷 光学

《计量测试技术手册》编辑委员会



中国计量出版社

计量测试技术手册

第10卷 光 学

《计量测试技术手册》编辑委员会

中国计量出版社

序

当人类文明的曙光照耀着历史长河的源头时,伴随着生产和社会活动的需求,计量就萌发了。我国古时秦始皇施行了度量衡制度,被看作是一项重要政绩,标志着社会的进步。本世纪欧洲各国也制定了计量单位,如英国的英尺、磅等。直至1898年,国际米制公约公布,号召各国采用统一的米制公斤计量标准,可说是顺应社会发展,时代进步的必然产物。随着科学技术和贸易的发展,大概始于本世纪与上世纪之交,计量又从传统的度量衡扩展到众多的新兴领域。各种计量要求的精确程度及实施的复杂性与日俱增,计量已成为一门独立的学科。特别是在今天高新技术迅速发展的时代,计量更是无所不在和不可缺少的科学手段。今天计量测试技术广泛应用于工农业生产、国防建设、科学研究、国内外贸易、医疗卫生,以及人民生活的各个领域。在现代社会中,人们把人、管理、原材料、工艺装备、计量测试技术列为工业生产的五大支柱。计量测试技术也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础。

在原国家计量局和现国家技术监督局的支持下,由中国计量出版社组织编写的《计量测试技术手册》即将出版。这套手册由100多位长期从事计量测试工作的专家、教授,历经7年编纂而成。该套手册总结了我国40多年来计量科学研究和实践的经验,吸取了国外先进技术,内容丰富,实用性强。并保持了从事计量工作一向遵循的科学上的严谨性,是适用于各个领域科技人员的工具书。

可以指出,编写的手册是一项组织繁杂,集体辛勤劳动的果实,是对我国计量事业做出了一个卓有贡献。为此,谨向所有付出心血的编者们表示敬意。



1995年10月18日

王大珩教授为中国科学院院士、中国工程院院士、中国高科技产业化研究会理事长、何梁何利基金优秀奖获得者。

《计量测试技术手册》编辑委员会

主任委员： 陈宽基

副主任委员： 倪伟清 徐孝恩 李绍贵 房景富 王东宝

委员： (按姓氏笔画顺序排列)

于 渤	王朋植	王晓莹	史元明	孙维民
师克宽	刘宝兰	刘瑞清	陈小林	陈艳春
何 贡	何伟仁	林宗虎	林鸿初	金士杰
施昌彦	席德熊	徐 鹑	黄秉英	窦绪昕
谢 英	潘君骅	潘秀荣		

本卷编辑委员会

主 编： 潘君骅

副 主 编： 陈进榜 杨永刚

委 员： (按姓氏笔画顺序排列)

王晓莹	陈小林	杨永刚	李同保
李在清	吴辛甲	陈进榜	沈海龙
陈遐举	李锡善	林永昌	徐大刚
韩昌元	潘君骅		

主 审： 冯家璋 苏大图

撰 稿 人： (按姓氏笔画顺序排列)

杨永刚	李同保	李在清	吴辛甲
陈进榜	沈海龙	李恭尉	陈遐举
李锡善	林永昌	郝允祥	张绍纲
赵建平	徐大刚	唐志健	韩昌元
潘君骅			
刘瑞清			

本卷责任编辑： 陈小林 王晓莹

本卷责任编辑： 席秀莲 倪 云 高 彤

版式设计： 齐洪海

封面设计： 齐洪海

前 言

我国的现代计量测试工作,始于本世纪 50 年代初,经过 40 多年的积累和发展,已建成具有门类较为齐全,覆盖全国的计量测试技术网络,在生产、科研和经贸中发挥着生产力的作用。计量测试队伍也从计量行业扩展到各技术领域的计量、测试人员,形成宏大的专业大军。作为这一专业领域的知识积累——编写《计量测试技术手册》,既是广大计量测试人员的要求,也为推进计量测试技术转化为生产力所需要。

《手册》旨在成为计量测试人员和技术科研、设计人员案头技术咨询的必备工具书,力求以技术科学性、数据准确性、资料实用性、查阅方便性来组织书稿内容。全书按计量测试技术各专业立卷,共 13 卷,覆盖了这一技术领域的全貌。各卷按各自专业特点,要求做到既独立完整,又相互协调统一。

《手册》是在原国家计量局和现国家技术监督局的支持和帮助下,由中国计量出版社组织编写的,并成立了各卷的编审委员会,得到了中国计量科学研究院和一些科研单位、大专院校的大力支持,有上百名计量测试技术专家、学者参与了编写工作,历经 7 个多寒暑,为此付出了艰辛的劳动。值此《手册》面世之际,我们谨向支持和参与《手册》编写、编辑出版的所有人员致以敬意!

编写如此浩大又涉及众多学科的《手册》,是一项系统而又细致的工程实践,要做到全面、完整、准确、统一是十分困难的,虽经共同努力,层层把关,也难免存在术语上的不统一,内容上有一定交叉重复,符号不太一致等问题。还会有错漏和不足,诚请广大读者批评指正,以便在《手册》再版和修订中改正。

《计量测试技术手册》编辑委员会

1995 年 9 月

编者的话

光学既是一门古老的基础科学,同时又是一门年轻的应用科学。人类对光的认识经历了从现象到本质的发展过程,光学计量测试也正是伴随着这一认识过程而产生和发展起来的。尤其是近几十年来,由于光学仪器、照明工程、电影、电视、光电子工业以及航天工业等的飞速发展,对光学计量测试提出了越来越高的要求,测量对象与日俱增,不但光谱范围扩大到真空紫外和中远红外,测量方法和技术也不断创新,日益复杂。

光学计量测试技术除了应用于光学量测量外,还广泛应用于其他学科的一些非光学量,特别是几何量和力学量的测量。

本书为《计量测试技术手册》第10卷光学。全书共14章,内容包括:辐射度、光度、光谱光度、色度、感光度;激光参数,光学材料性能,光纤和光通信参数;光学零件、光学薄膜性能、光学系统特性常数、光学系统的像差和像质,光辐射探测器等的计量基标准、量值传递、测试或检验方法及所用的装置和仪器的原理、结构、特性、使用、检定、误差分析等。

我们在撰编本书的过程中,收集并精选了光学计量测试中常用的技术资料,注意做到内容全面、实用性强;在系统地介绍传统的方法和技术的同时,尽可能地介绍国内外计量测试的新技术、新成就和最新的国际标准、国家标准、国家计量检定规程等的内容;并力求科学性强,引用数据可靠,表达简明扼要,便于读者查用。

因水平及时间所限,书中缺点和疏漏之处在所难免,竭诚希望读者不吝批评指正。

本卷编辑委员会

1995年4月

目 录

第1章 绪 论

- 1 对光的本性认识的历史 (1)
- 2 坎德拉——光学的基本单位 (2)
- 3 光学计量测试的范畴及发展趋势 ... (4)
 - 3.1 光度计量测试 (4)
 - 3.2 光辐射计量测试 (5)
 - 3.3 激光计量测试 (5)
 - 3.4 色度计量测试 (6)
 - 3.5 成像光学计量测试 (6)
 - 3.6 非光学量的光学测试 (7)
 - 3.7 光学计量测试的发展趋势 (7)

第2章 辐射度测量

- 1 基本辐射度量与单位 (8)
 - 1.1 辐射度量 (8)
 - 1.2 辐射度量的光谱特性 (10)
 - 1.3 光谱辐射度量 (10)
 - 1.4 发射率和吸收率 (11)
- 2 辐射度量的基准和传递标准 (12)
 - 2.1 黑体辐射器 (12)
 - 2.2 光热型绝对(电替代)辐射计 (16)
 - 2.3 低温辐射计 (18)
 - 2.4 硅光电二极管自校准技术 (19)
 - 2.5 实现辐射度量基准的其他方法 (20)
 - 2.6 辐射度量传递标准 (21)
 - 2.7 市售黑体辐射器 (23)
- 3 辐射度测量方法与仪器 (24)
 - 3.1 辐射度测量的基本考虑 (24)
 - 3.2 总辐射度量的测量与辐射计 (25)
 - 3.3 光谱辐射度量测量与光谱辐射计 (38)
 - 3.4 发射率测量 (47)
- 4 太阳辐射 (48)
 - 4.1 太阳辐射的一般特性 (48)
 - 4.2 地球表面上的太阳辐射特性 (53)

- 4.3 在地球表面上太阳总辐射的光谱分布 (53)

第3章 光度测量

- 1 光度量术语及单位 (55)
- 2 光谱光视效率 (58)
- 3 光度计量基准和传递系统 (64)
 - 3.1 发光强度基准的定义及复现方法 (64)
 - 3.2 [光]照度基准 (65)
 - 3.3 光通量基准、副基准及其测量 (65)
 - 3.4 [光]亮度基准 (69)
 - 3.5 弱光光度标准 (69)
 - 3.6 色温度基准及其测量 (70)
 - 3.7 发光强度、总光通量、色温度的基准灯 (72)
- 4 光度量值传递系统 (77)
- 5 光度测量方法 (77)
 - 5.1 发光强度的测量方法 (77)
 - 5.2 用球形光度计测量光源的总光通量 (86)
 - 5.3 光通量标准 (92)
 - 5.4 光源发光效能的计算 (92)
 - 5.5 光照度计及其检定 (93)
 - 5.6 余弦发射体产生的照度及距离平方反比定律的其他表达方式 (98)
 - 5.7 [光]亮度计及其检定 (100)
 - 5.8 微弱光照度计及其检定 (102)
 - 5.9 色温标准灯检定方法 (103)
 - 5.10 色温表及其检定方法 (104)
 - 5.11 气体放电光源的相关色温 T_c 的测量 (106)
- 6 照明的光度测量 (106)
 - 6.1 照明光源的照度计算及其测量 (106)
 - 6.2 室内灯具光度参数的测量和计算 (116)
 - 6.3 投光(泛光)照明灯具的测量和

计算	(120)
6.4 不舒适眩光计算	(123)
6.5 工作场所的照度标准值	(126)
7 天文和大气光度测量	(127)
7.1 天文光度测量中星等的确定	(127)
7.2 标准星	(128)
7.3 大气消光校正	(129)
7.4 常用的天文光度测量仪器	(130)
7.5 光辐射在大气中的传输	(131)

第4章 光谱光度测量

1 术语和单位	(134)
1.1 反射	(134)
1.2 透射	(135)
1.3 吸收	(136)
1.4 逆反射	(137)
1.5 偏振	(137)
2 光谱光度的测量体系	(137)
3 光谱光度仪器	(138)
3.1 紫外可见光谱区的仪器部件	(139)
3.2 紫外可见区的测试仪器	(143)
3.3 红外光谱区的仪器部件	(143)
3.4 红外光谱区的测试仪器	(147)
3.5 真空紫外光谱仪	(148)
3.6 发射光谱仪部件	(148)
3.7 摄谱仪	(149)
3.8 显微密度计	(151)
4 光谱透射测量	(151)
4.1 分光光度的特点	(151)
4.2 液体吸收(透射)标准	(151)
4.3 固体吸收(透射)标准	(158)
4.4 杂散光及其检测	(161)
4.5 透射比(吸光度)测量	(163)
4.6 光谱透射比(吸收度)基准	(165)
5 光谱反射测量	(167)
5.1 漫反射函数的确定	(167)
5.2 漫反射比测量的几何条件	(168)
5.3 反射比的数学表达式	(169)
5.4 漫反射因数测量的几何条件	(169)
5.5 反射因数的数学表达式	(170)
5.6 漫反射比测量	(171)
5.7 漫反射因数测量	(173)
5.8 漫反射分布测量	(175)
5.9 规则反射比测量	(178)

5.10 工业测量	(181)
5.11 反射标准器	(183)
5.12 波长标准器	(186)
5.13 逆反射测量	(188)
6 偏振与发射光谱测量	(189)
6.1 偏振器对的消光比测量	(189)
6.2 发射光谱测量方法	(190)
6.3 光栅摄谱仪的检定	(191)

第5章 色度测量

1 标准色度学系统	(193)
1.1 CIE 三刺激值	(193)
1.2 色度坐标	(223)
1.3 CIE1960 均匀色度标尺图	(224)
1.4 CIE LUV 均匀颜色空间	(225)
1.5 CIE LAB 均匀颜色空间	(226)
1.6 色差公式	(226)
1.7 其它表色系统	(227)
1.8 色调与主波长,彩度与饱和度的 关系	(228)
1.9 白度	(228)
2 色度计量的基准和标准	(230)
2.1 色度计量基准装置	(230)
2.2 副基准白板	(231)
2.3 标准白板	(231)
2.4 标准色板	(232)
2.5 色度量值传递系统	(234)
3 常用的色度测量仪器	(234)
3.1 色度计	(234)
3.2 色差计	(238)
3.3 色泽计	(238)
3.4 白度计	(238)
4 光源色的测量方法和测量仪器	(239)
4.1 光谱辐射法测量光源的三刺激值 和色坐标	(239)
4.2 光源的色温	(241)
4.3 光源的显色指数	(243)
4.4 光源的异谱同色指数	(246)
4.5 光源的色度测量仪器	(254)
5 彩色电视的色度计量	(255)
5.1 彩色电视的色度学参数	(255)
5.2 电视色度计量方法与仪器	(256)

第6章 感光度测量

1 基本术语、量与单位	(262)
-------------------	---------

2 坐标系和函数表示法	(263)	13.3 测量仪器	(286)
2.1 坐标系	(263)	13.4 电子系统	(287)
2.2 函数表示法	(263)	13.5 投影密度与漫射密度的转换	(287)
3 密度测量的几何条件	(264)	13.6 各类常用胶片的 RMS 颗粒度值	(287)
3.1 漫透射密度的几何模式	(264)	14 照相材料分辨力测试方法	(289)
3.2 投影密度的几何模式	(265)	14.1 基本概念	(289)
3.3 反射密度的几何模式	(265)	14.2 接触法	(289)
4 密度测量的光谱条件	(265)	14.3 照相物镜法	(289)
4.1 入射光谱 S	(266)	14.4 显微镜镜法	(289)
4.2 光谱条件	(266)	14.5 干涉法	(289)
5 感光测定用照明体	(269)	14.6 镜头分辨力校正	(289)
5.1 摄影照明体	(269)	14.7 测量方法的选择	(289)
5.2 标准感光测定昼光照明体	(269)	14.8 GB 9045—88 和 ISO 6328 规定	
5.3 标准感光测定摄影棚钨灯照明体	(269)	的测量方法	(290)
5.4 标准感光测定溢(泛)光照明体	(269)	15 照相材料调制传递函数(MTF)	
5.5 光谱分布指数(SDI)的计算	(271)	测量方法	(292)
5.6 光谱分布指数允差	(273)	15.1 基本概念	(292)
6 $H\&D$ 曲线	(273)	15.2 正弦法测量 MTF	(292)
7 曝光量基准	(273)	15.3 方波法测量 MTF	(293)
8 工业用感光仪	(273)	15.4 散布函数法	(295)
8.1 快门	(273)	15.5 随机噪声法	(295)
8.2 曝光量的校准	(275)	15.6 频谱法	(295)
8.3 辐射度校准	(276)	15.7 干涉法	(296)
9 工业密度计	(276)	15.8 物理测量法	(297)
9.1 密度计的分类	(276)	15.9 测微密度计引起畸变的校正	(297)
9.2 漫透射密度的光路布置	(278)	15.10 各种 MTF 测量方法比较	(297)
9.3 投影密度	(278)		
9.4 反射密度	(278)		
9.5 密度测量中的误差源	(279)		
9.6 密度计的选择	(281)		
10 漫透射视觉密度基准装置	(281)		
11 标准密度片	(282)		
11.1 漫透射视觉标准密度片	(282)		
11.2 漫透射彩色积分标准密度片	(282)		
11.3 漫反射视觉标准密度片	(282)		
12 漫透射密度计量器具国家检定			
系统	(282)		
12.1 视觉密度计量器具国家检定系统	(282)		
12.2 彩色积分密度计量器具检定系统	(282)		
13 照相材料 RMS 颗粒度测量			
方法	(286)		
13.1 基本概念	(286)		
13.2 测量过程	(286)		

第 7 章 激光参数测量

1 激光参数的量和单位	(298)
2 激光参数计量基标准和传递	
系统	(300)
2.1 激光功率基准	(300)
2.2 激光能量基准	(303)
2.3 激光波长基准	(305)
2.4 激光峰值功率标准	(306)
2.5 激光量值传递和溯源性	(307)
3 激光参数的测量方法	(309)
3.1 一般测量要求和条件	(309)
3.2 激光功率能量测量方法	(310)
3.3 激光时域参数测量方法	(314)
3.4 激光空域参数的测量方法	(316)
4 常用激光测量仪器	(322)
4.1 激光功率能量计	(322)
4.2 激光波长计	(327)

4.3 激光空域参数测试仪器	(329)
5 半导体激光二极管测试方法	(330)
5.1 参数名称和符号	(330)
5.2 测量条件和要求	(330)
5.3 正向电压(V_F)	(330)
5.4 反向击穿电压(V_{BR})	(331)
5.5 正向电流(I_F)	(331)
5.6 反向电流(I_R)	(331)
5.7 微分电阻(R_d)	(332)
5.8 阈值电流(I_{th})	(332)
5.9 输出激光功率 P 及 $P-I$ 特性	(333)
5.10 消光比(ξ)	(333)
5.11 外微分量子效率(η_D)	(333)
5.12 峰值发射波长(λ_p)、辐射光谱宽度($\Delta\lambda$)和纵模数目	(334)
5.13 近场图	(335)
5.14 强度空间分布(相对功率能量空间分布)	(335)
5.15 激光时域参数:延迟时间(t_d),上升时间(t_r),存贮时间(t_s),下降时间(t_f)	(335)
5.16 相对噪声强度(RIN)	(336)
5.17 截止频率	(337)

第8章 光学材料性能测试

1 无色光学玻璃	(338)
1.1 无色光学玻璃的理化性能指标	(338)
1.2 无色光学玻璃的折射率和色散系数的标准和测试方法	(338)
1.3 无色光学玻璃光学均匀性的标准和测试方法	(342)
1.4 无色光学玻璃应力双折射的标准和测试方法	(351)
1.5 无色光学玻璃条纹度的标准和测试方法	(353)
1.6 无色光学玻璃气泡度的标准和测试方法	(354)
1.7 无色光学玻璃光吸收系数的标准和测试方法	(355)
1.8 无色光学玻璃的紫外—红外折射率精密测定	(356)
1.9 无色光学玻璃内透过率测试	(358)
1.10 无色光学玻璃的其他理化性能的测试方法	(358)
2 颜色滤光玻璃和光学石英玻璃	(363)

2.1 颜色滤光玻璃	(363)
2.2 光学石英玻璃(也称为石英光学玻璃)	(367)
3 光学晶体	(369)
3.1 晶体的光轴定向方法	(369)
3.2 晶体折射率的测量	(374)
3.3 晶体的缺陷观测	(376)
3.4 晶体的消光比测量	(378)
3.5 晶体的其他物理化学性质	(378)
4 航空和汽车安全玻璃	(389)
4.1 航空有机玻璃的质量标准和测试方法	(389)
4.2 汽车安全玻璃的测试方法	(394)

第9章 光纤和光通信参数测量

1 光纤类别及技术要求	(398)
1.1 光纤结构	(398)
1.2 多模光纤	(398)
1.3 单模光纤	(400)
1.4 特性参数	(400)
2 光纤和光通信参数的计量标准	(404)
2.1 光功率标准装置	(404)
2.2 光纤带宽测量标准装置	(404)
2.3 折射率分布和几何参数标准测量装置	(406)
2.4 模场直径标准测量装置	(408)
2.5 光纤衰减标准测量装置	(409)
2.6 标准光纤	(410)
3 光纤和光通信参数的测量方法	(410)
3.1 测量方法总则	(410)
3.2 光衰减或损耗的测量条件和方法	(411)
3.3 带宽或基带响应	(416)
3.4 色散的测量方法	(420)
3.5 折射率分布测量方法	(424)
3.6 数值孔径测量方法	(427)
3.7 模场直径测量方法	(429)
3.8 截止波长测量方法	(433)
3.9 几何尺寸参数测量方法	(436)
4 常用纤维光学检测仪器	(439)
4.1 光纤功率计	(439)
4.2 光时域反射计(OTDR)	(439)
4.3 光纤损耗测试仪	(443)
4.4 其它光纤测试器件和设备	(444)

第10章 光学零件的测量

1 光学零件的表面面形偏差测量	(445)
1.1 有关的标准介绍	(445)
1.2 平面面形偏差的测量	(451)
1.3 球面面形的测量	(456)
1.4 非球面面形的测量	(460)
2 光学零件表面的球面曲率半径测量	(468)
2.1 有关的测量标准	(468)
2.2 用环形球径仪测量球面曲率半径	(469)
2.3 用自准直显微镜测量球面曲率半径	(471)
2.4 用自准直望远镜测量球面曲率半径	(472)
2.5 刀口阴影法测量球面曲率半径	(473)
2.6 干涉法测量球面曲率半径	(473)
2.7 球面曲率半径测量方法的选择	(474)
3 透镜中心厚度的测量	(475)
3.1 机械法测量	(475)
3.2 光学法测量	(475)
3.3 几种透镜中心厚度测量方法的特点	(476)
4 平面光学零件光学平行度测量	(477)
4.1 双像法自准直仪测量平行度	(477)
4.2 干涉法测量玻璃平板的平行度	(478)
4.3 光电光楔偏向角测量干涉仪	(482)
4.4 几种平行度测量方法的比较	(483)
5 棱镜的角度测量	(484)
5.1 精密测角仪测量棱镜的角度	(484)
5.2 比较法测量棱镜角度	(485)
5.3 反射棱镜光学平行度测量	(487)
5.4 屋脊棱镜的双像差和屋脊角误差测量	(490)
5.5 锥体棱镜的角度测量	(494)
6 光学零件加工质量的检验	(496)
6.1 光学零件抛光表面疵病的检验	(496)
6.2 透镜的中心误差测量	(498)
7 眼镜镜片的测量	(502)
7.1 眼镜镜片厚度的测量	(502)
7.2 眼镜镜片屈光度的测量	(503)

第11章 光学薄膜性能测试

1 介质膜折射率测量	(508)
------------	-------

1.1 单层膜折射率测量	(509)
1.2 多层膜折射率测量	(521)
2 金属膜复折射率测量	(522)
2.1 椭圆偏振法	(523)
2.2 光度法	(526)
3 光学薄膜厚度测量	(529)
3.1 双光束干涉法	(529)
3.2 多光束干涉法	(530)
3.3 光度法	(531)
4 薄膜元件透射比测量	(532)
4.1 单光路测量法	(532)
4.2 双光路测量法	(533)
5 光学薄膜反射比测量	(535)
5.1 低反射比测量	(535)
5.2 高反射比测量	(536)
6 薄膜元件吸收比测量	(539)
6.1 速率量热计测量法	(540)
6.2 用黑体校温的量热计测量法	(541)
7 薄膜元件散热比测量	(541)
7.1 用散射计测量散射比	(541)
7.2 表面散射比测量	(542)
8 薄膜机械强度和应力的测定	(542)
8.1 薄膜附着力测定	(542)
8.2 薄膜机械强度测定	(543)
8.3 薄膜应力测定	(544)
9 薄膜的激光破坏阈值测量	(547)

第12章 光学系统特性常数的测量

1 焦距和顶焦距的测量	(550)
1.1 放大率法测量焦距和顶焦距	(551)
1.2 精密测角法测量焦距	(553)
1.3 附加接筒法测量焦距	(554)
1.4 特长焦距的测量	(555)
1.5 测量焦距的其他方法	(556)
1.6 光电定焦方法	(557)
2 望远系统特性常数的测量	(558)
2.1 出瞳直径和出瞳距离的测量	(558)
2.2 望远系统放大率的测量	(559)
2.3 望远系统视场的测量	(561)
2.4 望远系统视度和视差的测量	(562)
2.5 望远系统分划倾斜和像倾斜的测量	(567)
2.6 望远系统积分透射比和光谱透射比的测量	(568)

2.7 双目望远系统特殊性能的测量	(569)	1.3 哈特曼检验与波像差测量	(611)
2.8 光学测距仪特殊性能的测量	(571)	2 光学系统畸变的测量	(613)
2.9 望远系统杂光系数的测量和标准	(572)	2.1 畸变及相对畸变表达式	(613)
3 显微系统特性常数的测量	(574)	2.2 有限远物距、无限远像距系统畸变的测量	(614)
3.1 显微系统放大率的测量	(574)	2.3 无限远物距、有限远像距系统畸变的测量	(616)
3.2 显微物镜数值孔径的测量	(576)	2.4 有限远物距、有限远像距系统畸变的测量	(617)
3.3 显微镜视场的测量	(578)	2.5 无限远物距、无限远像距系统畸变的测量	(617)
3.4 显微物镜装校过程中的检验	(578)	3 光学系统像质评定的星点检验法	(619)
3.5 显微系统杂光系数的测量	(578)	3.1 无像差衍射受限系统星点像的光强分布规律	(619)
4 照相物镜特性常数的测量	(579)	3.2 星点检验法的装置与条件	(620)
4.1 照相物镜的相对孔径和 T 数的测量	(579)	3.3 光学系统星点像判读	(622)
4.2 照相物镜渐晕系数的测量(参考 GB 8348—87)	(584)	4 光学系统的分辨率测量	(625)
4.3 照相物镜像面照度均匀度的测量	(585)	4.1 衍射受限系统(无像差理想光学系统)的分辨率	(625)
4.4 照相物镜的光谱透射比和积分透射比的测量(参考 GB 8346—87)	(586)	4.2 分辨率图案	(627)
4.5 照相物镜色贡献指数(ISO/CCI)及其测量(参考 GB 9191—88)	(588)	4.3 照相物镜分辨率测量(目视法)	(632)
4.6 照相物镜杂光系数的测量(参考 GB 9918—88)	(592)	4.4 望远系统分辨率测量	(635)
4.7 变焦距照相物镜像面稳定性的测量(参考 GB 9917—88)	(592)	4.5 显微镜系统分辨率测量	(635)
4.8 照相系统取景测距系统的测量(参考 GB 10047—88)	(593)	5 泰曼、斐索型干涉仪检测光学系统的波像差	(635)
5 投影系统的测量	(594)	5.1 干涉仪与检测波像差原理	(635)
5.1 投影物镜的物像共轭面距离的测量	(594)	5.2 初级像差与干涉图	(639)
5.2 投影物镜放大率的测量	(595)	5.3 波面相位光电探测技术	(647)
6 激光光学系统特性常数的测量	(595)	5.4 波面拟合与波像差函数求取	(650)
6.1 激光束的基本特性	(595)	5.5 用波像差值求解像质指标	(660)
6.2 激光光斑尺寸及其测量	(597)	6 波面横向错位干涉测量光学系统波像差	(662)
6.3 激光束的束散角及其测量	(601)	6.1 横向错位干涉仪及测量原理	(663)
6.4 激光束的横模及纵模的观测	(601)	6.2 横向错位干涉图与波面形状	(664)
7 光纤光学系统特殊性能的测量	(603)	6.3 由横向错位干涉图求原始波面	(666)
7.1 光纤光学元件的数值孔径的测量	(603)	7 刀口阴影法测量物镜的几何像差	(669)
7.2 光纤光学元件的透射比的测量	(604)	7.1 刀口阴影法几何原理及亮暗界线方程	(669)
7.3 自聚焦光纤的焦距和数值孔径的测量	(605)	7.2 初级像差的阴影图	(670)
第 13 章 光学系统的像差测量和像质鉴定			
哈特曼检验测量光学系统像差	(608)	8 朗契检验法检验光学系统像质	(673)
1.1 轴上点像差的测量	(608)	8.1 朗契检验法几何原理	(673)
1.2 斜光束像差的测量	(609)	8.2 朗契图与初级像差的关系	(673)

8.3 条纹扫描朗契检验技术	(677)	5 半导体探测器	(718)
9 光学传递函数的测量	(678)	5.1 概述	(718)
9.1 光学传递函数测量基础及表达式	(678)	5.2 光敏电阻——光电导探测器	(718)
9.2 衍射受限系统的光学传递函数	(683)	5.3 结型光电探测器	(722)
9.3 光学传递函数测量有关规定	(685)	5.4 雪崩光电二极管	(728)
9.4 测量光学传递函数的扫描法	(690)	5.5 电荷耦合成像器件	(730)
9.5 光学传递函数应用	(697)	6 热型探测器	(734)
9.6 光学传递函数测量装置的检定	(697)	6.1 概述	(734)

第 14 章 光辐射探测器及其测量

1 光辐射探测器的分类	(703)	6.2 热电偶和热电堆	(736)
1.1 光子效应探测机制的分类	(703)	6.3 测辐射热计和热敏电阻	(740)
1.2 热效应探测机制的分类	(703)	6.4 热释电探测器	(741)
1.3 波动作用效应探测机制的分类	(703)	6.5 高莱气动探测器	(744)
2 光辐射探测器件的术语	(704)	6.6 绝对辐射计和量热计	(745)
2.1 与探测器分类有关的术语	(704)	7 光辐射探测器件的主要性能参	
2.2 与探测器工作特性有关的术语	(705)	数与测量	(747)
3 光辐射探测器的计量标准	(706)	7.1 探测器的响应度	(747)
4 光电发射探测器	(706)	7.2 探测器的光谱匹配因子	(749)
4.1 概述	(706)	7.3 探测器响应度的测定	(749)
4.2 真空光电管	(708)	7.4 探测器的线性及其测定	(756)
4.3 光电倍增管	(710)	7.5 时间常数、上升时间、下降时间	(762)
4.4 充气光电管	(717)	7.6 探测器噪声及其测量	(764)
		参考文献	(766)

第 1 章 绪 论

人类和一切生物都生活在光的世界里,没有光就没有生命,自然界的生命发展过程是与光息息相关的。人类在利用自然光和发明人造光源的实践中,无时无刻不在进行着它们间的相互比较过程。然而,人们对于光的定量测定还是近二百年以来的事。

1 对光的本性认识的历史

自 1900 年以后,由于能量量子的发现,使光学这门古老的学科经历了一场彻底而深刻的革命,它深深地影响了我们关于光的本性的理解。

在这本手册里要详尽系统地介绍光学发展的历史,从而介绍光学计量的历史是有困难的,所以我们只就光学这门学科发展中,对光的本性的认识的几个主要转折点作一些叙述。因为这些对光本性的逐步深入的认识过程,都是利用实验,由计量测试的结果得到了验证。因此可以说,对光的本性的认识过程,也就是光学计量测试发展的过程。

我国早在公元前 4 世纪到 3 世纪之间的《墨经》中就记载了小孔成像和平面镜、凹面镜成像的研究,首先提出了光是直线传播的观点。因此可以说《墨经》是世界上最早的几何光学著作之一。东汉王符在他的《潜夫论·赞学》中说:“中阱深室幽黑无见,及设盛烛则百物彰矣,此则火之耀也,非日之光也,而目假之则为明矣”。指出人眼睛能看见物体是由于物体受到光的照射。北宋初年杨亿(974—1020)的《杨文公谈苑》中记载有:“嘉州峨嵋山有菩萨石,人多收之,色莹白如玉,如上饶水晶之类,日射之有五色”。说明了天然晶体的色散现象。北宋沈括的《梦溪笔谈》卷中载有:“阳燧面洼,向日照之,火皆聚向内。离镜一二寸,光聚为一点大如麻菽,著物则火发,此即腰鼓最细处也”。这是对凹面镜焦点最早的明确描述。而欧洲到 1267 年英国的培根(Roger Bacon)才发现凹面镜的焦点。

欧洲笛卡儿(R. Descartes(1596—1650))根据形而上学的观念,系统地陈述了关于光的本性的见解,他认为光在本质上是一种压力,在一种完全弹性的充满空间的介质中传输,并且把颜色的色归因于这个介质中粒子的不同速度的旋转运动。1657 年费马(P. Fermat)提出了著名的光传播的最小时间原理。当牛顿(I. Newton)于 1664 年开始了光学问题研究时,斯涅耳(W. Snell, Snellius(1580—1626))和笛卡儿已确定了入射角、折射角的正弦比对一定的介质来说是一个常数;关于反射和折射光程的几何原理,牛顿明确地引入了聚焦这一概念;牛顿于 1666 年发现色散现象,首先证明了白光是由很多颜色的光所组成,并指出不同颜色的光,其折射率是不同的,从红光到紫光折射率按一定曲线增长,并首次使棱镜变成了光谱仪,以揭示物质的本性;证明了每一束光具有一定折射率之后,牛顿又提出对折射率进行测量的问题。为此,发明了较简单的折射计,他还注意到这些量的准确度和重复性;牛顿对光的本性的认识,从根本上迈出了新的一步,完满地解释了光的直线传播、反射和折射等现象。牛顿发明了用干涉圈检验表面质量的方法,却认为光是粒子流,不承认波动说。

1678—1690 年惠更斯(C. Huygens)等人提出光的波动性理论,成功地推导出反射定律和折射定律,并从说明冰洲石双折射现象中,发现了光的偏振。但由于牛顿的微粒说,阻碍了波动说的发展,几乎过了 100 年波动说才又复兴起来。1800 年出现了杨氏(Young)的第一个光学研究,即著名的杨氏实验,清楚地表述了光波干涉的概念,从此,波动光学才又重新发展了起来。1810 年马吕斯(E. L. Malus)发现了新的最重要的现象,即自然光在反射时能产生偏振。1818 年菲涅耳(A. J. Fresnel)用实验和理论解释了衍射现象,为波动理论奠定了坚实的基础,在偏振理论方面,他证明了光的振动是横向的,垂直于光线传播的方向。根据这个原理很容易解释单色光的偏振现象,这是现代晶体光学理论的基础。大约在 19 世纪中叶基尔霍夫(G. Kirchhoff)建立了一门新兴科学——辐射热力学,把热力学规律应用于光学上,促进了光学的蓬勃发展,他推导出了更普遍的重要结论,即在相同温度下,对相同波长的光束来说,所有物体的发射能力和它的吸收能力的比值相同,用公式表示为: $E_{\lambda T}/A_{\lambda T} = f(\lambda, T)$, $f(\lambda, T)$ 是一

个与物体性质无关的普适函数。与此同时,麦克斯韦(J. C. Maxwell)和科耳劳什(R. Kohlraush)以及韦伯(W. Weber)等对电磁波的传播速度作计算和实验测量时,看到这个速度原来就是光的速度。这证实了麦克斯韦的推测,即光波也是电磁波。但这个推测只是在1888年赫兹(H. Hertz)的直接实验证明光是波长很短的电磁波后,才被人们所承认,从而使光现象和电磁现象得到了统一。1900年普朗克(M. Planck)提出量子理论并研究证明了平衡系统辐射(总强度)的出射度正比于温度的4次方,即导出了斯忒藩(Josef Stefan)用实验得出的,由波尔兹曼(Iudwig Boltzmann)从理论上证明的定律,其数学表达式为 $M = \sigma T^4$ 。随后他又得出了已知的维恩(Wien)公式,并证明维恩公式只适用于光谱中的短波部分。接着又导出

$$M = \frac{c\lambda^{-5}}{e^{c_1/\lambda T} - 1}$$

这就是著名的普朗克公式。

1905年爱因斯坦(A. Einstein)根据普朗克理论,把能量量子作为光粒子,认为光是一粒一粒的光子流,其最小单元——光子的能量为 $\epsilon = h\nu$,并成功地解释了在过去用波动理论不能说明的光电效应。从那时起确认了光的波动理论和微粒论二者同时有效,从而使人们认识到光具有波粒二象性。量子论不但对光学,也对整个物理学提供了崭新的概念,使物理学进入新的发展时期。

在人们对光的本性的漫长认识过程中,为了用实验测试验证理论的正确性,发展了大量的测试仪器和装置,研究了测试方法,如折射率测量仪器、光谱仪(即分光仪)、望远镜、显微镜等。由于光源、光传播介质、探测器件等的研究发展,使得光学领域内的各个分支都出现了对光学量进行准确测量和测量量值加以统一的要求。这些定性和定量的测定构成了光学计量的基本内容。建立必须的光学计量标准,发展精密测量方法和仪器设备,成为光学计量的主要任务。激光技术的发展,为光学学科的发展注入了新的内容,提出了新的课题。

2 坎德拉——光学的基本单位

坎德拉是国际单位制中表示发光强度的单位,它的符号是cd,是国际单位制中7个基本单位之一。

坎德拉过去称烛光,其发展与建立经过了漫长的时间。18世纪以前,人们对光的研究几乎都限于对光的本性的研究,没有人提出过定量地测定光辐射量的问题。1722年法国人贝利·伯格(Pierre Bouguer)首次提出了光度量及与其有关的概念,并发明了第一个可以用来比较两个光源的发光强度的光度计,这可以认为是光度学的正式诞生。

1760年朗伯(Lambert Johann H)创立了光度学体系,确立了光度学中的光通量、发光强度、照度、亮度等参数概念以及它们之间的数学关系。这标志着光度学已成为一门独立的学科。当时选用特制的人造火焰(蜡烛)作为基准。

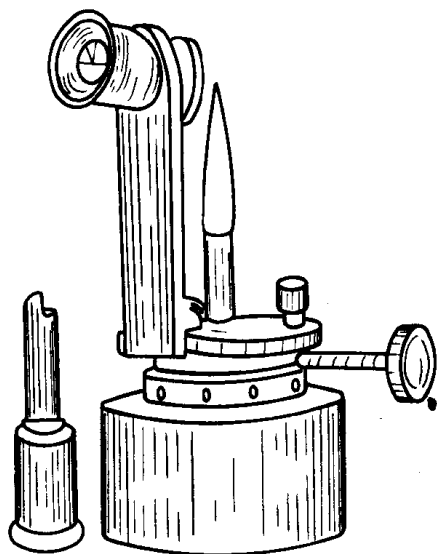


图 1-1 亥夫纳灯外形图

1800年卡赛尔(Carcel)设计并制成了一种灯,其发光强度约为10烛光,是在可测速率下燃烧菜油,由于不易控制,重复性不太好,于1877年就被A. G. Vernon Harcourt所发明的戊烷灯所取代。这种灯在无芯的燃烧器中燃烧戊烷蒸气和空气混合物,其锥型的发光强度约为1烛光。经重大改进后,戊烷灯才具有10烛光的强度。1889年英国正式采用它为基准,以取代老烛光。因为发光强度与大气的湿度和压力有关,所以用一个公式来估计这种影响。由于其严格的技术条件可以重复,因此,在英国的汽灯行业和国家物理研究所(NPL)早期的光度测量都使用这个标准。

1881年在法国巴黎首次召开的电气工程师会议上建议用“Violle”作为发光强度单位,它是通过铂表面融点给出的。

另一方面,在1884年亥夫纳(Hefner Alteneck)设计了水平方向辐射发光强度的亥夫纳灯(见图1-1)。它用醋酸酯戊烷作燃料,规定点着时灯焰的高度为40mm,火焰高度的调整是由一个简单的光学投影仪实现的。它在一定湿度、二氧化碳含量和大气压力等条件下是

一种重复性很好的发光强度为 1 亥夫纳烛光的灯。

1896 年,在日内瓦提出了对“光学工程”或“光度学”的量的完整体系和 $V(\lambda)$ 相一致的评价量取得了一致意见。这样就产生了一种按 $V(\lambda)$ 评价和测辐射强度的特殊单位“光强”。关于单位本身没有取得一致意见,德国代表拒绝采用 bougie decimal 单位(decimal candle 是一种旧的烛光单位,它是法国光度计量的标准,即 1cm^2 的铂在它的凝固点温度所发射的光的 $1/20$),它是以 Violle 单位为基础的。这时,德国仍坚持用亥夫纳烛光的单位。

考虑到量的复现性和稳定性,人们的注意力开始转到白炽体基准上来。白炽灯稳定性好,但制作上达不到光基准所要求的准确度。上世纪最后 20 年里,Draper, Violle 和 Petarel 研究了处于铂凝固温度下一平方厘米的铂表面所做成的基准。Pelarel 计算了铂在一定条件下,发光强度重复性可在 1% 以内。1889 年国际电工委员会(IEC) 采纳了这个基准,1919 年它就成为法国的法定光强单位。大约在上世纪末期所研制的白炽体基准中,Violle 是最成功的,而且在科学意义上,它是铂黑体光度基准的直接先导。

在 20 世纪的头几年里,各国进行了规定国际光度单位的努力,并于 1909 年由美国标准局(NBS)*、法国的电气试验中心(LCE)和英国国家物理研究所(NPL)联合作出约定,从 1909 年 4 月 1 日起,美、英、法采用 Violle 为烛光单位,这个单位是从具有 10 烛光的戊烷灯导出,用 3 组碳丝灯来保存。德国没有参加这个约定,继续使用亥夫纳烛光。德国人认为亥夫纳烛光的优点是:单位明确,结构数据和燃料作了规定,这是碳丝灯所做不到的。1921 年 CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)第五届会议上,把这个约定的参加国扩大到比利时、意大利、西班牙和瑞士等国家。这个烛光单位仍保持在白炽碳丝灯上,称之为“国际烛光”。

用白炽灯来保存光单位是不完善的,在几年时间内,虽然光单位的变化和稳定性可能比重复点燃很好的火焰标准要小得多,但是点燃的白炽灯要受缓慢地变质的限制。1930 年 CIPM(国际计量委员会)的电学咨询委员会注意到了 NBS 于早年(1908)建议的铂凝固温度下黑体辐射器的特定面积作为基准的实施方案,并与当时使用的白炽灯作了比对。1937 年 CIPM 新成立的光度咨询委员会首次会议上研究了这些结果。在 NBS,法国的斯特拉斯布尔大学和 NPL 对铂凝固温度下黑体的光亮度值分别测定为 58.86, 58.78 和 59.0 国际烛光/ cm^2 。对此,该委员会通过了如下的决议:从 1940 年 1 月 1 日起,光强度单位是黑体辐射器在铂凝固温度下每平方厘米发出的光亮度的 $1/60$ 。

新光强度单位叫“新烛光”。在这次会议上,协议的范围有了进一步扩大,它又包括了荷兰和德国。实际上也包括了原苏联和日本,该协议对德国来说,不仅是要废除亥夫纳烛光,而且还得把单位变动 10%。

但是由于第二次世界大战的影响,全面正式采用新烛光的工作一直拖到 1948 年 1 月 1 日。1948 年以来,CIE 给新烛光取了一个拉丁名“坎德拉”(Candela),符号为 cd,并得到了 CIPM 的确认。1948 年国际计量大会通过的决议为:坎德拉——光强度单位。坎德拉的大小是这样规定的,使全辐射体在铂凝固温度下的光亮度为 60 坎德拉每平方厘米。

1967 年国际计量大会考虑到这个定义所确定的光强度单位的大小是正确的,但措词不严密,所以将坎德拉的定义叙述为:坎德拉是在 $101\ 325\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 压力下处于铂凝固温度的黑体的 $1/600\ 000\text{m}^2$ 表面在垂直方向上的发光强度。

到 1979 年,有 9 个国家先后建立了黑体基准。除美、英、法、德外,还有原苏联、加拿大、日本、意大利和我国。其中五六个大实验室先后于 1952, 1956, 1961 和 1969 年进行了 4 次光强度和光通量基准的国际比对,并将比对结果复现在 BIPM 所保持的几种灯组上,作为国际平均坎德拉单位和国际平均流明单位。

以视觉为基础发展起来的光度学,把发光强度或烛光作为基本的光度量。大约到 1920 年,多数商业上所用的光源都是用烛光来衡量的,但是对照明工程来说,则更倾向于采用光源发出的总光通量。除此以外,光度量逐渐扩展到测量辐射场和探测量的领域。光度量是用视觉效应测量辐射的,测量时以人眼作为接收器,人眼对不同波长的光灵敏度不同,因而提出了用光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 表征人眼的这种特性。

视觉光度物理测量技术的发展,大大地推动了探测器技术,这对光谱光视效率函数在国际上的采用起到极其重要的作用。明视觉 $V(\lambda)$ 函数在 1924 年首次被 CIE 采用;并于 1933 年被 CIPM 所采纳。

从历次对发光强度单位的比对看出,光度值的差异比较大。以 1969 年比对为例,色温度为 2 045K 的发光强

* 1989 年美国标准局(NBS)改名为 National Institute of standard and Technology (NIST)。

度值的发散性为 1.6%。20 年来,光度值的国际一致性没有显著改善。在 1969 年的国际比对中,没有一个国家使用 1961 年以后复现的光度值,有的甚至仍沿用 1940 年的光度值。从坎德拉的原始定义可知,定义一方面依赖于温度,温度改变,辐射量和光度量之间的比例常数就变,而铂凝点黑体的温度也难于准确测量;另一方面,现代光谱辐射测量迫切要求测量光谱辐射,这就要通过一个准确数学关系把能量单位(焦耳)与光度量单位(坎德拉)联系起来。由于这两个原因,造成了重新定义坎德拉的必然结果。

后来,以电学方法替代辐射计为基础的辐射测量迅速发展,取得了公认为 0.3% 准确度的水平,这就具备了重新定义坎德拉的条件。在 1979 年 10 月第 10 届国际计量大会上,通过了如下的决议:坎德拉(cd)是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ (W/sr)。

坎德拉这个新定义是建立在单色辐射的最大光谱光视效能 $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 基础上的,这个值的选定是经过仔细研究,并以实验结果为依据。此值保证了光度量值的延续性,使重新定义的坎德拉与 1948 年批准的光度单位没有明显偏差。其次,此值不仅适用于明视觉的光度量,而且也适用于暗视觉的光度量。因为明视觉 $V(\lambda)$ 曲线与暗视觉 $V'(\lambda)$ 曲线恰好交于 555.8nm 波长上,它与明视觉曲线的峰值只差 0.8nm (见图 1-2),所以可把两种视觉效应定义在一个共同的 K 值上。

从坎德拉的新定义可看出,它没有规定复现光单位的手段,有利于发展辐射测量技术。通过 K_m 值使光度量与纯物理量紧密相联,也有利于国际比对。新定义的最大优点在于坎德拉的大小不受光谱光视效率的影响,即单位本身不受人眼因素的影响。

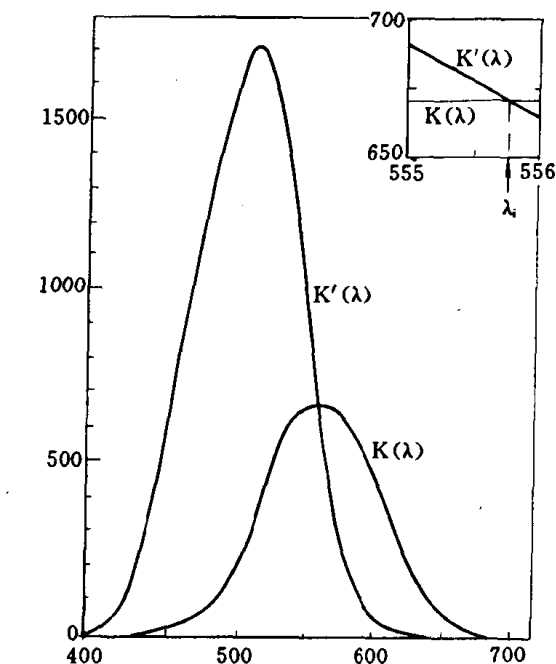


图 1-2 光谱光视效率函数

$V(\lambda)$ (明视觉)、 $V'(\lambda)$ (暗视觉)

新定义仍维持了坎德拉的主基准地位,因此,流明仍为导出单位,这和基本物理量把辐射功率和光功率(光通量)作为最基本量不相一致。所以光度体系中,这些量之间的主从关系有待进一步解决。

3 光学计量测试的范畴及发展趋势

人类从眼、耳、鼻、舌、皮肤等感觉器官接收外部信息,但来自光的信息就占 70%,光是人类、生物及自然界赖以生存和发展的重要物质。光的概念已从人眼对可见辐射而熟知的可见光波段,扩展到紫外和红外波段的光辐射。至今,光的应用已涉及到科学技术、工农业生产、国防、人民生活和贸易的各个领域,为了服务于这些领域,以利于探讨、分析、研究、掌握事物的客观规律,必须给出“量”的概念,为了准确获得“量”值,只有通过计量测试。

光学计量测试包括的范围很广泛,分类方法也很多,下面按照计量部门的分类方法来阐述。

3.1 光度计量测试

光度计量测试的主要参数有发光强度、光通量、亮度及照度等。发光强度单位为“坎德拉”(cd)，“坎德拉”是国际单位制中 7 个基本单位之一,它是不可能从其它单位直接导出的。

上节已叙述过在 1979 年第 16 届国际计量大会上通过了发光强度坎德拉的新定义。有了坎德拉基本单位定义,即可导出光通量、亮度及光源产生的照度和色度等单位。

在复现坎德拉的发光强度基准建立之后,可将其单位值传递到副基准灯组保存和向高色温副基准灯过渡。有了发光强度的基准,便不难建立计量其它光度学参量的副基准,在基准建立后,就可以利用各种光探测器,如光电光度计,很方便地测量出各种光度学参数。

我国已于 1974 年完成了全部复现光度单位工作,通过了国家级鉴定,开始独立自主地传递我国自己的量值,复现“坎德拉”单位的不确定度达到 0.3%。1984 年我国用绝对辐射计复现了坎德拉的新定义,不确定度达 0.1%,