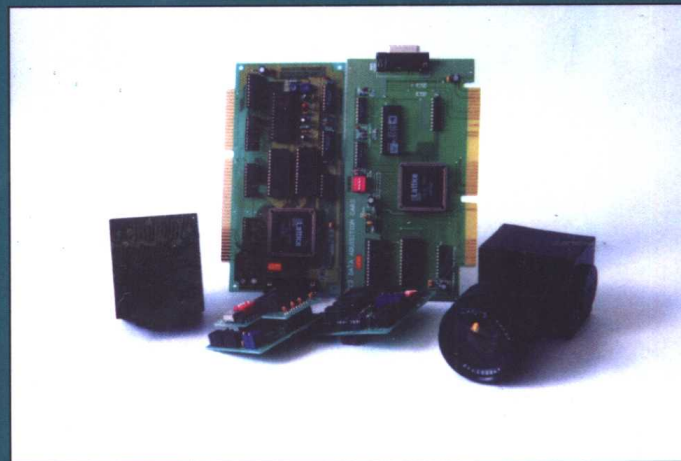
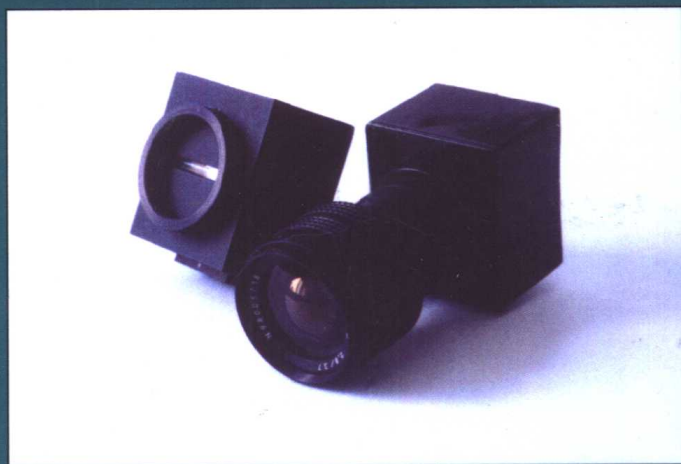
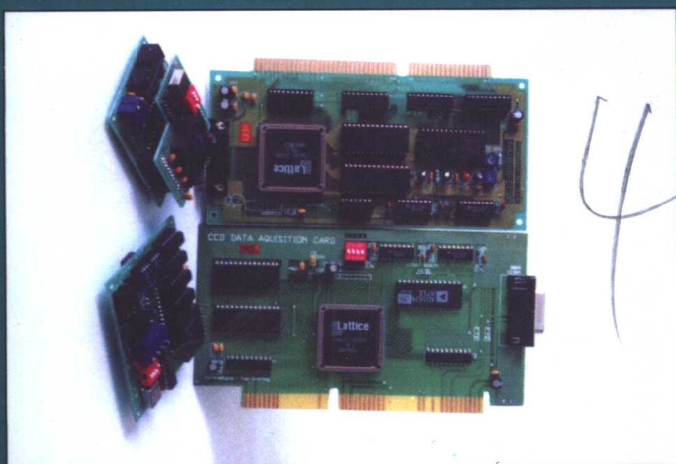


CCD

应用技术

王庆有 编著



天津大学出版社

CCD 应用技术

王庆有 编著

天津大学出版社

内 容 简 介

本书从应用角度讲述了电荷耦合器件(CCD)的基本工作原理,典型线阵、面阵 CCD 的驱动电路,各种线阵、面阵 CCD 的特性参数;CCD 应用中的有关光源、光学系统、计算机数据采集和处理的方法等,最后例举了 CCD 的一些典型应用实例。

本书可作为计量测试仪器、测控技术与仪器、光电信息工程、光电技术与仪器、自动化仪表等专业的本科生及研究生教材,也可作为光电技术领域科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

CCD 应用技术/王庆有等编. —天津:天津大学出版社,2000.11

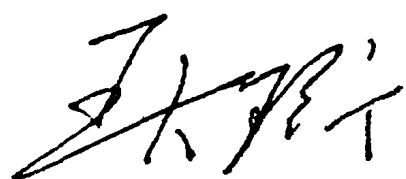
ISBN 7-5618-1364-3

I. C… II. 王… III. 电荷耦合器件 IV. TN386.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76059 号

出 版 天津大学出版社
出版人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 天津大学印刷厂
发 行 新华书店天津发行所
开 本 880mm×1230mm 1/16
印 张 16.25
字 数 587 千
版 次 2000 年 11 月第 1 版
印 次 2000 年 11 月第 1 次
印 数 1—4 000
定 价 24.00 元

CCD 技术是一项具有广泛应用前景的新技术。近年来,该技术的应用和研究在国内外发展很快,而且还在发展。《CCD 应用技术》是作者们将近年来历次教学讲义经审慎系统化而写成的,所反映的内容具有先进性和实用性。希望它能成为光电工程和现代测试技术科技人员的有益参考书。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王大俊' (Wang Dajun), written in a cursive style.

前 言

CCD(Charge Coupled Devices)电荷耦合器件是20世纪70年代初发展起来的新型半导体集成光电器件。它是由美国贝尔电话实验室的W.S.Boyle和G.E.Smith于1970年首先提出的,在经历了一段时间研究之后,建立了以一维势阱模型为基础的非稳态CCD理论。近30年来,CCD器件及其应用技术的研究取得了惊人的进展,特别是在图像传感和非接触测量领域的发展更为迅速。目前CCD应用技术已成为集光学、电子学、精密机械与计算机技术为一体的综合性技术,在现代光子学、光电检测技术和现代测试技术领域成果累累,方兴未艾。

为适应CCD科学技术的发展和培养人才的需要,我们曾于1993年出版了《CCD应用技术》一书,并作为天津大学精密仪器与光电子学院的本科生及研究生教材,南开大学等兄弟院校也把该书选为教材。在中国光学学会的组织与指导下,我们还在全国范围内举办了15届“CCD应用技术”讲习班,使这项新技术得以进一步推广和发展。

近年来,随着大规模集成电路的发展,纳米技术日趋成熟,CCD器件的品质随之越来越高,应用的广度也越来越大。为了使CCD的最新成果与技术及时得以推广,我们组织力量重新编写了本书,并被列为天津大学的95重点教材。

本书共分10章68节,主要内容包括光电技术基础理论,CCD的基本工作原理、特性,典型器件分析,CCD与计算机接口技术,CCD基本应用实例等主要技术及理论问题。愿该书的出版能如王大珩院士为本书题词中所说:“希望它能成为光电工程 and 现代测试技术科技人员的有益参考书。”

本书的编写受到科技界老前辈和光电工程领域专家们的大力支持和帮助,王大珩院士、母国光院士、张以谟教授和叶声华教授等都非常关心本书的出版工作,在此向他们致以深深的谢意!

本书由天津大学王庆有教授编著,参加编写的人员有:林家明副教授(编写第五、第九及第十章的各一部分);徐桂英副编审(编写第八章);杨隆荣先生(编写第五章的一部分);其余部分均由王庆有教授编写。

为了确保质量,特聘请天津大学孙学珠教授和南开大学牛文成教授进行了认真细致的校审,对两位教授利用暑假期间为本书所作的宝贵工作在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中主要参考了由王庆有、孙学珠主编的“CCD应用技术”一书(1993年版)。为此,对该书的编者孙学珠教授、田学飞副教授、陈本智教授及何在新先生等表示诚挚的感谢。

另外,本书在编写过程中得到了国内该领域众多老师和朋友的支持和帮助,为本书提供了大量素材和技术资料,他们是:清华大学孙培懋、何树荣,天津大学叶声华、孙长库、苗振魁,北京理工大学张忠廉、陈卫剑、蒋月娟,长春光学精密机械学院纪明、赵铁钧、马宏、张国玉,国防科技大学吕海宝,南京理工大学李开明,空军第一航空学院黄宜军、施得恒,中国科学院西安光机所陈良益、张太镒、孙传东,中国科学院光电技术研究所沈忙作、陈旭南,中国科学院自动化研究所吴小宁,中国计量科学研究院李长贵,中国北方光电工业总公司张云熙,华北光电技术研究所许少华及公安部第一研究所刘秉强,还曾得到天津市联惠利电子科技有限公司员工及天津大学光电信息工程研究室郭青等同志的大力支持,在此也一并表示诚挚的谢意!

王庆有

2000年8月

责任编辑: 徐桂英
封面设计: 王 馨
技术设计: 赵淑芬

应用技术

ISBN 7-5618-1364-3



9 787561 813645 >

ISBN 7-5618-1364-3
TN·20 定价:24.00 元

目 录

第一章 光电技术基础	(1)
1.1 光的度量	(1)
1.2 物体热辐射	(6)
1.3 辐射度参量和光度参量的关系	(9)
1.4 半导体对光的吸收	(12)
第二章 光源	(15)
2.1 自然光源	(15)
2.2 人工光源	(16)
2.3 CCD 应用系统中光源和照度的匹配	(27)
第三章 CCD 的基本工作原理	(30)
3.1 电荷存储	(30)
3.2 电荷耦合	(31)
3.3 CCD 的电极结构	(32)
3.4 电荷的注入和检测	(36)
3.5 CCD 的特性参数	(38)
3.6 电荷耦合摄像器件	(39)
第四章 典型线阵 CCD 及其驱动器	(46)
4.1 用于尺寸测量的线阵 CCD	(46)
4.2 用于光谱探测的线阵 CCD	(52)
4.3 高速检测应用中的线阵 CCD	(58)
4.4 用于彩色图像采集的线阵 CCD	(64)
4.5 环形线阵 CCD	(71)
第五章 典型面阵 CCD	(75)
5.1 DL32 型面阵 CCD	(75)
5.2 TCD5130AC 面阵 CCD	(78)
5.3 TCD5390AD 面阵 CCD	(83)
5.4 IA-D2 型面阵 CCD	(87)
5.5 特种面阵 CCD	(89)
5.6 面阵 CCD 摄像器件的特性	(94)
5.7 面阵 CCD 的电荷积累时间与电子快门	(97)
5.8 MTV-2821CB 摄像机	(99)
第六章 CCD 彩色摄像机概述	(107)
6.1 三管 CCD 彩色摄像机	(107)
6.2 两管式 CCD 彩色摄像机	(110)
6.3 单管 CCD 彩色摄像机	(111)
6.4 典型单片彩色 CCD	(114)
6.5 彩色数码照相机简介	(117)
第七章 CCD 视频信号处理与计算机数据采集	(120)
7.1 CCD 视频信号的二值化处理	(120)
7.2 CCD 视频信号的量化处理	(124)
7.3 线阵 CCD 输出信号的 A/D 数据采集与接口	(127)
7.4 面阵 CCD 的数据采集与计算机接口	(137)
第八章 CCD 应用中的光学系统	(148)

8.1	光学系统成像基本计算公式	(148)
8.2	光学元件的成像特性	(151)
8.3	光学系统中光阑的作用	(157)
8.4	常用光电图像转换系统的成像特性	(160)
8.5	照明系统	(164)
8.6	远心光路在 CCD 动态测试中的应用	(166)
8.7	面阵 CCD 摄像机光学镜头的类型及其参数	(167)
8.8	线阵 CCD 常用的物镜	(171)
第九章	CCD 应用实例	(173)
9.1	CCD 用于一维尺寸的测量	(173)
9.2	CCD 用于二维位置的测量	(179)
9.3	线阵 CCD 的拼接技术在尺寸测量中的应用	(180)
9.4	CCD 用于平板位置的检测	(183)
9.5	CCD 用于轨道振动的非接触测量	(185)
9.6	用单个线阵 CCD 检测刚体的瞬态平面运动	(187)
9.7	CCD 用于钢管内径的检测	(189)
9.8	线阵 CCD 用于实时动态测量	(193)
9.9	CCD 高精度细丝直径测量系统	(197)
9.10	用 CCD 细分光栅栅距的位移传感器	(199)
9.11	用线阵 CCD 测量运动物体的瞬时位置	(202)
9.12	CCD 在 BGA 管脚三维尺寸测试中的应用	(204)
9.13	用线阵 CCD 检测成像物镜的光学传递函数	(207)
9.14	应用 CCD 自动测量透镜的曲率	(210)
9.15	CCD 用于 ICP-AES 探测与分析的研究	(213)
9.16	面阵 CCD 钢板长宽尺寸在线实时测量系统	(216)
9.17	CCD 用于光学系统像差测量	(217)
9.18	CCD 天文观测系统	(220)
9.19	CCD 光电显微分析仪	(222)
9.20	CCD 工业内窥镜电视系统	(224)
9.21	CCD 水下电视系统	(225)
9.22	线阵 CCD 在扫描复印技术中的应用	(228)
第十章	特种 CCD 图像传感器	(231)
10.1	微光 CCD 图像传感器	(231)
10.2	红外 CCD 图像传感器	(242)
10.3	X 光 CCD 图像传感器	(246)
参考文献		(250)

第一章 光电技术基础

光电技术的理论基础是光的波粒二象性。光是以电磁波方式传播的物质。几何光学研究了光的成像规律,并依据光的波动性成功地解释了光的干涉、衍射等现象。然而,光的本质是物质,它还具有粒子性。光是以电磁波方式传播的粒子,称为光量子或光子。光子的静止质量为零。其能量和动量分别为

$$E = h\nu$$
$$p = \frac{h\nu}{c}$$

式中: h 为普朗克常数,为 $6.6261 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$; ν 为光的频率 (s^{-1}); c 为光在真空中的传播速度。

光的量子性成功地解释了光与物质作用时引起的光电效应,物质的光电效应证明了光的量子性。

电磁波谱的频率范围很宽,涵盖了由宇宙射线到无线电波 ($10^2 \sim 10^{25} \text{ Hz}$) 的广阔领域。图 1-1 所示为电磁波的波长分布及各波长区域的定义。由图可见,光波仅仅是电磁波中的一小部分,它包括的波长区间约从几纳米到一个毫米,即 $10^{-9} \sim 10^{-3} \text{ m}$ 的范围。在这个范围内,只有 $0.38 \sim 0.78 \text{ }\mu\text{m}$ 的光才能被人眼所见。

CCD 器件的光谱响应范围宽于人眼的视觉范围,一般在 $0.2 \sim 1.1 \text{ }\mu\text{m}$ 的波长范围内。特种材料的红外 CCD 的波长响应可扩展到几个微米,即 CCD 的光谱响应范围从远紫外、近紫外、可见光到近红外区,甚至到中红外区。

1.1 光的度量

为了定量分析光与物质相互作用所产生的光电效应、分析 CCD 器件的光电特性及用 CCD 定量计量各种光的度量,需要给出计量光波能量的参数和量纲。光的度量有两种方式,一种是物理的计量方式,称为辐射度学或称辐射度参数,它适用于整个电磁辐射谱区;另一种是从生理的角度,以人眼所见的光辐射对大脑的刺激程度来进行计量的度量方式,称为光度学或光度参数。光度参数只适用于 $0.38 \sim 0.78 \text{ }\mu\text{m}$ 的可见光谱区,超过这个谱区,没有任何意义。

辐射度参数与光度参数在概念上不一样,但它们的计量方法有许多相同之处,为讨论方便,常用相同的符号表示。为区别它们,常在对应符号的右下角标“e”表示辐射度参数,标“v”表示光度参数。

一、关于辐射源的参数

所谓辐射源的参数是指计量辐射源在辐射波长范围内发射连续光谱或单色光谱能量的参数。

1. 辐射能和光能

以辐射形式发射、传播或接收的能量称为辐射能,用符号 Q_e 表示,单位为 J。

光能是光通量对时间的积分,以 Q_v 表示,单位为 lms。

2. 辐射通量和光通量

辐射通量或辐射功率是以辐射形式发射、传播或接收的功率,或者说,在无穷小时间内,以辐射形式发射、传播或接收的辐射能除以无穷小时间的商叫辐射通量,以符号 Φ_e 表示,单位为 W,即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

(1-1)

电磁波名称	波长(m)
宇宙射线	10^{-14}
γ 射线	10^{-13}
	10^{-12}
	10^{-11}
X 光	10^{-10}
	10^{-9}
紫 外 线	10^{-8}
	10^{-7}
可 见 光	10^{-6}
红 外 线	10^{-5}
毫 米 波	10^{-4}
厘 米 波	10^{-3}
无线电波	10^{-2}
	10^{-1}
	10^0
	10^1
	10^2

图 1-1 电磁波谱的分布

若在时间 t 内单位时间发射、传播或接收的辐射能不随时间改变,则式(1-1)简化为

$$\Phi_e = \frac{Q_e}{t} \quad (1-2)$$

对可见光,光源表面在无穷小时间内发射、传播或接收所有可见光谱光能被无穷小时间间隔来除,定义为光通量 Φ_v ,即

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1-3)$$

若在时间 t 内单位时间发射、传播或接收的光能不随时间改变,则式(1-3)简化为

$$\Phi_v = \frac{Q_v}{t} \quad (1-4)$$

Φ_v 的通用单位为 lm 。

3. 辐射出射度和光出射度

对有限大小面积 A 的面光源,表面某点处的面元向半球面空间内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 与该面元面积 dA 之比,定义为辐射出射度 M_e ,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

M_e 的通用单位是 W/m^2 。

由式(1-5),面光源 A 向半球面空间内发射的总辐通量

$$\Phi_e = \int_{(A)} M_e dA \quad (1-6)$$

对可见光,面光源 A 表面某一点处的面元向半球面空间发射的光通量 $d\Phi_v$ 与面元面积 dA 之比称为光出射度 M_v ,即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (1-7)$$

其单位是 lm/m^2 。

对均匀发射辐射的面光源有

$$M_v = \frac{\Phi_v}{A}$$

由式(1-7),面光源 A 向半球面空间发射的总光通量

$$\Phi_v = \int_{(A)} M_v dA \quad (1-8)$$

4. 辐射强度和发光强度

对点光源在给定方向的立体角元 $d\Omega$ 内发射的辐射通量 $d\Phi_e$,与该方向立体角元 $d\Omega$ 之比定义为点光源在该方向的辐射强度 I_e ,即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-9)$$

其单位为 W/sr 。

点光源在有限立体角 Ω 内发射的辐通量

$$\Phi_e = \int_{(\Omega)} I_e d\Omega$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总辐通量

$$\Phi_e = I_e \int_0^{4\pi} d\Omega = 4\pi I_e \quad (1-10)$$

对可见光,与式(1-9)类似,定义发光强度

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (1-11)$$

对各向同性的点光源向所有方向发射的总光通量

$$\Phi_v = \int_{(\Omega)} I_v d\Omega = 4\pi I_v \quad (1-12)$$

一般点光源是各向异性的,其发光强度分布随方向而异。

发光强度的单位是坎德拉(candela),简称为坎(cd)。1979年第十六届国际计量大会通过决议,将坎德拉重新定义为:在给定方向上能发射 540×10^{12} Hz 的单色辐射源,在此方向上的辐射强度为 $(1/683)$ W/sr 的发光强度称为 1cd。

由式(1-11),对发光强度为 1cd 的点光源,向给定方向 1 球面度内发射的光通量定义为 1 lm。发光强度为 1cd 的点光源发出的总光通量为 $4\pi I_v = 12.566$ lm。

5. 辐射亮度和亮度

光源表面某一点处的面元在给定方向上的辐射强度除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积,称为辐射亮度 L_e ,即

$$L_e = \frac{I_e}{dA \cos \phi} = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega dA \cos \phi} \quad (1-13)$$

辐射亮度 L_e 的通用单位是 $\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ 。

对可见光,亮度 L_v 定义为光源表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度除以该面元在垂直给定方向平面上的正投影面积,即

$$L_v = \frac{I_v}{dA \cos \phi} = \frac{d^2 \Phi_v}{d\Omega dA \cos \phi} \quad (1-14)$$

L_v 的通用单位是 cd/m^2 。

若 L_e 、 L_v 与光源发射辐射的方向无关,且由式(1-13)、(1-14)表示,这样的光源称为余弦辐射体或朗伯辐射体。黑体是一个理想的余弦辐射体,而一般光源的亮度多少与方向有关。粗糙表面的辐射体或反射体以及太阳等是一个近似的余弦辐射体。

余弦辐射体表面某一点处面元 dA 向半球面空间发射的通量

$$d\Phi = \iint L \cos \phi dA d\Omega$$

式中: $d\Omega = \sin \phi d\phi d\theta$ 。

对上式在半球面空间内积分的结果为

$$\begin{aligned} d\Phi &= L dA \int_{\theta=0}^{2\pi} d\theta \int_{\phi=0}^{\pi/2} \sin \phi \cos \phi d\phi \\ &= \pi L dA \end{aligned}$$

由上式得到余弦辐射体的 M_e 与 L_e 、 M_v 与 L_v 的关系为

$$L_e = \frac{M_e}{\pi} \quad (1-15)$$

$$L_v = \frac{M_v}{\pi} \quad (1-16)$$

6. 辐射效率与发光效率

光源所发射的总辐通量 Φ_e 与外界提供给光源的功率 P 之比称为光源的辐射效率 η_e 。光源发射的总光通量 Φ_v 与提供的功率 P 之比称为发光效率 η_v 。它们分别为

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} \times 100\% \quad (1-17)$$

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P} \quad (1-18)$$

辐射效率 η_e 无量纲,发光效率 η_v 的单位是 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

对限定在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐射效率

$$\eta_{e\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{P} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中: $\Phi_{e\lambda}$ 称为光源辐射通量的光谱密集度,简称为光谱辐通量。

二、与接收器有关的参数

接收光源发射辐射的接收器可以是探测器,也可以是反射辐射的反射器,或两者兼有的器件。对接苏器的

有关参数定义如下。

1. 辐照度与照度

辐照度 E_e 是照射到物体表面某一点处面元的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该面元的面积 dA 的商,即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \tag{1-20}$$

E_e 的通用单位是 W/m^2 。

若辐通量是均匀地照射在物体表面上,则式(1-20)简化为

$$E_e = \frac{\Phi_e}{A}$$

注意,不要把辐照度 E_e 与辐出度 M_e 混淆起来。虽然两者单位相同,但定义不一样。辐照度是从物体表面接收辐通量的角度来定义的,辐出度是从面光源表面发射辐射的角度来定义的。

本身不辐射的反射体接收辐射后,吸收一部分,反射一部分。若把反射体当作辐射体,则光谱辐出度 $M_{er}(\lambda)$ (r 代表反射)与辐射体接收的光谱辐照度 $E_e(\lambda)$ 的关系为

$$M_{er}(\lambda) = P_e(\lambda) E_e(\lambda) \tag{1-21}$$

式中: $P_e(\lambda)$ 为辐射度光谱反射比,是波长的函数。

式(1-21)对波长积分,得到反射体的辐出度

$$M_{er} = \int \rho_e(\lambda) E_e(\lambda) d\lambda$$

对可见光,照射到物体表面某一面元的光通量 $d\Phi_v$ 除以该面元面积 dA 称为照度 E_v ,即

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \tag{1-22}$$

E_v 的通用单位是 lx。1 lx 等于 1 lmm^{-2} 。

对接收光的反射体,同样有

$$M_{vr}(\lambda) = \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) \tag{1-23}$$

$$M_{vr} = \int \rho_v(\lambda) E_v(\lambda) d\lambda$$

式中: $\rho_v(\lambda)$ 为光度光谱反射比,是波长的函数。

2. 辐照量和曝光量

照射物体表面某一点面元的辐照度 E_e 在时间 t 内的积分称为辐照量 H_e ,即

$$H_e = \int_0^t E_e dt \tag{1-24}$$

辐照度 H_e 的单位是 Ws/m^2 。

如果面元的辐照度 E_e 与时间无关,式(1-24)简化为

$$H_e = E_e t$$

与辐照量 H_e 对应的光度量是曝光量 H_v ,它定义为物体表面某一点面元接收的光照度 E_v 在时间 t 内的积分,即

$$H_v = \int_0^t E_v dt \tag{1-25}$$

H_v 的单位是 lxs。

表 1-1 综合了上面讨论的辐射度量和光度量的定义。

表 1-1 辐射度量和光度量的定义

辐 射 度 参 量				光 度 参 量			
名 称	符号	定 义	单 位	名 称	符号	定 义	单 位
辐射能	Q_e		J[焦(耳)]	光 量	Q_v	$Q_v = \Phi_v t$	$\text{lm} \cdot \text{s}$ [流(明)秒]
辐通量	Φ_e	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W[瓦(特)]	光通量	Φ_v	$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$	lm [流(明)]
辐功率				光功率			
辐出度	M_e	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m^2 [瓦(特)每平方米]	光出射度	M_v	$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lm/m^2 [流(明)每平方米]

续表 1-1

辐 射 度 参 量				光 度 参 量			
辐强度	I_e	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$	W/sr〔瓦(特)每球面度〕	发光强度	I_v	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	cd〔坎(德拉)〕
辐亮度	L_e	$L_e = \frac{dI_e}{dA \cos\phi}$ $= \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dA \cos\phi}$	W/(sr·m ²) 〔瓦(特)每球面度平方米〕	光亮度	L_v	$L_v = \frac{dI_v}{dA \cos\phi}$ $= \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\phi}$	cd/m ² 〔坎(德拉)每平方米〕
辐照度	E_e	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$	W/m ² 〔瓦(特)每平方米〕	光照度	E_v	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	lx〔勒(克斯)〕
辐照量	H_e	$H_e = \int_0^t E_e dt$	J/m ² (焦耳/米 ²)	曝光量	H	$H = \int_0^t E_v dt$	lx·s〔勒(克斯)(小)时〕

三、光源的辐射光谱分布参量

通常光源发射各种波长的辐射能按波长分布在辐射光谱范围内。光源在无穷小波长范围内发射的辐射量除以无穷小波长的商称为辐射量的光谱密度 $X_{e\lambda}$ ，简称为光谱辐射量，即

$$X_{e\lambda} = \frac{dX_e}{d\lambda} \tag{1-26}$$

式中：通用符号 $X_{e\lambda}$ 是波长的函数，代表所有光谱辐射量，如光谱辐通量 $\Phi_{e\lambda}$ 、光谱辐出度 $M_{e\lambda}$ 、光谱辐强度 $I_{e\lambda}$ 、光谱辐亮度 $L_{e\lambda}$ 、光谱辐照度 $E_{e\lambda}$ 。

同样以符号 $X_{v\lambda}$ 表示光源在可见光区无穷小波长范围内发射的光度量称为光度量的光谱密集度，简称为光谱光度量，即

$$X_{v\lambda} = \frac{dX_v}{d\lambda} \tag{1-27}$$

式中： $X_{v\lambda}$ 代表光谱光通量 $\Phi_{v\lambda}$ 、光谱光出射度 $M_{v\lambda}$ 、光谱发光强度 $I_{v\lambda}$ 和光谱光照度 $E_{v\lambda}$ 。

光源的辐射度参量 $X_{e\lambda}$ 随波长 λ 的分布曲线称为该光源的绝对光谱辐射分布曲线。该曲线任一波长 λ 的 $X_{e\lambda}$ 除以某一波长 $\lambda_{\max}$ 处的光谱辐射量最大值 $X_{e\lambda_{\max}}$ 的商 $X_{e\lambda r}$ ，称为光源的相对光谱辐射量，即

$$X_{e\lambda r} = \frac{X_{e\lambda}}{X_{e\lambda_{\max}}} \tag{1-28}$$

相对光谱辐射量 $X_{e\lambda r}$ 与波长 λ 的关系称为光源相对光谱辐射分布。

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内发射的辐通量

$$\Delta\Phi_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda$$

若积分区间从 $\lambda_1 = 0$ 或 $\lambda_2 \rightarrow \infty$ ，得到光源发出的所有波长的总辐通量

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda = \Phi_{e\lambda_{\max}} \int_0^\infty \Phi_{e\lambda r} d\lambda \tag{1-29}$$

光源在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的辐通量 $\Delta\Phi_e$ 与总辐通量 Φ_e 之比称为该光源的比辐射 q_e ，即

$$q_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda} d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda} \tag{1-30}$$

式中 q_e 没有量纲。

四、量子流速率

光源发射的辐功率是每秒发射光子能量的总和。光源在给定波长 λ 处无穷小波长范围内发射的辐通量 $d\Phi_e$ 除以该波长 λ 的光子能量 $h\nu$ ，得到光源在该波长 λ 处每秒发射的光子数，称为光谱量子流速率 $dN_{e\lambda}$ ，即

$$dN_{e\lambda} = \frac{d\Phi_e}{h\nu} = \frac{\Phi_{e\lambda} d\lambda}{h\nu} \tag{1-31}$$

光源在波长 λ 为 $0 \rightarrow \infty$ 内发射的总量子流速率

$$N_e = \int_0^\infty \frac{\Phi_{e\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\Phi_e \lambda_{\max}}{hc} \int_0^\infty \Phi_{e\lambda r} \lambda d\lambda \tag{1-32}$$

对可见光区域,光源每秒发射的总光子数

$$N_v = \int_{0.38 \mu\text{m}}^{0.78 \mu\text{m}} \frac{\Phi_{e\lambda}}{hc} \lambda d\lambda \quad (1-33)$$

量子流速率 N_e 或 N_v 的通用单位为光子数/s。

1.2 物体热辐射

物体通常以两种不同形式辐射能量。

第一种是热辐射。凡高于零绝对温度的物体都具有辐射的能力,其光谱辐射量 $X_{e\lambda}$ 是波长 λ 和温度 T 的函数。温度低的物体发射红外光,温度升高到 500°C 时开始发射一部分暗红色光,再升高到 1500°C 时开始发白光。物体靠加热保持一定温度使内能不变而持续辐射的辐射形式称为物体热辐射或温度辐射。凡能发射连续光谱,且辐射是温度的函数的物体叫热辐射体,如一切动植物、太阳、钨丝白炽灯等。

第二种是发光。物体不是靠加热保持温度使辐射维持下去,而是靠外能激发辐射,这种辐射称为发光。发光光谱是非连续光谱,且不是温度的函数。靠外能激发发光的方式有电致发光(气体放电产生的辉光)、光致发光(日光灯发射的荧光)、化学发光(磷在空气中缓慢氧化发光)、热发光(火焰中的钠或钠盐发射的黄光)。发光是非平衡辐射过程,发光光谱主要是线光谱或带光谱。

下面讨论物体热辐射的基本定律,并计算人眼的光度参量。

一、黑体辐射定律

1. 普朗克辐射定律

能完全吸收从任何方向入射的各种波长的辐射,而且在某一温度下每一方向上所有波长下都有最大辐射功率的物体称为黑体。黑体是余弦辐射体,其光谱辐出度 $M_{e\lambda}$ (角标“s”表示黑体)由普朗克公式表示为

$$M_{e\lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-34)$$

式中: k 是波尔兹曼常数; h 是普朗克常数; T 是绝对温度; c 是真空中光速。

式(1-34)表明,黑体表面 A 向半球面空间发射波长 λ 的光谱辐通量除以面积 A 的商 $M_{e\lambda}$ 是黑体温度 T 和波长 λ 的函数,这就是普朗克辐射定律。

黑体光谱辐亮度 $L_{e\lambda}$ 和光谱辐强度 $I_{e\lambda}$ 分别为

$$L_{e\lambda} = \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-35)$$

$$I_{e\lambda} = \frac{2c^2 h A \cos\phi}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (1-36)$$

图 1-2 绘出了黑体辐射的相对光谱辐亮度 $L_{e\lambda r}$ 与波长的等温关系曲线。图中每一条曲线有一个最大值,最大值的位置随温度升高向短波方向移动。

2. 斯尼藩-波尔兹曼定律

将式(1-34)对波长 λ 求积分,得到黑体面 A 发射的总辐出度

$$M_{es} = \int_0^\infty M_{e\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-37)$$

式中: σ 是斯尼藩-波尔兹曼常数,它由下式决定

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

由式(1-37), M_{es} 与 T 的四次方成正比,这就是黑体辐射的斯尼藩-波尔兹曼定律。

例如人体温度 310 K 、纯铂的凝固点温度 2045 K 、色温 2856 K 的钨丝白炽灯等的总辐出度 M_{es} 和辐亮度 L_{es} (设它们是黑体)分别为

$$\begin{aligned}
 M_{\text{es}310\text{k}} &= \sigma \cdot 310^4 = 523.6 \text{ W/m}^2 \\
 L_{\text{es}310\text{k}} &= M_{\text{es}310\text{k}} / \pi = 166.7 \text{ W/m}^2 \text{ sr} \\
 M_{\text{es}2045\text{k}} &= \sigma \cdot 2045^4 = 9.92 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \\
 L_{\text{es}2045\text{k}} &= M_{\text{es}2045\text{k}} / \pi = 3.16 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \text{ sr} \\
 M_{\text{es}2855\text{k}} &= \sigma \cdot 2856^4 = 3.77 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \\
 L_{\text{es}2856\text{k}} &= M_{\text{es}2856\text{k}} / \pi = 1.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \text{ sr}
 \end{aligned} \quad (1-38)$$

3. 维恩位移定律

将普朗克公式(1-34)对波长 λ 求微分后令其等于零,则得到最大光谱辐出度 $M_{\text{es}\lambda_{\text{max}}}$ 所对应的波长 λ_{max} 与绝对温度 T 的关系为

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2898}{T} (\mu\text{m}) \quad (1-39)$$

可见,最大光谱辐出度对应的波长与绝对温度的乘积是常数。当温度升高时,最大光谱辐出度对应的波长向短波方向位移,这就是维恩位移定律。

将式(1-39)代入式(1-34),得到黑体最大光谱辐出度

$$M_{\text{es}\lambda_{\text{max}}} = 1.309 T^5 \times 10^{-15} \text{ Wcm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \text{ K}^{-5}$$

例如人体的最大光谱辐出度 $M_{\text{es}\lambda_{\text{max}}} = 31.8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, 对应 $T = 310 \text{ K}$ 的波长 $\lambda_{\text{max}} = 9.65 \mu\text{m}$ 。

以上三个定律统称为黑体辐射定律。

二、辐射体的分类及其温度表示

1. 热辐射体的分类

按辐射本领,热辐射体可分为黑体和非黑体。实际上,绝大多数辐射体都是非黑体。非黑体包括灰体和选择性辐射体,也有混合辐射体。

1) 灰体

若辐射体的光谱辐出度 $M_{\text{e}\lambda}$ 与同温度黑体的光谱辐出度 $M_{\text{es}\lambda}$ 之比是一个与波长无关的系数时,该辐射体称为灰体。系数

$$\epsilon = \frac{M_{\text{e}\lambda}}{M_{\text{es}\lambda}} < 1 \quad (1-40)$$

称为辐射体的发射率。

灰体的光谱辐射分布与黑体的光谱辐射分布形状相同,最大值的位置一致(图 1-3)。通常大多数热辐射体可以当作灰体或干脆当作黑体。

2) 选择性辐射体

凡不服从黑体辐射定律的辐射体称为选择性辐射体,其光谱发射率 $q(\lambda)$ 是波长的函数,辐射分布曲线可能有几个最大值。如磷砷化镓发光二极管属于选择性辐射体。

2. 热辐射体的温度表示

对具有一定亮度和颜色的炽热物体,根据黑体辐射定律把热辐射体当作灰体,以三方面标测物体的温度。

1) 辐射温度 T_r

当热辐射体发射的总辐通量与黑体的总辐通量相等时,以黑体的温度标志该热辐射体的温度叫辐射温度 T_r 。

由式(1-37),若辐出度 M_{e} 已知,辐射温度 T_r 就能求出。通常利用图 1-4 的全辐射法测温装置,把黑体表面 A 发射的辐射功率经透镜聚焦在热电偶 B 上,用电流计 G 测量热电势电流 I_G (为防止杂散光的影响,整个

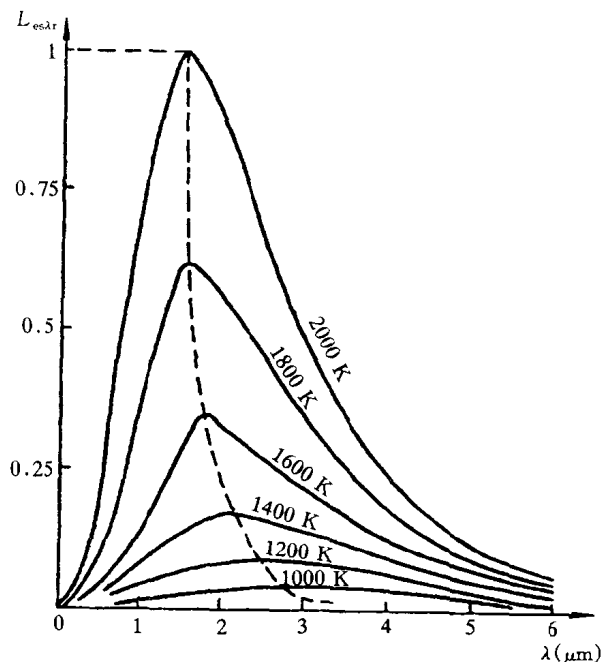


图 1-2 $L_{\text{es}\lambda r}$ 与 λ 、 T 的关系

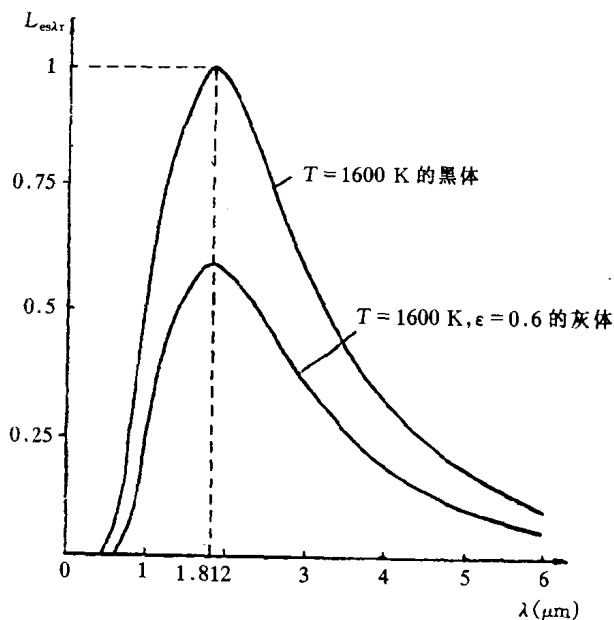


图 1-3 黑体与灰体辐射分布

装置应放在暗室中)。电流 I_G 与辐射温度 T_s 的关系为

$$I_G = dM_{\epsilon} = b\sigma T_e^4 \tag{1-41}$$

式中: b 是与测量系统和热电偶材料有关的系数。

由式(1-41),在电流计 G 的刻度上可以直接标出黑体辐射温度 T_e 。利用这个已标定的高温计就可以测量炽热物体的温度。但是炽热物体是灰体,测出的温度 T_e 与炽热物体实际温度 T_b 有一定的偏差。由式(1-41)、(1-37), T_b 与 T_e 的关系为

$$T_e = \epsilon^{1/4} T_b \tag{1-42}$$

两温度的相对偏差

$$\gamma_e = \frac{T_e - T_b}{T_e} = 1 - \epsilon^{-1/4} \tag{1-43}$$

由式可见, ϵ 越小,相对偏差 γ_e 越大; ϵ 接近 1 时,相对偏差趋于零。

表 1-2 列出几种物质的发射率。由发射率和测量的辐射温度 T_e 可以算出物体的实际温度 T_b 。

表 1-2 几种物质的发射率

物 质	温度(K)	ϵ	物 质	温度(K)	ϵ
钨	1 300	0.15	铁	1 500	0.11
	2 300	0.29	氧化铁		0.89
	3 300	0.34	镍		0.06
钼	1 300	0.12	氧化镍		0.85
	2 300	0.23	铂		0.15
钽	2 300	0.25			
碳	1 500	0.54	熔化的铜	1 400	0.15
银	1 300	0.04	氧化铜		0.54

2)色温 T_f

当热辐射体发射的可见光区域的光谱辐射分布具有与某黑体的可见光部分的光谱辐射分布相同的形状时,以黑体的温度来标志该热辐射体的温度称为热辐射体的色温 T_f 。

色温 T_f 的测量方法如下:(如双波段测温仪)

在可见光区选择两个波长($\lambda_1 = 0.45 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.65 \mu\text{m}$)的滤光片滤掉黑体表面的其他波长的辐射,透过滤光片的黑体两波长的辐亮度之比

$$\frac{L_{e\lambda_1}}{L_{e\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^5 (e^{\frac{hc}{\lambda_2 k T_f}} - 1)}{\lambda_1^5 (e^{\frac{hc}{\lambda_1 k T_f}} - 1)} \approx \frac{\lambda_2^5 e^{\frac{hc}{\lambda_2 k T_f}}}{\lambda_1^5 e^{\frac{hc}{\lambda_1 k T_f}}}$$

经热敏器件转换成电信号,该电信号与黑体色温 T_f 有关。

同样,用两滤光片透过的炽热体的两波长 $\lambda_1 = 0.45 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.65 \mu\text{m}$ 的辐亮度之比为

$$\frac{L_{e\lambda_1}}{L_{e\lambda_2}} \approx \frac{\epsilon(\lambda_2) \lambda_2^5 e^{\frac{hc}{\lambda_2 k T_{0b}}}}{\epsilon(\lambda_1) \lambda_1^5 e^{\frac{hc}{\lambda_1 k T_{0b}}}}$$

经同一热敏器件转换成电信号。若两电信号相等,即上两式相等,得到色温

$$T_f = \frac{hcT_{0b} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{kT_{0b} \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)} + hc \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \tag{1-44}$$

式中: $\epsilon(\lambda_1)$ 、 $\epsilon(\lambda_2)$ 分别是波长 λ_1 、 λ_2 的光谱发射率。

色温 T_f 与热辐射体的实际温度 T_{0b} 的相对偏差

$$\gamma_f = \frac{-kT_{0b} \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)}}{hc \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)} \tag{1-45}$$

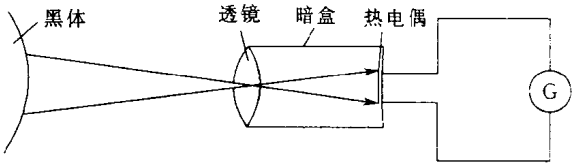


图 1-4 全辐射法测温装置简图

将 $\lambda_1 = 0.45 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.65 \mu\text{m}$ 及 h 、 c 、 k 的值代入式(1-45),得到

$$\gamma_f = 1.02 \times 10^{-4} T_{0b} \ln \frac{\epsilon(\lambda_1)}{\epsilon(\lambda_2)}$$

由式可见,当 $\epsilon(\lambda_1)$ 与 $\epsilon(\lambda_2)$ 越接近,相对偏差 γ_f 越小。通常 $\epsilon(\lambda_1) \approx \epsilon(\lambda_2)$, $\gamma_f \rightarrow 0$ 。

3) 亮温度 T_v

当热辐射体在可见光区某一波长 λ_0 的辐亮度 $L_{e\lambda_0}$ 等于黑体同一波长 λ_0 的辐亮度 $L_{e\lambda_0}$ 时,以黑体温度 T_v 来标志该热辐射体的温度称为亮温度 T_v 。

通常在可见光区选择中心波长为 λ_0 的滤光片来滤掉其他波长的光。透过滤光片的黑体某波长 λ_0 的辐亮度 $L_{e\lambda_0}$ 与温度 T_v 的关系为

$$L_{e\lambda_0} \approx \frac{2hc^2}{\lambda_0^5 e^{\frac{hc}{\lambda_0 k T_v}}}$$

光谱辐射亮度 $L_{e\lambda_0}$ 经光电器件转换成电信号。

同样,被测热辐射体在同一波长 λ_0 处的辐亮度 $L_{e\lambda_0}$ 为

$$L_{e\lambda_0} \approx \frac{\epsilon(\lambda_0) 2hc^2}{\lambda_0^5 e^{\frac{hc}{\lambda_0 k T_{0b}}}}$$

经同一光电器件转换成电信号。当两信号相等时,则亮温度

$$T_v = \frac{hc T_{0b}}{hc - \lambda_0 k T_{0b} \ln \epsilon(\lambda_0)} \quad (1-46)$$

若选择的中心波长 $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$,由 $\epsilon(\lambda_0)$ 和测量的亮温度 T_v 可求出热辐射体的实际温度 T_{0b} 。 T_v 与 T_{0b} 的相对偏差

$$\gamma_v = \frac{T_v - T_{0b}}{T_v} = \frac{\lambda_0 k T_{0b}}{hc} \ln \epsilon(\lambda_0) \quad (1-47)$$

将 $\lambda_0 = 0.65 \mu\text{m}$ 及 k 、 h 、 c 的数值代入,得到

$$\gamma_v = 4.51 \times 10^{-5} T_{0b} \ln \epsilon(\lambda_0)$$

可见,相对偏差由 $\epsilon(\lambda_0)$ 决定。当 $\epsilon(\lambda_0) = 1$ 时, $\gamma_v = 0$ 。

以上热辐射体的三种温度标测中,色温与实际温度的偏差最小,亮温度次之,辐射温度与实际温度的偏差最大。通常以测量色温代表炽热物体的温度。

1.3 辐射度参量和光度参量的关系

一、人眼的视觉灵敏度

物体发射的光或反射的光通过人眼到达视网膜上产生实物感,这是由于光刺激视网膜上的锥状细胞或柱状细胞的原因。锥状细胞只对光亮度超过 10^{-3}cd/m^2 的光才敏感,敏感的光谱范围是 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$,在 $0.555 \mu\text{m}$ 处最敏感,且能分辨出各种颜色。锥状细胞的这种视觉称为白昼视觉或明视觉。当亮度低于 10^{-3}cd/m^2 时,锥状细胞不敏感,而柱状细胞起作用。柱状细胞敏感的光谱范围是 $0.33 \sim 0.73 \mu\text{m}$,在 $0.507 \mu\text{m}$ 最敏感,但不能分辨出各种颜色。柱状细胞的这种视觉叫暗视觉或夜间视觉。

用各种单色辐射分别刺激正常人眼睛的锥状细胞,当刺激程度相同时,发现波长 $\lambda_{\max} = 0.555 \mu\text{m}$ 处的光谱辐亮度 $L_{e0.555 \mu\text{m}}$ 小于其他波长光谱辐亮度 $L_{e\lambda}$ 。把波长 $\lambda_{\max} = 0.555 \mu\text{m}$ 的光谱辐亮度 $L_{e\lambda_{\max}}$ 被其他波长 λ 的光谱辐亮度 $L_{e\lambda}$ 除得的商,定义为正常人眼的明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$,即

$$V(\lambda) = \frac{L_{e\lambda_{\max}}}{L_{e\lambda}} \quad (1-48)$$

$V(\lambda)$ 是一个与波长有关的相对值(图 1-5)。表 1-3 粗略地列出正常人眼的 $V(\lambda)$ 、 $V'(\lambda)$ 、 $K(\lambda)$ 与 λ 的数值关系。

对正常人眼的柱细胞,以微弱的各种单色辐射刺激时,发现在相同刺激程度下,波长 $\lambda'_{\max} = 0.507 \mu\text{m}$ 处