

目 录

绪论	(1)
第一章 视觉特性与色度学基础	(3)
1.1 光的基础知识	(3)
一、可见光	(3)
二、光源与色温	(4)
三、光的度量——常用光学单位	(6)
1.2 人眼的视觉特性与电视图像参数	(9)
一、视敏特性	(10)
二、亮度感觉与电视图像的亮度、灰度、对比度	(12)
三、人眼的分辨力与电视图像的清晰度	(15)
四、视觉惰性与临界闪烁频率	(17)
1.3 色度学基础	(18)
一、人眼的彩色视觉	(19)
二、物体的颜色与彩色三要素	(20)
三、三基色原理	(22)
四、彩色的计算及色度图	(23)
思考题与习题	(42)
第二章 黑白图像传送原理	(45)
2.1 图像的分解与传送	(45)
一、图像的分解	(45)
二、图像的传送	(45)
2.2 光电及电光转换原理	(47)
一、光电转换原理(摄像过程)	(47)
二、电光转换原理(显像过程)	(49)
三、光电与电光转换过程中的非线性	(50)
2.3 电视扫描原理	(53)
一、逐行扫描	(53)
二、隔行扫描	(59)
三、扫描的同步	(64)
四、扫描参数的确定	(69)
2.4 黑白全电视信号	(73)
一、黑白全电视信号的组成	(73)
二、全电视信号的特点	(77)

三、黑白全电视信号波形分析	(77)
四、电视信号的频谱结构	(84)
五、黑白电视广播标准	(87)
思考题与习题	(88)
第三章 彩色图像传送原理	(90)
3.1 彩色电视图像的摄取与重现	(90)
一、摄取与重现的基本过程	(90)
二、显像三基色的选取与亮度方程	(95)
三、色度匹配及 γ 校正对色度的影响	(99)
3.2 彩色电视制式	(104)
一、彩色电视制式的分类	(105)
二、兼容制彩色电视制式	(105)
3.3 兼容制彩色电视组成原理	(107)
一、对兼容的要求	(107)
二、传输信号的选择及组成原理	(107)
三、恒定亮度原理及高频混合原理	(109)
3.4 标准彩条信号	(112)
一、彩条的形成	(112)
二、彩条的命名	(112)
思考题与习题	(115)
第四章 兼容制彩色电视	(117)
4.1 NTSC 制彩色电视	(117)
一、频谱交错原理及副载频的选择	(117)
二、正交平衡调幅与同步检波	(120)
三、彩条全电视信号的波形及矢量图	(125)
四、 I 、 Q 色差信号	(130)
五、NTSC 制的编码与解码	(132)
六、NTSC 制的主要优缺点	(135)
4.2 PAL 制彩色电视系统	(135)
一、PAL 制彩色电视系统的基本特点	(136)
二、PAL 制补偿相位失真的基本原理	(137)
三、PAL 信号的频谱结构及副载频的选择	(138)
四、彩色全电视信号	(145)
五、PAL 制的编码	(151)
六、PAL _D 解码	(163)
七、PAL 制的主要性能	(175)
4.3 SECAM 制简介及三种制式的比较	(177)
一、SECAM 制简介	(177)
二、三种彩色电视制式的比较	(182)

思考题与习题.....	(184)
第五章 电视广播系统.....	(186)
5.1 概述	(186)
5.2 电视中心	(189)
一、基本组成	(189)
二、电视摄像机	(190)
三、磁带录像机	(199)
四、视频切换设备	(207)
五、同步机	(214)
5.3 电视信号的发送与接收	(226)
一、电视信号的发送	(226)
二、电视信号的接收	(231)
5.4 电视信号的传输	(238)
一、电缆传输	(238)
二、微波中继传输	(240)
三、通信卫星中继传输	(244)
5.5 电视广播新技术简介	(250)
一、数字电视	(250)
二、高清晰度电视	(258)
三、MAC 制简介	(262)
四、卫星电视广播	(264)
五、电视多工广播	(269)
六、加密电视	(273)
思考题与习题.....	(275)
附录一 黑白电视广播标准.....	(276)
附录二 彩色电视广播标准.....	(279)
附录三 我国电视频道的划分.....	(287)
附录四 彩色电视广播测试图.....	(289)

绪 论

在日常生活中,人们是通过视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉等接收各种信息的。据统计,视觉接收的信息量占 70%,听觉占 20%,这就是说,人们主要依靠视觉和听觉获得信息,因此,看电视和听广播成为人们获取信息的重要来源。

电视(Television)在拉丁语里是遥视的意思,它是用无线电电子学的方法,实时地、远距离地传送活动或静止图像的技术。它包括电视信号的产生、处理、存储、记录、发送和接收等内容,涉及到微电子学、光度学、色度学、视觉生理学及通讯技术等多种学科,并随着这些学科的发展而发展。所以说电视是一门综合性较强,密切结合应用的学科,它属于通信技术的一个分支。

电视的基本原理是基于光电及电光转换。在发送端,利用摄像器件(例如摄像管)中光电变换作用及电子束的扫描,将被摄景物的亮度及彩色信息变成相应的电信号,这个信号称为电视信号,经过处理与传输(有线或无线),在接收端通过显像器件(例如显像管)的电光变换作用及与摄像端同步的电子束扫描,将电信号还原为相应的光学图像,重现了原来的景物。

黑白电视重现的是黑白图像,即只有一个反映图像明暗变化的亮度信号;彩色电视除了传送亮度信号之外,还要传送反映色彩的色度信号,所以彩色电视比黑白电视能更加生动逼真地反映五彩缤纷的世界,具有更大的艺术感染力,因而彩色电视得到了更快的发展。

电视技术也像其它事物一样,有一个逐步发展,逐步完善的过程,总观其发展过程大体经历了机械黑白电视、电子黑白电视和彩色电视三个阶段。

1880至1920年是机械黑白电视设想阶段。在这期间,年仅23岁的德国青年工程师P·G·Nipkov于1884年发明了机械扫描圆盘。虽囿于当时的条件没有达到实用阶段,但它对电视技术发展的贡献是很大的。首先它找到了如何用电信号传送图像的思路,即顺序扫描、同步重现,为以后的电子扫描奠定了理论基础,其次是设想了未来电视的可用器件。所以Nipkov被后人誉为“电视鼻祖”。1897年德国人K·F·Braun发明了阴极射线管,这些都为机械电视的实用化准备了条件。1920至1930年是机械黑白电视的发展阶段,1925年英国人J·L·Baird利用机械扫描圆盘表演了机械扫描电视。到1930年左右,英国、前苏联等国都进行了机械电视广播。

机械电视毕竟是比较简单和原始的,缺点也是显而易见的,随着科学技术的发展,很快为电子电视所替代。

电子电视的研究在机械电视阶段的后期就开始了。1927年,美国人P·Farnsworth取得了电子电视系统的专利;1933年美国人V·K·Zworykin发明了光电导摄像管。1936年英国采用每帧405行、每秒25帧、隔行扫描方式开始了黑白电视广播,开创了电子电视的新时代。美国于1929年实验电子电视,到1936年推荐用441行/帧、30帧/秒、隔行扫描作为全国统一标准。前苏联也于1937年在莫斯科及列宁格勒先后实验240行和343行黑白电视广播。

二次大战的爆发使各国电视发展停顿,但战后又恢复并重新得到了高速发展。到50年代

初,黑白电视在比较发达的国家已得到了普及。日本由于是战败国,电视广播起步较晚,1953年开始黑白电视广播。我国于1958年开始黑白电视广播的实验。

彩色电视广播的实验研究始于50年代初,首先在美国开始,1951年美国用CBS制试播彩色电视,这是一种不兼容的场顺序制,由于当时美国黑白电视已相当普及,这种制式因不兼容而未能得到推广,于是研究的重点转向了兼容制彩色电视制式。1953年美国首先研究成功NTSC制彩色电视,经FCC(美国联邦通信委员会)批准成为美国的彩色电视广播制式并于1954年1月正式开播,从此开始了彩色电视广播的新时代。为了克服NTSC制的缺点,1967年联邦德国研制成功另一种彩色电视制式——PAL制,并于同年在日本进行了彩色电视广播;法国也同时研制成功SECAM制,在前苏联、法国进行了彩色电视广播,这样到1967年,世界上形成了NTSC制、PAL制和SECAM制三大彩色电视制式。

日本的电视广播虽起步晚,但发展快,自1953年开始黑白电视广播后,1957年就开始了彩色电视广播的实验,1960年正式使用NTSC制进行彩色电视广播。我国自1958年5月全国第一座电视台——北京电视台(中央电视台的前身)开播黑白电视起,全国各地如天津、上海、广州、武汉、成都、南京、长春、西安、沈阳、太原、济南等城市电视台相继上马,试播黑白电视,1960年三年经济困难时期不少电视台停播。1973年,北京电视台开始用PAL制试播彩色电视。1981年正式确定PAL制为我国彩色电视广播制式。70年代末以后,我国的广播电视事业开始迅速发展。

综上所述,电视广播从1930年机械电视广播到1936年黑白电子电视广播,1954年的彩色电视广播到1967年三大彩色电视制式的确立,仅用了数十年的时间,发展之快,令人惊叹。今天电视已深入经济、科技乃至家庭生活的各个领域,成为人们生产、生活及思想文化交流的有力工具。今后随着科学技术的进步,随着人们对物质文明和精神文明的需求,电视必将得到更大更快的发展。

电视原理是广播电视技术专业学生必修的一门专业基础课,它主要研究电视广播的基本工作原理,包括电视信号的摄取、加工传输和重现的基本过程。为继续学习电视发送、电视接收尤其是电视播控与制作等专业课提供必需的基本理论和基础知识,为读者今后从事电视广播技术工作打下必要的理论基础。具体地说通过本课程的学习应达到以下基本要求:

1. 了解与电视技术有关的光度学、色度学的基本知识,人眼的视觉特性和由此而确定的电视图像的基本参数。
2. 掌握电视传像及扫描的基本原理,掌握黑白全电视信号的组成、特点及波形分析等基本知识。
3. 掌握彩色电视的传像及兼容制彩色电视的组成原理。
4. 了解彩色电视制式。熟练掌握PAL制彩色电视系统的工作原理以及为实现兼容和改善兼容效果所采取的技术措施。
5. 了解电视广播系统的组成,从系统的角度了解电视信号的摄取、处理、传输、重现的基本过程及基本工作原理。

本书共分五章,分别阐述了这些基本原理。

第一章 视觉特性与色度学基础

1.1 光的基础知识

自然界五彩缤纷的景像,是通过光的传递才映入人的眼帘的,没有光的传递,人们就看不见景物。电视系统传送图像的过程,就是对图像进行变换、传输和复现的过程;传送的景物是光像,最后映入眼帘的仍是光像。为了更好地掌握电视原理,有必要从电视技术的角度来了解有关光的基础知识。

一、可见光

我们知道,能量可以用电磁波的形式在空间传播,整个电磁辐射波谱包括无线电波、红外线、可见光谱、紫外线、X射线、宇宙射线等,波谱范围很宽,其频率范围大约在 $10^5 \sim 10^{25}$ Hz、(波长为 $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^{-17}$ m),而人眼能感觉到其中 $380\text{nm} \sim 780\text{nm}$ ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)之间的电磁辐射,所以称该波长范围内的电磁波为可见光,简称为光,它在整个电磁辐射波谱中的位置如图1-1所示。由图可见,光在整个电磁辐射波谱中只占极窄的一部分。

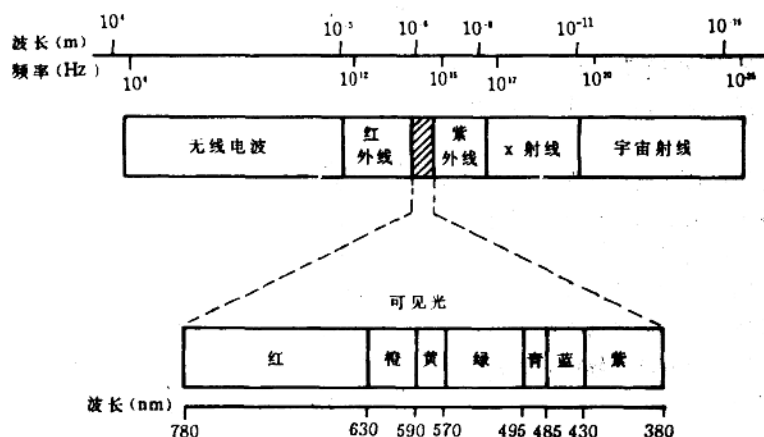


图 1-1 可见光在电磁辐射波谱中的位置

不同波长的光射入人眼会产生不同的彩色感觉,例如波长为 470nm 的光产生蓝色感觉,波长 700nm 的光产生红色感觉等等。在可见光范围内,光谱是连续分布的。随着波长的缩短,各波长对人眼所呈现的颜色依次是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。

单一波长或波谱宽度小于 5nm 的光称为单色光,例如上述的七种光都可以是单色光。单色光对应着光谱中一定的波长,所以又称谱色光。含有二种或二种以上波长的光称为复合光,复合光使人眼产生混合色,它不能作为单色光出现在光谱上,所以又称为非谱色光。在电视学中被称为白光的也都是复合光,例如灯光、日光等。太阳光是自然界最大的白光光源,它

是热、光及各种射线的辐射体，太阳光的波谱很宽，而且是连续的，只有其中极窄的一小段波谱带（380nm~780nm）内的电磁辐射能被人眼所察觉并给人以白光的感受。

白光可以被分解成为不同波长的单色光，这种现象称为白光的分解，也称光的色散。太阳光同样可以分解为单色光，雨后空中的彩虹就是阳光被分解为七种单色光的例子。单色光也可以复合给人以白光的综合感受，电视广播只利用可见光。

我们日常所感知的光归纳起来有三种，即直射光、透射光和反射光。

发光体产生并直接刺激人眼引起光感的光称为直射光。例如阳光、照明灯光、显像管荧光屏发出的光等。

发光体所发出的光照射到透明或半透明的物体上，被有选择的透过称为透射光。例如玻璃、滤色片、电影胶片透过的光。物体的透光性能常用透射光谱特性 $\tau(\lambda)$ 表示。

发光体发出的光照射到物体上，被该物体有选择的反射出来称为反射光。我们所看到的大多数不透明物体的光都是反射光。物体对光谱的反射特性用反射系数 $\rho(\lambda)$ 表示。

二、光源与色温

光源是指在影响物体色感的波长范围内按一定的光谱功率分布而辐射能量的物体。

（一）光源的辐射功率波谱

一个光源发出的光是由许多不同波长的谱色光组成的，而且不同波长光的辐射功率也不相同。光源的辐射功率在各个波长上的分布情况称光源的辐射功率密度波谱（简称辐射功率波谱或光源的光谱功率分布）用 $p(\lambda)$ 表示，即

$$p(\lambda) = \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \text{ W/m} \quad (1-1)$$

其中 $d\lambda$ 为某一波长微段， $d\phi_e(\lambda)$ 为该波长微段内的辐射功率。辐射功率波谱的单位是瓦/米(W/m)。

光源的辐射功率波谱表明了光源的辐射功率在各个波长上的分布规律它可以用直角坐标上的曲线来表示。如果光源在整个可见光范围内或在一段及几段波长区域内都有能量辐射，其光谱为连续光谱；如果只在若干波长点有能量辐射，其光谱则为线状光谱。

对不同光源，由于发光物质的成分不同，其光谱功率分布也不相同，一定的光谱功率分布代表着一定的光色，也就直接关系到被照物体的颜色。

太阳光是自然界最大的光源，它的光谱功率分布如图 1-2 所示。由图可见，太阳光的波谱范围是很大的，但其主要能量集中在可见光范围内并且在该范围内能量是近似均匀分布的。

为了便于比较各种光源之间光谱功率分布的差异，同时也考虑到人眼对波长 $\lambda=555\text{nm}$ 的黄绿光最敏感，通常用相对功率波谱来表示光源的光谱功率分布。相对功率波谱是指某光源的辐射功率波谱 $p(\lambda)$ 相对于 $\lambda=555\text{nm}$ 的黄绿光的辐射功率波谱 $p(555)$ 的比值，用 $\phi(\lambda)$ 表

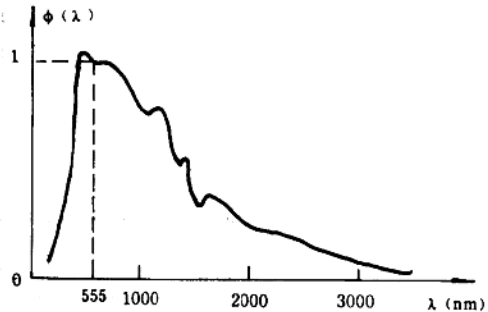


图 1-2 太阳光的功率辐射波谱

示,即

$$\phi(\lambda) = \frac{p(\lambda)}{p(555)} \quad (1-2)$$

(二) 光源的色温

光源的色温是表示光源的颜色即光谱分布的物理量。在色度学上,它通常用光源的光与绝对黑体发出的光相比较并用绝对黑体的温度来表征。

所谓绝对黑体是指既不反射也不透射,而能把落在它上面的辐射光全部吸收的物体。当绝对黑体被加热时,能辐射出连续光谱,其光谱能量的分布只与加热温度有关。绝对黑体在不同温度下的辐射功率波谱如图 1-3 所示。

由图可见,在不同的温度下,绝对黑体辐射光的功率波谱并不相同。绝对黑体温度升高时,辐射能量增大,发光亮度增加,所辐射的光谱中蓝色成分增加,红色成分减少。

绝对黑体也称完全辐射体,它对所有波长的光的吸收系数均为 1,这种物体在自然界是不存在的,但我们可以把一个内部涂黑,其上开有一个极小小孔的中空球体近似地看成是绝对黑体。绝对黑体受热辐射连续光谱的轨迹在 XYZ 色度图上是一条曲线,这条曲线称为普朗克曲线。

既然绝对黑体被加热时能辐射出连续光谱,我们在描述光源的颜色时,可以把该光源颜色(即光谱分布)与绝对黑体受热辐射的光的颜色(光谱分布)相比较,用绝对黑体的温度来表征。当绝对黑体在某一特定温度下辐射光的光谱与某光源的光谱具有相同的特性时,则绝对黑体的这一特定温度就称为该光源的色温。

例如一个温度为 2800K 的钨丝灯泡所发出的光与绝对黑体被加热到 2854K 所辐射出的光光谱分布一致,则该灯泡发出的光其色温就是 2854K。

色温用绝对温度单位——开氏度(K)表示。色温用来表示光源的光谱特性,并非光源的实际温度。在电视技术中引入“色温”的概念,是为了进行色度的计算和白光的比较。

有些光源的光谱分布并不与绝对黑体在某温度下辐射的光谱精确等效,而只是近似,这时就把与该光源最接近的绝对黑体的温度称为该光源的相关色温。在普朗克曲线上,光源的色温可用曲线上的点来表示,相关色温则不在曲线上而在曲线附近。几种常见光源的色温为:

阳光	早晨	2000K
	上午 10 时及下午 4 时	4800K
	正午	6000K
钨丝灯泡		2854K
卤钨灯 (电视演播室常用光源)		3200K

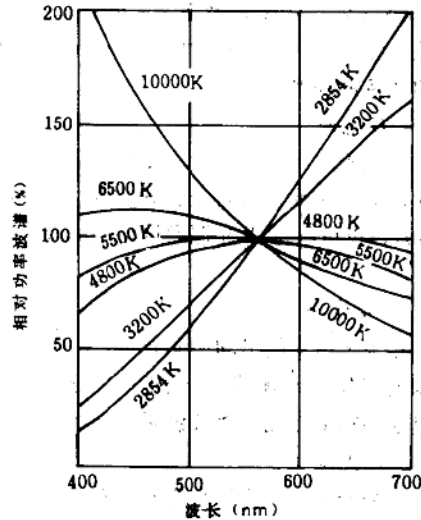


图 1-3 不同温度下绝对黑体的辐射功率波谱
(560nm 辐射功率为 100%)

(三) 标准光源

太阳光虽然是自然界最大的白光光源,但它的光谱分布是随季节、时辰、气候变化的,而照明光源的光谱分布又影响着被照物体的颜色,所以电视技术中,为了高度逼真地重现彩色,必须选用标准光源,即标准白光,而一般不选用日光。按照国际的规定,选用的标准白光光源有 A、B、C、 D_{65} 、E 五种。

1. A 光源

相当于钨丝灯泡在温度为 2800K 时发出的光,其波谱能量主要集中于靠近红外线区,所以看起来带桔红色,色温 2854K。

2. B 光源

相当于上午 10 时及下午 4 时的直射阳光,相关色温 4800K, B 光源可以由 A 光源通过特制的滤色镜获得。

3. C 光源

相当于白天的自然光,波谱能量在 400nm ~ 500nm 处较大,含蓝光成分偏多,相关色温 6800K,也可以由 A 光源通过特制的滤色镜得到。

4. D_{65} 光源

相当于白天的平均照明光,在 400nm 以下的能量比 B、C 光源都大,近年来广泛被用作彩色电视的标准白光,相关色温 6500K。

5. E 光源

这是一种实际不存在的假想光源,它是由可见光范围内所有波长的辐射功率都相等的光复合成的一种白光,也称等能白光。用 $E_{\text{白}}$ 表示。它与色温 5500K 的白光的色温相近。采用等能白光 $E_{\text{白}}$ 是为了简化色度学的计算。

五种标准光源的光谱分布曲线如图 1-4 所示。

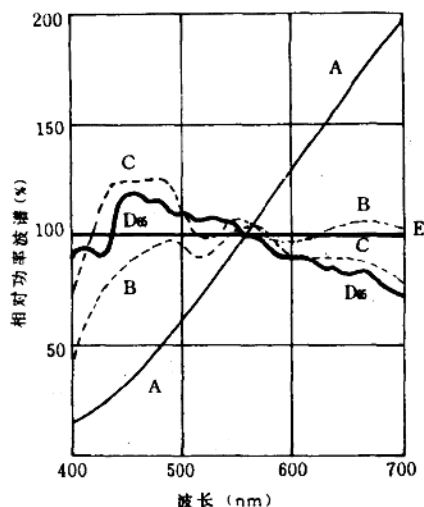


图 1-4 标准光源相对功率波谱

三、光的度量——常用光学单位

为了对光进行分析或度量,必须掌握光度学常用基本量的定义、单位和物理概念。常用的基本量有光通量、发光强度、亮度和照度,下面分别介绍。

(一) 光通量 F

光通量是光的功率单位,是按照人眼的光感觉来度量的辐射功率。对于某一波长为 λ_1 的单色光,其光通量 F 是该波长上的辐射功率 $p_w(\lambda_1)$ 与相对视敏函数 $v(\lambda_1)$ 之乘积,即

$$F(\lambda_1) = p_w(\lambda_1) \cdot v(\lambda_1) \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知光通量不仅与辐射功率有关,还与相对视敏函数值有关(关于相对视敏函数的概念,下一节将讲述)。

光通量的通用单位是流明(lumen),简称为 lm。CIE 规定绝对黑体在铂的凝固温度下,从 $5.305 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ 面积上辐射出来的光通量为 1lm。光通量也可以用光瓦(lw)来表示, $\lambda =$

555nm 的单色光, 辐射功率为 1W 时所产生的光通量定为 1lw, 二者之换算关系为

$$\left. \begin{aligned} 1\text{lw} &= 680\text{lm} \\ 1\text{lm} &= \frac{1}{680}\text{lw} = 1.47 \times 10^{-3}\text{lw} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

一个 40W 的钨丝灯泡输出的光通量为 468lm, 一个 40W 的日光灯输出的光通量是 2100lm, 有的人工光源则更大。

对于一个波谱为 $p(\lambda)$ 的任意光源, 其光通量为

$$\begin{aligned} F &= \int_{380}^{780} p(\lambda)v(\lambda)d\lambda \quad (\text{lw}) \\ &= 680 \int_{380}^{780} p(\lambda)v(\lambda)d\lambda \quad (\text{lm}) \end{aligned} \quad (1-5)$$

即总的光通量是各波长成分光通量之总和。

一个光源所产生的光通量 (lm) 与其辐射功率 (W) 之比, 称该光源的发光效率。例如一个 40W 的日光灯产生 2100lm 的光通量, 其发光效率为 $\eta = 2100/40 = 52.5\text{lm/W}$ 。

(二) 发光强度 I

发光强度简称光强, 是指光源在指定方向的单位立体角内发出的光通量。光强代表了光源在不同方向上的辐射能力。如果光源的辐射是均匀的, 则光强为

$$I = \frac{F}{\Omega} \quad (1-6)$$

式中, F 为光通量; Ω 为立体角, 单位为球面度。

立体角是从球心射向球面 S 的锥体角, 若球的半径为 r , 则

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (1-7)$$

光强的单位是坎德拉 (candela), 简称坎, 符号为 cd, 它与流明之间的关系为

$$1\text{cd} = \frac{1\text{lm}}{1\text{sr}} \quad (1-8)$$

式中 sr 为球面度。

对于一个点光源, 其向四周的辐射都是均匀的, 即各个方向上的光强都相等。各条光线都与此光源为中心的球面垂直。一个球体球心对球面的立体角为 4π 球面度, 所以点光源的光强为

$$I = \frac{F}{4\pi} \quad (1-9)$$

光强为 1cd 的点光源发出的总光通量为 $4\pi\text{lm}$ 。

对于一个面光源, 特别是漫散射面光源, 在与光源面法线成 α 角方向上的光强为

$$I_{\alpha} = I_n \cos \alpha \quad (1-10)$$

式中 I_n 是光源面法线方向上的光强。漫散射面光源的光强分布见图 1-5。

(三) 亮度 B

亮度是表示发光面明亮程度的物理量, 它是指发光表面在指定方向上的发光强度与垂直于指定方向的发光面面积之比, 如图 1-6 所示。

在图 1-6 中, 设 S 为发光面, I_n 为法线方向上的光强, 与法线成 α 角的方向上的光强为 I_{α} , 则该方向上的亮度为

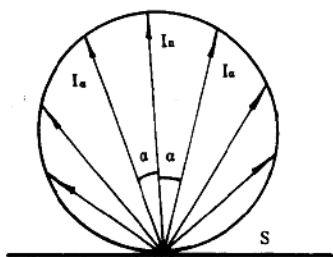


图 1-5 漫散射面光源的光强分布

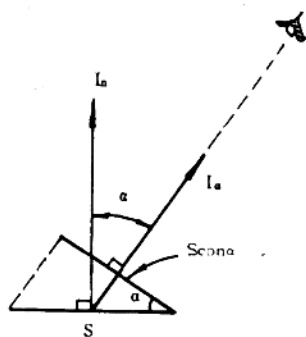


图 1-6 亮度计算示意图

$$B_a = \frac{I_a}{S \cos \alpha} \quad (1-11)$$

对于一个漫散射面

$$I_a = I_n \cos \alpha$$

则

$$B_a = \frac{I_a}{S \cos \alpha} = \frac{I_n \cos \alpha}{S \cos \alpha} = B_n \quad (1-12)$$

这说明对于一个漫散射面，尽管各个方向上的光强和光通量不相同，但各个方向上的亮度都是相等的，电视机的荧光屏就是近似这样的漫散射面，所以从各个方向上观看图像，都有相同的亮度感觉。

亮度的常用单位是尼特 (nit)， 1m^2 的发光面在其法线方向上产生 1cd 的光强，则该发光面的亮度就是 1nit ，即 $1\text{nit} = 1\text{cd}/\text{m}^2$ 。

电视机荧光屏的亮度一般为：黑白电视机 120nit 左右；彩色电视机 80nit 左右。常见光源的亮度为：

太阳	1.5×10^9 nit
超高压水银灯	1.2×10^9 nit
日光灯	$(5 \sim 10) \times 10^3$ nit
月光 (满月)	2.5×10^3 nit

(四) 照度 E

光通量与被照物体表面面积之比称为照度，用 E 表示，即

$$E = \frac{F}{S} \quad (1-13)$$

照度的单位为勒克斯 (lx)， 1lx 就是指 1m^2 的面积上得到 1lm 的光通量，即

$$1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$$

照度与照明光源、被照表面及光源在空间的位置有关，下面以点光源为例来说明。(见图 1-7)。

在图 1-7 中，设点光源 A 的光强为 I ，被照表面面积为 S ，二者之距离为 r 。

当点光源 A 与被照物体表面 S 垂直时，即图 (1-7) (a) 所示的情况，这时

A 点对 S 的立体角

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

光强 $I = \frac{F}{\Omega}$ ，对点光源

$$I = \frac{F}{4\pi}$$

S 面上接收的光通量为

$$\Delta F = I\Omega = I \frac{S}{r^2} = \frac{F}{4\pi} \cdot \frac{S}{r^2} = \frac{FS}{4\pi r^2}$$

$$\text{所以 } E = \frac{\Delta F}{S} = \frac{F}{4\pi r^2} \quad (1-14)$$

当点光源 A 与被照物体表面 S 不是垂直而是与法线之间有一夹角 α 时, 如图 1-7 (b) 所示, 这时 A 点对 S 的立体角为

$$\Omega = \frac{S \cos \alpha}{r^2}$$

S 面接收的光通量为

$$\Delta F = I\Omega = I \frac{S \cos \alpha}{r^2} = \frac{FS \cos \alpha}{4\pi r^2}$$

照度为

$$E = \frac{\Delta F}{S} = \frac{FS \cos \alpha}{4\pi r^2 S} = \frac{F \cos \alpha}{4\pi r^2} \quad (1-15)$$

由上述式子可以看出照度与光源的光强和光线的入射角的余弦成正比, 而与光源至被照物体表面的距离的平方成反比。自然光照射下, 各种环境的照度如表 1-1 所示。

表 1-1 各种环境照度表

环境条件	黑夜	月夜	阴天室内	阴天室外	晴天室内	读书所需照度	电视演播室所需照度
照度 (lx)	0.001~0.02	0.02~0.2	5~50	50~500	100~1000	50	300~2000

以上讲述了这四个光学量的基本定义、物理意义及常用单位。在国际单位制中, 这四个量可以归纳为表 1-2。

表 1-2 光度单位

名称	代表符号	数学定义式	常用单位	单位间换算关系
光通量	F	$F = \int_{380}^{780} p(\lambda) v(\lambda) d\lambda$	流明 (lm) 光瓦 (lw)	$1 \text{ lm} = \frac{1}{680} \text{ lw}$
光强	I	$I = \frac{F}{\Omega}$	坎德拉 (cd)	$1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ sr}}$
亮度	B	$B = \frac{I_s}{S \cos \alpha}$	尼特 (nit)	$1 \text{ nit} = \frac{1 \text{ cd}}{\text{m}^2}$
照度	E	$E = \frac{F}{S}$	勒克斯 (lx)	$1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{\text{m}^2}$

1.2 人眼的视觉特性与电视图像参数

电视系统的最终任务是显示图像供人观看, 其综合质量指标最终要由人眼来鉴定, 因此

电视系统应尽可能准确地模拟人眼的特性,才能使看到的图像逼真、连续。所以我们有必要了解人眼的视觉有那些特点以及其对电视系统的要求,以便合理地选择电视系统的基本参数与图像的质量指标,例如像素数、扫描行数、帧数、扫描方式及电视图像的尺寸、亮度、清晰度、对比度等,使之既能满足观看者的需要,又避免不必要的技术上的复杂与浪费。这一节将从研究人眼的视觉特性出发来研究这些参数。与电视技术有关的人眼的视觉特性有视敏特性、亮度感觉、人眼的分辨力、视觉惰性。人眼的彩色视觉特性将在第三节中讲述。

一、视敏特性

视敏特性是指人眼对不同波长的光具有不同灵敏度的特性,即对于辐射功率相同的各色光的亮度感觉不同。人眼感到最亮的光是黄绿光,而感觉最暗的光是红光和紫光。换言之,要获得相同的亮度感觉所需各色光的辐射功率则不相同,例如红光和紫光所需的辐射功率就比黄绿光要大的多。

为了确定人眼对各种不同波长的光的敏感程度,可在两种光照条件(光亮条件和黑暗条件)下调整各波长光的强度,使观察者得到相同的亮度感觉,测出不同波长的辐射功率 $p_r(\lambda)$ 。显然 $p_r(\lambda)$ 越大,说明人眼对该波长的光越不敏感,故可以用 $p_r(\lambda)$ 的倒数来衡量人眼对波长为 λ 的光的敏感程度,称为视敏函数(或称视敏度、视见度),用 $K(\lambda)$ 表示,即

$$K(\lambda) = \frac{1}{p_r(\lambda)} \quad (1-16)$$

$K(\lambda)$ 越大,证明人眼对该波长的光越敏感,即相同辐射功率时,该波长的光作用于人眼引起的亮度感强。

研究人眼的视觉生理表明,人眼的视敏特性在明亮条件下和昏暗条件下是不同的,这是由于人眼的不同光敏细胞作用的结果。实验表明:在明亮条件下,人眼对波长为555nm的黄绿光有最高的灵敏度,即视敏函数取得最大值 $K(555) = K_{\max}$,在暗视觉条件下,视敏函数在507nm处取得最大值,即 $K'_{\max} = K'(507)$ 。

通常把任意波长光的视敏函数与最大视敏函数的比值称为相对视敏函数,用 $v(\lambda)$ 表示,则明视觉相对视敏函数为

$$v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{\max}} = \frac{K(\lambda)}{K(555)} = \frac{p_r(555)}{p_r(\lambda)} \quad (1-17)$$

暗视觉相对视敏函数为

$$v'(\lambda) = \frac{K'(\lambda)}{K'_{\max}} = \frac{K'(\lambda)}{K'(507)} = \frac{p'_r(507)}{p'_r(\lambda)} \quad (1-18)$$

根据对大量正常视力的观察者实验统计结果,得到如表1-3的相对视敏函数的值,并据此画出了图1-8所示的视见度曲线或称视敏度曲线。曲线以波长为横坐标,等能量的各波长光引起的相对亮度感为纵坐标,分别表明两种光照条件下的视敏特性,称为明视觉特性和暗视觉特性。

这两条曲线之所以不同,是人眼不同光敏细胞作用的结果。在人眼的视网膜上有两种光敏细胞——锥状细胞和杆状细胞。杆状细胞灵敏度高,但只能辨别明暗,不能辨别颜色。在黑暗条件下,主要是杆状细胞起作用,而锥状细胞的灵敏度不如杆状细胞,但它既能辨别明暗,也能辨别颜色。在明亮条件下主要是锥状细胞起作用,这样就形成了两种照明条件下的

两条曲线。电视技术应用的都是明视觉特性曲线。

由图可见，明亮条件下，在波长 $\lambda=555\text{nm}$ 处， $v(\lambda)=1$ ，说明人眼对该波长的光，亮度感最强。离开这一点，波长不论是增加还是减少， $v(\lambda)$ 的值都减小，即亮度感减少。当 $\lambda>760\text{nm}$ 或 $\lambda<400\text{nm}$ 时， $v(\lambda)\approx 0$ ，说明 400nm 以下和 760nm 以上波长的电磁辐射已超出可见光范围而进入红外线区和紫外线区，不能引起人眼的亮度感觉。还可以看出，在黑暗条件下，对波长较短的光，敏感程度相对增大，表现为暗视觉曲线左移，在 $\lambda=507\text{nm}$ 处有最大视见度。

视敏特性是人眼的重要视觉特性之一，黑白电视摄像管的光谱特性应设计与人眼的视敏特性基本一致，才能得到高质量的黑白图像。在前面讲到光学度量时也用到这一概念。

表 1-3 明视觉与暗视觉相对视敏函数值（最大值为1）

波 长 (nm)	明视觉 $v(\lambda)$	暗视觉 $v'(\lambda)$	波 长 (nm)	明视觉 $v(\lambda)$	暗视觉 $v'(\lambda)$
380	0.00004	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.00012	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003336
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.3281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.0000715
480	0.139	0.753	690	0.0082	0.00003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.00000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.00000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.000002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.0000002413
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.0000001390
580	0.870	0.1212			

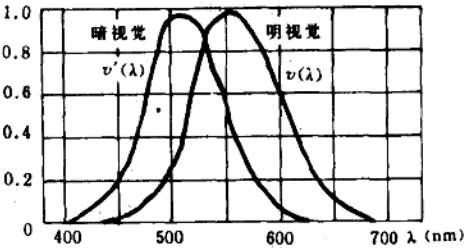


图 1-8 相对视敏函数曲线

二、亮度感觉与电视图像的亮度、灰度、对比度

(一) 亮度视觉范围

人眼最主要的特性之一是有亮度感觉,即能分辨不同的亮度层次。人眼能感觉到的亮度范围称为亮度视觉范围。这个范围非常大,明视觉可以从 1nit 至几百万 nit,暗视觉则从千分之几 nit 至几 nit,这主要是因为人眼的感光作用可以随外界光的强弱而自动地调节。但是人眼并不能同时感受到这样大的光亮范围,它要受环境亮度制约。当人眼适应了某一环境的平均亮度之后,视觉范围就有了一定的限度,一般为 1000:1,平均亮度很低时只有 10:1。这是人眼感光作用的局部性。另外在不同的环境亮度下,对同一亮度的主观感觉也不相同。例如,同样是 100nit 的目标亮度,在很亮的环境下,例如可分辨的亮度范围是 200~2000nit,引起的感觉是黑色,而在可分辨的亮度范围是 1~200nit 时,却是相当亮的感觉,可见人眼的亮度感觉是相对的。根据这一特性,可以选用不同的环境亮度,用不同的目标亮度使人得到相同的亮度感觉。在电视技术中,电视图像的亮度一般都低于原景物的亮度,当我们在不太亮的环境中观看时,仍可以获得相当逼真的效果。

人眼感光的第三个特性是视觉的适应性。所谓视觉适应性,是指人眼对外界光的强弱变化而产生的自动调节能力,它分为亮适应和暗适应。从亮环境到暗环境眼睛的适应能力称为暗适应,例如从阳光下走进电影院,会感到周围一片漆黑,什么都看不见,几分钟后,逐渐看清周围的东西,数十分钟后达到稳定。过一过程一方面通过眼睛瞳孔的调节作用,这时瞳孔扩大,可以从 2mm 扩大到 8mm,进入眼球的光通量可以扩大 16 倍;另一方面,视觉细胞将从锥状细胞起作用转换到灵敏度更高的杆状细胞起作用。亮适应是指从暗到亮的环境变化时人眼的适应能力,这一过程则是视觉细胞由杆状细胞转换为锥状细胞的过程,一般只要数秒钟即可完成。

(二) 亮度感觉及对比度灵敏度阈

实践证明人眼在观看景物时,主观的亮度感觉并不直接取决于景物的实际亮度,而是与其对数成正比,即

$$S = K' \lg B + K_0 \quad (1-19)$$

式中, S 表示人眼的主观亮度感觉; B 代表景物的实际亮度; K' , K_0 均为常数。

实验还表明人眼察觉亮度变化的能力是有限的,当某一亮度变化到人眼刚能察觉时的最小亮度变化量 $\Delta B_{\min}$ 称为一级亮度级差,每增加一个 $\Delta B_{\min}$ 就增加了一级亮度级差或者叫增加一个亮度层次,人眼的主观亮度感觉就是以这样的级数来衡量的。

不同的亮度 B , $\Delta B_{\min}$ 也不相同。 B 越大, $\Delta B_{\min}$ 也越大,但是在相当大的亮度范围内,可观察到的最小相对亮度变化 $\Delta B_{\min}/B$ 却近似一个常数。这个比值称为相对视觉阈,也称对比度灵敏度阈,用 δ 表示,即 $\delta = \frac{\Delta B_{\min}}{B}$,它表明了相对于某一亮度 B 能引起亮度差所必需的最小亮度变化。 δ 越小,说明在一定的相对亮度范围内人眼所能分辨的亮度层次多,亮度分辨能力强。 δ 值可因环境条件的不同而不同,一般在 0.02~0.05 之间选取。在观看电视图像时,考虑到杂散光的影响, δ 可以取上限,即取 $\delta = 0.05$ 。根据实验得到的人眼的主观亮度感觉与亮度之间的关系曲线,如图 1-9 所示。

由于主观亮度感觉是心理量而不是物理量,它只能用实验得出的变化级数为单位,图中

的纵坐标就表示亮度变化级数,即表示人眼在适应了横坐标表示的亮度后得到的主观亮度感觉,而横坐标采用对数刻度。图中的曲线有两条,表明两种光敏细胞的感觉不同,低亮度区的短曲线是暗视觉的亮度感觉特性,高亮度区的长曲线是明视觉的亮度感觉特性,两条曲线交叉衔接,反映了人眼的适应性。曲线在很大的亮度范围内接近直线,说明亮度感觉与亮度的对数近似成线性关系,这与式(1-19)是一致的。图1-9中通过某点的虚线代表眼睛在适应了该点的亮度后以主观感觉“白”或“黑”为界限的视觉范围。这个范围比较小而且也随亮度的不同而不同,反映了人眼视觉的局部性。从曲线也可看出人眼视觉的相对性,同一亮度对适应了不同平均亮度的人眼会引起不同的主观亮度感觉。例如图中A点的亮度,对适应了C点亮度的人眼是相当明亮的,而对适应了B点亮度的人眼则是黑暗的感觉。

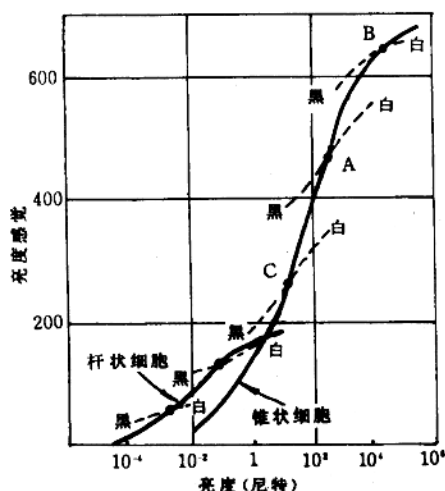


图 1-9 亮度感觉与亮度间的关系

在选择电视图像的亮度(这里是指电视图像的平均亮度)时,应保证重显必需的对比度和亮度层次,并使长时间的观看致疲劳,调的太大,会使人感到暗处太亮,也会使最亮处过大的亮度刺激眼睛。一般的观看条件,电视图像的平均亮度应不少于 30nit,最大可达 100~150nit。目前生产的显像管对满足这个要求是绰绰有余的。

(三) 电视图像的对比度与灰度

由于人眼的亮度感觉是相对的,同一亮度在不同的环境亮度下会给人不同的亮度感觉,因此图像重现时,就视觉上讲,重要的不是其实际亮度,而是它的相对明暗层次。

景物或重现图像的最大亮度 $B_{\max}$ 与最小亮度 $B_{\min}$ 之比称为对比度(Contrast)以 C 表示,即

$$C = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} \quad (1-20)$$

而画面的最大亮度与最小亮度之间能分辨的亮度感觉级数称为亮度层次,也称灰度,用 n 标记。

对比度表示了一幅图像的亮度范围。在从 $B_{\max} \sim B_{\min}$ 之间分布着由相对视觉阈 δ 所确定的亮度级数,它反映了景物的亮度层次,而景物对视觉来讲主要表现为对比度和亮度层次,绝对亮度并不重要,所以在电视系统中无需复现原景物的实际亮度也不必复现人眼不能觉察的亮度差别,只要复现与实际景物对主观感觉相同的对比度和亮度差别(亮度层次),就能给人以真实的感觉。例如一幅运动场的图像,实际亮度是 200~10000nit,其对比度 $C = \frac{10000}{200} = 50$,如果取 $\delta = 0.05$ 则在这个亮度范围里共包含了 78 个亮度层次;在电视屏幕上如果亮度范围是 2~100nit,其对比度也是 50 ($C = \frac{100}{2} = 50$) 也包含着 78 个亮度层次,就能给人以在现场观看相仿的效果。这就是电影、电视虽不反映真实亮度但却能给人以真实感觉的依据,是人眼适应性在电视上的应用。

实际上人总是在一定的环境亮度下看电视,当考虑环境亮度后,电视图像的对比度为

$$C = \frac{B_{\max} + B_s}{B_{\min} + B_s} \quad (1-21)$$

其中 B_s 为环境亮度。

可见环境亮度使对比度降低,只有当 $B_s \ll B_{\min}$ 时, C 才少受环境亮度的影响。

通常在摄像时被摄景物中总设法避免有直接光源,所以景物的亮度范围取决于景物反射系数的范围。在一定照度下,最白的莫过白石膏,其反射系数 $\rho=99\%$; 最黑的要数黑丝绒,其反射系数为 $\rho=1\%$,所以一般景物的对比度不会超过 100。实际上对比度有 30~40 就已经很满意了。 C 太大眼睛容易疲劳。

电视图像灰度是表示图像黑白层次的,一幅图像从最黑到最白之间的层次越多,图像越柔和,图像的细节越清晰,图像也就越逼真;反之图像则粗糙、生硬。

在确定相对视觉阈 δ 之后,人眼能分辨的亮度级数 n 就取决于对比度。下面我们来看看 δ 、 n 、 C 之间的关系:

设图像的最小亮度为 $B_{\min}=B_1$

则人眼能分辨的第二级亮度为 $B_2=B_1+\Delta B_{\min}=B_1+\delta B_1=B_1(1+\delta)$

人眼能分辨的第三级亮度为 $B_3=B_2+\Delta B_{\min}=B_2+\delta B_2=B_2(1+\delta)=B_1(1+\delta)^2$

依次类推,能分辨的最后一级亮度即最大亮度为

$$B_n=B_{\max}=B_{n-1}+\delta B_{n-1}=B_1(1+\delta)^{n-1}=B_{\min}(1+\delta)^{n-1}$$

所以对对比度为

$$C = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} = (1+\delta)^{n-1}$$

两边取对数得

$$\ln C = (n-1) \ln(1+\delta)$$

将 $\ln(1+\delta)$ 按幂级数展开得

$$\ln(1+\delta) = \delta - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{3} - \frac{\delta^4}{4} + \cdots + (-1)^{n-1} \frac{\delta^n}{n}$$

由于

$$\delta \ll 1$$

所以

$$\ln(1+\delta) \approx \delta - \frac{\delta^2}{2} \approx \delta$$

$$\ln C = (n-1)\delta = n\delta - \delta$$

$$n = \frac{\ln C + \delta}{\delta} = \frac{\ln C}{\delta} + 1$$

又由于

$$\frac{\ln C}{\delta} \gg 1$$

故

$$n = \frac{\ln C}{\delta} = \frac{2.3}{\delta} \lg C \quad (1-22)$$

考虑到 $B_{\min}$ 算作一级亮度层次,所以 n 就是 $B_{\min} \sim B_{\max}$ 之间的可分辨的亮度层次即灰度级数。

例如取 $\delta=0.05$ 、 $C=50$ 、则

$$n = \frac{2.3}{0.05} \lg 50 = 78$$