



高等学校
电子信息类

规划教材

电视原理

(第5版)

俞斯乐 侯正信 冯启明 李文元 编著

国防工业出版社

电 视 原 理

(第 5 版)

俞斯乐 侯正信 冯启明 李文元 编著

國防工業出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

电视原理/俞斯乐等编著. —5版. 北京:国防工业出版社, 2000.4(2003.3重印)

ISBN 7-118-02150-4

I. 电... II. 俞... III. 电视-原理-高等学校-教材 IV. TN94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 63750 号

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 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27½ 639 千字

2000 年 4 月第 5 版 2003 年 3 月北京第 15 次印刷

印数:144001—150000 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办同各专指委、出版社协商后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由通信与信息工程教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由天津大学俞斯乐担任主编，清华大学王贻良担任主审。

本教材的参考学时数为 80~100。全书内容共分七章，其中第一、第二章介绍彩色电视的基础理论知识与电视传像基本原理，包括视觉特性与三基色原理、光度学与色度学，电视系统的组成、扫描与同步以及电视图像的基本参量等；第三章讲述三种基本彩色电视传输制式的原理、编解码方法和主要性能，以及近代彩色电视制式梗概；第四、第五章围绕电视系统各主要环节中的摄像、信号校正、视频与射频全电视信号的形成、同步信号形成、电视信号的录放、接收与显像等过程，着重讨论彩色图像信息的获取、转换、处理、信号形成与记录的基本原理，以及有关器件与电路的工作原理；第六章讨论电视信号数字处理原理，包括数字处理技术基础和数字处理电视机等；第七章介绍数字电视系统的技术基础，包括信源与信道编码、调制和接收等。每章均附有习题和思考题。在附录中还给出了广播电视方面的几个国家标准。

使用本教材时应注意根据专业培养目标和教学计划所规定的学时数等具体情况，决定对内容作必要的取舍或增补。

本教材是在总结第 4 版教材使用经验的基础上，根据当代电视技术的发展，对内容进行更新修编而成的。修编工作的分工为：李文元承担第一、第二、第四章（原作者郭福云）和 6.5.2 节，俞斯乐承担第三章和附录 1~附录 4，冯启明承担第五章（原作者李桂苓）和 6.4.2~6.4.6 节，侯正信承担第六章（除上述几节外）和第七章。在本书前几版的编写工作中作出过贡献的还有黄元、张春田、王兆华、刘意松和雒靖华，这里对他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1999 年 4 月

目 录

第一章 视觉特性与三基色原

理 1

§ 1.1 光的特性 1

1.1.1 电磁辐射与可见光谱 1

1.1.2 光源 2

§ 1.2 人眼的视觉特性 4

1.2.1 眼睛的构造 5

1.2.2 光的度量 6

1.2.3 亮度、彩色与立体视觉 9

1.2.4 眼睛的视觉范围与亮度感觉 12

1.2.5 人眼的分辨力与空间频率响应 14

1.2.6 视觉惰性与闪烁感觉 17

§ 1.3 三基色原理与色度图 18

1.3.1 三基色原理 18

1.3.2 RGB 计色制 19

1.3.3 XYZ 计色制 25

1.3.4 均匀色标制 33

§ 1.4 彩色的重现 35

1.4.1 显像三基色 35

1.4.2 显像三基色的色系数与亮度方 程 37

1.4.3 摄像光谱响应曲线 39

参考文献 41

习题与思考题 41

第二章 电视传像基本原理 43

§ 2.1 电视系统组成原理 43

2.1.1 图像顺序传送原理 43

2.1.2 光和电的转换原理 45

2.1.3 彩色图像的摄取与重现 47

§ 2.2 电视扫描原理 49

2.2.1 逐行扫描 49

2.2.2 隔行扫描 51

2.2.3 扫描的同步 54

§ 2.3 电视图像的基本参量 59

2.3.1 图像的几何特征 59

2.3.2 图像的连续性与场频的确定 61

2.3.3 扫描行数及有关参数的确定 62

2.3.4 图像亮度与色度的非线性失真 66

§ 2.4 视频图像信号 70

2.4.1 黑白图像信号 70

2.4.2 亮度信号、色差信号及其组成原 理 73

2.4.3 标准彩条信号 80

参考文献 83

习题与思考题 83

第三章 彩色电视制式 85

§ 3.1 彩色电视制式概述 85

§ 3.2 NTSC 制 86

3.2.1 正交调制与正交检波 86

3.2.2 压缩系数 88

3.2.3 波形图和矢量图 89

3.2.4 Q/I 色差信号 91

3.2.5 副载频选择 93

3.2.6 NTSC 编、解码方框图 96

3.2.7 NTSC 制的主要性能 97

§ 3.3 PAL 制 99

3.3.1 彩色相序交变原理 99

3.3.2 PAL 色度信号及 PAL_D 解码原 理 100

3.3.3 色度信号的频谱交错 103

3.3.4 副载频选择 105

3.3.5 梳状滤波器的频率特性 109

3.3.6 行顺序效应 116

3.3.7 PAL 制的主要性能 120

§ 3.4 SECAM 制 122

3.4.1 顺序传送与存储复用 122

3.4.2 SECAM 色度信号 123

3.4.3 色同步信号 128

3.4.4 副载波处理 129

3.4.5 SECAM 制编、解码方框图 131

3.4.6 行顺序效应 134

3.4.7 SECAM 制主要性能 134

§ 3.5 近代彩色电视制式 136

3.5.1 现行彩色电视制式的缺陷 137

3.5.2 采用时分多工方式的 MAC 制 140

3.5.3 采用滤波扫描变换的质量增强制式	141	§ 5.2 高、中频电视信号的处理	230
3.5.4 模拟高清晰度电视制式	146	5.2.1 高频电视信号的接收	230
3.5.5 数字高清晰度电视制式	150	5.2.2 中频电视信号的放大	236
参考文献	154	5.2.3 视频信号检波	239
习题与思考题	155	§ 5.3 视频电视信号的处理	241
第四章 电视信号的形成、处理与记录	158	5.3.1 亮度信号处理	241
§ 4.1 电视系统概述	158	5.3.2 图像清晰度增强	244
§ 4.2 图像信号的产生	159	5.3.3 色度信号处理	246
4.2.1 广播彩色电视摄像机的组成	159	§ 5.4 电视图像的同步与电子束的扫描	252
4.2.2 彩色电视摄像机的光学系统	160	5.4.1 同步信号的分离	252
4.2.3 电视摄像管	164	5.4.2 扫描电路的作用、性能要求与电路组成	257
§ 4.3 图像信号的处理	170	5.4.3 行/场扫描电路的实例	258
4.3.1 反噪波校正	171	5.4.4 行输出电路	261
4.3.2 图像信号中直流分量的恢复	174	5.4.5 扫描非线性失真的校正	266
4.3.3 电缆校正	176	§ 5.5 显像管及其附属电路	269
4.3.4 黑斑校正	177	5.5.1 概述	269
4.3.5 γ 校正	179	5.5.2 自会聚彩色显像管	270
4.3.6 彩色校正	180	5.5.3 显像管的附属电路	275
§ 4.4 PAL 制彩色全电视信号的形成	183	§ 5.6 平板显示原理	278
4.4.1 PAL 制彩色全电视信号的形成方案	183	5.6.1 液晶及液晶显示器	278
4.4.2 基色信号的矩阵变换	187	5.6.2 液晶显示器的驱动	280
4.4.3 色度信号的形成	188	5.6.3 液晶电视接收机	282
§ 4.5 射频电视信号的形成	191	5.6.4 等离子体显示器	283
4.5.1 图像信号的调制	191	5.6.5 等离子体显示器的驱动	285
4.5.2 电视发射机	196	5.6.6 等离子体电视接收机	287
§ 4.6 同步信号的形成	198	参考文献	288
4.6.1 同步信号的定时原理	199	习题与思考题	288
4.6.2 同步信号的形成	200	第六章 电视信号数字处理基础	290
4.6.3 同步设备之间的锁相原理	201	§ 6.1 概述	290
§ 4.7 电视信号的录放原理	203	6.1.1 电视信号数字处理的优点	290
4.7.1 磁性录放原理	203	6.1.2 数字电视信号的产生和复原	291
4.7.2 数字磁带录像原理	212	§ 6.2 彩色电视图像信号的数字编码	294
4.7.3 光盘录像的原理	214	6.2.1 全信号编码	294
参考文献	222	6.2.2 分量编码	295
习题与思考题	223	§ 6.3 数字电视信号的滤波与频谱分析	298
第五章 电视信号接收原理	225	6.3.1 数字滤波处理	299
§ 5.1 电视信号的接收	225	6.3.2 电视信号的二维和三维频谱分析	301
5.1.1 概述	225	§ 6.4 采用数字处理技术的电视机	306
5.1.2 黑白电视接收机的组成	226	6.4.1 用数字处理方法实现亮色分离	307
5.1.3 彩色电视接收机的组成	228		

6.4.2 数字处理电视机的主控系统	317	§ 7.7 视频信道编码和传输概述	381
6.4.3 画中画处理电路	326	§ 7.8 前向纠错(FEC)编码	383
6.4.4 NICAM728 立体声/双伴音系统	331	7.8.1 RS 码的编码及其纠错译码	383
6.4.5 消除闪烁技术	337	7.8.2 卷积编码及维特比(Viterbi)译码	387
6.4.6 图文电视广播	339	7.8.3 能量扩散	392
§ 6.5 电视演播室数字设备简介	343	7.8.4 交织	394
6.5.1 数字时基和空间处理设备	343	§ 7.9 调制技术	395
6.5.2 非线性编辑系统	346	7.9.1 四相相移键控(QPSK)	395
参考文献	350	7.9.2 正交幅度调制(QAM)	396
习题与思考题	351	7.9.3 格形编码调制(TCM)	398
第七章 数字电视系统原理	352	7.9.4 编码正交频分复用(COFDM)	403
§ 7.1 数字电视系统	352	§ 7.10 数字电视信号的接收	407
§ 7.2 视频信源编码概述	355	7.10.1 数字卫星电视信号的接收	407
§ 7.3 预测编码	357	7.10.2 数字有线电视信号的接收	408
7.3.1 预测编码原理	357	7.10.3 数字地面广播电视信号的接收	409
7.3.2 帧内预测编码	360	7.10.4 综合接收解码器(IRD)	411
7.3.3 帧间预测编码	363	参考文献	413
§ 7.4 变换编码	370	附录 1 GB1385—78 黑白电视广播标准	415
7.4.1 变换编码原理	370	附录 2 GB3174—82 彩色电视广播	418
7.4.2 离散余弦变换	372	附录 3 我国电视频道的划分	426
7.4.3 DCT 系数的量化和编码	373	附录 4 GB2097—80 彩色电视广播测试图	428
§ 7.5 熵编码	376		
7.5.1 霍夫曼(Huffman)编码	376		
7.5.2 运动矢量的熵编码	377		
7.5.3 DCT 系数的熵编码	377		
§ 7.6 MPEG-2 视频编解码器	379		

第一章 视觉特性与三基色原理

§ 1.1 光的特性

五光十色的自然界,通过光波的传递映入人眼产生了视觉。电视就是根据人眼视觉特性以一定的信号形式实时传送活动景物的技术。通常,在发送端,用电视摄像机把景物(或图像)转变成相应的电信号,电信号通过一定的途径传输到接收端,再由显示设备显示出原景物(或原图像)的重现光像。可见,电视源是光像,最后映入人眼的仍是光像,而中间则经过光—电转换、电信号的传输和处理、电—光转换等过程。因此,为了更好地学习电视原理,有必要先从电视技术的角度简要介绍一下光的某些基本特性。

1.1.1 电磁辐射与可见光谱

在地球上,太阳是照亮大自然的光源之一,它是热、光和各种射线的辐射体。光兼有波动特性和微粒特性,光是一种携带电磁辐射能量的电磁波中的很小一部分。电磁波的波谱范围很广,包括无线电波、红外线、可见光谱、紫外线、X射线、 γ 射线等等,如图 1-1 所示。其中只有我们眼睛能看到的那一部分叫做可见光。

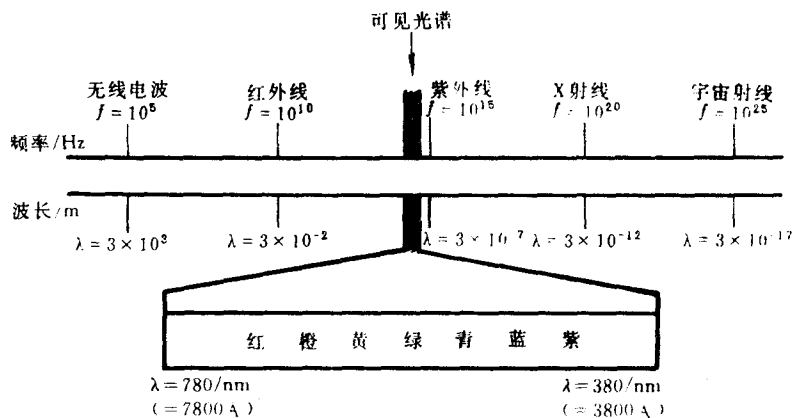


图 1-1 电磁辐射波谱

注: $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} = 10^9 \text{ \AA}$ 或 $1 \text{ \AA} = 10^{-10}\text{m}$ 。

由图 1-1 看出,不同波长的光所呈现的颜色各不相同,随着波长的缩短,呈现的颜色依次为:红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。只含有单一波长成分的光称为单色光;包含有两种或两种以上波长成分的光称为复合光。复合光给人眼的刺激呈现为混合色,太阳辐射出的电磁波是含有各种波长的波谱带,其中波长为 $380 \sim 780\text{nm}$ 的电磁波才能被人眼所感知,如图 1-2 所示,并给人以白光的综合感觉。

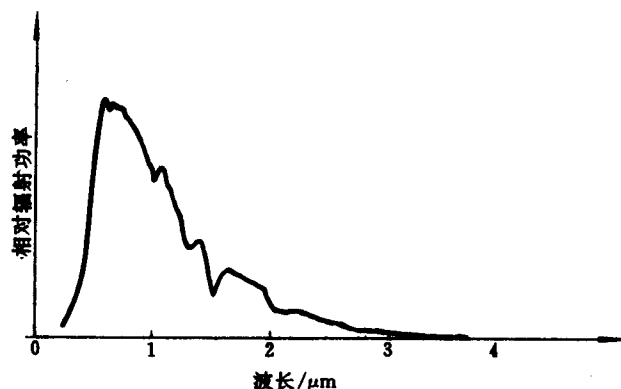


图 1-2 太阳辐射功率波谱

广播电视只利用可见光谱范围,而当电视应用于科学技术其它领域时,波谱范围就大为扩展。例如,紫外电视可用于生物研究、医疗诊断、工业探伤等方面;红外电视可用于夜间侦察、跟踪制导、宇宙开发、节能、临床医学、激光研究、公害监视、气象等方面。这些应用所涉及的波谱范围可宽达 $20 \sim 14000\text{nm}$ 。

1.1.2 光源

自然界的不同景物,在日光(即太阳光)照射下,由于反射(或透射)了可见光谱中的不同成分而吸收其余部分,从而引起人眼的不同彩色感觉。一般来讲,某一景物的彩色,是该景物在特定光源照射下所反射(或透射)的一定可见光谱成分,作用于人眼而引起的视觉效果。例如,当一块布受到阳光(白光)照射后,主要反射了蓝色光谱成分,吸收了白光中其余光谱成分,被反射的蓝光射入人眼并引起蓝色视觉效果,于是我们说:这是一块蓝色的布。可见,彩色感觉既决定于人眼对可见光谱中的不同成分有不同视觉效果的功能,又决定于光源所含的光谱成分以及景物反射(或透射)和吸收其中某些成分的特性。所以,同一物体在不同光源照射下呈现的彩色也有所不同。例如,在白炽灯光下看蓝色的布,其彩色就不如在自然光下那样鲜艳,这是由于白炽灯光中的蓝光成分较少的缘故。又如,在用绿色光源照明的暗室里观看蓝色的布,这时蓝布的颜色将呈现为黑颜色。总之,人眼的彩色感觉是主观(人眼的视觉功能)和客观(物体属性与照明条件的综合效果)相结合的系统中所发生的生理—物理过程,二者缺一不可。

一般来讲,色源有两种。一种是上述不发光的物体,在一定光谱分布(功率波谱)的光源照射下,因反射一定的光谱成分和吸收其余部分而呈现一定的彩色;另一种是本身发光的色源,根据它的辐射光谱分布,引起人眼的一定彩色感觉。由于彩色与照明光源的光谱分布有密切关系,所以有必要对光源作一简单介绍。

一、色温

在近代照明技术中统称为“白光”的光谱分布并不相同,其中包括光谱能量偏重于波长较长端(红色区)的“热白光”,直到能量偏重于波长较短的“冷白光”,它们将引起彩色视

觉的差异。为了便于进行白光的比较和色度计算,经常采用色温这个概念。当绝对黑体^①被加热时,将以电磁波的形式向外辐射能量,其辐射波谱仅由温度决定,如图 1-3 所示。由图可见,随着温度的增加,辐射能量也增大;同时,曲线最大值向短波方向移动。所以,当温度增高时,不仅亮度增大,其发光颜色也随之变化。为了区分各种光源的不同光谱分布与颜色,可以用绝对黑体的温度来表征。当绝对黑体在某一特定绝对温度下,其辐射的光谱与某一光源的光谱具有相同的特性,则绝对黑体的这一特定温度就定义为该光源的色温。色温的单位是开[尔文](K)。例如,一个钨丝灯泡的温度保持在 2800K 时所发出的白光,与温度保持为 2854K 的绝对黑体所辐射的白光功率波谱相一致,于是就称该白光的色温为 2854K。可见,色温并非光源本身的实际温度,而是用来表征其光谱特性的参量。图 1-4(a)示出在不同温度下绝对黑体在可见光范围内的相对辐射功率波谱。

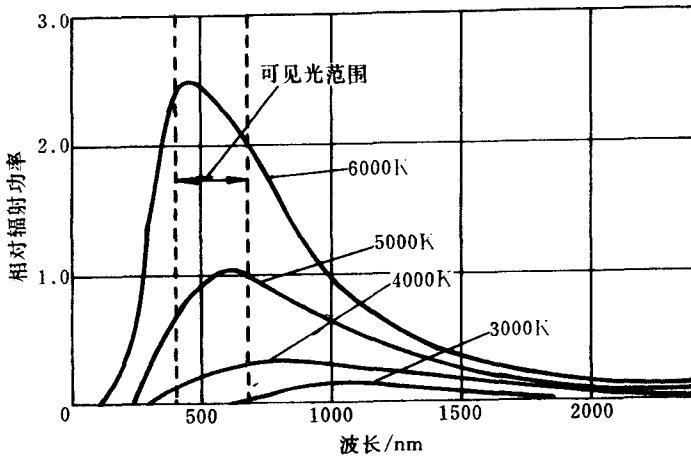


图 1-3 绝对黑体在不同温度时的辐射功率波谱

二、标准光源

太阳是最大的自然光源,它的辐射波谱范围很广。在地面上测量时,太阳辐射光谱分布是随季节、气候、时辰而变化的。因为影响太阳光色温的因素较多,所以,太阳光不便于用作实用的标准光源。近几十年来,人们在试制新型光源方面已取得了很大成绩,出现了不少人造光源。电视能否高度逼真地传输彩色与光源的选用有密切关系。在近代照明技术中,按国际规定选用如下五种主要标准光源(即标准白光)。

A 光源 相当于钨丝灯在 2800K 时发出的光,色温为 2854K。其波谱能量主要集中在红外线区域,所以钨丝灯光看起来不如太阳光白,而总是带些橙红色。

B 光源 接近于正午直射的阳光。当绝对黑体温度在 4800K 时发出的光与该光源发出的光最接近,所以说 B 光源的相关色温^②为 4800K。在实验室中,可以用特制的滤色镜由 A 光源获得 B 型光源。

① 绝对黑体(也称全辐射体)是指既不反射也不透射而完全吸收入射辐射的物体。它对所有波长辐射的吸收系数均为 1。严格来说,绝对黑体在自然界是不存在的,其实验模型是一个中空的、内壁涂黑的球体,在其上面开了一个极小的小孔,进入小孔的光辐射经内壁多次反射、吸收,已不能再逸出外面,这个小孔就相当于绝对黑体。

② 有些光源的光只与某一温度下绝对黑体辐射的光近似,而不能精确等效。这时,把辐射光的特性与光源最近的黑体温度称为该光源的相关色温。

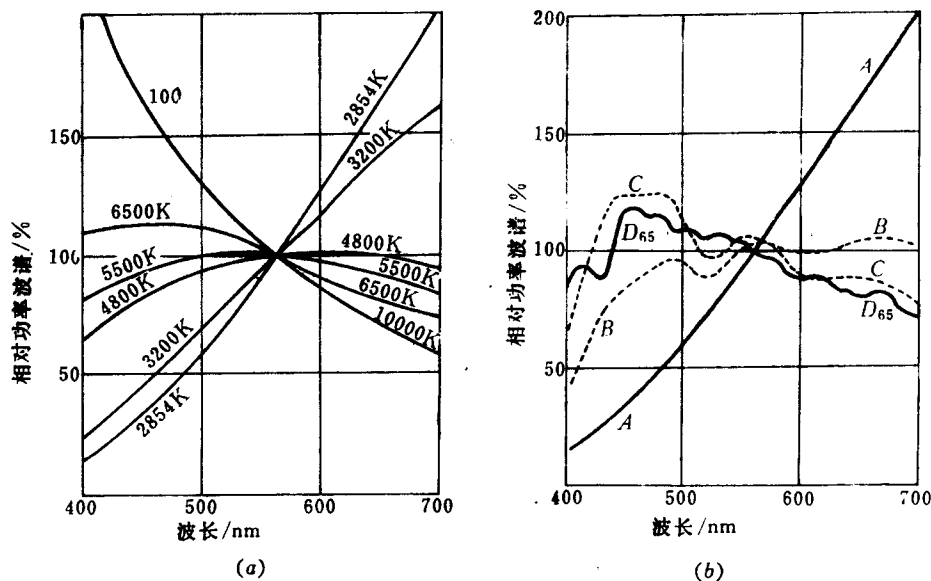


图 1-4 黑体与标准光源的相对功率波谱

(a) 各种色温下黑体的辐射功率波谱(在可见光范围内);

(b) 标准光源的功率波谱。

C 光源 相当于白天的自然光,其波谱能量在 $400 \sim 500\text{nm}$ 处较大,可见 C_{H} 含蓝色成分较多。它的相关色温为 6770K 。也可用特制滤色镜由 A 光源获得。

D_{65} 光源 相关色温为 6500K ,相当于白天的平均光照。在 400nm 以下范围内,它的波谱能量比 B 光源与 C 光源要大些,所以更接近太阳光的波谱。用来作为照明光源时,被照物体所呈现的颜色更接近于在日光照射下的真实颜色。所以,1967 年国际照明委员会(CIE^[1])建议采用 D_{65} 作为标准光源。它可以由彩色显像管所采用的三种荧光粉发出的光适当混配得到。

E 光源 是在色度学中采用的一种假想的等能白光(E_{H}),就是当可见光谱范围内的所有波长的光都具有相等辐射功率时所形成的一种白光,它与色温为 5500K 的白光相近。这种光源实际上并不存在,但由于它的采用而大大简化了色度学中的计算。

在近代照明技术中还采用一种新式卤钨灯,其色温为 3200K ,它具有寿命长、亮度高、体积小、色温稳定等特点,是彩色电视演播室中常用的光源。

近年来在电视屏幕上,尤其是黑白显像管荧光粉所发出的白光,色温有时高达 9300K ,甚至 11000K 。不过在后一种情况下,已明显地给人以偏蓝色的感觉。对于彩色电视,太高的色温将使重现彩色不够柔和。

上述各标准光源的近似功率波谱曲线分别示于图 1-4(b)中。

§ 1.2 人眼的视觉特性

电视图像是供人眼观看的,电视系统的综合质量,最终要由人眼做出鉴定,所以电视

1: CIE 是 Commission International de l'Eclairage(国际照明委员会)的缩写词。

系统应当精确地模拟人眼的视觉特性。只有掌握了人眼特性及其对电视系统的要求,才可能合理选择电视系统的基本参数,以保证其质量。因此,有必要在学习电视系统之前,先研究有关人眼视觉特性方面的一些问题。

1.2.1 眼睛的构造

眼睛是一个构造极其复杂的器官,图 1-5 只画出了眼球水平断面的几个主要部分。

眼球壁由多层组成,最外层是坚硬的蛋白质膜,它的正前方的 $\frac{1}{6}$ 部分为有弹性的透明组织,称为角膜。光线从这里进入眼内。其余 $\frac{5}{6}$ 部分为白色不透明组织,称为巩膜,它主要起巩固及保护眼球的作用。

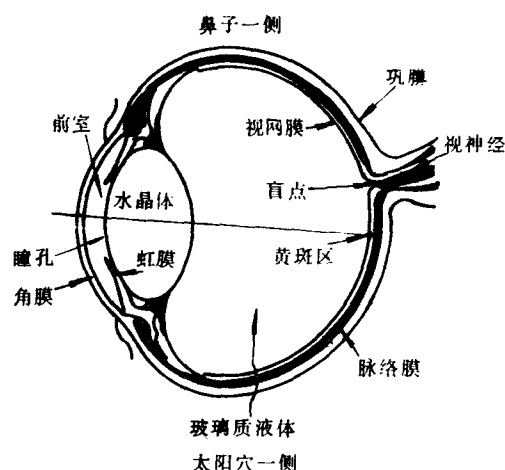


图 1-5 眼球的水平断面图

巩膜里面的一层由虹膜和脉络膜组成,后者含有丰富的色素细胞,呈现黑色,起着遮光作用。它既能避免外来多余光线的干扰,又能避免眼球内部光线的乱反射。虹膜随不同种族有不同颜色,如黑色、蓝色、褐色等。

在虹膜中间有一圆孔称为瞳孔。瞳孔的大小可借助于虹膜的环状肌肉组织来调节,从而可以控制进入眼睛内部的光通量,起着照像机中光圈的作用。

眼球壁最里层为视网膜层,它由大量光敏细胞所组成。光敏细胞按其形状分为杆状细胞与锥状细胞两种。前者分布在视网膜边缘部分,其灵敏度极高,在低照度时,主要靠它来辨别明暗,但对彩色不敏感。锥状细胞分布在视网膜中心部分,它既能辨别光的强弱,又能辨别颜色。白天的视觉过程主要由锥状细胞来完成。夜晚视觉则由杆状细胞起作用,所以在较暗处只能看见黑白形象而无法辨别彩色。这些光敏细胞都与视神经末梢连接。视神经汇集到视网膜上的一点,然后通向大脑,该汇集点无光敏细胞,称盲点。

在瞳孔后面是一扁球形弹性透明体,称水晶体,即通常所说的眼球,它起着透镜的作用。水晶体的曲率由其两旁的睫状肌调节,从而可以改变焦距,使不同距离的景物都能在视网膜上清晰成像。

正对水晶体中心的视网膜上,有一个集中了大量锥状细胞的黄斑区,每个锥状细胞都

连着一个神经末梢,所以黄斑区的分辨力(定义见第 1.2.5 节)最高,具有最高清晰度。在远离黄斑区的视网膜上,视神经分布很稀,多个光敏细胞接在一条视神经上,因而这条视神经将传递多个细胞的平均光刺激,于是使这一区域的视觉分辨力显著下降。

眼球的前室是对可见光透明的水状液体,它能吸收一部分紫外线。后室充满了胶质透明结构体,也称玻璃质液体,起着保护眼睛的滤光作用。

眼睛观看景物时,光线通过透明的角膜、前室水状液、水晶体以及后室玻璃质液体,使影像聚焦在视网膜的中心部位—黄斑区。视网膜上的光敏细胞受到光刺激产生电脉冲,电脉冲沿着神经纤维传递到视神经中枢,由于各细胞产生的电脉冲不同,大脑就形成了一幅景象感觉。

1.2.2 光的度量

前面介绍了光源本身的特性和人眼的构造,在这里我们将讨论如何用人眼去度量光,也就是讨论客观光波对人眼刺激的效果。虽然,诸如光强、亮度等一些基本度量单位在实用中已被作为客观物理量来解释和利用,但实际上却是客观光波刺激人眼而引起的主观效果,已经包含了人眼的视觉特性和大脑视觉区域的生理功能。

一、视觉光谱光效率 $V(\lambda)$ 曲线

视觉效应是由可见光刺激人眼引起的。如果光的辐射功率相同而波长不同,则引起的视觉效果也不同。随着波长的改变,不仅颜色感觉不同,而且亮度感觉也不相同。例如,在等能量分布的光谱中,人眼感到最暗的是红色,其次是蓝色和紫色;而最亮的是黄绿色。反过来说,要获得相同的亮度感觉,所需要的红光的辐射功率要比绿光的大得多。人眼这种对不同波长光有不同敏感度的规律因不同人而有所不同;对同一人来讲,也会因年龄、身体状况等因素而变化。下面要介绍的人眼光谱光效率函数曲线是以“标准观察者”的标准数据为依据的。这些数据来自对许多正常视觉观察者测试结果的平均值。

为了确定人眼对不同波长光的敏感程度,可以在产生相同亮度感觉的情况下,测出各种波长光的辐射功率 $\Phi_r(\lambda)$ 。显然 $\Phi_r(\lambda)$ 越大,说明该波长的光越不容易被人眼所感觉;而 $\Phi_r(\lambda)$ 越小,则人眼对它的敏感程度越高。因此 $\Phi_r(\lambda)$ 的倒数可用来衡量视觉对波长为 λ 的光的敏感程度,称光谱光效能,用 $K(\lambda)$ 表示。

实测表明,对波长为 555(nm)的光,有最大光效能 $K_m = K(555)$ 。于是,把任意波长光的光效能 $K(\lambda)$ 与 K_m 之比称为光谱光效率函数,并用函数 $V(\lambda)$ 表示

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K(555)} = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (1-1)$$

如果用得到相同主观亮度感觉时所需各波长光的辐射功率 $\Phi_r(\lambda)$ 表示,则有

$$V(\lambda) = \Phi_r(555)/\Phi_r(\lambda) \quad (1-2)$$

$V(\lambda)$ 是小于 1 的数,也就是说,为得到相同的主观亮度感觉,在波长为 555nm 时,所需光的辐射功率为最小。随着波长自 555nm 开始逐渐增大或减小,所需辐射功率将不断增长,或者说光效能不断下降。

表 1-1 列出 1933 年国际照明委员会(CIE)所获得的最佳数据,由此画出的光谱光效率函数曲线示于图 1-6(粗线)。该曲线也称相对光谱灵敏度(或光谱响应)曲线。它说明,

如果光的辐射功率相同而波长不同,则人眼的亮度感觉将按曲线规律变化。对于明视觉,当 $\lambda=555\text{nm}$ 时为黄绿光, $V=1$,说明亮度感觉最大。对其余波长的光 $V(\lambda)<1$,说明亮度感觉减弱。而当 $\lambda<400\text{nm}$ 或 $\lambda>760\text{nm}$ 时 $V(\lambda)=0$,说明人眼已没有亮度感觉。

下面我们要介绍的几种光学度量单位都是与光谱光效率函数有关的量,即包含了主观度量的因素。

表 1-1 光谱光效率函数值

λ/nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	λ/nm	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
400	0.0004	0.00929	600	0.631	0.03315
410	0.0012	0.03484	610	0.503	0.01593
420	0.0040	0.0966	620	0.381	0.00737
430	0.0116	0.1998	630	0.265	0.003335
440	0.023	0.3281	640	0.175	0.001497
450	0.038	0.455	650	0.107	0.000677
460	0.060	0.567	660	0.061	0.0003129
470	0.091	0.676	670	0.032	0.0001480
480	0.139	0.793	680	0.017	0.0000715
490	0.208	0.904	690	0.0082	0.00003533
500	0.323	0.982	700	0.0041	0.00001780
510	0.503	0.997	710	0.0021	0.00000914
520	0.710	0.935	720	0.00105	0.00000478
530	0.862	0.811	730	0.00052	0.000002546
540	0.954	0.650	740	0.00025	0.000001379
550	0.995	0.481	750	0.00012	0.000000760
560	0.995	0.3288	760	0.00006	0.000000425
570	0.952	0.2076			
580	0.870	0.1212			
590	0.757	0.0655			

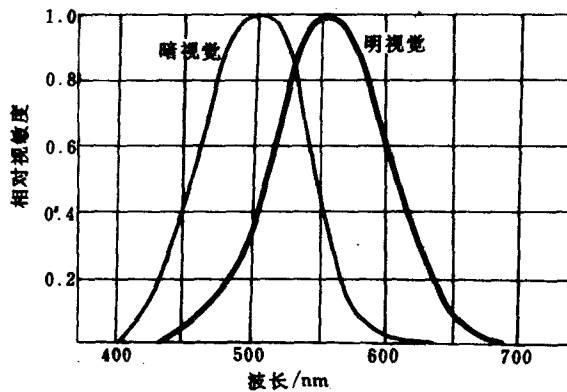


图 1-6 明视觉与暗视觉的光谱光效率曲线

二、光度学中几个度量单位

既然人眼对不同波长光的亮度感觉不同,那么从人眼光感觉来度量某一波长光的辐

射作用时,不仅与该波长光的辐射功率有关,而且还与人眼对该波长光的光效能有关。

根据我国 1984 年颁布的《中华人民共和国法定计量单位》,下面介绍几个主要光度量单位,它们与国际计量局的最新规定是统一的。

1. 发光强度

发光强度的单位是坎[德拉],为国际单位制(SI)中的一个基本单位,1979 年第十六届国际计量大会决定:坎德拉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,而且在此方向上的辐射强度为 1/683 瓦特每球面度。

发光强度用符号 I_v 表示,其单位坎[德拉]用 cd 表示。

2. 光通量

光通量是按人眼光感觉来度量的辐射功率,用符号 Φ_v 表示。其单位名称为流明(lm),是具有专门名称的 SI 的一个导出单位,且定义为:流明等于发光强度为 1 坎[德拉]的点光源,在 1 球面度立体角内发射的光通量。如用符号表示,可写成 $1\text{lm} = 1\text{cd} \cdot \text{sr}$ 。

根据坎[德拉]定义可知,当 $\lambda = 555\text{nm}$ 的单色光辐射功率为 1W 时,所产生的光通量为 683lm(或称 1 光瓦)。在其它波长时,由于光谱光效率 $V(\lambda)$ 下降,相同辐射功率所产生的光通量均随之下降。

如果光源的辐射功率波谱为 $\Phi_e^i(\lambda)$,则总的光通量应为各波长成分的光通量之总和,即

$$\Phi_v = K \int_{380}^{780} \Phi_e^i(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1-3)$$

因为人眼只对 380~780nm 的波长成分有光感觉,因此式中的积分限与此二数值相对应,式中 K ② 为常数,当辐射功率以瓦为单位时, $K = 683(\text{lm/W})$ (对明视觉而言)。

利用光谱灵敏度曲线与光谱光效率函数曲线相同的光电转换器件,就可以直接测量光通量。

一个 40W 的钨丝灯泡输出的光通量为 468lm,发光效率为 11.7lm/W;一个 40W 的日光灯可以输出 2100lm 的光通量,发光效率为 52.5lm/W;用于电视照明的金属卤化物灯,发光效率可达 80~100lm/W。目前许多国家都在努力研制新型人工光源,并已取得很大成果,不仅提高了发光效率,而且延长了光源的使用寿命。但许多新光源具有新的光谱特性,有的是连续光谱,有的是线状或带状的非连续光谱,因而产生了光源的视觉质量问题。对电视中采用的光源,需要更多地考虑其光谱特性。

3. [光]亮度、[光]照度单位

用以表示发光面明亮程度的光亮度的单位是坎[德拉]每平方米,符号为 cd/m^2 。它是 SI 的一个导出单位。光亮度用 L_v 表示。过去常用的单位尼特(nt)现已不再使用。

光照度单位勒[克斯]是具有专门名称的 SI 的一个导出单位,符号为 lx。其定义为:勒[克斯]等于 1 流明的光通量均匀分布于 1 平方米面积上的光照度。 $1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$ 。光照度常用 E_v 表示。

① 根据国际规定,相应的辐射物理学参量和光度学参量用同样字母表示,只由一个脚标加以区分(V 代表目视,用于光度学; e 代表能量,用于辐射物理学),在不会发生混淆的场合,脚标可以去掉。

② 因为 K 是常数,在后面分析相对量值的公式中都略去不写。

1.2.3 亮度、彩色与立体视觉

一、明暗视觉

在第 1.2.2 节中我们讨论了人眼的明视觉光谱光效率函数,并给出了如图 1-6 中粗线所示的典型曲线 $V(\lambda)$ 。这一曲线表明,在白天正常光照下人眼对不同波长光的敏感程度,也称明视觉光谱光效率曲线。在第 1.2.1 节中曾指出,明视觉过程主要是由锥状细胞完成的,它既产生明暗感觉又产生彩色感觉。

在夜晚或在微弱光线下,人眼主观亮度感觉规律有所变化,表现在对波长短的光敏感程度增大,即光谱光效率曲线左移,如图 1-6 中细线所示。在这种情况下,紫色能见范围扩大;红色能见范围缩小。这一曲线称暗(或夜晚)视觉光谱光效率曲线,用 $V'(\lambda)$ 表示。

当光线暗到一定程度时,就只有杆状细胞起作用,于是人眼分辨不出光谱中各种颜色,结果使整个光谱带只反映为明暗程度不同的灰色带。

二、彩色视觉

彩色视觉是人眼的一种明视觉功能。为确切表示某一彩色光,必须采用三个基本参量:亮度(亦称明度)、色调和饱和度。这三个量在视觉中组成一个统一的总效果,并严格地描述了彩色光。

亮度是光作用于人眼时所引起的明亮程度的感觉。一般来说,彩色光的光功率大则感觉亮,反之,则暗。就物体而言,其亮度决定于由其反射(或透射)的光功率的大小。若照射物体的光功率为定值,则物体反射(或透射)系数越大,物体越明亮,反之,则越暗。对同一物体来说,照射光越强(即光功率越大),越明亮,反之,则越暗。

色调反映了颜色的类别。通常所说红色、绿色、蓝色等等,就是指的色调。在第 1.1.1 节中我们曾提到不同波长的光所呈现的颜色不同,实际上就是指色调不同。至于彩色物体的色调,则决定于物体在光照射下所反射的光谱成分。不同波长的反射光使物体呈现不同的色调。例如,某物体在日光下呈现绿色,这就是说该物体受白光照射后,只将绿色光分量反射出来,并被人眼所感觉,而其余成分都被物体吸收了。

对于透光物体(例如玻璃),其色调由透射光的波长所决定。例如红玻璃被白光照射后,吸收了白光中大部分光谱成分,而只透射过红光分量,于是人眼感觉到这块玻璃是红色的。

色调是决定彩色本质的基本参量,是彩色的重要属性之一,彩色物体的色调由物体本身的属性——吸收特性和反射或透射特性所决定。但是,当我们观看物体彩色时,还与照明光源的特性——光谱分布有关。

饱和度是指彩色光所呈现彩色的深浅程度(或浓度)。对于同一色调的彩色光,其饱和度越高,说明它的颜色越深,如深红,深绿等。饱和度较低,则说明它呈现较浅的颜色,如浅红、浅绿等。高饱和度的彩色光可以因掺入白光而被冲淡,变成低饱和度的彩色光。例如,投射到白纸上一束高饱和度的红光,则人们看到白纸呈现为深红色。如果再将一束白光同时投射到该纸上,则人眼虽然仍感觉到红色色调,但已变成了淡红色,即饱和度降低了。投射的白光越强,则感到红色越淡。可见饱和度下降的程度反映了彩色光被白光冲淡的程度,而饱和度则反映了某种色光的纯度。例如,100%饱和度的某色光,就代表完全没有混