



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

Pinciples of Television (Seventh Edition)

电视原理

(第7版)

侯正信 吕卫 褚晶辉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电视原理

(第7版)

侯正信 吕卫 褚晶辉 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系普通高等教育电气信息类国家级规划教材,适合电子信息工程、通信工程和相近专业的相关课程教学使用。

全书以彩色电视为主线,系统讲述了视觉特性与三基色原理、电视传像基本原理、模拟与数字彩色电视制式、图像信息的获取、模拟与数字电视信号的形成、处理、传输,以及接收与显示的原理。由于电视技术已发展到高清晰度、数字阶段,因而在此次修订中以数字电视为重点,对全书内容作了更新和调整。每章末附有习题和思考题,并列出参考文献。

《电视原理实验》是与本书配套的实验教材。

本书也可供从事电视技术研发、生产以及维护工作的研究生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电视原理/侯正信,吕卫,褚晶辉编著. —7版.

—北京:国防工业出版社,2016.1

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-118-11068-5

I. ①电… II. ①侯… ②吕… ③褚… III. ①电视

—理论—高等学校—教材 IV. ①TN94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 245123 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 100048)

三河市德鑫印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 插页 1 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 397 千字
2016 年 9 月第 7 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 43.00 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

前 言

本教材属教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

全书共分6章。第1章、第2章介绍彩色电视的基础知识和电视传像的基本原理,包括视觉特性、光度学和色度学、彩色重现原理、电视系统的组成、扫描和同步、电视图像的基本参量,以及彩色电视的摄像和显示原理等。第3章讲解模拟彩色电视,主要包括NTSC制和PAL制的原理、编解码方法和主要性能,PAL制接收机的组成、信号处理方法和相关电路,以及模拟电视接收机中的数字处理技术。第4章至第6章涉及有关数字电视的内容。第4章在介绍模拟电视信号的数字化和分量编码的基础上,以MPEG-2视频压缩标准为主阐述预测编码、变换编码和熵编码原理,同时介绍H.264/AVC、H.265/HEVC和AVS等视频压缩编码标准。第5章介绍数字电视传输原理,内容涉及ATSC制、DVB制、ISDB-T制和DTMB制4种数字电视制式的特点与性能,以及它们所采用的传送层的功能和格式、信道编码与调制技术的原理。第6章介绍数字地面、卫星、有线电视的接收原理,以及数字电视广播中的条件接收、数字电视机顶盒和中间件的工作原理。每章均附有习题与思考题。

本教材的参考学时数为48~64,可根据专业培养目标和教学计划所规定的学时数对讲授内容作必要的取舍或增补。

考虑到电视技术迅速发展,必须增加数字电视及其新技术的教学比重,同时又考虑到专业课程的学时有限,必须精简教学内容,本教材根据第6版教材使用的经验,对原教材的结构和内容进行了幅度较大的更新和修编。

本教材的第1章~第3章、第4.1~4.6节、第5.1.1~5.1.3节、第5.2~5.4节、第6.1~6.2节由侯正信负责修编,第4.7节、第4.8节、第5.1.4节、第5.5节、第6.3节由吕卫负责修编,由褚晶辉审校全稿。

本教材是在俞斯乐主编《电视原理》第1版至第6版基础上的更新和发展,对本书前几版做出过贡献的还有郭福云、李桂苓、黄元、张春田、王兆华、刘意松、雒靖华、李文元、冯启明、杨兆选等,这里一并向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2016年1月

目 录

第1章 视觉特性与三基色原理	1
1.1 光的特性	1
1.1.1 电磁波与可见光	1
1.1.2 光源	2
1.2 人眼的视觉特性	3
1.2.1 眼睛的构造和视觉的产生	3
1.2.2 亮度视觉	4
1.2.3 彩色视觉	7
1.2.4 视觉的空间分辨力	9
1.2.5 视觉惰性 with 闪烁感觉	10
1.3 彩色计量原理	11
1.3.1 RGB 色度系统	11
1.3.2 XYZ 色度系统	12
1.3.3 均匀色标制	18
1.4 彩色重现原理	20
1.4.1 显像三基色及重现色域	20
1.4.2 显像三刺激值与亮度方程	20
1.4.3 显像混色曲线和摄像光谱响应曲线	23
1.4.4 显像计色三角形	24
1.4.5 电视系统非线性对重现彩色的影响及 γ 校正	26
1.4.6 高清晰度电视的色域	28
习题与思考题	29
第2章 电视传像的基本原理	31
2.1 电视图像的顺序传送	31
2.1.1 图像的表示和顺序传送	31
2.1.2 扫描和同步	31
2.2 视频图像信号组成原理	35

2.2.1 视频图像信号的组成	35
2.2.2 标准彩条信号	38
2.3 彩色电视摄像机	40
2.3.1 广播彩色电视摄像机的组成	40
2.3.2 彩色电视摄像机的光学系统	42
2.3.3 CCD 摄像管	45
2.4 电视图像的基本参量	47
2.4.1 与扫描有关参数的确定	47
2.4.2 视频图像信号的频谱	50
2.5 电视信号显示原理	53
2.5.1 CRT 电视机显示原理	53
2.5.2 平板电视机显示原理	56
2.5.3 投影显示原理	61
习题与思考题	64
第3章 模拟彩色电视原理	65
3.1 模拟彩色电视的扫描同步信号	65
3.1.1 复合同步脉冲和复合消隐脉冲	65
3.1.2 开槽场同步脉冲与均衡脉冲	67
3.2 NTSC 制模拟彩色电视原理	69
3.2.1 正交平衡调幅与频谱交错原理	69
3.2.2 NTSC 全电视信号的构成	74
3.3 PAL 制模拟彩色电视原理	80
3.3.1 彩色相序交变原理	80
3.3.2 PAL 色度信号及其频谱	82
3.3.3 PAL 制副载频的选择	85
3.3.4 PAL _D 解码原理	86
3.3.5 PAL 制彩色全电视信号编码器	92
3.3.6 PAL 制彩色电视同步信号的形成	96
3.3.7 PAL 制彩色电视射频信号的形成	97
3.4 PAL 制模拟彩色电视接收机	99
3.4.1 PAL 制模拟彩色电视接收机的组成	99
3.4.2 高频、中频模拟电视信号的处理	99
3.4.3 视频电视信号处理	104

3.4.4 电视图像的同步、扫描与显示	107
3.5 模拟电视接收机中的数字处理技术	110
3.5.1 数字处理电视机的组成和全信号编码	110
3.5.2 用数字处理方法实现亮色分离	111
3.5.3 数字处理电视机的主控系统	114
3.5.4 消除闪烁技术	116
习题与思考题	117
第4章 数字电视视频压缩编码原理	120
4.1 数字电视发展概述	120
4.1.1 模拟彩色电视的缺陷	120
4.1.2 数字彩色电视的发展	122
4.2 视频图像信号的数字化和压缩编码概述	126
4.2.1 模拟电视信号的数字化	126
4.2.2 标准清晰度电视的分量编码	127
4.2.3 高清晰度电视的分量编码	134
4.2.4 视频压缩编码的必要性及其理论依据	138
4.2.5 MPEG-2 的视频格式	139
4.3 预测编码原理	140
4.3.1 预测编码概述	140
4.3.2 I 图像的帧内预测编码	142
4.3.3 帧间预测编码概述	144
4.3.4 运动补偿帧间预测编码	145
4.3.5 帧间预测模式	148
4.4 变换编码原理	151
4.4.1 变换编码和 DCT 概述	151
4.4.2 DCT 系数的量化	153
4.4.3 游程编码	154
4.5 熵编码原理	155
4.5.1 霍夫曼(Huffman)编码	155
4.5.2 运动矢量的熵编码	156
4.5.3 DCT 系数的熵编码	156
4.6 MPEG-2 视频编解码器	157
4.7 H.264/AVC 视频编码标准	159

4.7.1 H.264 编码器及其分层结构	159
4.7.2 H.264 的预测编码	161
4.7.3 H.264 的整数变换与量化	165
4.7.4 H.264 的熵编码	166
4.7.5 H.264 的其他特征	167
4.7.6 H.264 标准的发展	168
4.8 最新视频编码标准	172
4.8.1 H.265/HEVC 视频编码标准	172
4.8.2 AVS 视频编码标准	175
习题与思考题	177
第5章 数字电视的传输原理	179
5.1 传送层的功能和格式	179
5.1.1 概述	179
5.1.2 PES 包	181
5.1.3 TS 包	182
5.1.4 传送层的业务信息描述	184
5.2 ATSC 数字电视制式	187
5.2.1 ATSC 制概述	187
5.2.2 前向纠错信道编码概述	188
5.2.3 RS 码的编码及其纠错译码	189
5.2.4 卷积编码及维特比 (Viterbi) 译码	193
5.2.5 交织	196
5.2.6 能量扩散	197
5.2.7 TCM-8VSB 调制技术	198
5.2.8 VSB 数据帧和 VSB 频谱	205
5.2.9 ATSC 制的主要性能	207
5.3 DVB 数字电视制式	208
5.3.1 DVB 制的视频格式	208
5.3.2 DVB-T 制概述	209
5.3.3 DVB-T 的信道编码	211
5.3.4 编码正交频分复用 (COFDM) 信号的形成与传输	216
5.3.5 DVB-T 制的主要性能	221
5.3.6 DVB-S 制与 DVB-C 制	222

5.4 ISDB - T 数字电视制式	224
5.4.1 ISDB - T 制的设计要求	225
5.4.2 ISDB - T 制的传输技术	225
5.4.3 ISDB - T 制的主要性能	228
5.5 DTMB 数字电视制式	228
5.5.1 概述	228
5.5.2 前向纠错编码(FEC)	229
5.5.3 符号星座映射	230
5.5.4 交织方式	232
5.5.5 帧结构与复用	232
5.5.6 DTMB 制的主要性能	235
习题与思考题	235
第6章 数字电视的接收原理	237
6.1 数字电视信号的接收	237
6.1.1 数字地面广播电视信号的接收	237
6.1.2 数字卫星电视信号的接收	243
6.1.3 数字有线电视信号的接收	244
6.2 数字电视广播中的条件接收	245
6.2.1 条件接收概述	245
6.2.2 数字电视广播 CAS 结构及原理	245
6.2.3 同密和多密模式	248
6.3 数字电视机顶盒与数字电视中间件	249
6.3.1 数字电视机顶盒的硬件结构	250
6.3.2 数字电视机顶盒基于中间件的软件结构	252
6.3.3 数字电视机顶盒与一体机的关系	256
习题与思考题	257
参考文献	258

第 1 章 视觉特性与三基色原理

电视通指根据人眼视觉特性,以一定的信号形式,远距离传送活动景物图像及其伴音的技术和设备。在发送端,电视摄像机通过光 - 电转换把景物的光图像转变成相应的电信号,电信号通过处理设备变换成适合于信道传输的形式,通过信道传输到接收端,经过接收设备处理后,由电视显示器进行电 - 光转换,重现出原景物的光像,如图 1 - 1 所示。

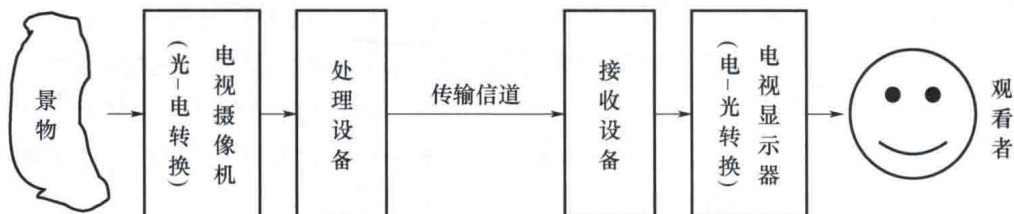


图 1 - 1 电视系统示意图

电视技术研究如何用经济、有效的信号转换和处理方法,使重现光像逼真地模拟实际景物。电视技术体现了物理学和生理学的结合。因此,在具体地研究电视技术之前,需要首先了解光的物理特性以及人眼感觉光像的生理特性。

1.1 光的特性

1.1.1 电磁波与可见光

光或称可见光是一种人眼可见的电磁波,其波长范围为 380 ~ 780nm,只占电磁辐射波谱的很小一部分。电磁波的波谱范围很广,包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等,如图 1 - 2 所示。

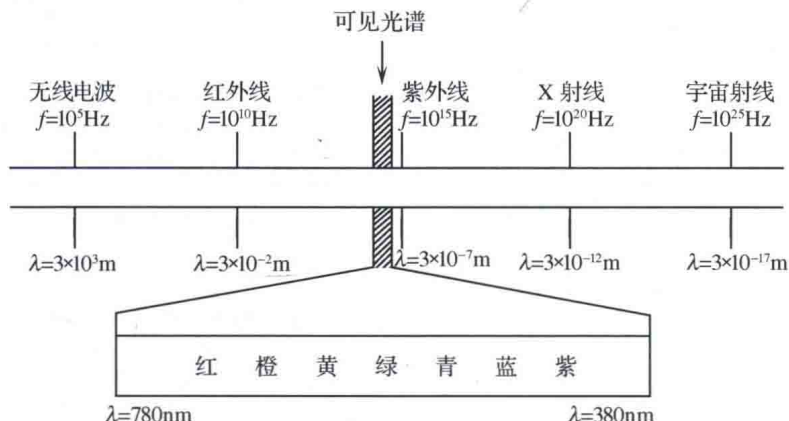


图 1 - 2 电磁辐射波谱

除了特殊用途的紫外电视、红外电视外,广播电视只利用可见光谱范围。由图 1-2 可见,不同波长的光呈现出的颜色各不相同,随着波长由长到短,呈现的颜色大致依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。只含有单一波长成分的光称为单色光(或谱色光),包含有两种或两种以上波长成分的光称为复合光。太阳辐射的光含有各种单色光,给人以白光的感觉。颜色感觉是由人眼的主观视觉功能和物体、光源的客观属性相结合产生的。

1.1.2 光源

用于照明的发光物体称为光源。某一景物所呈现的色彩是该景物在特定光源照射下,反射(或透射)的光谱成分作用于人眼而引起的视觉效果。例如,当一块布在白光照射下主要反射了白光中的蓝色光谱成分而吸收了其余光谱成分时,被反射的蓝光作用于人眼就产生了蓝色的视觉。另外,同样一块蓝色的布,之所以在白炽灯光照射下其颜色不如在太阳光下那样鲜艳,是由于白炽灯光中的蓝光成分较少的缘故。因此,为了正确重现景物的颜色就需要研究光源的特性。

由光源所发出的具有特定相对光谱功率分布的光称为照明体。“等能白光”是一个假想的照明体,它包含可见光的所有光谱成分,而且各光谱成分的辐射功率都相同。实际上,无论是在室外照明中所采用的太阳光,还是在室内照明中所使用的人造白光,其各光谱成分的辐射功率并不完全相同。通常使用色温这一术语来描述用于照明的白光即照明体的品位。当完全辐射体(指既不反射也不透射而完全吸收入射波的理想物体)在某一绝对温度下,其辐射的相对光谱功率分布与某一照明体的光谱相同(或最接近)时,这一绝对温度就定义为该照明体的色温(或相关色温)。色温的单位用 K(Kelvin,开尔文)表示。国际照明委员会(Commission Internationale de l'Eclairage,CIE)定义的 6 种标准照明体以及等能白光如表 1-1 所列。图 1-3 示出了不同温度下完全辐射体和标准照明体的相对光谱功率分布。

表 1-1 标准照明体

名称	标准照明体及其色温
A	色温 2856K 的完全辐射体的光
B	相关色温约 4874K 的日光
C(C _白)	相关色温约 6740K 的日光
D ₅₅	相关色温约 5503K 的日光
D ₆₅	相关色温约 6504K 的日光
D ₇₅	相关色温约 7504K 的日光
E(E _白)	相关色温约 5500K 的假想等能白光

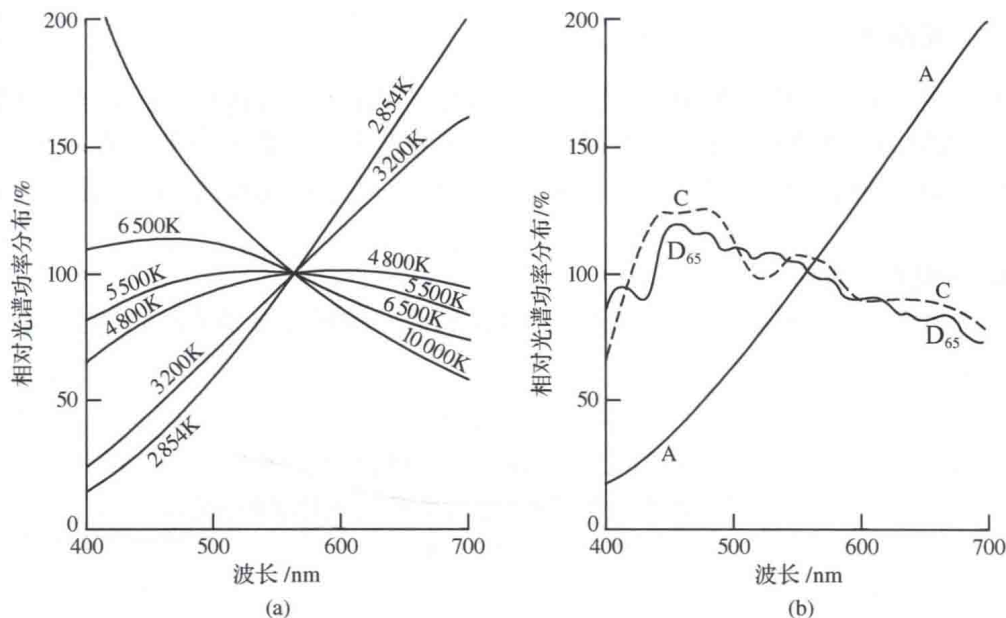


图 1-3 完全辐射体和标准照明体的相对光谱功率分布

(a) 不同温度下完全辐射体的相对光谱功率分布; (b) 标准照明体的相对光谱功率分布。

1.2 人眼的视觉特性

电视是供人观看的,电视图像质量最终要由人的主观感觉做出鉴定。为了高质量、高效率地重现景物,电视系统的特性应与人眼的视觉特性相适应。

1.2.1 眼睛的构造和视觉的产生

眼睛是一个构造复杂的器官,图 1-4 画出了眼睛水平断面的主要部分。为了便于理解,我们可以把眼睛比作一个摄像机。其中,巩膜比作机壳,角膜比作镜头,瞳孔比作光圈,虹膜比作光圈控制,晶状体比作变焦透镜,玻璃体比作滤光器,脉络膜比作暗箱,视网膜比作感光体,视神经比作信号线。眼睛观看景物时,由景物反射或透射的光线经角膜、晶状体、玻璃体成像在视网膜上。视网膜由大量连接到视神经末梢的光敏细胞组成。光敏细胞受到光的刺激产生生物信号,生物信号沿着视神经传递到视神经中枢,形成视信息。视信息与眼肌调节信息、记忆信息一起,经大脑综合处理后形成对景物的视觉。

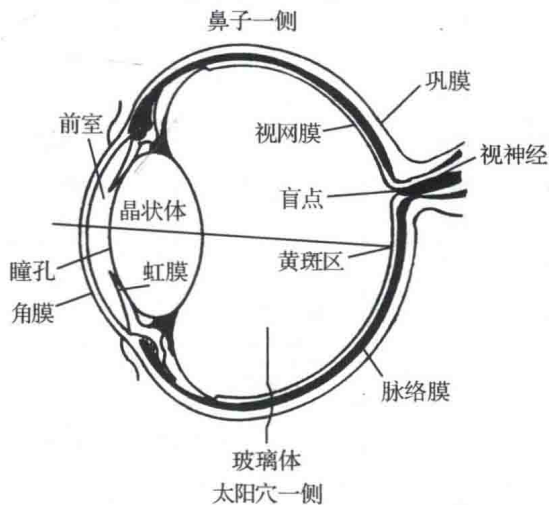


图 1-4 眼睛的水平断面图

1.2.2 亮度视觉

亮度视觉是人眼对光的明暗感觉,它是由可见光刺激人眼引起的。显然,光的辐射功率越大,人眼的亮度感觉就越强。然而亮度感觉不仅仅与光的辐射功率有关,实验表明,对于辐射功率相同而波长不同的光,人眼不仅感觉它们有不同的颜色,而且感觉有不同的亮度。

1. 光谱光视效率

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 $\Phi_e(\lambda)$,并定义 $\Phi_e(\lambda)$ 的倒数为光谱光视效能:

$$K(\lambda) = 1/\Phi_e(\lambda) \quad (1-1)$$

实测表明,人眼对波长为 555nm 的光具有最大的光谱光视效能 $K_{\max} = K(555)$ 。定义以 $K_{\max}$ 归一化的光谱光视效能为光谱光视效率(或称为相对光谱灵敏度),即

$$V(\lambda) = K(\lambda)/K_{\max} \quad (1-2)$$

显然, $0 \leq V(\lambda) \leq 1$ 。

由式(1-1)和式(1-2)可见,对于不同波长的光, $V(\lambda)$ 越接近于 1,在相同的亮度感觉下,所需该波长光的辐射功率就越小;而在相同的辐射功率下,人眼感觉该波长光的亮度就越大。当 $V(\lambda) = 0$ 时,产生有限的亮度感觉需要无穷大的辐射功率,而在有限的辐射功率下,人眼对该波长的光已没有亮度感觉。表 1-2 列出了 1933 年由 CIE 测量公布的光谱光视效率数据,由此画出的光谱光视效率曲线如图 1-5 所示。

表 1-2 明视觉与暗视觉的光谱光视效率

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

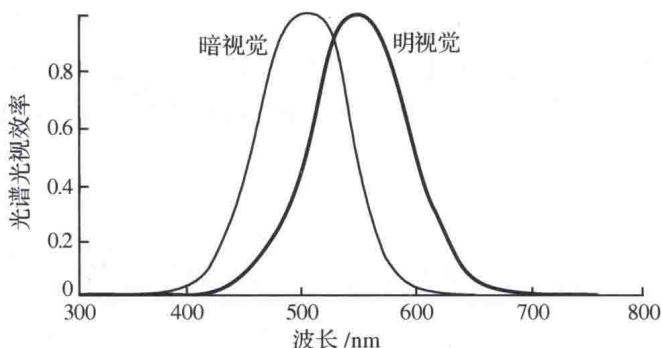


图 1-5 明视觉与暗视觉的光谱光视效率曲线

在表 1-2 和图 1-5 中分别包含有明视觉和暗视觉两种过程的数据和曲线,这与在人的视网膜上存在两种光敏细胞(椎状细胞和杆状细胞)有关。椎状细胞只在环境亮度比较大的情况下起作用,它既能辨别光的强弱,又能辨别颜色。明视觉过程是在白天正常光照下主要由椎状细胞完成的。杆状细胞的灵敏度较高,可在低照度下起作用,但它只能辨别光的强弱,不能辨别颜色。暗视觉过程是在夜晚或微弱光线下主要由杆状细胞完成的。由图 1-5 可见,暗视觉的光谱光视效率曲线与明视觉相比要向左偏移。

2. 亮度的度量

由前面的介绍可以了解到,人眼观看某一景物的亮度感觉不仅与该景物所反射的各波长成分光的辐射功率有关,而且与各波长光的光谱光视效率有关。下面介绍几个与亮度有关的度量单位,它们与国际计量局的最新规定是一致的。

1) 光通量

光通量是按人眼的亮度感觉来度量的光源的辐射功率,用符号 Φ 表示。其单位名称为流明(lumen),单位符号为 lm。若光源发出波长为 555nm 的单色光,辐射功率为 1W,则产生的光通量为 683lm(或称 1 光瓦)。一般而言,对于波长为 λ 的单色光,辐射功率为 $\Phi_e(\lambda)$,产生的光通量为 $\Phi = \Phi_e(\lambda) V(\lambda)$ 光瓦 = 683 $\Phi_e(\lambda) V(\lambda)$ (lm)。非单一波长光源的光通量是其各波长的光通量总和。对于由 N 个不同波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 的单色光组成的光源,其光通量为

$$\Phi = 683 \sum_{i=1}^N \Phi_e(\lambda_i) V(\lambda_i) \text{ (lm)} \quad (1-3)$$

对于具有连续光谱功率分布密度 $\Phi_e(\lambda)$ 的光源,其光通量为

$$\Phi = 683 \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \text{ (lm)} \quad (1-4)$$

式(1-4)中的积分下限和上限分别为 380 和 780,是考虑到人眼只对波长为 380 ~ 780nm 的可见光有亮度感觉。

2) 发光强度

光源在给定方向上单位球面立体角(1sr)内的光通量称为该光源在此方向上的发光强度,用符号 I 表示,其单位为坎德拉(Candela,简写为 cd)。1cd = 1lm/1sr,也就是说,若光源在某方向上一个单位球面立体角内的光通量为 1lm,则在此方向上的发光强度为 1cd。发光强度可表示为

$$I = d\Phi/d\Omega \quad (1-5)$$

3) 亮度

亮度用来表示发光面的明亮程度。发光面在给定方向上的亮度是它在该方向的发光强度与它在垂直于该方向平面上的投影面积之比,用符号 L 表示。其单位为 cd/m^2 (坎德拉每平方米)。亮度可表示为

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos\theta} \quad (1-6)$$

式中: S 为发光面的面积; θ 为发光面的法线方向与亮度指定方向的夹角。

3. 视觉范围与视亮度

视觉范围是指能够被人眼感觉的亮度范围。由于瞳孔和光敏细胞具有随光的强弱而自动调节的能力,因此视觉范围非常宽,从百分之几到几百万坎德拉每平方米。然而,人眼并不能同时感觉这样大的亮度范围。当人眼适应了某一环境亮度时,所能感觉的亮度范围将变小。例如,在白天 $10000\text{cd}/\text{m}^2$ 的环境亮度下,人眼能感觉的亮度范围约为 $100 \sim 20000\text{cd}/\text{m}^2$, 低于 $100\text{cd}/\text{m}^2$ 的亮度感觉为黑色。而在夜间 $30\text{cd}/\text{m}^2$ 的环境亮度下,能感觉的亮度范围约为 $1 \sim 200\text{cd}/\text{m}^2$, 这时 $100\text{cd}/\text{m}^2$ 的亮度就可产生相当亮的感觉。这说明人眼在一定环境亮度下观看景物时的亮度感觉,即所谓视亮度,虽然与景物的亮度有关,但不直接由它所决定,还与周围环境亮度有关。

在不同的背景亮度 L 下,人眼所能觉察的最小亮度变化 $\Delta L_{\min}$ (称为可见度阈值)也不相同。实验表明,按如下定义的相对对比度灵敏度阈值 ξ 为一个常数:

$$\xi = \Delta L_{\min} / L \quad (1-7)$$

ξ 在 $0.005 \sim 0.05$ 范围内取值。这就意味着,视亮度增量 dS 应该用相对亮度增量来衡量,即 $dS = k' dL / L$ 。将此式积分后得到视亮度:

$$S = k \lg L + k_0 \quad (1-8)$$

式中: k 和 k_0 均为常数。式(1-8)表明,视亮度与亮度的对数成线性关系。

设人眼可分辨的景物图像的第1级亮度为最小亮度, $L_1 = L_{\min}$, 由式(1-7)知,人眼能分辨出来的第2级亮度为

$$L_2 = L_1 + \xi L_1 = (1 + \xi) L_{\min}$$

依此类推,人眼能分辨出来的第 n 级亮度(设其为最大亮度)为

$$L_n = (1 + \xi)^{n-1} L_{\min} = L_{\max} \quad (1-9)$$

定义景物图像中最大亮度 $L_{\max}$ 与最小亮度 $L_{\min}$ 的比值 C 为对比度:

$$C = L_{\max} / L_{\min} \quad (1-10)$$

由式(1-9)和式(1-10),并考虑到 $\xi \ll 1$, 得到所能分辨的亮度层次级数为

$$n = 1 + \frac{\ln C}{\ln(1 + \xi)} \approx \frac{1}{\xi} \ln C = \frac{2.3}{\xi} \lg C \quad (1-11)$$

即人眼所能分辨的亮度层次级数与图像对比度的对数成正比。

图1-6示出了视亮度与亮度的关系曲线,横坐标为对数亮度,纵坐标为视亮度,单位为(亮度层次)级。实线对应亮度变化足够慢的情况,与式(1-8)所示的对数线性关系一致,显示了在很宽的视觉范围内人眼的亮度感觉。曲线的下部有相交的两分支,表示两种光敏细胞不同的亮度感觉。图中穿过实线上某些点的虚线则对应人眼在适应某一环境亮度下小得多的视觉范围,与式(1-11)所示的对数线性关系一致。由图可见,同一亮度在不同的环境亮度条件下可产生完全不同的视亮度。例如, A 点的亮度对适应于 C 点的视

亮度是非常明亮,而对适应于 B 点的视亮度则是非常黑暗。

视亮度的相对视觉特性为景物图像的传送和重现提供了方便。首先,重现图像的亮度范围无需与实际景物的相等,只要二者具有相同的对比度和亮度层次级数,就能给人以真实的感觉。例如,在通过电视机屏幕观看运动会的实况转播时,设现场的亮度范围是 $200 \sim 20000 \text{ cd/m}^2$,屏幕的亮度范围仅有 $2 \sim 200 \text{ cd/m}^2$,尽管如此仍可获得真实的亮度感觉,因为二者的对比度同为 100。其次,人眼不能觉察的亮度差别,在重现景物图像上也无需精确复制出来,这就为在数字图像编码中采用有限的量化级数提供了依据。最后,它为在电视技术中方便有效地表示景物图像的亮度提供了可能。景物图像可看作是由很多具有相同的微小面积的像素组成的,

各个像素对光源照射的光所具有的不同的反射能力,所产生的不同的反射光通量,是使人眼产生不同亮度感觉的内在原因。由前面的介绍可知,在发光面积以及人眼观看的角度等条件给定的情况下,光度学中所定义的亮度是与光通量成正比的。因此,在电视技术中通常是借用光通量的单位(流明)来表示景物的各个像素的亮度。这样表示的优点是排除了发光面积和观看角度等不确定因素影响,能有效地传送图像对比度和亮度层次信息。另外,光通量直接与光的辐射功率有关,便于用相应的电视信号表示和控制。

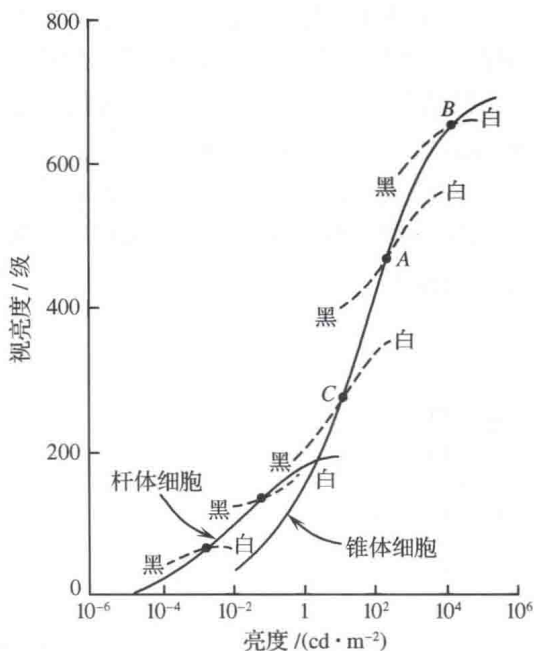


图 1-6 视亮度与亮度的关系曲线

1.2.3 彩色视觉

1. 彩色三要素

彩色视觉是人眼的明视觉功能。描述彩色光的三个基本参量(或称彩色三要素)包括亮度、色调和饱和度。

如前所述,亮度是光作用于人眼所引起的明亮程度的感觉。光源的亮度取决于人眼所能感觉的光源辐射功率的大小,非发光物体的亮度取决于在光源的照射下,其反射(或透射)并被人眼感觉到的光功率的大小。

色调表示颜色的种类,通常所说的红色、绿色、蓝色等,指的就是色调。当某一波长的单色光作用于人眼时,所产生的相应的颜色感觉称为该单色光的色调。若复合光是由某一单色光与白光混合产生的,其中单色光的颜色也称为该复合光的色调。

饱和度表示彩色光所呈现颜色的深浅程度(即纯度)。同一色调的彩色光,例如红色光,可具有从深红到浅红等多种不同的饱和度。若复合光是由某一单色光与白光混合产生的,饱和度取决于其中单色光在该复合光中所占的比例,介于 0 和 100% 之间。若只有单色光,饱和度为 100%;若只有白光,饱和度为 0。色调和饱和度合称为色度。因此,色度既表示彩色光的颜色类别,又表示颜色的深浅程度。

实验表明,人眼对彩色光的色调和饱和度只具有有限的分辨能力。对于不同波长的单色光,人眼能分辨出色调差别的最小波长变化量称为色调分辨阈,其数值随波长而改变,如图 1-7(a) 所示。色调分辨阈越小,色调分辨力越强。由图中可见,人眼对 480 ~ 640nm 区间色光的色调分辨力较强。

对于某一色调的彩色光使其饱和度由 100% 逐渐变化到 0,视觉所能分辨的饱和度变化的等级数称为该色调彩色光的饱和度分辨力(或灵敏度)。饱和度分辨力随波长而改变,数值大约在 4 ~ 25 之间,如图 1-7(b) 所示。由图中可见,在红色、蓝色区域饱和度分辨力较强。

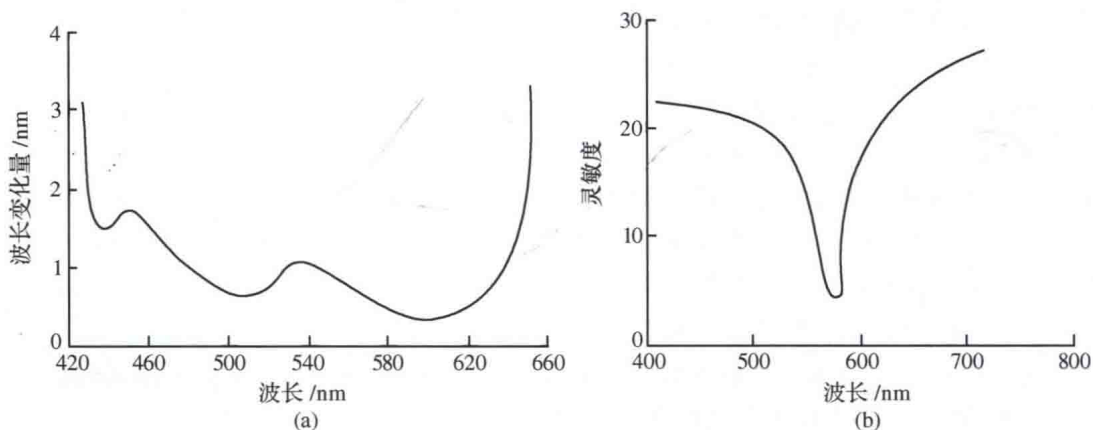


图 1-7 色调分辨阈和饱和度分辨力

(a) 色调分辨阈与波长的关系; (b) 彩色饱和度分辨阈与波长的关系。

人眼的色调和饱和度分辨能力对电视系统色调失真和饱和度失真的控制提供了技术依据。

2. 三基色原理

不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉,然而相同的彩色感觉却可以来源于不同的光谱成分组合。例如,由适当比例的红光和绿光混合,可以产生与黄单色光相同的视觉效果;以适当比例混合起来的红、绿、蓝 3 种单色光,可以产生与具有连续光谱的白光相同的视觉效果。从视觉效果来讲,自然界中的所有彩色几乎都能由红、绿、蓝 3 种基本彩色光混合配出,这就是对彩色电视具有重要意义的三基色原理。

三基色原理是基于人眼的这样一种彩色视觉假说:视网膜上有红、绿、蓝 3 种椎状光敏细胞,它们具有各自的光谱光视效率。如图 1-8 所示, $V_R(\lambda)$ 、 $V_G(\lambda)$ 、 $V_B(\lambda)$ 分别表示红、绿、蓝 3 种光敏细胞的光谱光视效率曲线,三者相加即得到图 1-5 中的明视觉光谱光视效率曲线:

$$V(\lambda) = V_R(\lambda) + V_G(\lambda) + V_B(\lambda) \quad (1-12)$$

设某彩色光的功率分布为 $\Phi_e(\lambda)$, 对应三种光敏细胞的光通量分别为

$$\begin{cases} \Phi_R = 683 \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V_R(\lambda) d\lambda \\ \Phi_G = 683 \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V_G(\lambda) d\lambda \\ \Phi_B = 683 \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V_B(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1-13)$$