

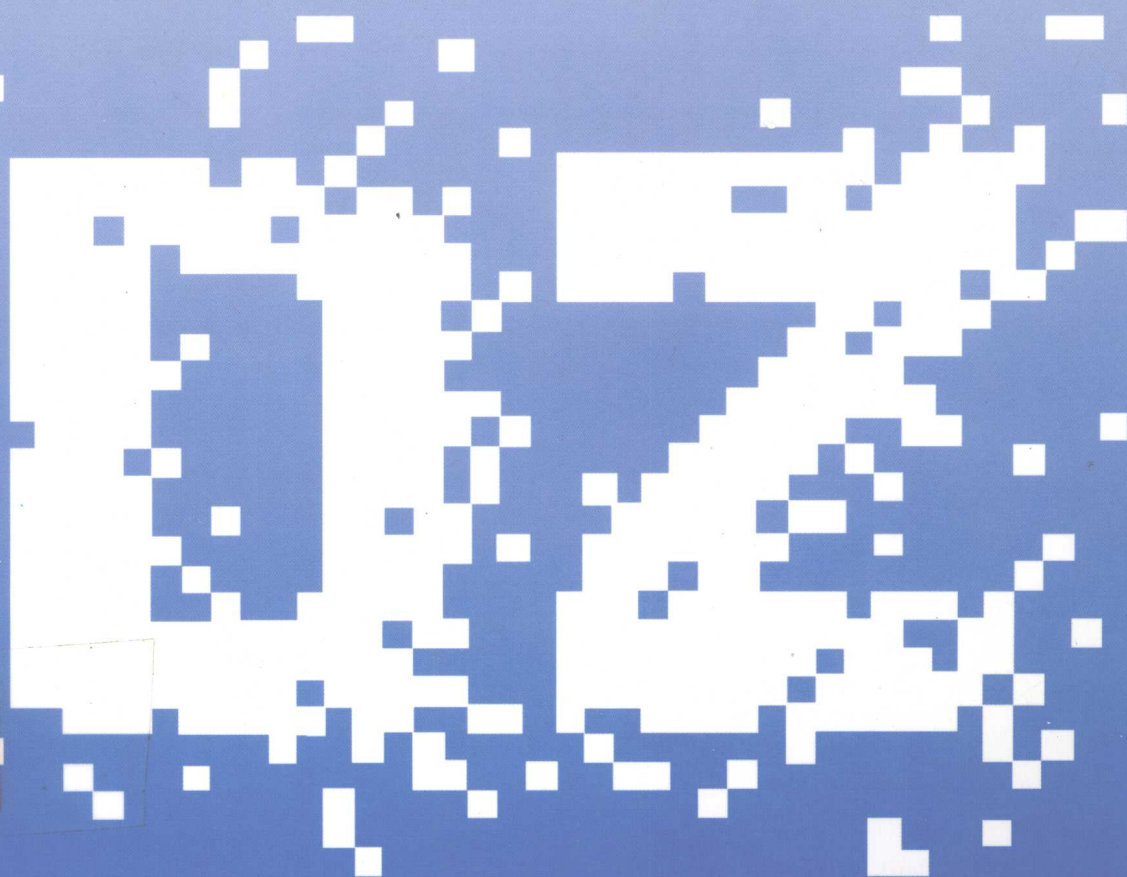


高等学校
工科电子类 规划教材

彩色电视原理

(第4版)

杨 琳 张锬生 杨怀祥



东南大学出版社

彩色电视原理

(第4版)

杨 琳 张锬生 杨怀祥

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 提 要

本书为全国高等学校工科电子类专业用教材。

本书共分三篇。第一篇主要讲授彩色电视基础;第二篇讲授广播电视信号传输,主要介绍广播电视信号的发射、卫星电视传送及有线电视系统;第三篇讲授彩色电视接收技术,主要介绍彩色电视接收原理、电视信号的数字化原理、磁带录像机和数字激光视听技术、液晶电视、等离子体电视等,最后介绍了数字电视原理及高清晰度电视(HDTV)。每章末均附有思考题与习题。

本书可作为高等院校信息电子类、无线电技术专业教材,也可供从事电视领域科研、生产及维修工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

彩色电视原理 / 杨琳主编;张锟生,杨怀祥编. —4
版. —南京:东南大学出版社,2004.7
ISBN-7-81089-626-1

I. 彩... II. ①杨... ②张... ③杨... III. 彩色电
视—电视接收机—理论 IV. TN949.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 047043 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼2号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 扬中市印刷有限公司
开本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.75 字数:460千字
2004年7月第4版 2004年7月第10次印刷
印数:35001—40000 定价:28元
(凡因印装质量问题,可直接向发行部调换。电话:025—83792327)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,做出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

第4版前言

本教材按电子工业部工科电子类1991~1995年教材编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会通信教材编审小组征稿并推荐出版。责任编辑委为陆大经教授。

本教材由周桂友、杨先富、张锬生编写第1版,1996年5月由张锬生、杨怀祥、杨琳进行了修编(第2版)。两次编写均由清华大学尤婉英教授担任主审。2001年1月进行了第3次修编,现在第3版基础上进行第4次修编,章节安排与第3版基本相同,内容上加大了电视数字技术的分量。教材仍由东南大学任主编。

本教材的参考学时数为64~80学时。

本教材可作为非广播电视专业的工科类本科和大专学生的教学用书。本教材力图讲清彩色电视原理的基础,使学生全面了解、掌握电视技术应用。因此,本教材除介绍彩色电视机外,还简要介绍电缆电视、磁带录像机、激光视盘机、液晶电视和等离子体电视等应用技术。

本次修编中,为适应教学及生产、维修的需要,第7章中选用两片集成电路彩色电视机进行介绍;第8章主要介绍电视信号的数字化原理及模拟电视机中的数字技术;将原第11章“电视新技术”改为“数字电视及数字高清晰度电视”,介绍数字电视的发展概况及国际上一些数字电视系统;其他章节在内容上也进行了局部调整。

本教材1、2、4、5、6章和9.1节由杨琳执笔,3、7章由杨怀祥执笔,8、10、11章和9.2节由张锬生执笔。

作者感谢熊猫电子集团公司为本教材提供部分资料。

由于编者水平有限,书中疏漏及错误之处难免,请读者不吝指正。

编 者 于东南大学

2004年2月

第3版前言

本教材按电子工业部工科电子类1991~1995年教材编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会通信教材编审小组征稿并推荐出版。责任编辑委为陆大绘教授。

本教材由周桂友、杨先富、张锬生编写第1版,1996年5月由张锬生、杨怀祥、杨琳进行了修编。两次编写均由清华大学尤婉英教授担任主审。现在前两轮教材的基础上再次进行修编,融进了近年来出现的电视新技术。仍由东南大学任主编。

本课程的参考学时数为64~80学时。

本教材可作为非广播电视专业的工科电子类本科或大专学生的教学用书。修编后的教材将所有内容分为三篇,力图讲清彩色电视的基础后,使学生全面掌握电视技术应用。因此,本教材除介绍电视接收机外,还简略介绍了有线电视、盒式磁带录像机、激光视盘机、液晶电视及等离子电视等应用技术。

现教材修编后对模拟电视接收机部分进行了精简,删掉了一些过时落后的内容,对数字电视原理中有关内容进行了调整,增加了多媒体电视及网络广播等内容。

本书1、2、4、5、6章和9.1节由杨琳执笔,3、7章由杨怀祥执笔,8、10、11章和9.2节由张锬生执笔。

作者感谢熊猫电子集团公司为本书提供部分资料。

由于编者水平有限,书中疏漏及错误之处在所难免,请读者不吝指正。

编者 于东南大学

2001年2月

目 录

第一篇 彩色电视基础

1 彩色电视色度学基础	(1)
1.1 光的性质	(1)
1.2 视觉特性	(2)
1.3 三基色原理与配色方程	(5)
思考题与习题	(10)
2 电视图像转换原理与电视信号	(12)
2.1 电视传像原理	(12)
2.2 电子扫描	(15)
2.3 电视图像的基本参量	(18)
2.4 电视信号的基本组成	(21)
思考题与习题	(24)
3 彩色电视制式	(25)
3.1 兼容制彩色电视制式概述	(25)
3.2 NTSC 制彩色电视	(32)
3.3 PAL 制彩色电视	(42)
3.4 SECAM 制彩色电视	(49)
思考题与习题	(50)

第二篇 广播电视信号传输

4 广播电视信号的发射	(52)
4.1 概述	(52)
4.2 广播电视信号的射频发射	(52)
4.3 电视的微波中继传输	(55)
思考题与习题	(57)
5 卫星电视传送系统	(58)
5.1 概述	(58)
5.2 卫星广播电视的传输方式	(58)

5.3 卫星广播系统的基本组成	(61)
5.4 卫星数字电视	(68)
思考题与习题	(68)
6 有线电视系统	(69)
6.1 概述	(69)
6.2 有线电视系统的设计	(70)
6.3 工作频段与频道	(76)
思考题与习题	(80)

第三篇 电视接收技术

7 彩色电视接收机	(81)
7.1 超外差单通道彩色电视接收机的组成	(81)
7.2 彩色电视接收机的主要性能	(88)
7.3 高频调谐器和遥控电路	(90)
7.4 图像中频系统和伴音系统	(99)
7.5 色度信号处理系统(PAL 制解码器)	(107)
7.6 亮度通道	(121)
7.7 扫描电路	(125)
7.8 两片集成电路彩色电视接收机介绍	(139)
7.9 大屏幕、多制式彩色电视接收机	(150)
思考题与习题	(160)
8 电视信号的数字化及模拟电视机中的数字技术	(162)
8.1 概述	(162)
8.2 电视视频、音频信号的数字化原理	(163)
8.3 模拟电视机中的数字技术	(170)
8.4 数字图像信号的压缩编码原理及 MPEG 标准简介	(205)
思考题与习题	(213)
9 盒式磁带录像机和数字激光视听技术	(215)
9.1 盒式磁带录像机	(215)
9.2 激光数字视听技术——LD CD VCD SVCD DVD	(222)
思考题与习题	(242)
10 液晶电视(LCD)和等离子体电视(PDP)	(243)
10.1 液晶电视(LCD)	(243)
10.2 等离子体电视(PDP)	(253)

思考题与习题	(255)
11 数字电视和数字高清晰度电视	(256)
11.1 兼容制模拟彩色电视体制的缺陷	(256)
11.2 国际上数字电视和高清晰度电视发展概况	(257)
11.3 高清晰度电视视频参数的导出及其国际标准	(258)
11.4 美国 ATSC 地面数字电视系统简介	(264)
11.5 欧洲 DVB—T 地面数字电视系统简介	(266)
11.6 欧洲 DVB—S 卫星数字电视系统简介	(267)
11.7 欧洲 DVB—C 有线数字电视系统简介	(268)
11.8 日本 BST—OFDM 地面数字电视系统简介	(268)
11.9 我国数字电视和数字高清晰度电视发展概况	(268)
11.10 数字电视机顶盒	(269)
11.11 多媒体电视和网络广播简介	(271)
思考题与习题	(273)
参考文献	(275)
附录	(277)

第一篇 彩色电视基础

1 彩色电视色度学基础

彩色电视传送景物的过程,就是把一幅光学图像转换成电信号进行传输,然后再把电信号恢复成正确的光学图像。因此,在学习彩色电视技术之前,有必要了解一些有关光和色度学的基本知识。

1.1 光的性质

1.1.1 可见光谱

由光学理论知道,光是属于一定波长范围内的一种电磁辐射。电磁辐射的波长范围很宽,它包括无线电波、红外线、紫外线、X射线和宇宙射线等。图 1.1 所示为电磁波按波长(或频率)的顺序排列,称作电磁波谱。

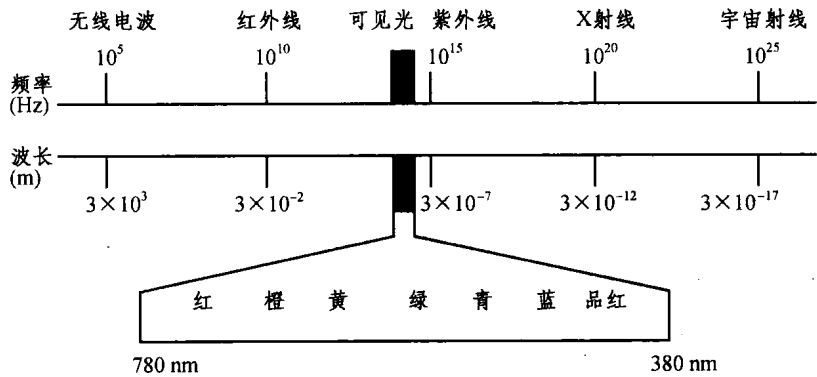


图 1.1 电磁辐射波谱

由图可知,人眼能感觉到的可见光谱只集中在 5×10^{14} Hz 附近很窄的一段频率范围内,其波长为 380~780 nm。当作用于人眼的可见光的波长从长到短依次变化时,在人眼中引

起的颜色感觉将是红、橙、黄、绿、青、蓝、品红各色。

作为白光的太阳光,实质上并不是单色光,而是由不同波长的无数单色光所组成。一束太阳光通过三棱镜后,由于不同波长折射率的不同,便分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的彩带。这一实验表明,太阳光是包含全色谱的复合光,给人眼以白光的综合感觉。

1.1.2 标准光源

在色度学中,常常以白色光作为一种标准。为便于对白光进行比较和色度计算,通常用绝对黑体的辐射温度——“色温”作为标准。

绝对黑体被定义为能全部吸收入射光的物体的理想黑体。一个绝对黑体所辐射的光谱,是与它的温度密切相关的。绝对黑体的温度越高,它所辐射的光谱中蓝色分量就越多,红色分量就越少。因此,光源的“色温”是这样定义的:在可见光谱内,光源的光谱与某温度的绝对黑体辐射的光谱相同或相近时,则该绝对黑体的温度称为该光源的色温,单位以绝对温度开氏度(K)表示。例如,白炽灯钨丝的温度为 2 800K 时所发出的白光,与温度为 2 854K 的绝对黑体所辐射的白光光谱相近,则白炽灯光的色温为 2 854K,而不是 2 800K。因此色温并非光源本身的实际温度,而是用来表征光源特性的一个参数。

物体的颜色与光源的光谱特性密切相关。电视图像能否高保真地反映自然景色的颜色,与选用的光源有关。为了使光源的比较和色度计算有一个标准,国际照明委员会推荐 A、B、C、 D_{65} 和 E 等国际标准光源,其中几种光源的光谱分布如图 1.2 所示。

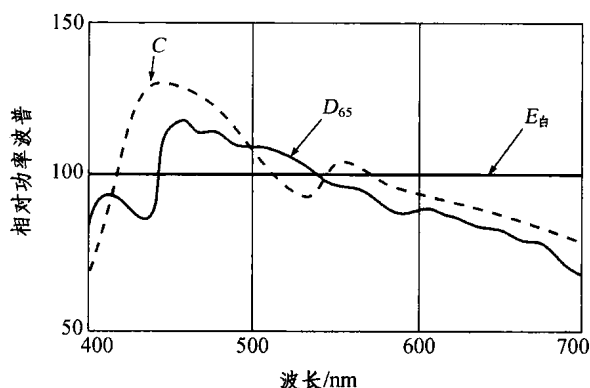


图 1.2 C、 D_{65} 、 E 的相对功率波谱

图中, C 光源近似为白天的自然光,色温近似为 6 700K; E 光源实际上并不存在,仅为简化色度学中的计算而引入的一种假设光源,也称为等能光源,色温近似为 5 500K; C 、 D_{65} 光源常被用作彩色电视标准光源。

1.2 视觉特性

1.2.1 人眼的亮度视觉

在可见光的波长范围内,人眼对不同波长的光的敏感程度是不相同的,而且因人而异。

图 1.3 是经过对各种类型人的统计,国际照明委员会推荐的标准视敏度曲线,也称人眼视觉

的光谱灵敏度曲线或相对视敏函数曲线。

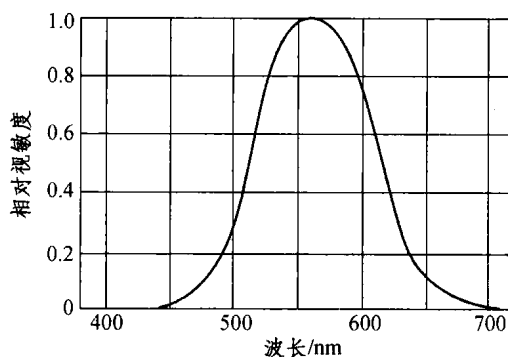


图 1.3 相对视敏函数曲线

图中曲线是光度学和色度测量基础。曲线表明了具有相等的辐射能量而波长不同的光作用于人眼时,人眼的亮度感觉不一样。也就是说,人眼对不同颜色光的亮度感觉不一样。由曲线可知,人眼最敏感的光波长为555 nm,颜色是草绿色,这一区域颜色,人眼看起来省力,不易疲劳。在555 nm处两侧,随着波长的增加或减少,亮度感觉逐渐降低。也就是说,在可见光谱范围之外,即使辐射能量再大,人眼也是没有亮度感觉的。

1.2.2 人眼的色度视觉

关于彩色视觉,科学家曾做过大量实验并提出视觉三色原理的假设。假设认为,人眼有3种不同的锥状光敏细胞,它们分别只对红色、绿色和蓝色光谱能量的刺激产生视觉反映。3种细胞对可见光的反应灵敏度曲线如图1.4所示。

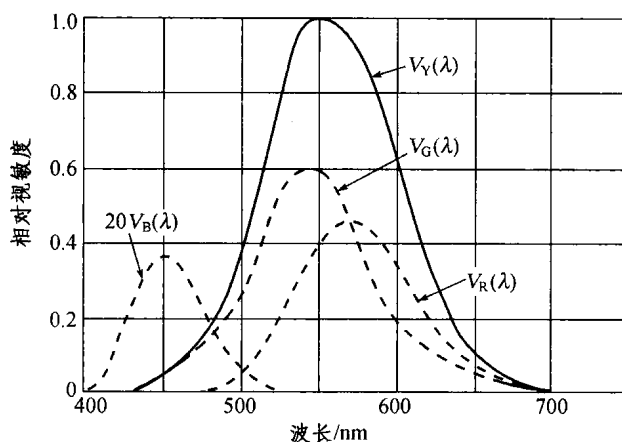


图 1.4 三种锥状细胞的相对视敏函数曲线

由图可知,曲线 V_R 、 V_G 、 V_B 的最大值分别在光谱的红、绿、蓝区域内, $V_Y(\lambda)$ 为它们的综合视敏曲线。当一束光射入人眼时,3种锥状细胞就产生不同的反应。例如,一束黄色光射入视网膜时,只对红敏细胞和绿敏细胞产生刺激,引起黄色视觉;一束品色光射入时,对红敏细胞和蓝敏细胞产生刺激,引起品色视觉。不同颜色的光对3种细胞的刺激量是不同的,产

生的彩色视觉各异,从而使人眼能分辨出五光十色的颜色。在电视技术中,正是利用了这一原理,在视觉图像复现过程中,不是重现原来景物的光谱分布,而是利用 3 种相似于红、绿、蓝锥状细胞特性曲线的 3 种光源进行配色,在色感上得到相同的效果。

1.2.3 人眼的分辨力

人眼的分辨力是指人在观看景物时对细节的分辨能力。

早期在研究人眼分辨力时,利用图 1.5 来对人眼进行测试。图中在眼睛的正前方放一块白色的屏幕,上面有两个相距很近的小黑点。逐渐增加画面与眼睛之间的距离,当距离增加到一定长度时,人眼就分辨不出两个黑点之间的距离了,这说明眼睛分辨景色细节的能力有一个极限值。我们将这种分辨细节的能力称为眼睛的分辨力或视觉锐度。

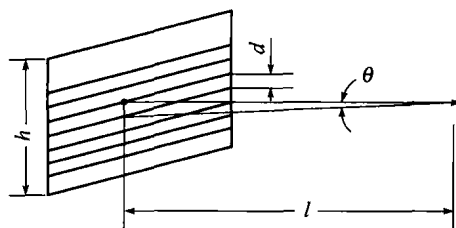


图 1.5 人眼的分辨力

分辨力的定义是眼睛对被观察物上两点之间能分辨的最小视角 θ 的倒数,即

$$\text{分辨力} = \frac{1}{\theta} \quad (1.1)$$

图 1.5 中, d 表示能分辨的相邻两点之间最近的距离, θ 是以分(')为单位的最小视角,这与医学中所定义的视力是一致的。若眼睛的最小视角为 $1'$,则视力为 1.0;若眼睛的最小视角为 $2'$,则视力为 0.5。

最小视角取决于相邻两个视敏细胞之间的距离。对于正常视力的人,在中等亮度情况下观看静止图像时, θ 为 $1' \sim 1.5'$ 。分辨力在很大程度上取决于景物细节的亮度 and 对比度,当亮度很低时,视力很差,这是因为亮度低时锥状细胞不起作用。但是亮度过大时,视力不再增加,甚至由于眩目现象,视力反而有所降低。此外,细节对比度愈小,也愈不易分辨,造成分辨力降低。在观看运动物体时,分辨力更低。

人眼对彩色细节的分辨力比黑白细节的分辨力要低。例如,黑白相间的等宽条子,相隔一定距离观看时,刚能分辨出黑白差别,如果用红绿相间的同等宽度条子替换它们,此时人眼已分辨不出红绿之间的差别,而是一片黄色。此外,实验还证明,人眼对不同彩色,分辨力也各不相同。如果眼睛对黑白细节的分辨力定义为 100%,则实验测得人眼对各种颜色细节的分辨力如表 1.1 中所列数值。

表 1.1 人眼对彩色细节的相对分辨力

细节色别	黑白	黑绿	黑红	黑蓝	红绿	红蓝	绿蓝
相对分辨力/%	100	94	90	26	40	23	19

因此在彩色电视系统中传送彩色图像时,只传送黑白图像细节,而不传送彩色细节,可减少色信号的带宽,这就是大面积着色原理的依据。

1.2.4 视觉惰性

当一定强度的光突然作用于视网膜时,不能在瞬间形成稳定的主观亮度感觉,而有一个

短暂的过渡过程。随着作用时间的增长,主观亮度感觉由小变大,达到最大值后又降低到正常值。实验还证明,当光消失后,亮度感觉并不瞬时消失,而是按近似指数函数的规律逐渐减小,这叫做视觉暂留特性,也称视觉惰性,这一特性可用图 1.6 进一步说明。

图 1.6(a)表示作用于人眼的光脉冲,图 1.6(b)表示相应的主观亮度感觉,它滞后于实际光信号。光脉冲消失后,亮度感觉还要一段时间才能消失。图 1.6(b)中 $t_2 \sim t_3$ 就是视觉暂留时间。在中等亮度的光刺激下,视力正常的人眼视觉暂留时间约为 0.1s。

眼睛在周期性的光脉冲刺激下,如果它的频率不够高,则会感到一明一暗的闪烁现象。如果将闪烁的频率增加到某一值时,由于视觉惰性,眼睛就感觉不到闪烁了。不引起闪烁感觉的最低重复频率,称为临界闪烁频率。临界闪烁频率与光脉冲亮度有关,由经验公式得到,人眼的临界闪烁频率约为 46Hz。

视觉惰性在近代电影和电视中得到应用,它们都依靠快速更换固定的图像,利用眼睛的视觉暂留特性而在人的大脑中形成图像内容连续运动的感觉。

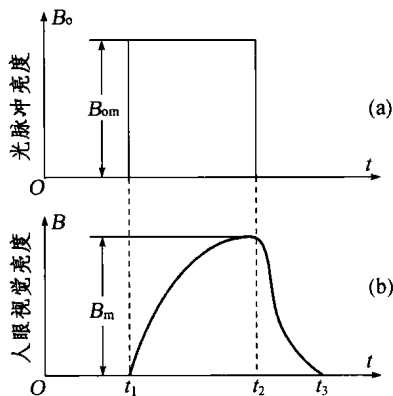


图 1.6 人眼的视觉惰性

1.3 三基色原理与配色方程

1.3.1 彩色三要素

从视觉的角度描述一种色彩需要用亮度、色调和饱和度 3 个基本参量,因此彩色视觉是人眼对亮度、色调和色饱和度的总效应。

亮度是反映光作用于人眼时引起的明亮程度。一般来说,彩色光辐射的功率越大,亮度越高,反之则亮度越低。对于不发光的物体,其亮度取决于它反射光功率的大小。

色调是反映彩色的类别,例如红色、绿色和蓝色等不同颜色。不同光谱的光呈现不同的色调,彩色物体所反映出的色调不仅与它所反射的光谱分量有关,而且还与照射物体的光源的光谱成分有关。

色饱和度是表示彩色光所呈现的深浅程度。对于同一色调的彩色光,彩色越浓越纯,其饱和度越高。也就是说,饱和度是表示某一彩色掺进白色的程度,或者说是纯净的单色光被白光冲淡的程度。某彩色光饱和度为 100%,表示该彩色光中没有混入白光。饱和度的下降,反映了彩色光被白光冲淡。

彩色光的亮度、色调和色饱和度是构成人眼对彩色光感觉的三要素。通常把色调和色饱和度合称为色度,它既表示了彩色光的彩色区别,又反映了彩色光的深浅程度。

1.3.2 三基色原理

在前面所述人眼彩色视觉特性中已知,在彩色重现过程中并不要求完全重现原景物及反射光的光谱成分,而重要的是应获得与景物相同的彩色感觉。因此仿效人眼 3 种锥状细胞,可以任选 3 种基色,将它们按不同比例进行组合,可引起各种不同的彩色感觉。3 种基色必须是相互独立的,即在数学上是线性无关的。也就是说,其中任何一种基色都不可能由

另外两种基色混合而得,否则实际上是两基色,使重现彩色的色域比三基色的狭小。另外,三基色的光谱特性可以是谱色,也可非谱色。因此所谓三基色原理,是指选择3种独立的基色,将它们按不同的比例混合,就可以得到不同的颜色;反之,任何彩色,也能分解为3种基色。

在彩色电视中,比较恰当的是在红色、绿色和蓝色光谱区域内选择3个基色。这是因为人眼的3种锥状细胞分别对红光、绿光和蓝光最敏感,它们配得的颜色范围也较广。

由三基色光相混合所得彩色光的亮度等于3种基色亮度之和,这种色光的混色又称为相加混色,其混合规律如图1.7所示。

当红、绿、蓝三束单色光投射到一个白色屏幕上,三者比例合适时,有如下混色规律:

红光+绿光=黄光

红光+蓝光=品红光

绿光+蓝光=青光

红光+绿光+蓝光=白光

适当改变混色比例时,几乎可以得到自然界中常见的所有彩色光。从图1.7中可看到:

红光+青光=白光

绿光+品红光=白光

蓝光+黄光=白光

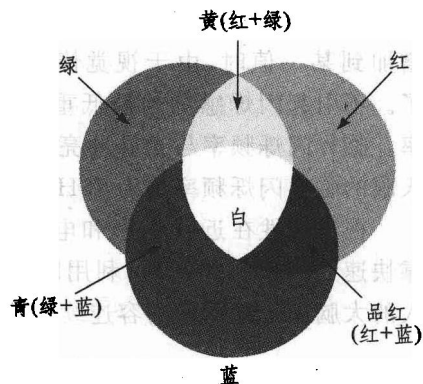


图 1.7 相加混色

当两种色光按适当比例混合时得到白光,这两种色称为互补色。例如,上述红、绿、蓝分别是青、品红、黄三色的补色,反之亦然。

利用三基色原理,在彩色电视系统摄像端用三基色光谱特性将景色分解成3个基色信号传送,在接收端产生相应的红、绿、蓝光,配出原景物的色彩。这样,利用人眼的彩色视觉特性就可以大大简化彩色电视系统的实现过程。

在电视技术中,常用的相加混色方法有两种:

时间混色法 将3种基色轮流投射到某一表面,只要轮换速度足够快,利用人眼的视觉惰性,就能得到相加混色的效果。这是顺序制彩色电视基础。

空间混色法 利用人眼空间分辨力有限的特性,把彼此相距很近的三基色发光点看成是相加的合成光。这是同时制彩色电视的基础。

与彩色电视不同,在彩色印刷、彩色胶片和绘画中采用的是相减混色法。它们是利用颜料、染料的吸色性质来实现的。例如,黄色颜料吸收蓝色(黄色的补色)光,于是在白光照射下,反射光中因缺蓝光而呈现黄色。在减色法中用黄、品红、青作为三基色,它们分别吸收各自的补色,即蓝、绿和红光。因此在减色法中,将三基色按不同比例混合时,在白光照射下,蓝、绿、红光也将按相应的比例被吸收,从而呈现各种不同色彩。

1.3.3 颜色的度量与表示

1) 配色实验

由三基色原理知道,按不同比例混合相互独立的三基色,可以获得与已知色相同的颜色。对于选定的三基色进行配色实验时,可用最简单的配色实验装置来实现,如图1.8所示。

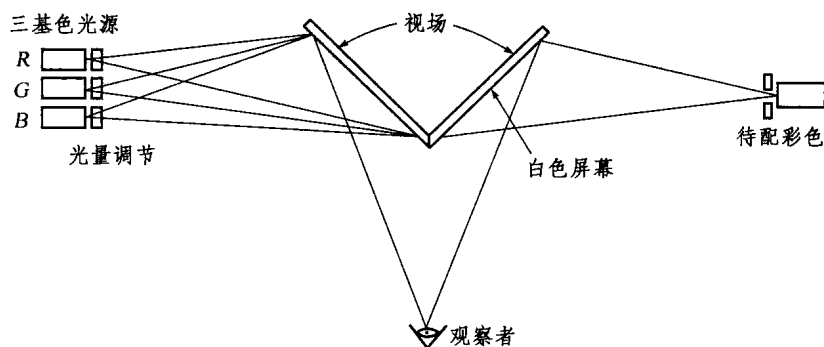


图 1.8 配色实验原理

配色实验采用正交漫反射的白屏,将人眼的视场分成 2 等分,使红、绿、蓝的配色光和待配的已知色光同时作用到人眼,进行颜色比较。然后调节三基色光强度,使它们配出的光 and 要配的已知色光,在人的视觉效果上完全一致。这时记下的三基色调节器上的光通量读数,就是所需三基色的混合比。于是得到配色方程的数学表达式为

$$F = R[R] + G[G] + B[B] \quad (1.2)$$

式中: F 为任意一个彩色光, $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$ 为三基色单位量。它表示配出已知彩色时,各需多少单位红 $[R]$ 、绿 $[G]$ 、蓝 $[B]$ 基色, R 、 G 、 B 为三色分布系数, R 、 G 、 B 的比例关系确定了所配彩色光的色度(包含色调和色饱和度),其数值确定了所配彩色光的光通量。 $R[R]$ 、 $G[G]$ 、 $B[B]$ 分别代表彩色量 F 中所含三基色的光通量成分,又称彩色分量。

由于不同的观察者对同一色感所需的 R 、 G 、 B 的色系数数值有差异,加上色感与可见光谱长之间又非单值,因此,国际照明委员会规定了配色实验的基色光波长。基色光采用水银光谱,选用红基色光波长为 700nm ,绿基色光波长为 546.1nm ,蓝基色光波长为 435.8nm 。用这个标准三基色混合相加,配得等能标准 $E_{\text{白}}$ 光,三基色光通量的比例为 $1.0000 : 4.5907 : 0.0601$,即用光通量为 1lm 的一个单位的红基色光 $[R]$ 和光通量为 4.5907lm 的一个单位的绿基色光 $[G]$,及光通量为 0.0601lm 的一个单位的蓝基色光 $[B]$,相加配色得到光通量为 5.6508lm 的 $E_{\text{白}}$ 光。

在配色实验中发现,如果要配出高饱和度的单色光谱色,需将某一基色放到要配的光谱色一边,并用其余两基色去配色才能获得。例如,配光谱中的黄单色光时,要把少量的蓝基色光加到欲配的黄单色光一侧,另一侧用红与绿基色光相混后,才能得到满意的结果。这种情况可用数学式表示如下:

$$F + B[B] = R[R] + G[G]$$

或

$$F = R[R] + G[G] - B[B] \quad (1.3)$$

式中“ $-$ ”号表示蓝基色光加到欲配光的一侧。

配色实验的过程,物理意义比较明确,但进行定量计算时比较复杂,三色分布系数中,有正、负值,计算时易搞错,作图又比较复杂。另外用坐标图表示亮度时,需要经过换算,用起来不方便。基于上述原因,国际上又补充了一套计色制,即 XYZ 计色制。

2) 色度图

自然界中的颜色种类繁多,很难用一个确切的词汇来描述或区分颜色,而且每一个人的理

解都带有主观因素。为了统一、确切地度量彩色,通常采用色度图表示法。它使任何一种颜色在色度平面上均有确切的坐标位置。色度图种类较多,这里仅介绍一种国际照明委员会规定的 XYZ 制色度图。

在 XYZ 计色制中,人为设想的 3 个 X、Y、Z 基色代替 R、G、B 三基色,建立新的计算系统和色度图。用该系统构成任意彩色光的配色方程为

$$F = X[X] + Y[Y] + Z[Z] \quad (1.4)$$

式中: X、Y、Z 为标准三系数; [X]、[Y]、[Z] 为标准三基色单位。

为克服 RGB 计色系统的缺点,XYZ 计色制中,作如下规定:

(1) 标准三系数均为正值。

(2) 三系数 Y 表示混合彩色光的亮度,而 X、Z 二系数不包含亮度。

(3) 色度由三系数的相对比例确定,当 $X=Y=Z=1$ 时,配出等能白光 $E_{\text{白}}$ 。

必须指出的是,这个坐标系是为了数学上计算方便而引入的,它没有实际的物理意义。因此, [X]、[Y]、[Z] 不能用光学方法获得,三系数 X、Y、Z 无法直接测定,要通过 RGB 计色制得到的数值进行换算。这两种计色制的转换是线性相关的,在数学上表现为线性矩阵变换,如果知道这两种系数间的转换关系,就可以在 XYZ 标准三系数和 RGB 三系数之间转换。对于某一实际色光,可通过配色实验确定其物理三系数 R、G、B,然后转换成 X、Y、Z 标准三系数,这样该彩色光的亮度和色度(X、Y、Z 的比例)均为已知,也就是说,可以写出 XYZ 计色制中的配色方程(1.4)。

色度是由三系数 X、Y、Z 的相对值确定的,与 X、Y、Z 的绝对值无关。如果不计亮度大小,仅考虑色度值时,可以用三系数的相对值表示。

设

$$\left. \begin{aligned} m &= X + Y + Z \\ x &= \frac{X}{X + Y + Z} = \frac{X}{m} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} = \frac{Y}{m} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} = \frac{Z}{m} \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

式中: m 为色模,表示某彩色光所含标准三基色单位的总量,它与光通量有关,对颜色不发生影响; x 、 y 、 z 为相对色度系数,又叫色度坐标。

由式(1.5)可知

$$x + y + z = 1 \quad (1.6)$$

式(1.6)表明,当某一彩色量 F 的相对色度系数 x 、 y 已知时,则 z 也为已知,即 z 是一个非独立的参量。这样就可将由配色实验得到的数据,换算成 x 、 y 坐标值,并画出其平面图形,即 x - y 标准色度图,如图 1.9 所示。

在 x - y 色度图中,所有可见光波长作用于人眼引起色感的光谱色都在所示的舌形曲线上。曲线上各点的单色光既可用一定的波长来标记,也可用色度坐标表示,该曲线亦称为光谱色曲线。