

DIANSHI YUANLI YU  
SHUZI SHIPIN JISHU

高 等 学 校 教 材

何 辅 云  
张 海 燕 编 著

# 电视原理 与 数字视频技术

DIANSHI YUANLI YU

SHUZI SHIPIN JISHU

DIANSHI YUANLI YU  
SHUZI SHIPIN JISHU



合肥工业大学出版社

高等学校教材

# 电视原理 与 数字视频技术

何辅云 编著  
张海燕

合肥工业大学出版社

## 内容提要

本书详细阐述了电视系统的基本构成,全电视信号的形成、传送、接收及各部分的工作原理和特性。本书还根据数字电视技术迅猛发展和应用的需要,结合数字视频技术的最新进展与成果,全面介绍了数字电视系统、数字电视信号的形成和对数字电视信号进行编码压缩和解码恢复的技术原理,并介绍了国际上通用的数字视频标准和相关技术。

本书可供高等院校电子信息专业、通信专业、广播电视专业和应用电子类专业的师生作为教材使用,也可作为相关领域工程技术人员的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

电视原理与数字视频技术/何辅云,张海燕编著.合肥:合肥工业大学出版社,2003.10  
ISBN 7-81093-062-1

I.电... II.①何...②张... III.①电视-理论②视频信号-数字技术 IV.TN94

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第082176号

## 电视原理与数字视频技术

编著 何辅云 张海燕

责任编辑 汤礼广 刘俊

出版 合肥工业大学出版社

印刷 合肥星光印务有限公司

地址 合肥市屯溪路193号 邮编 230009

照排 合肥飞天图文艺术设计中心

电话 0551-2903028(总编室)

开本 787×1092 1/16

0551-2903198(发行部)

印张 25.75 字数 630千字

网址 www.hfut.edu.cn/出版社

版次 2003年10月第1版

发行 全国新华书店

印次 2003年10月第1次印刷

ISBN 7-81093-062-1/TN·1

定价: 34.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行科联系调换

# 前 言

彩色电视原理一直是理工科院校的电子和通信专业的必修专业课程。现今,电视理论已日臻完美。20世纪末,随着电子信息领域技术的全面数字化,数字视频技术飞速发展,尤其是高质量多功能数字电视的诞生,又将电视技术推向一个全新的高度——它不仅给人以高质量的声像享受,而且使人们由被动收看转为积极参与。目前,世界各国正在陆续开展数字电视的普及工作。为适应数字电视在我国的普及,编著者在总结多年电视教学工作经验基础上,结合相关课题的研究,并参考大量文献,对电视原理和数字电视两门课程的内容进行整合,形成本教材。

全书共分两大部分。第一部分(第1章~第8章)在内容处理上淡化了繁琐的理论推算和电路分析,从色度学基础知识入手,着重介绍彩色电视信号的组成及摄取、调制、发送至接收的全过程。它是学习电视知识的基础部分。第二部分(第9章~第14章)从数字电视基础的角度出发,系统地介绍数字图像摄取、量化编码、传输、接收、解码的知识,全面反映了国际上数字视频技术的最新进展和成果。它是学习数字电视知识的基础部分。这两部分内容既相互联系,也可自成一体。

本教材虽然为理工科专业技术教材,但编著者力求其语句通俗易懂,而且书后附有电视系统常用工程参数和数字视频技术中英文对照表,使本书具有通俗性、系统性、先进性和实用性,特别适合该专业学生课内外学习,也便于相关专业同行参考。

本教材参考学时数为80学时。在教学过程中,也可根据实际需要对各章内容进行取舍,短缺部分可由学生自学,困难一般不大。

本教材在编写过程中,得到了安徽省教育厅领导的大力支持,同时得到了长期从事相关学科研究的专家特别是王家骥教授、钱源诚教授的帮助和指正,还吸收了同事们的辛勤劳动成果,在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平、写作时间有限,本书可能存在有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

**编著者**

2003年8月于合肥工业大学

# 目 录

<b>第 1 章 光与人眼的视觉特性</b> .....	(1)
1.1 可见光谱和光谱功率分布 .....	(1)
1.2 人眼视敏特性 .....	(2)
1.3 人眼的亮度视觉特性 .....	(4)
1.4 人眼的分辨力 .....	(5)
1.5 人眼的彩色视觉特性 .....	(6)
<b>第 2 章 三基色原理和几种计色系统</b> .....	(8)
2.1 三基色原理 .....	(8)
2.2 配色实验和 RGB 计色系统 .....	(9)
2.3 XYZ 计色系统 .....	(12)
2.4 彩色电视中的三基色 (显像三基色) .....	(15)
<b>第 3 章 电视扫描和黑白全电视信号</b> .....	(18)
3.1 电视传像的基本概念.....	(18)
3.2 电视扫描.....	(21)
3.3 图像信号.....	(29)
3.4 消隐脉冲和同步脉冲.....	(30)
3.5 黑白全电视信号.....	(36)
3.6 图像信号的频带.....	(37)
3.7 图像信号的频谱分析.....	(45)
<b>第 4 章 电视摄像机</b> .....	(48)
4.1 摄像管的类型.....	(49)
4.2 光电效应.....	(49)
4.3 氧化铅摄像管.....	(51)
4.4 硒砷碲摄像管.....	(56)
4.5 摄像机的聚焦与偏转问题.....	(57)
4.6 预放器和视频信号处理.....	(64)
4.7 多管彩色摄像机.....	(69)
4.8 单管彩色摄像机.....	(76)
<b>第 5 章 兼容制彩色电视</b> .....	(82)
5.1 NTSC 制彩色电视 .....	(83)
5.2 逐行倒相制 (PAL) 彩色电视 .....	(103)
5.3 SECAM 制彩色电视介绍 .....	(115)

<b>第 6 章 电视显像管</b> .....	(123)
6.1 电视显像管的结构 .....	(123)
6.2 电子枪的静电聚焦原理 .....	(124)
6.3 显像管内电子束的偏转 .....	(130)
6.4 显像管荧光屏 .....	(135)
6.5 显像管的调制特性 .....	(138)
6.6 自会聚彩色显像管 .....	(140)
6.7 彩色显像管的自消磁 .....	(145)
6.8 彩色显像管的调制特性及黑、白平衡调整 .....	(146)
6.9 大屏幕彩色显像管 .....	(148)
<b>第 7 章 电视信号的调制</b> .....	(153)
7.1 电视射频信号传送的特点 .....	(153)
7.2 图像信号的调制 .....	(154)
7.3 伴音信号的调制 .....	(161)
7.4 电视发射机 .....	(164)
7.5 电视频道的划分 .....	(166)
7.6 电视制式 .....	(166)
<b>第 8 章 模拟电视接收机</b> .....	(169)
8.1 模拟电视机的组成 .....	(169)
8.2 高频调谐器 .....	(169)
8.3 图像和伴音通道 .....	(174)
8.4 PAL <sub>D</sub> 解码扫描系统 .....	(180)
<b>第 9 章 数字电视概述</b> .....	(182)
<b>第 10 章 视频 A/D、D/A 变换器</b> .....	(184)
10.1 量化及噪声.....	(184)
10.2 分量信号量化比特数确定和码电平分配.....	(185)
10.3 视频 A/D 转换器 .....	(187)
10.4 视频 D/A 转换器 .....	(190)
<b>第 11 章 PAL 信号的亮、色数字分离</b> .....	(193)
11.1 抽样结构.....	(193)
11.2 PAL 信号亮、色数字分离 .....	(193)
<b>第 12 章 图像压缩编码</b> .....	(203)
12.1 图像数据压缩机理及图像编码过程.....	(203)
12.2 亚奈奎斯特编码及内插方法.....	(206)
12.3 预测编码.....	(214)
12.4 变换编码.....	(233)
12.5 统计编码.....	(241)

12.6	子带编码	(245)
12.7	分形图像编码	(251)
12.8	模型基图像编码	(259)
12.9	运动估值在序列图像编码中的应用	(266)
<b>第 13 章</b>	<b>数字电视的国际标准</b>	<b>(285)</b>
13.1	CCIR 601 号建议	(285)
13.2	H.261 标准	(290)
13.3	JPEG 标准	(303)
13.4	MPEG-1 标准	(319)
13.5	MPEG-2 标准	(327)
13.6	H.263 建议	(340)
13.7	HDSL 技术	(344)
13.8	ADSL 技术	(346)
<b>第 14 章</b>	<b>数字信号传输技术</b>	<b>(350)</b>
14.1	数字调制技术	(350)
14.2	数字声音广播	(365)
14.3	数字视频传输	(373)
<b>附录 A</b>		<b>(391)</b>
<b>附录 B</b>		<b>(394)</b>
<b>附录 C</b>		<b>(396)</b>
<b>附录 D</b>		<b>(397)</b>
<b>参考文献</b>		<b>(404)</b>

# 第 1 章 光与人眼的视觉特性

电视与人眼的视觉特性有着密切的关系。可以说,电视就是依据人眼的视觉特性以一定的电信号形式来传送活动景象的技术。由于电视系统的综合质量最终要由人眼来鉴定,所以电视系统应尽量适应人眼的特性。电视技术是色度学、视觉生理学、电子技术三门学科的综合应用,只有掌握了人眼特性及其对电视系统的要求,才能合理地选择电视系统的基本参数,从而使人们对重现的图像感到满意。因此,有必要先掌握与电视有关的色度学和视觉生理学的知识。

## 1.1 可见光谱和光谱功率分布

通过对光的物理性质的研究知道,光也是一种电磁辐射。人眼能感觉到的可见光,是处在一定波长范围内的一种电磁辐射。电磁辐射的波长范围非常宽,短的如宇宙空间射来的宇宙射线,波长仅仅十分之几飞米(fm)( $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$ ),长的如交流市电,波长长达数千千米。只有在  $380\text{nm} \sim 780\text{nm}$ ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ )范围内的电磁辐射才会引起人眼的视觉,称为可见光。在可见光谱范围内,不同波长的电磁辐射会引起人眼不同的颜色感觉,780nm~630nm 范围内为红色,630nm~590nm 为橙色,590nm~530nm 为黄色,530nm~495nm 为绿色,495nm~480nm 为青色,480nm~340nm 为蓝色,340nm~380nm 为紫色。上述颜色是大致的划分,实际上波长连续变化时人眼颜色感觉是渐变的,中间过渡区并无明显的分界线。

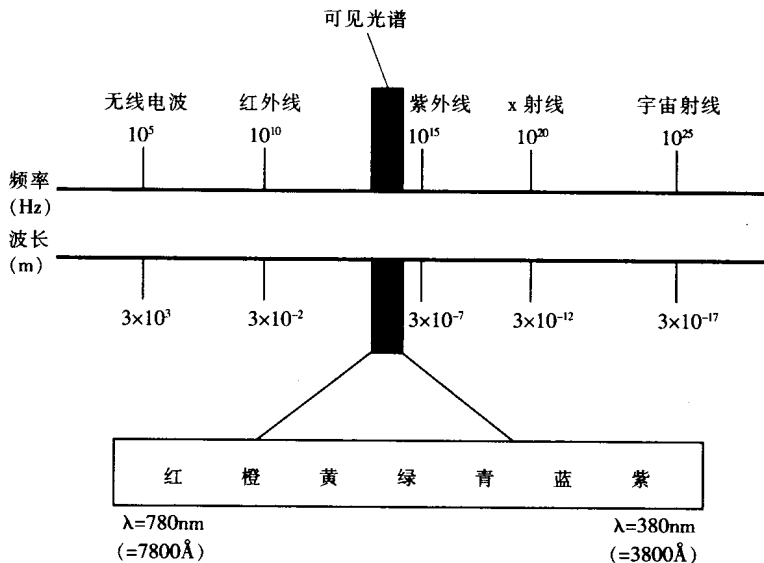


图 1.1 电磁辐射的波谱及扩展的可见光谱





一束太阳光通过缝隙投射到三棱镜的一个侧面时,从另一侧面射出的光线将在白色屏幕上呈现出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的光谱带。这表明太阳光中全面地包含有 380nm~780nm 范围内可见光。

从原理上说,单一频率电磁辐射所发出的光称为单色光或谱色光,人眼对此感到的是一种单纯的颜色,称为单色或谱色。实际上,一般光源不会发出纯净的谱色光,它们或者像日光和白炽灯光那样发出的是连续光谱的光,或者像高压汞灯那样发出具有若干条谱线的线状光谱的光。无论连续光谱光源或线状光谱光源,它们发出的光都称为复合光。我们日常接触到的各色的光源或者由客观景物反射入眼睛的光线,均为复合光。

一种光源同时发射多种谱色光,那么在各个波长上将具有各自的功率。光源的光谱辐射功率按波长的分布称为光谱功率分布。光源的光谱功率分布可以用直角坐标上的一种曲线来表示。横坐标为光谱波长,纵坐标为辐射功率或相对能量。

图 1.2 显示的是几种标准光源的光谱功率分布曲线例子。可见,充气钨丝白炽灯(A 光源)波长越长,辐射功率越大。而等能白光源(E 光源)可见光范围内辐射功率完全均匀,它发出某一种白色光。不过,等能白光源是假想的,这种光谱功率分布的光源在自然界中是不存在的,也难以用人工制造出来。然而,它在彩色电视的色度计算中十分有用,是一个方便而有意义的人为规定的基准白色光源,简称为 E 白。图中的 C 光源和 D 光源分别是 NTSC 制和 PAL 制彩色电视照明光源。

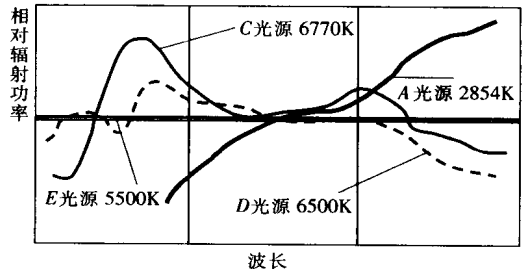


图 1.2 几种光源的光谱功率分布曲线

## 1.2 人眼视敏特性

### 1.2.1 人眼视敏函数和相对视敏函数

所谓人眼视敏特性,就是指人眼视觉对不同波长的光具有不同敏感程度的特性。我们知道,视觉效应是由可见光刺激人眼而引起的。可见光的波长不同,则人眼的颜色感觉不同,波长从 780nm 变化到 380nm 时,颜色依次变化为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。如果光的辐射功率相同而波长不相同,那么除了颜色不同外,它们的亮度感觉是否一样呢? 实验证明是不相同的。在辐射功率相同的各种色光中,人眼感觉红光和紫光都比较暗,而感觉最亮的是绿光。反过来说,要获得相同的亮度感觉,所需要的红光或紫光的辐射功率要比绿光的辐射功率大得多。为了确定人眼对不同波长光的敏感程度,在保证各种波长光产生相同亮度感觉的前提下,测出它们的辐射功率  $P(\lambda)$ ,用  $P(\lambda)$  的倒数来衡量人眼对波长为  $\lambda$  的光的敏感程度并称其为视敏函数  $K(\lambda)$ (或称视敏度)。实验表明,在明亮的环境下,波长为 555nm 的绿光有最大视敏度。将任意波长光的视敏函数与波长为 555nm 光的视敏度相比称为相对视敏函数,并用  $V(\lambda)$  表示:

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

显然  $V(\lambda)$  是小于 1 的数。它表明为得到相同亮度感觉,所需波长为 555nm 的绿光辐射



功率最小;而波长自 555nm 逐渐增大或减小,所需各波长光的辐射功率不断增长。其变化规律如图 1.3 中  $V(\lambda)$  曲线所示,称其为相对光谱响应曲线。值得注意的是,如果在夜晚或微弱的光线下,测得的人眼相对视敏函数曲线向左移,如图 1.3 中  $V'(\lambda)$  曲线所示。常称  $V(\lambda)$  为明视觉相对视敏函数,称  $V'(\lambda)$  为暗视觉相对视敏函数。

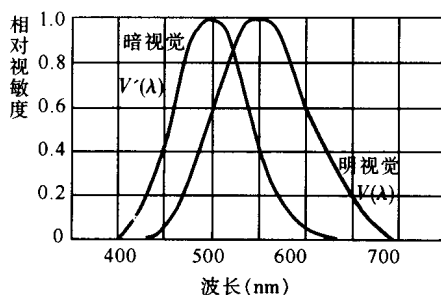


图 1.3 人眼的相对视敏函数

### 1.2.2 光学基本参量

#### 1. 光通量

由于人眼对不同波长光的亮度感觉不同,那么用人眼的光感觉来度量某光时,必然与视敏度有关。光通量就是按人眼光感觉来度量光的辐射功率。对于波长为  $\lambda_i$  的单色光,其辐射功率为  $P(\lambda_i)$ ,其光通量  $F(\lambda_i)$  为:

$$F(\lambda_i) = P(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i) \quad (\text{光瓦}) \quad (1-2)$$

如果光源的辐射功率波谱为  $P(\lambda)$ ,则有:

$$F(\lambda) = \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{光瓦}) \quad (1-3)$$

光通量的单位还可以用流明表示,光瓦与流明之间的关系为:1 光瓦 = 680 流明。

#### 2. 发光强度

光源在单位立体角内发出的光通量定义为发光强度,用  $I$  表示。它与光通量的关系为:

$$I = \frac{dF}{d\omega} \quad (\text{烛光}) \quad (1 \text{ 烛光} = \frac{1 \text{ 流明}}{1 \text{ 立体弧度}}) \quad (1-4)$$

$$F = \int I d\omega \quad (\text{流明}) \quad (1-5)$$

例如,处在球心的点光源的光通量假设为  $F$ ,则在球面上的发光强度为:

$$I = \frac{FR^2}{4\pi R^2} = \frac{F}{4\pi} \quad (1-6)$$

#### 3. 亮度

亮度是指发光面在指定方向上的发光强度与发光面在垂直于所取方向的平面上的投影之比。如果发光面以平方米为单位,发光强度单位为烛光,亮度单位为尼特,则:

$$1 \text{ 尼特} = 1 \text{ 烛光/平方米}$$

亮度单位还可以用熙提表示:

$$1 \text{ 熙提} = 10^4 \text{ 尼特}$$

大多数面光源只在半球空间辐射,对于漫散射面光源(例如显像管荧光屏面),其发光强度是按余弦规律分布的。

漫散射面  $ds$  在  $\alpha$  方向上的亮度为:

$$B = \frac{dI_\alpha}{ds \times \cos\alpha} = \frac{dI_n \cos\alpha}{ds \times \cos\alpha} = \frac{dI_n}{ds} = B_n \quad (1-7)$$

上式说明,理想漫散射面虽然在各个方向上的发光强度不同,但亮度相同。



## 1.3 人眼的亮度视觉特性

### 1.3.1 人眼的亮度视觉范围和亮度感觉

亮度视觉范围指人眼所能感觉的亮度范围。这个范围非常宽,明视觉的亮度感觉范围为1尼特至几百尼特;暗视觉的亮度感觉范围为千分之几尼特至几个尼特。人眼具有如此宽广的亮度视觉范围,原因在于眼睛的感光作用具有适应性。当外界光的强弱大幅度突变时,眼睛会通过一定的生理调节过程来适应新的光强。眼睛的适应性分暗适应和亮适应两种过程:从明亮环境进入黑暗环境时,人眼的瞳孔直径可由2mm扩大到8mm,使进入眼球的光通量增加16倍,更主要的是由灵敏度极高的杆状细胞接替灵敏度较低的锥状细胞产生感光作用,从而使感光灵敏度提高几万倍;从黑暗环境进入明亮环境也需要一个短暂的亮适应过程,才能由锥状细胞起作用。

尽管人眼感光范围极其广阔,但它并不能同时感觉如此宽广的亮度范围。当人眼适应某一环境亮度后,可感受的亮度范围就有一定的限度。在平均亮度适中时,能感受的亮度上下限之比约为1000:1;而平均亮度过高或过低时,这一比值只有10:1。

另外,人眼的明暗感觉是相对的,在不同的亮度背景下,对同一景物亮度的主观感觉并不相同。例如,在晴朗的白天,环境亮度为10000尼特,此时可分辨的亮度范围是200尼特~20000尼特,等于或低于200尼特的亮度都引起黑色感觉;在环境亮度为30尼特时,人眼可分辨的亮度范围为1尼特~200尼特,此时200尼特的亮度引起极为明亮的感觉,而低于1尼特的亮度才引起黑色感觉。可见,黑白明暗感觉是相对的,此时的亮可以变为彼时的暗。正因为如此,不论是电影还是电视所映出的画面,并不需要恢复原景物的亮度,而只需具有一定的对比度和亮度层次,就能给人以相当真实的亮度感觉而得出较高质量的黑白图像。

### 1.3.2 对比度和亮度层次

原景物图像或重现图像的最大亮度 $B_{\max}$ 与最小亮度 $B_{\min}$ 之比称对比度或反差,用 $C$ 标记。在画面的最大亮度与最小亮度之间能分辨的亮度感觉级数为亮度层次,也称黑白灰度,用 $n$ 标记。一般来说,对比度越大,画面的亮度层次应当越丰富。但另一方面,能分辨的亮度层次还受人眼的对比度灵敏度阈 $\delta$ 的制约。

在一定的照明光源下,电视图像的对比度为:

$$C = \frac{B_{\max} + B_p}{B_{\min} + B_p} \leq \frac{B_{\max}}{B_{\min}} \quad (1-8)$$

式中: $B_{\max}$ 、 $B_{\min}$ 和 $B_p$ 分别表示图像最大亮度、最小亮度和杂散光亮度。

### 1.3.3 视觉惰性和闪烁感觉

人眼视觉的建立和消失都具有一定的惰性。从视觉的建立来说,当一定强度的光突然投射到视网膜上时,人眼并不即刻形成稳定的亮度感觉,而有一段短暂的建立过程。随着时间的增长,亮度感觉先由小到大,很快达到最大值,然后回降至稳定值。另一方面,从视觉的消失来说,也有一个消失过程。光线消失后的残留视觉被称为视觉暂留。图1.4(a)所示的视觉惰性中,可以同时看出视觉惰性的两个方面,即视觉的建立过程和视觉过程的消失过程。实测表明,在视觉消失过程中,亮度感觉曲线近似地按指数函数规律下降。通常,视觉暂留时间约为



0.05 秒~0.2 秒。电影和电视技术成功地利用了视觉暂留特性。一幅幅静止画面以一定的频率在银幕或荧光屏上换幅显示时,由于视觉暂留特性,前一幅画面的印象尚未消失,后一幅画面的印象又已建立,于是人眼就会感觉画面不是断断续续的而是连续的。暂留时间为 0.05 秒,则产生连续感的换幅频率(重复频率)为 20Hz。此外在电视荧光屏上,有数十万个像素按一定的顺序在轮流发光,但人眼看到的却像是整幅画面在同时发光,获得的是恒定亮度的完整图像。这同样是视觉暂留特性产生的结果。

人眼对于亮度变化的光线还有一种称为闪烁感觉的特性,如图 1.4(b)所示。如果有周期性的脉冲光源作用于视网膜上,当脉冲的光重复频率不够高时,人眼会产生一明一暗交替变化的闪烁感觉。产生闪烁感觉是因为光源在做有光和无光的交替变化时,人眼在亮度感觉上能分辨出它们的差异所致。如果将脉冲光的重复频率提高到某一定值以上,则人眼将不会再觉察出是脉冲光源,而感到是一种亮度恒定的不闪烁光源。不再引起闪烁感觉的光源最低重复频率称之为临界闪烁频率,常用  $f_c$  表示。这说明,当脉冲光的重复频率低于  $f_c$  时,人眼有闪烁感觉;而当脉冲的重复频率等于或高于  $f_c$  时,人眼无闪烁感觉。在影响临界闪烁频率的诸多因素中,最主要的因素是脉冲光源的亮度,即  $f_c$  与亮度的对数成线性关系,这样便有如下公式:

$$f_c = a \lg(B_1 - B_2) + b \quad (1-9)$$

式中:  $B_1$  是脉冲光源亮度;  $B_2$  是背景亮度;  $a$  和  $b$  是与许多因素有关的常数,对于电视荧光屏来说,常取  $a = 9.6$ ,  $b = 26.6$ , 即:

$$f_c = 9.6 \lg(B_1 - B_2) + 26.6 \quad (1-10)$$

荧光屏的最高亮度大约为 100 尼特,这样电视图像的  $f_c = 45.8\text{Hz}$ 。

## 1.4 人眼的分辨力

人眼分辨图像细节的能力称为人眼的分辨力。分辨黑白图像细节的能力称亮度分辨力;分辨彩色图像细节的能力称彩色分辨力。分辨力的大小可用分辨角(视敏角)来表示(如图 1.5 所示)。当与人眼相隔一定距离  $L$  的白色屏幕上的两个黑点靠近到一个光敏细胞上,就分辨不出有两个黑点存在,而只模糊地感觉到连在一起的是一个黑点。这说明人眼分辨景物细节的视力有一定的极限值。设人眼刚能分辨出两个黑点  $A$  和  $B$  的距离为  $d$ ,  $A$  和  $B$  对眼睛形成的张角为  $\theta$ , 则  $\theta$  就是分辨角。用分辨角的倒数来定义人眼分辨力。

如果在距人眼  $L$  的屏幕上刚能分辨的两点间

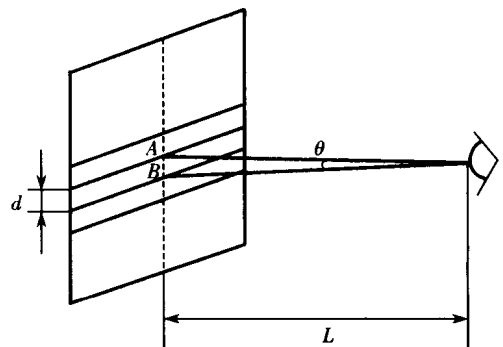
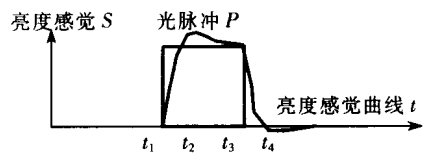
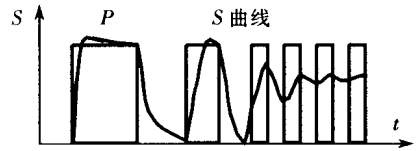


图 1.5 人眼的分辨率测定原理



(a)视觉惰性



(b)临界闪烁频率

图 1.4 视觉惰性和临界闪烁频率



距离  $d$  已测出,则分辨角  $\theta$  与  $d$ 、 $L$  有如下关系式:

$$\theta = \frac{57.3 \times 60 \times d}{L} = 3438 \frac{d}{L} \quad (1-11)$$

分辨力除因人而异外,还与照明强度和景物的相对对比度有关。在中等亮度和中等相对对比度下,观察静止图像时,分辨角  $\theta$  约为  $1' \sim 1.5'$ ,但对于运动物体,分辨角将大些,即分辨力要低些。

分辨力与人眼对运动景物的连续感有密切关系。由于存在视觉惰性,且暂留时间大于 0.05 秒,所以当一幅静止画面(即景物不运动)以高于 20Hz 频率间断地重复呈现时,尽管有亮度闪烁,但会感觉这幅画面始终存在于眼前,产生了视觉上的连续感。

实验表明,对于一个间断呈现的运动景物,当它的换幅频率高于 20Hz,且前后两次呈现的相对位置对眼睛的张角不超过  $7.5'$  时,就会产生连续移动的感觉;当超过了  $7.5'$  时,欲使其仍具连续感,则要将换幅频率提高到大于 20Hz。画面增多了,运动景物前后两次呈现的相对位置挨近了,张角小于  $7.5'$  便产生连续感。

实验证明,人眼的彩色分辨力低得多。表 1.1 给出一组实验测量数据。

人眼彩色分辨力与亮度分辨力的特性,对于实现彩色电视信号传输有着重要意义。

表 1.1 人眼对彩色的分辨力

彩色对比	黑白	黑绿	黑红	黑蓝	绿红	红蓝	绿蓝
分辨率	100%	94%	90%	26%	40%	23%	19%

## 1.5 人眼的彩色视觉特性

### 1.5.1 彩色的三个参量

人眼所能看到的彩色种类繁多,为了确切的表示某种彩色光,我们常用三个参数描述它的特性:亮度、色调、饱和度。人眼看到任一彩色都是这三个特性的综合效果。

**亮度:**是光作用于人眼时所引起的明亮程度的感觉,常以  $B$  表示。它与被观察物体的发光强度有关。如果是反射体(透射体),物体的亮度与照明光源和物体的反射系数(透射系数)都有关。同一物体,照射的光越强,物体越亮;不同的物体,在相同照射条件下,反射系数(透射系数)越大,物体越亮。此外亮度感还与视敏函数有关。所以不同的彩色光,即使强度相同,当照射同一物体时会产生不同的亮度。

**色调:**是彩色之间相互差异的重要特征,反映颜色的类别。可见光谱中不同波长的谱色光有不同的色调,不同谱色光组成的复合光总是对应着一定的色调。光源的色调决定于辐射能量中所有成分对人眼产生的综合感觉,物体的色调决定于光源的光谱成分和物体的反射特性或透射特性。

**饱和度:**表示彩色的纯粹性和色调的浓淡深浅程度。谱色光是饱和度最高的彩色,彩色光的饱和度随着掺入的白光增多而降低。例如在红色光中不断地增加白光,呈现的颜色为:深红、红、浅红、粉红等,但其色调仍然是红,只是饱和度降低了。通常将色调和饱和度统称为色度。

总之,亮度表示某彩色光的明亮程度,色调表示颜色的类别,饱和度表示颜色的深浅程度。

### 1.5.2 人眼的彩色视觉特性

在表征了一个彩色光的三个基本参量以后,可以归纳出人眼的彩色视觉特性是:人眼所看到的彩色是不同光谱成分作用于眼睛的综合效果。不同波长光波会引起不同彩色感觉;相同的彩色感觉,也可以由不同波长的光谱成分引起。例如,波长 580nm 的谱色光引起橙黄色感觉;又例如,太阳光发出的白光包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光,即这七色光可混合成太阳白光。但也可以用红、绿、蓝三种不同波长的单色光混合成白光。由此可知:单色光可用混合色光来等效,混合色光也可由单色光以适当比例混配来代替,这种现象称为混色。利用混色的方法,人们可以仿造出自然界中绝大多数彩色而不管仿造的彩色与原彩色是否具有相同的光谱成分。这一点对于实现彩色电视广播也具有非常重要的意义。

对于人眼彩色视觉特性的解释主要有两大学说。一个是杨·亥姆霍尔兹的三色学说,另一个是赫林的对立色(四色)学说。前者从彩色混合的物理学规律出发,后者从彩色视觉特点出发。三色学说是假设视网膜上有三类锥状细胞,它们各主要对红色、绿色和蓝色三色光起反应,可分别称为感红(红敏)细胞、感绿(绿敏)细胞和感蓝(蓝敏)细胞。当长波长的光线刺激视网膜时,感红的锥状细胞反应最大,兴奋最强烈,感绿细胞和感蓝细胞都不怎么兴奋,于是引起红色感觉;当中波长的光线刺激视网膜时,感绿细胞最兴奋,于是引起绿色感觉;当短波长的光线刺激视网膜时,感蓝细胞最兴奋,因而引起蓝色感觉。若光线引起感红细胞和感绿细胞都兴奋,则产生黄色感觉;若感绿细胞和感蓝细胞都兴奋,则产生青色感觉;若感红细胞和感蓝细胞都兴奋,则产生紫色感觉;若感红细胞、感绿细胞和感蓝细胞三者都兴奋,将产生白色感觉。这都是符合实际的色光混合现象的。

通过实验后的计算推得三类锥状细胞具有图 1.6 所示的相对视敏函数曲线,分别用  $V_R(\lambda)$ 、 $V_G(\lambda)$  和  $V_B(\lambda)$  表示。

三条响应曲线的峰值分别在 580nm(红)、540nm(绿)与 440nm(蓝)点,三条曲线互相重叠,使各种谱色仅处于其中一条曲线之下,或者同时处在两条或三条曲线之下。由图可见,黄光既能刺激红敏细胞,又能刺激绿敏细胞,因此红光和绿光以适当比例混合同时到达视网膜时,这两种锥状细胞同时受到刺激,所造成的视觉与黄光单独作用是一样的。把三条曲线加起来,就是相对视敏函数曲线,也称亮度曲线。

现代神经生理学的研究成果表明:视网膜上确实存在着三类不同的感色锥状细胞,每一类具有不同的光谱敏感特性,最灵敏点大致对应于黄色、绿色和蓝色。不过由于技术上的困难,对这三类锥状细胞的解剖分析和生化特性尚未掌握,然而,这毕竟有力地支持了三色学说。

三色学说的主要缺陷在于不能满意地解释色盲现象。按该学说,色盲被认为是某一类锥状细胞(单色盲)或者甚至全部三类锥状细胞(全色盲)先天或后天损伤造成的。于是,单色盲应有红色盲、绿色盲或蓝色盲,它们可以单独地存在,但事实上,极大多数的红色盲者也是绿色盲者,称为红-绿色盲,并且红-绿色盲者照样有黄色感觉和白色感觉。至于全色盲,则按三色学说推论,应该连亮度感觉也没有了,而事实上全色盲仍能感觉灰色、白色等明暗层次。

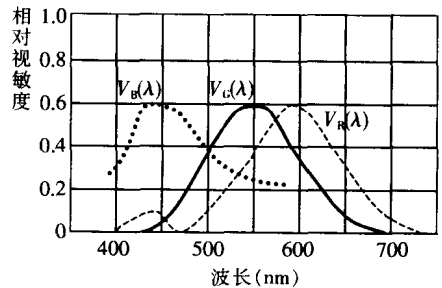


图 1.6 人眼的三色视敏细胞视敏函数曲线

## 第2章 三基色原理和几种计色系统

有了第1章的视觉生理学基础知识,现在可以进一步讨论彩色电视中的色度学问题。色度学是一种度量颜色的科学,也是彩色电视的重要理论基础。本章讨论色度学中的三基色原理并简述几种计色系统。

### 2.1 三基色原理

根据人眼的视觉特性和格拉斯曼(Grassman)定律可知,在传送和重现彩色时,只要求重现原景物的彩色感,并不一定要求恢复原来的光谱。为此,我们只需要研究彩色之间的相互关系,可以不考虑谱色及非谱色等问题。前面已述及,白光可分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等谱色,也可以由后者相混合得到白光。不仅如此,实验还证实了大自然中几乎所有颜色都可以由三种基色按不同比例混合而得到,于是出现了彩色计量的基础——三基色原理。其主要内容是:适当选择三种基色,便可以由这三种颜色按不同比例相混合产生出自然界中几乎所有彩色,混出的彩色光的色调由三基色的比例关系决定,其亮度由三基色光的亮度之和决定。要求选择的三种基色是互相独立的,即任一基色光不可由其他两种基色光以任何方式相混产生;选择三种基色的方法要尽可能简单,由它们配出的彩色域要尽可能大。

彩色电视就是应用三基色原理,将自然界中的任意景象先分解成红、绿、蓝三种基色光像,再将三基色光像经编码处理送到接收端,在接收端将红、绿、蓝三种基色光像相加混色,在显像管荧光屏上恢复被送来的彩色景物。当然,三基色组并不一定只有红、绿、蓝,也可以是其他三基色组。

将红、绿、蓝三种等能彩色光混合在一起,结果可表示如下:

红色(R) + 绿色(G) = 黄色(Yellow)

红色(R) + 蓝色(B) = 紫色(Magenta)

蓝色(B) + 绿色(G) = 青色(Cyan)

红色(R) + 绿色(G) + 蓝色(B) = 白色(White)

如果进行混合的各种颜色的相对强度发生变化,那么就会产生不同的新颜色。在加法混色中,由两种等量的基色相混合而产生的第三种颜色称为补色,因此与红、绿、蓝三基色对应的三补色为青、紫、黄。相加混色有如下几种方式:

(1) 实际混色:将三基色光投射到白色屏幕上,当三基色光由屏幕反射时,它们的光线已真正混合在一起。这就是所谓实际混色。

(2) 时间混色:将三基色光按一定比例轮流投射到同一屏幕上,只要交替的速度足够快,由于人眼的视觉暂留特性,产生的彩色视觉与三基色直接相混时一样。在这种混色方法中,由于各基色是在不同时间出现的,故称时间混色。它是顺序制彩色电视的理论依据。

(3) 空间混色:将三种基色同时投射到同一表面的三个邻近的点上,只要这些点之间的距离足够近,利用人眼的分辨力有限而产生混色。人眼看到的彩色感是这三种颜色相混的结果,



其色度也随各基色的强度比例关系变化而变化。因各种基色位置不同,故称之为空间混色。它是同时制彩色电视的理论依据。

(4) 生理混色:两只眼睛分别看两个不同颜色的景物,两束视神经受到的光刺激通过大脑的综合而给出混合的色光感觉。在立体彩色电视中,可以利用这一原理使图像既是立体的,又是彩色的。

除了相加混色外,还有相减混色法。相减混色利用了滤光特性即在白光中减去不需要的彩色留下所需要的。目前印染、颜料等均采用相减混色。相减混色中有以下混色关系:

黄色 = 白色 - 蓝色  
 紫色 = 白色 - 绿色  
 青色 = 白色 - 红色  
 红色 = 白色 - 蓝色 - 绿色  
 绿色 = 白色 - 蓝色 - 红色  
 蓝色 = 白色 - 绿色 - 红色  
 黑色 = 白色 - 蓝色 - 绿色 - 红色

以上关系式中若各基色之间的比例不同,还会引起色调的变化。相减混色主要应用于印染、颜料、绘画、彩色照片等技术中,此处不予详细讨论。

## 2.2 配色实验和 RGB 计色系统

将任一彩色用  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三基色定量地表示,是色度计量的基本原理与方法。下面通过配色实验得出描述任一彩色光的方程,并讨论 CIE(国际照明委员会)物理计色系统即 RGB 计色系统。

### 2.2.1 配色实验

任何一种彩色光,都可以用不同比例的三基色表示。通过配色实验可以确定它们之间量的关系。CIE 规定:标准红基色光( $R$ )的波长  $\lambda$  为 700nm,标准绿基色光( $G$ )的波长为 546.1nm,标准蓝基色光( $B$ )的波长为 435.8nm,它们都是谱色光,视敏函数值分别为:

$$V_R(\lambda) = V_R(700) = 0.041; V_G(\lambda) = V_G(546.1) = 0.8756; V_B(\lambda) = V_B(435.8) = 0.0173$$

为什么要选这三种谱色光为基色光呢?其原因在于 700nm 波长附近人们感到几乎都是同一色调的红色,许多光源中都含有相当能量的这种波长的红光,因而取 700 这一整数;而 546.1nm 和 435.8nm 是水银灯中包含的两条明显的汞亮谱线,在各国实验室中容易用物理手段精确地产生出来。

配色实验装置是,在观察者的正前方放置两块互相垂直的白石膏板作为比色计,将 CIE 选定的标准三基色的光源置于比色计的右侧,三基色光源  $R$ 、 $G$ 、 $B$  的强弱可以分别调节;将待配色光投射到比色计的左侧。如图 2.1 所

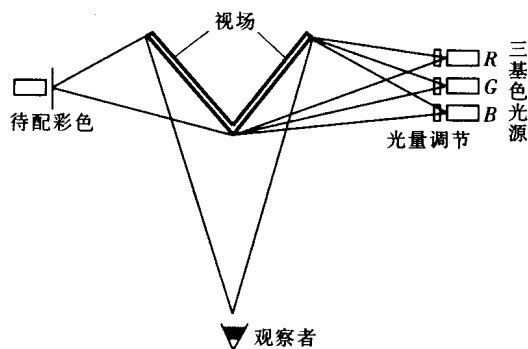


图 2.1 配色实验





示,调节三基色光源  $R$ 、 $G$ 、 $B$  的大小,直至比色计两侧呈现的彩色感(包括亮度和色度)完全相同。由三基色光调节器的刻度可以得到  $R$ 、 $G$ 、 $B$  数值,这就是待配彩色光所包含的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  数值。配色实验中,待配色光  $F$  可以用下式表示:

$$F = R[R] + G[G] + B[B] \quad (2-1)$$

式中: $F$  表示具有一定亮度与色度的任一彩色光;  $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$  分别表示红、绿、蓝三基色单位;  $R$ 、 $G$ 、 $B$  表示基色单位数,称基系数,由三基色调节器的刻度读取其数值。式中的等号“=”表示人眼视觉的颜色相等,即等式两边是同色异谱色。在选定基色单位  $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$  时,为了色度学计算上的方便,规定各以 1 单位的红、绿、蓝三基色光相混,恰能产生出等能白光(即  $E$  白光)时,所需三个基色光通量的比例为:

$$|F_R| : |F_G| : |F_B| = 1 : 4.5907 : 0.0601 \quad (2-2)$$

式中: $|F|$  表示某色光的光通量。CIE 规定:1  $[R]$  基色单位表示 1 光瓦波长为 700nm 的红谱色光;1  $[G]$  基色单位表示 4.5907 光瓦波长为 546.1nm 的绿谱色光;1  $[B]$  基色单位表示 0.0601 光瓦波长为 435.8nm 的蓝谱色光。在配色实验中,比色计调节器就是以  $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$  为单位进行刻度的,因此  $E$  白光的方程表示为:

$$F_{E白} = 1[R] + 1[G] + 1[B] \quad (2-3)$$

其光通量为:  $|F_{E白}| = 1 + 4.5907 + 0.0601 = 5.6508$  (光瓦)

若三基色同时增大  $K$  倍,配出的仍然是  $E$  白光,只是光通量大小也增大  $K$  倍而已。

### 2.2.2 RGB 计色系统

对于任意色光,其配色方程为:

$$F = R[R] + G[G] + B[B] \quad (2-4)$$

此方程说明  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三基系数的大小决定了彩色亮度的大小,其比例关系决定了色度,只要比例不变,色调就不变。其光通量为:

$$\begin{aligned} |F| &= (R \times 1 + G \times 4.5907 + B \times 0.0601) \quad (\text{光瓦}) \\ &= 680(R \times 1 + G \times 4.5907 + B \times 0.0601) \quad (\text{流明}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

通常色度学中只需考虑混配色光  $F$  的色度参量,而不必考虑其光通量(亮度),这样只要讨论配色方程中三系数  $R$ 、 $G$ 、 $B$  之间的比例关系。由式(2-1),设三基系数之和为:

$$R + G + B = m \quad (2-6)$$

并令:

$$r = R/m \quad g = G/m \quad b = B/m \quad (2-7)$$

于是得:

$$r + g + b = 1 \quad (2-8)$$

上面: $m$  称为色模,表示某彩色光  $F$  所含的三系系数的总和; $r$ 、 $g$ 、 $b$  称为相对色系数,表示配出的某色光各基系数在总基系数中所占的比例。如果  $m = 1$ ,则  $r$ 、 $g$ 、 $b$  表示配出某色光的色模为 1 时所需各基色单位的多少。这样式(2-1)可有下式形式:

$$F = m \{ r[R] + g[G] + b[B] \} \quad (2-9)$$

$m = 1$  时,

$$F = r[R] + g[G] + b[B] \quad (2-10)$$

在求其光通量时可按下式: