

高等学校电子信息类专业
“十三五”规划教材

ELECTRONIC
INFORMATION SPECIALTY

数字电视原理

李白萍 李荣 薛颖轶 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

数字电视原理

李白萍 李荣 薛颖轶 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统讲述了数字电视系统的基本原理与关键技术。全书共分8章,内容包括:模拟电视的基本原理、数字电视的基本概念、图像信号的数字化、数字电视的调制与解调、数字电视的传输、特种应用电视及应用环境、数字电视的新技术。

本书内容丰富、取材新颖,可作为高等院校通信工程及广播电视等专业的本科生教材,也可供从事多媒体通信的工程技术人员和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电视原理/李白萍,李荣,薛颖轶编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.11

高等学校电子信息类专业“十三五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4310 - 6

I. ①数… II. ①李… ②李… ③薛… III. ①数字电视—高等学校—教材 IV. ①TN949.197

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 262536 号。

策 划 云立实

责任编辑 宁晓蓉

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2016年11月第1版 2016年11月第1次印刷

开 本 787毫米×960毫米 1/16 印 张 8.5

字 数 159千字

印 数 1~3000册

定 价 15.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4310 - 6/TN

XDUP 4602001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

随着数字图像处理技术的发展,电视系统正快速走向“数字时代”,世界发达国家的广播电视从模拟到数字的过渡已基本完成,我国也在快速的发展中,目前已经初步完成了节目在制作、编排和传输环节的数字化,数字电视接收机、数字点播电视、数字交互电视、全数字高清晰度电视等数字电视设备层出不穷,引导整个数字电视技术的潮流。

本书是作者在近10年从事数字电视原理理论教学和相关科研的基础上编写而成的,并结合数字化矿山建设,对数字电视系统的基本原理和关键技术进行了研究,是作者多年教学工作的总结。

本书共分8章,其中第2、3、4、5、6章是讲述的重点。第1章简述电视技术的发展历程及数字电视的基本概念。第2章论述模拟电视的基本原理,内容包括:色度学基础、彩色电视信号及彩色电视制式、系统分解力与图像清晰度。第3章简述数字电视的基本概念及电视信号数字化参数。第4章阐述视频A/D、D/A变换的基本原理及初步实现。第5章分析数字电视的调制与解调技术,内容包括:QPSK、MQAM等调制技术。第6章对数字电视传输系统做了初步研究。第7章和第8章概述了特种应用电视及应用环境和数字电视新技术。本书参考教学时数为48学时。

本书第1章、第7~8章由李白萍教授编写,第2章由薛颖轶编写,第3~6章由李荣编写,全书由李白萍教授统稿。

本书的编写得到了陕西省通信工程特色专业建设点(No. [2011] 42)和陕西省通信工程系列课程教学团队项目(No. [2013] 32)的大力支持。

在本书的编写过程中,参阅了大量参考文献和图书资料,在此谨向这些文献、资料的原作者表示衷心的感谢。

由于目前数字电视技术飞速发展,加之编者水平有限,书中难免存在疏漏,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2016年6月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 电视技术的发展历程	1
1.2 数字电视的基本概念及优点	2
1.3 数字电视系统和数字电视机顶盒	3
1.3.1 数字电视系统	3
1.3.2 数字电视机顶盒	4
习题	6
第 2 章 模拟电视的基本原理	7
2.1 色度学概念	7
2.1.1 人眼的视觉特性	7
2.1.2 彩色三要素和三基色原理	11
2.2 电视图像的传送	13
2.2.1 像素	14
2.2.2 光电与电光转换	14
2.2.3 电子扫描	15
2.3 彩色电视制式与彩色电视信号	18
2.3.1 彩色电视制式分类	19
2.3.2 亮度信号与色差信号	20
2.3.3 NTSC 制	21
2.3.4 PAL 制	25
2.4 系统分解力与图像清晰度	29
习题	31
第 3 章 数字电视的基本概念	32
3.1 数字电视原理概述	32
3.2 电视信号数字化参数	35
3.2.1 抽样结构	36
3.2.2 量化	39
3.2.3 编码	43

3.3 视频分量信号量化比特数确定和量化电平的计算	44
习题	46
第4章 图像信号的数字化	47
4.1 电视信号的离散化	47
4.2 视频 A/D、D/A 变换器	52
4.2.1 视频 A/D 变换器	52
4.2.2 PCM 编码器	54
4.2.3 视频 D/A 变换器	55
4.2.4 并串型 A/D 变换器	57
4.3 PAL 信号亮、色数字分离原理	59
4.3.1 亮、色数字分离电路	60
4.3.2 色差信号分离	61
4.4 图像压缩编码和数字电视的国际标准	63
4.4.1 图像压缩编码概述	63
4.4.2 常用的图像压缩编码方法	65
4.4.3 视频压缩编码标准	68
4.5 新一代图像压缩编码	71
4.5.1 模型基编码	71
4.5.2 神经网络用于图像编码	71
习题	72
第5章 数字电视的调制与解调	73
5.1 数字电视调制概述	73
5.2 PSK 调制方式	74
5.2.1 二进制绝对调相(2PSK)和相对调相(2DPSK)方式	74
5.2.2 多相调制	76
5.3 MQAM 调制	81
5.3.1 2ASK 信号的产生与解调	81
5.3.2 QAM 信号	82
5.4 字节到符号的映射	86
习题	86
第6章 数字电视的传输	88
6.1 数字电视传输系统	88
6.1.1 数字电视传输系统的组成	88
6.1.2 数字电视传输系统的分类	90

6.2	能量扩散	94
6.3	数据交织与解交织	97
6.4	格状编码(TCM)简介	103
	习题	104
第7章 特种成像及防爆电视		106
7.1	红外电视	106
7.1.1	红外线的基本概念	106
7.1.2	主动式红外电视	107
7.1.3	被动式红外电视	109
7.2	微光电视	111
7.2.1	微光电视的特点	111
7.2.2	微光像增强器	112
7.2.3	微光摄像机的应用	114
7.3	防爆电视设备	114
7.3.1	防爆电视设备的通用要求	115
7.3.2	防爆电视设备的设计	115
7.3.3	井下监测监控系统简介	116
	习题	118
第8章 数字电视应用技术与发展		119
8.1	水下电视	119
8.1.1	水下电视分类	119
8.1.2	水下电视的技术问题	120
8.2	X线电视	122
8.2.1	X线	122
8.2.2	X线电视系统	122
8.2.3	X线电视系统的应用	123
8.3	新型数字电视终端	124
8.3.1	超薄液晶电视	124
8.3.2	3D立体液晶电视	124
8.4	数字电视发展展望	125
	习题	126
参考文献		127

第 1 章 概 论

电视就是根据人的视觉特性，经电子扫描，用电的方法来传送活动图像的技术。

1.1 电视技术的发展历程

电视技术是 20 世纪先进的电子科学技术发展的一项重大成果。作为以昂贵的电子设备为载体的大众传播媒介，它声像并茂、色彩兼备，远距离传送，不受文化、年龄的限制，面向社会，深入家庭。

现代电视技术是集电子学、大规模集成电路、光学、电磁学、材料科学、卫星技术、数字信号处理、色度学、人类视觉科学等多学科成果于一身的综合性技术，它的进步不仅依赖于这些学科的发展，同时还极大地推动着这些学科的进步和发展。

19 世纪末，少数先驱者设想并开始研究、设计图像的传送技术。1873 年，英国科学家约瑟夫·梅发现硒元素的光电特性，为后来电视技术的发明奠定了基础。1883 年圣诞节，德国电气工程师尼普柯夫用他发明的“尼普柯夫圆盘”，使用机械扫描方法，做了首次发射图像的实验，每幅画面有 24 行扫描线，图像相当模糊。1908 年，英国人肯培尔·斯文顿、俄国人罗申克夫提出电子扫描原理，奠定了近代电视技术的理论基础。1923 年，美籍俄国人兹沃尔金发明静电积贮式摄像管，同年又发明电子扫描式显像管，这是近代电视摄像技术的先驱。

1936 年 11 月 2 日是一个值得纪念的日子，位于英国市郊的亚历山大宫的英国广播公司电视台开始正式播出。这是世界上第一座正式开播的电视台，人们把这一天作为电视事业的开端。英国正式开播的电视在开始时仍为机电系统，4 个月后被电子系统取代。1939 年，美国无线电公司开始播送全电子式电视信号。1940 年，美国人古尔马研制出机电式彩色电视系统。1966 年，美国无线电公司研制出集成电路电视机，3 年后又生产出具有电子调谐装置的彩色电视接收机。

1985 年 3 月 17 日，在日本举行的筑波科学万国博览会上，日本索尼公司建造的超大屏幕彩色电视墙亮相，它位于中央广场，长 40 m，高 25 m，面积达 1000 m²，整个建筑有

14层楼房那么高。

1985年,英国电信公司(BT)推出综合数字通信网络,它向用户提供话音、快速传送图表、传真、慢扫描电视终端等业务。

1991年11月25日,日本索尼公司的高清晰度电视开始试播:其扫描线为1125条,比目前的525条多出一倍,图像质量提高了100%;画面纵横比改传统的9:12为9:16,增强了观赏者的现场感;平机视角从 10° 扩展到 30° ,画面更有深度感;电视图像“画素”从28万个增加为127万个,单位面积画面的信息量一举提高了近4倍,因此,观看高清晰度电视的距离不是过去屏高的7倍而是3倍,且伴音逼真,采用4声道高保真立体声,富有感染力。1995年,日本索尼公司推出超微型彩色电视接收机(即手掌式彩电),只有手掌大小,重量为280g,具有扬声器,也有耳机插孔,液晶显示屏宽度约5.5cm,画面看来虽小,但图像清晰,其最明显的特点是:以人的身体作天线来取得收视效果,看电视时将两根引线套在脖子上,就能取得室外天线般的效果。1996年,日本索尼公司推出“壁挂”式电视,其长度为60cm,宽为38cm,而厚度只有3.7cm,重量仅1.7kg,犹如一幅壁画。

我国第一座电视台是1958年5月1日试运行的北京电视台,也就是现在的中央电视台,1973年开始试播彩色电视节目。

1.2 数字电视的基本概念及优点

数字电视是一个从节目采集、制作、传输到用户端都以数字方式处理信号的端到端的系统。数字电视从根本上改变了电视信号的处理方式,它与模拟电视有本质上的区别。在数字电视系统中,从电视图像和伴音信号的信源处理、传输到接收和记录都是数字化的,而在模拟电视系统中,采用的都是模拟信号。

数字电视与模拟电视相比,有着如下所述的一系列优点。

(1) 传输质量高。在模拟信号传输过程中,不可避免地会产生失真并引入噪声,导致信噪比下降,因此,模拟信号的传输质量不能得到有效保障。而数字信号因为是脉冲信号,相对于模拟的连续变化量能更好地确保传输后的信噪比。在电视广播覆盖面积相同的条件下,数字信号所需的发射功率仅为模拟信号的 $1/10$ 。

(2) 图像清晰度高,伴音效果好。在模拟电视中,由于梳状滤波器分离两个色差信号的彻底性欠佳,不可避免地出现色调失真;而亮度信号与色度信号之间的串扰,使彩色图像质量下降。在数字电视机中,利用集成在一块芯片上的自适应数字滤波器,能使亮度信号和色度信号充分分离,提高了彩色图像的质量。另外,数字电视采用场存储器将电视机的隔行扫描转换成逐行扫描,可克服光栅闪烁现象,提高图像质量,并使图像更稳定。在

伴音系统方面,数字电视采用数字音频技术,音质更好。

(3) 功能强。数字信号便于存储,可实现多画面显示、画中画显示、任意瞬间画面静止显示等功能,这是模拟电视无法实现的。

(4) 容易实现自动化。采用数字技术,易于实现微处理器控制下的自动调整和操作,也可以与计算机或其他数字式设备组成系统,实现可视数据、图形文字、图像的综合显示,同时具备文字广播、接收等功能。

(5) 容易实现三种彩色电视制式的统一。彩色电视技术发展的历史原因导致目前世界范围内 NTSC 制、PAL 制、SECAM 制三种彩电制式共存的局面,这给国际间电视节目的交换带来很大麻烦。传统的模拟电视技术无法从根本上解决这个问题,而数字处理电路可使同一机芯适用于不同的电视制式,它可通过微处理器实现同一机芯接收三种不同制式电视信号的目标,且容易做到机芯标准化,这就从根本上解决了三种彩电制式互不兼容的问题。

(6) 频道利用率高。采用通信卫星播出时,利用带宽压缩技术,可以在一个频道内播送 5 套电视节目、100 个频道的音频广播及计算机用数字广播等多种广播。采用有线电视广播网络时,一个 PAL 制的电视信道可播出 8~10 套标准分辨率的数字电视节目。

(7) 服务多样化。数字电视的发展将促进电视、通信和计算机产品的相互配合,即电视、电话和计算机的一体化,产生多种新的信息业务,“电视节目由电视台发送”的概念将被打破。数字电视机不仅可以收看电视节目,播放录像节目,如果直接与因特网相连,作为因特网终端,足不出户就可以实现购物与理财,还可完成交互式的远程教学、图文杂志阅读、视频点播、电子游戏等。

(8) 使用方面的优点。数字电视信号易实现计算机控制和自动化管理,大规模数字集成电路的应用提高了工作可靠性,几乎无需调整。

1.3 数字电视系统和数字电视机顶盒

1.3.1 数字电视系统

数字电视系统可分为三大部分,即电视信号的数字化及其处理、数字电视信号的传递与交换、数字电视信号的接收和记录。一个完整的数字电视系统同模拟广播电视系统一样,也是由节目源、广播和接收三大环节组成。

图 1.1 所示为数字电视系统框图。发送端由摄像机产生彩色电视图像,经 A/D 变换后,变为数字音、视频信号送入音频或视频编码器中。音、视频编码器承担着音频和图像

数据压缩功能,它去掉信号中的冗余部分,使传输码率降低。然后,经 MPEG-2 标准压缩后的数字音、视频信号和数据送入传输打包和复用,传输流复用完成多套节目复用功能,最后送入信道编码和调制器中。信道编码和调制器包括纠错编码和各种信号传输处理以及数字调制的功能,提高信号在传输中的抗干扰能力和频谱利用率。因为数据码流经长距离传输后不可避免地会引入噪声而产生误码,因此,加入纠错编码和各种信号传输处理可以提高其抗干扰能力。经纠错编码和各种信号传输处理和调制后的信号再通过输出接口电路送入传输线路。远距离传输时,可以采用数字光纤线路、数字卫星线路,也可以采用数字微波线路,采用接力传输方式,站与站的距离可达 50 km。接收端的过程与发送端相反,接收端接收信号后,通过输入接口电路把信号送入信道解码和解调器中,经数字解调和信道解码可纠正由传输所造成的误码,然后将信号送入传输解复用和解包中,最后再分别送入音频或视频解码器中,还原成模拟的音频、视频信号。

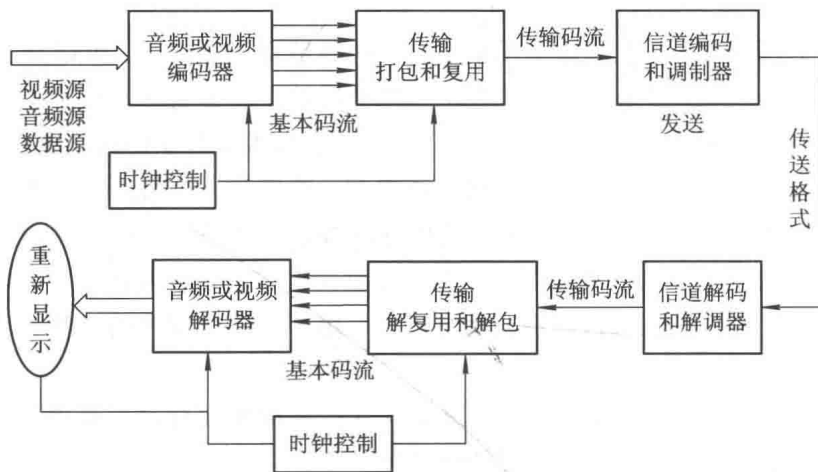


图 1.1 数字电视系统框图

1.3.2 数字电视机顶盒

数字电视机顶盒不仅是用户终端,也是网络终端,它能使模拟电视机从被动接收模拟电视转向交互式数字电视,并能接入因特网,使用户享受电视、数据、语音等全方位的信息服务。

1. 数字电视机顶盒的组成

数字电视机顶盒是充当电视台发送的数字电视信号与用户的显示设备两者之间桥梁的一种接收装置。随着广播电视数字化技术的不断发展,模拟电视机最终将被数字电视机所取代。目前,从我国国情来看,全国有将近 3 亿台模拟电视机,在我国逐步从模拟广播电

视向数字广播电视过渡的进程中,这些模拟电视机不可能即时淘汰,而数字电视机顶盒将是这一过渡时期最好的解决方案。将一台模拟电视机与数字电视机顶盒结合,就可以构成一台接收数字广播电视信号的数字电视机。

数字电视机顶盒的组成框图如图 1.2 所示,它主要由调谐解调器、频率合成器、信道解码器(三者组成数字 CATV 高频头)和 MPEG-2 解压缩器组成。数字电视机顶盒的基本功能是从有线电视网接收数字电视信号,经调谐解调器进行下变频得到频率较低的中频信号;调谐解调器完成选台功能,同时完成数字解调功能。中频信号经放大后再进行信道解码,在信道解码中要完成 R-S 解纠错、卷积解交织等工作,随后送入 MPEG-2 解压缩器中,进行传输流解多路复用、节目流解多路复用及数字视频解压缩、数字音频解压缩,最终输出模拟的视频和音频信号。模拟视频和音频信号经过模拟信号处理,可输出亮度信号和 R、G、B 色度信号及复合视频信号(CVBS)。数字电视机顶盒中的所有功能模块都是由超大规模集成电路实现的。

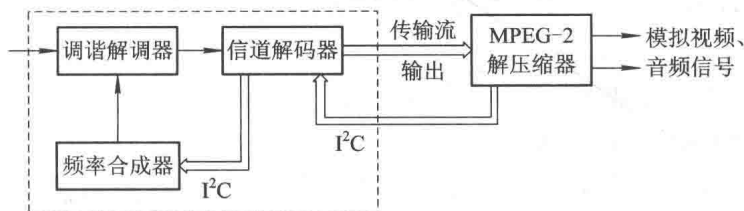


图 1.2 数字电视机顶盒框图

2. 数字电视机顶盒的主要技术

信道解码、信源解码、上行数据的调制编码、嵌入式 CPU、MPEG-2 解压缩、机顶盒软件、显示控制和加解扰技术是数字电视机顶盒中采用的主要技术。

1) 信道解码

数字电视机顶盒中的信道解码电路相当于模拟电视机中的高频头和中频放大器。在数字电视机顶盒中,高频头是必需的,不过调谐范围包含卫星频道、地面电视接收频道、有线电视增补频道。根据 DTV 目前已有的调制方式,信道解码应包括 QPSK、QAM、OFDM、VSB 解调功能。

2) 信源解码

模拟信号数字化后,信息量激增,必须采用相应的数据压缩标准。数字电视广播采用 MPEG-2 视频压缩标准,适用多种清晰度的图像质量。音频目前则有 AC-3 和 MPEG-2 两种标准。信源解码器必须适应不同的编码策略,正确还原原始音、视频数据。

3) 上行数据的调制编码

开展交互式应用,需要考虑上行数据的调制编码问题。目前普遍采用的有三种方式,

分别为：电话线传送上行数据、以太网卡传送上行数据和有线网络传送上行数据。

4) 嵌入式 CPU

嵌入式 CPU 是数字电视机顶盒的心脏，当数据完成信道解码以后，首先要解复用，把传输流分成视频、音频，即使视频、音频数据分离。在数字电视机顶盒专用的 CPU 中集成了 32 个以上可编程 PID 滤波器，其中两个用于视频和音频滤波，其余的用于 PSI、SI 和 Private 数据滤波。CPU 是嵌入式操作系统的运行平台，它要和操作系统一起完成网络管理、显示管理、有条件接收管理(IC 卡和 Smart 卡)、图文电视解码、数据解码、OSD、视频信号的上下变换等功能。为了实现这些功能，必须在普通 32~64 位 CPU 上扩展许多新的功能，不断提高速度，以适应高速网络和三维游戏的要求。

5) MPEG-2 解压缩

MPEG-2 包括从网络传输到高清晰度电视的全部规范，目前实用的视频数字处理技术基本上是在 MPEG-2 技术基础上的。MP@LL 用于 VCD，可视电话会议和可视电话用的 H. 263 和 H. 261 是它的子集，MP@ML 用于 DVD、SDTV，MP@HL 用于 HDTV。

MPEG-2 图像信号处理方法分为运动预测、DCT、量化、可变长编码四步，电路是由 RISC 处理器为核心的 ASIC 电路组成。

MPEG-2 解压缩电路包含视频、音频解压缩和其他功能。在视频处理上要完成主画面、子画面解码，最好具有分层解码功能。图文电视可用 APHA 选显功能选加在主画面上，这就要求解码器能同时解调主画面图像和图文电视数据，要有很高的速度和处理能力。OSD 是一层单色或伪彩色字幕，主要用于用户操作提示。

在音频方面，由于欧洲 DVB 采用 MPEG-2 伴音，美国的 ATSC 采用杜比 AC-3，因此音频解码要具有以上两种功能。

习 题

- 1-1 数字电视有哪些优点？
- 1-2 画出数字电视系统框图。

第2章 模拟电视的基本原理

电视是根据人眼的视觉特性,以一定的信号形式实现景物的分解、变换、实时传送并再现的技术。无论是模拟电视还是数字电视,都离不开光和色彩、电子扫描、电视信号等知识。本章首先介绍色度学的基本概念,进而描述彩色图像的摄取、传输与重现。

2.1 色度学概念

视觉生理学与色度学是彩色电视的基本理论,本节结合光和人眼的视觉特性,介绍三基色等色度学基本知识。

2.1.1 人眼的视觉特性

黑白和彩色电视技术,均利用了人眼视觉的某些特性而实现。黑白电视中利用了人眼的视觉惰性和分辨力的局限性,彩色电视中除了利用以上特性外,还利用了人眼的彩色视觉特性。

1. 人眼的分辨力

分辨力:眼睛分辨景象细节的能力。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) θ 来表征,其关系为:分辨率 $=1/\theta$,所谓视敏角是指观测点(眼睛)与被测的两个点所形成的最小夹角,如图2.1所示。

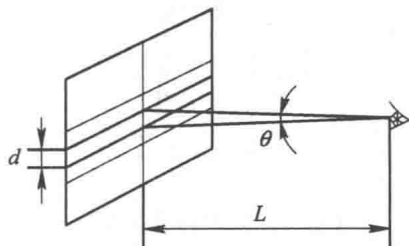


图 2.1 分辨角的测定原理图

由图 2.1 可得

$$\theta = \frac{57.3 \times 60 \times d}{L} = 3438 \frac{d}{L} \quad (2-1)$$

式中, θ 为人眼能分辨的景物细节的分辨角, d 为景物细节间的距离, L 为人眼到景物间的距离。

通常在中等亮度、中等对比度的情况下, 当观察静止图像时, 分辨角 θ 约为 $1' \sim 1.5'$; 而观察运动物体时, 分辨角将大些, 即分辨力要低些。

分辨力在很大程度上取决于景物细节的亮度和对比度。实验表明, 人眼对彩色细节的分辨力比黑白细节低, 若将人眼对黑白细节的分辨能力定义为 100%, 则人眼对各种细节的分辨力实验测量数据如表 2.1 所示。

表 2.1 彩色分辨力对比

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

人眼亮度分辨力与彩色分辨力的特性, 对实现彩色电视信号传输有重要的意义。

2. 视觉惰性与闪烁感

视觉的建立和消失都需要短暂的时间。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, 而是有一个短暂的过渡过程; 同样, 光消失后, 亮度感觉并不瞬时消失, 而是接近似指数函数的规律逐渐减小, 这种现象叫做视觉暂留特性, 也称视觉惰性。通常, 视觉暂留时间为 $0.05 \sim 0.2$ s。

如图 2.2 所示, t_1 到 t_2 、 t_3 到 t_4 分别为视觉的建立和消失的过程, 因此在观看图像时, 前一幅画面的印象尚未完全消失, 后一幅画面的印象已建立, 人眼就会感觉画面是连续的, 反之则是断续的。若暂留时间为 0.05 s, 则产生连续感的每幅画面变换频率(帧频)为 20 Hz。

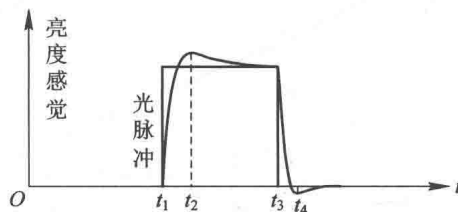


图 2.2 视觉惰性示意图

将不再引起闪烁感觉的光源最低重复频率称为临界闪烁频率 f_c , 它与亮度的对数呈线

性关系，若荧光屏的最高亮度为 100 尼特，则此电视图像的 $f_c = 46.8 \text{ Hz}$ 。

3. 相对视敏曲线

光是一种以电磁波形式存在的物质，人眼可以看见的光叫可见光，它的波长范围为 $380 \sim 780 \text{ nm}$ ，随着波长由长到短，呈现的颜色依次为：红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。在可见光范围内，相同波长的光，当辐射功率不同时，给人的亮度感觉是不同的；对于相同辐射功率而不同波长的光，给人的亮度感觉也是不同的。实践证明，人眼感到最亮的是黄绿色，最暗的是蓝色和紫色。

国际照明委员会经过大量的实验和统计，给出人眼对不同波长光亮度感觉的相对灵敏度，称为相对视敏度。图 2.3 给出了人眼对理想等能白光光源光谱的相对视敏曲线。在同一亮度环境中，辐射功率相同的条件下，波长等于 555 nm 的黄绿光对人眼的亮度感觉最大，并令其亮度感觉灵敏度为 100% ，即相对视敏度 $V(\lambda) = 1$ ；人眼对其他波长光的亮度感觉灵敏度均小于黄绿光 (555 nm)，故其他波长光的相对视敏度 $V(\lambda)$ 都小于 1。例如波长为 660 nm 光线的相对视敏度 $V(660) = 0.061$ ，那么，这种红光的辐射功率应比黄绿光 (555 nm) 大 16 倍 (即 $1/0.061 = 16$)，才能给人相同的亮度感觉。

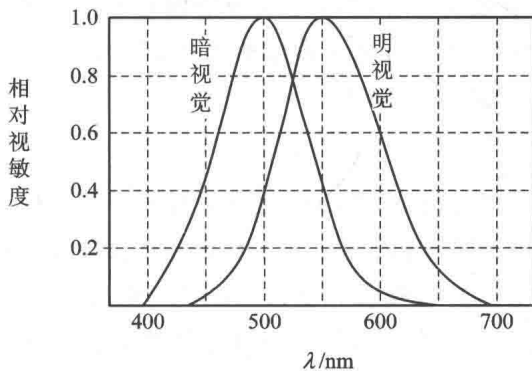


图 2.3 相对视敏曲线

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，称为暗视觉相对视敏曲线，正常情况下称为明视觉相对视敏曲线。对于不同的人，相对视敏曲线的形状是会稍有差异的。

4. 人眼的亮度视觉特性

亮度感觉，即包括人眼所能感觉到的最大亮度与最小亮度的差别及在不同环境亮度下对同一亮度所产生的主观亮度感觉。

(1) 人眼的亮度视觉范围相当宽，原因在于眼睛的感光作用可通过瞳孔的生理调节来适应外界光强的突变。明视觉的亮度感觉范围为一尼特至几百尼特；暗视觉的亮度感觉范

围为千分之几尼特至几个尼特。

尽管人眼的感光范围极广，但他不能同时感受到这样大的亮度范围，当眼睛适应了某一平均环境亮度之后，能分辨的亮度视觉范围就变得小多了。

(2) 人眼的亮度感觉是相对的，在不同环境亮度下，眼睛对同一景物亮度的主观感觉并不相同。例如，在晴朗的白天，如果有人在你身边提一盏小桔灯，你可能不会感觉亮度明显增加；若是漆黑的夜晚，即使离你较远有人提一盏小桔灯，你也会感觉到光亮。

(3) 当人眼适应于不同的平均亮度后，可分辨的亮度范围也不相同。如环境亮度为 10 000 尼特时，可分辨的亮度范围是 200~20 000 尼特，即低于 200 尼特的亮度会引起黑色感觉；而环境亮度为 30 尼特时，可分辨的亮度范围约 1~200 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。

原景物图像或重现图像的最大亮度 B_{\max} 与最小亮度 B_{\min} 之比称为对比度；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。一般来说，对比度越大，画面的亮度层次也越丰富。

由以上特点可知：不论电影还是电视，重现景象的亮度无需等于实际景物亮度；人眼不能觉察出的亮度差别，在重现景物时可以不予精确复制，只需保持重现图像的对比度，就能给人以十分真实的亮度感觉。这给电视图像的传输与重现带来了极大的方便。

5. 人眼的彩色视觉特性

1) 物体的颜色

自然界五光十色，实际上我们看到的颜色有两种来源：一种是发光体所呈现的颜色，如各种霓虹灯和 LED 灯所发出的彩色光；另一种是物体反射或透射的光，那些本身不发光的物体，在光源照射下，有选择地吸收一些波长的光，而反射或透射另一些波长的光，从而使物体呈现一定的颜色。如红旗反射红光而吸收其他颜色的光，因而呈现红色；绿色植物因反射绿光而吸收所有其他色光而呈现绿色，煤炭吸收全部照射光而呈现黑色等。

物体呈现的颜色与照射它的光源密切相关。若把绿草拿到红光下观察，就会发现它近乎是黑色的，因为红色光源中没有绿光成分，绿草全部吸收了红光，所以变成黑色。生活中会有这样的经验，在日光与在灯光下看到的物品颜色有差异，说明日光与灯光这两种光源所含的光谱成分不同，使同一物体表现为不同的颜色。因此不能简单地从看到的颜色来判断光谱的分布，一定的光谱分布表现为一定的颜色，但同一颜色也可由不同的光谱分布而获得。

黄色可以由单一波长的黄光(单色光)产生，也可以由两种或两种以上不同波长的光(复合光)按一定比例混合而成；太阳光可分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色光，却给人以白光的综合感觉，而用红、绿、蓝三种不同波长的单色光也可以混合成白光。