



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业 规划教材

图像通信基础

◆ 吴乐华 杜 鹞 主编

Electronic Information
Science and Engineering



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子信息科学与工程类

图像通信基础

主编 吴乐华 杜 鷗

参编 朱桂斌 张洪英 李元伟

单东晶 杨 琬 张杰良



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书比较系统地介绍了图像通信的相关基础和技术, 主要内容包括: 人眼的视觉特性, 图像和图像通信的含义与特点, 视频图像信号的数字化, 图像质量评价方法, 图像压缩编码方法及相关国际、国家标准, 图像通信协议框架, 以及图像通信中的质量控制技术。

本书注重图像压缩编码基本方法、视频图像压缩编码国际标准与图像通信协议的介绍, 兼顾相关前沿技术及新标准的发展, 内容比较丰富, 叙述深入浅出, 并配有大量图表, 列举了一些实例; 每章均附有习题与思考题, 适合教学和自学。本书可作为高等院校电子信息与通信工程类相关专业的本科生教材, 也可作为声像传输、图像通信工程相关领域从事科研、管理、维护等工作的工程技术人员的培训教材或参考资料。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

图像通信基础 / 吴乐华, 杜鹁主编. —北京: 电子工业出版社, 2017.6

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-31519-0

I. ①图… II. ①吴… ②杜… III. ①图象通信—高等学校—教材 IV. ①TN919.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 105183 号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 桑 昀

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区方寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 17.5 字数: 448 千字

版 次: 2017 年 6 月第 1 版

印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

前 言

随着信息时代的到来,视频图像通信技术飞速发展,国际电信联盟 ITU 和国际标准化 ISO 不断推出视频图像压缩编码和图像通信相关国际标准,视频图像通信已成为日常工作、生活不可或缺的一部分。我国的数字音视频编解码技术标准(AVS)工作组自 2002 年成立以来,经过 10 多年的努力已成功制定一系列视频编码标准,这些标准不仅与最新的国际标准相兼容,而且具有自主的知识产权。为便于初步接触视频通信的人们较快入门,让从事视频通信设备操作、维护和管理的人们能够了解视频通信的基本工作原理与方法,编者根据多年从事音视频教学的实践经验,在图像通信相关培训教材的基础上重新整理编写了此书。

本书既介绍图像压缩编码的基本原理与方法,也介绍图像压缩编码和图像通信的相关国际标准、协议与国家标准;既注重体现 H.265 等最新国际标准,又论述了我国具有自主知识产权的 AVS 系列视频编码标准。就其广度和深度而言,主要针对初学者,并力求兼顾具有一定基础的不同读者或培训对象的需求。

全书共分 6 章。第 1 章为图像与图像通信概论,包括人眼的视觉特性,图像的基本概念,图像通信概述;第 2 章为视频图像数字化及质量评价方法,介绍视频信号的基本概念,视频信号的数字化,数字视频格式,图像质量的评价;第 3 章为图像压缩编码方法,介绍图像压缩编码的理论与方法,阐述熵编码、预测编码和变换编码;第 4 章阐述图像压缩编码标准,包括静止图像压缩编码标准, H.26x、MPEG—x 系列视频压缩编码标准,以及我国具有自主知识产权的视频压缩编码标准 AVS;第 5 章为图像通信协议,介绍图像通信协议体系,图像通信的相关标准, H.320 协议, H.323 协议, H.324 协议, SIP 协议,基于网络的数字视频传输协议;第 6 章介绍图像通信中的质量控制技术,包括图像传输对网络的要求,图像传输手段,图像通信中的码率控制、差错控制。每一章均配有习题与思考题。

本书由吴乐华、杜鹃担任主编,负责纲目拟定、组织编写和统稿工作。

本书编写采取了全体编委集体讨论、分工合作的方式,编写任务具体分工为:第 1 章、第 3 章由吴乐华编写;第 2 章 2.1~2.3 节由张洪英编写, 2.4 节由杨琬编写;第 4 章 4.1 节及 4.3.1、4.3.2 小节由朱桂斌编写, 4.2.1、4.3.3 两小节由李元伟编写, 4.2.2、4.3.4 两小节由单东晶编写, 4.4 节由张杰良编写, 4.5 节由杜鹃编写;第 5 章 5.1~5.6 节由杜鹃编写, 5.7 节由朱桂斌编写;第 6 章由朱桂斌编写。

在本书的编写过程中,参考和引用了他人的研究成果和书籍,这些资料已在本书的参考文献中列出,特在此对文献的著作者们表示由衷的谢意。

在本书的编写过程中,尽管我们力求文字准确,说理清楚,但由于水平有限,时间仓促,书中难免存在一些谬误和不足,恳请读者批评指正。

编 者

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 图像与图像通信概论	1
1.1 人眼的视觉特性	1
1.1.1 可见光	1
1.1.2 人眼的视敏特性	2
1.1.3 人眼的亮度视觉	3
1.1.4 人眼的彩色视觉	4
1.1.5 人眼的立体视觉	5
1.1.6 人眼的视觉惰性和闪烁感觉	5
1.1.7 人眼的分辨力	6
1.2 图像的基本概念	8
1.2.1 图像信息的特点	8
1.2.2 图像的分类	9
1.2.3 图像的顺序传送	9
1.2.4 彩色混合的三基色原理	13
1.3 图像通信概述	19
1.3.1 图像通信的分类	20
1.3.2 图像通信系统的组成	20
习题与思考题	22
第 2 章 视频图像数字化及质量评价方法	23
2.1 视频信号	23
2.1.1 视频信号的类型	23
2.1.2 模拟视频信号	24
2.2 视频信号的数字化	26
2.2.1 彩色视频信号的数字化方式	26
2.2.2 彩色视频信号的分量编码	27
2.2.3 彩色空间转换	30
2.3 数字视频格式	30
2.3.1 ITU—T BT.601 建议的数字视频格式	31
2.3.2 CIF 格式	32
2.3.3 高清格式	34
2.4 图像质量的评价	35
2.4.1 图像质量与失真效应	35

2.4.2	图像质量的主观评价	37
2.4.3	图像质量的客观评价	40
2.4.4	数字视频客观质量评价	47
	习题与思考题	53
第3章	图像压缩编码方法	55
3.1	图像压缩编码的理论与方法	55
3.1.1	信源模型及其信息熵	55
3.1.2	无失真编码理论	59
3.1.3	限失真编码理论	60
3.1.4	图像压缩编码的基本方法	63
3.2	熵编码	65
3.2.1	Huffman 编码	65
3.2.2	算术编码	69
3.3	预测编码	76
3.3.1	差分脉冲编码调制	76
3.3.2	图像的预测编码	81
3.4	变换编码	93
3.4.1	离散 K-L 变换	93
3.4.2	DCT 变换	95
3.4.3	小波变换	100
	习题与思考题	117
第4章	图像压缩编码标准	119
4.1	概述	119
4.1.1	图像压缩编码的标准化组织	119
4.1.2	图像压缩编码标准化发展史	120
4.2	静止图像压缩编码标准	124
4.2.1	JPEG 图像编码标准	124
4.2.2	JPEG2000 图像编码标准	130
4.3	H.26x 系列视频压缩编码标准	137
4.3.1	H.261 视频编码标准	137
4.3.2	H.263、H.263+和 H.263++视频编码标准	142
4.3.3	H.264 视频编码标准	147
4.3.4	H.265 视频编码标准	158
4.4	MPEG—x 系列视频压缩编码标准	173
4.4.1	MPEG—1 标准	173
4.4.2	MPEG—2 标准	178
4.4.3	MPEG—4 标准	184

4.5	AVS 系列视频压缩编码标准	192
4.5.1	AVS 视频编码标准	192
4.5.2	AVS2 视频编码标准	199
4.5.3	AVS+视频编码标准	206
	习题与思考题	209
第 5 章	图像通信协议	211
5.1	图像通信协议体系	211
5.2	图像通信的相关标准	212
5.2.1	G 系列标准	212
5.2.2	T.120 系列标准	218
5.2.3	H.200 系列标准	219
5.3	H.320 协议	223
5.3.1	H.320 协议框架	223
5.3.2	H.320 视频系统结构	224
5.3.3	H.320 会议电视终端结构	225
5.4	H.323 协议	225
5.4.1	H.323 协议框架	226
5.4.2	H.323 视频系统结构	227
5.5	H.324 协议	230
5.5.1	H.324 协议框架	230
5.5.2	H.324M 移动视频通信标准框架	230
5.6	SIP 协议	231
5.6.1	SIP 协议组成	231
5.6.2	SIP 的信令协议	232
5.6.3	基于 SIP 的视频系统	233
5.6.4	SIP 与 H.323 的区别	234
5.7	基于网络的数字视频传输协议	236
5.7.1	实时传输协议 (RTP)	236
5.7.2	实时传输控制协议 (RTCP)	238
5.7.3	实时流协议 (RTSP)	240
5.7.4	资源预留协议 (RSVP)	242
5.7.5	RTP/RTCP、RTSP 和 RSVP 的关系	244
	习题与思考题	245
第 6 章	图像通信中的质量控制技术	247
6.1	图像传输对网络的要求	247
6.2	图像传输手段	248
6.2.1	普通导线传输	248

6.2.2	光纤通信	249
6.2.3	无线通信	249
6.2.4	微波通信	250
6.2.5	卫星通信	251
6.3	图像通信中的码率控制	252
6.3.1	码率控制的必要性	252
6.3.2	码率控制的基本原理	252
6.3.3	码率控制的模式	253
6.3.4	码率控制的典型方法	255
6.4	图像通信中的差错控制	256
6.4.1	编码端差错控制技术	257
6.4.2	解码端差错隐藏技术	260
6.4.3	编码端和解码端交互式抗差错技术	262
	习题与思考题	263
	附录 A JPEG 标准编码数据	264
	参考文献	268

第 1 章 图像与图像通信概论

图像是人类接触世界、获取信息的最重要途径，也是现代通信系统中传输的主要内容之一。图像通信已和语音通信、数据通信一起构成了现代通信的三大支柱，应用越来越广泛。本章将介绍人眼的视觉特性、图像的相关概念、图像通信的分类及系统组成等内容。

1.1 人眼的视觉特性

光辐射刺激人眼时，将会引起复杂的生理和心理变化，这种感觉就是视觉。视觉是人类最重要、最完美的感觉，也是人类获取信息的主要来源。据统计，在人类从外界获取的信息中，70%以上来自视觉。

人眼构造精妙绝伦，使人眼视觉具备了一系列无与伦比的特性。这些特性对于视频图像处理具有重要的指导意义，也构成了视频图像通信的基本依据。

1.1.1 可见光

人们之所以能看到大自然的景物，首先是太阳光对大地照射的结果，离开阳光，地球将是一个黑暗的世界。由物理学可知，光是一种电磁波，兼有波动特性和微粒特性。日光是太阳上的热核反应所发出的多种波长范围的电磁辐射的一部分，这些电磁波混合在一起，同时作用于人眼，便获得了白色光的感觉。当然，并不是一切波长的电磁波都能引起人眼的视觉反应，只有波长在 380~780 nm 的电磁波才能被人眼所感觉，通常把这部分电磁波称为可见光。按波长由长到短的顺序排列的电磁辐射波谱如图 1-1 所示，依次是无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和宇宙射线等。

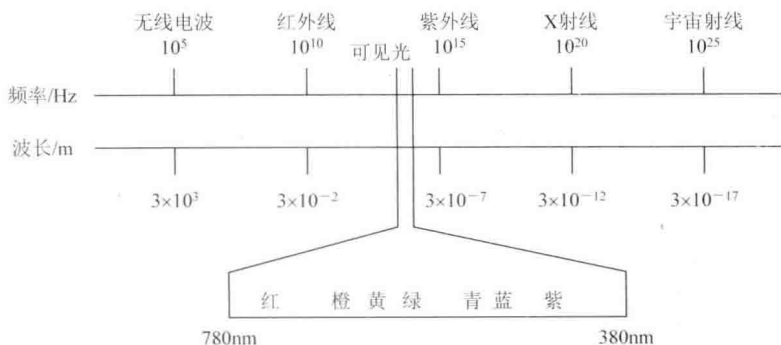


图 1-1 电磁辐射波谱

不同波长的光所呈现的颜色各不相同，随着波长的缩短，显现的颜色依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。

只含有单一波长成分的光或所占波谱宽度小于 5 nm 的光称为单色光，含有两种或两种

以上单色光成分的光称为复合光。单色光所呈现的色称为谱色，复合光所呈现的色称为非谱色。

太阳光是复合光，包含了自 380 nm 至 780 nm 所有波长的光，它刺激人眼引起的白色是非谱色。实验表明，利用三棱镜可以把太阳光分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七个范围的连续光谱，各彩色光的光谱范围见表 1-1。实验还表明，光具有可逆性，即可以用同样的三棱镜将上述七个范围的彩色光重新聚合起来，还原为一束白光。

表 1-1 各色光的光谱范围

色光名称	紫	蓝	青	绿	黄绿	黄	橙	红
光谱范围/nm	390~430	430~470	470~500	500~530	530~560	560~590	590~620	620~780

能够辐射光的物体称为光源或发光体，而不能辐射光的物体则统称为非发光体。太阳是最大的自然光源，是照亮大自然的光源之一。

能被人眼所感知的光归结起来有三种：直射光、透射光和反射光。由发光体产生并直接刺激人眼形成光感的光称为直射光，如日光、照明光等都属于这一类。发光体所产生的光，照射到透明或半透明物体上，被有选择地透射过来的光称为透射光。日常见到的墨镜、滤色片等就是这样的物体。同样，发光体所发出的光，照射到物体上，被该物体有选择地反射出来的光称为反射光。

就物体所呈现的颜色而言，发光体和非发光体是有区别的。对于发光体，它所呈现的颜色是由其本身发出的光的光谱分布所决定的。对于那些本身不发光的非发光体，其颜色是由照射它的光源的光谱分布及物体本身的反射或透射特性所决定的，亦即该物体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所引起的视觉效果。通常，非发光体的颜色是指日光照射时所呈现的颜色。也就是说，自然界的不同景物，在日光照射下，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。例如，一块红布，是因为该布中的颜料反射了日光中的红色光而吸收了其他各色光才使其呈红色；一个白色的物体，之所以呈白色，是因为它对日光中所有波长的光，具有同等的反射特性。如若不用日光照射，而是用其他照明光源照射非发光体，颜色就有可能发生变化。例如，若以不含红光成分的绿色光源去照射红布的话，则会因吸收了绿色光而使红布呈现暗黑色；同样，对于白色物体，若用红色光源去照射便会因为反射了红色光而呈现红色，如用绿色光源照射则会因为反射了绿色光而呈现绿色。可见，非发光体的彩色感觉取决于两个方面，一是人眼对可见光谱中不同成分有不同的视觉感受，二是光源所含的光谱成分以及物体反射（或透射）和吸收其中某些成分的特性。

1.1.2 人眼的视敏特性

视觉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。随着波长在 380~780 nm 内的改变，不仅颜色感觉不同，而且亮度感觉也不相同。

在等能分布的光谱中，人眼感觉最暗的是红色，其次是紫色和蓝色，而最亮的是黄绿色。换句话说，若要获得相同的亮度感觉，则所需的红光辐射功率要比黄绿光的辐射功率

大得多。图 1-2 是根据 1993 年国际照明委员会 (CIE) 获得的最佳数据绘制的相对视敏度 (视敏函数) 曲线, 体现了在光辐射功率相同的情况下, 人眼的亮度感觉随光波波长变化的一般规律。

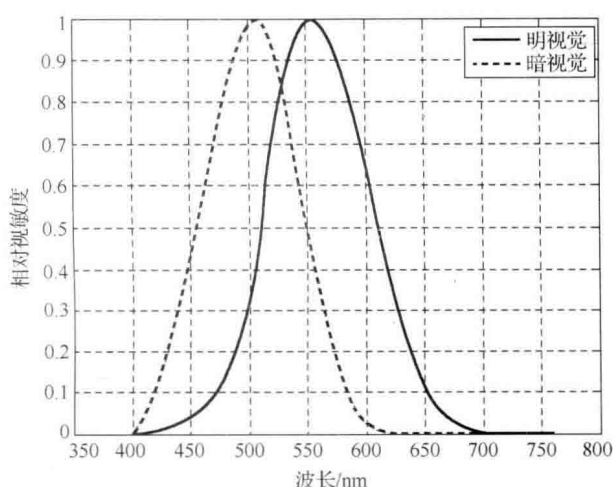


图 1-2 明视觉和暗视觉的相对视敏度曲线

在图 1-2 中, 实线为明视觉视敏函数曲线, 反映的是白天正常光照下人眼对不同波长光的敏感程度; 虚线为暗视觉视敏函数曲线, 反映的是人眼在夜晚或微弱光线下对不同波长光的敏感程度。可见, 在白天正常光照下, 人眼对波长为 555 nm 的光 (黄绿光) 具有最大的明视觉灵敏度。在夜晚或微弱光线下, 人眼主观亮度感觉规律有所变化, 表现为对波长短的光的敏感程度增大, 即视敏函数曲线左移, 人眼对波长为 507 nm 的光具有最大的暗视觉灵敏度。

产生明视觉和暗视觉的机理是: 人眼的视网膜层由大量光敏细胞组成。光敏细胞按其形状分为锥状细胞与杆状细胞两种。锥状细胞既可辨别光的强弱, 又可辨别光的色彩, 白天的视觉过程主要由锥状细胞来完成。杆状细胞只能感光, 不能感色, 但它对弱光的灵敏度要比锥状细胞高得多, 当光线暗到一定程度时主要靠它来辨别明暗。所以, 在暗处或微弱光线下人眼看到的景物都呈灰黑色, 并没有颜色感觉。

1.1.3 人眼的亮度视觉

除光源外, 自然界中各种物体的亮度决定于它所反射的光的强弱。因此, 在同样照明条件下, 各种物体的亮度取决于物体对入射光的反射能力。

人眼所能感觉的亮度范围 (称为视觉范围) 非常宽, 约有百分之几至几百万坎德拉每平方米 (cd/m^2)。其所以如此, 在于人眼的感光具备随外界光的强弱而自动调节的能力。这种调节能力也称眼睛的适应性, 它包括瞳孔的调节作用和视觉细胞本身的调节作用。当一个人从明亮的大厅步入一个较暗的房间时, 一开始会感到一片漆黑, 什么也看不清, 但经过一段时间的适应后就能够逐渐看清物体, 这就是所谓的暗光适应。同样, 从暗的房间一下子进入明亮的大厅时, 也会经历从什么都看不清到逐渐能分辨物体的过程, 即亮光适应过程。暗光适应需要 10~30 秒, 亮光适应则要快得多, 只需 1~2 秒。

当然,人眼并不能同时感受这样大的亮度范围。人眼的明暗感觉是相对的,实际观察景物时所得到的亮度感觉并不直接由景物的亮度所决定,还与周围环境的亮度有关。一方面,人眼在适应了某一环境的平均亮度后,能够分辨的亮度范围要窄得多;另一方面,随着所适应环境的平均亮度不同,人眼的视觉范围也有所不同。通常,在适当平均亮度下,人眼能分辨的最大亮度和最小亮度之比(又称为对比度,记为 C)为1000;而当平均亮度很低时,这一比值只有10。另外,在不同环境亮度下,对同一亮度的主观感觉也并不相同。例如,晴朗的白天,环境亮度约为 10000 cd/m^2 ,可分辨的亮度范围为 $200\sim 20000\text{ cd/m}^2$,低于 200 cd/m^2 的亮度都引起黑色感觉;但当环境亮度降至 30 cd/m^2 时,可分辨范围为 $1\sim 200\text{ cd/m}^2$,这时, 100 cd/m^2 的亮度已引起相当亮的感觉,只有低于 1 cd/m^2 的亮度才形成黑色感觉。可见,人眼在适应于某一平均亮度时,黑-白感觉对应的亮度范围较小,且对比度 C 几乎与绝对亮度无关。

实验表明,人眼察觉亮度变化的能力也是有限的,即对不同亮度 L ,能察觉的最小亮度变化 $\Delta L_{\min}$ 不同。但在相当大的范围内,可察觉的最小相对亮度变化 $\Delta L_{\min}/L$ 却等于常数 ξ ,称之为相对对比度灵敏度阈或费赫涅尔系数。随着环境条件不同, ξ 通常会在 $0.05\sim 0.02$ 内变化;当亮度很高或很低时, ξ 可达0.05。

根据对比度 C 和对比度灵敏度阈 ξ ,就可以计算出能分辨的亮度层次。亮度层次也称图像的黑白层次、图像亮度梯级数或灰度等级。能分辨的亮度层次越多,则图像越清晰,越逼真。

人眼的这些亮度视觉特性给景物的传送和重现带来了方便,一方面,重现景物的亮度无须等于实际景物的亮度,而只需要保持对比度 C 不变;另一方面,人眼不能察觉的亮度差别,在重现景物上也无须精确复制出来。总之,只要具有相同的对比度和亮度层次,对人眼主观感觉来说,重现景物就具有与实际景物相同的亮度感觉。正因为如此,并不反映景物实际亮度的电影和电视,却能给人以真实的亮度感觉。

1.1.4 人眼的彩色视觉

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、色调和色饱和度。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,所以通常称其为彩色三要素。

1. 亮度 (I)

亮度是指光的明亮程度,是光作用于人眼所引起的明暗感觉。一般来说,彩色光的亮度由发光体的辐射功率决定,光功率大则感觉亮,反之则暗。就物体而言,其亮度则与照明光源的光功率以及物体的反射或透射特性有关。照射到同一物体上的光功率越大,则物体越明亮;如果照射物体的光功率为定值,则物体的反射(或透射)系数越大就越明亮。

2. 色调 (H)

色调是彩色光的种类或类别,即颜色的类别。不同波长的光所呈现的颜色不同,实际上就是指色调不同。一般来说,彩色光的色调由其光谱分布决定,而彩色物体的色调则与照明光源的光谱分布及物体的反射或透射特性有关。

色调是决定彩色本质的一个基本参量，是彩色的重要属性之一。

3. 饱和度 (S)

饱和度是指彩色光的深浅程度。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、深绿色；饱和度较低，则说明它呈现较浅的颜色，如浅红、浅绿等。饱和度与彩色光中掺入的白色光成分有关，即完全不掺入白光的彩色光，其饱和度最高（定为100%）；若掺入一半的白光，则饱和度为50%。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，若将一束高饱和度的红光投射到白纸上，则人们看到白纸呈现为深红色；如果再将一束白光投射到该纸上，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，则人眼感觉到的红色越浅。可见饱和度的下降程度反映了彩色光被白光冲淡的程度，亦即饱和度反映了某种彩色光的纯度。

色调与饱和度又合称为色度，它既说明彩色光的颜色类别，又说明颜色的深浅程度。

应该指出的是，虽然不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以由不同光谱成分的光来产生，这就是同色异谱现象。例如，波长为580nm的单色光引起的橙黄色感觉，可以用适当比例的红、绿两种单色光的混合色光来等效；尽管前者是单色光而后者是复合光，光谱成分不一样，但引起的彩色感觉却可以是相同的；故从视觉效果来讲，两者是等效的，可以相互代替。又例如：太阳光是白色光，它的光谱在380~780nm内是连续分布的，但如果用适当比例混合红、绿、蓝三种单色光，则人眼可以获得与太阳光相同的白色感觉。这就是说，单色光和复合光可以产生相同的彩色视觉，由不同光谱成分构成的复合光也可以产生相同的彩色视觉，即从彩色视觉角度而言它们是等效的。

1.1.5 人眼的立体视觉

人眼看到的自然界景物都是具有宽度、高度和深度的立体图像。当人们观察某一景物时，由于两眼球之间存在58~72mm的距离，使得同一物体在左、右两眼视网膜上的成像存在一定的差异，这种差异形成了人眼的宽、高、深的立体视觉。

通常，立体视觉分为双眼立体视觉和单眼立体视觉。形成双眼立体视觉的主要因素是双眼视差和辐辏。当被观察景物未能在左、右两眼相应点上成像时，看到的会是二重像，此时眼球需要做旋转运动，即辐辏。由于辐辏时，眼外肌的运动使景物能在视网膜上将二重像变为单像，因此，辐辏也是产生立体视觉的重要因素之一。单眼立体视觉是指用单眼观察景物时可分辨景物深度信息所产生的立体感觉。产生单眼立体视觉的因素很多，例如，为了使不同距离的景物能在视网膜上清晰成像，需要适当调节睫状肌，以适应眼睛与景物之间的距离变化，从而产生不同的深度感觉等。

1.1.6 人眼的视觉惰性和闪烁感觉

人眼视觉的建立和消失具有一定惰性。如图1-3所示，当一定强度(I_{om})的光突然于 t_1 时刻投射到视网膜上时，人眼并不立刻形成稳定的亮度感觉，而有一段短暂的建立时间。亮度感觉随着时间由 t_1 增大到 t_2 ，逐渐达到稳定值 I_m 。另外，光线一旦消失（如 t_3 时刻），亮度感觉并不瞬时随即消失，而是经历 t_3 到 t_4 逐渐消失的。实测表明，亮度感觉曲线近似

于指数规律, 建立时间稍短, 消失时间较长 (为 $0.05 \sim 0.2$ 秒)。人眼的这种视觉特性称为视觉惰性, 也称视觉暂留特性或视觉暂留效应。

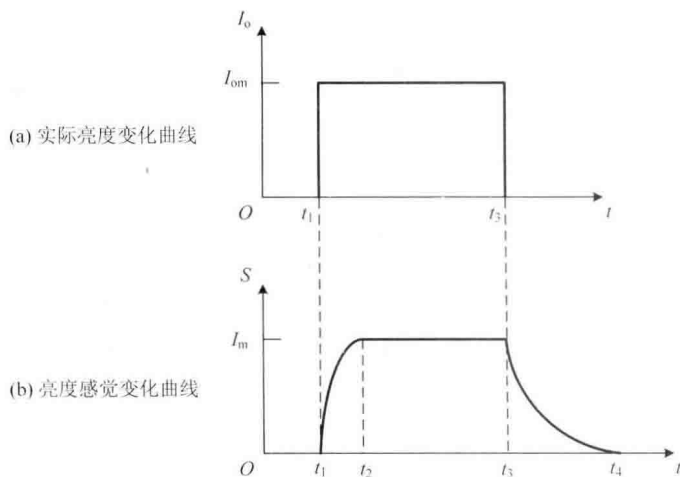


图 1-3 视觉惰性

如果有周期性的脉冲光源作用于视网膜上, 当重复频率不够高时, 人眼会产生一明一暗的闪烁感觉, 这是因为人眼能在亮度感觉上分辨出有光和无光。如果将重复频率提高到某一定值以上, 人眼将察觉不出是脉冲光源, 而只感到是一种亮度恒定的不闪烁光源。不再引起闪烁感觉的脉冲光源最低重复频率, 称为临界闪烁频率。实验测试表明, 当 $I_{0m}=100 \text{ cd/m}^2$ 时, 人眼的临界闪烁频率约为 46 Hz 。只要变化频率超过这个值, 人眼就不会感到闪烁。

视觉暂留特性实际上就是人眼对于随时间变化的目标的分辨能力, 也称时间分辨力。

视觉惰性很早就 在电影和各种频闪仪中得到应用。根据电影技术的经验, 一幅一幅不动的画面, 若其内容在相对位置上有些改变, 则在每秒钟换幅 24 次 (每幅画面曝光两次) 的情况下, 就能给人以较好的连续运动景物的感觉。但如果实际景物运动速度过快, 以致相邻两幅画面的内容差异较大, 则仍会有跳动的感觉。

1.1.7 人眼的分辨力

人眼的分辨力是指人在观看景物时人眼对景物细节的分辨能力。当与人眼相隔一定距离的两个黑点 (如图 1-4 所示) 靠近到一定程度时, 它们在视网膜上的像将落在同一个光敏细胞上, 人眼就分辨不出有两个黑点存在, 而只感觉到是连在一起的一个黑点。这说明人眼分辨景物细节的能力有一个极限值, 该值就是人眼的空间分辨力。

通常, 将人眼对被观察物体上能分辨的最紧邻两点的最小视角称为分辨角, 记为 θ 。图 1-4 中, L 表示人眼与图像之间的距离, d 表示能分辨的最紧邻两点之间的距离, 分辨角 θ 与 L 、 d 具有如下关系:

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

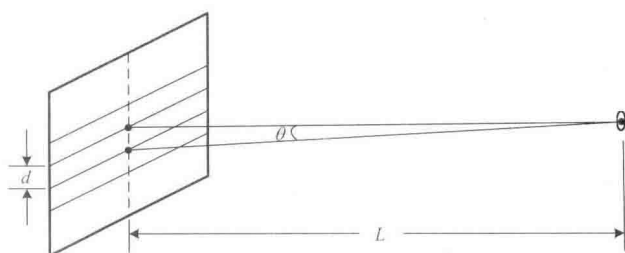


图 1-4 人眼的分辨力

显然，分辨角 θ 越小，人眼的分辨力越高，故将分辨角 θ 的倒数定义为人眼的分辨力，又称视觉锐度。

分辨角在很大程度上与照明强度和景物的相对对比度有关。照度太大时人眼感到炫目，分辨力会降低；照度太小时锥状细胞将不起作用，靠杆状细胞来感受，分辨力也差。当景物亮度与背景亮度比较接近（即相对对比度较小）时，人眼自然会难以分辨，故分辨力下降，亦即分辨角变大。受视觉惰性的影响，人眼对运动物体的分辨力是低于对静止物体的分辨力的。

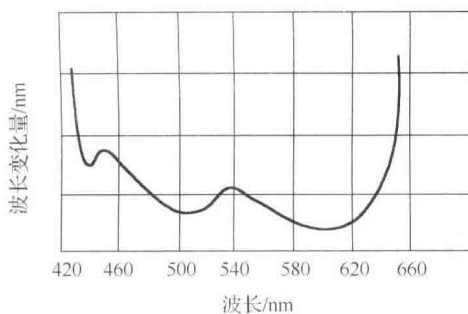
具有正常视力的人，在中等亮度和中等相对对比度下观察黑白静止图像时，分辨角 θ 约为 $1' \sim 1.5'$ 。

此外，人眼对彩色细节的分辨力比对亮度细节的分辨力要差，如果黑白分辨力为 1，则黑红为 0.9，绿蓝为 0.19，见表 1-2。由表可见，人眼分辨景象彩色细节的能力很差。例如，彩色电视系统在传送彩色图像时，细节部分只传送黑白图像而不送彩色信息，即采用大面积着色以节省传输频带，正是利用了人眼的这一特性。

表 1-2 人眼的相对分辨力

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

对不同色调，人眼的分辨力也不同。通常，人眼能分辨 100 多种色调。人眼对色调细节的分辨能力可用色调分辨阈值来表征，它是指当人眼观察某一波长 λ 的彩色时，将波长改变为 $\lambda + \Delta\lambda$ ，这时人眼刚好能分辨出这两种彩色色调的差别，称 $\Delta\lambda$ 为色调分辨阈值。实验表明，在可见光范围内，对于不同的波长 λ ，其 $\Delta\lambda$ 是不同的，如图 1-5 所示。例如，当波长在 $580 \sim 640 \text{ nm}$ （对应的彩色在红、黄之间）内时， $\Delta\lambda$ 较小，这说明在该波长范围人眼的色调分辨力最高。若色彩饱和度较低或亮度较低，则人眼的色调分辨力会有所下降。

图 1-5 色调分辨阈值 $\Delta\lambda$ 与波长 λ 的关系

人眼能分辨同一色调不同饱和度的彩色。实验表明,人眼对不同色调的饱和度变化的敏感程度不同。例如,对于黄光,人眼能分辨出的饱和度变化只有4级,是最不敏感的;而对于红光和蓝光,人眼能分辨的饱和度变化则可达25级。

1.2 图像的基本概念

人眼之所见即人眼所获取的图像。在日常生活、工作或学习中,图像都是必不可少的组成部分,它为人类构建了一个形象的思维模式。

图像有多种含义,其中最常见的定义是指各种图形和影像的总称。一般来说,图像是当光辐射能量照在物体上,经过物体的反射或透射,或由发光物体本身发出的光能量,在人的视觉器官中所呈现出的物体的视觉信息。

1.2.1 图像信息的特点

人们经常接触的信息主要有三大类:图像信息、语音信息、文本信息。与语音、文本等信息相比,图像信息具有信息量大、直观形象等诸多显著的特点。

1. 图像的信息量大

俗语“百闻不如一见”、“一目了然”等表明图像带给我们的信息量是非常大的。用一幅图像可以直接说明很多问题,而说明同样的问题可能需要许多文字。“百闻不如一见”中的“一见”也表明人们接受图像信息的方式是一种“并行”的方式,一眼看去,图中的所有的像素尽收眼底,而不像看文字一样得一行一行地看。由此可知图像信息的直观性和便于并行接收的特点。

2. 图像的直观性强

一般情况下,图像的内容和我们用眼睛直接观察到的呈现在我们脑海中的图像非常接近。图像是外部世界的直接反映。图像信息我们一看就懂,直观性很强,不需要经过人的思维的特别转换,可以被人直接理解。不像语音或文本那样,存在语种的差别,造成交流的困难。如一幅风景画,不管中国人还是外国人都能一看就明白,不存在看不懂的问题。

3. 图像信息的模糊性

图像存在一定的模糊性。人们读解图像的能力与其所处的文化背景、年龄、性别以及民族习惯等有着密切的关系。来自不同文化背景的人,由于个人可能接触到的文化内容不同,对同样的视觉图像容易产生带分歧的观点。如对同一幅图像,不同的观察者可能会有不同的理解和感受,甚至有可能给出不同的解释,所以说对图像的理解具有很强的主观性。

4. 图像的实体化和形象化

图像比文字和语言更具有实体化和形象化的功能。实体化和形象化能够帮助人们更有效地理解、掌握和记忆学习内容。因此图像经常用于多媒体教学中,以提供在传统教育教学中语言和文字无法实现的实体化和具体化。