

数字电视 与平板电视中的 色度学

国家广播电视产品质量监督检验中心 编著
TCL多媒体科技控股有限公司GPC研发中心

COLORIMETRY

数字电视 ⑤ 平板电视中的 色度学

国家广播电视产品质量监督检验中心 编著
TCL多媒体科技控股有限公司GPC研发中心

人 民 邮 电 出 版 社
北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电视与平板电视中的色度学 / 国家广播电视产品质量监督检验中心, TCL多媒体科技控股有限公司 GPC研发中心编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2010. 6
ISBN 978-7-115-21941-1

I. ①数… II. ①国… ②T… III. ①数字电视—色度学②平板电视—色度学 IV. ①TN949.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第234927号

内 容 提 要

本书从人眼的视觉特性与电视系统参数之间的关系入手, 全面系统地讲解了数字电视与平板电视中的色度学原理, 介绍了色度学在数字电视和平板电视中的应用, 分析了平板电视亮度、色度测量原理和测量仪器使用方法。书中既有经典理论的论述, 又列举了经典理论在最新技术领域的典型应用。全书在编写过程中力求深入浅出, 图文并茂, 突出实用性。

本书适合广播电视行业从事数字电视和平板电视研发、设计、生产、质量检测、标准制定的科技人员阅读使用, 也可作为高等学校相关专业的教学参考书。

数字电视与平板电视中的色度学

-
- ◆ 编 著 国家广播电视产品质量监督检验中心
TCL 多媒体科技控股有限公司 GPC 研发中心
责任编辑 张 鹏
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.5 彩插: 2
字数: 512 千字 2010 年 6 月第 1 版
印数: 1—2 000 册 2010 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-21941-1

定价: 78.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

前言

色度学是研究人眼的颜色视觉规律、颜色测量理论与技术的科学。它是以物理光学、视觉生理、视觉心理等科学为基础的综合性科学。数字电视技术中的色度学是研究如何将自然界景物的颜色,在数字电视系统中完成摄取、压缩、编码、调制、传输,并在显示器屏幕上正确地复显出来的学科。从艺术角度出发,还要研究如何对反映颜色的色度参数进行控制,并适当地加以艺术加工,使重显的颜色比真实景物颜色更加鲜艳夺目,更富有艺术感染力。

数字电视是继黑白电视向彩色电视过渡之后,电视技术的又一次革命。它用新颖的数字技术代替传统的模拟技术,近几年得到飞速发展。数字技术与电视技术的融合,进一步增加了人类获取信息的手段和方法,并使广播电视系统的技术水平和质量水平得到质的飞跃,最大限度地满足了人类对视听产品提出的要求。

平板电视机是近几年国内外市场上的热销产品,由于它具有屏幕大、重量轻、厚度薄、清晰度高、图像质量优良、色彩鲜艳等特点,深受广大消费者欢迎。平板电视机的寻址、激励方式最适合数字信号,是数字电视时代理想的终端显示器,近年来发展迅猛,已成为彩色电视机的主流产品。

随着数字电视及平板电视的发展,广播电视行业的广大科技人员和读者亟需一本系统介绍数字电视及平板电视中的色度学的图书,帮助他们利用传统的色度学原理,解释数字电视系统及平板电视机中色度信号的产生、传输、控制、重显的原理,使数字电视系统及平板电视机的技术水平和质量水平不断得到提高。为此,国家广播电视产品质量监督检验中心和 TCL 多媒体科技控股有限公司 GPC 研发中心共同组织行业有关专家、教授编写了这本《数字电视与平板电视中的色度学》,希望它能对数字电视及平板电视的研发、生产、检测、教学有所帮助。

本书共分 5 章,第 1 章主要介绍人眼的视觉特性与电视系统参数之间的关系,这是因为人类在发展电视技术的过程中,首先分析了人眼的视觉特性,由视觉特性确定了彩色电视系统的大部分参数;第 2 章数字电视与平板电视中的色度学是本书的重点,主要介绍了国际照明委员会(CIE)的几种标准色度坐标系统的特点、计算方法以及它们之间的关系,CIE 标准色度坐标系统在模拟和数字电视中的应用等;第 3 章针对数字电视与平板电视中的颜色重显,主要介绍几种数字电视显示器彩色重显的原理、方法以及它们的优缺点;第 4 章主要介绍平板显示器的亮度、色度测量原理和检测仪器,重点介绍国内电视行业常用的几种积分式和分光式测光测色仪器的使用方法、校正原理;第 5 章平板显示器的亮度和色度性能测量,重点介绍行业标准《数字电视平板显示器测量方法》(SJ/T 11348—2006),同时对平板显示器亮度、色度性能的测量方法和测量原理作了深入分析;附录给出了 ITU、IEC 两个国际标准化组织有关扩展色域的标准 ITU-R BT.1361、IEC 61966-2-4 以及 IEC 61996-9 的译文。

本书由国家广播电视产品质量监督检验中心安永成教授主编,TCL 多媒体科技控股有限公司 GPC 研发中心黄凯华总工程师、杨福忠高级工程师、李培仁教授也参与了部分章节的编写,并提供了大量资料。国家广播电视产品质量监督检验中心整机检测室的温娜博士翻译、

校对了部分外文资料,吴昕高级工程师、王海燕高级工程师等提供了部分资料。本书在编写过程中还得到天津大学李桂苓教授、俞斯乐教授、徐岩博士和王学珍的大力支持,李桂苓教授对书稿提出了许多宝贵修改意见和建议,还亲自撰写了第 2.10 节,浙江大学叶关荣教授审阅了第 4 章,国家广播电视产品质量监督检验中心刘全恩高级工程师审阅了第 2 章和第 5 章,他们都提出了许多宝贵的修改意见。从某种意义上说,本书是电视行业部分专家、教授集体智慧的成果,在此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

本书内容新颖,全面系统地讲述了数字电视与平板电视中的色度学原理,既有经典理论的论述,又列举了经典理论在最新技术领域的典型应用;既有经典公式的推导,又有严谨的计算举例。全书在编写过程中力求深入浅出,通俗易懂,图文并茂,突出实用性。本书适合从事数字电视及平板电视研发、设计、生产、质量检测、标准制定的科技人员阅读使用,也可作为高等院校消费电子类专业的教学参考书,广大电视技术爱好者阅读本书也会有所收获。

由于编著者水平有限,加之编写时间仓促,尽管经反复推敲、多方研讨,书中不妥之处仍在所难免。希望本书能起到抛砖引玉的作用,有更多的同仁参与讨论,提出宝贵的修改意见。

国家广播电视产品质量监督检验中心
TCL 多媒体科技控股有限公司 GPC 研发中心
2010 年 2 月

目录

第1章 视觉特性与电视系统参数	1
1.1 人眼的结构特点	1
1.1.1 人眼的构造	1
1.1.2 锥状细胞与杆状细胞	2
1.1.3 明视觉特性与暗视觉特性	4
1.1.4 平板电视机中常用的光学物理量	8
1.2 人眼的视觉特性与电视系统参数	9
1.2.1 人眼的视觉锐度与图像分辨力	9
1.2.2 人眼的视觉惰性与时秒钟传送完整图像的帧数	16
1.2.3 人眼的视觉适应性 with 图像对比度	17
1.2.4 人眼的彩色视觉和三基色原理	21
1.2.5 人眼的彩色分辨力与大面积图像着色理论	23
1.2.6 人眼视觉的马赫效应与图像勾边处理	24
1.3 人眼的立体视觉与立体电视	26
1.3.1 人眼立体视觉的机理	26
1.3.2 立体电视	27
1.4 人眼的其他视觉特点	32
1.4.1 人眼的视觉阈值效应与掩盖效应	32
1.4.2 人眼的视野与图像幅型比	33
1.4.3 视觉的空间频率响应与运动图像清晰度	34
1.4.4 人眼的彩色色调分辨阈和彩色饱和度分辨力	35
第2章 数字电视与平板电视中的色度学	36
2.1 CIE 标准色度学系统	36
2.1.1 彩色三要素	36
2.1.2 1931 CIE-RGB 计色系统	37
2.1.3 1931 CIE-XYZ 计色系统	42
2.1.4 1960 CIE-UCS 计色系统	49
2.1.5 CIE 均匀颜色空间	55
2.2 相关色温与标准光源	61
2.2.1 光源的光谱功率分布与色温	61
2.2.2 相关色温的概念	64
2.2.3 CIE 推荐的 A、B、C、D 标准照明体	73
2.3 彩色电视系统三基色荧光粉和基准白的选择	76
2.3.1 三基色荧光粉的选择	76
2.3.2 摄像端和显像端基准白的选择	77
2.4 NTSC 制电视系统色度信号的传送	78
2.4.1 NTSC 制 C_{40} 的亮度方程式	78
2.4.2 正交平衡调幅原理	81

2.4.3 彩条信号压缩比的计算	83
2.4.4 NTSC 制的编、解码矩阵方框图	86
2.5 PAL 制电视系统色度信号的传送	88
2.5.1 我国 PAL-D 制的亮度方程式	88
2.5.2 色度信号逐行倒相的特点	90
2.6 数字电视色度信号的传送	92
2.6.1 数字电视色度信号的压缩	92
2.6.2 标准清晰度电视系统亮度、色度信号的编/解码方框图	93
2.6.3 高清晰度电视系统亮度、色度信号的编/解码方框图	96
2.6.4 数字电视广播系统的色域扩展	99
2.6.5 平板显示器件提高色域的措施	101
2.6.6 彩色电视系统提高色域的建议	102
2.7 摄像端亮度、色度信号的产生	103
2.7.1 摄像光谱响应曲线	103
2.7.2 摄像机中亮度、色度信号的产生	105
2.7.3 CCD 型电视摄像管	109
2.8 平板显示器中的去 γ 校正	122
2.8.1 CRT 型显像管的亮度转换特性	122
2.8.2 电视广播系统的 γ 预校正	124
2.8.3 新型显示器中的去 γ 校正	126
2.8.4 $\gamma_s \neq 1$ 的非线性传输特性对色度信号重显的影响	126
2.9 彩色电视系统的彩色校正	129
2.9.1 修正法	129
2.9.2 合成法	130
2.10 宽色域数字电视信号	131
2.11 平板电视机中色度误差的表示	135
2.11.1 各种色度误差的计算公式	135
2.11.2 现行行业标准中色度误差的比较	137
第 3 章 平板电视机中的颜色重显	139
3.1 概述	139
3.1.1 对平板电视机颜色重显的要求	139
3.1.2 平板电视机的显示方式	139
3.2 CRT 型彩色显像管的颜色重显	141
3.2.1 荫罩式彩色显像管的构成	141
3.2.2 荧光粉的发光机理	143
3.2.3 CRT 型彩色显像管的白平衡调整	150
3.2.4 CRT 型彩色显像管的优缺点	152
3.3 等离子(体)彩色显示器的彩色重显	153
3.3.1 PDP 彩色显示器的特点	153
3.3.2 PDP 显示器的基本原理	154
3.3.3 壁电荷和壁电压的形成	156
3.3.4 表面放电型 AC-PDP 的结构	156
3.3.5 灰度等级的实现——子帧驱动	157
3.3.6 寻址与激活	158

3.3.7 PDP 显示屏辉光放电、发光原理	161
3.3.8 PDP 平板显示器的白平衡调整	164
3.4 CRT 型投影显示器的色度重显	164
3.4.1 CRT 型投影显示器的工作原理	165
3.4.2 CRT 型投影显示器的彩色重显	166
3.5 LCD 的彩色重显	169
3.5.1 LCD 的工作原理	169
3.5.2 LCD 的彩色重显	173
3.5.3 LCD 的特点	180
3.5.4 LCD 的色度校正	181
3.6 液晶投影显示器的彩色重显	186
3.6.1 液晶投影显示器的工作原理	186
3.6.2 液晶投影显示器的彩色重显	187
3.7 硅基液晶 (LCoS) 投影显示器的彩色重显	189
3.7.1 LCoS 投影显示器的工作原理	189
3.7.2 LCoS 投影显示器的驱动原理	190
3.7.3 LCoS 投影显示器的彩色重显	191
3.8 DLP 投影显示器的彩色重显	191
3.8.1 DLP 投影显示器的工作原理	191
3.8.2 DLP 投影显示器的彩色重显	193
3.9 各种平板显示器的性能比较	195
第 4 章 平板显示器的亮度、色度检测原理和检测仪器	197
4.1 前言	197
4.2 亮度、色度测量原理	198
4.3 光电积分式仪器	201
4.3.1 光电积分式仪器的工作原理	201
4.3.2 光电积分式仪器的校正	204
4.4 光电积分式仪器 BM-5 简介	205
4.4.1 BM-5 型色度计的主要特性	205
4.4.2 BM-5 型色度计的使用开关	206
4.4.3 BM-5 型色度计的使用注意事项	207
4.4.4 BM-5 型色度计的使用程序	207
4.5 CM-7 型彩色分析仪简介	209
4.5.1 CM-7 型彩色分析仪的工作原理	209
4.5.2 CM-7 型彩色分析仪的技术指标	210
4.5.3 CM-7 型彩色分析仪的使用说明	210
4.5.4 使用、维修注意事项	212
4.6 CA-210 显示器色彩分析仪	213
4.6.1 CA-210 显示器色彩分析仪的主要应用	213
4.6.2 CA-210 显示器色彩分析仪的特点	214
4.6.3 用 CA-210 进行显示器的 γ 调整	215
4.6.4 CA-210 的技术规格	216
4.7 分光光度法测色仪器	217
4.7.1 分光光度法测色的简单原理	217

4.7.2 分光光度计的原理方框图	218
4.7.3 CS-2000 型分光辐射亮度计简介	219
4.7.4 PR-650 光谱扫描式彩色频谱仪简介	223
第 5 章 平板显示器的亮度和色度性能测量	226
5.1 测量前的准备工作	226
5.1.1 测量的一般要求	226
5.1.2 测量设备方框图	230
5.1.3 额定输入信号电平	230
5.1.4 显示器标准工作状态的调整	230
5.2 亮度的测量	231
5.2.1 亮度 (Luminance) 的概念	231
5.2.2 亮度的测量方法	232
5.3 对比度的测量	232
5.3.1 对比度的概念	232
5.3.2 对比度的测量方法	232
5.3.3 显示器对比度参数的制定	233
5.4 清晰度的测量	233
5.4.1 图像清晰度的概念	233
5.4.2 图像清晰度与图像分辨力的关系	234
5.4.3 图像清晰度的理论值	234
5.4.4 图像清晰度的测量方法	235
5.5 运动图像拖尾时间	239
5.5.1 响应时间和拖尾时间	239
5.5.2 拖尾时间的测量方法	239
5.5.3 测量步骤	241
5.5.4 LCD 产生拖尾的原因	242
5.5.5 缩短 LCD 响应时间的措施	243
5.6 可视角	244
5.6.1 可视角的概念	244
5.6.2 可视角的测量条件	244
5.6.3 可视角的测量步骤	245
5.6.4 可视角的表示	246
5.6.5 LCD 存在方向性的原因	246
5.6.6 提高 LCD 方位角的技术措施	246
5.7 亮度均匀性	248
5.7.1 亮度均匀性的概念	248
5.7.2 测量方法	249
5.8 白色色度误差	249
5.8.1 白色色度误差的概念	249
5.8.2 测量白色色度误差的意义	250
5.8.3 测量方法	251
5.8.4 测量白色色度误差时的注意事项	251
5.9 基色色度坐标	251
5.9.1 基色色度坐标的定义	251
5.9.2 基色色度坐标的测量方法	251

5.10 相关色温	252
5.10.1 相关色温的概念	252
5.10.2 相关色温的测量方法	252
5.10.3 测量结果表示	252
5.10.4 相关色温测量中的注意事项	252
5.11 色域覆盖率	252
5.11.1 色域覆盖率的概念	252
5.11.2 测量方法	253
5.11.3 色域覆盖率的计算举例	253
5.11.4 提高色域覆盖率的意义	254
5.12 白色色度不均匀性	255
5.12.1 白色色度不均匀性的定义	255
5.12.2 测量方法	255
5.13 图像重显率	256
5.13.1 图像重显率的定义	256
5.13.2 图像重显率的测量方法	256
5.13.3 平板显示器图像重显率检测的意义	256
5.14 像素缺陷	258
5.14.1 像素缺陷的定义	258
5.14.2 测量方法	258
5.14.3 平板显示器行业标准对像素缺陷的限额值	259
5.15 残留影像	260
5.15.1 测试残留影像的意义	260
5.15.2 测量方法	261
5.16 固有分辨力	262
5.16.1 固有分辨力的定义	262
5.16.2 固有分辨力的测量方法	262
5.16.3 平板显示器的显示格式	263
5.17 白平衡误差	264
5.17.1 白平衡误差的定义	264
5.17.2 测量方法	264
5.17.3 白平衡误差测试的意义	264
5.18 亮度均匀性与视角的关系	265
5.18.1 亮度均匀性与视角关系的概述	265
5.18.2 测量方法	265
5.19 色度与视角的关系	266
5.19.1 色度与视角关系的概述	266
5.19.2 测量方法	266
5.20 整机消耗功率	268
5.20.1 测量方法	268
5.20.2 测量结果表示	269
5.21 待机消耗功率	269
5.21.1 测量方法	269
5.21.2 测量结果表示	269
5.22 亮度与功率比	269
5.22.1 测量方法	269

5.22.2 测量结果表示	269
5.23 平板电视能效测试	269
5.23.1 美国“能源之星”能效标准简介	269
5.23.2 欧洲 EuP “用能产品生态设计指令” 框架协议简介	270
5.23.3 音、视频设备及相关设备功耗的 IEC 测量方法	270
5.23.4 国家标准报批稿《平板电视能效限定值及能效等级》简介	271
5.24 通断比	275
5.24.1 测量通断比的意义	275
5.24.2 测量方法	275
5.24.3 测量结果表示	275
5.25 响应时间	275
5.25.1 响应时间的定义	275
5.25.2 响应时间的测量方法	276
5.25.3 测量结果表示	276
5.26 灰阶响应时间	277
5.26.1 灰阶响应时间的定义	277
5.26.2 测量方法	277
5.26.3 测量结果表示	277
5.27 亮度非线性	277
5.27.1 亮度非线性的定义	277
5.27.2 测量方法	277
5.27.3 测量结果表示	277
5.28 亮度启动特性	278
5.28.1 亮度启动特性的定义	278
5.28.2 测量方法	278
5.28.3 测量结果表示	278
5.29 漏光	278
5.29.1 漏光的定义	278
5.29.2 测量方法	279
5.29.3 测量结果表示	279
5.30 黑电平稳定性	279
5.30.1 测量黑电平稳定性的意义	279
5.30.2 测量条件	280
5.30.3 测量结果表示	280
附录 1 国际标准 ITU-R BT.1361 建议书《未来电视和图像系统的国际统一色度和 相关特性》	281
附录 2 国际标准 IEC 61966《多媒体系统和设备——彩色测量与管理》	291
2-4: 彩色管理——面向视频应用的扩展色域 YCC 彩色空间——xvYCC	291
附录 3 国际标准 IEC 61966《多媒体系统和设备——彩色管理和测量》	299
第 9 部分: 数字摄像机	299
参考文献	317

第 1 章 视觉特性与电视系统参数

彩色电视技术是根据人的视觉特性，建立在色度学、电子技术等基础上的新技术。人类在发展电视技术的过程中，首先分析了人的视觉特性，然后由此确定了彩色电视系统的大部分参数。在研究彩色电视技术之前，应首先了解人眼的视觉特性。

1.1 人眼的结构特点

眼睛是人类认识世界的主要感觉器官，大量统计表明，人类获取的知识和信息有 70% 来自视觉系统，20% 来自听觉系统，10% 来自嗅觉、触觉和味觉系统，可见视觉是人们获取知识和各种信息的主要来源。人眼又是一个十分复杂的光学系统，任何复杂的光学仪器都无法模拟、替代人眼的全部特性。例如人眼通过瞳孔的调节作用，既能感觉到百分之几坎德拉/平方米的低亮度，又能感受到几百万坎德拉/平方米的高亮度；通过调节两眼之间的会聚点，既能看到几厘米近的物体，又能看到几千米之外的物体，甚至宇宙空间的星体。

1.1.1 人眼的构造

人类观看景物是通过光波传送及眼睛的透镜作用使景物在眼睛内的视网膜上成像。人眼的构造如图 1.1.1 所示，它是一个前后直径大约 23mm 的近似球状体，主要由眼球壁和折光部分构成。

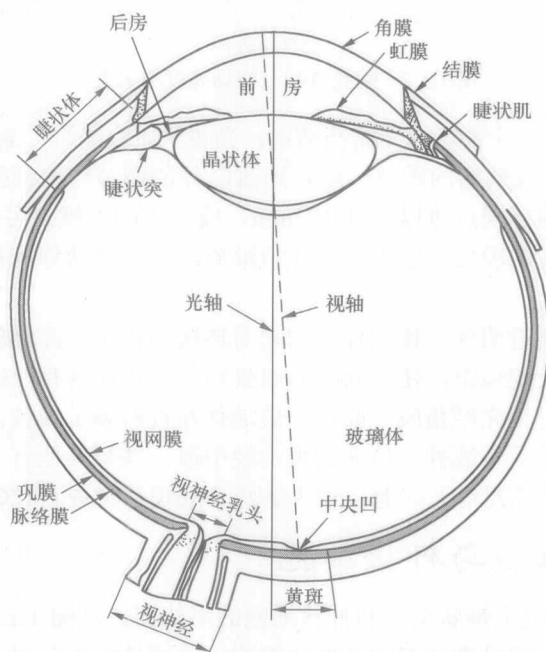


图 1.1.1 人眼的构造

眼球壁由多层组成,最外层是坚硬的蛋白质膜,它的正前方的 $1/6$ 部分为有弹性的透明组织,称为角膜。角膜厚约 1mm ,横径约 11mm ,含有大量的感觉神经纤维,光线从这里进入眼内。眼球壁的其余 $5/6$ 部分为不透明组织,称为巩膜,巩膜厚 $0.5\sim 1\text{mm}$,主要起巩固和保护眼球的作用。

巩膜里边的一层由虹膜、睫状肌和脉络膜组成。脉络膜上有丰富的色素细胞,呈黑色,具有吸收外来杂散光的作用,可消除光线在眼球内的乱反射。虹膜随不同种族有不同的颜色,如黑色、蓝色、褐色等,中国人的虹膜呈黑色,西方人的虹膜呈蓝色。

在虹膜的中间有一小孔,称为瞳孔,瞳孔的大小可以借助于虹膜的肌肉组织来调节,从而可以控制进入眼睛内部的光通量,相当于照相机光圈的作用。虹膜上的瞳孔直径可以从微弱光时的 8mm 缩小到强光时的 2mm ,如图 1.1.2 所示。

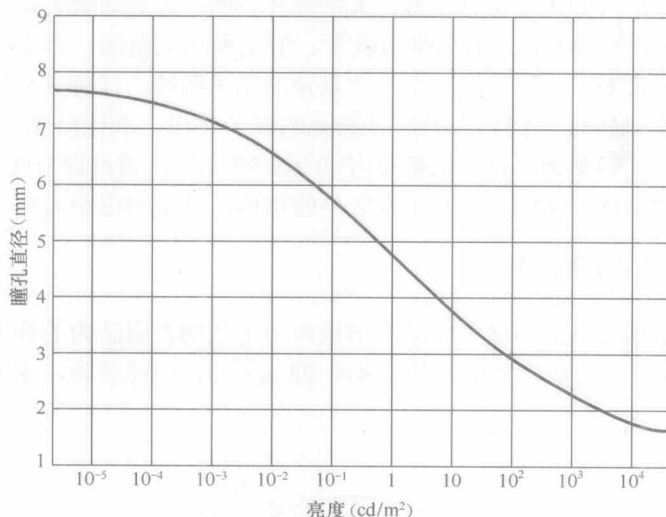


图 1.1.2 瞳孔直径与视场亮度的关系

眼球中的晶体相当于一个曲率可变的凸透镜,当睫状肌收缩时,晶体的后焦距从 22.7mm 变到 18.9mm ,这样不论观察物的距离远近,通过晶体的调节作用都能使物体的像正好呈现在视网膜上。少年儿童的近视点可以近到 102mm ,成年人的近视点可以变为 250mm 。

眼球壁内最里层为视网膜层,它由大量光敏细胞组成。光敏细胞按其形状分为杆状细胞和锥状细胞两种。

在瞳孔后面是一弹性透明体,称晶体,它起着透镜的作用。晶体的曲率能通过其两旁的睫状肌调节,从而可以改变焦距,使不同距离的景物都能在视网膜上成像。

眼睛观看景物时,可见光经角膜、晶体、玻璃体在视网膜上成像,光敏细胞受到光刺激产生生物信号,生物信号沿着视神经传递到视神经中枢,并与其他有关信息(包括眼肌调节的紧张程度、记忆方面的信息等)一起,经大脑综合处理后形成对景物的视觉。

1.1.2 锥状细胞与杆状细胞

图 1.1.3 是人眼视网膜上锥状细胞和杆状细胞的形状图。从图 1.1.3 可以看出,视网膜可以粗略的分为三层,最外层是锥状细胞和杆状细胞。这两种细胞是以它们的形状命名的,图中 D、E、F、G 是锥状细胞系统, A、B、C 是杆状细胞系统, H 是锥状细胞与杆状细胞的混

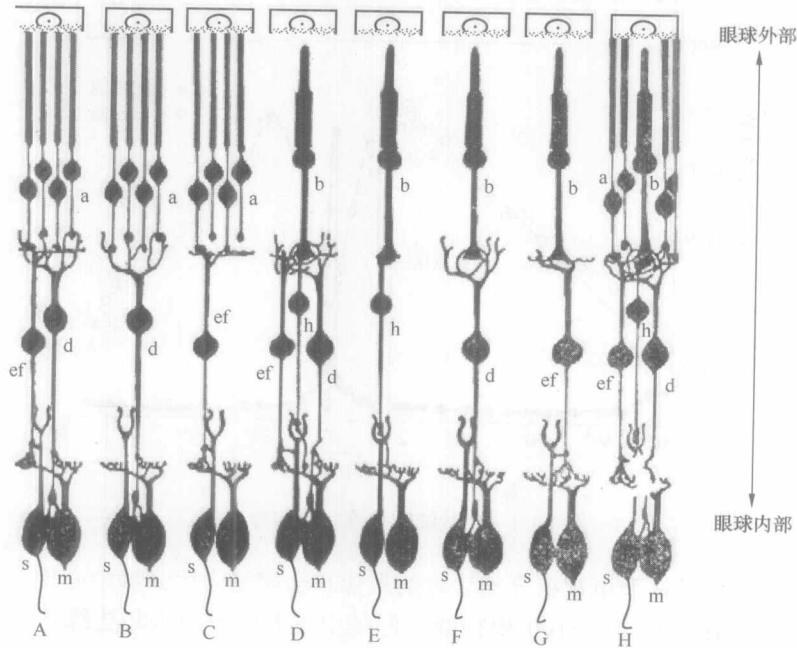


图 1.1.3 杆状细胞与锥状细胞形状图

合系统。锥状细胞 b 和杆状细胞 a 的末端靠近脉络膜，它们位于视网膜的最后层。光线由角膜进入眼球至视网膜，先通过视网膜的其他层次，最后才到达杆状细胞和锥状细胞。第二层为双极细胞 (d 、 ef 、 h) 和其他细胞，杆状细胞和锥状细胞都与双极细胞连接。一般来说，每一个锥状细胞都与一个双极细胞相连接。这是为了在光亮条件下，每一个锥状细胞作为一个单元，能够精细地分辨外界景物的细节。而杆状细胞则不同，几个杆状细胞只连接一个双极细胞。这是为了在黑暗条件下通过几个杆状细胞对外界的微弱光起总合作用。第三层是最内层，主要含有神经节细胞 (m 、 s)，神经节细胞与视神经相连接。

人眼的锥状细胞的长度为 $0.028 \sim 0.058\text{mm}$ ，直径为 $0.0025 \sim 0.0075\text{mm}$ 。杆状细胞比锥状细胞长，其长度为 $0.04 \sim 0.06\text{mm}$ ，平均直径只有 0.002mm 。在视网膜中央的黄斑区部位和中央凹大约 3° 视角范围内主要是锥状细胞，几乎没有杆状细胞。在黄斑区之外，杆体细胞逐渐增多，而锥状细胞大量减小。从图 1.1.4 可以看出：越靠近视网膜边缘部分，杆状细胞越多。杆状细胞的灵敏度极高，在低照度下，主要靠它来辨别明暗，但其对颜色不敏感，主要确定人眼的暗视觉特性；越靠近视网膜中心部分，锥状细胞越密，它既能辨别光的强弱，又能辨别颜色，主要靠它确定人眼的明视觉特性。白天视觉过程主要由锥状细胞完成，夜晚的视觉过程主要由杆状细胞起作用，所以人们在夜晚只能看到黑白画面，无法辨别颜色。这些光敏细胞都与视神经末梢相连接。视神经汇集到视网膜上一点，然后通向大脑，完成视觉作用。视网膜上这一点无光敏细胞，称为盲点。

科学工作者奥斯特伯格 (G.Osterberg) 曾以视网膜的 164 个代表区为取样区，计算了锥状细胞与杆状细胞的分布情况，发现人眼视网膜大约有 650 万个锥状细胞和 1 亿个杆状细胞，视网膜的中央凹每平方毫米有 14 万~16 万个锥状细胞。离开中央凹，锥状细胞急剧减少，而杆状细胞急剧增多，在离开中央凹 20° 的地方，杆状细胞的数量最多，这就是人眼对

中心和边缘图像具有不同分辨力的原因。图 1.1.4 是人眼锥状细胞和杆状细胞的分布图。

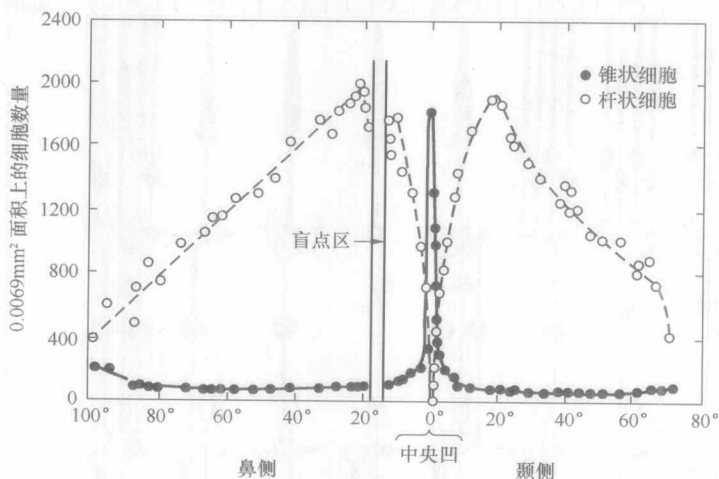


图 1.1.4 杆状细胞与锥状细胞分布图

CRT (阴极射线管) 型电视机光栅边缘的聚焦和会聚能力比光栅中心差, 使图像边缘清晰度比图像中心清晰度低 50~100 电视线。但是由于人眼对中心和边缘图像具有不同分辨力, 这并不会明显降低人们观看图像的质量。

1.1.3 明视觉特性与暗视觉特性

现代物理学认为: 光是属于一定波长的电磁辐射。电磁辐射的范围很广, 可见光的光谱范围在 380~780nm, 即只有在这一范围内的电磁辐射才能够引起人眼的视觉感受。

在可见光的范围内, 不同波长的电磁辐射引起人眼的不同颜色感觉。例如 700nm 为红色, 580nm 为黄色, 510nm 为绿色, 470nm 为蓝色。光的颜色取决于进入人眼的不同波长可见光谱的辐射相对功率分布。单一波长的光表现为一种颜色, 称为单色光。

大量实验证明, 人眼对不同的波长具有不同的灵敏度, 图 1.1.5 表示引起杆状细胞与锥状细胞反应的相对能量。可以看出, 人眼杆状细胞与锥状细胞的最大感受点在光波的不同波长。杆状细胞决定人眼的暗视觉特性, 它在 510nm (绿色) 时具有最低相对辐射能量, 即波长为 510nm 处具有最高灵敏度。锥状细胞决定人眼的明视觉特性, 它在 555nm 时具有最低相对辐射能量, 即波长为 555nm (黄绿色) 处具有最高灵敏度, 在 380nm 和 780nm 处明视觉特性具有最低灵敏度。

1924 年国际照明委员会 (Commission International de L' Eclairage, 缩写为 CIE) 规定了明视觉特性曲线, 1951 年规定了暗视觉特性曲线, 两种视觉特性曲线如图 1.1.6 所示。CIE 明视觉特性和暗视觉特性曲线在色度学中分别称为“CIE 明视觉标准光度观察者”和“CIE 暗视觉标准光度观察者”, 它们代表光谱中不同波长的能量对人眼产生光感觉的效率, 虽然两条曲线的明亮度相差很大, 但为了方便使用, CIE 将两条曲线进行了归一化处理, 使明视觉函数和暗视觉函数均成为相对值。用公式表示, 即在引起明亮感相等的条件下:

$$V(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda_m}}{\Phi_{\lambda}} \quad (1.1.1)$$

式中, Φ_{λ_m} 和 Φ_{λ} 分别为波长 λ_m 和 λ 的辐射通量。

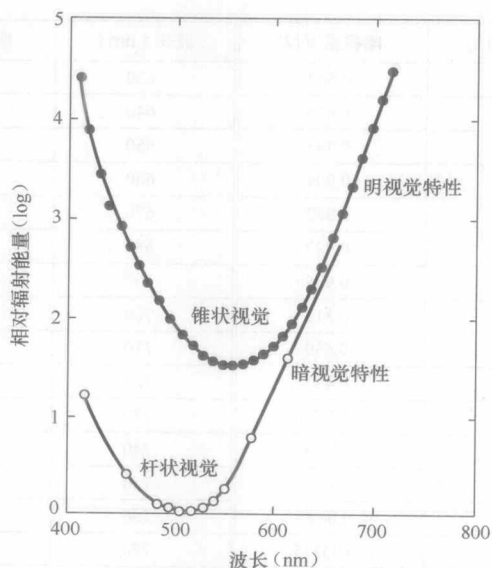


图 1.1.5 引起杆状细胞与锥状细胞反应的相对能量

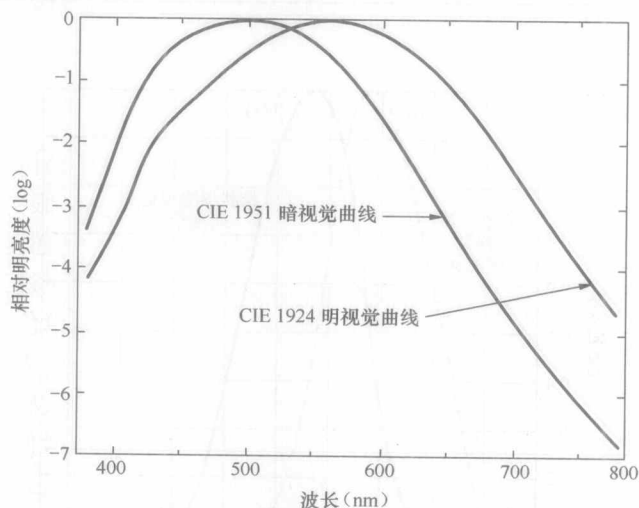


图 1.1.6 CIE 1924 明视觉曲线和 CIE 1951 暗视觉曲线

CIE 正式推荐的明视觉光谱光效率曲线 $V(\lambda)$ 和暗视觉光谱光效率曲线 $V'(\lambda)$ 是将原 CIE 1924 明视觉曲线和 CIE 1951 暗视觉曲线修匀后用算术坐标表示, 成为两条近似对称的圆钟形曲线, 如图 1.1.7 所示。 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 的函数表见表 1.1.1。

表 1.1.1 明视觉与暗视觉的光谱光效率函数 (最大值为 1)

波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
380	0.00004	0.000589	420	0.0040	0.0966
390	0.00012	0.002209	430	0.0116	0.1998
400	0.0004	0.00929	440	0.023	0.3281
410	0.0012	0.03484	450	0.038	0.455

续表

波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$	波长 (nm)	明视觉 $V(\lambda)$	暗视觉 $V'(\lambda)$
460	0.060	0.567	630	0.265	0.003335
470	0.091	0.676	640	0.175	0.001497
480	0.139	0.793	650	0.107	0.000677
490	0.208	0.904	660	0.061	0.0003129
500	0.323	0.982	670	0.032	0.0001480
510	0.503	0.997	680	0.017	0.0000715
520	0.710	0.935	690	0.0082	0.00003533
530	0.862	0.811	700	0.0041	0.00001780
540	0.954	0.650	710	0.0021	0.00000914
550	0.995	0.481	720	0.00105	0.00000478
560	0.995	0.3288	730	0.00052	0.000002546
570	0.952	0.2076	740	0.00025	0.000001379
580	0.870	0.1212	750	0.00012	0.000000760
590	0.757	0.0655	760	0.00006	0.000000425
600	0.631	0.03315	770	0.00003	0.0000002413
610	0.503	0.01593	780	0.000015	0.0000001390
620	0.381	0.00737			

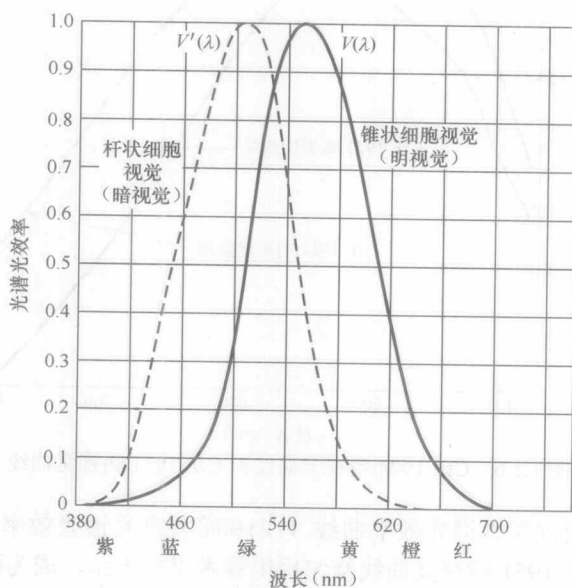


图 1.1.7 明视觉与暗视觉的光谱光效率

在图 1.1.6 中, $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 的相对值代表等能光谱波长 λ 的单色辐射所引起的明亮感觉的程度, 明视觉曲线 $V(\lambda)$ 的最大值在 555nm 处, 即光谱 555nm 波长的黄绿色最明亮, 越向光谱两端的光越暗; 暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 的最大值在 507nm 处, 即 507nm 波长的光谱最明亮。整个暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 相对于明视觉曲线 $V(\lambda)$ 向短波方向推移, 长波端的能见范围减小, 短波端的能见范围略有扩大。暗视觉曲线 $V'(\lambda)$ 的形状主要决定于杆状细胞的视觉特性, 适用于