

高等学校教材

# 电视原理

天津大学 俞斯乐 郭福云 李桂苓 张春田 编著



001923

国防工业出版社

# 电 视 原 理

天 津 大 学  
俞斯乐 郭福云 编著  
李桂苓 张春田

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系高等学校工科电子类无线电技术专业《电视原理》课程的统编教材。

本书为修编第二版，共包括七章，即视觉特性与三基色原理、电视传象基本原理、兼容制彩色电视、电视信号的处理与形成、电视信号接收原理、电视测量原理、数码电视与卫星电视。各章内容均以介绍彩色电视系统的信息处理和传输原理为主。

本书也可供从事电视研究和生产工作的科技人员参考。

## 电 视 原 理

天津大学

俞斯乐 郭福云 李桂苓 张春田 编著

责任编辑：李 端

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/16 印张22 505千字

1984年11月第二版 1984年11月第三次印刷 印数：60,001—74,000册

统一书号：15034·2142 定价：3.60元

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为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

## 前 言

本书系高等学校工科电子类无线电技术专业必修（或必选）专业课程《电视原理》的统编教材。

这本教材是在第一版的基础上按修编大纲改写而成。参加修订大纲会议的有南京工学院、南京邮电学院、西安交通大学、上海科技大学、安徽大学、合肥工业大学、大连工学院、山东工学院、湖南大学、重庆大学、华中工学院、北京邮电学院、清华大学和天津大学等单位的代表。对各兄弟院校的同志们给予的帮助，谨致以衷心的感谢。

本书以彩色电视原理为线索，来安排各章节的内容，全书共分七章。其中第一、二、三章介绍彩色电视技术和系统的基本理论知识，包括视觉特性与三基色原理、电视传象基本原理以及彩色电视兼容制式。第四、五章围绕电视系统各环节中的摄像、信号校正、视频与射频全电视信号的形成、同步信号形成、特技操作、接收与显象等过程，着重讨论信息的获取、转换、处理和传输的基本原理以及有关器件与电路的工作原理。第六章讲述电视测量原理。第七章介绍数字电视与卫星电视。此外，在附录中给出广播电视方面的几个国家标准以及电视接收机典型线路图。

本教材全部内容所需学时数约为100。其中，约70学时的内容建议供课堂讲授用，其余标有记号“\*”的建议供教师选用或学生自学用。各校可根据实际情况决定教材的取舍。

本书由俞斯乐同志担任主编。参加修编工作的还有郭福云（执笔第一、二、四章）、李桂苓（执笔第五、六章及§7.2）、张春田（执笔§7.1）三同志。

本书由蔡丹宇同志担任主审。参加审阅工作的还有谈新权、卢益民两同志。

黄元、王兆华两同志曾参加本书初版的编写工作。王宗海同志曾对本书的修编提出宝贵意见。对此，我们表示衷心感谢。

限于我们的水平和修编时间仓促，书中不妥或错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编著者

1984年1月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 视觉特性与三基色原理.....         | 1  |
| § 1.1 光的特性.....             | 1  |
| 1.1.1 电磁辐射与可见光谱 .....       | 1  |
| 1.1.2 光源 .....              | 2  |
| § 1.2 人眼的视觉特性.....          | 4  |
| * 1.2.1 眼睛的构造 .....         | 4  |
| 1.2.2 光的度量 .....            | 5  |
| 1.2.3 亮度与彩色视觉 .....         | 8  |
| 1.2.4 眼睛的视觉范围与亮度感觉 .....    | 10 |
| 1.2.5 人眼的分辨力 .....          | 12 |
| 1.2.6 视觉惰性与闪烁感觉 .....       | 14 |
| § 1.3 三基色原理与色度图 .....       | 15 |
| 1.3.1 三基色原理 .....           | 15 |
| 1.3.2 RGB 计色制 .....         | 16 |
| 1.3.3 XYZ 计色制 .....         | 23 |
| * 1.3.4 均匀色标制 .....         | 33 |
| § 1.4 彩色的重现 .....           | 34 |
| 1.4.1 显象三基色 .....           | 34 |
| 1.4.2 显象三基色的色系数与亮度方程 .....  | 36 |
| 1.4.3 摄象光谱响应曲线 .....        | 38 |
| 第二章 电视传象基本原理 .....          | 40 |
| § 2.1 电视系统组成原理 .....        | 40 |
| 2.1.1 图象顺序传送原理 .....        | 40 |
| 2.1.2 光和电的转换原理 .....        | 41 |
| 2.1.3 彩色图象的摄取与重现 .....      | 44 |
| § 2.2 电视扫描原理 .....          | 45 |
| 2.2.1 逐行扫描 .....            | 46 |
| 2.2.2 隔行扫描 .....            | 48 |
| 2.2.3 扫描的同步 .....           | 52 |
| § 2.3 电视图象的基本参量 .....       | 56 |
| 2.3.1 图象的几何特征 .....         | 57 |
| 2.3.2 图象的连续性与场频的确定 .....    | 58 |
| 2.3.3 扫描行数及有关参数的确定 .....    | 59 |
| 2.3.4 图象亮度与色度的非线性失真 .....   | 63 |
| § 2.4 视频图象信号 .....          | 67 |
| 2.4.1 黑白图象信号 .....          | 67 |
| 2.4.2 亮度信号、色差信号及其组成原理 ..... | 69 |
| 2.4.3 标准彩条信号 .....          | 74 |
| 第三章 兼容制彩色电视 .....           | 79 |
| § 3.1 彩色电视制式概述 .....        | 79 |
| § 3.2 NTSC 制 .....          | 80 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 正交调制与正交检波 .....                     | 80  |
| 3.2.2 压缩系数 .....                          | 81  |
| 3.2.3 波形图和矢量图 .....                       | 83  |
| 3.2.4 Q、I 色差信号 .....                      | 85  |
| 3.2.5 副载频选择 .....                         | 86  |
| 3.2.6 NTSC编、解码方框图 .....                   | 89  |
| 3.2.7 NTSC制主要性能 .....                     | 90  |
| § 3.3 PAL制 .....                          | 93  |
| 3.3.1 彩色相序交变原理 .....                      | 93  |
| 3.3.2 PAL色度信号及PAL <sub>D</sub> 解码原理 ..... | 93  |
| 3.3.3 色度信号的频谱交错 .....                     | 96  |
| 3.3.4 副载频选择 .....                         | 98  |
| 3.3.5 梳状滤波器的频率特性 .....                    | 102 |
| 3.3.6 行顺序效应 .....                         | 109 |
| 3.3.7 PAL制的主要性能 .....                     | 113 |
| *3.3.8 其它PAL解码方式 .....                    | 115 |
| § 3.4 SECAM制 .....                        | 123 |
| 3.4.1 SECAM制基本原理 .....                    | 123 |
| 3.4.2 SECAM制主要性能 .....                    | 125 |
| 第四章 电视信号的处理与形成 .....                      | 128 |
| § 4.1 电视系统概述 .....                        | 128 |
| § 4.2 图象信号的产生 .....                       | 129 |
| 4.2.1 广播彩色电视摄像机的组成 .....                  | 129 |
| 4.2.2 彩色电视摄像机的光学系统 .....                  | 130 |
| 4.2.3 电视摄像管 .....                         | 134 |
| § 4.3 图象信号的处理 .....                       | 139 |
| 4.3.1 反杂波校正 .....                         | 139 |
| 4.3.2 图象信号中直流分量的恢复 .....                  | 142 |
| 4.3.3 电缆校正 .....                          | 144 |
| 4.3.4 黑斑校正 .....                          | 144 |
| 4.3.5 轮廓校正 .....                          | 146 |
| 4.3.6 Y校正 .....                           | 148 |
| 4.3.7 彩色校正 .....                          | 149 |
| § 4.4 PAL制彩色全电视信号的形成 .....                | 151 |
| 4.4.1 PAL制彩色全电视信号的形成方案 .....              | 151 |
| 4.4.2 基色信号的矩阵变换 .....                     | 155 |
| 4.4.3 色度信号的形成 .....                       | 156 |
| § 4.5 视频电视信号的切换与特技效果 .....                | 160 |
| 4.5.1 视频电视信号的切换 .....                     | 160 |
| 4.5.2 慢转换与特技 .....                        | 161 |
| § 4.6 高频电视信号的形成 .....                     | 165 |
| 4.6.1 图象信号的调制 .....                       | 165 |
| 4.6.2 电视发射机 .....                         | 172 |
| 4.6.3 电视转播机 .....                         | 174 |
| § 4.7 同步信号的形成 .....                       | 176 |
| 4.7.1 同步信号的定时原理 .....                     | 176 |
| 4.7.2 同步信号的形成 .....                       | 177 |
| 4.7.3 同步设备之间的锁相原理 .....                   | 178 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第五章 电视信号接收原理</b>   | 181 |
| § 5.1 电视信号的接收         | 181 |
| 5.1.1 概述              | 181 |
| 5.1.2 黑白电视接收机的组成      | 181 |
| 5.1.3 彩色电视接收机的组成      | 184 |
| § 5.2 高、中频电视信号的处理     | 184 |
| 5.2.1 高频电视信号的接收       | 184 |
| 5.2.2 中频电视信号的放大       | 188 |
| 5.2.3 视频电视信号的检取       | 191 |
| § 5.3 视频电视信号的处理       | 194 |
| 5.3.1 概述              | 194 |
| 5.3.2 亮度信号处理电路        | 198 |
| 5.3.3 色度信号解调电路        | 200 |
| 5.3.4 矩阵和视频放大电路       | 210 |
| 5.3.5 彩色同步电路          | 211 |
| § 5.4 电视图象的同步与电子束的扫描  | 221 |
| 5.4.1 概述              | 221 |
| 5.4.2 同步信号的分离         | 231 |
| 5.4.3 场扫描电路           | 226 |
| 5.4.4 行扫描电路           | 230 |
| 5.4.5 行、场扫描集成电路       | 236 |
| § 5.5 显象管及其附属电路       | 237 |
| 5.5.1 概述              | 237 |
| 5.5.2 自会聚彩色显象管        | 238 |
| 5.5.3 显象管的附属电路        | 242 |
| <b>第六章 电视测量原理</b>     | 246 |
| § 6.1 电视测量的特点         | 246 |
| 6.1.1 概述              | 246 |
| *6.1.2 电视监测示波器的特点     | 246 |
| *6.1.3 电视图象质量的评价      | 247 |
| *6.1.4 电视系统质量指标的叠加和分配 | 248 |
| § 6.2 非线性失真测量原理       | 249 |
| 6.2.1 非线性失真及其测量的特点    | 249 |
| 6.2.2 亮度信号非线性幅度失真     | 250 |
| 6.2.3 色度信号非线性失真       | 252 |
| 6.2.4 同步信号非线性失真       | 254 |
| § 6.3 线性失真测量原理        | 254 |
| 6.3.1 线性失真及其测量的特点     | 254 |
| *6.3.2 频域测量原理         | 255 |
| 6.3.3 时域测量原理          | 257 |
| *§ 6.4 视频杂波测量原理       | 265 |
| 6.4.1 视频杂波及其测量的特点     | 265 |
| 6.4.2 视频杂波的测量         | 266 |
| <b>*第七章 数码电视与卫星电视</b> | 269 |
| § 7.1 数码电视            | 269 |
| 7.1.1 概述              | 269 |
| 7.1.2 电视信号数码化         | 270 |



|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 7.1.3 | 差分脉码调制 .....                 | 273 |
| 7.1.4 | 线性变换编码 .....                 | 280 |
| 7.1.5 | 亚奈奎斯特抽样 .....                | 285 |
| 7.1.6 | 几种数字化电视设备 .....              | 286 |
| § 7.2 | 视听信息电视多工传输 .....             | 294 |
| 7.2.1 | 概述 .....                     | 294 |
| 7.2.2 | 电视多伴音广播 .....                | 295 |
| 7.2.3 | 电视文字广播 .....                 | 299 |
| 7.2.4 | 静止画广播 .....                  | 308 |
| 7.2.5 | 电视接收机的系统化 .....              | 310 |
| § 7.3 | 卫星电视广播 .....                 | 311 |
| 7.3.1 | 发展卫星广播的原因 .....              | 312 |
| 7.3.2 | 卫星广播的信号处理 .....              | 313 |
| 7.3.3 | 卫星广播系统 .....                 | 318 |
| 7.3.4 | 对广播卫星的主要要求 .....             | 323 |
| 附录 1  | 中华人民共和国国家标准 GB 1385-78 ..... | 327 |
| 附录 2  | 中华人民共和国国家标准 GB 3174-82 ..... | 330 |
| 附录 3  | 我国电视频道的划分 .....              | 337 |
| 附录 4  | 中华人民共和国国家标准 GB 2097-80 ..... | 339 |

# 第一章 视觉特性与三基色原理

## § 1.1 光的特性

五光十色的自然界，通过光波的传递映入人眼产生了视觉。电视就是根据人眼视觉特性以一定的信号形式来传送活动景象的技术。通常，在发送端，用电视摄像机把景物（或图象）转变成相应的电信号，电信号通过一定的途径传输到接收端，再由显示设备显示出原景物（或原图象）的重现光象。可见，电视源是光象，最后映入人眼的仍是光象，而中间则经过光-电转换、电信号的传输和处理、电-光转换等过程。因此，为了更好地掌握电视原理，有必要首先从电视技术的角度简要介绍一下光的某些基本特性。

### 1.1.1 电磁辐射与可见光谱

在地球上，太阳是照亮大自然的光源之一，它是热、光和各种射线的辐射体。光兼有波动特性和微粒特性。光是一种携带电磁辐射能量的电磁波中的很小一部分。电磁波的波谱范围很广，包括无线电波、红外线、可见光谱、紫外线、X射线、γ射线等等，如图1-1所示。其中只有我们眼睛能看到的那一部分叫做可见光。

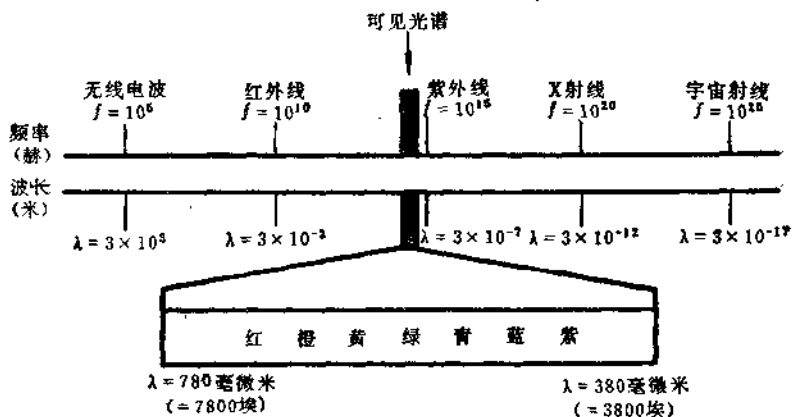


图1-1 电磁辐射波谱

[注：1 毫微米  $= 10^{-9}$  米  $= 10$  埃，或者 1 埃  $(\text{\AA}) = 10^{-10}$  米]

由图1-1看出，不同波长的光所呈现的颜色各不相同，随着波长的缩短，呈现的颜色依次为：红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。只含有单一波长成分的光称为单色光；包含有两种或两种以上波长成分的光称为复合光。复合光给人眼的刺激呈现为混合色。太阳辐射出的电磁波是含有各种波长的波谱带，如图1-2所示。其中波长为 380~780 毫微米的电磁波才能被人眼所感知，并给人以白光的综合感觉。

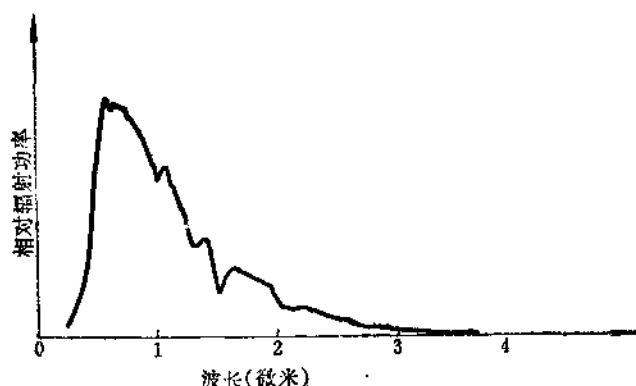


图1-2 太阳辐射功率波谱

广播电视只利用可见光谱范围，而当电视应用于科学技术其他领域时，波谱范围就大为扩展。例如，紫外电视可用于生物研究、医疗诊断、工业探伤……等方面；红外电视可用于夜间侦察、跟踪制导、宇宙开发、节能、临床医学、激光研究、公害监视、气象等方面。这些应用所涉及的波谱范围可宽达20~14000毫微米。

### 1.1.2 光源

自然界的不同景物，在日光(即太阳光)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。一般来讲，某一景物的彩色，是该景物在特定光源照射下所反射(或透射)的一定可见光谱成分，作用于人眼而引起的视觉效果。例如，当一块布受到阳光(白光)照射后，主要反射了蓝色光谱成分，吸收了白光中其余的光谱成分，被反射的蓝光射入人眼并引起蓝色视觉效果，于是我们说这是一块蓝色的布。可见，彩色感觉既决定于人眼对可见光谱中的不同成分有不同视觉效果的功能，又决定于光源所含的光谱成分以及景物反射(或透射)和吸收其中某些成分的特性。所以，同一物体在不同光源照射下呈现的彩色也有所不同。例如，在白炽灯光下看蓝色的布，其彩色就不如在自然光下那样鲜艳，这是由于白炽灯光中的蓝光成分较少的缘故。又如，在用绿色光源照明的暗室里观看蓝色的布，这时蓝布的颜色将呈现为黑颜色。总之，人眼的彩色感觉是主观(人眼的视觉功能)和客观(物体属性与照明条件的综合效果)相结合的系统中所发生的生理-物理过程，二者缺一不可。

一般来讲，光源有两种。一种是上述不发光的物体，在一定光谱分布(功率波谱)的光源照射下，因反射一定的光谱成分和吸收其余部分而呈现一定的彩色；另一种是本身发光的色源，根据它的辐射光谱分布，引起人眼的一定彩色感觉。由于彩色与照明光源的光谱分布有密切关系，所以有必要对光源作一简单介绍。

#### 一、色温

在近代照明技术中统称为“白光”的光谱分布并不相同。其中包括光谱能量偏重于波长较长端(红色区)的“热白光”，直到能量偏重于较短波长的“冷白光”，它们将引起彩色视觉的差异。为了便于进行白光的比较和色度计算，经常采用色温这个概念。当

绝对黑体<sup>①</sup>加热时,将以电磁波的形式向外辐射能量,其辐射波谱仅由温度决定,如图1-3所示。由图可见,随着温度的增加,辐射能量也增大;同时,曲线最大值向短波方向移动。所以当温度增高时,不仅亮度增大,其发光颜色也随之变化。为了区分各种光源的不同光谱分布与颜色,可以用绝对黑体的温度来表征。当绝对黑体在某一特定绝对温度下,其辐射的光谱与某一光源的光谱具有相同的特性,则绝对黑体的这一特定温度就定义为该光源的色温。色温的单位是开氏度(K)。例如,一个钨丝灯泡的温度保持在2800K时所发出的白光,与温度保持为2854K的绝对黑体所辐射的白光功率波谱相一致,于是就称该白光的色温为2854K。可见,色温并非光源本身的实际温度,而是用来表征其光谱特性的参量。图1-4(a)示出在不同温度下绝对黑体在可见光范围内的相对辐射功率波谱。

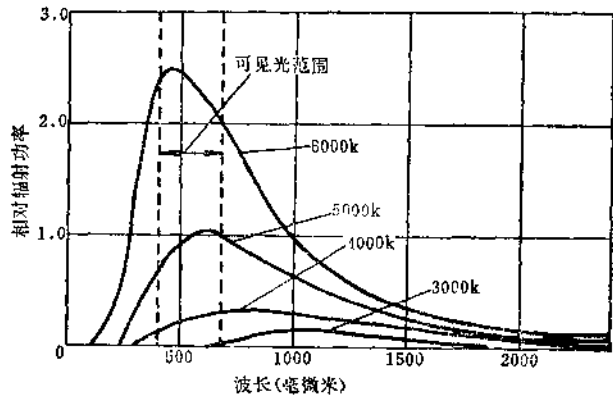


图1-3 绝对黑体在不同温度时的辐射功率波谱

下绝对黑体在可见光范围内的相对辐射功率波谱。

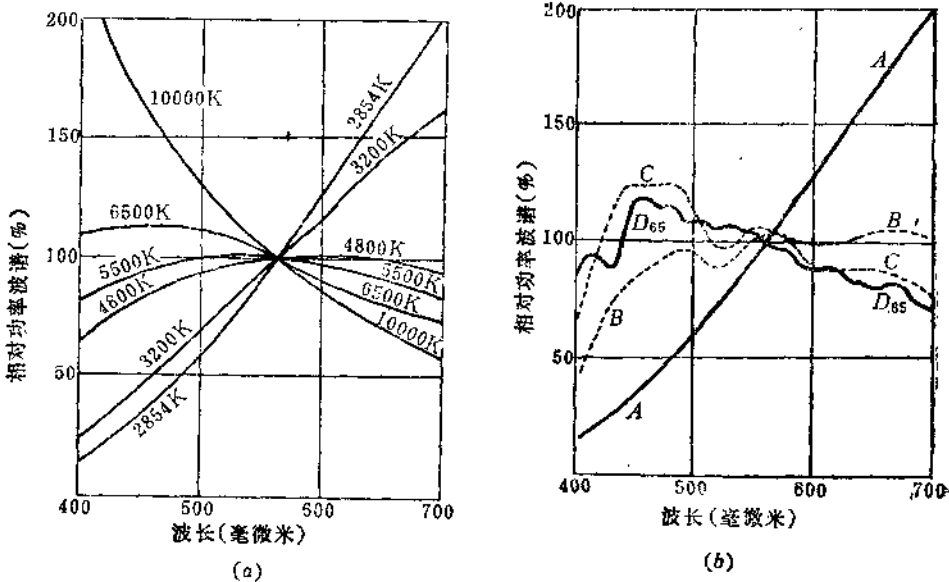


图1-4 黑体与标准光源的相对功率波谱

(a) 各种色温下黑体的辐射功率波谱 (在可见光范围内);

(b) 标准光源的功率波谱。

● 绝对黑体 (也称全辐射体) 是指既不反射也不透射而完全吸收入射辐射的物体。它对所有波长辐射的吸收系数均为1。严格来说,绝对黑体在自然界是不存在的,其实实验模型是一个中空的、内壁涂黑的球体,在其上面开了一个极小的孔,进入小孔的光辐射经内壁多次反射、吸收,已不能再逸出外面,这个小孔就相当于绝对黑体。

## 二、标准光源

太阳是最大的自然光源，它的辐射波谱范围很广。在地面上测量时，太阳辐射光谱分布是随季节、气候、时辰而变化的。因为影响太阳光色温的因素较多，所以，太阳光不便于用作实用的标准光源。近几十年来，人们在试制新型光源方面已取得了很大成绩，出现了不少人造光源。电视能否高度逼真地传输彩色与光源的选用有密切的关系。在近代照明技术中，按国际规定选用如下五种主要标准光源（即标准白光）。

**A光源** 相当于钨丝灯在2800K时发出的光，色温为2854K。其波谱能量主要集中在红外线区域，所以钨丝灯光看起来不如太阳光白，而总是带些橙红色。

**B光源** 接近于正午直射的阳光。当绝对黑体温度在4800K时发出的光与该光源发出的光最接近，所以说B光源的相关色温<sup>●</sup>为4800K。在实验室中，可以用特制的滤色镜由A光源获得B型光源。

**C光源** 相当于白天的自然光，其波谱能量在400~500毫微米处较大，可见 $C_{\text{A}}$ 含蓝色成分较多。它的相关色温为6770K。也可用特制滤色镜由A光源获得。

**$D_{65}$ 光源** 相关色温为6500K，相当于白天的平均光照。在400毫微米以下范围内，它的波谱能量比B光源与C光源要大些，所以近年来被用作彩色电视中的标准白光。它可由彩色显象管的三种荧光粉发出的光适当配合而得到。

**E光源** 是在色度学中采用的一种假想的等能白光( $E_{\text{A}}$ )，就是当可见光谱范围内的所有波长的光都具有相等辐射功率时所形成的一种白光，它与色温为5500K的白光相近。这种光源实际上并不存在，采用它纯粹是为了简化色度学中的计算。

在近代照明技术中还采用一种新式卤钨灯，其色温比较稳定，为3200K。这种灯也是彩色电视演播室中常用的光源。

近年来在电视屏幕上，尤其是黑白显象管荧光粉所发出的白光，色温有时高达9300K甚至11000K。不过在后一种情况下，已明显地给人以偏蓝色的感觉。

上述各标准光源的近似功率波谱曲线分别示于图1-4(b)中。

## § 1.2 人眼的视觉特性

电视图象是供人眼观看的，电视系统的综合质量，最终要由人眼做出鉴定，所以电视系统应当精确地模拟人眼的视觉特性。只有掌握了人眼特性及其对电视系统的要求，才可能合理选择电视系统的基本参数，以保证其质量。因此，有必要在学习电视系统之前，先来研究有关人眼视觉特性方面的一些问题。

### \*1.2.1 眼睛的构造

眼睛是一个构造极其复杂的器官，图1-5只画出了眼球水平断面的几个主要部分。

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。光线从这里进入眼内。其余5/6部分为白色不透明组织，称为巩膜，它主要起巩固及保护眼球的作用。

● 有些光源的光只与某一温度下绝对黑体辐射的光近似，而不能精确等效。这时，把辐射光的特性与光源最相近的黑体温度称为该光源的相关色温。

巩膜里面的一层由虹膜和脉络膜组成。后者含有丰富的色素细胞,呈现黑色,起着遮光作用。它既能避免外来多余光线的干扰,又能避免眼球内部光线的乱反射。虹膜随不同种族有不同颜色,如黑色、蓝色、褐色等。

在虹膜中间有一圆孔称为瞳孔。瞳孔的大小可借助于虹膜的环状肌肉组织来调节,从而可以控制进入眼睛内部的光通量,起着照象机中光圈的作用。

眼球壁最里层为视网膜层,它由大量光敏细胞所组成。光敏细胞按其形状分为杆状细胞与锥状细胞两种。前者灵敏度极高,在低照度时,主要靠它来辨别明暗,但对彩色不敏感。锥状细胞既可辨别光的强弱,又可辨别彩色。白天的视觉过程主要由锥状细胞来完成。夜晚视觉则由杆状细胞起作用。所以,在较暗处只能看见黑白形象而无法辨别彩色。这些光敏细胞都与视神经末梢连接。视神经汇集到视网膜上的一点,然后通向大脑,该汇集点无光敏细胞,称盲点。

在瞳孔后面是一扁球形弹性透明体,称水晶体,即通常所说的眼球,它起着透镜的作用。水晶体的曲率由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清晰成象。

正对水晶体中心的视网膜上,有一个集中了大量锥状细胞的黄斑区,每个锥状细胞都连着一个神经末梢,所以黄斑区的分辨力(其定义见第1.2.5节)最高,具有最高清晰度。在远离黄斑区的视网膜上,视神经分布很稀,多个光敏细胞接在一条神经上,因而这条神经将传递多个细胞的平均光刺激,这就使得这一区域的视觉分辨力显著下降。

眼球的前室是对可见光透明的水状液体,它能吸收一部分紫外线。后室充满了胶质透明结构体,也称玻璃质液体,起着保护眼睛的滤光作用。

眼睛观看景物时,光线通过透明的角膜、前室水状液、水晶体以及后室玻璃质液体,使影象聚焦在视网膜的中心部位——黄斑区。视网膜上的光敏细胞受到光刺激产生电脉冲,电脉冲沿着神经纤维传递到视神经中枢,由于各细胞产生的电脉冲不同,大脑就形成了一幅景象感觉。

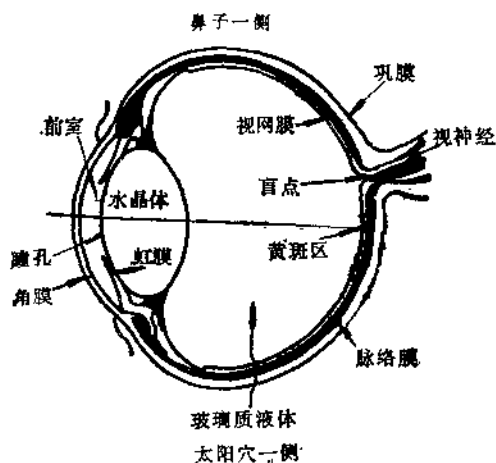


图1-5 眼球的水平断面图

### 1.2.2 光的度量

前面介绍了光源本身的特性和人眼的构造,在这里我们将讨论如何用人眼去度量光,也就是讨论客观光波对人眼刺激的效果。虽然,诸如光强、亮度……等一些基本度量单位在实用中已被作为客观物理量来解释和利用,但实际上却是客观光波刺激人眼而引起的主观效果,已经包含了人眼的视觉特性和大脑视觉区域的生理功能。

#### 一、相对视敏函数

视觉效应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。随着波长的改变,不仅颜色感觉不同,而且亮度感觉也不相同。例如,在等能量分布的光谱中,人眼感到最暗的是红色,其次是蓝色和紫色,而最亮的是黄绿色。反过来说,要获得相同的亮度感觉,所需要的红光的辐射功率要比绿光的大得多。人眼这种对不同波长光有不同敏感度的规律因不同人而有所不同;对同一人来讲,也会因年龄、身体状况等因素而变化。下面要介绍的相对视敏函数曲线是以“标准观察者”的标准数据为依据的。实际上这些数据来自对许多正常视觉观察者测试结果的平均值。

为了确定人眼对不同波长光的敏感程度,可以在产生相同亮度感觉的情况下,测出各种波长光的辐射功率  $P_V(\lambda)$ 。显然,  $P_V(\lambda)$  越大,说明该波长的光越不容易被人眼所感觉;而  $P_V(\lambda)$  越小,则人眼对它的敏感程度越高。因此  $P_V(\lambda)$  的倒数可用来衡量视觉对波长为  $\lambda$  的光的敏感程度,即视敏度。视敏度用  $K(\lambda)$  表示。

实测表明,对波长为 555 毫微米的光,有最大视敏度  $K_m = K(555)$ 。于是,把任意波长光的视敏度  $K(\lambda)$  与  $K_m$  之比称为相对视敏函数,并用  $V(\lambda)$  表示。

即

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

如果用得到相同主观亮度感觉时所需各波长光的辐射功率  $P_V(\lambda)$  表示,则有

$$V(\lambda) = P_V(555)/P_V(\lambda)$$

$V(\lambda)$  是小于 1 的数,也就是说,为得到相同的主观亮度感觉,在波长为 555 毫微米时,所需光的辐射功率为最小。随着波长自 555 毫微米开始逐渐增大或减小,所需辐射功率将不断增长,或者说视敏度不断下降。

表 1-1 列出 1933 年国际照明委员会 (CIE●) 所获得的最佳数据,由此画出的相对视

表 1-1 相对视敏函数值

| $\lambda$ (毫微米) | $V(\lambda)$ | $\lambda$ (毫微米) | $V(\lambda)$ | $\lambda$ (毫微米) | $V(\lambda)$ |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 400             | 0.0004       | 530             | 0.862        | 660             | 0.061        |
| 410             | 0.0012       | 540             | 0.954        | 670             | 0.032        |
| 420             | 0.0040       | 550             | 0.995        | 680             | 0.017        |
| 430             | 0.0116       | 560             | 0.995        | 690             | 0.0082       |
| 440             | 0.023        | 570             | 0.952        | 700             | 0.0041       |
| 450             | 0.038        | 580             | 0.870        | 710             | 0.0021       |
| 460             | 0.060        | 590             | 0.757        | 720             | 0.00105      |
| 470             | 0.091        | 600             | 0.631        | 730             | 0.00052      |
| 480             | 0.139        | 610             | 0.503        | 740             | 0.00025      |
| 490             | 0.208        | 620             | 0.381        | 750             | 0.00012      |
| 500             | 0.323        | 630             | 0.265        | 760             | 0.00006      |
| 510             | 0.503        | 640             | 0.175        |                 |              |
| 520             | 0.710        | 650             | 0.107        |                 |              |

敏函数曲线示于图 1-6。该曲线也称相对光谱灵敏度(或光谱响应)曲线。它说明,如果光的辐射功率相同而波长不同,则人眼的亮度感觉将按曲线规律变化。对于  $\lambda = 555$  毫微米的黄绿光  $V = 1$ , 说明亮度感觉最大。对其余波长的光  $V(\lambda) < 1$ , 说明亮度感觉

● CIE 是 Commission International de l'Eclairage (国际照明委员会) 的缩写词。

减弱。而当  $\lambda < 400$  毫微米或  $\lambda > 760$  毫微米时, 相对视敏函数  $V(\lambda) = 0$ , 说明人眼已没有亮度感觉。

下面我们要介绍的几种光学度量单位都是与相对视敏函数有关的量, 即包含了主观度量的因素。

## 二、光通量

既然人眼对不同波长光的亮度感觉不同, 因此从人眼光感觉来度量的某一波长光的辐射功率, 不仅与该波长光的辐射功率有关, 而且也与入眼对该波长光的视敏度有关。光通量就是按人眼光感觉来度量的辐射功率。

对于波长为  $\lambda_1$  的单色光来说, 光通量  $F(\lambda_1)$  就等于辐射功率  $P_w(\lambda_1)$  与相对视敏函数  $V(\lambda_1)$  的乘积, 即

$$F(\lambda_1) = P_w(\lambda_1) V(\lambda_1) \text{ 光瓦} \quad (1-2)$$

当  $\lambda_1 = 555$  毫微米时, 光感觉最强,  $V(555) = 1$ 。此时, 1 瓦辐射功率产生的光通量定为 1 光瓦, 于是二者在数值上相等。在其它波长时, 由于人眼视敏度下降, 1 瓦辐射功率产生的光通量均小于 1 光瓦。

如果光源的辐射功率波谱 (辐射功率密度分布) 为  $P(\lambda)$ , 则其总的光通量应为各波长成分的光通量之总和, 即

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

由于人眼只对 380~780 毫微米的波长成分有光感觉, 因此上式中的积分限与此二数值相对应。

目前, 国际上通用的光通量单位为流明。国际照明委员会规定, 绝对黑体在铂的凝固温度下, 从  $5.305 \times 10^{-8}$  平方厘米面积上辐射出的光通量为 1 流明。而 1 瓦辐射功率的 555 毫微米波长的单色光所产生的光通量恰为 680 流明。于是, 光瓦与流明之间的关系为

$$1 \text{ 光瓦} = 680 \text{ 流明} \quad \text{或} \quad 1 \text{ 流明} = \frac{1}{680} \text{ 光瓦}$$

当光通量采用流明为单位时, 式 (1-3) 可写成

$$F = 680 \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad \text{流明}$$

利用光谱灵敏度曲线与人眼视敏函数曲线相同的光电转换器件, 就可以直接测量光通量。

一个 40 瓦的钨丝灯泡输出的光通量为 468 流明, 发光效率为 11.7 流明/瓦; 一个 40 瓦的日光灯可以输出 2100 流明的光通量, 发光效率为 52.5 流明/瓦; 而有的人工光源的发光效率已达 100 流明/瓦。目前许多国家都在努力研制新型人工光源, 并已取得很大成果, 不

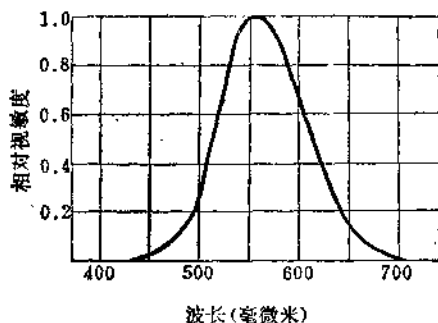


图 1-6 相对视敏函数曲线



仅提高了发光效率,而且延长了光源的使用寿命。但许多新光源具有新的光谱特性,有的是连续光谱,有的是线状或带状的非连续光谱,因而产生了光源的视觉质量问题。对电视中采用的光源,需要更多地考虑其光谱特性。

光度学的基本度量单位还有光源的发光强度、亮度以及被照射物面的照度。这些单位量在物理光学中都有阐明,这里不再赘述。

### 1.2.3 亮度与彩色视觉

#### 一、明暗视觉

在第 1.2.2 节中我们讨论了人眼的视敏函数,并给出了如图 1-6 所示的典型曲线。这一曲线表明,在白天正常光照下人眼对不同波长光的敏感程度,也称明视觉视敏函数曲线,在图 1-7 中用粗线重新画出。

在第 1.2.1 节中曾指出,明视觉过程主要是由锥状细胞完成的,它既产生明暗感觉又产生彩色感觉。

在夜晚或在微弱光线下,人眼主观亮度感觉规律有所变化,表现在对波长短的光敏感程度增大,即视敏函数曲线左移,如图 1-7 中细线所示。在这种情况下,紫色能见范围扩大;红色能见范围缩小。这一曲线称暗(或夜晚)视觉视敏函数曲线(也可称为暗相对视敏函数曲线)。

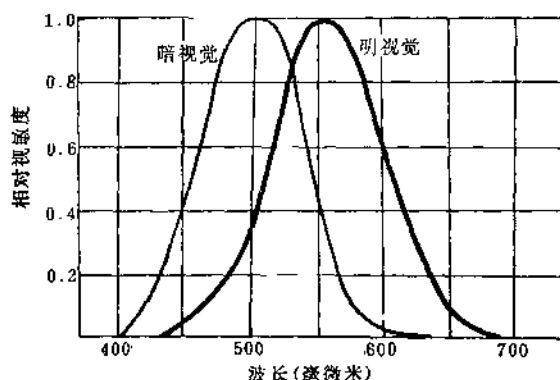


图1-7 视敏函数曲线

当光线暗到一定程度时,就只有杆状细胞起作用,于是人眼分辨不出光谱中各种颜色,结果使整个光谱带只反映为明暗程度不同的灰色带。

#### 二、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(亦称明度)、色调和饱和度。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。

亮度是光作用于人眼时所引起的明亮程度的感觉。一般来说,彩色光的光功率大则感觉亮,反之,则暗。就物体而言,其亮度决定于由其反射(或透射)的光功率的大小。若照射物体的光功率为定值,则物体反射(或透射)系数越大,物体越明亮,反之,则越暗。对同一物体来说,照射光越强(即光功率越大),越明亮,反之,则越暗。

色调反映了颜色的类别。通常所说红色、绿色、蓝色等等,就是指的颜色。在第 1.1.1 节中我们曾提到不同波长的光所呈现的颜色不同,实际上就是指色调不同。至于彩色物体的色调,则决定于物体在光照射下所反射的光谱成分。不同波长的反射光使物体呈现不同的色调。例如,某物体在日光下呈现绿色,这就是说该物体受白光照射后,只将绿色光分量反射出来,并被入眼所感觉,而其余成分都被吸收了。

对于透光物体(例如玻璃),其色调由透射光的波长所决定。例如红玻璃被白光照射后,吸收了白光中大部分光谱成分,而只透射过红光分量,于是人眼感觉到这块玻璃