

电视摄像机与视频处理

孙景鳌 蔡安妮 编著

電子工業出版社

电视摄像机与视频处理

孙景鳌 蔡安妮 编著

电子工业出版社

内 容 提 要

本书作者在美国学习期间收集研究了大量资料,并将研究成果与本人在北京邮电学院教学的经验相结合写成了此书,它反映了电视技术的近代状态和趋势,使人读书有清新明晰之感。全书共有八章。第一、二章介绍彩色视觉特性、电视扫描原理;第三、四章介绍彩色电视摄像管和摄像机;第五章介绍单管彩色电视摄像机和CCD彩色电视摄像机;第六、七、八章介绍编码器、同步机和视频特技。内容丰富,有的还比较新颖,每章末附有大量参考文献,可供读者查阅。

本书可供从事广播电视科研、生产、教学和使用维修工作的工程技术人员学习,也可作大专院校有关专业的教学参考书。

电视摄像机与视频处理

孙景鳌 蔡安妮 编著

责任编辑 王德声

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)

北京燕山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 28.875 字数: 663千字

1988年5月第1版 1988年6月第1次印刷

印数: 8000册 定价: 7.35元

ISBN 7-5053-C196-9/TN·102

前 言

本书以最近十几年发表的、能够反映电视科研和生产水平的代表性文献为基础，少量地保留了作者在“彩色电视技术”（北京邮电学院，1976年）教材中所写的彩色电视摄像机、编码器和彩色同步机三章中的部分内容。第一至五章由孙景鳌执笔，第六至八章由蔡安妮执笔。全书由广播科学研究所康诵诗工程师审稿。

北京邮电学院周炯槃教授应邀为本书撰写了序言，并对原稿作了许多重要修改；此书的写作得到电子工业部通讯广播工业管理局隋经义总工程师的支持与鼓励；作者交稿之后就出了国，增加了编辑工作的困难，王德声编辑为统一符号、术语，为修改文字作了特殊的努力，作者表示衷心的感谢。同时，向通讯广播工业管理局施国强工程师、广播科学研究所赵幕文工程师、北京电视设备厂董美云工程师、王燕华工程师，以及其他对本书的写作、出版给予热情帮助的朋友们致谢。

这本书若对读者有某些可取之处，应归功于为推动电视技术发展做出贡献的人们（各章的参考文献反映了他们之中的杰出者），而作者仅对书中的缺点和错误承担责任，並期待着读者的批评指正。

孙景鳌 蔡安妮
1984年12月于北京邮电学院

代 序

电视技术是近代发展最迅速的技术之一。人们通过感官从外界提取信息，其中以视觉所获得的信息为最多，所谓“耳闻不如目见”就是指此而言的。因此电视技术一问世，由于它能扩大人的眼界，把遥远的活动景像传到眼前来，相当于神话中的“千里眼”，所以它就得到了足够的重视和广泛的应用。从广播黑白电视开始，不断地向其它领域扩展，如各种工业管理中的监控，医学中的检查，通信中的可视电话等等，它们都是以传送活动景像为目标的。在这许多应用中，广播电视可能仍是主要的，后者不但已成为人们生活中不可缺少的一部份，在世界上和我国，近年来电视的逐渐普及可说明这一点，而且还为其它应用开辟了道路，提供了先进的技术手段。广播电视本身也是在不断地更新和发展，已从黑白电视发展到彩色电视，还将向彩色立体电视发展；从演播室节目到现场实况直播，采访式的录像新闻，使人们可获得更多的信息，更丰富的感受。从广播电视的发展过程中可以看到，起决定性作用的是提高发送质量和降低接收机成本，前者更为突出。在我国现代化的过程中，电视无疑也是重要方面之一。要促进电视事业的发展，必须有更多的人了解它、掌握它。在摄像技术和视频信号处理方面，尤其需要有更多更好的书籍，供人们学习和参考。本书就是适应这种需要，在电子工业部通信电视总局的关怀和支持下写成的。

本书从实际需要出发，对广播电视系统中典型设备的工作原理作比较深入的分析，并以国内外电视技术的最新成果为主，适当地介绍一些典型电路和方框图，已不用的器件和设备将只提及不详细介绍。分析方法力求符合当前广泛被采用的方法。至于更深入和更专门的问题这里不能详细说明，请参阅每章末尾所介绍的参考文献。

本书共分八章。第一章讨论视觉特性，这在研究电视技术时是很重要的问题。电视中所传送并恢复的图像，其实与原来的景像已完全不同。原来的在二维甚至三维空间中的景物，可认为是二维或三维的亮点的连续分布，当用电信号传送时，必然要将它变换成一维（时间）的电量分布，由此屏幕上恢复的图像，实际上已不是同时发光，结构上在垂直方向也不是连续的，但由于人眼的视觉特性，这图像看起来却象是真的。从某种意义上说，不利用人眼的视觉特性，电视的实现几乎是不可能的。作者在本章中简要地阐述了光度学、色度学和视觉特性，读者对此应予以足够的重视。

第二章是关于广播电视中图像信号的形成，这也是基础性的一章。作者在这里除了介绍扫描原理和根据视觉特性来确定系统参量外，在分析视频信号的频谱时，引入了空间频率的概念，这也是值得肯定的。这是确定系统指标的重要分析方法。利用二维空间频率滤波，可澄清一些以前不够完善的概念。事实上，二维空间频率是研究平面图像的基本概念。对于近代彩色电视制式，本章中着重介绍了PAL系统原理，因为它是我国目前使用的制式，其它制式就不多涉及了，以节省篇幅。

第三章到第五章是摄像管和摄像机，除了介绍现在常用的一些管子的性能、工作原理以及摄像机的构成和其中的各种电路外，还介绍了正在发展中的单管彩色摄像机和电子耦合器件（CCD）所构成的摄像机，以使读者对当前的水平和发展趋向有所了解。各种电路

的介绍和分析也是比较全面的。

电视中心所必须的彩色编码器和同步信号发生器，分别是第六章和第七章介绍的内容。这里先讨论设计这些设备的原理和随着器件发展而出现的变动，而后着眼于电路的分析，有些电路具有普遍意义，并不只限于这些设备中。有些分析结果，不易在其它书籍中找到，有其特点。锁相的讨论也简而严谨。

最后一章是视频切换与特技效果，这是广播电视所独有的，是改善广播电视效果所必须的。介绍一下各种键控方式和自动调整系统的工作原理，对于电视台的工程技术人员来说，可能是很有用的，对其他人员也有参考价值。

作者们在美国学习期间，收集了不少资料，并作了合理的取舍，叙述也较深入浅出。我从七十年代以来对电视新技术接触不多，此次读后，深有清新之感。虽不能说本书已把近代发展性问题都已列入，但使人对电视技术的近期状态和趋势有深刻的印象。可以说，这是一本较好的参考书，对我国电视事业的发展会起到一定的作用。

周炯荣

1985年3月于北京邮电学院

目 录

第一章 视觉特性与彩色电视	1
1.1 关于彩色的概念	1
1.2 视觉的光谱灵敏度与光度测量	3
1.2.1 视觉的光谱灵敏度	3
1.2.2 有关辐射的物理量和单位	4
1.2.3 有关光的物理量和单位	5
1.3 空间频率与人眼的分辨力	8
1.3.1 人眼分辨力的表示方法	8
1.3.2 空间频率的概念	10
1.3.3 眼球的空間频率特性	12
1.3.4 眼睛的横向抑制效应	13
1.3.5 表示人眼分辨力的空間频率响应	14
1.4 人眼的对比度特性	15
1.4.1 关于对比度的定义	15
1.4.2 人眼辨别亮度差别的灵敏度特性	16
1.4.3 马克光带和视在对比度效应	17
1.5 视觉惰性与闪烁感觉	18
1.6 彩色视觉	19
1.6.1 客观彩色视觉	19
1.6.2 主观彩色视觉	20
1.7 格拉兹曼 (Grassman) 法则	21
1.8 色度学	22
1.8.1 彩色的定量表示	22
1.8.2 三系数	23
1.8.3 三维矢量坐标与麦克思韦三角形	26
1.8.4 RGB坐标系统	27
1.8.5 XYZ坐标系统	29
第二章 扫描与图像信号	34
2.1 广播电视的现状和未来	34
2.2 电视图像的宽高比	36
2.3 扫描—空间频率与时间频率的转换	36
2.4 电视扫描系统基本参数的确定	37
2.4.1 场扫描频率的选择	37
2.4.2 隔行扫描	38

2.4.3 扫描行数的确定	39
2.5 电视图像的清晰度	41
2.5.1 清晰度的概念	41
2.5.2 电视线	42
2.5.3 调制传输函数(MTF)	43
2.5.4 图像清晰度的定量表示	45
2.5.5 显像管的等效时间频率响应	47
2.5.6 电视图像的清晰度与人眼分辨力的比较	48
2.6 视频图像信号的频谱	48
2.6.1 概述	48
2.6.2 卷积定理	49
2.6.3 静止图像的视频信号的频谱	50
2.6.4 运动图像的视频信号的频谱	53
2.7 彩色电视图像信号	55
2.7.1 概述	55
2.7.2 亮度信号	55
2.7.3 色差信号	56
2.8 色度信号的传送	57
2.8.1 概述	57
2.8.2 频谱交错原理和平衡正交调制	58
2.8.3 彩条信号与色度信号的电平范围的压缩	61
2.8.4 亮度信号与色度信号之间的相互干扰	64
2.8.5 色度信号的同步检波	67
2.9 PAL制逐行倒相原理	69
2.9.1 V分量逐行倒相的平衡正交调制	69
2.9.2 u信号和v信号的分离与解调	70
2.9.3 PAL彩色图像信号的频谱	71
第三章 彩色电视摄像管	77
3.1 概述	77
3.2 摄像管的工作原理	78
3.2.1 工作原理	78
3.2.2 摄像管输出电容的降低(LOC)	79
3.3 摄像管的基本技术参数	80
3.3.1 惰性与背景光的使用	81
3.3.2 灵敏度	82
3.3.3 分解力与孔阑效应	83
3.4 摄像管调制传输函数的数学分析	85
3.5 摄像管电子枪	91
3.5.1 普通电子枪与ACT	91

3.5.2	二极管电子枪与DBC	94
3.5.3	电子束电阻小的三极管枪	99
3.5.4	电子倍增器在高分解力摄像管中的应用	99
3.6	摄像管的聚焦与偏转	100
3.6.1	概述	100
3.6.2	电子束的磁聚焦	101
3.6.3	电子束的磁偏转	103
3.6.4	电子束的全静电聚焦	104
3.6.5	电子束的静电偏转	106
3.7	视像管 (Vidicon)	109
3.8	氧化铅管 (Plumbicon)	110
3.9	硒靶管 (Saticon)	113
第四章	彩色电视摄像机	117
4.1	概述	117
4.2	光学系统	119
4.2.1	透镜成像的基本原理	119
4.2.2	变焦距镜头	123
4.2.3	分光棱镜	127
4.2.4	色温滤色片与中性滤色片	129
4.3	摄像机偏转电路	130
4.3.1	对摄像机偏转电路的基本要求	130
4.3.2	产生直线性锯齿电流的必要条件	131
4.3.3	脉冲锯齿形电压的形成	132
4.3.4	场扫描输出电路	134
4.3.5	输出管工作在开关状态的行扫描电路	136
4.3.6	开关式行扫描电路中锯齿电流的线性校正	139
4.3.7	线性功率放大式行扫描输出电路	144
4.3.8	重合调整电路	146
4.4	预放器	148
4.4.1	预放器的特点	148
4.4.2	放大器的噪声系数	149
4.4.3	预放器的噪声计算	150
4.5	图像信号的箝位	154
4.5.1	对图像信号进行箝位的必要性	154
4.5.2	箝位电路	156
4.6	黑斑校正 (Shading Correction)	161
4.7	轮廓校正	164
4.7.1	孔阑效应的影响	164
4.7.2	轮廓校正原理	164

4.7.3 轮廓校正中的噪声抑制	168
4.8 彩色校正	170
4.8.1 彩色校正的必要性	170
4.8.2 彩色校正原理	171
4.9 γ' (Gamma) 校正	175
4.10 黑色电平调整	180
4.10.1 背景光与暗电流的影响	180
4.10.2 杂散光校正	181
4.10.3 消隐电平切割	183
4.11 电缆校正	183
4.12 摄像机中的自动调整	184
4.12.1 自动化调整的发展	184
4.12.2 自动光圈调整	186
4.12.3 自动白色平衡、自动黑色平衡和自动 γ 校正	187
4.12.4 自动电子束校正	190
4.12.5 自动重合调整	192
4.12.6 自动中心调整	195
第五章 单管彩色摄像机与CCD彩色摄像机	205
5.1 单管彩色摄像机的发展	205
5.2 单管彩色摄像机中的光学信息处理	207
5.2.1 光学信息处理的基本概念	207
5.2.2 栅状滤色器的空间频率传输特性与光信号的调制	209
5.2.3 光信号的低通滤波	212
5.2.4 差拍现象和光信号陷波器	214
5.3 三电极分离型单管彩色摄像机	216
5.4 基本的频率分离型单管彩色摄像机 (Kell系统)	218
5.4.1 基本原理	218
5.4.2 滤色器结构与差拍干扰的能见度	219
5.4.3 R, G, B 信号的形成	220
5.4.4 Kell系统的优缺点	224
5.5 几种应用频谱交错原理的频率分离方式	224
5.5.1 频谱交错的实现及频谱分析	225
5.5.2 栅状滤色器结构参数的计算	230
5.5.3 R, B 共频带的 Y, R, B 分离方式	231
5.5.4 R, B 共频带的 Y, R, G, B 分离方式	234
5.5.5 Y 与 G, R 与 B 共频带的 Y, R, G, B 分离方式	235
5.5.6 R, G, B 共频带的 Y, R, G, B 分离方式	236
5.5.7 平衡调幅的色信号完全与 Y 信号共频带的分离方式	240
5.6 相位分离型单管彩色摄像机	241

5.6.1	一般相位分离方式	241
5.6.2	Trinicon ——一种性能优良的相位分离式三色管	243
5.7	CCD (电荷耦合器件) 彩色电视摄像机概述	247
5.8	CCD的基本工作原理	248
5.8.1	电荷的存储	248
5.8.2	电荷的转移	249
5.8.3	电荷的输入与信号的取出	250
5.8.4	二相CCD	251
5.8.5	体沟道 CCD	252
5.9	CCD摄像管	253
5.9.1	CCD摄像管的基本原理	253
5.9.2	入射光的照射方式与CCD的光谱特性	255
5.9.3	线阵CCD摄像管	256
5.9.4	面阵CCD摄像管	258
5.9.5	CCD摄像管的性能参量	260
5.10	应用光电移像原理的CCD摄像管 (Image-intensified CCD)	262
5.11	CID摄像管	263
5.12	CCD的输出电路	265
5.12.1	电流输出电路	265
5.12.2	电压输出电路	265
5.12.3	浮栅放大器	266
5.12.4	分布式浮栅放大器	267
5.13	CCD摄像管中的信号处理	268
5.14	三管式CCD彩色摄像机	269
5.14.1	摄像机的基本组成	270
5.14.2	光学系统和CCD摄像机中的重合调整	272
5.14.3	频谱混叠干扰在 R 、 G 、 B 信号之间的相互抵消	273
5.15	两管式CCD彩色摄像机	274
5.16	单管CCD彩色摄像机	275
5.16.1	滤色器结构	276
5.16.2	两种基本方案	277
第六章	编码器	285
6.1	编码器的基本组成	285
6.2	矩阵电路	286
6.3	低通滤波器	290
6.3.1	网络的频率响应与输出波形之间的关系	290
6.3.2	色差信号的低通滤波器	295
6.4	恒流源差分电路在电视设备中的应用	295
6.4.1	恒流源差分电路	296

6.4.2	可控恒流源式与分流式可控增益放大器	301
6.4.3	模拟乘法器	303
6.4.4	双平衡恒流源差分电路	303
6.4.5	双平衡模拟乘法器	304
6.5	色差信号的调制	306
6.5.1	二极管环形调制器与平衡调幅波	306
6.5.2	恒流源差分式平衡调制器	313
6.6	色度信号的形成	319
6.6.1	PAL开关	319
6.6.2	副载波移相电路	321
6.6.3	PAL色度信号的形成	324
6.6.4	色同步信号的形成	326
6.7	彩色全电视信号的形成	327
第七章	同步信号发生器	330
7.1	同步信号	330
7.1.1	同步信号的作用	330
7.1.2	复合同步脉冲的形状	332
7.1.3	副载频的选择	334
7.1.4	色同步消隐迂回门	337
7.2	同步信号发生器的基本设计思想	338
7.2.1	概述	338
7.2.2	基本方案的演变	339
7.2.3	单振荡器方案示例	340
7.2.4	双振荡器方案示例	343
7.2.5	PAL基本频率关系在双振荡器方案中的保证	348
7.3	同步信号发生器之间的锁相	354
7.3.1	台从锁相	354
7.3.2	一般锁相环路	355
7.3.3	副载频锁相与 P 脉冲定相	366
7.3.4	行锁相	371
7.3.5	场锁相	374
7.3.6	中心台与多个远方节目源之间的同步	374
第八章	视频切换与特技效果	381
8.1	概述	381
8.2	基本的切换系统	382
8.2.1	电视信号的切换	382
8.2.2	多路输入、多路输出的切换设备	384
8.2.3	两个彩色全电视信号进行组合的条件	384
8.3	彩色全电视信号的相加混合	385

8.4 波形键控.....	389
8.4.1 键控特技原理.....	389
8.4.2 平移型和90°范围内的旋转型扫换	390
8.4.3 旋转型扫换	401
8.4.4 分画面的位移和追光效果	409
8.4.5 画面分界线的艺术处理	411
8.6 亮度键控	414
8.5.1 自键与外键	414
8.5.2 彩色字幕及其边界处理	415
8.6 色度键控.....	419
8.6.1 一般色键	419
8.6.2 对一般色键的改进	425
8.6.3 软色键	430
8.6.4 相加性彩色背景代换(Ultimate)	433
8.7 附属信号发生器.....	434
8.7.1 彩色光栅信号的产生	434
8.7.2 光点信号的产生	438
8.8 视频切换与特技设备的系统设计	439
8.8.1 基本设计原则	439
8.8.2 系统设计中的几个主要问题	441

第一章 视觉特性与彩色电视

1.1 关于彩色的概念

人们十分熟悉生活中常见的颜色，如花是红的，叶是绿的，天是蓝的，云是白的，等等。人们喜欢彩色，用以点缀环境，美化生活。但是，彩色并不只是物体本身的属性，也不只是光的属性。严格地讲，彩色是一个心理物理学的概念，就是说，它是由客观量和主观量所共同确定的。光照射到物体上，人眼接受了照明光光谱中被物体反射的那一部分光的能量，产生彩色的感觉。

从彩色的角度描述一种可见光需要用三个术语：亮度、色调和饱和度。亮度与光的强弱有关。色调是指彩色的类别，如黄、橙、红、绿等（在科学术语中，用光谱的主波长来表征发光体彩色的类别^[1]，主波长一词来源于辐射热力学^[2]，在电视技术中已经较少出现）。饱和度代表颜色深浅的程度，即颜色的纯度。在定量地确定某种彩色光的上述参数时，必须考虑以下因素：物体表面反射系数的光谱特性，照明光的光谱分布以及人眼的光谱灵敏度特性。这三个因素的乘积，代表了人眼所看到的颜色。

电视系统处在景物和观众之间。它的任务是：将光信号转换成电信号并进行传输，最后在电视机屏幕上再将图像以光的形式显示出来。图像的几何形状和色彩应该真实到，使观众在某种程度上具有身临其境的感觉。

现在暂不讨论图像的几何失真问题。如果把电视系统等效成为具有某种光谱特性的光学系统，很明显，要保证电视图像的彩色逼真，应该满足以下条件：物体的反射光谱特性、光源的光谱分布、电视系统的光谱特性以及人眼的光谱灵敏度特性，四者的乘积等于人眼直接观看原景物时三个因素的乘积。这个简单的数学关系，至少从一个重要的方面表明，为什么电视技术的产生和发展，始终与视觉特性的研究紧密地联系着。

这里提出了一个问题，电视观众实际上并没有身临其境，怎么能够察觉出电视图像的颜色是否真实呢？一个白色平面，用红光照射呈现红色；而用绿光（或蓝光）去照射，人们看到的就是绿色（或蓝色）的。如果观察者事先不知道该平面的颜色，那么在这三种情况下人们所看到的彩色都是真实的。否则，就意味着严重的彩色失真。人类在阳光下生活，人们判别电视图像的颜色是否真实，就是看它与白昼的平均照明下所呈现的彩色是否一致。例如，在白昼平均照明下，人的肤色或者是红润的，或者是苍白的、黝黑的。如果电视图像所呈现的肤色是青色、绿色或者别的什么颜色，就不会令观众满意。因此人们应该通过各种技术措施，使电视系统中所使用的照明光源的光谱分布特性最大限度地接近于白昼平均照明的光谱特性。

在科学技术上，要定量地描述某一种颜色，必须同时注明产生这一颜色所用光源的光谱特性。正如大科学家牛顿所说，如果太阳只发出单一波长的光，那么整个世界就只有一

种颜色了。光源与彩色之间的定量关系，将在1.8节中讨论。

CIE（国际照明委员会）于1931年推荐了A, B, C和E四种国际标准光源。它们的光谱分布如图1-1所示。其中A光源为钨丝灯的灯丝炽热到2800K时的光谱；B光源近似为

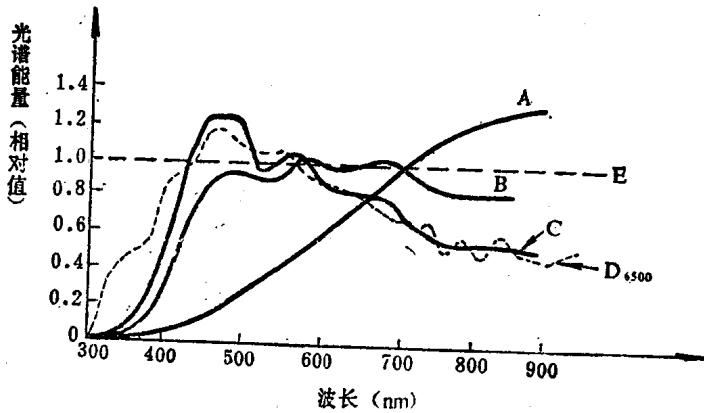


图1-1 几种国际标准光源的光谱分布

中午阳光的光谱；C光源近似为白昼平均照明，它曾经被规定为彩色电视的标准光源；E光源称为等能光源，它虽然无法直接产生，但是在光度测量中，往往需要把测试数据折算成相当于E光源照射的数据才具有普遍意义；1965年国际上改用D光源（图1-1中虚线所示）作为彩色电视的标准光源，因此它的光谱分布比C光源更接近于人们生活中所习惯的“平均白昼照明”。

用曲线来表示光源的特性是一种科学的方法，但使用起来很不方便，有时也不够准确。人们发现，用绝对黑体的热辐射作为光源的客观标准，即用黑体的开氏度（K）代表光源的光谱分布和色度特性——色调和饱和度，对于满足工程技术的需要来讲，是既简单又准确的方法，这就是所谓色温的概念。

绝对黑体（也称为全辐射体），在理论上是这样一种物体：它在任何温度下，对于任何波长的光的吸收系数均为100%，反射系数均为零。这是一种在自然界中找不到的理想物质。实际的黑体是由俄国学者建议的。在一个用不透明材料制成的中空腔体上开一个小孔，孔的面积与腔体表面积相比足够小，射入小孔的光线，经过腔体内壁多次反射和吸收，最后反射出小孔的光能接近于零。这个小孔就是在物理实验和工程技术中实际应用的黑体，通常也近似地称为绝对黑体。设法在这样的腔体内加热，小孔将辐射出光，其光谱是连续分布的，并与黑体温度有着单一的对对应关系。如果一种光源的光谱分布与黑体在某一温度下的辐射光的光谱分布相同或者相近，并且二者的色度相同，那么黑体的温度（K），就称为该光源的色温^[2]。例如，A光源的色温是2854K，就是说，它的光谱分布与黑体加热到2854K时的辐射光谱分布相近，而且二者的色度相同。B, C, D三种光源的色温分别为4870K, 6770K, 6500K。至于“相关色温”^[3]，因不是电视常用术语，这里从略了。

需要强调指出的是，色温的概念包括光源的光谱分布与色度两方面的含意。如果光源的光谱与黑体的辐射光谱差别甚大，即便是色度相同，色温这一术语对该光源也是没有意义的^[2]。这就是为什么图1-1中的E光源不能用色温表示的缘故。此外，光源的色温不含有温度的概念。例如新型彩色电视机荧光屏的色温接近于6500K，而其本身的温度却与室温相差无几。

顺便指出，在许多电视书刊上多沿用文献[4]中对色温的解释，即“黑体产生与被比较的光源相同色度时的温度”。这一解释固然精练，但不够明确。因为它不涉及光谱分

布，而仅用黑体的色度是不能单一地定义光源的。在1.8节中将会看到，任何温度下的黑体辐射光的色度都可以精确地用三种单色光来合成，而合成的方案又无穷多。这就是说，如果不考虑光谱分布，那么在指定的黑体温度下，就有无穷多个光源与其对应。

1.2 视觉的光谱灵敏度与光度测量

1.2.1 视觉的光谱灵敏度

如前所述，电视系统是处于景物与观众之间的，它的光谱特性必须与人眼的光谱灵敏度特性相对应。如不对应，比方说图像是在红外光谱范围内显示的，即便能量再高，也无法为人眼所接受。

任何物体受热后，都能以电磁波的形式向周围空间辐射能量。从理论上讲，辐射的能量可能分布于波长 λ 从零到无穷大的整个区间内。无论在物理学中，还是在理论光学中，如果只研究波的一般特性，而不涉及到某一谱带范围内的具体特性时，那么波长 λ 在 $0 \sim \infty$ 整个区间内的辐射称之为电磁辐射，简称为辐射。在整个谱带范围内的辐射只有分布在大约 $380\text{nm} \sim 780\text{nm}$ 范围内的辐射能够引起人眼的视觉，称之为可见光。在此范围以外的则称为不可见光。本书中用到“光”一词时，一般指的是可见光。

人眼对波长不同的光的敏感程度是不相同的，而且因人而异。图1-2是CIE推荐的标准视度曲线（视觉光谱灵敏度曲线）。这条曲线十分重要，它是设计整个电视系统光谱特性的基本依据之一，也是光度学和色度学测量的基础。在讨论它的具体应用之前，定性

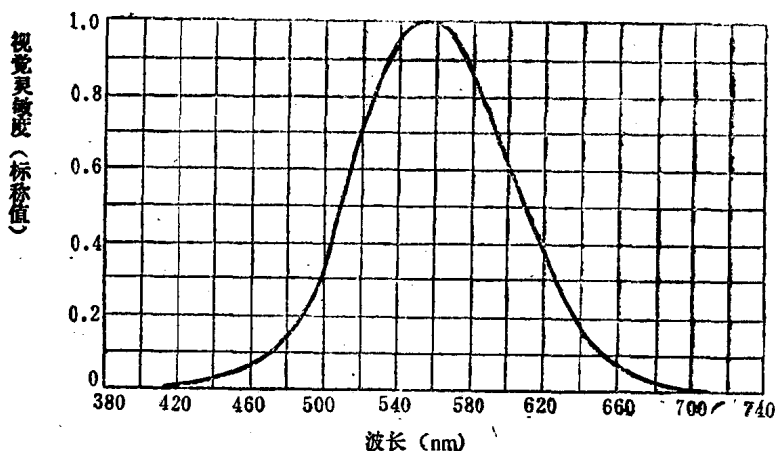
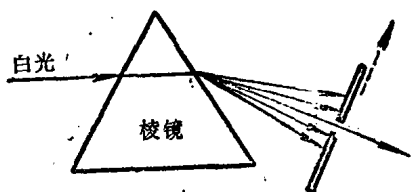


图1-2 人眼的视度曲线

地介绍一下如何测得这条曲线，对于加深对人眼视觉的光谱灵敏度特性的理解是有益的。

由于波长不同的光将引起不同的颜色视觉，而人眼很难准确地比较两束颜色不同的光的亮度，所以视度曲线的测试是按“递进比较”的方法做的^[5]。光谱连续的白光，如日光，经过棱镜的折射，其能量按波长分离。再用图1-3所示的装置，按相同的波长间隔 $\Delta\lambda$ （例如 5nm ），依次取出相应部分作为单元光源。将波长在 $\lambda_0 \sim \lambda_1$ 之间的光束与波长在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 之间的光束同时投射到两个相邻的视场上，调整两束单元光源的强弱，



虚线箭头指向 λ 增大的方向

图1-3 窄带光束的产生

使观察者认为两个视场的亮度相等, (两束 $\Delta\lambda$ 很小、频谱又相邻的光, 看起来色彩相同), 此时两个单元光源的功率分别记为 ΔP_1 与 ΔP_2 。然后用同样的方法, 将 ΔP_2 与波长在 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 之间的光比较, 得到 ΔP_3 。以此类推, 可得到在整个可见光范围内产生相同亮度感觉的各个单元光源的辐射功率, $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3, \dots$ 。

由于亮度感觉与视觉灵敏度 $V(\lambda)$ 和单元光源的功率 ΔP_i 成正比, 所以若引起同样亮度感觉的单元光源的功率为 ΔP_i 和 ΔP_{i+1} 时, 得

$$\frac{V(\lambda_i)}{V(\lambda_{i+1})} = \frac{\Delta P_{i+1}}{\Delta P_i} \quad (1 \leq i \leq n) \quad (1-1)$$

式中, $V(\lambda_i)$ 是波长为 λ_i 时的视觉灵敏度值, λ_i 为区间 $[\lambda_{i-1}, \lambda_i]$ 上的一个值。为了简化符号起见, 后面叙述中的 λ_i 均指 λ_i 。假设 ΔP_m 是功率数值中最小的一个, 也就是说, 它对应于人眼的灵敏度最高的波长($\lambda_m = 555\text{nm}$)。若将此点的灵敏度值 $V(\lambda_m)$ 取为1, 那么任意点的视觉灵敏度值可由下式算出:

$$V(\lambda_i) = \frac{\Delta P_m}{\Delta P_i} \quad (1-2)$$

根据这些数据可作出图1-2所示的曲线。视度曲线可以用函数 $V(\lambda)$ 表示, $V(\lambda)$ 则相应地称为视度函数。

视度曲线表明, 要使人眼产生相同的亮度感觉, 不同波长的光必须施以不同的功率; 反之, 在受到完全相同的辐射功率的刺激时, 例如在等能白光E照射下, 人眼对不同波长的光的亮度感觉是不同的。因此人眼可以等效为一个光的时间频率的带通滤波器, 其频率响应为 $V(\lambda)$ 。请注意这里使用了时间频率这一术语, 它与将要在1.3节中介绍的空间频率, 在概念上是不同的。

从图1-2的曲线上可以看出, 辐射功率相同的一束浅绿色光($\lambda = 555\text{nm}$)和一束桔红色光($\lambda = 610\text{nm}$)所引起的亮度感觉, 前者是后者的二倍。当光波的波长接近于700nm或者420nm时, 亮度感觉就趋近于零了。这就提出了一个问题, 辐射功率显然不能直接描述光源的照明效果, 需要使用另外的物理量及其单位。因此实际上存在着两套物理量和单位: 一套是有关辐射的物理量和单位, 一套是有关光的物理量和单位。前者与人眼无关, 后者则把人眼的视度特性考虑在内。二者之间几乎是一一对应的。

1.2.2 有关辐射的物理量和单位

这一部分术语是以辐射为研究对象的。它与人眼视觉的光谱灵敏度无关。与人眼的关系将在下段研究。

1) 辐通量或辐射功率(Radiant Power)

它是辐射体在单位时间内所辐射出的能量, 如果辐射能的功率频谱分布为 $P(\lambda)$, 则总的辐通量按下式计算, 单位为(W)。

$$P = \int_0^\infty P(\lambda) d\lambda \quad (W) \quad (1-3)$$

假如要计算指定波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的辐通量, 则可用 λ_1 和 λ_2 分别代替(1-3)式中的积分限。这就是前面介绍视度曲线时所用过的辐射功率的概念。

2) 辐强度或辐射强度(Radiant Intensity)