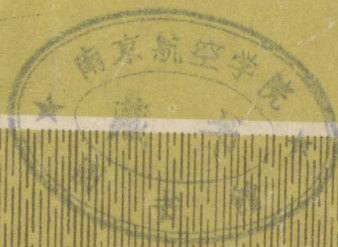


航空高等院校教材

数字图象处理基础

上册

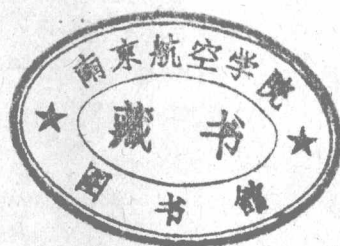
赵荣椿 编著



航空专业教材编审组

数字图像处理基础

赵荣椿 编著



2



航空专业教材编审组

内 容 简 介

本书系统地介绍了数字图象处理与识别的基本理论和方法。全书共分 12 章。前 5 章是基础知识, 分别介绍了图象处理的研究对象、系统组成、主要输入输出设备、人类视觉系统模型以及光度学和色度学的若干基本知识。第 6 章集中讨论了图象处理的重要数学基础——有关图象变换的一些知识。第 7 到 10 章是图象处理的传统内容, 分别讨论了图象增强、复原、编码和重建。最后两章属于图象分析与理解的内容, 着重讨论了图象的分割与描述。

本书是为航空工业部所属高等院校计算机控制与信息处理专业高年级学生和研究生编写的教材, 但对于其它高等院校学生以及从事和图象处理有关工作的工程技术人员来说, 也是一本有用的参考书。

主审稿人 齐兰秋

责任编辑 韩兆轩 吕传生

数 字 图 象 处 理 基 础

赵荣椿 编著

*

航空专业教材编审室

西北工业大学印刷厂印装 内部发行

*

787×1092 1/16 印张 26 654 千字

1984 年 8 月第一版 1984 年 8 月第一次印刷 印数 0001—1000 册

统一书号: 15138 j 定价 1.50 元

前 言

早在本世纪初,人类为了用图片及时的传输世界各地发生的新闻事件,便开始了对图象处理技术的研究。然而,图象处理技术的真正发展还是在本世纪六十年代以后。这一方面是由于受到航天技术发展的刺激;另一方面,也是因为作为图象处理重要工具的数字计算机和各种不同类型的数字化器及显示器,有了突飞猛进的发展,并且价格也越来越便宜。到今天,数字图象处理作为一门崭新的学科,日益为人们所重视,并业已在科学研究、工农业生产、军事技术、医疗卫生、政府部门等许多领域中,发挥着越来越重要的作用。例如,在宇宙探索方面,它被用于有效地传输和处理从宇宙空间拍摄来的各种天体,其中包括地球本身的照片。处理结果除用于各种天文物理研究外,对地球照片的处理,还被用于资源勘探、气象预报、大气污染研究、地势分类、地图测绘和作物生长情况评价等等。生物医学工程是图象处理应用的一个十分活跃的领域,处理各种射线照片、显微图片、内窥镜象、温谱图及核子扫描图象,可以帮助医生对疾病进行快速正确的分析与诊断。在军事上,卫星或航空照片的处理,可以及时而准确地提供靠人力难以获得的侦察情报。在工业上的应用也日益普遍,例如,通过对人工地震信号的处理,可以除去干扰,清楚的显示地层内部结构,以帮助寻找石油。通过对射线图片的处理,可以对各种机件进行无损探伤。即使对于计算机科学本身的发展,图象处理技术也是必不可少的。其中最重要的,是用它来解决计算机文字和图形识别问题。这些问题的解决不但可以大大提高计算机的信息输入效率,而且也为人工智能和计算机辅助设计的研究提供可靠的基础。此外,在地理学、生物学、高能物理学、化学、通讯工程乃至考古和司法部门,也都有着重要的应用。

本书是为航空院校控制及信息处理、电子计算机、雷达、通信工程类专业高年级学生和研究生编写的。其目的是向学生介绍有关数字图象处理的基本概念和方法,从而为在这一领域中进行深入学习和研究打下必要的基础。同样,本书的内容对于从事和图象处理有关工作的大部分工程技术人员来说,也是有用的。

本书包括七部分内容。第一部分介绍有关图象处理的某些基本知识,其中有人类视觉系统特点和模型(第二章);色度学的基本知识(第三章);图象的数字描述(第四章);图象的输入、输出设备(第五章)。第二部分着重讨论图象处理的数学基础—图象变换(第六章)。第三部分和第四部分分别讨论图象的增强和恢复(第七章和第八章),这两个问题和按期望结果改善图象质量密切相关。第五部分扼要地介绍了和高效率记录与传输图象信息相联系的图象数据编码和压缩的问题(第七章)。第六部分讨论了由投影重建图象的基本理论和方法(第十章)。最后一部分,图象分析包括两章内容,即第十一章图象分割和特征抽取及第十二章描述。

在编写本教材时，认为读者已具备了积分变换、线性代数、概率论与随机过程、数字信号处理、电子计算机原理、算法语言、计算机控制原理等知识。同时，由于“模式识别”将作为另一门课程单独讲授，因此，在用到上述知识时，本书只做简短复习或扼要介绍，这样既避免了不必要的重复，也照顾了本书的完整性。

西安交通大学的齐兰秋、谈正、薛培鼎和王积勤同志详细地审阅了书稿、并提出了许多十分宝贵的意见和建议。西北工业大学崔甦生同志编制并校验了本书的全部计算程序。本书的插图是由李时哲、林树根同志绘制的。对于本书的文字修饰和出版，于兴旺、韩兆轩、郝重阳和吕传生同志做了大量工作，对于上述同志的积极支持和热心帮助，作者在此深表谢意。

目 录

✓第一章 导论.....	1
§ 1.1 数字图象处理的研究对象	1
§ 1.2 数字图象处理系统的组成	2
§ 1.3 数字图象处理的若干重要应用	3
参考文献.....	4
X第二章 人类视觉系统的特点和数学—物理模型.....	5
§ 2.1 人眼的构造	5
§ 2.2 光度学的基本知识	6
§ 2.3 人眼的视觉特性	11
本章小结.....	23
参考文献.....	23
X第三章 色度学的基本知识.....	25
§ 3.1 三基色原理	25
§ 3.2 色度图	28
§ 3.3 彩色视觉模型	38
本章小结.....	40
参考文献.....	41
✓第四章 图象的数学描述.....	42
§ 4.1 连续图象的数学描述	42
§ 4.2 图象的数字化和离散图象的数学描述	44
本章小结.....	53
参考文献.....	53
X第五章 图象的输入输出设备.....	54
§ 5.1 几种常用的光电转换元件	54
§ 5.2 显微密度计	57
§ 5.3 飞点扫描器	61

§ 5.4 单色摄象管	62
§ 5.5 固体摄象装置	68
§ 5.6 彩色数字化器	73
§ 5.7 图象的输出设备	75
本章小结	84
参考文献	85

✓第六章 图象变换.....86

§ 6.1 预备知识	86
§ 6.2 二维连续付里叶变换	90
§ 6.3 二维采样定理	103
§ 6.4 二维离散付里叶变换 ✓	106
§ 6.5 图象变换的一般表达式	119
§ 6.6 沃尔什变换	130
§ 6.7 哈达玛变换 ✓	151
§ 6.8 沃尔什—哈达玛变换 ✓	157
§ 6.9 哈尔变换 ✓	163
§ 6.10 卡胡南—劳埃夫变换 ✓	173
§ 6.11 其它图象变换 <i>Handwritten</i>	178
本章小结	184
参考文献	185

✓第七章 图象增强.....187

§ 7.1 灰度级修正及灰度比例尺变换	187
§ 7.2 直方图均衡和直方图修正	189
§ 7.3 平滑和噪音消除	198
§ 7.4 图象锐化	207
§ 7.5 用同态滤波方法进行图象增强	217
§ 7.6 伪彩色图象增强	220
本章小结	223
参考文献	224

✓第八章 数字图象恢复.....225

§ 8.1 退化模型	225
§ 8.2 循环矩阵和分块循环矩阵的对角化	229
§ 8.3 对角化对退化模型的简化	232
§ 8.4 恢复所需的某些知识	234
§ 8.5 代数恢复方法	241
本章小结	263

参考文献	263
第九章 图象编码	264
§ 9.1 图象编码概述	264
§ 9.2 关于编码器的若干基本知识	269
§ 9.3 无误差图象编码	277
§ 9.4 有误差图象编码	287
本章小结	302
参考文献	302
第十章 由投影重建图象	304
§ 10.1 断层摄影图象的获取	304
§ 10.2 重建图象的解联立方程组方法	307
§ 10.3 反投影法	308
§ 10.4 用付里叶变换进行图象重建	309
§ 10.5 利用卷积进行图象重建	315
§ 10.6 图象重建的逐步逼近法	318
本章小结	320
参考文献	320
第十一章 分割与特征抽取	321
§ 11.1 引言	321
§ 11.2 基于点相关的分割	322
§ 11.3 基于区域相关的分割	347
§ 11.4 图象特征抽取	356
本章小结	364
参考文献	364
第十二章 区域描述	366
§ 12.1 简单几何性质描述与变换	366
§ 12.2 目标大小的描述	375
§ 12.3 形状描述	377
§ 12.4 区域综合特征的描述	388
§ 12.5 相互关系描述	392
§ 12.6 相似性描述	406
本章小结	408
参考文献	408

第一章 导 论

这一章我们将要介绍有关数字图象处理的某些基本概念。其中包括它的研究对象、图象处理系统的组成以及它的某些重要应用。

§ 1.1 数字图象处理的研究对象

我们首先要弄清楚什么是图象？什么是数字图象处理？

按照字面的解释，图象就是对客观存在的物体的一种相似性的生动模仿或描述。照片、各种类型的绘画、电视画面等是图象的最直观的例子。然而，除了这些能被人眼观察到的各种平面图象以外，它还包括视觉无法观察的其它物理图象和空间物体图象。例如，温度、压力、高度等物理量的平面或空间分布，就是无法直接用人眼进行观察的图象。此外，我们所讨论的图象还包括用数学函数和离散数据所描述的抽象的连续或离散图象。关于这些图象在第四章还要详细讨论。

所谓数字图象处理，就是指用数字计算机及其它有关数字技术，对图象施加某种运算和处理，从而达到某种予想的目的。例如，使退色模糊了的照片重新变清晰。从医学显微图片中提取有意义的细胞特征等等。

数字图象处理的研究内容概括起来可包括如下六个方面：

1. 图象的数字化——即研究如何把一幅连续的光学图象表示成一组数字，既不失真又便于计算机分析处理。
2. 图象的增强——增强图象中的有用信息，削弱干扰和噪声、从而改善图象的质量，以便于观察和识别。
3. 图象恢复——把退化、模糊了的图象复原。
4. 图象编码——在满足一定的保真度要求下，简化图象的表示，从而大大压缩表示图象的数据，以便于存贮和传输。
5. 图象重建——由图象投影数据重建该图象。
6. 图象分析——对图象中的不同对象进行分割、描述，从而利用计算机对图象进行分类、识别和解释。

应该注意，对于前五个方面，输入、输出都是图象。而对于最后一方面，输入是一幅图象，输出则是图象的描述或解释（又叫图象理解），或者是对象的分类或结构分析（又称为图象识别）。

§ 1.2 数字图象处理系统的组成

数字图象处理系统由数字化器、大容量存贮器、数字计算机及输出显示器等四部分组成，如图 1-1 所示。

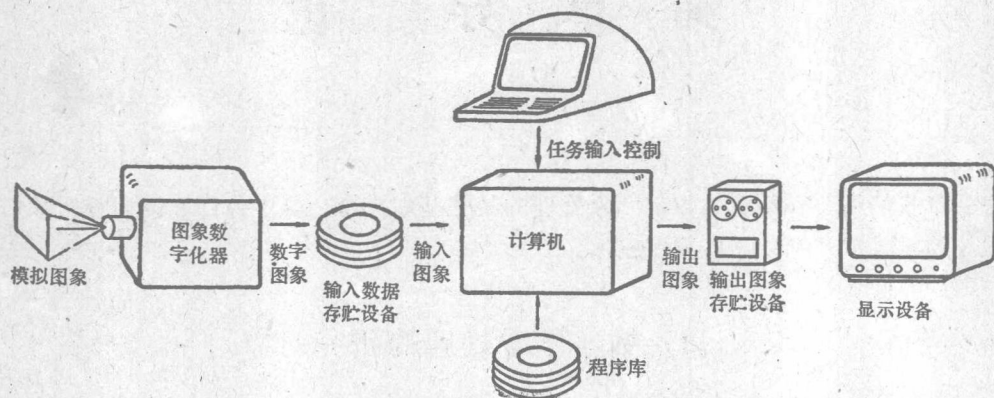


图 1-1 数字图象处理系统

数字化器是把连续明暗（或彩色）图象转变为计算机可以接受的数字图象的设备。最常用的数字化器有摄像机、飞点扫描器和显微密度仪等。光学图象经数字化器以后，转变成一幅数字图象暂存于一个适当的输入数据存贮设备中。计算机根据从控制器传来的不同处理命令，从程序库中调用相应的处理程序，并对输入数字图象进行处理。处理结果存放于输出数据存贮设备中，并根据控制器发出的命令显示于输出图象的显示器上。

从上述图象处理过程可以看出，大容量存贮器的功用是存放输入、输出数字图象和各种不同处理程序，此外，它还必须存贮中间处理结果。在许多情况下，中间结果还需存放到它原来读出时的地址，所以，除了存放输出图象的设备以外，其余存贮设备必须具有良好的可重复性，这意味着必须选取磁盘存贮器。

根据对处理能力和处理结果的要求不同，数字计算机可以采用多个微处理机组成的系统、小型计算机直到大型计算机。对于通常的实验室条件来说，快速的数据通过量并不是主要的，因此，一台中等规模的小型通用计算机已经够用了。对于各类 16 位乃至 32 位微处理机业已投入市场的今天，也许采用微处理机系统或多个微处理机并行工作更为适宜。只有在需要对大量图象进行处理，因而要求有快速的数据通过量的情况下，才用功能更强、速度更快的大型计算机系统。当然，作为一种更为合理的方案，可以把小型机或微型机图象处理系统接入大型计算机网，从而在一般图象研究或少量处理情况下，将单独使用小型或微型机系统，而在大批图象处理，或需共享大型机资源的情况下，再把它接入大型机网。

对于专门用于图象处理的系统来说，除了计算机本身的运算控制器以外，还配有另外的操作控制器，从而更便于使用者灵活地选取各种已经标准化了的图象处理程序，以及随意调用各种外部设备。

作为系统输出的设备有电视显像系统、记忆示波管和宽行打印机。有时，为了记录这些结果还配以照相机、录像机、硬拷贝等。

图象处理的软件，过去是用汇编语言编写的，以提高处理的速度。对于一些应用较多、计算量较大的程序可以固化成硬件，如二维快速付里叶变换程序等，以进一步提高处理的速度。但另一方面，为了增加系统的灵活性，特别是为了便于新的图象处理软件的研制，系统至少配备一种高级语言是十分必要的。近年来，用高级语言编写的图象处理软件已日益增多。

图 1-2 展示了一个以小型通用计算机为中心的图象处理系统实例。其中两台微处理机是

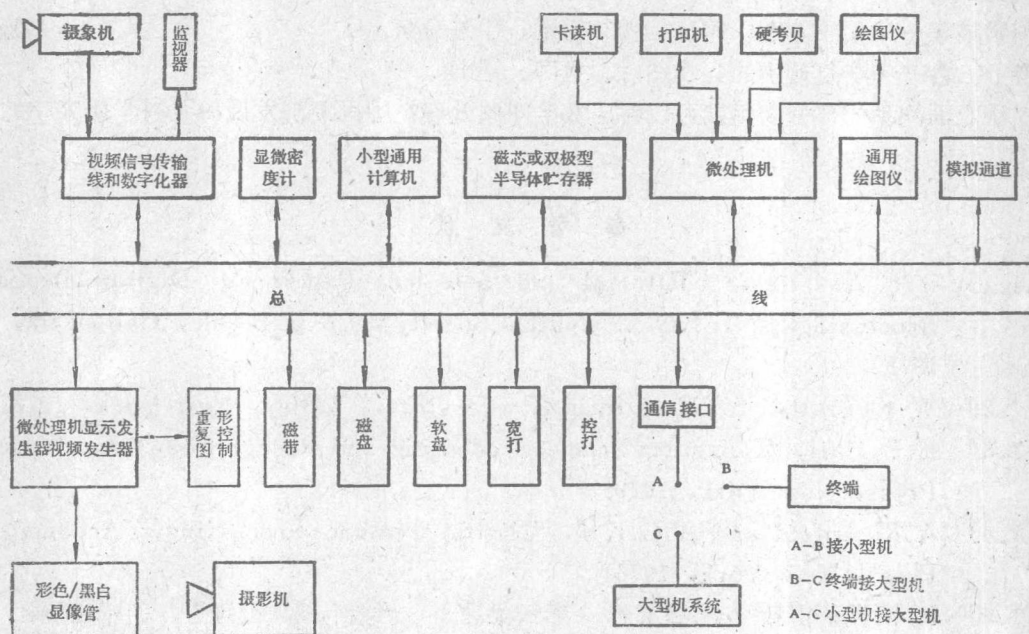


图 1-2 一个典型的数字图象处理系统

专门用来进行输出和显示控制的，目的是减少主机用于这方面的时间，从而提高处理速度。

§ 1.3 数字图象处理的若干重要应用

正像任何一门学科的产生一样，数字图象处理这门学科的形成也和社会生产力发展的需要分不开的。早期的图象处理是由于通讯方面的要求而发展起来的，这就是本世纪廿年代传真术的发明和发展。其后，则是由于宇宙探索方面的要求，需要处理大量在宇宙探测器上拍摄下来的不清楚的其它天体（如月球、火星等）以及地球本身的照片。然而，图象处理技术的发展，远远突破了这两个领域，到今天，它已经广泛地应用到科学研究、工农业生产、军事技术、政府部门、医疗卫生等许多领域，进一步推动着社会生产力的发展。它的一些主要应用可归纳为如下几个方面。

通讯技术——图象传真，电视电话，卫星通讯，数字电视；

宇宙探索——其它星体图片处理；

遥感技术——农林资源调查，作物长势监视，自然灾害（水、火、风、虫等）验测、预报，地势、地貌以及地质构造测绘，找矿，水文、海洋调查，环境污染监测等等；

生物医学——X射线、超声、显微图片分析，内窥镜图、温谱图分析，断层分析；

工业生产——无损探伤, 石油勘探, 生产过程的自动控制(识别零件, 装配, 质量检查);

计算机科学——文字、图象输入的研究, 计算机辅助设计, 人工智能研究;

气象预报——天气云图测绘、传输;

军事技术——航空及卫星侦察照片的判读, 导弹制导, 雷达、声纳图象处理;

高能物理——核子泡室图片分析;

侦破破案——指纹鉴别, 印鉴、伪钞识别, 手迹分析。

考古——恢复珍贵的文物图片、名画、壁画。

仅从上面列举的部分应用就可以看出数字图象处理在国民经济发展以及科学研究中的重要作用。

参 考 文 献

- [1.1] H.C.Andrews, "Tutorial and Selected Papers in Digital Image Processing," IEEE Computer Society, Long Beach, California, 1978.
- [1.2] W.K.Pratt, "Digital Image Processing," Wiley, New York, 1978.
- [1.3] E.L.Hall, "Computer Image Processing and Recognition," Academic Press, New York, 1979.
- [1.4] A.Rosenfeld and A.C.Kak, "Digital Picture Processing," Academic Press, New York, 1976.
- [1.5] R.C.网萨雷斯 P.温茨著 李叔梁等译 "数字图象处理" 科学出版社 1981年。
- [1.6] T.S.Huang,ed, "Picture Processing and Digital Filtering," Springer—Verlag, Berlin and New York, 1979.
- [1.7] Special Issue on Digital Filtering and Image Processing.IEEE Trans. Circuits Syst.CAS-2, 1975.
- [1.8] Special Issue on Digital Image Processing.IEEE Comput.7, No.5, 1974.
- [1.9] Special Issue on Digital Picture Processing.Proc. IEEE 60, No.7, 1972.

第二章 人类视觉系统的特点和 数学—物理模型

由于图象处理的许多目标都是帮助人更好的观察和理解图象中的信息，也就是说，最终要通过人眼来判断所处理的结果。因此，有必要研究人类视觉系统的特点，并研究它的等效数学—物理模型，从而在进行处理时，把它作为整个处理系统的一个环节来考虑。这样，可以使处理的客观效果尽可能和主观感觉相一致。

然而，由于现代科学技术的水平，还不能准确地解释有关人类视觉系统的全部生理、物理过程，因此，关于人类视觉系统模型的讨论，只能建立在假设和实验结果相符合的基础之上。

§ 2.1 人眼的构造

人眼是一个平均半径约 20mm 的球状器官。它由三层薄膜包围着，如图 2-1 所示。

最外层是坚硬的蛋白质膜，其中，位于前方的大约 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 为白色不透明组织，称为巩膜，它的作用是巩固和保护整个眼球。

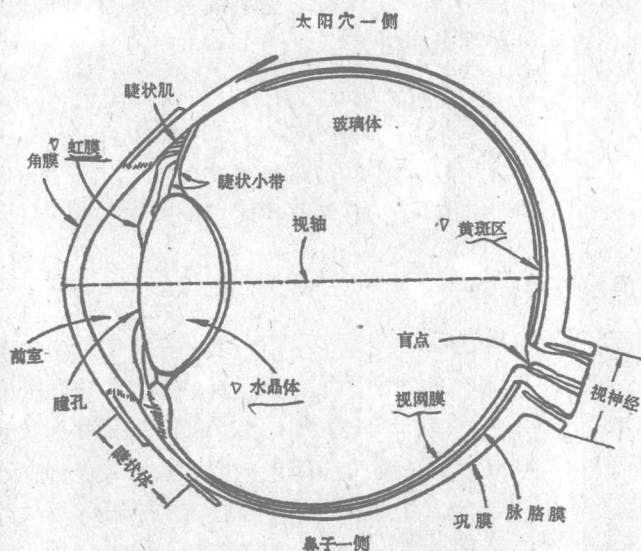


图 2-1 眼球的水平剖面图

中间一层由虹膜和脉络膜组成。虹膜的中间有一个圆孔，称为瞳孔。它的大小可以由连接虹膜的环状肌肉组织（睫状肌）来调节（直径约在 2mm 到 8mm 之间），以控制进入眼睛内部的光通量大小，其作用和照相机中的光圈一样。随着种族的不同，虹膜也具有不同的颜色，如黑色、兰色、褐色等。

最内一层为视网膜，它的表面分布有大量光敏细胞。按照形状，这些光敏细胞可以分为锥状和桿状两类。每只眼睛中大约有 600 万到 700 万个锥状细胞，并集中分布在视轴和视网膜相交点附近的黄斑区内。每个锥状细胞都连接一个神经末梢，因此，黄斑区对光有较高的分辨力，能充分识别图象的细节。锥状细胞既可以分辨光的强弱，也可以辨别彩色，白天的视觉过程主要靠锥状细胞来完成，所以，锥状视觉又称白昼视觉。桿状细胞数目更多，每只眼睛中大约有 7600 万到 15000 万个。然而，由于它广泛分布在整个视网膜表面上，并且，由于有若干个桿状细胞同时连接在一根神经上，因此，这条神经只能感受多个桿细胞的平均光刺激，使得在这些区域的视觉分辨力显著下降，因此无法辨别图象中的细微差别，而只能感知视野中景物的总的形象。桿状细胞不能感觉彩色，但它对低照明度的景物往往比较敏感，所以，夜晚所观察到的景物只有黑白、浓淡之分，而看不清它们的颜色差别。由于夜晚的视觉过程主要由桿状细胞完成，所以，桿状视觉又称夜视觉。

除了三层薄膜以外，在瞳孔后面有一个扁球形的透明体，称为水晶体。它由许多同心的纤维细胞层组成，由叫作睫状小带的肌肉支撑着。水晶体的作用如同可变焦距的一个透镜，它的曲率可以由睫状肌的收缩进行调节，而睫状肌则根据锥状细胞感受到景物的聚焦情况改变其张力。从而使景像始终能刚好的聚焦于黄斑区。

角膜和水晶体包围的空间称为前室，前室内是对可见光透明的水状液体，它能吸收一部分紫外线。水晶体以后为后室，后室内充满的胶质透明体称为玻璃体，它起着保护眼睛的滤光作用。

人眼在观察景物时，光线通过角膜、前室水状液、水晶体、后室玻璃体、成像在视网膜的黄斑区周围。视网膜上的光敏细胞感受到强弱不同的光刺激，产生强度不同的电脉冲，并经神经纤维传送到视神经中枢，由于不同位置的光敏细胞产生了和该处光强弱成比例的电脉冲，所以，大脑中便形成了一幅景物的感觉。

§ 2.2 光度学的基本知识

在具体讨论视觉特征之前，先复习一些有关光度学的基本知识 [2.1-2.6]。

2.2.1 电磁辐射和可见光谱

电磁波的波谱范围很广，如图 2-2 所示。可见光只占其中很小的范围，波长从 380 毫微米到 780 毫微米。不同波长的光呈现出不同的颜色，随着波长的缩短，可见光的颜色依次为红、橙、黄、绿、青、兰、紫。只有单一波长成份的光称为单色光，含有两种以上波长成份的光为复合光。人眼感受到复合光的颜色便是组成该复合光之单色光所对应颜色的混合色。太阳辐射电磁波谱范围恰好主要占据整个可见光谱范围。所有可见色光的混合便是白色光。太阳辐射功率波谱如图 2-3 所示。（我们称辐射功率按波长的分布为辐射功率波谱）。

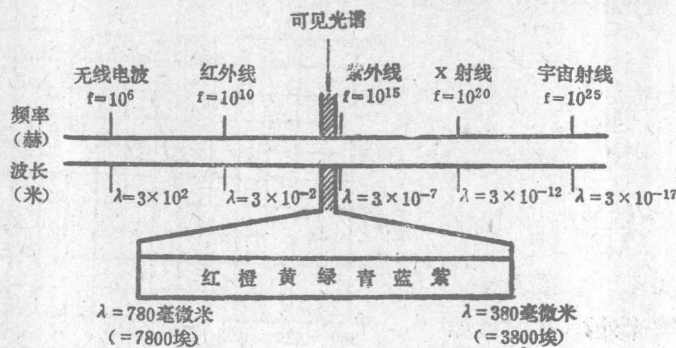


图 2-2 电磁辐射波谱

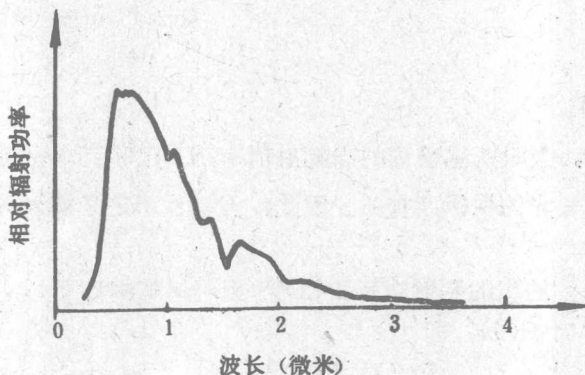


图 2-3 太阳辐射功率波谱

2.2.2 相对视敏函数

在辐射功率相同的情况下，不同波长的光不仅给人以不同的彩色感觉，而且也给人以不同的亮度感觉。例如，尽管每种色光具有完全相同的辐射能，但人眼将感到红光最暗、蓝色次之而黄绿色最亮。反之，如果要对各色光获得相同的亮度感觉，就必须使红色光有比黄或绿光有更高的辐射功率。对于不同的人来说，这种对波长不同的光的敏感规律也不相同，即使对于同一个人，这种规律也会因年龄、身体情况的变化而改变。

为了定量的描述人眼对不同波长的敏感程度，可以选取若干正常的观察者对不同波长光刺激的亮度平均反应作为一种度量标准，这便是所谓的视敏函数。

在具体给出视敏函数的定义之前，我们先介绍一下视敏度的概念。

如果在获得相同的亮度感觉前提下，测出各种波长的辐射功率为 $P(\lambda)$ ，那么其倒数

$$K(\lambda) = \frac{1}{P(\lambda)} \quad (2-1)$$

便称为波长为 λ 的光的视敏度。显然，它越大，获得相同亮度感觉，波长为 λ 的光需要辐射的功率越小，说明人眼对这种波长的光有较高的灵敏度，反之，它越小，证明人眼对该种波长的光不够敏感。

实践表明，人眼对波长为 555 毫微米的光有最大的敏感度，即

$$K(\lambda)_{max} = K(555)$$

于是，又把视敏度和它的比称作相对视敏函数，记为

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K(555)} \quad (2-2)$$

或者，据(2-1)式，上式又可写成

$$K(\lambda) = \frac{P(555)}{P(\lambda)}$$

它的取值范围为从 0 到 1。最大值 1 发生在 $\lambda = 555$ 毫微米处，其图形如图 2-4 所示。

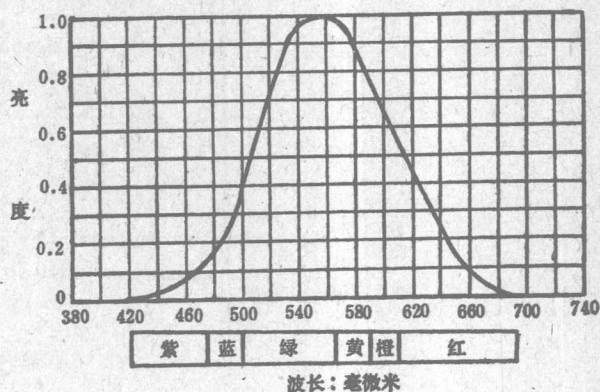


图 2-4 相对视敏函数曲线

2.2.3 光通量

由下面的讨论知，人眼所感受到的光辐射功率，不仅和光本身所辐射的功率大小有关，而且也和对不同波长光的视敏度有关。因此，需要重新定义被人所感知的不同波长的光的辐射功率。

我们定义波长为 λ 的光的辐射功率 $P(\lambda)$ 和相对视敏函数 $V(\lambda)$ 的乘积，为被感知的该波长光的光通量，记为 $F(\lambda)$ ，即

$$F(\lambda) = P(\lambda)V(\lambda) \quad (\text{光瓦}) \quad (2-3)$$

单位为光瓦。当 $\lambda = 555$ 毫微米时，人的光感觉最强， $V(\lambda) = 1$ ，此时 $F(\lambda) = P(\lambda)$ ，即一瓦辐射功率刚好产生一光瓦的光通量。当 $\lambda \neq 555$ 毫微米时，一瓦辐射功率将产生不了一光瓦的光通量。此外，当 $V(\lambda) = 1$ 时，主观光通量便和客观光通量（不考虑人眼的感知情况）完全一致。

对于任意可见光源来说，它辐射的可见光波长范围为 380—780 毫微米，于是人眼接受的总光通量应为

$$F = \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (\text{光瓦}) \quad (2-4)$$

国际通用的光通量单位是流明。国际照明委员会规定：绝对黑体在铂的凝固温度下（2045°K），从 $5.305 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 面积上辐射的光通量为 1 流明。一瓦辐射功率的 555 毫微米波长的单色光所产生的光通量为 680 流明。于是光瓦和流明之间的关系为

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

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

如果以流明为单位，(2-4) 式可改写成

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

2.2.4 发光强度

光源在单位立体角内发出的光通量，称为发光强度，简称光强，用 I 来表示，它和光通

量之间的关系为

$$I = \frac{dF}{d\omega} \quad \text{烛光} \quad (2-5)$$

$$F = \int I d\omega \quad \text{流明} \quad (2-6)$$

显然，1 烛光 = 1 流明 / 1 立体弧度。1 立体弧度角即直径为 1 米的圆球表面 1 米² 面积所对的球心角。

对于点光源，由于向四周辐射是均匀的，以及由于球心对球面的立体角等为 4π 立体弧度，所以点光源的光强与光通量有如下关系

$$I = F / 4\pi$$

$$F = 4\pi I$$

所以，光强为 1 烛光的点光源所发出的总光通量为 4π 流明。

2.2.5 亮 度

亮度是用来描述发光表面的明亮程度的，它可定义为发光面在指定方向上的发光强度与发光面在垂直于所取方向的平面上的投影之比，记为 B ，即

$$B = \frac{dI_\alpha}{ds \cos \alpha} \quad (2-7)$$

式中， dI_α 为指定方向上的发光强度； $ds \cos \alpha$ 为发光面在 P 平面上的投影（见图 2-5）。

（2-7）式表明，如果在所取方向上观察到的发光表面越小，而辐射的发光强度越大，则该发光表面的亮度越大。在发光面的法线方向上有

$$B_n = \frac{dI_n}{ds}$$

发光面可以是面光源，也可以是反射面或透射面。对于一个漫反射面 ds ，其在任意方向 α 上的发光强度 $dI_\alpha = dI_n \cos \alpha$ ，于是，在该方向上的亮度为

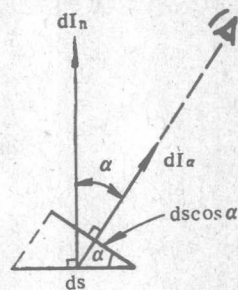


图 2-5 发光面 ds 之亮度

$$B = \frac{dI_n \cos \alpha}{ds \cos \alpha} = \frac{dI_n}{ds} = B_n$$

这说明，尽管漫反射面在各不同方向上的光强和光通量不同，但其亮度都是相同的。电视荧光灯屏表面便近似一个余弦分布的散射面。所以，从不同角度看电视图象，都有相同的亮度感觉。

有两种不同的亮度单位

1. 当亮度用每单位面积的发光强度表示时，其单位为熙提或尼特

1 熙提 = 1 烛光/平方厘米

1 尼特 = 1 烛光/平方米

2. 当亮度用每单位面积发出的光通量表示时，其单位为亚熙提或朗伯

1 亚熙提 = 1 流明/平方米

1 朗伯 = 1 流明/平方厘米

两种亮度单位之间的关系为 [2.6]