



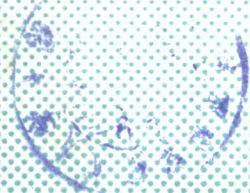
GH

981409

高等学校 规划教材  
工科电子类

# 图像电子学基础

唐传尧 编著



8



电子工业出版社

高等学校工科电子类规划教材

# 图像电子学基础

唐传尧

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书以图像为中心,主要讨论与图像有关的光学和电子学方面的基本理论和基础知识。具体包括图像的光学原理,图像与视觉,图像信息理论,图像信号的产生、显示与传送,图像处理与图像质量评价等内容。

本书主要适用于应用电子技术、物理电子技术以及图像传输和图像工程等有关专业的大专学生教材,也可供该领域有关科技人员和研究生参考。

高等学校工科电子类规划教材

**图像电子学基础**

唐 传 尧

特约编辑: 张成全

\*

电子工业出版社 出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

\*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 10 字数: 240 千字

1995年10月第一版 1995年10月北京第一次印刷

印数: 1000 册 定价: 7.80 元

ISBN7-5053-2976-6/G·245

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师的共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断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

FA024/07

# 前 言

图像电子学是在电视技术的基础上发展起来的。由于广播电视的普及,图像传输与图像通信包括摄像、录像、图像存贮、图像显示和图像处理等的迅速发展,逐渐形成了一门新的技术学科——图像工程,而图像电子学则是研究图像工程中有关电子学问题的科学。

《图像电子学基础》的宗旨是从光学和电子学角度深入地认识图像,了解图像的基本特点,讨论在电视广播,图像传输与通信过程中的光学的和电子学的基本问题,以便有效地利用光学和电子学手段,扩展人眼对图像的视觉功能,最大限度地发挥图像的可用性。

本教材共分七章,即绪论、图像的光学原理、图像与视觉、图像信息理论、图像信号的产生、显示与传送、图像处理及图像质量评价。由于《图像电子学基础》是一门专业基础性课程,它涉及面较宽,作者在编写时力求强调物理概念、基本原理和性能特点的分析。适当地减少了结构的细致描绘和复杂公式的推导,并尽量做到理论联系实际,使在掌握基本理论的同时,也提高了学习的实用性。

本教材是为应用电子技术、物理电子技术、图像工程和图像传输有关专业本科生编写的,同时也可供有关科技人员和研究生参考阅读。

在编写本教材过程中,得到电子科技大学五系和 502 教研室教师们的大力支持和帮助,书稿由东南大学杨永诚教授和林福华教授主审,他们对初稿提出很多宝贵意见和建议,作者谨在此表示衷心感谢。由于这门课程的教材编写在国内属初次尝试,编者水平有限,书中难免会存在缺点和错误,竭诚欢迎广大读者批评指正。

作 者

1994 年 7 月

# 目 录

第一章 绪论.....	1
§ 1.1 图像与图像电子学.....	1
一、图像和图像工程.....	1
二、图像电子学.....	3
§ 1.2 图像电子学与图像处理.....	6
一、图像处理及其分类.....	6
二、图像处理系统.....	7
§ 1.3 图像技术的发展和和应用.....	11
一、图像技术发展历史.....	11
二、图像技术发展趋势.....	11
复习思考题.....	14
第二章 图像的光学原理.....	15
§ 2.1 光源与光度学.....	15
一、光源概述.....	15
二、黑体与真实物体的辐射.....	18
三、太阳辐射与自然光源.....	25
四、摄影与摄像对照明光源的选用.....	27
五、光度学.....	28
§ 2.2 理想光学系统的光传输.....	30
§ 2.3 光学系统的非理想特性.....	31
一、光传输的非理想特性,像面照度的 $\cos^4\theta$ 定律.....	31
二、光成像的非理想特性.....	32
三、对摄影和摄像镜头参量的选择.....	35
§ 2.4 傅里叶光学和调制传递函数.....	36
一、光学系统的线性和位移不变性.....	36
二、 $\delta$ 函数.....	38
三、卷积及其作用.....	41

四、光学成像的空域卷积公式与 $PSF$ .....	44
五、光学图像的傅里叶变换和空间频率域的表达 .....	46
六、光学成像的频域乘积公式与 $OTF$ .....	48
七、 $PSF$ 与 $OTF$ .....	50
八、正弦波响应与矩波响应 .....	55
九、级联系统的成像特性 .....	60
十、图像的频谱 .....	62
§ 2.5 光子效应和图像噪声 .....	65
一、光子效应与散粒噪声 .....	65
二、电子摄像系统的噪声 .....	71
复习思考题 .....	74
第三章 图像与视觉 .....	75
§ 3.1 图像亮度的视觉特性 .....	75
一、人眼的构造 .....	75
二、客观亮度与主观亮度感觉 .....	76
三、微光视觉与视觉锐度曲线方程 .....	81
§ 3.2 视觉的空间频率特性 .....	84
一、人眼视觉空间分辨率 .....	84
二、人眼空间频率探测阈值 .....	85
三、 $MTF$ 与极限分辨率 .....	86
四、马赫带 .....	87
§ 3.3 图像视觉的时间特性 .....	88
§ 3.4 图像与色视觉特性 .....	91
一、色与色视觉 .....	91
二、三基色理论与基色制 .....	94
三、 $XYZ$ 色谱图及重现图像的色域与质量 .....	97
§ 3.5 景物形状、大小和深度的视觉特性 .....	102
一、物形和大小的视觉 .....	102
二、景物深度的视觉 .....	105
复习思考题 .....	107
第四章 图像信息理论 .....	108
§ 4.1 图像信息的变换与同步 .....	109

一、图像的光学变换	108
二、图像的扫描变换	110
三、彩色图像变换	113
四、图像的同步	116
§ 4.2 图像信息的统计特性	119
一、图像的空域统计特性	120
二、图像的频域统计特性	122
§ 4.3 图像信息的信息量	126
一、信息量和熵	126
二、信道容量和编码效率	128
三、独立熵、联合熵和条件熵	129
四、图像信息的统计特性的应用	132
复习思考题	134
第五章 图像信号的产生、显示与传送	135
§ 5.1 图像信号的产生和存贮	135
一、图像信号的产生	135
二、图像信号的磁记录 and 重放	164
三、光盘存贮原理	168
§ 5.2 图像的显示和记录	169
一、图像显示及其分类	170
二、电子束显示	171
三、液晶显示	181
四、等离子显示	185
§ 5.3 图像信号的传送	187
一、图像信号的传输方式	187
二、图像信号传输过程的噪声和波形失真	189
三、幅度调制与频率调制	193
四、图像的数字传输	198
五、图像信号的传送	201
§ 5.4 图像通信与图像信息交换	203
一、图像通信	203
二、图像信息交换及通信网	212



复习思考题 .....	218
第六章 图像处理 .....	219
§ 6.1 图像处理及其目的 .....	219
§ 6.2 图像的采样、量化与重建 .....	220
一、采样原理 .....	221
二、重建原理 .....	223
三、量化与量化误差 .....	223
§ 6.3 图像编码与数据压缩 .....	225
一、图像编码及其分类 .....	225
二、Huffman 编码 .....	227
三、正交变换编码 .....	229
四、预测编码 .....	240
§ 6.4 图像的增强、恢复、投影重建与分析 .....	241
一、图像增强 .....	241
二、图像恢复 .....	255
三、图像的投影重建 .....	265
四、图像分析 .....	273
复习思考题 .....	287
第七章 图像质量评价 .....	288
§ 7.1 概述 .....	288
§ 7.2 图像质量的客观评价 .....	291
一、以原空间图像为评价依据 .....	291
二、以空间频谱幅值调制度为评价依据 .....	292
三、以标准波形或测试卡为评价依据 .....	298
§ 7.3 图像质量的主观评价 .....	299
一、主观评价时注意点 .....	299
二、主观评价分析方法 .....	300
§ 7.4 图像质量主客观评价相结合探索—美函数 .....	307
复习思考题 .....	308
参考文献 .....	310

# 第一章 绪 论

## § 1.1 图像与图像电子学

### 一、图像和图像工程

一切自然景物和客观目标经过某种作用转变成相应的二维或三维空间的光学信息都称为图像。其转变作用可以通过光学的、光化学的、机械的和电子的各种技术手段。而光学信息可以是只有光强度或光密度分布,即黑白图像,也可以还包括色度分布,即彩色图像。实际上,从光学角度看,自然景物和客观目标本身也是具有一定空间分布的光学信息,广义地说也是图像,但它通常是三维空间图像,为了与一般图像区分,称它们为物图像或原物。

为了克服人眼视觉的局限和让客观图像更好地为人们所利用,通常要将原物经过成像、传输、处理,最后再显示出来。一般地说,要求最后显示的图像尽量逼真原物,但是实际上并非要求绝对精确地重现原物,因为这既不可能也无必要。不可能的理由是:实物的信息量很大,完全重现技术难度大,也不经济。另外在成像和传像过程必然要产生信息损失和失真,图像像质总要变差。无必要的理由是:人眼观察景物,对其亮度、尺寸、颜色的视觉分辨能力都是有限的,也就是说,人眼视觉本身就自然地丢失了景物中一些过分精细的信息,设法把这部分信息重新显示出来没有实际意义。再加上人眼观察景物也并非对其一切内容都感兴趣,而往往是按照应用要求和观察者的愿望有选择地对图像的某些部分内容或图像内容的某些方面有所重视和偏爱,即强调的是图像的有用性,而非全部内容。

图像是二维或三维空间光学信息分布,为了分析方便,常用二维或三维数列表示。但是图像终究是要为人所观察和利用的,因此必须考虑图像对人的心理作用及所产生的心理效果。因此,纯粹的数列虽然可以表示图像,但并非图像,因为它没有计及人的心理因素。

图像有多种分类方法,如按颜色分类有黑白图像和彩色图像,而后者又可包括单色、多色和全色等几种。如按空间域维数分类有二维图像即平面图像和三维图像即立体图像。按照动作情况分类有固定图像、动画图像和活动图像。按照显示形式分类有自发光式、反射式、投射式和投影式等。如果把图像的含意拓宽,从广义的图像概念讨论,则可包括非可见光图像以及图像的其它能量存贮形式,如红外、紫外、微波、超声、多波谱图像和电位图像、电流密度图像等。

图像工程通常是指对二维或二维以上光学信息的成像、传输、记录、存贮、变换、处理和显示等各种技术的统称,其基本功能有三。

(1) 扩展人眼视觉的空间功能: 即解决图像的传输问题,如电视、传真等。

(2) 扩展人眼视觉的时间功能: 解决图像的保存问题,如照像、印刷、录像等。

(3) 扩展视觉的分辨识别功能: 包括图像频谱转换、图像处理,具体应用如热成像,图像真伪识别,图像投影重建等。

按照图像各像素传输的时序不同,图像工程分为两大类。

### 1. 顺序制

用扫描把各像素的空间信息顺序转换为时间信息,然后依次传送,其典型代表为电视。

### 2. 同时制

不需扫描,图像各像素的空间信息同时传送,其代表为照相。

由以上讨论,可将图像工程所包含的主要技术列表如下。

表 1-1 图像工程包含的主要技术

	传 输 (视觉空间功能扩大)	记 录 (视觉时间功能延长)	处 理 (视觉识别功能扩大)
同 时 制	光学仪器(望远镜、显 微镜、光学测量器等) 光放大器 X射线荧光板 显像管、文字显示管	照像、电影胶片、微型胶片 电子照像 放射线照片 复印(静电复印、重氮复 印) 复制、捺染 印刷(凸版、平版、凹版) 图像加工技术 全息照相存贮	光学处理(滤光、光 学检索等) 光化学处理(掩膜 等) 光电处理(电路板特 征取样)
顺 序 制	电视(广播电视、可视 电话、工业电视、投影电 视等) 温度记录 激光扫描 超声扫描 扫描显示器、光电显示板 数字显示器 雷达	传真 存贮管 磁带录像、电子视频记录 电视唱片、磁盘 光磁记录装置 热记录装置 磁芯存贮、半导体存贮	模拟处理(轮廓的强 调和取样等) 数字处理(计算机处 理) 计算机显示

## 二、图像电子学

图像电子学是指图像工程中与电子学有关的机理部分。由于电视的出现和电视技术的迅速发展以及其应用范围的日益扩大,电视技术已经成为图像电子学的主导内容,也可以说,正是由于电视技术的发展,才产生和形成了图像电子学。

在顺序制系统中,在图像传输和变换过程中,图像不仅以空间信息的形式出现,而且常需转变为电信号,即产生以时间信息形式出现的中间过程,其原因在于电信号可以用电子技术进行传输、记录、存贮和处理。如以电视传输的过程为例,其原理性框图见图 1.1。

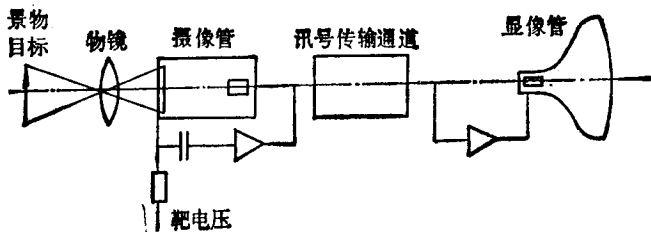


图 1.1 电视传像原理性框图

对电信号传输研究的历史较早,根据电通信理论,当连续电信号在线性和时间不变系统中传输时,其输入和输出信号之间关系可用卷积和拉普拉斯变换表示。

如  $f(t)$  为输入电信号;

$h(t)$  为线性系统的脉冲响应或冲激响应;

$g(t)$  为输出电信号,

则 
$$g(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t')h(t-t')dt'$$

如  $F(S)$ 、 $H(S)$  和  $G(S)$  分别为  $f(t)$ 、 $h(t)$  和  $g(t)$  的拉普拉斯变换,

$S$  为复频率坐标,

则得: 
$$G(S) = F(S)H(S)$$

式中  $H(S)$  称为系统的传递函数,它代表该系统传递电信号的特性。

由上可见,如果系统的  $H(S)$  已知,则对任意输入电信号(又称激励)可通过上述卷积和拉普拉斯变换等求出通过系统后的输出电信号(响应)。

当具有空间信息的光学图像经过线性和位移不变的空间系统时具有与上述时间信息传输相类似的特性。

设光学图像是二维空间信息,即

$f(x, y)$  为物图像的亮度分布,

$h(x, y)$  为线性位移不变图像传送系统的点扩展函数,

$g(x, y)$  为像图像的亮度分布,

则有卷积公式:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y)$$

$$= \iint_{-\infty}^{\infty} f(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy'$$

如  $F(u, v)$ 、 $H(u, v)$  和  $G(u, v)$  分别为  $f(x, y)$ 、 $h(x, y)$  和  $g(x, y)$  的傅立叶变换;

$u$  和  $v$  为空间频率坐标, 空间频率是单位空间长度内正弦亮度光栅的变换周期数; 则得卷积的傅立叶变换公式:

$$G(u, v) = F(u, v)H(u, v)$$

式中  $F(u, v)$  和  $G(u, v)$  分别表示物图像(输入图像)的空间频谱和像图像(输出图像)的空间频谱。

$H(u, v)$  称为系统的光学传递函数, 它表示该系统传递图像的各空间频率成分的能力。

综上所述, 可以把时间信息电信号和空间信息光学图像的传输作一比较, 如表 1-2。

表 1-2 时间信息和空间信息传输比较

	输入	线性系统的传输性能	输出
时间讯号	$f(t)$	$*$ $h(t)$ 脉冲响应	$=$ $g(t)$
↓ 拉氏变换			
时间频谱	$F(S)$	$\times$ $H(S)$ 传递函数	$=$ $G(S)$
空间图像	$f(x, y)$	$*$ $h(x, y)$ 点扩展函数	$=$ $g(x, y)$
↓ 付氏变换			
空间频谱	$F(u, v)$	$\times$ $H(u, v)$ 光学传递函数	$=$ $g(u, v)$

## § 1.2 图像电子学与图像处理

研究图像工程和图像电子学的目的是扩展人眼视觉功能，提高图像传输质量和提高图像的可用性。这里的可用性是随着应用要求不同而不同，同时也随着科学技术的发展而发展变化，它可以包括对图像的观察、欣赏、测量、辨识和分析等。

单凭肉眼直接观察原物尽管是经常需要而又十分重要，但是由于人眼视觉功能的限制，图像的可用性和效能远未充分发挥。因此，虽然图像的应用目的各不相同，对图像的要求也多种多样，但重要之点是图像必须经过传输和处理。

### 一、图像处理及其分类

图像处理可以有两种含意：

在图像传输过程中，采取一定的措施以改善图像质量和提高图像的有用性，这是一种经典的狭义的图像处理概念。

为达到一定应用要求所产生的原物图像的第二图像或图像群的过程统称为图像处理。这是广义的图像处理概念。按照这种概念，它不仅包含上述经典的图像处理内容而且包括了图像传输，而这与图像工程概念已无差异。

根据处理方式的不同，图像处理分为：

#### 1. 数字图像处理

即计算机图像处理，它包括各种电子技术、模拟和数字硬件、计算机和微处理机以及大量计算机软件程序。

#### 2. 光学信息处理

它可以包括各种光学系统，相干的和非相干的，一般光学系统，全息系统、电光系统、磁光系统和声光系统等。

机械和光化学系统：包括照相和静电复印。

印刷系统：紧压型和非紧压型。

喷墨型等。

按照不同的应用要求和达到的不同目的,图像处理可分为:图像增强,图像恢复,图像压缩编码,图像投影重建、图像分析与模式识别等。

## 二、图像处理系统

通用图像处理系统:它是通用的顺序制图像传输和处理系统,包括了图像电子通信各基本方面和可能采用的各基本形式。如图 1-2。

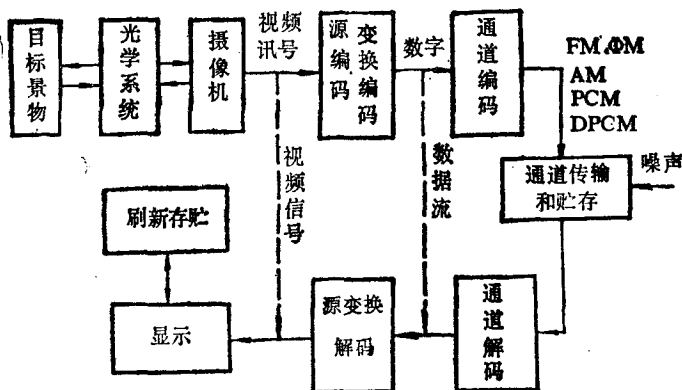


图 1-2 通用图像处理系统框图

由图 1-2 可见,通用图像处理系统包括下述部分。

### 1. 目标景物

它可以是自发光体、光反射体或由飞点扫描器产生。对时间言,它可以是静止的或变化的。就颜色言,它可以是黑白的或彩色的。对摄像机关,它可以是位置固定的或者是作相对运动。景物表面可以是具有不同的粗糙程度甚至是编织图形。

景物的外光照明情况如光照的强弱和光照的方向对图像质量影响较大。用散射光照射可使图像信噪比较高、图像质量较佳。有选择地采用几个方向的定向照明可使图像产生三维效应,即具有



立体感或图像模型化。彩色图像比黑白图像要妩媚动人，如果光照未能调节到最佳时两者的差异尤为明显。

## 2. 光学系统

即物镜。景物发射的光强分布或者是景物受光照产生反射的光强分布通过光学系统成像到摄像器靶面上。光学系统的轴向位置可以是固定的或者可调的。

一般都把光学系统看成线性和位移不变性系统，但实际上，由于存在像差，在整个视场区域，随着离轴径向距离的不同，系统的点扩展函数也不同，因此常把视场区按径向距离范围分成若干同心环带，每个环带区域内，点扩展函数相同，称为等晕区，透镜的空间频率响应随等晕区半径的增大而下降。

## 3. 摄像机

其作用是把人射光学图像通过光电转换和扫描变成输出电信号。摄像器件大致分为有存贮作用和无存贮作用两类，前者的灵敏度高，而后者在强局外光条件下工作时像质较好。

在存贮式摄像器件中，常用的分两类：一是真空摄像器件，目前用得最多的是各种视像管。另一是固体摄像器件，常用电荷耦合器件 CCD。

在非存贮式摄像器件中，有产生历史较早的析像器。飞点扫描器和扫描旋转鼓至今仍有应用。

## 4. 源编码和变换编码

源编码的作用是把摄像机输出但尚未处理的视频模拟信号进行处理和编码，使其变成适于进一步使用的形式。其最简单的形式是对信号线性放大和限制其频带宽度，以使适宜送入调制器调制。如果该部分比较复杂，它还可包括模数转换、灰度变换、二维滤波、数据压缩编码以及图像锐化和去噪等。

如果考虑到图像内容的相关性，为了减小相关性，以利于进一步压缩数据，常采用变换编码。因为图像传输必须对传输数据编码，而为了保证图像质量又同时尽量减少传输的数据量又必须压