

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

光学信息技术 原理及应用

陈家璧 苏显渝 主编

朱伟利 孙雨南 陶世荃 吴建宏 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材。本书是上海理工大学、四川大学、中央民族大学、北京理工大学、北京工业大学、苏州大学等校教授依据多年的教学和科研经验,并参考国内外优秀教材编写而成。本书分为两部分。前 5 章介绍光学信息技术的基本理论,包括二维线性系统理论、光的标量衍射理论、光学系统频谱分析、部分相干理论和光全息术。后 6 章介绍它的主要实际应用,包括空间光调制器、光学信息存储技术、光学信息处理技术、图像的全息显示、光学三维传感和全息散斑干涉计量。本书的特点:一是用线性系统的傅里叶分析方法分析光学问题,把光学看做信息科学技术的一个重要组成部分进行研究;二是密切联系实际,讨论了光学信息技术的各种已经实现和正在发展的应用;三是配有许多独具匠心的习题,附有大量发表在国内外科技刊物及学术会议的有关文献,可以引导读者自学,启发读者思维,培养学生的创新能力。

本书可以作为高等学校“光信息科学与技术”及其他有关光学和光学工程专业的专业课教材,也可以供社会读者阅读。

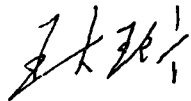
序

传统看法认为光学是物理学的一个分支。在我国高校理、工科分校的时期,光学被认为是一个理科专业;但是光从远古到今天一直是一种最重要的传播信息的载体,光学研究的成像过程实际上是信息的传播过程,因此光学实质上又是信息科学的一个重要分支。国际上多数把光学应用归入信息科学领域,甚至与电子信息归纳在一起,已不是仅仅把光学看做一种理论,而更多地把它看做一种密切结合实际的技术学科。现在光信息科学与技术专业列入了我国教育部新的学科目录,将它作为一个非理非工、亦理亦工的技术专业来开办,与国际接轨,这是一个进步。《光学信息技术原理及应用》是该专业的一门主要专业课程的教材。

这本教材在比较广的意义上研究光学信息处理,不仅讨论用光学方法处理已经获取的信息,而且讨论用光学技术承载信息、传播信息、记录信息、萃取信息、显示信息的种种方法。这些都是近代光学的前沿。它们是以光的物理本性为基础,发展为研究光的变换特性。例如,它将夫琅禾费衍射看做光学的傅里叶变换,而把菲涅耳衍射看做光学的分数傅里叶变换,于是光在自由空间的传播过程就可以完全用广义的傅里叶变换来表达。这样用信息科学的方法来讨论光学问题对于在信息产业中更多地应用光学技术无疑是有益的。在这本教材中,着重介绍了光学信息技术的几个主要应用领域,包括光信息存储、光学信息处理和光计算、光学三维传感、光学全息显示、全息散斑计量,题材新颖,内容丰富,物理概念清晰,反映了光学信息技术的最新进展,也反映了面向 21 世纪的时代需要,具有相当的先进性。作为教材,在每一章后都编写了适量的具有实际应用意义的习题,附以主要参考文献,并列有中英文术语对照,对学生很有好处。

这本教材的编者自从改革开放以来一直主要从事光学信息技术应用领域的研究,也一直从事光学信息技术领域的教学工作。教材中的许多内容都是他们自己的研究成果和教学心得,在不少方面具有原创性。相信这些带有原创性思路的内容对于启发学生创造性思维是有益的。希望这本教材的出版,能为我国培养更多优秀的光学工程领域的技术人才发挥作用。

中国科学院院士
中国工程院院士



2001.5.10

前 言

作为自然现象,光是最重要的信息载体。据统计,人类感官接收的客观世界总的信息量的90%以上要通过眼睛。早在3000年前人类就开始研究光学,但是光学发展最快的时期还是20世纪,尤其是20世纪下半叶。近代光学对信息时代的到来起了十分重要的作用。20世纪40年代末提出的全息术、50年代产生的光学传递函数、60年代发明的激光器、70年代发展起来的光纤通信、80年代成为微机标准外设的光驱、航天航空事业中应用的空间光学等近代光学技术对信息产业的高速成长发挥了不可替代的作用。与此同时,近代光学也成为电子信息科学的最重要基础之一。因此,在高等院校电子信息学科的有关专业开设光学信息处理技术理论与应用的课程是很有必要的。

光学信息处理的理论基础是将信息科学中的线性系统理论引入光学中形成的。光学成像系统实际上是一种二维的图像信号的传输和处理系统。传统的光学仅在空域中研究光学现象,信息光学将研究方法扩展到空间频域,对光学成像系统进行空间频谱分析,并由此发展出全息术与光学信息处理的各种方法。这些方法使光学系统的单一成像功能扩展到信息处理的许多方面,有二维信号(图像)的各种运算方法,有图像处理与识别技术,有高密度信息存储的光学方法,有三维形面测量及全息散斑干涉技术,等等。本书的重点是介绍光学信息处理的理论基础以及近年来发展很快的相关应用和方法。

本书前5章是理论基础部分。第1章的主要内容是二维线性系统分析以及为之服务的二维傅里叶变换和信息科学的另一基础——抽样定理。对于学过“信号与系统”课程的读者,复习一下并推广到二维情况也是不无补益的。与以往同类的教科书不同,这一章不再详细介绍有关数学预备知识。这是由于近20年来几乎所有开办本专业的高等院校都开设含积分变换的数学课程,再从基础讲起已无必要。第2章关于标量衍射理论的讨论不讲述物理光学或工程光学中已经讲过的惠更斯原理及基尔霍夫衍射公式的推导,而是由波动方程的平面波解及平面上复振幅分布的傅里叶分析与综合导出近场及远场衍射公式。在介绍分数傅里叶变换基础上,讨论菲涅耳衍射的分数傅里叶变换表示,从而将衍射现象完全与傅里叶变换联系在一起。第3章关于光学成像系统的频谱分析与以往多数教材不同,对透镜的傅里叶变换性质给出一个统一的表达方式,并得出不同情况下的结果。由此出发进一步分析相干与非相干成像系统,给出成像系统的相干传递函数与光学传递函数。第4章综合各种教材对光的相干性理论的阐

述,由时间相干性、空间相干性到准单色光的相干性,全面介绍了光的相干性的概念,以此为基础讨论了部分相干光的传播及其光学系统的频谱分析的影响,为近代光学将许多光的传播过程当做随机过程来研究打下基础。第5章研究的全息学是本书讲述的重点应用技术——全息存储、全息显示、全息干涉计量的基础,讨论了全息学原理,介绍了全息的实用技术及各种全息方法的具体分析。

本书后6章是实际应用部分。第6章集中介绍各种光调制器和接收器,是建立光学信息处理系统的基础。第7章重点介绍各种光学信息存储技术,包括已经广泛应用的光盘存储技术和正在发展的各种三维、四维及其他海量光学存储技术,讨论了目前光学存储技术的主要发展趋势。第8章讲述光学信息处理的一般方法,包括二维图像信号的各种运算、非线性处理的光学实现、光计算及光学信息处理的某些最成功的应用,如综合孔径雷达信号的光学信息处理方法和用黑白胶片作彩色摄影及存储彩色图像的方法。第9章的内容是全息显示技术,主要是彩虹全息、模压技术及像素全息,这些技术已经并且正在应用到日常生活之中。第10章是三维面形测量技术,作为一种非接触测量方法,它不仅改变了传统的三坐标测量思想,而且已经有大量的实际应用,并与正在快速发展的计算机虚拟现实技术密切相关。最后一章的全息散斑计量是全息术的最早应用之一,是研究宏观世界与微观世界之间的所谓介观世界的有力武器。这一章从理论上改变了传统的光程差分析方法,把统计光学及随机过程的概念引入光学系统的分析之中,而且在此基础上介绍了诸如光外差技术、相移干涉技术、时间平均方法、光学的逐点与全场滤波、数字散斑方法等近代光学信息处理的最新方法。

作为理论基础部分,本书的第1、2、3、5章是本科生必读的部分,其他章节可根据具体情况选读。

改革开放以来我国高等学校开设了许多有关光学信息处理的课程,出版发行许多教材和专著,其中包括国外经典优秀教材的中译本。而国内外发表的 optics 信息处理方面的科技论文更是浩如烟海。本书最后附以主要参考书籍及引用文献的目录,总计达二百篇左右,其中绝大多数是20世纪80年代以来的资料,一半以上是90年代以后发表的。希望这些文献能够帮助读者了解本学科发展的历史过程,帮助读者了解各种新发展产生的背景与研究问题的思路以及因本书篇幅限制无法充分阐明的问题。另外在每章的后面都附有帮助读者学习的习题,最后还给出部分习题的参考答案。

本书第1、2、4、11章由陈家璧编写,第3、10章由苏显渝编写,第5、8章由朱伟利编写,第6章由孙雨南编写,第7章由陶世荃编写,第9章由吴建宏编写。这些编者都长期从事有关光学信息处理的教学和科学研究,对撰写的章节有关的内容和最新发展十分熟悉,撰写的内容也包括了他们自己的研究成果。

本书在编写过程中得到了中国科学院院士、中国光学学会理事长、南开大学母国光教授的指导。母先生不仅对本书的内容和结构提出了指导性的意见,并且还对本书进行仔细审阅,使作者受益匪浅。著名科学家、光学界泰斗、两院院士王大珩先生对现代光学的教育非常重视,特地为本书作序,使我们备受鼓舞。在此对他们一并表示衷心感谢。

编者

2001年5月

目 录

第 1 章 二维线性系统分析	(1)
1.1 线性系统	(1)
1.1.1 线性系统的定义	(1)
1.1.2 脉冲响应和叠加积分	(2)
1.2 二维傅里叶变换	(3)
1.2.1 二维傅里叶变换定义及存在条件	(3)
1.2.2 极坐标下的二维傅里叶变换和傅里叶 - 贝塞尔变换	(5)
1.2.3 虚、实、奇、偶函数傅里叶变换的性质	(6)
1.2.4 二维傅里叶变换定理	(7)
1.2.5 常用二维傅里叶变换举例	(9)
1.3 二维线性不变系统	(10)
1.3.1 二维线性不变系统的定义	(10)
1.3.2 二维线性不变系统的传递函数	(12)
1.3.3 线性不变系统的本征函数	(13)
1.3.4 级联系统	(15)
1.4 抽样定理	(16)
1.4.1 函数的抽样	(17)
1.4.2 原函数的复原	(19)
1.4.3 空间 - 带宽积	(21)
习题	(22)
第 2 章 标量衍射的角谱理论	(24)
2.1 光波的数学描述	(24)
2.1.1 光振动的复振幅和亥姆霍兹方程	(25)
2.1.2 球面波的复振幅表示	(26)
2.1.3 平面波的复振幅表示	(28)
2.1.4 平面波的空间频率	(29)
2.2 复振幅分布的角谱及角谱的传播	(30)
2.2.1 复振幅分布的角谱	(30)
2.2.2 平面波角谱的传播	(31)
2.2.3 衍射孔径对角谱的作用	(34)
2.3 标量衍射的角谱理论	(35)
2.3.1 惠更斯 - 菲涅耳 - 基尔霍夫标量衍射理论的简要回顾	(35)

2.3.2 平面波角谱的衍射理论	(36)
2.3.3 菲涅耳衍射公式	(37)
2.4 夫琅禾费衍射与傅里叶变换	(38)
2.5 菲涅耳衍射和分数傅里叶变换	(40)
2.5.1 分数傅里叶变换的定义	(41)
2.5.2 分数傅里叶变换的几个基本性质	(43)
2.5.3 用分数傅里叶变换表示菲涅耳衍射	(43)
习题	(47)
第3章 光学成像系统的频率特性	(49)
3.1 透镜的相位变换作用	(49)
3.2 透镜的傅里叶变换性质	(51)
3.2.1 物在透镜之前	(52)
3.2.2 物在透镜后方	(55)
3.2.3 透镜的孔径效应	(56)
3.3 透镜的一般变换特性	(57)
3.4 相干照明衍射受限系统的成像分析	(59)
3.4.1 透镜的点扩散函数	(60)
3.4.2 衍射受限系统的点扩散函数	(62)
3.4.3 相干照明下衍射受限系统的成像规律	(64)
3.5 衍射受限系统的相干传递函数	(66)
3.6 衍射受限系统的非相干传递函数	(70)
3.6.1 非相干成像系统的光学传递函数(OTF)	(70)
3.6.2 OTF与CTF的关系	(73)
3.6.3 衍射受限的OTF	(73)
3.7 有像差系统的传递函数	(77)
3.8 相干与非相干成像系统的比较	(79)
3.8.1 截止频率	(79)
3.8.2 像强度的频谱	(80)
3.8.3 两点分辨	(82)
习题	(83)
第4章 部分相干理论	(85)
4.1 实多色场的复值表示	(85)
4.2 时间相干性、自相干函数与复自相干度	(86)
4.2.1 非单色光的分振幅干涉及其数学描述	(86)
4.2.2 自相干函数与复自相干度	(87)
4.2.3 复自相干度与光功率谱密度的关系	(89)
4.2.4 相干时间和相干长度	(90)

4.3 空间相干性、互相干函数和复相干度	(92)
4.3.1 分波面干涉及其数学描述	(92)
4.3.2 互相干函数和复相干度	(94)
4.3.3 互相干函数和互相干度的测量	(96)
4.4 准单色条件、互强度和复相干因子	(97)
4.4.1 准单色条件	(97)
4.4.2 互强度和复相干因子	(97)
4.4.3 相干面积	(98)
4.5 准单色光的传播和衍射	(99)
4.5.1 自由空间中准单色场互相干性的传播	(100)
4.5.2 薄透明物体对互强度的影响	(102)
4.5.3 部分相干光的衍射	(103)
4.6 范西特 - 策尼克定理	(106)
4.6.1 范西特 - 策尼克定理	(106)
4.6.2 均匀圆形光源	(108)
4.6.3 迈克耳孙测星干涉仪	(110)
4.7 部分相干场中透镜的傅里叶变换性质	(111)
4.8 部分相干光成像	(113)
4.8.1 准单色光照明光学系统的物像关系	(113)
4.8.2 准单色光照明下光学系统的频率响应	(115)
习题	(117)
第 5 章 光全息术	(119)
5.1 引言	(119)
5.2 全息术原理——波前记录与再现	(120)
5.2.1 波前记录	(120)
5.2.2 波前再现	(121)
5.2.3 全息实验装置	(124)
5.3 基元全息图分析	(126)
5.4 平面全息图及其衍射效率	(127)
5.4.1 菲涅耳全息图	(128)
5.4.2 傅里叶变换全息图	(133)
5.4.3 无透镜傅里叶变换全息图	(136)
5.4.4 傅里叶变换全息图的两个特例	(138)
5.4.5 像全息图	(141)
5.4.6 相位全息图	(142)
5.4.7 平面全息图的衍射效率	(144)
5.5 体积全息图	(145)

5.5.1 体全息图的记录与再现	(146)
5.5.2 透射体全息和反射体全息	(147)
5.5.3 体全息图的衍射效率	(148)
5.6 计算全息术及其应用	(149)
5.6.1 计算全息图	(149)
5.6.2 计算全息术的应用	(151)
5.7 全息记录介质	(153)
5.7.1 卤化银乳胶	(153)
5.7.2 重铬酸盐明胶	(156)
5.7.3 光致抗蚀剂	(157)
5.7.4 光导热塑	(158)
5.7.5 光致聚合物	(159)
5.7.6 光折变晶体	(160)
习题	(160)
第6章 空间光调制器	(162)
6.1 概述	(162)
6.1.1 空间光调制器的基本结构与分类	(162)
6.1.2 空间光调制器的功能	(164)
6.1.3 空间光调制器的基本性能参数	(166)
6.2 液晶光阀	(169)
6.2.1 液晶的光电特性	(169)
6.2.2 光寻址液晶光阀	(174)
6.2.3 电寻址液晶光阀	(175)
6.3 电光效应器件	(176)
6.3.1 晶体的电光效应及其电光调制原理	(176)
6.3.2 泡克尔斯读出光调制器	(185)
6.3.3 微通道板空间光调制器	(188)
6.3.4 Si-PLZT 空间光调制器	(190)
6.4 磁光空间光调制器(MOSLM)	(191)
6.4.1 磁性材料的磁化特性与磁光效应	(191)
6.4.2 器件结构	(192)
6.4.3 工作原理	(193)
6.4.4 器件性能	(194)
6.5 表面形变空间光调制器	(194)
6.5.1 G-E 表面形变空间光调制器	(196)
6.5.2 数字微反射镜空间光调制器	(197)
6.6 自电光效应器件空间光调制器	(198)

习题	(199)
第7章 光信息存储技术	(201)
7.1 引言	(201)
7.2 二维光存储:光盘存储	(203)
7.3 三维光存储:体全息存储	(209)
7.3.1 体全息的基本原理	(210)
7.3.2 光折变材料的全息存储机理与特性	(220)
7.3.3 全息存储器的数据传输速率	(227)
7.3.4 全息存储的应用举例	(230)
7.4 四维光存储	(236)
习题	(239)
第8章 光学信息处理技术	(240)
8.1 引言	(240)
8.2 光学频谱分析系统和空间滤波	(241)
8.2.1 阿贝(Abbe)成像理论	(241)
8.2.2 阿贝-波特(Abbe-Porter)实验	(241)
8.2.3 空间频率滤波系统	(243)
8.2.4 空间滤波的傅里叶分析	(244)
8.2.5 滤波器的种类及应用举例	(247)
8.3 相干光学信息处理	(251)
8.3.1 相干光学信息处理系统	(251)
8.3.2 多重像的产生	(252)
8.3.3 图像的相加和相减	(253)
8.3.4 光学微分-像边缘增强	(256)
8.3.5 光学图像识别	(259)
8.3.6 图像消模糊	(260)
8.3.7 综合孔径雷达	(261)
8.4 非相干光学信息处理	(265)
8.4.1 图像的相乘和积分	(266)
8.4.2 图像的相关和卷积	(267)
8.5 白光信息处理	(268)
8.5.1 θ 调制	(268)
8.5.2 用黑白胶片保存彩色像	(269)
8.5.3 黑白图像的白光密度假彩色编码	(272)
8.5.4 多重像的产生	(274)
8.6 光计算	(275)
8.6.1 引言	(275)

8.6.2 光学矩阵运算	(276)
8.6.3 光学互连	(278)
8.6.4 光学神经网络	(283)
习题	(287)
第9章 图像的全息显示	(290)
9.1 引言	(290)
9.2 彩虹全息图	(291)
9.2.1 线全息图消色模糊原理	(291)
9.2.2 彩虹全息图的记录	(293)
9.2.3 彩虹全息图的像质	(294)
9.3 合成全息技术	(297)
9.3.1 二维图片的记录	(298)
9.3.2 平面多路合成全息	(298)
9.3.3 360°合成全息	(299)
9.4 彩色全息术	(301)
9.4.1 彩色全息的激光器和记录材料	(301)
9.4.2 彩色彩虹全息	(303)
9.4.3 反射体积彩色全息	(305)
9.5 全息图的复制	(306)
9.5.1 全息图的光学复制	(306)
9.5.2 全息图的模压复制	(306)
9.5.3 全息图的注塑复制	(308)
9.6 数字像素全息技术	(311)
9.6.1 数字全息图的制作方法	(312)
9.6.2 数字全息图的设计	(313)
9.7 其他全息显示技术	(315)
9.7.1 全息电影	(315)
9.7.2 边缘照明全息	(317)
9.7.3 虚拟全息三维显示	(317)
习题	(319)
第10章 光学三维传感	(321)
10.1 主动三维传感的基本概念	(322)
10.1.1 主动照明的三维传感方法	(322)
10.1.2 三种基本的结构照明方式	(323)
10.1.3 三维传感系统的基本组成	(325)
10.2 采用单光束的三维传感	(326)
10.2.1 基本原理与计算公式	(326)

10.2.2 散斑对激光三角法精度的影响	(329)
10.2.3 测量实例(鞋楦三维面形测量)	(330)
10.2.4 基于激光同步扫描的三维面形测量	(332)
10.3 采用激光片光的三维传感	(335)
10.3.1 激光片光的产生	(335)
10.3.2 测量原理	(335)
10.3.3 测量实例	(337)
10.4 相位测量剖面术	(339)
10.4.1 相位测量剖面术的原理	(339)
10.4.2 产生结构照明的方法	(343)
10.4.3 相位测量剖面术应用举例	(345)
10.5 傅里叶变换剖面术	(350)
10.5.1 基本原理	(350)
10.5.2 FTP 方法的测量范围	(352)
10.5.3 一种改进的方法	(353)
10.6 调制度测量轮廓术	(354)
10.6.1 基本原理	(354)
10.6.2 信息处理方法	(355)
10.6.3 测量实例	(357)
10.7 其他光学三维轮廓测量方法	(358)
10.7.1 采用激光扫描的三维共焦成像	(358)
10.7.2 飞行时间法	(359)
习题	(361)
第 11 章 全息散斑干涉计量	(363)
11.1 光学粗糙表面散射光场的统计特性	(363)
11.1.1 物面系综上物表面散射光场的统计特性	(363)
11.1.2 散射光场的一阶统计特性	(365)
11.1.3 散射光场的强度自相关函数	(367)
11.2 全息干涉的统计光学描述	(368)
11.2.1 全息干涉的基本原理	(368)
11.2.2 二次曝光全息干涉术的干涉场	(369)
11.2.3 表面变形特性与散射光场特性的关系	(371)
11.2.4 二次曝光全息干涉术的统计光学描述	(372)
11.3 时间平均全息干涉术	(375)
11.4 外差与准外差全息干涉术	(377)
11.4.1 外差全息干涉技术	(377)
11.4.2 准外差全息干涉技术	(379)

11.5 散斑干涉术	(381)
11.5.1 参考束型散斑干涉测量方法	(381)
11.5.2 剪切散斑干涉测量方法	(382)
11.6 电子散斑干涉测量技术	(384)
11.6.1 电子散斑干涉仪的典型光路和原理	(385)
11.6.2 电子散斑干涉相减技术的统计分析	(386)
11.7 散斑照相测量术	(387)
11.7.1 像面二次曝光激光散斑图的记录及其透过率函数	(387)
11.7.2 二次曝光散斑图的逐点滤波	(388)
11.7.3 二次曝光散斑图的全场滤波	(389)
11.7.4 白光散斑照相测量术	(392)
11.8 数字散斑照相测量术	(393)
11.8.1 数字全场滤波技术	(393)
11.8.2 数字逐点滤波技术	(394)
习题	(395)
参考文献	(396)
部分习题参考答案	(407)
附录 A: 二维 δ 函数的定义及性质	(412)
附录 B: 常用函数及其傅里叶变换	(413)
附录 C: 式(11.47)到式(11.48)的推导	(414)
汉英名词术语对照	(416)

第 1 章 二维线性系统分析

现今系统论的系统概念已为社会广泛接受,它强调的是系统中诸多因素之间的相互影响。这里研究的是狭义的物理系统。一个物理系统是指某种装置,当施加一个激励时,它呈现某种响应。激励常称为系统的输入,响应称为系统的输出。例如电路网络,它的输入和输出是一维时序电信号。光学系统的输入和输出是物与像,是二维空间分布的图像信号。光学系统可以由透镜组成的成像系统,也可以是光波通过的自由空间,因为它们都有把输入变成输出的作用。把系统定义为一个变换,这样定义的系统可以用算符 $\mathcal{L}\{\}$ 来表示,该算符把在 $x_1 - y_1$ 平面上定义的二维输入函数 $f(x_1, y_1)$ 变换为定义在 $x_2 - y_2$ 平面上的二维输出函数 $g(x_2, y_2)$,记为

$$g(x_2, y_2) = \mathcal{L}\{f(x_1, y_1)\} \quad (1.1)$$

一个系统可以有多个输入和输出,但是本书将主要讨论一个输入端和一个输出端的系统,而且本章不讨论系统内部的结构和工作情况,只关心系统的边端性质,即输入与输出的关系,系统的这种边端性质可以用如图 1.1 所示的框图形象地表示。

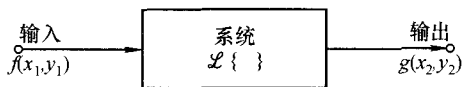


图 1.1 系统的算符表示

1.1 线性系统

1.1.1 线性系统的定义

假设一个用算符 $\mathcal{L}\{\}$ 表示的系统,对任何两个输入函数 $f_1(x_1, y_1)$ 和 $f_2(x_1, y_1)$ 有输出函数

$$g_1(x_2, y_2) = \mathcal{L}\{f_1(x_1, y_1)\} \quad (1.2a)$$

$$g_2(x_2, y_2) = \mathcal{L}\{f_2(x_1, y_1)\} \quad (1.2b)$$

而且对于任意复常数 a_1 和 a_2 ,在输入函数为 $a_1 f_1(x_1, y_1) + a_2 f_2(x_1, y_1)$ 时,输出函数为

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}\{a_1 f_1(x_1, y_1) + a_2 f_2(x_1, y_1)\} &= \mathcal{L}\{a_1 f_1(x_1, y_1)\} + \mathcal{L}\{a_2 f_2(x_1, y_1)\} \\
 &= a_1 \mathcal{L}\{f_1(x_1, y_1)\} + a_2 \mathcal{L}\{f_2(x_1, y_1)\} \\
 &= a_1 g_1(x_2, y_2) + a_2 g_2(x_2, y_2)
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

则称该系统为线性系统。上式表明线性系统具有叠加性质,即系统对几个激励的线性组合的整体响应等于单个激励所产生的响应的线性组合。图 1.2 表示激励为两个一维函数的例子。通常可以把光学系统看成是二维的线性系统。

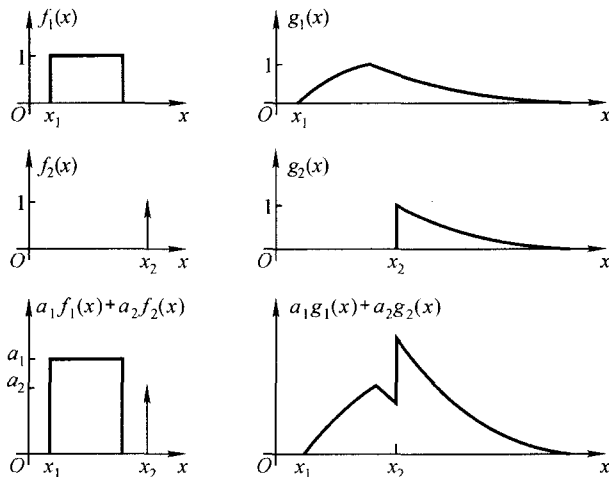


图 1.2 线性系统的叠加性质

如果任何输入函数都可以分解为某种“基元”函数的线性组合,相应的输出函数便可通过这些基元函数的线性组合来求得,这就是线性系统的方便之处。基元函数通常是指不能再进行分解的基本函数单元。在线性系统分析中,常用的基元函数有 δ 函数(即脉冲函数,参阅附录 A)、阶跃函数、余弦函数和复指数函数等。对光学系统来说,主要用二维 δ 函数和复指数函数进行分析。

1.1.2 脉冲响应和叠加积分

首先研究 δ 函数作为基元函数的情况。根据 δ 函数的筛选性质[见式 (A.7)],任何输入函数都可以表达为

$$f(x_1, y_1) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta$$

上式表明,函数 $f(x_1, y_1)$ 可以分解成为在 $x_1 - y_1$ 平面上不同位置处无穷多个 δ 函数的线性组合, $f(\xi, \eta)$ 为坐标位于 (ξ, η) 处的 δ 函数在叠加时的权重。函数 $f(x_1, y_1)$ 通过系统后的输出为

$$g(x_2, y_2) = \mathcal{L} \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta) d\xi d\eta \right\}$$

根据线性系统的叠加性质,算符 $\mathcal{L}\{\}$ 与对基元函数积分的顺序可以交换,即可将算符 $\mathcal{L}\{\}$ 先作用于各基元函数,再把各基元函数得到的响应叠加起来,即

$$g(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \mathcal{L}\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} d\xi d\eta \quad (1.4)$$

$\mathcal{L}\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\}$ 的意义是物面上位于 (ξ, η) 处的单位脉冲函数通过系统后的输出,可把它定义为系统的脉冲响应函数(见图 1.3)

$$h(x_2, y_2; \xi, \eta) = \mathcal{L}\{\delta(x_1 - \xi, y_1 - \eta)\} \quad (1.5)$$

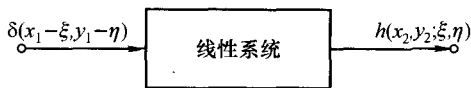


图 1.3 线性系统的脉冲响应

将脉冲响应代入式(1.4),得到系统输出为

$$g(x_2, y_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) h(x_2, y_2; \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (1.6)$$

式(1.6)通常称为“叠加积分”,它描述了线性系统的输入和输出之间的关系。显然,线性系统的性质完全由它的脉冲响应所表征。只要知道系统对位于输入面上所有可能点上的脉冲响应,就可以通过叠加积分计算任何输入信号对应的输出。这是一个形式上很完美的表达式。在一般情况下,脉冲响应与输入面上的位置有关,会使得脉冲响应的形式十分复杂,叠加积分难于实际运算。只是对于线性系统的一个重要子类——线性不变系统,分析才变得简单。幸好,大多数情况下,光学系统都可以看做线性不变系统,本书将重点研究线性不变系统。

1.2 二维傅里叶变换

傅里叶变换是研究线性不变系统的重要数学工具,本书中大量用它研究光学系统。尽管本书读者都具备有关数学基础,为了叙述的方便和表达方式的统一,在详细讨论二维线性不变系统之前,本节先简要介绍二维傅里叶变换。

1.2.1 二维傅里叶变换定义及存在条件

若函数 $f(x, y)$ 在整个 $x - y$ 平面上绝对可积且满足狄里赫利条件,其傅里叶变换定义为