

映像光学

YING XIANG GUANG XUE

康 辉 编著

南开大学出版社

映 像 光 学

康 辉 编著

南开大学出版社

内 容 简 介

这是一本现代应用光学的教科书。该书运用信息和系统科学的观点、方法分析研究光学系统和器件对光子信号进行变换的理论、方法和技术,从应用的目的出发,以光子映像为主线,将经典光学和现代光学中的许多重要内容有机地结合在一起,形成了现代应用光学的新体系。

该书内容广泛、丰富、新颖。其中包括光学系统理论、光路计算、像差、光波衍射映像理论、像质评价、光能传递规律及计算、光学信息和熵、光学傅里叶变换和传递函数、光学和计算全息映像术、光子互连、光计算、光信号的线性和非线性处理、光学神经网络等。

本书适于光学专业本科生学习,亦可供有关教师、研究生及科研人员参考。

映 像 光 学

康 辉 编著

南开大学出版社出版

(天津八里台南开大学校内)

邮编 300071 电话 3508542

新华书店天津发行所发行

天津宝坻第二印刷厂印刷

1996年3月第1版

1996年3月第1次印刷

开本:850×1168 1/32

印张:19.625 插页:2

字数:546千

印数:1—1000

ISBN 7-310-00861-8

O·93 定价:24.00元

53.7
5

前 言

一、映像光学

KG22/06

本书所讨论的映像光学即变换光学。“变换”一词具有广泛的含义。在数学中,它代表任何一种运算;在物理学中,它表示相关联的物理参量之间的转换关系;在化学中,它可表示某种化学反应过程;在心理学中,它可表示由感觉到意识的整个认识过程,这是一个具有反馈的、能动的反映过程。总之,从哲学的观点看,变换是表示事物之间的互连和对应关系。即它既可表示同一事物不同状态之间的变化,也可表示不同事物之间的转换;既可以是简单的放大和缩小的几何变化,也可以是生命过程中的复杂、高级、多层次、能动和质的演变。由于这里仅限于研究利用光子信号实现的各种变换,而以光子作媒介进行信息传递和加工时所具有的二维并行的特点,恰与人的视觉系统以映像方式能动地反映客观世界相一致,所以本书定名为映像光学。

映像光学是以系统、信息科学为指导、利用各种不同的科学方法(譬如数学方法、几何光学方法、波动光学方法、傅里叶光学方法、信息光学方法等)分析研究系统和器件对光子信号的变换特性。这种变换包括线性和非线性变换、连续和离散信号变换、一一对应和非一一对应变换、光-光、光-电、光-化……变换等。在本书中,赋予映像、映射、映照、投影等词与变换具有相同的含义,只是根据不同的习惯和具体场合挑选使用它们罢了。成像一词表示一种特殊的映像,通常是指系统的输入和输出是一一对应的线性变换关系。而影像则表示映射的结果,此时它与映像的名词含义相同。

二、信息、系统和光子映像

信息论、控制论和系统论是本世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科,它们的应用和影响已经遍及众多的学科领域。在本书中,尝试利用信息和系统科学的观点和方法分析研究光学系统的映像问题。

什么是信息?信息是事物的运动状态、方式和性质(称为自然信息)以及关于这些的广义知识(称为人工信息)。信息论的创始人山农(Shannon)将信息的作用看成是消除信宿(即用户)对信源存在的不确定性。信息的多少(即信息量)可用它所消除这种不确定性的多少来度量。信息科学和技术就是用于研究信息的产生、度量、获取、存储、传输、变换、处理、识别、显示和应用等。

控制论的创始人维纳(Wiener)认为,信息和控制是不能分开的,机器的控制与人脑功能具有相似之处。所以他说控制论是“关于动物和机器中控制和通信的科学”(见常迺著《信息论基础》)。信息是控制的基础。

系统论是由奥地利生物学家贝塔兰菲(Bertalanffy)创立的。他指出,“一切生物体都是在一定的时间和空间中呈现出复杂的、有层次的结构;是由各要素组成的有机整体。整体的功能大于组成它的各部分的功能的组合。”^[1]显然,系统具有整体性、组织性和有序性的特点,信息量的大小是它具有组织化程度的量度,信息量的增加标志系统组织化、有序化程度的提高。控制则使系统朝着目标动态演化。

光和生命息息相关,它不仅是生物的重要能源,而且是极重要的信息媒介。随着信息社会的到来,信息已成为人类的第一需要。这正如维纳所说,人要有效地生活,必须拥有足够的信息。人类之所以成为万物之灵,关键在于他能从事创造性的劳动。这首先体现在大脑的思维能对信息进行创造性的加工,生产出人类化的新信息。人脑这个信息加工厂,原料来自感觉器官,以光子为信息媒介的视觉系统起着主要作用。有人曾作过估计,视觉信息约占总信息量的85%。人的眼

睛是一个光学系统,它将携带客体信息的光信号成像到视网膜上,这就是光子映像,具有自然信息属性。视网膜是一种光变换器,它将光子信号转换为神经冲动,通过视神经系统传到脑的视皮层,形成物体的主观映像。这是一种能动的光子映像过程,是大脑思维的重要组成部分。可见,光子映像是思维科学和生命科学的重要研究内容。

在信息时代,大大突出了人类社会的系统整体功能的作用。一个国家、一个地区的经济发展和科技进步,一个群体和每个人的聪明才智的发挥,都依赖于充分地、有效地利用整个人类社会所拥有的信息资源。然而,现有的电子通信网络和信息处理工具已远远不能适应人们对信息财富需求剧增的要求。相反,以光子作为信息载体的通信和信息处理技术却展现出电子所不能比拟的某些优越性。其中,光纤通信和光盘存储的应用就是明显的例证。所以在未来的多元多维多层次、并具有智能的通信网络和信息处理设备以及智能机器人中,光子信息技术将会有巨大的应用潜力。这也是我们学习和研究光子映像的目的。

三、教材的形成过程和特点

本书是在南开大学物理系现代应用光学课程中讲授的教材。应用光学课是由母国光教授于50年代末期开设的。我在学期间学习了这门课,工作后又参加了由他领导的一些光学工程和光学信息处理方面的研究课题,深感理科的光学学生学习应用光学这门课的重要。在教学实践中,我曾给母国光先生辅导过应用光学,学到了他的一些宝贵的教学思想和经验。80年代初,我开始讲授这门课。为适应教改的需要,在继承原来教学成果的基础上,对教学内容进行了修改和调整,保留了传统应用光学中某些基本的常用内容,增补了许多现代光学中的新材料,并以光学成像为主线统构全局,形成现代应用光学体系。于1985年编印成“成像光学”讲义试用,它就是本书的原型。

根据现代科学综合、交叉发展的特点和从事现代应用光学方面的教学科研实践的需要,我开始学了点关于信息论、控制论、系统论、

思维科学和心理学等方面的基础知识,并将它们与原来专业知识相结合,构成了一种新的知识结构体系。教材“映像光学”在一定程度上就反映了这一发展过程。

本教材以信息、系统科学的基本观点和方法研究光学系统和器件对光子信号变换的理论、方法和技术问题,内容广泛、丰富而深入。它既包括光学系统理论、光路计算、光学像差、衍射映像、像质评价、光度学等一些传统应用光学内容,又囊括了诸如光子信息理论、光学傅里叶变换、传递函数、全息术、光子互连、光计算、光信号处理和光学神经网络等现代光学内容。在具体选材上,力求做到新颖、详实。对于一些关键内容和近些年发表的新科研成果,都标注了参考文献。在理论和实践的关系上,既强调了系统性强、概念准确、思路清晰和具有启发性,又兼顾到简单和实用的要求。书中收集整理了许多有实际应用价值的参数图表,以便读者随时查找。为了便于读者自学,书中给出了适量例题并选编了许多练习题,以供选做。

四、致谢

在本书成稿和出版之际,我要衷心感谢老师的培养;校、系和教研室领导以及工作人员所给予的支持和帮助,使本教材被选定、纳入出版计划、并得到资助;高胜泉和杨建文博士、周金鹏硕士和谭昕等为本书精心绘制了大量图表;李正明副教授和出版社的同志为本书所做的出色编辑和校订工作;以及我的夫人赵萍和孩子红军、红权所给予的始终如一的理解和支持。

作者 1994 年 10 月

目 录

前言	(1)
第一章 理想光学系统及其变换	(1)
§ 1-1 系统及其数学算符表示	(2)
1-1.1 系统的概念	(2)
1. 系统的定义	(2)
2. 系统的结构与功能	(2)
3. 系统的分类	(3)
1-1.2 用数学算符表示系统	(3)
1. 系统模型	(3)
2. 数学算符	(4)
1-1.3 线性系统和平移不变系统	(5)
§ 1-2 理想光学系统及其共线变换原理	(8)
1-2.1 理想光学系统的定义	(8)
1-2.2 共线变换及其数学描述	(9)
§ 1-3 轴对称理想光学系统的物像变换关系	(10)
1-3.1 焦点和牛顿公式	(10)
1-3.2 主点和高斯公式	(12)
1-3.3 角放大率和节点	(14)
1-3.4 轴向放大率	(16)
1-3.5 傍轴条件下的变换关系式	(17)
§ 1-4 理想光学系统的组合	(19)
1-4.1 理想光学系统的光线光路计算	(19)
1. 角度公式	(19)

2. 过渡公式	(20)
1-4.2 由光路计算研究理想组合系统	(20)
1. 确定组合系统的基本要素	(21)
2. 确定组合系统的变换关系	(21)
3. 傍轴条件下组合系统的计算公式	(23)
1-4.3 组合系统等效基本要素的解析式	(24)
1. 等效光焦度公式	(24)
2. 双子系统的等效基本要素	(25)
3. 举例:单透镜的基本要素	(27)
§ 1-5 典型的组合系统及其功能	(29)
1-5.1 无焦系统	(29)
1. 平面反射镜系统	(29)
2. 反射棱镜系统	(31)
3. 双子无焦系统的基本公式	(35)
4. 望远系统	(36)
5. 准直扩(缩)束系统	(37)
6. 4-f 图像处理系统	(37)
1-5.2 定焦系统	(38)
1. 放大镜	(38)
2. 显微镜	(40)
3. 摄影光学系统	(44)
4. 投影光学系统	(51)
5. 照明光学系统	(53)
1-5.3 变焦系统	(59)
1. 变焦系统的一般原理	(59)
2. 光学补偿变焦距物镜	(64)
3. 机械补偿变焦距物镜	(66)
4. 变倍望远镜	(71)
§ 1-6 理想光学系统的相位变换特性	(72)
1-6.1 光程和几何波前	(72)

1-6.2	等程原理和波前变换特性	(73)
1-6.3	理想光学系统的相位变换特性	(74)
1.	一般的相位分布式	(74)
2.	傍轴条件下的相位变换函数	(75)
1-6.4	满足理想相位变换性质的非球面系统	(76)
1.	轴对称曲面方程	(76)
2.	等光程的反射非球面	(76)
3.	等光程的折射非球面	(78)
4.	非球面透镜	(79)
§ 1-7	光学系统对信息的变换特性	(79)
1-7.1	通信和信息论的基本概念	(79)
1.	通信系统模型	(79)
2.	信息及其度量	(80)
1-7.2	光学系统的点源响应和卷积成像原理	(87)
1.	物函数的点源分解	(88)
2.	光学系统的点源响应	(88)
3.	光学系统的物象关系	(89)
1-7.3	光学系统的空间频率响应和空间滤波成像原理	(90)
1.	光学图像的空间频谱	(90)
2.	光学系统的频率响应	(91)
3.	光学系统空间滤波成像	(92)
1-7.4	光学图像的信息量和取样定理	(92)
1.	空域函数的取样定理	(93)
2.	频域函数的取样定理	(96)
3.	光学图像的信息量和熵	(96)
1-7.5	光学系统的信息容量和空间带宽积	(98)
1.	光学信号体积	(98)
2.	光学系统的信息容量和空间带宽积	(99)
3.	空间带宽积和拉氏不变量的关系	(100)

§ 1-8 光学系统对光能的传输特性	(100)
1-8.1 表示光能的物理量	(101)
1. 光辐射(能)通量和光通量	(101)
2. 辐射强度和发光强度	(103)
3. 辐照度和光照度	(105)
4. 光能出射度	(105)
5. 亮度	(105)
1-8.2 光能的自由传播	(109)
1. 点光源的发光辐射特性	(109)
2. 等亮度面光源的辐射特性	(111)
3. 光束能量的传递特性	(112)
1-8.3 理想光学系统对辐射能的传递规律	(114)
1. 拉氏不变量和斯特劳贝尔定理	(114)
2. 理想系统对亮度的变换	(114)
3. 理想系统的正弦条件	(115)
4. 理想系统的像面照度	(116)
1-8.4 光学系统对能量的有效利用率	(117)
1. 系统的光能损失和传光效率	(117)
2. 光束能量衰减传递关系式	(118)
3. 光学介质及界面的光能损失	(118)
4. 系统传光效率的估算	(120)
1-8.5 像面照度与光学系统参量之间的关系	(121)
1. 像平面中心处的照度公式	(121)
2. 轴外视场的像面照度公式	(122)
习题	(124)

第二章 实际光学系统的几何成像特性

§ 2-1 概述	(129)
2-1.1 光学材料	(130)

1. 光学玻璃	(130)
2. 光学晶体	(132)
3. 光学塑料	(132)
4. 反射光学材料	(133)
5. 光学介质膜	(133)
2-1.2 光学系统的理想参量和像差	(134)
1. 理想参量	(134)
2. 像差	(134)
3. 典型光组应校正的主要像差	(135)
2-1.3 计算和校正像差的谱线选择	(136)
§ 2-2 光线光路计算	(139)
2-2.1 几个基本概念和常用术语	(140)
2-2.2 符号规则	(142)
2-2.3 子午面内三角描光路公式	(143)
2-2.4 子午面傍轴光路计算公式	(144)
2-2.5 初始数据和数据处理	(145)
§ 2-3 轴上物点单色光成像的几何像差	(146)
2-3.1 球差的定义和表示方法	(146)
2-3.2 球差的分类及特性	(148)
1. 球差的幂级数表示式	(148)
2. 初级球差和高级球差	(149)
2-3.3 球差的校正及剩余带球差	(149)
1. 初级球差的校正	(149)
2. 初、高级球差的平衡和带球差	(150)
2-3.4 球差的分布	(151)
1. 初级球差的分布表示式	(151)
2. 不产生球差的条件	(152)
3. 单球面产生球差的大小和正负的分析	(152)
2-3.5 单透镜的球差特性	(154)

1. 不晕透镜	(154)
2. 具有最小球差(绝对值)的透镜弯曲形式	(155)
§ 2-4 近轴物点成像的单色光线像差	(157)
2-4.1 正弦差和它的计算表示式	(157)
1. 正弦差的定义	(157)
2. OSC' 的计算公式	(158)
2-4.2 垂轴面元的等晕成像和不晕成像	(159)
1. 等晕成像	(159)
2. 正弦条件和不晕成像	(160)
2-4.3 正弦差的分类及分布	(161)
1. 正弦差的级数表示式	(161)
2. 初级正弦差的分布	(161)
§ 2-5 轴外物点成像的单色光线像差	(162)
2-5.1 轴外细光束像差	(162)
1. 像散和场曲	(162)
2. 畸变	(165)
2-5.2 轴外宽光束像差	(166)
1. 彗差	(166)
2. 宽光束场曲和轴外球差	(168)
§ 2-6 轴上物点复色光成像的几何像差	(169)
2-6.1 位置色差的定义及其表示方法	(169)
2-6.2 初级位置色差和色球差	(171)
2-6.3 位置色差的校正方案	(172)
2-6.4 初级位置色差的分布	(172)
1. 分布公式	(172)
2. 简单光学元件的初级位置色差	(173)
3. 双胶合透镜的光焦度分配	(174)
2-6.5 二级光谱和复消色差	(176)

§ 2-7 轴外物点复色细光束成像的光线像差	(176)
2-7.1 倍率色差的定义及其表示	(176)
2-7.2 倍率色差的分类及特性	(178)
2-7.3 初级倍率色差的分布	(179)
1. 分布表达式	(179)
2. 薄透镜系统的倍率色差	(179)
§ 2-8 光线像差的综合表示	(180)
2-8.1 子午面内垂轴像差曲线	(180)
1. 子午垂轴像差的定义及表示方法	(180)
2. 子午垂轴像差与单项几何像差的对应关系	(181)
2-8.2 弧矢光线垂轴像差曲线	(182)
2-8.3 对垂轴像差曲线的综合分析	(183)
1. 几何像差的分析和判断	(183)
2. 离焦量的选择	(184)
3. 光阑位置的选择	(185)
4. 拦光和渐晕	(185)
§ 2-9 波像差	(186)
2-9.1 单色波像差	(186)
1. 单色波差的定义	(186)
2. 轴对称波差与轴向球差的关系	(187)
3. 轴外点波差与垂轴像差的关系	(188)
2-9.2 因参考点移动产生的波像差	(189)
1. 轴向离焦产生的波差	(189)
2. 焦深	(190)
3. 垂轴离焦产生的波差	(190)
2-9.3 波色差	(190)
2-9.4 波像差的计算	(191)
习题	(193)

第三章 光学系统的衍射映像原理及像质评价方法 (196)

§ 3-1 光波场的数学描述 (196)

3-1.1 单色稳态光波场 (196)

1. 波场的复振幅 (197)

2. 光波场的强度、功率和能量 (197)

3. 光屏函数 (198)

3-1.2 平面波场的复振幅和空间频率 (198)

3-1.3 球面波场的复振幅 (201)

1. 一般公式 (201)

2. 菲涅耳近似的球面波场 (202)

3. 菲涅耳球面波的远场近似 (202)

4. 傍轴近似下的球面波场 (203)

3-1.4 柱面波场的复振幅 (203)

3-1.5 高斯球面波场的复振幅 (204)

1. 高斯束的复振幅表示式 (204)

2. 高斯束在自由空间的传播特性 (205)

3. 光学系统对高斯光束的变换 (207)

§ 3-2 光波场的叠加特性 (213)

3-2.1 两波场的叠加公式 (213)

3-2.2 光波场的相干特性 (215)

1. 相关函数 (215)

2. 复相干度 (216)

3. 相干特性分析 (216)

3-2.3 光波场的线性叠加 (221)

1. 相干场 (221)

2. 非相干场 (222)

3. 部分相干场 (222)

§ 3-3 受限单色波场的衍射积分变换	(224)
3-3.1 受限波场的衍射变换特性	(225)
3-3.2 波场的一般衍射积分变换	(226)
1. 瑞利-索末菲衍射积分公式	(227)
2. 菲涅耳-基尔霍夫衍射积分公式	(228)
3-3.3 菲涅耳变换式	(228)
3-3.4 夫琅和费变换式	(229)
§ 3-4 光学系统的衍射映像	(230)
3-4.1 利用衍射积分计算系统的变换场	(230)
1. 逐次利用衍射积分法	(230)
2. 几何光学等效一次衍射积分法	(231)
3-4.2 理想系统的衍射变换和光瞳函数	(231)
1. 薄透镜的傍轴衍射成像特性	(232)
2. 一般理想系统的衍射成像	(236)
3. 实际光学系统的衍射成像和广义光瞳函数	(237)
§ 3-5 像质评价标准和测试方法	(238)
3-5.1 中心亮点法和星点检验	(239)
3-5.2 瑞利判据和波前变形测量	(241)
3-5.3 分辨率及其测量方法	(242)
3-5.4 光学传递函数(OTF)	(245)
1. 基元广延物函数-正弦波光栅	(246)
2. 正弦波光栅的衍射像	(247)
3. 光学传递函数的表示式	(248)
4. OTF 与其它像质评价标准之间的关系	(250)
3-5.5 保真度、相对结构含量和相关量	(252)
3-5.6 光线像差的容限	(254)
1. 点列图	(254)
2. 像差容限	(255)
习题	(257)

第四章 傅里叶光学映像原理和传递函数..... (261)

§ 4-1 光信号的傅里叶分析 (262)

4-1.1 时变光信号的傅里叶分析 (262)

1. 一维傅里叶分解式 (262)

2. 实多色光信号的复解析表示 (264)

3. 准单色光的相幅矢量 (266)

4-1.2 空变光信号的傅里叶分析 (267)

1. 二维傅里叶分解式 (267)

2. 复振幅傅里叶分解的物理解释 (268)

3. 实空变光信号的二维傅里叶分解式 (268)

4. 实函数傅里叶分解的物理解释 (269)

5. 空变实函数的复解析表示 (270)

§ 4-2 利用光学系统实现光信号的傅里叶变换 (274)

4-2.1 自由空间传播系统的傅氏变换性质 (274)

4-2.2 透镜的二维傅氏变换性质 (274)

4-2.3 傅氏变换物镜 (278)

1. 普通物镜傅氏变换功能的局限性 (278)

2. 傅氏变换物镜的特性 (280)

§ 4-3 光学系统两次傅里叶变换成像分析 (281)

4-3.1 单透镜的两次傅氏变换成像 (281)

4-3.2 双子共焦系统的两次傅氏变换成像 (282)

§ 4-4 光学系统的传递函数 (284)

4-4.1 光学系统对空间频谱的滤波变换——传递函数 (284)

4-4.2 自由空间传播系统的传递函数 (287)

1. 平面波谱的自由传播规律 (287)

2. 光栅衍射自成像 (289)

3. 受限波场的频谱展宽 (290)