

普通高等教育  
兵工类规划教材

# 傅里叶光学

FU LI YE GUANG XUE

游明俊 编著

兵器工业出版社



## 图书在版编目(CIP)数据

傅里叶光学/游明俊编著. —北京:兵器工业出版社,  
2000.3

ISBN 7-80132-751-9

I. 傅… I. 游… III. 傅里叶光学-高等学校-教材 N.O438.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 03400 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:张明

责任技编:魏丽华

社址:100089 北京市海淀区车道沟10号

经销:各地新华书店

印刷:国营五三一印刷厂印装

版次:2000年4月第1版第1次印刷

印数:1—800

封面设计:底晓娟

责任校对:冯敏悦

责任印制:王京华

开本:787×1092 1/32

印张:10.375

字数:228.15千字

定价:16.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

## 内 容 简 介

本书简介了与傅里叶光学有关的数学和物理基础,详细阐述了傅里叶光学的基本理论、全息术和光学信息处理的基本原理和主要应用,介绍了傅里叶光学的新进展。本书在内容的广度和深度方面作了比较合理的安排,重视系统性和理论与实践的结合,便于教学和自习。全书共分十章,主要内容包括:傅里叶分析,线性系统概论,光波场的数学描述,标量衍射理论基础,菲涅耳衍射与夫琅和费衍射,透镜的变换性质,光学成像系统的频率特性,光全息学基本原理,光学信息处理,傅里叶光学的新进展。

本书可作为光学工程、光学仪器和光学专业工科大学生的专业基础课教材,也可供从事现代光学研究和光学测试工作的技术人员参考。

## 出版说明

在 21 世纪即将来临之际,根据兵器工业科技与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规划》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向 21 世纪军工专业课程体系 and 教学内容的改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

本教材由南京师范大学华家宁教授主审。

殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

1997 年 8 月 17 日

# 前 言

本书是为光学工程、光学仪器和光学专业工科大学生编写的一门专业基础理论课程教材。本课程的授课时数为48学时,另安排8学时实验课。

根据大学教学的特点,本书在内容的广度和深度方面作了比较合理的安排,注重系统性,强调物理概念与数学方法、基本原理与实验技术的紧密结合,着重于基本概念和基本理论的阐述,并介绍了现代光学的一些新的应用技术。在文字叙述上,力求思路清晰,语言流畅,以便于教师教学和学生自学。

全书共分十章。第一章和第二章是与傅里叶光学有关的数学基础,分别介绍傅里叶分析和线性系统概论两部分内容。傅里叶分析主要介绍本课程要用到的数学知识,包括常用函数及其性质,卷积,相关, $\delta$ 函数和comb函数,傅里叶变换和抽样定理。线性系统概论介绍线性系统的基本概念和分析方法,为今后分析光学系统提供有效的分析工具。在介绍数学基础时,不追求数学上的严密性,但力求把数学公式与其所表示的物理模型紧密联系起来。第三章至第五章是物理光学基础,分别阐述光波场的数学描述、标量衍射理论基础、菲涅耳衍射和夫琅和费衍射。这三章的任务是加深对物理光学基本理论,特别是对光衍射理论的理解,并完成从物理光学到傅里叶光学公式的过渡。第六章和第七章是傅里叶光学的主要内容。第六章讨论透镜的位相变换性质和傅里叶变换性质,所得到的许多公式对于分析光学系统非常有用。第七章是应用线性系统的空间域和频率域分析方法来分析光学成像系统,引入了

表征系统特征的脉冲响应函数和光学传递函数,并用广义光瞳函数的概念来分析存在像差的实际光学系统的成像特性。第八章阐述光全息学的基本原理和各种类型全息图的制作方法,其中包括傅里叶变换全息图、像全息图、彩虹全息图、位相全息图和计算全息图等,并简述光全息术在全息光学元件、全息干涉计量和全息信息存储等方面的应用。因为激光散斑与光全息术存在一定的内在联系,故将激光散斑的内容一并在本章中介绍。第九章阐述光学信息处理的基本原理和主要应用,内容包括空间频率滤波、相干光学处理、非相干光处理、白光信息处理、非线性处理和实时混合处理等。第十章简介傅里叶光学的新进展,内容包括二元衍射光学、光数字计算机和畸变不变光学模式识别等。

本书各章后面附有习题,可选择一些题作为课外作业,以加深对基本概念的理解,提高分析问题和解决问题的能力。有关实验内容,可在兵器工业出版社出版的《信息光学基础实验》一书(游明俊编,1992年8月出版)中根据课程内容和实验时数选择。

在编写本书的过程中,得到了迟泽英教授、陈文建博士等专家的积极支持和热情帮助,在此表示衷心的感谢!由于编著者水平有限,书中可能存在一些缺点和错误,敬请读者不吝指正。

**编著者**

**1999年9月**

# 目 录

第一章 傅里叶分析 .....	(1)
第一节 常用函数及其性质 .....	(1)
一、矩形函数和方盒函数 .....	(1)
二、三角形函数 .....	(3)
三、sinc 函数和 $\text{sinc}^2$ 函数 .....	(4)
四、阶跃函数 .....	(5)
五、符号函数 .....	(6)
六、圆域函数 .....	(6)
第二节 卷积 .....	(7)
一、卷积的定义 .....	(7)
二、卷积的计算方法 .....	(8)
三、卷积的性质 .....	(12)
第三节 相关 .....	(14)
一、相关的定义 .....	(14)
二、相关的性质 .....	(14)
第四节 $\delta$ 函数和 comb 函数 .....	(15)
一、 $\delta$ 函数的定义 .....	(15)
二、 $\delta$ 函数的表示方法 .....	(18)
三、 $\delta$ 函数的性质 .....	(18)
四、comb 函数及其性质 .....	(21)
第五节 傅里叶变换 .....	(22)
一、傅里叶变换的定义 .....	(22)
二、傅里叶变换的性质 .....	(23)

三、可分离变量函数的傅里叶变换·····	(28)
四、常用傅里叶变换对·····	(32)
第六节 抽样定理·····	(32)
一、抽样定理的内容·····	(33)
二、抽样定理的证明·····	(34)
习题·····	(37)
<b>第二章 线性系统概论</b> ·····	(39)
第一节 线性系统的基本概念·····	(39)
一、系统及其分类·····	(39)
二、线性系统·····	(40)
三、线性不变系统·····	(42)
第二节 线性系统的分析方法·····	(43)
一、系统对基元函数的响应·····	(43)
二、线性系统的两种分析方法·····	(47)
第三节 复合系统的脉冲响应和传递函数·····	(49)
一、串联系统·····	(50)
二、并联系统·····	(51)
三、反馈系统·····	(52)
习题·····	(53)
<b>第三章 光波场的数学描述</b> ·····	(54)
第一节 光波场的复振幅表示·····	(54)
一、平面波的复振幅·····	(55)
二、球面波的复振幅·····	(56)
三、柱面波的复振幅·····	(57)
第二节 光波场中任一平面上的复振幅·····	(58)
一、平面光波复振幅的空间频率描述·····	(59)
二、球面光波场中任一平面上的复振幅·····	(64)



习题 .....	(67)
<b>第四章 标量衍射理论基础 .....</b>	<b>(68)</b>
<b>第一节 惠更斯—菲涅耳原理 .....</b>	<b>(68)</b>
一、衍射概述.....	(68)
二、惠更斯—菲涅耳原理.....	(69)
<b>第二节 基尔霍夫衍射公式 .....</b>	<b>(70)</b>
<b>第三节 瑞利—索末菲衍射公式 .....</b>	<b>(73)</b>
<b>第四节 衍射公式与叠加积分 .....</b>	<b>(74)</b>
<b>第五节 衍射问题的频率域分析 .....</b>	<b>(76)</b>
一、从空域到频域.....	(76)
二、频谱的传播效应.....	(77)
三、衍射过程的频谱分析.....	(79)
<b>第六节 非单色光波的衍射 .....</b>	<b>(81)</b>
习题 .....	(82)
<b>第五章 菲涅耳衍射与夫琅和费衍射 .....</b>	<b>(84)</b>
<b>第一节 衍射区的划分 .....</b>	<b>(84)</b>
一、衍射区的划分.....	(84)
二、菲涅耳近似与夫琅和费近似.....	(85)
<b>第二节 菲涅耳衍射与夫琅和费衍射的“系统”分析</b> .....	<b>(89)</b>
一、菲涅耳衍射的“系统”分析.....	(89)
二、夫琅和费衍射的“系统”分析.....	(91)
<b>第三节 夫琅和费衍射实例 .....</b>	<b>(93)</b>
一、矩孔的夫琅和费衍射.....	(93)
二、圆孔的夫琅和费衍射.....	(95)
三、正弦型振幅光栅的夫琅和费衍射.....	(96)
四、正弦型位相光栅的夫琅和费衍射 .....	(100)

第四节	菲涅耳衍射的计算	(103)
习题		(106)
<b>第六章</b>	<b>透镜的变换性质</b>	(110)
第一节	薄透镜的位相变换性质	(110)
第二节	透镜的傅里叶变换性质	(115)
一、	物在透镜前方	(115)
二、	物在透镜后方	(120)
第三节	透镜孔径对透镜傅里叶变换的影响	(124)
一、	透镜孔径对光线的限制作用	(124)
二、	透镜的截止频率	(126)
三、	能得到物体准确傅里叶变换的最大空间频率	(126)
四、	考虑透镜孔径影响后频谱的复振幅表示式	(127)
五、	物面位置对透镜傅里叶变换的影响	(128)
习题		(130)
<b>第七章</b>	<b>光学成像系统的频率特性</b>	(133)
第一节	正薄透镜的成像	(133)
一、	透镜的振幅点扩散函数	(133)
二、	正透镜的成像	(138)
第二节	一般光学成像系统的分析	(139)
一、	光学成像系统的黑箱模型	(139)
二、	成像系统的线性特性	(141)
第三节	相干传递函数(CTF)	(143)
一、	CTF 的概念及其与光瞳函数的关系	(143)
二、	CTF 计算举例	(145)
三、	对 CTF 的简要说明	(148)

第四节 光学传递函数(OTF) .....	(150)
一、OTF 的概念 .....	(150)
二、OTF 与 CTF 的关系 .....	(152)
三、OTF 与光瞳函数的关系 .....	(153)
四、OTF 的一般性质 .....	(154)
五、OTF 计算举例 .....	(156)
六、OTF 的物理解释 .....	(160)
第五节 实际光学系统的传递函数 .....	(163)
一、广义光瞳函数 .....	(163)
二、实际光学成像系统的 CTF .....	(164)
三、实际光学成像系统的 OTF .....	(164)
四、成像系统离焦时的 OTF .....	(166)
第六节 相干成像和非相干成像的比较 .....	(169)
一、像的强度频谱与衬度 .....	(170)
二、两点间的分辨率 .....	(173)
习题 .....	(176)
<b>第八章 光全息学基本原理</b> .....	(180)
第一节 光全息术概述 .....	(180)
第二节 全息照相的基本方程 .....	(185)
一、波前记录 .....	(185)
二、波前再现 .....	(187)
三、平面全息图的物像关系 .....	(189)
第三节 傅里叶变换全息图 .....	(193)
一、傅里叶变换全息图 .....	(193)
二、准傅里叶变换全息图 .....	(196)
三、无透镜傅里叶变换全息图 .....	(198)
第四节 像全息图 .....	(201)

第五节 彩虹全息图·····	(202)
一、二步彩虹全息图·····	(202)
二、一步彩虹全息图·····	(204)
第六节 位相全息图·····	(205)
第七节 计算全息图·····	(208)
一、抽样·····	(209)
二、计算离散傅里叶频谱·····	(211)
三、编码绘图·····	(212)
四、照相缩版·····	(214)
五、光学再现·····	(214)
第八节 光全息术的应用简介·····	(215)
一、全息光学元件·····	(215)
二、全息干涉计量·····	(220)
三、全息信息存储·····	(227)
第九节 激光散斑及其应用·····	(229)
一、激光散斑的基本性质·····	(229)
二、散斑干涉术及其应用·····	(232)
习题·····	(236)
<b>第九章 光学信息处理·····</b>	<b>(238)</b>
<b>第一节 空间频率滤波·····</b>	<b>(239)</b>
一、阿贝二次成像理论·····	(239)
二、阿贝—波特实验·····	(240)
三、泽尼克相衬显微镜·····	(242)
<b>第二节 基本相干光处理系统·····</b>	<b>(245)</b>
一、光学频谱分析系统·····	(246)
二、光学滤波系统·····	(247)
三、光学相关系统·····	(251)

四、混合处理系统 .....	(254)
第三节 相干光学处理 .....	(255)
一、光学图像相减 .....	(255)
二、像边缘增强 .....	(260)
三、图像识别 .....	(264)
四、模糊图像的像质改善——用逆滤波器消模糊 .....	(269)
五、相干光反馈系统 .....	(271)
第四节 非相干光处理 .....	(273)
一、基于几何成像的非相干光处理 .....	(274)
二、基于几何投影的非相干光处理 .....	(277)
第五节 白光信息处理 .....	(278)
第六节 非线性光学处理 .....	(283)
一、半色调网屏处理 .....	(283)
二、 $\theta$ 调制技术 .....	(288)
第七节 实时混合处理 .....	(290)
习题 .....	(291)
<b>第十章 傅里叶光学的新进展 .....</b>	<b>(293)</b>
第一节 二元衍射光学 .....	(293)
一、引言 .....	(293)
二、二元光学的基本原理 .....	(294)
三、二元元件的设计 .....	(297)
四、二元元件的制作 .....	(299)
五、二元元件的主要应用 .....	(301)
第二节 光数字计算机 .....	(303)
一、光逻辑元件 .....	(304)
二、光学互连 .....	(307)

三、光计算机的研究重点 .....	(307)
第三节 数字实时全息术 .....	(309)
第四节 畸变不变光学模式识别 .....	(310)
一、引言 .....	(310)
二、综合鉴别函数模式识别 .....	(311)
参考文献 .....	(317)

# 第一章 傅里叶分析

傅里叶光学是利用傅里叶分析方法来研究光的传播、干涉和衍射等现象的一门学科,是现代光学中具有广泛应用的新分支。傅里叶光学的显著特点是在光学中引入了傅里叶变换的概念,在频域中描述和处理光学信息。

本章叙述在傅里叶光学中要用到的一些数学知识。在内容的选择上主要根据应用的需要,在阐述中不追求数学上的系统性和严密性,并力求阐明数学知识所反映的光学现象。

## 第一节 常用函数及其性质

### 一、矩形函数和方盒函数

矩形函数(又称门函数)是最常用的函数之一,通常记为  $\text{rect}(x)$  或  $\Pi(x)$ 。它的定义为

$$\text{rect}(x) = \Pi(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-1)$$

矩形函数的图形如图 1-1(a)所示,其特点是宽度和高度均为 1,且左右对称。矩形函数可以位移和改变宽度,例如

$$\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{a}\right) = \begin{cases} 1 & \left|\frac{x-x_0}{a}\right| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-2)$$

它表示高为 1,宽为  $a$ ,中心在  $x=x_0$  处的矩形函数。其图形如

图 1-1(b) 所示。

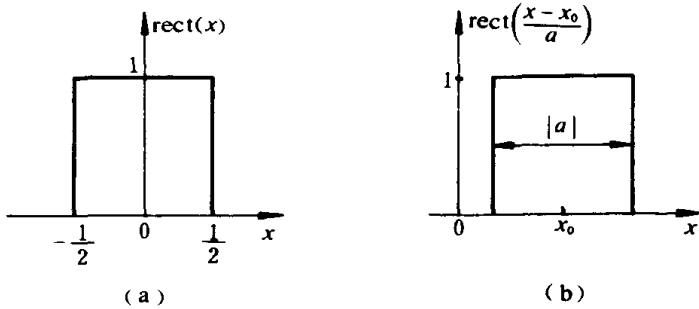


图 1-1 矩形函数

矩形函数在光学中是一个十分有用的函数。当自变量  $x$  表示时间变量时, 矩形函数可用来表示照相机的快门函数, 式 (1-2) 中的  $|a|$  便是曝光时间。无限大的不透光屏上的单缝的透过率也可以用矩形函数表示, 即式 (1-2) 表示以  $x=x_0$  为中心线、宽度为  $a$  的单缝的透过率函数。矩形函数的组合形式可用于表示双缝、多缝和矩形光栅。在频域中矩形函数可用于表示理想的低通和带通滤波器。

矩形函数具有截断作用。若某函数与矩形函数相乘, 则得到该函数在矩形函数有值范围内的部分。例如  $\cos\pi x \cdot \text{rect}(x)$  表示  $\cos\pi x$  在  $|x| \leq \frac{1}{2}$  内的部分, 用公式表示即为

$$\cos\pi x \cdot \text{rect}(x) = \begin{cases} \cos\pi x & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

二维矩形函数称为方盒函数, 其图形是一个方盒, 如图 1-2 所示。方盒函数定义为:



$$\begin{aligned} & \text{rect}\left(\frac{x-x_0}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y-y_0}{b}\right) \\ = & \begin{cases} 1 & \left|\frac{x-x_0}{a}\right| \leq \frac{1}{2}, \left|\frac{y-y_0}{b}\right| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-3) \end{aligned}$$

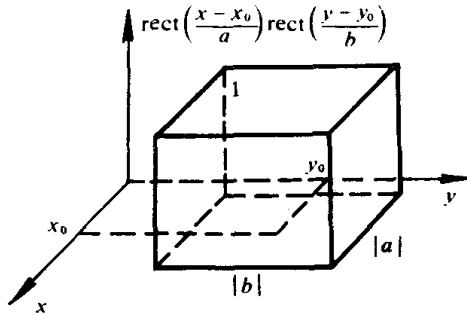


图 1-2 方盒函数

方盒函数可用于描述不透明屏上矩形孔的透过率,在矩孔内透过率为 1,在矩孔外透过率为 0。

## 二、三角形函数

三角形函数用符号  $\Lambda(x)$  表示,其定义为

$$\Lambda(x) = \begin{cases} 1 - |x| & |x| \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-4)$$

该式表示底边长为 2、高为 1 的等腰三角形,其面积为 1,如图 1-3(a)所示。位移和展宽后的三角形函数表示式为

$$\Lambda\left(\frac{x-x_0}{a}\right) = \begin{cases} 1 - \left|\frac{x-x_0}{a}\right| & \left|\frac{x-x_0}{a}\right| \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1-5)$$

该式所表示的图形如图 1-3(b)所示。