

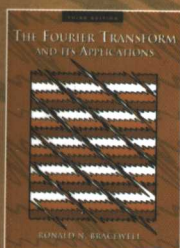


傅里叶变换及其应用

The Fourier Transform and Its Applications

(第3版)

[美] 罗纳德·N·布雷斯韦尔 著
殷勤业 张建国 译



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



 国外名校最新教材精选

The Fourier Transform and Its Applications

傅里叶变换及其应用

(第3版)

Ronald N. Bracewell

Lewis M. Terman Professor of Electrical Engineering Emeritus
Stanford University

〔美〕 罗纳德·N·布雷斯韦尔 著

殷勤业 张建国 译



西安交通大学出版社

Xi'an Jiaotong University Press

内容提要

本书是美国著名学者罗纳德·N·布雷斯韦尔教授编著的一本经典教材,它有两大特色:一是擅于借助图形以及对图形的解释来说明复杂的问题;二是与工程应用联系紧密。本书不仅有5章的内容与实际应用紧密相关,而且在各章的内容及习题中,与实际应用有关的例子也随处可见。

本书共23章,其中前11章对傅里叶变换理论做了全面的论述,12到14章讲述了与傅里叶变换相关的一些变换,15到19章是傅里叶变换在各学科中的应用,20章给出了几个重要函数的数值表,21章给出了部分习题的答案,22章是傅里叶变换图示集,23章对傅里叶的生平做了详细的介绍。

本书可供电气工程、电子工程、信息与通信工程、控制工程、生物医学工程、天文学等理工类学科专业的研究生和高年级本科生使用,也可作为相关领域的科研和工程技术人员的参考书籍。

Ronald N. Bracewell

The Fourier Transform and Its Applications

ISBN:0-07-303938-1

Copyright© 2000 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Xi'an Jiao-tong University Press.

本书中文简体字翻译版由西安交通大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2003-003 号

图书在版编目(CIP)数据

傅里叶变换及其应用:第3版/(美)布雷斯韦尔(Bracewell, R. N.)著;
殷勤业,张建国译. —西安:西安交通大学出版社,2005.8

(国外名校最新教材精选)

书名原文:The Fourier Transform and Its Applications

/3rd Edition

ISBN 7-5605-2061-8

I. 傅… II. ①布… ②殷… ③张… III. 傅里叶
变换-高等学校-教材 IV. 0174.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 095477 号

书 名:傅里叶变换及其应用(第3版)

著 者:(美)罗纳德·N·布雷斯韦尔

译 者:殷勤业 张建国

出版发行:西安交通大学出版社

地 址:西安市兴庆南路25号(邮编:710049)

电 话:(029)82668357 82667874(发行部)

(029)82668315 82669096(总编办)

电子邮件:xjtupress@163.com

印 刷:西安交通大学印刷厂

字 数:751千字

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:31.375

印 次:2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷

印 数:0 001~4 000

书 号:ISBN 7-5605-2061-8/O·228

定 价:56.00元

版权所有 侵权必究

译者序

傅里叶变换是信号处理中一种重要的变换方法,所以其在电气工程、电子工程、信息与通信工程、控制工程、生物医学工程、天文学等理工类学科中的重要性是不言而喻的,它是绝大多数理工类学科的基础课程。关于本书的指导思想、使用对象以及内容安排,作者在前言中已经做了细致的介绍,在此无需重复。

本书的作者 Bracewell 博士在大学时就对傅里叶分析产生了浓厚的兴趣,他长期致力于射电天文及图像重建方面的研究工作,并做出了突出贡献。正如在作者简介中提到的那样,傅里叶分析在他的研究工作中始终扮演着关键的角色。作者对傅里叶变换的深刻理解贯穿于本书的字里行间,译者对此有切身的体会。

本书的主要特色有两点:其一是借助图形以及对图形的解释来说明复杂的问题,并在第 22 章给出了傅里叶变换图示集。其二是与工程应用联系紧密,这不仅表现在本书有五章(第 15 到 19 章)与实际应用紧密相关,而且在各章的内容及习题中,与实际应用有关的例子也随处可见。更令译者敬佩的是,这些应用涉及很多学科,甚至是生活的各个方面。

本书第 1 章至第 8 章由殷勤业翻译,其余章节由张建国翻译,全书由殷勤业统一整理。译者要特别感谢微软的孔原博士,他在百忙之中为本书部分章节的译法提出过宝贵的建议。此外,在本书的翻译过程中,得到了邓科博士、张红副教授以及博士生曾雁星、张一闻、罗铭、丁乐和孟银阔的帮助,在此对他们表示诚挚的感谢。博士生张莹、冯昂、孟玉吉以及硕士生张辉、戴辉、唐志勇、田昕、王毅、田小辉、吉欣、张运饥、刘维佳直接参与了本书的翻译工作,对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。最后,向本书的责任编辑宗立文、赵丽萍表示衷心的感谢,没有他们的帮助,本书将难以完成。

原书中有少量输入和排版的疏漏,在翻译过程中做了改动。

另外,由于本书中的各种应用涉及面非常广、而且限于译者的水平和不可避免的主观片面性,翻译不当或表述不清之处在所难免,恳请广大读者及专家不吝指教,提出修改意见,我们将不胜感激。

译 者

2005 年 3 月于西安交通大学

作者简介

罗纳德·N·布雷斯韦尔(Ronald N. Bracewell)出生于澳大利亚,在悉尼大学获得了理学学士、工学学士和工学硕士学位,并且在剑桥大学获得了物理学博士学位。目前,作为斯坦福大学电气工程系的 L. M. Terman 名誉教授,Bracewell 博士拥有许多对其声望来讲令人印象深刻的履历、奖励和出版物。他是皇家天文学会(Royal Astronomical Society)会士、澳大利亚天文学会会士以及美国天文学会的前任议员。他还是电子电气工程师协会(IEEE)的终身会士和 Heinrich Hertz 金奖获得者。在斯坦福射电天文研究所,他设计并建造了创新的射电望远镜,其中包括第一个具有人眼分辨率(小于一个弧分)的天线,这个天线早期曾被用于发现宇宙背景辐射。傅里叶分析在他的新仪器设计和数据处理中扮演了关键的角色。傅里叶的绝妙的思想也使得 Bracewell 博士在层析成像方面做出了突出贡献,这使他当选为国家科学院的医药协会会士,获得了悉尼大学的首届杰出校友奖,并且由于他在射电天文和图像重建领域对科学的贡献受到了澳大利亚国家级官员的约见。

前言

变换这一方法为电网络、能量转换和控制器件、天线和其他的电气系统元件,以及全部的线性系统和许多电的或非电的物理系统和器件的研究提供了统一的数学方法。这些相同的方法同样可以应用于有线或光纤通信学科、无线电传播和电离层媒介(它们都与电气系统的互连方式有关),以及信息论,其中,信息论涉及数据的获取、处理和表示。在电气工程的基本领域进行处理时,还会用到其他理论技术,但实际上变换方法是所有这些理论中必不可少的。傅里叶分析在电气工程方面有很多重要的应用,是电气工程的必修课——的确,许多数学方面的发展都与交流理论、信号分析以及明显与电气通信相关的信息论有关。

这就是许多有关技术应用的文献出现在电气和电子刊物的原因。尽管与电气工程有密切的关系,傅里叶分析在生物医学和遥感(地球物理学、海洋学、行星表面、土木工程)方面也是必不可少的,这些方面的使用者在数量上已超过了通常使用傅里叶分析的电气工程师。但是,傅里叶分析及其应用的教学仍归属于电气工程。

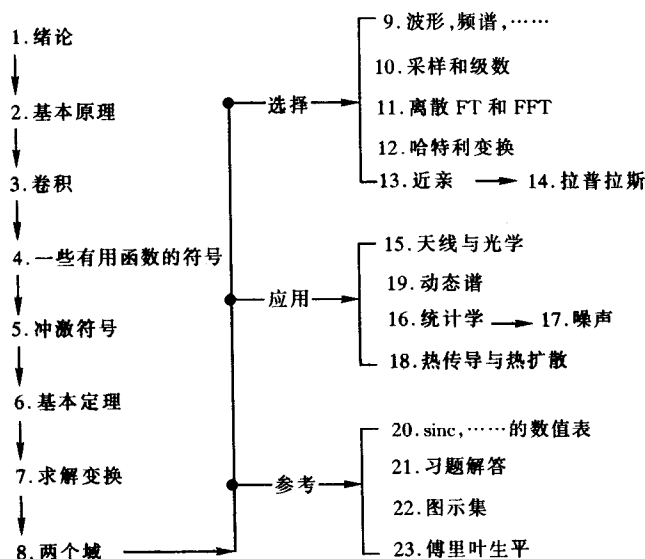
多年来,变换及其应用一直是斯坦福大学电气工程专业的一门课程,这门课程的要求不超出学士学位持有者通常所具有的先决条件。我们的目标是发展一门所有研究生早期阶段的关键性的课程,以免学生在后面的更专业的课程中重复遇到相同的内容,而后面的教师可以更直接地进入他们的专业课的主题。

显然,试图仅仅在一门课程中介绍所有的线性数学知识是不可行的;核心内容必须通过合理的判断才能作出选择。然而,如果对所作的选择界定明确,将会对后面的教师更有帮助。

前期课程应该简单,但并非不重要;本书的目标是通过使用恰当的符号和卷积的方法来简化表示高级课程中经常遇到的很多关键问题。

使用本书的一种方法是按照章节顺序。对那些无需帮助便

能阅读前半部分或能通过几讲快速带过前半部分的学生来说,这样是可行的。但是,如果用正常的速度完成这些内容,那么,用物理实例来解释每一个定理和概念会比较实用,也不失为一个好方法。波形和它们的谱以及基本扩散理论都适合用来做解释。此后,有关应用的几章可以用期望的任何顺序进行。本书的章节安排如下:



根据所选应用章节的多少,内容的量适合于一个学期或半个学期。实用的计划是把有关应用章节的选择留给当前的教师来作。

关于傅里叶变换已经出版了很多不错的数学教材。本书的不同之处在于它是专门为那些关心傅里叶变换在物理场合应用的读者所著的,并不适用于那些注重数学本身的读者。本书还讨论了傅里叶变换和其它变换的关系,而且有意识地充实了适用于变换对和有关变换定理的简要的参考信息。

1939年,在悉尼大学学习 H. S. Carslaw 的“Fourier Series and Integrals”时,我对这一学科产生了兴趣。在 C. S. I. R 无线电物理实验室,作为 J. C. Jaeger 的同事,我学到了它的物理应用,并且继承了由 J. A. Ratcliffe 发起的剑桥 Cavendish 实验室结晶学家们的物理思想。变换方法是电气工程的核心课程。已成为课程重要组成部分的数字计算和数据处理,虽然在内容上与对电路、电子和波的严肃研究有很大不同,但是它们却通过傅里叶变换连结在了一起。通过掺杂(用于构造半导体器件)和电导体中空穴和电子的控制流,很久以前与海底电缆电报有关的扩散方程,作为固体物理器件中的需要考虑的重要事项再度出现。显然,掌握傅里叶基本原理在固态实验室非常有用。

图像工程中的大部分都可以通过二维的推广来解释,它的迅速发展增强了核

心课程的价值。因此,本书的主题已很容易转变为重要角色,不同专业的教学人员发现它很易于讲授。一年级的研究生,尤其是来自其他大学和其他系(尤其是应用物理和地球科学系)的学生,需要学习这个课程。本课程也可用于大学四年级的学生。

快速傅里叶变换(FFT)算法的引入把傅里叶变换的应用范围拓展到了数据处理和一般的数字表达,而且使离散傅里叶变换(DFT)更加重要。与第 11 章所述的离散数学有关的技术变革使得对任何需要处理大量数据的专业人员,如医药、生物和遥感等许多领域的工程师或专家都必须理解傅里叶理论(例如混叠)。基于 Ralph V. C. Hartley 方程(第 12 章)的研究使得有可能不用计算傅里叶分析时的虚部,而只是简单地计算实的 Hartley 形式。

该书第一版中就提及的 Hartley 方程,随着计算机的发展在信号处理中得到了更多的应用。1983 年,在离散 Hartley 变换(这个名字现在已被普遍认可)这个题目下,我在时间序列中使用新式的符号给它们赋予了新的意义,同时 Z. Wang (Appl. Math. and comput., 第 9 卷,53—73、153—163、245—255 页,1983)独立地鼓舞了数学家。Hartley 的 cas (余弦加正弦)函数也已得到广泛认可。

我们为那些喜欢自己编写程序的读者提供了一些伪码段。把它们翻译成你所选择的语言,可以对代数的和图形的观点给出一些补充的理解。进一步地,执行数值例子可以得到一种有用的直觉,虽然没有物理直觉那么强有力,但这使我们在经验上又增加了一个维度。伪码适合于那些并非会好几种语言的读者。目标是提供简单且易于理解的指令,这些指令易于改写为读者的流畅的语言,读者要提供必要的规程、数组声明,以及其他不同的特征。

书中给出代码段是为了弥补口头解释的不足,并不适合代替计算工具包。

然而,能使用计算机算法常常比理解它的构成细节更重要,就像使用积分表或工程设计手册。为了满足这一需要,并使强大的傅里叶变换应用于更广的领域,人们创建了一些商业软件工具包,这些工具包已经变得非常必要。例如,广为流行的 MATLAB,它是一个用户友好的高级专用工具包,第 7 和 11 章阐述了它的应用。

在用户不知道算法细节的情况下,需要多加小心;在用计算机输出表示以前可以方便地知道期望的输出。由于这样或那样的原因,在图示集中用图形表示变换已被证明是一个很有用的参考。图形表达是关于积分变换出版物的有用的辅助手段,有时我们很难在大量的罕见例子中寻找常用的条目,而且像冲激、不连续或逐段定义的这种简单函数,或许很难辨认或许根本就不包含在其中。

在合适的阶段选用好的习题对学生是相当有用的,但很难编出好的习题。本书中的许多习题都包括技术背景或要求给出看法,超越了数学练习。那些希望挖掘习题中的好内容的人会发现习题中好的内容都加了标题,这是一种应该广泛采

用的习惯。第 21 章给出了许多习题的解,但偶尔有一个主题的练习紧跟在内容的后面而不是在章节的末尾,这种情况不是很多。

符号是思考的重要辅助工具,我很高兴地告诉大家,我们从 D. M. Woodward 那里学到的 **sinc** 函数非常有效,它遭受了那些不懂得“ $\sin x$ 比 x ”并非 **sinc** 函数的作者们的误解和反对而幸存下来。**单位矩形函数**(单位高度和宽度) $\Pi(x)$,是 **sinc** 函数的变换,已被证明相当有用,对于板书来说更是如此。在打字稿或其它不太希望使用希腊字母的地方, $\Pi(x)$ 可以写作“ $\text{rect } x$ ”,在任何情况下把它读作 **rect** 都是很方便的。**jinc** 函数,类似于圆形的 **sinc** 函数,具有相应的归一化性质,并且可用于描述一个望远镜或照相机的衍射场。**shah** 函数 $\text{III}(x)$ 容易理解,它易于打印,而且比你想象的还要有用,因为它的变换仍然是它本身。用星号表示卷积,Volterra 已用了很长时间,或许更早一些时候就开始使用了,现在它已经得到了广泛的应用。另外,我建议用“ $*$ ”表示二维卷积,作为图像处理快速增长的结果,二维卷积越来越普遍。

早先,有关傅里叶变换的教材中对数字卷积的强调仅仅是个开始。几年内,卷积已从一个相当高深的概念变成了一个在初期阶段就很容易理解的概念,它适用于所有对正弦激励产生正弦响应的系统。

目 录

译者序

作者简介

前 言

第 1 章 绪论..... (1)

第 2 章 基本原理..... (4)

傅里叶变换和傅里叶积分定理..... (4)

傅里叶变换存在的条件..... (6)

极限情况下的变换..... (7)

奇偶性..... (8)

奇偶性的意义..... (9)

复共轭..... (11)

余弦和正弦变换..... (12)

公式的含义..... (13)

第 3 章 卷积..... (18)

卷积的例子..... (20)

序列积..... (22)

序列乘法的逆运算/用矩阵表示的序列积/序列的向量表示
..... (26)

用计算机进行卷积..... (30)

自相关函数和五角星符号..... (30)

三重相关..... (34)

互相关..... (35)

能量谱..... (36)

第 4 章 一些有用函数的符号..... (42)

单位高度和单位宽度的矩形函数 $\Pi(x)$ (42)

单位高度单位面积的三角窗函数 $\Lambda(x)$ (44)

各种指数曲线、高斯曲线和瑞利曲线..... (44)

Heaviside 单位阶跃函数 $H(x)$ (46)

符号函数 $\operatorname{sgn} x$ (50)

滤波函数或内插函数 $\operatorname{sinc} x$ (51)

图形表示	(52)
特殊符号总结	(53)
第 5 章 冲激符号	(58)
筛选特性	(61)
采样或复制符号 $\text{III}(x)$	(63)
偶冲激对 $\text{II}(x)$ 和奇冲激对 $\text{I}_1(x)$	(65)
冲激符号的导数	(66)
零函数	(68)
二维和更高维的一些函数	(69)
广义函数的概念	(72)
极好性态函数/正则序列/广义函数/广义函数的代数性质/普通函数导数	(73)
第 6 章 基本定理	(84)
一些用于说明的变换	(84)
相似性定理	(87)
加性定理	(87)
移位定理	(90)
调制定理	(91)
卷积定理	(92)
瑞利定理	(95)
功率定理	(96)
自相关定理	(97)
微分定理	(99)
卷积的微分	(99)
广义函数的变换	(101)
定理的证明	(102)
相似性定理和移位定理/微分定理/功率定理	(102)
定理的总结	(103)
第 7 章 求解变换	(109)
闭式积分	(110)
数值傅里叶变换	(113)
慢速傅里叶变换程序	(114)
用定理生成变换	(116)
对分段函数应用微分定理	(117)
谱的测量	(118)
无线电频率谱分析/光学傅里叶变换光谱学	(118)

第 8 章	两个域	(121)
	定积分	(121)
	一阶矩	(123)
	质心	(124)
	惯性矩(二阶原点矩)	(125)
	矩	(126)
	均方横坐标	(126)
	回转半径	(127)
	方差	(127)
	平滑性与积聚性	(127)
	卷积的平滑	(129)
	渐近性态	(130)
	等效宽度	(132)
	自相关宽度	(135)
	均方宽度	(136)
	采样与复制	(137)
	一些不等式	(138)
	幅度和斜率的上限/施瓦兹不等式	(138)
	不确定性关系	(140)
	不确定性关系的证明/不确定性关系举例	(140)
	有限差分	(143)
	滑动平均	(145)
	中心极限定理	(146)
	两个域中对应关系的总结	(148)
第 9 章	波形、频谱、滤波器和线性性	(156)
	电波形与频谱	(156)
	滤波器	(157)
	线性滤波器理论的通用性	(160)
	数字滤波	(160)
	对定理的解释	(161)
	相似性定理/叠加定理/移位定理/调制定理/调制定理的逆	(163)
	线性和时不变	(165)
	周期性	(166)
第 10 章	采样与级数	(173)
	采样定理	(173)
	内插	(177)
	频域矩形滤波	(178)

用滑动平均进行平滑	(179)
欠采样	(180)
幅度和斜率采样	(181)
交错采样	(183)
存在噪声的采样	(184)
傅里叶级数	(186)
Gibbs 现象/有限区间傅里叶变换/傅里叶系数	(189)
周期冲激串	(193)
Shah 符号是它本身的傅里叶变换	(194)

第 11 章 离散傅里叶变换和 FFT	(203)
离散变换公式	(203)
圆周卷积	(207)
离散傅里叶变换的例子	(208)
互易性质	(209)
奇偶性	(210)
特殊对称的例子	(210)
复共轭	(211)
反转特性	(211)
叠加定理	(211)
移位定理	(212)
卷积定理	(212)
乘积定理	(213)
互相关	(213)
自相关	(213)
序列和	(213)
首值	(213)
广义 Parseval-Rayleigh 定理	(214)
填补定理	(214)
相似性定理	(214)
使用 Matlab 的例子	(215)
快速傅里叶变换	(217)
实际考虑	(220)
离散傅里叶变换正确吗?	(222)
FFT 的应用	(222)
时间测定图	(223)
当 N 不是 2 的整数幂时	(223)
二维数据	(224)
功率谱	(225)

第 12 章 离散哈特利变换	(231)
一种严格互易的实变换	(231)
符号与示例	(232)
离散哈特利变换	(233)
DHT 的例子	(234)
讨论	(235)
一维和二维的卷积运算	(235)
二维 DHT	(236)
Cas-Cas 变换	(236)
定理	(237)
离散正弦和离散余弦变换	(237)
边界值问题/数据压缩应用	(237)
计算	(240)
对数值变换的感性认识	(240)
复哈特利变换	(242)
哈特利变换的物理特性	(242)
快速哈特利变换	(242)
快速算法	(243)
运行时间	(248)
通过条纹图计时	(249)
矩阵公式	(250)
卷积	(253)
置换	(253)
快速哈特利变换子程序	(255)
第 13 章 傅里叶变换的近亲	(261)
二维傅里叶变换	(261)
二维卷积	(262)
汉克尔变换	(266)
傅里叶核函数	(270)
三维傅里叶变换	(270)
n 维汉克尔变换	(273)
梅林变换	(273)
Z 变换	(276)
Abel 变换	(280)
Radon 变换和断层摄影技术	(284)
Abel-Fourier-Hankel 变换环/投影-切片定理/ 通过改进的反向投影进行重构	(285)

希尔伯特变换	(286)
解析信号/瞬时频率和包络/因果性	(287)
计算希尔伯特变换	(291)
分数阶傅里叶变换	(292)
移位定理/微分定理/分数卷积定理/变换的例子/应用	(294)
第 14 章 拉普拉斯变换	(303)
拉普拉斯积分的收敛性	(304)
拉普拉斯变换定理	(306)
瞬态响应问题	(307)
拉普拉斯变换对	(308)
自然响应	(311)
冲激响应和传递函数	(311)
初始值问题	(313)
求解初始值问题	(316)
开关问题	(316)
第 15 章 天线与光学	(325)
一维孔径	(325)
与波形和谐对照	(328)
波束宽度和孔径宽度	(329)
波束变向	(329)
Arrays of arrays	(330)
干涉仪	(330)
频谱灵敏度函数	(331)
调制传输函数	(332)
角度谱的物理特性	(332)
二维理论	(333)
光衍射	(334)
菲涅耳衍射	(335)
傅里叶分析的其它应用	(336)
第 16 章 在统计学中的应用	(341)
和的分布	(341)
卷积关系的结果	(344)
特征函数	(345)
截断指数分布	(346)
泊松分布	(347)

第 17 章	随机波形和噪声	(353)
	随机数的离散表示	(354)
	随机输入通过滤波器:对幅度分布的影响	(356)
	关于独立的题外话/卷积关系	(357)
	对自相关的影响	(360)
	对谱的影响	(362)
	随机输入的谱/输出谱	(362)
	一些噪声数据	(365)
	带通噪声的包络	(367)
	噪声波形的检测	(368)
	噪声功率的测量	(368)
第 18 章	热传导与热扩散	(375)
	一维扩散	(375)
	一个点的高斯扩散	(379)
	空间正弦扩散	(380)
	正弦时间的改变	(383)
第 19 章	动态功率谱	(386)
	动态谱的概念	(386)
	动态谱图	(387)
	计算动态功率谱	(390)
	频分/时分/表示	(390)
	等价定理	(391)
	包络和相位	(392)
	用 $\log f$ 代替 f	(393)
	小波变换	(394)
	自适应的单元位置	(395)
	基本线性调频信号(Chirplets)	(396)
	维格纳(Wigner)分布	(397)
第 20 章	$\text{sinc}x$, sinc^2x 和 $\exp(-\pi x^2)$ 的数值表	(401)
第 21 章	部分习题答案	(406)
	第 2 章 基本原理	(406)
	第 3 章 卷积	(407)
	第 4 章 一些有用函数的符号	(408)
	第 5 章 冲激符号	(410)
	第 6 章 基本定理	(414)