

康晓东 编著

医学图像信号 变换与压缩

YIXUE TUXIANG XINHAO BIANHUAN YU YASUO

4V2
ASIN 120
Abdomen
General /V
T1/-1/ 2/V:3
1/2 CD:4.0
CD Gain = 52
Store in progress

清华大学出版社

康晓东 编著

医学图像信号 变换与压缩

YIXUE TUXIANG XINHAO BIANHUAN YU YASUO

4V2
Abdomen
General /V

T1/-1/ 2/V:3
1/2 CD:4.0
CD Gain = 52

Store in progress

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书从信号的最基本概念开始,在讨论了信号的时域变换、频域变换、 z 变换、离散变换、随机信号处理、小波变换和信号的滤波、调制的基础上,重点阐述了二维图像信号变换及其应用、信号压缩及信号压缩编码的实现。

本书一方面在叙述上尽量避免繁复的数学推导,而在那些必需的关键之处,又能做到不省略中间步骤,给出全部的推导过程;另一方面虽然以信号压缩为信号变换的具体运用作主线,但在信号变换的叙述中充分预留了其他应用上的“接口”(如医学信号重建、医学图像增强与复原、医学信息分析等)。

本书既是医学图像信号变换及应用方面最新技术成果的综合性论著,也可作为高等院校相关专业课程的教材,同时还兼顾了医疗机构、医疗器械生产企业或业务相关的研究单位以及从事相关的市场定位、研究开发等方面的从业人员提高业务的需要。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

医学图像信号变换与压缩/康晓东编著. —北京:清华大学出版社,2004.7

ISBN 7-302-08251-0

I. 医… II. 康… III. 影像诊断—图像处理 IV. R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 018532 号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客户服务: 010-62776969

责任编辑: 张建平 罗 健

版式设计: 刘祎森

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印 张: 29.25 字 数: 591 千字

版 次: 2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-08251-0/R·49

印 数: 1~3000

定 价: 72.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

著作論文
碩果累累

書贈 康曉東教授

王威琪



癸未年六月

序

20 世纪 70 年代初 X 线 CT 的开发应用,使放射学进入了一个以体层成像和电子计算机图像重建为基础的新阶段。继之,磁共振成像、放射性核素和超声成像逐步兴起并应用于临床,医学成像技术不仅有图像的产生,还包括图像的处理、显示、记录、存储和传输。

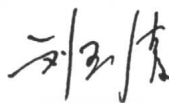
近年来,由于微电子和现代计算机技术的进展,数字化图像处理包括多种医学图像。三维甚至四维重建和后处理技术发展迅速,大大丰富了影像学诊治的内容。另一方面,PACS(picture archiving and communication system,图像存储与通信系统)逐步走向实用化,并向远程放射学和网络影像学方向发展。

自 20 世纪 90 年代以来,医学图像处理与分析、计算机图形学、虚拟现实和计算机网络等技术已逐渐形成了一个交叉的学科专业,近年来国内也有相当的进展。由康晓东同志撰写的这本《医学图像信号变换与压缩》是关于医学图像信号变换与压缩及相关内容的一部技术性很强的著作,它从理论上比较全面系统地阐述了医学成像过程。从技术上讲信号变换是信号压缩的基础,信号压缩则是信号变换的最新应用方式;从医学应用上,信号变换描述了能向医学专业人员最大限度地提供真实信息的可能性,信号压缩则能提供丰富的信息共享空间。

我祝愿并相信本书会受到广大读者尤其是相关领域中青年同道们的欢迎。

中国医学科学院、协和医科大学

阜外医院



2004 年春

前言

撰写这部《医学图像信号变换与压缩》用了作者近 4 年的时间,而酝酿它则长达 10 年之久。

◇ 为什么撰写本书

计算机和网络技术与临床医学的结合/应用主要表现在如下两个方面:其一是将计算机技术植入仪器、设备和装置,用于人体信息检/监测(如临床医学检验仪器、ICU/CCU 监控仪器),或用于过程控制(如辅助治疗);其二是通过网络的软/硬件平台进行信息集成(如 HIS、RIS 和 PACS)和信息交流(如 E-mail、信息搜索与发布)。

而前述第一方面的最典型、最成功的结合又当数人类基于投影重建图像数学理论发明的 X 射线计算机体层成像技术(X-ray computed tomography, X-CT)。

20 世纪初,奥地利数学家 Radon 提出了图像重建理论的数学公式,并证明:一个二维或三维物体能通过其不同方向上的投影单一地重建起来。1963 年 9 月及 1964 年 10 月,美国教授 A. M. Cormack 在《应用物理杂志》(Journal of Applied Physics)上发表了 2 篇题为《用线性积分表示一函数的方法及其在放射学上的应用》的文章,并将这一图像重建的数学方法成功地用于简单的模型装置,从而奠定了 CT 图像的精确重建。

20 世纪 60 年代末,英国工程师 G. N. Hounsfield 将“如果一束 X 线从各个方向穿过人体,并且测量到它们的透射值,那么就可以得到物体内部结构的信息,且能以图像的形式呈现出来”的想法付诸行动,并在 Ambrose 医生指导下进行了临床实验,成功地开发出世界第一台 X 线计算机体层成像设备。

如果从信号的角度说,究其实质,X-CT 不外是将检测到的信息或记

录在某种媒体上的信息,而这些信息中有的含有有用信息的信号(signal),有的是需要处理掉噪音(noise)后的信号——通过信号变换的方式,以便抽取其中有用的信息,最后将其以人的感观可以感觉到的形式呈现出来的过程。

CT的发明使得医学与工程技术的结合极受社会所推崇。稍后,应用X-CT图像信号成像的原理,人们相继开发成功了核磁共振CT(nuclear magnetic resonance computed tomography, NMR-CT)和发射型计算机断层扫描成像技术(emission computed tomography, ECT)^①。为此, Hounsfield 和 Cormack 于 1979 年共同获得了诺贝尔生理学医学奖。2003 年的诺贝尔生理学医学奖授予了美国的物理学家 Paul C Lauterbur 和英国的物理学家 Peter Mansfield。这两位科学家通过对磁共振信号的研究奠定了 NMR-CT 的基础框架。

网络在临床医学方面应用的历史虽不长,但其表现却很引人瞩目:在诊治现场,在医疗部门内部,及与其他医疗部门、机构之间,无缝地传递、分享医学信息;建立与医疗计划工作流程相适应的连续而一体化的放射学数据;患者信息识别为身份不明患者(如在外伤急救场合)提供其放射诊断图像与接纳、诊治历史的匹配方法;因放射图像一致性显示而对一系列通信作出的规定,以保持灰度图像及其显示状态的显示一致性;分群程序显示应付一些关联的研究课题;放射信息访问为访问放射信息规定一系列问讯通信;关键图像标注——为使用者标志一个或一批图像而规定一个通信标准;为简单图像与数字报告便利应用而日渐普遍的数字化听写、语音识别,以及规定报告集。

自 2000 年起,由北美放射学会 RSNA 和医疗住处管理与系统学会 HIMSS(Healthcare Information Management and Systems Society)联合组成了集成医疗机构(Integrating the Healthcare Enterprise, IHE),专门用以解决医生、医院管理部门和其他医疗专业人士的一个困惑的问题:医院计算机系统之间不能共享信息——从信号的角度说,是网络医学中不可避免的对信号的压缩和解压问题,编制、并在每年的初春发布称之为“IHE 技术体制(IHE technical framework)”的文献,以在 DICOM 和 HL7 基础上,由此作为协调实施医疗信息标准的蓝图。

本书内容

本书论述医学图像信号变换与压缩及其相关内容。

最初,用模拟方法对模拟信号予以处理时,因信号处理和信息抽取是一个整体,所以对“信号变换”技术并没有太深刻的认识。是香农(Shannon)采样定理架起了从模拟信号

^① 已商品化的有 SPECT(single photon emission computed tomography, 单光子 CT)和 PET(positron emission computed tomography, 正电子 CT)。

处理通向以计算机擅长的数字信号处理的桥梁,并由此衍生出支撑现代社会的、丰富多彩的信息技术。

在模拟处理时代,从物理角度看,信号处理受到很大限制,当用计算机进行数字处理时,经常会遇到不受物理条件制约的数学加工,即算法(algorithm),也就是数字信号处理(digital signal processing, DSP)领域各种信号变换技术的统称。

DSP 的历史可以追溯到 1936 年 PCM(pulse code modulation)技术的发明和 Dudley 发明声音编码器(voice coder)时期。1942 年,当因数学难度而闻名的 Wiener 预测理论用于天气预报时,人们就感到必须将连续时间函数改进为离散时间函数。从理论上讲,Levinson 虽然给出了由连续时间域向离散时间域转换的可能性,但因当时计算机技术尚不完善,Levinson 的算法未能得到实际的应用。

20 世纪 50 年代,计算机技术开始普及。20 世纪 60 年代, z 变换成为描述线性离散时间系统的基本工具,并指导了数字滤波器的设计。20 世纪 70 年代,VLSP 芯片两大成功的范例使数字信号处理引起了社会的广泛关注:第一是以 Levinson 算法为中心的语音的线性预测编码(linear predictive coding, LPC)的问世,1978 年美国德州仪器公司(TI)将该算法作为滤波器开发出 LSI 芯片;第二是贝尔实验室开发的,用于在长途电话中消除回声现象的回声消除器(echo canceled)。回声消除器的核心是一种应用 LSM 算法后的自适应滤波器,该滤波器解决了长话系统中,虽然信号统计量是未知的,但可由数据推出最佳滤波系数。今天,自适应滤波器还用作通信线路均衡器、电视图像重影(ghost)的消除器以及抑制有源噪声等方面。

DSP 的另一大支柱理论是快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)。FFT 最初由 Cooley 和 Tukey 发表^①,也正是由于计算机技术的应用,FFT 不但没被作为一个纯数学上的发现而埋没,反而在 MIT 林肯实验室中更成熟,并最终被广泛应用在信号流程图解释、bit 位变换分析、定位计算和 NlogN 的计算量研究上。

信号变换的基本组态是通过时间、空间或者频率在不同坐标轴上进行变换,以便更容易地掌握其特征与性质。然而,实际上大部分信号都是不确定的,需要采用概率与数理统计的方法予以处理;大部分物理事件的发生过程都是动态的而不是静态或恒定不变的,而且,在其生成阶段也大多是非线性的变换^②。

本书的信号变换的内容涉及到:

(1) 最基本的拉普拉斯变换和傅里叶变换,在数学、控制论或自动控制等其他领域也会涉及到。

① FFT 实际上可以追溯到 Gauss 时代,Cooley 和 Tukey 也表示 1942 年他们也发现过,但在手摇计算时代,计算量为数十万数量级是一件不可想像的事情。

② 若要处理更多更复杂的对象,就必须考虑更加抽象化的基础知识所需要的更一般的原理。

(2) z 变换,把时间连续信号经过取样变换为离散的时间信号的操作,是 DSP 处理的第一步。

(3) 由离散傅里叶变换(discrete Fourier transform,DFT)所推导出的 FFT 算法,同时 FFT 也是 DSP 中使用最频繁的算法。

(4) 由实验取得的信号数据在多数情况下是伴随概率变化的,且以随机变化更为常见,通过建立信号模型则较易把握对象的特征,同时可进一步通过研究模型来描述对象。

(5) 对于时变信号的处理方式,目前主要是依靠柯根和小波变换来进行(后者进一步衍化出了子带滤波),而这些又是通过滤波器来实现的。

(6) 医学图像信号处理,一方面属于多维信号处理的范畴(图像重建),另一方面又离不开信号判别(图像后处理)。

信息高速公路、数字地球概念的提出以及 Internet 的广泛使用,又提出了如何在节省通信带宽的前提下,尽可能地保证有用信息的可靠传输问题。

(7) 从信号的滤波、调制到信号的压缩。

(8) 信号变换的算法通过编码实现。

◇ 撰写思路

全书的编写思路是:

(1) 围绕医学信号,特别是大型医学影像设备中信号的变换这一目前凝聚最先进信号变换技术载体的主线展开,但又不仅仅拘泥于医学信号变换理论和技术,而是将信号变换理论技术推广到非电类。

(2) 考虑到读者对象的特点,特别安排了第 2 章信号变换的数学基础,以帮助其对信号变换所涉及到的数学知识有个充分的准备。

(3) 虽然以信号压缩作为信号变换的具体运用进行重点介绍,但在信号变换的叙述中充分预留了其他应用上的“接口”,如信号重建、信息理解等。

(4) 内容叙述强调整体性,着重原理和关键机制,代码细节从简(因它们最占篇幅)。

(5) 取材现代化,尽量囊括信号变换的最先进的实现技术。

(6) 将“通信交换原理与技术”和“传感器原理与技术”以附录的形式缀于书末,以保证全书在科学上的整体性。

◇ 使用本书时应注意什么

DSP 既是 digital signal processing 的缩写,也是 digital signal processor 的缩写。前者是指数字信号处理的理论和方法;后者则是指用于数字信号处理的可编程微处理器。

DSP 技术基于两个领域的高速发展,一是数字信号处理的理论和方法的发展,各种快速算法(如声音与图像的压缩编码、识别与鉴别、加密解密、调制解调、信道辨识与均衡、智能天线、频谱分析等算法)都成为研究的热点,并在这些领域有长足的进步,为各种信号的实时处理提供了算法基础;二是随着微电子科学与技术的进步,数字信号处理器的性能迅速提高。在性能大幅度提高的同时,体积、功耗和成本却大幅度下降,以满足低成本便携式电池供电应用系统的要求。本书所涉及的仅是上述第一个领域的部分内容。

将一个信号处理算法从其研究时使用的通用计算环境移植到实时应用领域的方法有两个基本的特征:一个是处理速度要能跟上输入,另一个是这样的处理能在一个小的而且经济可靠的系统上实现。它所涉及的带有普遍性的问题是软硬件实现、时间空间的折衷、现成的元件和用户定制元件等。

实际上,算法移植过程是将研究中的算法移植到一个系统的过程。这个系统受到处理时间、系统大小和系统成本三个方面的约束。

进一步说,要使一个算法满足实际应用的需求,就要在算法、硬件、软件等多个领域内应用折衷和集成技术。如通常需要同时改变算法的结构和执行算法的硬件与软件的体系结构;可以引入更多的计算步骤,以获取计算的均匀分布,也可以把一个算法分解到特殊的硬件结构上(可以由多个处理器组成),还可以是设计一个特殊的硬件结构,使之更适合于算法在用户硬件上的实现。从微观层次上看,必须确定算法是用硬件来实现还是用软件来实现,这就要在灵活性和速度之间进行折衷。从宏观层次上看,要降低系统在整个生命周期内的成本,是在开发、制造、维护各个阶段都采取降低成本的优化措施,还是只选择一个阶段使其成本得到优化,比如说优化开发阶段的成本。

与那些数字信号处理算法基础相比,数字信号处理的实现不像前者那样,是任何一个信号处理解决方案的起点,而是处在设计周期的后期。关于这方面更详细的信息,需要读者去查阅其他资料。

◆ 致谢

出版一本书是集体努力的结果。许多人为此书的内容、评阅和出版贡献了他们的宝贵时间和精力。作者要感谢为此书贡献力量,给作者鼓励的人们。

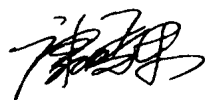
作者的工作曾得到过罗沛霖院士、俞梦孙院士、吴咸中院士、钟南山院士、陈太一院士、刘玉清院士、王威琪院士、郝希山院士、何丕廉教授、吴恩惠教授、陈星荣教授、娄建石教授、赵堪兴教授、刘瑞挺教授、吴功宜教授、胡宗泰高级工程师、蒋大宗教授和朱丽兰研究员的大力扶持和指导,他们严谨的治学态度令人感佩;东软集团刘积仁教授、安科公司陶笃纯研究员、中华医学会医学图像分会罗述谦教授和总后卫生部傅征教授曾对作者的工作给予关注和期望,作者对他们的支持铭记在心;在本书写作过程中,清华大学出版社

蔡鸿程总编、医学与生物科技编辑室张建平主任和罗健编辑都提出过许多宝贵的建议,使作者受益颇多;另外,作者还要感谢张新荣教授、董甫南教授、卜绮成教授、秦世才教授、张金钟教授、姚智教授、顾汉卿教授、谭建辉教授和时季成教授,以及其他许多前辈、同仁的理解和帮助。

作者还特别感谢医学影像界和医药卫生工程学界的著名前辈学者,中国工程院院士、中国医学科学院阜外医院博士生导师刘玉清教授和中国工程院院士、复旦大学生物医学工程中心博士生导师王威琪教授的关心和鼓励,感谢他们两位巨擘于百忙之中为本书赐序题词。

也感谢作者文稿的长期的第一读者——南开大学副教授饶友玲博士,她曾牺牲了许多宝贵的时间为作者斟字酌句,并直至阅读完本手稿的最后一个字方飞赴海外。

最后,书中所有的错误和缺点都是作者自己造成的,因而,也更诚恳地希望各位读者,各位研究和从事相关工作的学者专家提出宝贵意见。



2004年初改于天津

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号分类	2
1.1.1 随机信号与确定信号	2
1.1.2 模拟信号与数字信号	4
1.2 医学信号描述	5
1.2.1 医学信号表达	5
1.2.2 医学信号运算与分解	12
1.2.3 医学信号采样	17
1.3 对医学信号的变换处理	20
1.3.1 医学信号的特点与频谱	20
1.3.2 医学信号的变换处理	24
第 2 章 信号变换的数学基础	29
2.1 卷积及其应用	29
2.1.1 卷积的定义	29
2.1.2 卷积的性质与应用	32
2.2 傅里叶变换和拉普拉斯变换	34
2.2.1 傅里叶变换	34
2.2.2 典型非周期函数的傅里叶变换	37
2.2.3 傅里叶变换的基本性质	40
2.2.4 拉普拉斯变换的概念	45
2.2.5 拉氏变换的基本性质	46
2.2.6 拉氏变换与傅氏变换的关系	48
2.3 信号的矢量空间	51

2.3.1	二维向量的距离和内积	52
2.3.2	从多维向量空间到函数空间	54
2.3.3	标准正交函数系	57
2.4	相关函数	60
第3章	医学信号的时域变换	63
3.1	连续系统内信号的时域变换	63
3.1.1	用卷积积分法实现信号的时域变换	64
3.1.2	用状态法实现信号的时域变换	66
3.2	离散系统内信号的时域变换	67
3.2.1	离散信号的表示与运算规则	67
3.2.2	用差分方程描述离散信号	69
3.3	卷积和及其应用	70
3.3.1	卷积和	70
3.3.2	卷积和的计算机模拟	71
第4章	医学信号的频域变换	75
4.1	对信号的傅里叶变换	75
4.1.1	对周期信号的傅里叶变换	75
4.1.2	傅里叶变换的计算机模拟	78
4.2	信号抽样	79
4.2.1	时域抽样	80
4.2.2	频域抽样	83
4.2.3	采样(抽样)定理	84
4.3	信号的复频域(S域)变换	86
4.3.1	通过s变换求系统函数	86
4.3.2	利用系统函数分析系统特性	88
第5章	z变换和离散傅里叶变换	91
5.1	z变换	91
5.1.1	z变换的定义与性质	91
5.1.2	z变换的性质	94
5.1.3	z变换应用	95
5.2	系列离散变换方法	99

5.2.1	离散傅里叶变换 DFT	100
5.2.2	离散傅里叶变换的性质	104
5.2.3	快速傅里叶变换 FFT	112
5.2.4	FFT 应用中应注意的问题	122
5.2.5	沃尔什变换及其应用	125
5.2.6	离散余弦变换 DCT	129
第 6 章	随机信号处理和小波变换	131
6.1	随机信号的概念与描述	131
6.1.1	随机信号的概念	131
6.1.2	随机信号的描述	133
6.2	随机信号的数字特征与频域分析	135
6.2.1	随机信号在时域的数字特征	135
6.2.2	随机信号的频域分析	140
6.3	信号的统计处理	143
6.3.1	平稳过程	143
6.3.2	各态历经	145
6.3.3	高斯信号、白噪声和伪随机信号	146
6.3.4	确定信号的相关分析	148
6.3.5	信号模型选择	150
6.4	小波变换与应用	153
6.4.1	短时傅里叶变换	153
6.4.2	小波变换	159
6.4.3	多重分辨率近似	167
6.4.4	小波包分析	172
第 7 章	信号的滤波与调制	175
7.1	滤波器原理与分类	175
7.2	模拟滤波器	178
7.2.1	信号的无失真传输	178
7.2.2	理想低通滤波器	180
7.2.3	佩利-维纳准则	184
7.2.4	模拟滤波器的逼近与设计	185
7.2.5	模拟滤波器的频率与元件变换	191

7.3	数字滤波器	194
7.3.1	无限冲激响应数字滤波器(IIR)	194
7.3.2	有限冲激响应数字滤波器(FIR)	200
7.4	自适应滤波器	205
7.4.1	自适应滤波器原理	205
7.4.2	LMS 算法	208
7.4.3	RLS 算法	210
7.5	信号调制	212
7.5.1	调制与解调	212
7.5.2	从抽样信号恢复连续信号	215
第 8 章	多维信号变换与医学图像重建	219
8.1	数字图像信号的基本概念	219
8.1.1	图像与图像分析	220
8.1.2	图像处理中的信号变换	221
8.2	图像的多维信号变换	222
8.2.1	图像的二维傅里叶变换	223
8.2.2	图像离散化	225
8.2.3	图像的灰度直方图	228
8.2.4	二维小波变换	229
8.2.5	非正-余弦函数的正交变换	235
8.2.6	斜变换、霍特林变换和霍夫变换	241
8.3	医学图像重建	245
8.3.1	图像检测与投影重建	245
8.3.2	傅里叶-卷积图像重建	248
8.3.3	代数重建	255
8.3.4	代数重建中的滤波器设计	258
8.3.5	重建优化	261
第 9 章	医学图像的增强、复原及分析	265
9.1	图像增强	268
9.1.1	通过直方图改善图像对比度	269
9.1.2	通过空域滤波使图像增强	271
9.1.3	通过频域滤波使图像增强	274

9.1.4	多图像平均与图像局部增强	279
9.2	图像复原	280
9.2.1	图像退化模型	281
9.2.2	将图像信号逆滤波以消除(匀速直线运动导致的)模糊	288
9.2.3	对图像信号的维纳滤波与约束去卷积	291
9.2.4	兼具保护图像边缘和去除噪声的中值恢复	295
9.2.5	图像空间畸变校正	298
9.3	图像特征提取	301
9.3.1	二值化图像的阈值选择和图形提取	301
9.3.2	图像的边缘检测	303
9.3.3	线图形的检测方法	306
第 10 章	对医学图像信号压缩	309
10.1	图像信息熵与信道复用	310
10.1.1	图像信息熵	312
10.1.2	信息失真理论简介	315
10.1.3	脉冲调制中的取样频率	319
10.1.4	频分复用、时分复用与标记复用	323
10.1.5	码分复用	328
10.2	对图像信息的压缩编码	330
10.2.1	统计编码	330
10.2.2	预测编码	334
10.2.3	变换编码	339
10.2.4	子带编码	345
10.2.5	从波形基编码到模型基编码	348
10.3	医学图像信息压缩标准	352
10.3.1	以 DICOM 为代表的医学图像接口编码标准	353
10.3.2	HL7 医学信息集成标准	359
第 11 章	分形几何与图像代数的应用	363
11.1	分形方法	363
11.1.1	分形及分形维数	363
11.1.2	分形插值	367
11.1.3	复迭代中分形	371

11.1.4	自相似分形的几何构造	374
11.1.5	分形方法	375
11.2	基于数学形态学的图像信号处理	380
11.2.1	数学形态学(图像代数)的基本概念	380
11.2.2	数学形态学的基本算法	381
11.2.3	二值图像处理时的基本算法	387
11.2.4	灰度图像信号的形态学处理	393
11.2.5	灰度形态学的实际应用	397
附录A	通信交换原理与技术	399
A.1	通信交换技术概述	399
A.2	通信交换网络	403
A.2.1	WAN 的通信	403
A.2.2	LAN 的通信	421
附录B	关于信道编码	429
B.1	信道编码概念	429
B.2	信道中的纠错编码方法	434
B.2.1	线性分组码	434
B.2.2	循环码	438
B.2.3	卷积码	440
参考文献		446