

CAMBRIDGE

# Channel Codes


Classical and Modern

# 信道编码： 经典与现代

【美】William E. Ryan Shu Lin 著

【中】白宝明 马啸 译

【美】林舒 (Shu Lin) 审校

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 信道编码：经典与现代

[美] William E. Ryan Shu Lin 著

[中] 白宝明 马啸 译

[美] 林舒 (Shu Lin) 审校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

信道编码是数字通信和数据存储系统的核心技术，本书主要讨论经典编码与现代编码的基础理论与应用实践。在本书中，Lin 教授与 Ryan 教授清晰地介绍了现代信道编码（包括 LDPC 码与 Turbo 码）的最新研究情况，同时详细阐述了一些经典信道码，如 BCH 码、RS 码、卷积码、有限几何码以及乘积码，所以本书既包含经典编码技术，也包含现代编码技术。

本书适合通信、计算机、电子信息工程等专业的高年级本科生、研究生，以及从事信道编码研究的工程师和计算机科学工作者阅读。

Channel Codes :Classical and Modern,1 edition, 978-0-521-84868-8 by William E. Ryan and Shu Lin first published by Cambridge University Press[2009]

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Publishing House of Electronics Industry[2017]

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

This edition is authorized for sale in China Mainland.

此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2011-7561

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

信道编码：经典与现代 /（美）威廉·E.瑞恩（William E.Ryan），（美）林舒（Shu Lin）著；白宝明，马啸译。—北京：电子工业出版社，2017.3

书名原文：Channel Codes: Classical and Modern

ISBN 978-7-121-30899-4

I. ①信… II. ①威… ②林… ③白… ④马… III.①信道编码 IV. ①TN911.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 022122 号

责任编辑：董亚峰

印 刷：北京天宇星印刷厂

装 订：北京天宇星印刷厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：37.25 字数：956 千字

版 次：2017 年 3 月第 1 版

印 次：2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价：98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式：（010）88254694。

# 译者序

---

随着信息理论与编码技术的发展，信道编码作为一项标准技术已广泛应用于数字通信与数据存储系统。本书作者之一 Shu Lin (林舒) 教授和 Daniel J. Costello, Jr. 教授合著的经典名著《差错控制编码：基础与应用》全面而深入地论述了经典信道编码技术，深为相关专业的师生及工程师所喜爱。但随着 Turbo 码的问世与 LDPC 码的复兴，信道编码领域仍缺少一本深入讲述现代编码理论与技术的书。

《Channel Codes: Classical and Modern》是林舒教授和 William E. Ryan 教授合著的一本关于现代信道编码技术的优秀著作，系统地论述了基于图的现代编码技术（包括 Turbo 码、LDPC 码等）；特别地，对于 LDPC 码，从二元到多元，从基于计算机搜索的构造到代数构造，均做了全面而深入的讨论。这两本书相辅相成，能够使读者全面掌握经典与现代信道编码理论与方法。

我们初次接触到《Channel Codes: Classical and Modern》一书是在 2009 年年初，觉得这是一本紧跟技术发展的优秀著作，很有必要翻译成中文介绍给国内读者。林舒老师也鼓励我们，并跟我们一起致力于翻译工作。LDPC 码的应用研究正方兴未艾，相信本书的出版对广大的研究人员与工程师会有很大的帮助。

本书的翻译工作由西安电子科技大学团队（负责第 9 ~ 15 章）和中山大学团队（负责第 1 ~ 8 章）的师生通力合作完成，两校的学生还共同对书中的公式和文字进行了全面、仔细的校对，对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。直接参与翻译和校对工作的主要有：西安电子科技大学的博士生徐恒舟、穆锡金、李琪、邵军虎、张睿、冯丹、朱敏，硕士生魏芸、李琼、屈宇澄、陈佩瑶、孙成、沈春慧、鲁邹晨、邱晨、赵悦、陈嵘庭等；中山大学的赵山程、胡竞男、许小珮、邓博之、王磊军、张运鸿、曾慧聪、陈海强、唐四云、刘佳、余冬菊、杨铮、庄秋涛等。中山大学的陈立老师翻译了原书的前言。最后由白宝明统稿。

原书的内容很新，包含许多新的技术术语。有些词语的翻译经过了多番讨论与推敲，但仍感觉难以完美地反映出原文的精妙。由于水平有限，不当之处在所难免，恳请有条件阅读英文原著的读者批评指正。

感谢林舒老师的鼓励与支持，以及对我们的研究工作的指导。林老师自始至终关心着本书的翻译工作，并在百忙之中审阅了翻译初稿。林老师平易近人，其在学术上孜孜不倦、不断创新的精神时刻激励着我们前行。感谢王新梅教授带我们进入了信息论与信道编码这一激动人心的领域，并在本书的翻译过程中给予了许多指导。

本书的翻译得到了国家 973 计划项目“高移动性宽带无线通信网络重点理论基础研究”（2012CB316100）的支持，特此致谢。

最后，感谢电子工业出版社的董亚峰编辑，他为本书的出版做了大量的工作。

译者

2015 年 8 月

# 前言

---

本书命名为《信道编码：经典与现代》，这个名字用于反映这本书的具体内容，既涵盖了经典的信道编码，也涵盖了现代的信道编码。本书所涉及的编码包括 BCH 码、Reed-Solomon 码、卷积码、有限几何码、Turbo 码、低密度校验 (LDPC) 码和乘积码等。然而，这个书名还有另外一层含义，本书的大部分内容是关于 LDPC 码的，这被认为是一种既经典 (1961 年被发现) 又现代 (1996 年被重新发现) 的编码技术。David Forney 在他 1999 年 8 月有关定义在图上的码 (LDPC 码是一种图码) 的 IMA 讲话中印证了这一观点：“这感觉就像早期编码的年代”。另一个本书具备经典与现代双重性的例子是，有限几何码是 20 世纪 60 年代被广为研究的一种信道编码，因此，它属于经典的信道编码。然而，Shu Lin 等人在 2000 年重新发现了这种编码并把它归结为 LDPC 码的其中一类，具有很好的纠错性能，因此，有限几何码也可以被认为是一种现代的信道编码。对于有限几何码，“经典”与“现代”的元素主要体现在它的译码器上：一步硬判决译码 (经典) 和迭代软判决译码 (现代)。

Claude Shannon 在 1948 年发表了著名的《通信的数学理论》一文，奠定了信道编码、信源编码和信息论领域的基础，该文发表至今已有 60 余年了。Shannon 证明了存在这样的一类信道编码，在信息速率不超过信道容量的前提下，这类码是可以用来保证可靠通信的。在 Shannon 的文章发表后的 45 年内，编码理论界设计了大量既巧妙又高效的编码系统。然而，在实际的场景中，这些系统都不能够很好地逼近 Shannon 的理论极限。第一个突破是 1993 年 Turbo 码的发现，这是第一种能够逼近 Shannon 容量限的信道编码。第二个突破是 1996 年对 LDPC 码的重新发现，这种码同样具有逼近容量限的性能 (这种码发明于 1961 年，但随后便被忽略了，这主要是因为当时的技术水平看来，这不是一种很实用的编码技术)。至今，这两种码的发现已超过了 10 年的时间，这方面的知识也日渐成熟，因此，也就到了写一本有关信道编码的新书的时候。

本书主要是针对工程和计算机科学专业的研究生，以及工业界和学术界的研发人员撰写的。编码理论的知识大多发表在各期刊和会议文章中，我们感觉非常有必要把这些知识系统地归纳在一起。对于信道编码的入门者和那些希望在该领域进一步提升自己知识水平的人而言，这是一本既可以学习到经典信道编码又可以学习到现代信道编码的书籍。目前，大部分档案文献都是针对该领域的专家而写的，但本书既适合于初学者 (前面的章节)，又适合于该领域的专家 (后面的章节)。本书的撰写由浅入深，阅读时并不需要信道编码领域的前提知识。由本书目录可见，我们会逐渐地延伸到这个领域的前沿知识部分。

当然，本书的选题反映了作者的经验和兴趣，但同时也考虑到选题在信道编码研究领域的重要性。因此，一些额外的章节使得本书稍显笨重。本书着重强调针对二进制输入信道的编码

技术, 这类信道包括二进制输入加性高斯白噪声信道、二进制对称信道和二进制删除信道等。显然, 我们省略了针对无线信道 (如 MIMO 信道) 的编码技术的内容。然而, 本书对于从事这个方向研究的学生和研究者们仍然是相当有用的, 因为很多针对加性高斯白噪声信道的技术能够推广到无线信道。另外, 可以注意到我们也省略了针对 Reed-Solomon 码的软判决译码算法的内容, 尽管这部分内容相当重要, 但作者认为这部分内容还不像本书的其他内容那么成熟。

如果将本书当做教科书使用, 可以列出若干不同的课程大纲。对于有关信道编码的研究生课程, 最显然的课程大纲应该涵盖本书的第1、2、3、4、5和7章的内容。这门课程首先介绍几种常用信道的容量限 (第1章), 然后介绍相关的代数知识 (第2章), 以便于学生理解 BCH 码、Reed-Solomon 码和它们的译码器 (第3章)。随后, 这门课程会介绍卷积码和它们的译码器 (第4章)。这门课程紧接着会介绍 LDPC 码及其迭代译码 (第5章)。最后, 在第4章和第5章的基础上, 学生可以开始学习 Turbo 码和 Turbo 译码 (第7章)。以上所提及的课程内容对于只上一个学期的研究生课程而言, 显然是有点过多了, 课程导师应当从中选择一部分来教授。

对于一门专门介绍 LDPC 码的设计的更高级课程而言, 课程导师可以从第10~14章选取课程内容。这门课首先介绍基于欧氏几何和射影几何的 LDPC 码设计 (第10章), 然后介绍基于有限域的 LDPC 码设计 (第11章) 和基于组合数学及图论的 LDPC 码设计 (第12章)。随后, 学生可以利用以上章节所学的知识学习如何专门针对二进制删除信道设计 LDPC 码 (第13章)。最后, 学生可以学习多元 LDPC 码的设计技术 (第14章)。

作为课程大纲的最后一个例子, 该门课程可以专门介绍基于计算机的 LDPC 码设计, 其内容应该包括本书的第5、6、8和9章。这门课程适合于已经学过经典信道编码, 且对 LDPC 码感兴趣的学生。这门课程首先介绍 LDPC 码及其若干译码器 (第5章)。随后, 学生开始学习若干基于计算机的 LDPC 码设计方法, 这包括 Gallager 码、MacKay 码、基于基模图的 LDPC 码和基于累加器的 LDPC 码等 (第6章)。然后, 学生将学习如何从重量分布的角度来衡量 LDPC 码集的性能 (第8章)。最后, 学生将学习如何利用密度进化和 EXIT 图等工具, 从译码门限的角度来衡量 LDPC (长) 码的性能 (第9章)。

本书每章都包含一定数量的习题, 这些习题形式多样, 有的要求例行的计算和推导, 有的要求利用计算机找答案或者利用计算机进行仿真, 有的甚至可以作为一个学期的项目。作者选择这些习题, 一方面希望加强学生对每章知识的理解 (比如, 要求学生某个译码器做计算机仿真); 另一方面, 也希望引导学生进一步扩展自己所学的知识 (比如, 要求学生某个结果进行证明, 而这个证明过程并没有在书本中出现过)。

首先, 我们要感谢 Ian Blake 教授, 他仔细阅读了整个书稿的早期版本并给出了很多重要的建议, 使本书得到了很大的完善。

我们也要感谢我们的研究生们, 在本书的准备过程中, 他们给予了很大的帮助。他们帮忙排版、仿真、校对和整理图片, 同时, 本书中也包含了很多他们的研究结果。对 W. Ryan 所撰写部分有贡献的学生 (过去的和现在的) 包括 Yang Han 博士、Yifei Zhang 博士、Micheal (Sizhen) Yang 博士、Yan Li 博士, Gianluigi Liva 博士、Fei Peng 博士、Shadi Abu-Surra、Kristin Jagiello (她校对了8章的内容) 和 Matt Viens。我们也同时感谢 Li Zhang (S. Lin 的学生), 他就第6章和第9章给予了很多有价值的反馈。最后, W. Ryan 也感谢 Lulea Institute of Technology 的 Sara Sandberg, 她就第5章的早期版本给予了很有用

的反馈意见。对 S. Lin 所撰写部分有贡献的学生包括 Bo Zhou 博士、Qin Huang (黄勤) 博士、Ying Y. Tai 博士、Lan Lan 博士、Lingqi Zeng 博士、Jingyu Kang 和 Li Zhang。其中，我们尤其需要感谢 Bo Zhou 博士和 Qin Huang 博士，他们帮忙输入了 S. Lin 撰写的所有章节，并在这些章节最后版本的准备过程中给予了许多的帮助。

我们感谢 Dan Costello 教授，他发给了我们很多有关第15章卷积 LDPC 码部分的参考资料。我们感谢 Marc Fossorier 博士，他给予了我们很多有关第14章的建议。我们还感谢 Ali Gharyeb 教授，他给予了我们很多有关第7章的建议。

我们感谢(美国)国家自然科学基金、国家航空和空间管理中心及信息存储产业联盟多年来对信道编码的资金支持，离开了他们的支持，本书的很多结果是不可能取得的。我们同时要感谢亚利桑那大学和加州大学戴维斯分校，本书的撰写得到了他们很大的支持。

我们同时感谢才华横溢的 Linda Wyrgatsch 女士，她专门为本书的封底创作了一幅图画。我们注意到，本书的封面和封底的两幅图画正好分别反映了经典与现代两个概念。

最后，我们要特别致谢我们的妻子(Stephanie 和 Ivy)、孩子和孙子，在本书的撰写过程中，他们给予了我们源源不断的爱与支持。

William E. Ryan  
亚利桑那大学  
(University of Arizona)

Shu Lin  
加州大学戴维斯分校  
(University of California, Davis)

本书网址:

[www.cambridge.org/9780521848688](http://www.cambridge.org/9780521848688)

<http://www.ece.arizona.edu/~ryan/ChannelCodesBook/>



# 目录

---

第1章 编码和容量 .....	1
1.1 数字数据通信与存储 .....	1
1.2 信道编码概述 .....	2
1.3 信道编码范例：(7,4) 汉明码 .....	3
1.4 设计准则和性能度量 .....	6
1.5 常用信道模型的信道容量公式 .....	8
1.5.1 二元输入无记忆信道的容量 .....	9
1.5.2 $M$ 元输入无记忆信道的编码限 .....	15
1.5.3 有记忆信道的编码限 .....	17
习题 .....	19
参考文献 .....	22
第2章 有限域、向量空间、有限几何和图论 .....	23
2.1 集合和二元运算 .....	23
2.2 群 .....	25
2.2.1 群的基本概念 .....	25
2.2.2 有限群 .....	26
2.2.3 子群和陪集 .....	29
2.3 域 .....	31
2.3.1 定义和基本概念 .....	32
2.3.2 有限域 .....	33
2.4 向量空间 .....	36
2.4.1 基本定义和性质 .....	37
2.4.2 线性独立和维数 .....	38
2.4.3 有限域上的有限向量空间 .....	39
2.4.4 内积和对偶空间 .....	41

2.5	有限域上的多项式	42
2.6	Galois 域的构造及其性质	46
2.6.1	Galois 域的构造	46
2.6.2	有限域的一些基本性质	53
2.6.3	加法子群和循环子群	58
2.7	有限几何	58
2.7.1	欧氏几何	59
2.7.2	射影几何	64
2.8	图论	67
2.8.1	基本概念	67
2.8.2	路径和环	70
2.8.3	二分图	72
	习题	74
	参考文献	76
	附录	77
<b>第3章</b>	<b>线性分组码</b>	<b>79</b>
3.1	线性分组码介绍	79
3.1.1	生成矩阵和校验矩阵	80
3.1.2	线性分组码的检错	82
3.1.3	线性分组码的重量分布和最小汉明距离	83
3.1.4	线性分组码的译码	85
3.2	循环码	89
3.3	BCH 码	93
3.3.1	码的构造	93
3.3.2	译码	95
3.4	多元线性分组码和 RS 码	102
3.5	乘积码、交织码和级联码	108
3.5.1	乘积码	109
3.5.2	交织码	110
3.5.3	级联码	111
3.6	准循环码	111
3.7	重复码和单奇偶校验码	119
	习题	120
	参考文献	123
<b>第4章</b>	<b>卷积码</b>	<b>125</b>
4.1	卷积码的范例	125
4.2	卷积码的代数描述	126

4.3	编码器的实现和分类	129
4.3.1	编码器类型的选择	133
4.3.2	灾难编码器	133
4.3.3	最小编码器	135
4.3.4	卷积码的设计	138
4.4	卷积码的其他表示	138
4.4.1	作为半无限长线性码的卷积码	138
4.4.2	卷积码编码器的图表示法	143
4.5	基于网格图的译码器	144
4.5.1	MLSD 和 Viterbi 算法	145
4.5.2	差分 Viterbi 译码	149
4.5.3	逐比特 MAP 译码和 BCJR 算法	151
4.6	基于网格图译码的性能估计	158
4.6.1	分组码的最大似然译码器性能	158
4.6.2	卷积码的重量枚举	160
4.6.3	卷积码的最大似然译码性能	162
	习题	165
	参考文献	169
<b>第5章</b>	<b>低密度校验码</b>	<b>171</b>
5.1	LDPC 码的表示	171
5.1.1	矩阵表示	171
5.1.2	图形表示	172
5.2	LDPC 码的分类	175
5.3	消息传递和 Turbo 原理	177
5.4	和积算法	181
5.4.1	概述	181
5.4.2	重复码的 MAP 译码器和 APP 处理器	183
5.4.3	单奇偶校验码的 MAP 译码器和 APP 处理器	184
5.4.4	Gallager 的 SPA 译码器	185
5.4.5	盒式加法 SPA 译码器	188
5.4.6	对 SPA 译码器性能的评述	191
5.5	降低复杂度的近似 SPA 算法	191
5.5.1	最小和译码器	191
5.5.2	衰减和偏移最小和译码器	192
5.5.3	修正最小和译码器	194
5.5.4	近似 $\min^*$ 译码器	197
5.5.5	Richardson/Novichkov 译码器	198

5.5.6	降低复杂度的盒加译码器	200
5.6	广义 LDPC 码的迭代译码器	203
5.7	BEC 和 BSC 的译码算法	205
5.7.1	BEC 下的迭代删除填充算法	205
5.7.2	BEC 下的 ML 译码	206
5.7.3	BSC 下的 Gallager 算法 A 和算法 B	207
5.7.4	BSC 下的比特翻转算法	208
5.8	结束语	209
	习题	209
	参考文献	215
<b>第 6 章</b>	<b>基于计算机的低密度校验码设计</b>	<b>219</b>
6.1	原始的 LDPC 码	219
6.1.1	Gallager 码	219
6.1.2	MacKay 码	220
6.2	PEG 算法和 ACE 算法	221
6.2.1	PEG 算法	221
6.2.2	ACE 算法	221
6.3	基模图 LDPC 码	222
6.4	多边型 LDPC 码	225
6.5	基于单个累加器的 LDPC 码	226
6.5.1	RA 码	226
6.5.2	非规则重复一累加码	227
6.5.3	基于广义累加器的 LDPC 码	234
6.6	基于两个累加器的 LDPC 码	234
6.6.1	非规则重复一累加一累加码	234
6.6.2	累加一重复一累加码	236
6.7	标准中的基于累加器的码	240
6.8	广义 LDPC 码	242
	习题	245
	参考文献	249
<b>第 7 章</b>	<b>Turbo 码</b>	<b>253</b>
7.1	并行级联卷积码	253
7.1.1	RSC 码的主要特性	253
7.1.2	交织器的主要特性	255
7.1.3	打孔	255
7.1.4	在 BI-AWGNC 上的性能估计	255

7.2	PCCC 迭代译码器	259
7.2.1	迭代译码器概述	260
7.2.2	译码器细节	261
7.2.3	PCCC 迭代译码器的总结	264
7.2.4	低复杂度近似	267
7.3	串行级联卷积码	270
7.3.1	BI-AWGNC 下的性能估计	270
7.3.2	SCCC 迭代译码器	272
7.3.3	SCCC 迭代译码器的总结	274
7.4	Turbo 乘积码	277
7.4.1	乘积码的 Turbo 译码	278
	习题	282
	参考文献	284
<b>第 8 章</b>	<b>Turbo 码集和 LDPC 码集的枚举器</b>	<b>287</b>
8.1	符号表示	287
8.2	并行级联码的码集枚举器	290
8.2.1	预备知识	290
8.2.2	PCCC 码集的枚举器	292
8.3	串行级联码集的枚举器	301
8.3.1	预备知识	301
8.3.2	SCCC 码集的枚举器	302
8.4	若干基于累加器的码的枚举器	306
8.4.1	重复—累加码的枚举器	306
8.4.2	非规则重复—累加码的枚举器	307
8.5	基于基模图的 LDPC 码集的枚举器	310
8.5.1	有限长码集的重量枚举器	310
8.5.2	渐进集合重量枚举器	313
8.5.3	计算渐进集合枚举器的复杂度	316
8.5.4	陷阱集集合枚举器	319
8.5.5	停止集集合枚举器	321
	习题	322
	参考文献	325
<b>第 9 章</b>	<b>LDPC 码集和 Turbo 码集的译码门限</b>	<b>327</b>
9.1	规则 LDPC 码的密度进化	327
9.2	非规则 LDPC 码的密度进化	332
9.3	量化密度进化	336

9.4	高斯近似	338
9.4.1	规则 LDPC 码的高斯近似	339
9.4.2	非规则 LDPC 码的高斯近似	340
9.5	LDPC 码的通用性	342
9.6	LDPC 码的 EXIT 图	346
9.6.1	规则 LDPC 码的 EXIT 图	347
9.6.2	非规则 LDPC 码的 EXIT 图	349
9.6.3	基模图码的 EXIT 技术	351
9.7	Turbo 码的 EXIT 图	353
9.8	EXIT 图的面积特性	355
9.8.1	串行级联码	355
9.8.2	LDPC 码	356
	习题	357
	参考文献	359
<b>第 10 章</b>	<b>有限几何 LDPC 码</b>	<b>361</b>
10.1	基于欧氏几何中的线构造 LDPC 码	361
10.1.1	一类循环 EG-LDPC 码	362
10.1.2	一类准循环 EG-LDPC 码	364
10.2	基于欧氏几何中的平行线簇的 LDPC 码构造	366
10.3	基于欧氏几何分解的 LDPC 码构造	369
10.4	通过掩模方法构造 EG-LDPC 码	374
10.4.1	掩模方法	374
10.4.2	规则掩模	374
10.4.3	非规则掩模	375
10.5	根据循环矩阵分解法构造 QC-EG-LDPC 码	378
10.6	基于射影几何构造循环和准循环 LDPC 码	382
10.6.1	循环 PG-LDPC 码	382
10.6.2	准循环 PG-LDPC 码	385
10.7	FG-LDPC 码的一步大数逻辑译码算法和比特翻转译码算法	385
10.7.1	BSC 下 LDPC 码的 OSMLG 译码算法	387
10.7.2	BSC 下 LDPC 码的 BF 译码算法	392
10.8	加权比特翻转译码: 算法 1	394
10.9	加权比特翻转译码: 算法 2 和算法 3	396
10.10	结束语	399
	习题	399
	参考文献	402

第 11 章 基于有限域的 LDPC 码构造 .....	405
11.1 有限域中域元素的矩阵散列 .....	405
11.2 基于有限域构造 QC-LDPC 码的一般方法 .....	406
11.3 基于两信息符号 RS 码最小重量码字的 QC-LDPC 码构造 .....	407
11.4 基于一类特殊 RS 码的通用校验矩阵的 QC-LDPC 码构造 .....	415
11.5 基于有限域子群的 QC-LDPC 码构造 .....	418
11.5.1 基于有限域的加法子群构造 QC-LDPC 码 .....	419
11.5.2 基于有限域的乘法子群构造 QC-LDPC 码 .....	421
11.6 基于素域加法群的 QC-LDPC 码构造 .....	423
11.7 基于有限域本原元的 QC-LDPC 码构造 .....	427
11.8 基于欧氏几何中相交线簇的 QC-LDPC 码构造 .....	429
11.9 一类基于 RS 码构造的结构化 LDPC 码 .....	432
习题 .....	436
参考文献 .....	438
第 12 章 基于组合设计、图和叠加的 LDPC 码构造 .....	439
12.1 平衡不完全区组设计和 LDPC 码 .....	439
12.2 I 类 Bose BIBD 和 QC-LDPC 码 .....	440
12.2.1 I 类 Bose BIBD .....	440
12.2.2 I 型 I 类 Bose BIBD-LDPC 码 .....	441
12.2.3 II 型 I 类 Bose BIBD-LDPC 码 .....	442
12.3 II 类 Bose BIBD 和 QC-LDPC 码 .....	446
12.3.1 II 类 Bose BIBD .....	446
12.3.2 I 型 II 类 Bose BIBD-LDPC 码 .....	447
12.3.3 II 型 II 类 QC-BIBD-LDPC 码 .....	448
12.4 散列法构造 II 型 Bose BIBD-LDPC 码 .....	450
12.5 基于网格图的 LDPC 码构造 .....	452
12.5.1 基于网格图的二部图短环消除方法 .....	452
12.5.2 码构造 .....	454
12.6 基于 PEG Tanner 图的 LDPC 码构造 .....	455
12.7 叠加法构造 LDPC 码 .....	459
12.7.1 通用叠加法构造 LDPC 码 .....	459
12.7.2 基矩阵和组成矩阵的构造 .....	460
12.7.3 叠加构造乘积 LDPC 码 .....	463
12.8 两类围长为 8 的 LDPC 码 .....	465
习题 .....	467
参考文献 .....	470

第 13 章	二进制删除信道上的 LDPC 码	473
13.1	BEC 上 LDPC 码的迭代译码	473
13.2	纠随机删除的能力	475
13.3	BEC 上的好 LDPC 码	476
13.4	突发删除的纠正	480
13.5	有限几何循环 LDPC 码和叠加 LDPC 码的纠突发删除能力	483
13.5.1	用基于有限几何的循环 LDPC 码纠突发删除	483
13.5.2	用叠加构造的 LDPC 码纠突发删除	483
13.6	渐近最优的纠突发删除 QC-LDPC 码	485
13.7	通过阵列扩展构造 QC-LDPC 码	489
13.8	纠正突发删除的循环码	494
	习题	497
	参考文献	498
第 14 章	多元 LDPC 码	501
14.1	定义	501
14.2	多元 LDPC 码的译码	502
14.2.1	QSPA	502
14.2.2	FFT-QSPA	506
14.3	基于有限几何的多元 LDPC 码构造	508
14.3.1	一类 $q^m$ 元循环 EG-LDPC 码	508
14.3.2	一类多元准循环 EG-LDPC 码	512
14.3.3	一类多元规则 EG-LDPC 码	514
14.3.4	基于射影几何的多元 LDPC 码构造	516
14.4	基于有限域的多元 QC-LDPC 码构造	518
14.4.1	有限域元素扩展成多元循环置换矩阵	519
14.4.2	基于有限域的多元 QC-LDPC 码构造方法	519
14.4.3	基于掩模法的多元 QC-LDPC 码构造	520
14.4.4	基于阵列扩展法的多元 QC-LDPC 码构造	522
14.5	基于欧氏几何中的平行平面和矩阵扩展的 QC-EG-LDPC 码构造	524
14.6	基于欧氏几何中的交叉平面和矩阵扩展的多元 QC-EG-LDPC 码构造	526
14.7	多元 QC-LDPC 码的叠加-扩展构造	530
	习题	533
	参考文献	535
第 15 章	LDPC 码的应用和前沿话题	539
15.1	LDPC 编码调制	539
15.2	ISI 信道上的 Turbo 均衡和 LDPC 码设计	546
15.2.1	Turbo 均衡	546



15.2.2	ISI 信道上的 LDPC 码设计	548
15.3	LDPC 码误码平层的估计	550
15.3.1	误码平层现象和陷阱集	551
15.3.2	误码平层估计	553
15.4	低误码平层的 LDPC 译码器设计	555
15.4.1	所研究的码	557
15.4.2	双模式译码器	559
15.4.3	级联和比特固定	563
15.4.4	广义 LDPC 译码器	565
15.4.5	注记	566
15.5	LDPC 卷积码	566
15.6	喷泉码	568
15.6.1	旋风码	569
15.6.2	LT 码	570
15.6.3	Raptor 码	570
	习题	570
	参考文献	572