

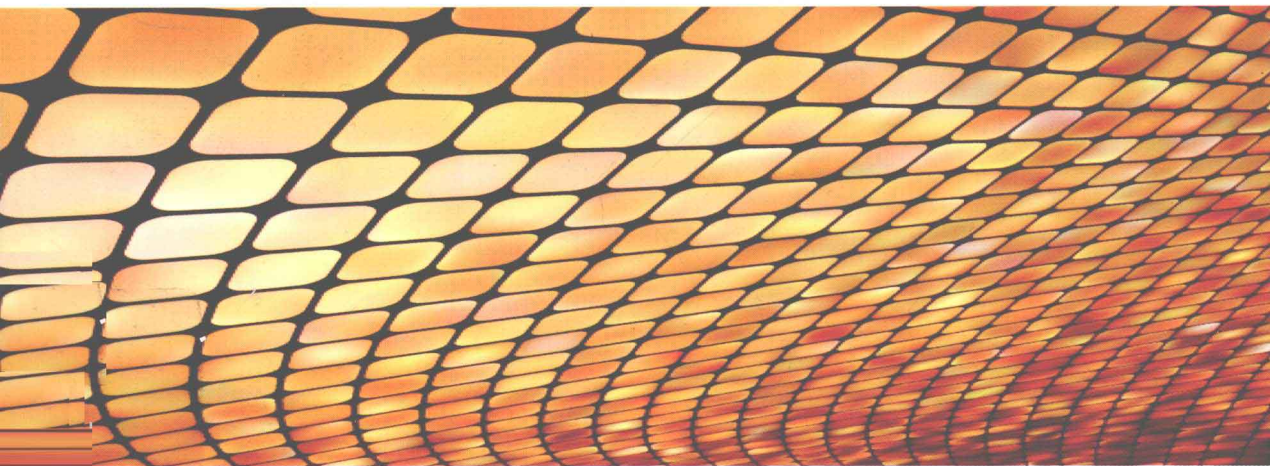
网络编码原理

Network Coding Principles

黄佳庆

编著

[加拿大] Zongpeng Li



国防工业出版社
National Defense Industry Press

网络编码原理

黄佳庆

[加拿大] Zongpeng Li 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

网络编码是信息论领域的重要理论突破,现已成为网络信息论的重要分支,是当前研究的重点和热点,将对未来网络的构架和发展产生重大和深远的影响。本书系统、全面地介绍了网络编码的基础理论、主要技术和典型应用。网络编码的基础理论包括单源网络编码和多源网络编码,其中,单源网络编码介绍有向无环网络中的网络编码(线性网络编码)、有向有环网络中的网络编码(卷积网络编码)和无向网络中的网络编码;多源网络编码介绍多多播网络编码和多单播网络编码。网络编码的主要技术包括随机网络编码、分代网络编码、多级网络编码、部分网络编码、物理层网络编码、模拟网络编码和复数域网络编码等;网络编码的典型应用包括应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层的典型应用实例。本书系统、条理地阐述了网络编码的知识体系框架和内容,注重阐明概念和原理的物理意义,力求深入浅出,易于读者理解和领会。

本书可作为通信、信息、计算机、电子等相关专业的研究生、高年级本科生的教材或学习参考书,也可作为从事上述专业的科研人员和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

网络编码原理/黄佳庆,(加)李宗鹏编著. —北京:国防工业出版社,2012.4

ISBN 978-7-118-08061-2

I. ①网... II. ①黄... ②李... III. ①计算机网络—编码程序—程序设计 IV. ①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 072384 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 15 字数 266 千字

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

网络编码(Network Coding)是信息论与编码领域的重要突破,属于网络信息论的一个重要分支。虽然网络编码的基本思想并不复杂,但却有别于传统的经典信息论。它已迅速发展成为一个相对独立的研究领域。网络编码和网络信息论的发展,将对当前和未来网络通信的构建和发展产生重大和深远的影响。

网络编码,顾名思义,是指网络中的节点参与编译码。网络编码与经典信息论与编码中的信源编码(Source Coding)和信道编码(Channel Coding)存在本质差别:

(1) 信源编码和信道编码仅考虑终端节点(信源和信宿)的编译码问题,网络的中间节点仅作存储转发。

(2) 网络编码还考虑网络中间节点的编译码问题。就是这个看似并不复杂的差别,却为信息论领域带来了质的飞跃。当允许网络中间节点参与编译码后,网络吞吐量可以得到有效提升。初识网络编码的读者可以通过了解“蝶形网络(Butterfly Network)”快速领略网络编码的魅力。

网络编码的划时代意义在于:突破经典信息论中商品流(Commodity Flow)不能再被压缩的结论,指出网络信息流(Network Information Flow)可以被处理/压缩,从而可进一步提升网络吞吐量。因此网络编码理论也被称为网络信息流理论(Network Information Flow Theory)。

本书旨在较全面和深入地介绍网络编码的基础理论、主要技术和典型应用,便于读者了解和熟悉网络编码的基本原理,并为进一步学习网络信息论等奠定基础。

本书遵循的基本原则和特色如下:

(1) 注重知识的系统性,每章均给出知识结构框架,便于读者把握知识点之间的联系;

(2) 注重阐释概念和原理的物理意义,力求深入浅出,将学术性和可读性有机结合;

(3) 每个中文概念均附有对应的英文概念,便于读者与英文参考文献中的概念相对应;

(4) 本书融入作者 Zongpeng Li(李宗鹏)多年的研究成果——无向网络中网络编码,从有向和无向两个方面阐释网络编码原理。本书还融入作者黄佳庆的国家自然科学基金项目的研究成果——有环网络中网络编码,从无环和有环两个方面进一步阐释网络编码原理,有助于读者对网络编码有较全面和深入的认识。

本书共分9章,从网络编码基础理论、主要技术和典型应用三个方面来展开。第1章绪论,介绍网络编码的概念、起源和发展,并介绍本书的组织结构。第2章网络编码基础,介绍网络编码的优势及劣势、本质、可行性和主要研究内容。第3章~第6章从有向和无向、有环和无环、单源和多源的分类角度,较全面地阐释了网络编码的基础理论。具体而言,第3章阐述有向无环网络中的网络编码——线性网络编码,包括两个重要参量(局部编码矩阵和全局编码向量)、四个性质(线性多播、线性广播、线性扩散和一般线性网络码)及其码构造算法;第4章阐述有向有环网络中的网络编码——卷积网络编码,也包括两个重要参量(考虑了时延的局部编码矩阵和全局编码向量)、四个性质(卷积多播、卷积广播、卷积扩散和基本卷积网络码)及其码构造算法;第5章阐述无向网络中的网络编码;第6章阐述多源网络编码,包括多多播网络编码和多单播网络编码。第7章阐述网络编码的主要技术,包括随机网络编码、分代网络编码、多级网络编码、部分网络编码、物理层网络编码、模拟网络编码和复数域网络编码等。第8章阐述网络编码的典型应用,包括网络编码在应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层的典型应用实例。第9章阐述网络信息论,便于读者了解网络编码和网络信息论的内在联系。附录是本书中涉及到的相关数学知识,以较简洁的方式加以阐释,便于读者理解与网络编码相关的概念和原理。更详细的数学内容可以参考相关数学书籍。

本书受国家自然科学基金项目“有环网络中网络编码的理论研究及其在实时异构 P2P 传输中的应用”资助(No. 60872005)和中央高校基本科研业务费专项资金资助(HUST: 编号 2011TS112)。

本书第5章(无向网络中网络编码)由加拿大 University of Calgary 计算机科学系 Zongpeng Li(李宗鹏副教授,Email: zongpeng@ucalgary.ca)撰写,并审校全书,其余各章由湖北省智能互联网技术重点实验室、华中科技大学电子与信息工程系黄佳庆副教授(Email: jquhuang@mail.hust.edu.cn)撰写。

本书在编写过程中参阅的国内外文献和书籍均列于各章参考文献中,在此向作者表示衷心感谢!

衷心感谢华中科技大学黑晓军副教授、张惕远老师、金振坤博士、王蔚博士、丁毅博士、张小彪、杨春风、明晨曦、黄翹磊、李晓艳在书稿校稿过程中所提出的

宝贵修改意见！特别感谢杨春风对书稿各章修改所付出的宝贵时间和精力！衷心感谢西安电子科技大学郭网媚博士及香港中文大学网络编码研究所 Q. F. Tyler Sun 博士后研究员对本书所提出的宝贵修改意见！衷心感谢国防工业出版社的大力支持！

作者在此也深深感谢家人的默默支持！

限于作者的知识水平和时间，书中难免有不妥和疏漏之处，热忱欢迎广大读者批评指正（意见和建议请发至 jquang@mail.hust.edu.cn）。为了不断改进本书质量，将及时更新勘误表（请参阅作者个人主页 <http://itec.hust.edu.cn/~jquang>）。

编著者
2012 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 网络编码的概念	1
1.1.1 网络编码与路由的比较	1
1.1.2 网络编码与信源编码、信道编码的比较	3
1.2 网络编码的起源和发展	4
1.3 本书的组织结构	12
本章附录	13
参考文献	15
第2章 网络编码基础	23
2.1 网络编码的优势及劣势	23
2.1.1 网络编码的优势	23
2.1.2 网络编码的劣势	28
2.2 网络编码的本质	29
2.3 网络编码的可行性——随机网络编码	31
2.4 网络编码的主要研究内容	33
2.5 本章小结	37
参考文献	37
第3章 有向无环网络中的网络编码——线性网络编码	41
3.1 线性网络编码的编码原理——局部编码矩阵和全局编码向量	42
3.2 线性网络编码的译码原理	51
3.3 线性网络编码的四个性质的	51
3.3.1 线性多播	52
3.3.2 线性广播	54
3.3.3 线性扩散	55
3.3.4 一般线性网络码	58
3.3.5 四个性质的关系	59
3.4 线性网络编码的码构造算法	61

3.4.1	线性多播的码构造算法	62
3.4.2	线性广播的码构造算法	68
3.4.3	线性扩散的码构造算法	70
3.4.4	一般线性网络码的码构造算法	71
3.5	本章小结	72
	本章附录	74
A3.1	线性网络编码中全局编码向量迭代关系的其他两种形式	74
A3.2	网络编码与信道编码的区别	75
A3.2.1	网络编码与线性分组码的区别	76
A3.2.2	网络编码与无码率码/喷泉码的区别	78
A3.3	静态线性网络编码与变速率线性网络编码	79
	参考文献	80
第4章	有向有环网络中的网络编码——卷积网络编码	82
4.1	卷积网络编码的编码原理——局部编码矩阵和全局编码向量	83
4.1.1	未考虑时延的卷积网络编码	83
4.1.2	考虑单位时延的卷积网络编码	86
4.1.3	考虑时延函数的卷积网络编码	97
4.2	卷积网络编码的译码原理	97
4.3	卷积网络编码的四个性质	100
4.3.1	卷积多播	100
4.3.2	卷积广播	101
4.3.3	卷积扩散	101
4.3.3	基本卷积网络码	101
4.3.5	四个性质之间的关系	101
4.4	卷积网络编码的码构造算法	102
4.4.1	环的定义和分类	102
4.4.2	卷积网络码的统一码构造算法	107
4.4.3	卷积多播的码构造算法	112
4.4.4	卷积广播的码构造算法	114
4.4.5	卷积扩散的码构造算法	114
4.4.6	基本卷积网络码的码构造算法	114
4.5	本章小结	119
	本章附录	120
	参考文献	122

第5章 无向网络中的网络编码	124
5.1 基本概念	125
5.1.1 吞吐量、装箱数、强度和连通度	125
5.1.2 编码优势	128
5.1.3 信源独立性	129
5.1.4 整数路由和分数路由	130
5.2 基于单会话的无向网络中网络编码	131
5.2.1 基于多播的无向网络中网络编码	131
5.2.2 基于单播的无向网络中网络编码	134
5.2.3 基于广播的无向网络中网络编码	135
5.3 基于多会话的无向网络中网络编码	135
5.3.1 基于多单播的无向网络中网络编码	135
5.3.2 基于多广播的无向网络中网络编码	139
5.3.3 基于多多播的无向网络中网络编码	139
5.4 无向网络中网络编码的研究进展	139
5.4.1 基于多单播的无向网络中编码优势猜想的最终证明	139
5.4.2 基于多播的无向网络中编码优势上界紧致性	140
5.4.3 无向平面网络中的网络编码	140
5.5 本章小结	140
参考文献.....	141
第6章 多源网络编码	144
6.1 基本概念	144
6.2 多多播网络编码	145
6.3 多单播网络编码	149
6.4 多源网络编码的实例	150
6.5 本章小结	152
参考文献.....	152
第7章 网络编码的主要技术	154
7.1 随机网络编码	154
7.2 分代网络编码	155
7.2.1 代内网络编码	156
7.2.2 代间网络编码	156
7.3 多级网络编码	157
7.4 部分网络编码	157

7.5	物理层网络编码	159
7.6	模拟网络编码	161
7.7	复数域网络编码	164
7.8	本章小结	165
	参考文献	165
第8章	网络编码的典型应用	168
8.1	网络编码的应用层应用	168
8.1.1	P2P 文件下载中的应用	168
8.1.2	P2P 流媒体直播中的应用	169
8.1.3	P2P 流媒体点播中的应用	172
8.2	网络编码的传输层应用	176
8.3	网络编码的网络层应用	179
8.3.1	无线 Ad Hoc 网络中的应用	179
8.3.2	无线传感器网络中的应用	181
8.3.3	无线 Mesh 网络中的应用	182
8.4	网络编码的数据链路层应用	186
8.5	网络编码的物理层应用	187
8.6	本章小结	188
	参考文献	188
第9章	网络信息论	191
9.1	与单用户信息论的比较	192
9.2	网络信源	193
9.2.1	网络信源的分类	193
9.2.2	相关信源编码模型	193
9.2.3	Slepian - Wolf 相关信源编码	195
9.3	网络信道	198
9.3.1	网络信道的分类	198
9.3.2	多址接入信道	202
9.3.3	广播信道	208
9.3.4	中继信道	212
9.4	网络信源和网络信道的联合/分离	215
9.5	本章小结	216
	参考文献	219
A 附录		221

A1	最大流	221
A1.1	基本概念	221
A1.2	单点到单点最大流算法	223
A1.3	多点到多点最大流算法	224
A2	有限域加法/乘法	225
A2.1	有限域加法	225
A2.2	有限域乘法	226
A3	Mason 公式	228
	参考文献	230

第1章 绪 论

首先阐明“网络编码^①”的概念,然后介绍网络编码的起源和发展,最后介绍本书的组织结构。

1.1 网络编码的概念

网络编码(Network Coding)^[1-23]的概念正式发表于2000年的先锋论文^[1]中,其基本思想初看起来并不复杂,即允许网络的中间节点参与编译码,但这种并不复杂的基本思想却带来质的飞跃,并由此开创了一个全新的领域。

1.1.1 网络编码与路由的比较

网络编码的优势常通过与路由(Routing)的比较加以说明。路由采用存储—转发(Store-and-Forward)的方式,网络编码则采用存储—编译码—转发的方式。网络编码与路由的性能比较可形象地通过蝶形网络^[3,14](Butterfly Network)^②加以说明(图1-1-1);当网络中间节点允许网络编码后可以达到网络的多播(Multicast)容量,采用路由却不一定能达到。其中,多播是一种路由方式,常指一个信源节点发送消息给多个信宿节点,记为One-to-Many。相对应的其他两个路由概念分别为单播(Unicast)和广播(Broadcast):单播指一个信源节点发送消息给一个信宿节点,记为One-to-One;广播指一个信源节点发送消息给所有信宿节点,记为One-to-All。当多播中信宿节点的个数为1的时候,多播就退化为单播;当多播中信宿节点的个数为网络中所有节点数的时候,多播就是广播。可见,多播的两个特例分别是单播和广播,或者说,多播具有更一般的形式。容量(Capacity)指吞吐量(Throughput)的最大值。

对于有向无环网络(Directed Acyclic Network),如图1-1-1(a)所示,设链路(Link)具有单位容量且无时延,考虑信宿节点 R_1 和 R_2 能否同时收到信源节

① 网络编码主页:<http://www.networkcoding.info/>。

② 可译为“蝴蝶网络”或“蝶形网络”,本书采用后一种译法,可与本书第4章“有向有环网络中的网络编码”中提及的“梭形网络(Shuttle Network)”相对应。

点 S 发出的消息 a 和 b (共 2bit)。

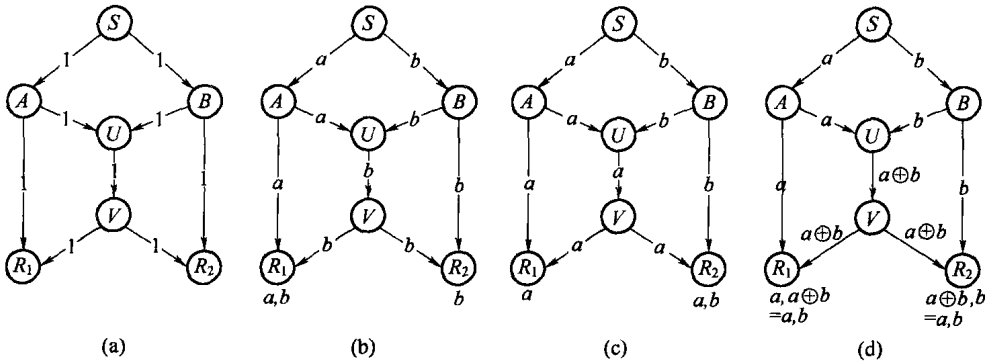


图 1-1-1 蝶形网络中网络编码与路由的比较

(a) 有向无环网络; (b) 采用路由; (c) 采用路由; (d) 采用网络编码。

若采用路由方式, 由于链路 UV 是该网络传输的瓶颈, 只能传送 1bit (消息 a 或者消息 b)。图 1-1-1(b) 中的链路 UV 传送消息 b , 从而信宿节点 R_1 可以收到消息 a 和 b (共 2bit), 而信宿节点 R_2 只能收到消息 b (1bit), 平均每个信宿节点的吞吐量为 $(2+1)\text{bit}/2\text{节点} = 1.5\text{b}/\text{节点}$ 。类似地, 图 1-1-1(c) 中的链路 UV 传送消息 a , 从而信宿节点 R_2 可以收到消息 a 和 b (共 2bit), 而信宿节点 R_1 只能收到消息 a (1bit), 平均每个信宿节点的吞吐量仍为 $1.5\text{b}/\text{节点}$ 。

若采用网络编码的方式, 图 1-1-1(d) 中的链路 UV 上传送消息 a 与 b 的编码 (此处为异或) 结果, 信宿节点 R_1 可以收到消息 a 并译码出消息 b [利用 $a \oplus (a \oplus b)$ 译码出 b], 相当于收到 2bit。信宿节点 R_2 可以收到消息 b 并译码出消息 a [利用 $b \oplus (a \oplus b)$ 译码出 a], 相当于收到 2bit。这样, 平均每个信宿节点的吞吐量为 $(2+2)\text{b}/2\text{节点} = 2\text{b}/\text{节点}$ 。

可见, 采用网络编码时所达到的吞吐量可以大于采用路由时所达到的吞吐量。上述蝶形网络的例子形象地说明了网络编码不同于路由的新性能: 网络编码允许中间节点参与编译码, 从而可以达到网络的多播容量, 但路由可能^①达不到。

网络编码是路由的超集 (Superset), 或者说, 路由可以看成是网络编码的一种特例。例如, 图 1-1-1 中路由相当于系数分别为 $(0, 1)$ 或 $(1, 0)$ 的网络编码, 网络编码则相当于系数是 $(1, 1)$ 的网络编码, 即网络编码的系数中不出现 0。结

^① 网络编码的性能与网络拓扑有较直接的关系。蝶形网络的拓扑比较特殊, 网络编码的吞吐量“严格大于”路由。但是, 在一般的网络拓扑中, 并不能保证网络编码的吞吐量严格大于路由。所以一般说, 网络编码的吞吐量“大于等于”路由的吞吐量。

合图 1-1-2 加以具体说明:针对图 1-1-2(a)中的节点 U ,路由可以看成系数为 $(0,1)$ 的网络编码 $(0 \cdot a) \oplus (1 \cdot b) = b$;针对图 1-1-2(b)中的节点 U ,路由可以看成系数为 $(1,0)$ 的网络编码 $(1 \cdot a) \oplus (0 \cdot b) = a$;针对图 1-1-2(c)中的节点 U ,网络编码可以看成系数为 $(1,1)$ 的网络编码 $(1 \cdot a) \oplus (1 \cdot b) = a \oplus b$ 。可见,路由可以看成是最简单的网络编码。从这个意义上说,当网络编码理论发展成熟时,网络中的路由器将被“网络编码器”所替代。

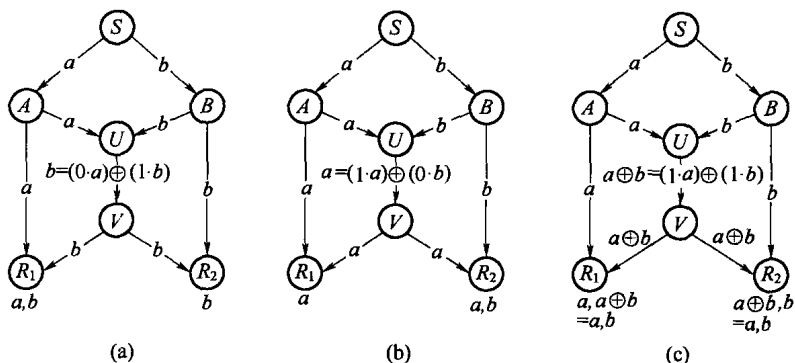


图 1-1-2 网络编码是路由的超集

(a) 采用系数 $(0,1)$ 的网络编码;(b) 采用系数 $(1,0)$ 的网络编码;(c) 采用系数 $(1,1)$ 的网络编码。

网络编码理论的划时代意义在于:突破经典信息论中商品流 (Commodity Flow)^[2] 不能再被压缩的结论,指出网络信息流 (Network Information Flow) 可以被处理/压缩,从而可进一步提升网络吞吐量。因此,网络编码理论也称为网络信息流理论 (Network Information Flow Theory)^[1]。本书第 2.2 节中从图论最大流的角度进一步揭示网络编码的本质。

网络编码理论属于网络信息论的重要分支。网络编码理论的发展,将对未来网络的架构和发展产生变革性的影响,因此具有重大和深远的意义。

网络编码理论所带来的突破以及引发的学术界和工业界的研究热潮,都源自于一个简单的想法——“混合”^[24]。本书通过较系统地阐述网络编码的基础理论、主要技术和典型应用,一起领略网络编码所带来的“混合的魔力”^[24]。

1.1.2 网络编码与信源编码、信道编码的比较

经典信息论中涉及的编码通常包括两类——信源编码 (Source Coding) 和信道编码 (Channel Coding) (或称纠错编码),网络编码与前两者相比,具有本质上的不同:

(1) 从参与网络通信的节点类型来比较:信源编码和信道编码仅需考虑终

端节点(信源节点和信宿节点)参与编译码所涉及的科学问题,网络编码还需考虑网络中间节点参与编译码所涉及的科学问题。虽然其区别并不难于理解,但网络编码已是本质上不同于信源编码和信道编码的全新理论。

(2) 从评估网络通信系统的指标(有效性和可靠性)来比较:信源编码是通过压缩信源冗余度来提高通信系统的有效性;信道编码是通过增加冗余度来提升通信系统的可靠性;网络编码可以提升网络吞吐量,相当于提升网络通信系统的有效性。从这个角度看,网络编码与信源编码目标一致,常常很自然地结合在一起使用^①,共同提升通信系统的有效性。

1.2 网络编码的起源和发展

网络编码概念的诞生可以溯源到 1998 年论文“Network Information Flow Theory^[25]”(引自文献[26])和 1999 年 Yeung 和 Zhang 发表的关于卫星通信的论文^[27](引自文献[4,14])。

网络编码理论正式发表于 2000 年 R. Ahlswede、N. Cai、S. Y. R. Li 和 R. W. Yeung 的先锋论文“Network Information Flow^[1]”,这是网络编码理论的奠基之作。

在 2003 年,网络编码领域发表了许多重要研究成果,具有里程碑意义。

2003 年,香港中文大学讯息工程系的李硕彦教授、杨伟豪教授、蔡宁教授发表了论文“Linear Network Coding^[2]”,指出线性网络编码可以达到多播方式下的网络容量。该文于 2005 年获得 IEEE 信息理论学会年度最佳论文奖。该奖项是首次颁发给亚洲学者,以表彰他们在信息论领域的重要贡献,这也彰显出网络编码理论所具有的重大价值。值得一提的是,这篇具有突破性进展的论文在首次投稿时得到的评审意见是拒稿。这是因为当跨学科的新领域刚形成时,必须要面对多方不认同的现实。在 2005 年的获奖大会上,颁奖主席的贺词正是“恭喜你们开创了新领域!”(引自李硕彦教授撰写的《网络编码迷蝴蝶》,发表在《科学美国人》2007 年 7 月第 65 期)。在这篇文章中,李教授讲述了著名的蝶形网络诞生的过程,“来自香江的一个小故事,戏剧性地在通信界掀起一股全球热潮。”从被拒稿到最佳论文的最高荣誉,不仅说明一个全新理论诞生和被接受的

① 一个典型实例是,将网络编码与相关信源编码结合应用于无线传感器网络^[53]。在无线传感器网络中大多数传感器节点是依靠电池供电,且无法充电,所以能耗是十分重要的评估指标。由于在一定范围内的无线传感器节点所感知的数据具有相关性,所以需要采用相关信源编码(如 Slepian - Wolf 相关信源编码,详见第 9 章)进行数据压缩,减少无线传感器节点向汇集点(Sink)传送的冗余数据,进而减少能耗。另一方面,采用网络编码可以提高网络带宽的利用效率,也可节省能耗。网络编码和相关信源编码的自然结合,能提供一个较好的解决方案。

不易,也说明真正的创新一定经得起时间的检验。

2003 年,Koetter 和 Medard^[28]提出网络编码的代数学(Algebra)框架,即用抽象代数来解决线性网络编码的问题,为研究网络编码提供了一个有力的数学工具。

2003 年,Sanders 等^[29]提出具有多项式复杂度的线性信息流(Linear Information Flow, LIF)算法,该算法属于集中式的码构造算法。2005 年,Jaggi 等^[30]将之正式发表于 IEEE 信息论会刊,文献[4]中称 LIF 算法为 Jaggi - Sanders 算法。

2003 年 Ho 等^[31,32]提出随机网络编码(Random Network Coding, RNC)(2006 年正式发表于 IEEE 信息论会刊^[33]),属于分布式的码构造算法。随机网络编码的基本思想并不复杂(详见 2.3 节),每个节点均随机选取系数进行编码,将得到线性组合向下游节点发送。当信宿节点收到足够多线性无关的组合后,通过联立求解线性方程组,即可译码出信源节点发出的所有消息。由于每个节点均随机地选择系数,节点不必获得全局信息,因此是分布式算法。随机网络编码已申请了美国发明专利^[34]和中国发明专利^[35]。随机网络编码的提出证明了网络编码的可行性。

2003 年,Chou 等^[36]提出实际的网络编码(Practical Network Coding)及其相应的设计原则。主要包括:①同步机制:采用网络编码,一般需要等到所有数据到达之后才能进行,因此需要添加缓存。②缓存刷新机制:由于缓存的大小总是有限的,所以需要设计缓存中内容的更新机制。当然,缓存大小的最优设置也需考虑。③渐进译码(Progressive Decoding)机制,通过一边下载一边译码,来节省译码时间。④译码成功率:译码成功概率与有限域大小存在一定关系。Jaggi 等^[30]指出,当有限域大小为 $|F| = 2^{16}$ 且网络中的链路数为 $|E| = 2^8$ 时,译码成功概率可达 99.6%;Chou 等^[36]指出有限域大小为 2^8 即可满足实用的需求。Guang 等^[37]研究随机网络编码在蝶形网络中的译码失败概率。

2003 年以后,网络编码的发展可以用如火如荼来形容,众多的研究成果也层出不穷,限于篇幅本章无法一一穷尽,故列出一幅网络编码的知识图谱(图 1-2-1),以概略性地呈现网络编码的全貌,包括网络编码的数学基础、网络编码的理论基础和网络编码的应用。随着网络编码的不断发展,读者还可以继续丰富和完善该知识图谱。

下面结合图 1-2-1 介绍网络编码理论、技术和应用已有的研究进展。

网络编码与路由的性能比较一直贯穿网络编码的发展,包括在有向网络、无向网络、单会话和多会话等不同情况下的性能比较,常采用编码优势^[19,20]作为评估的定量指标。另一个思路是如何将路由在网络编码的框架下统一起来。Wu 等^[38]提出网络编码和路由的一个统一定理,Lucani 等^[39]提出网络编码和路

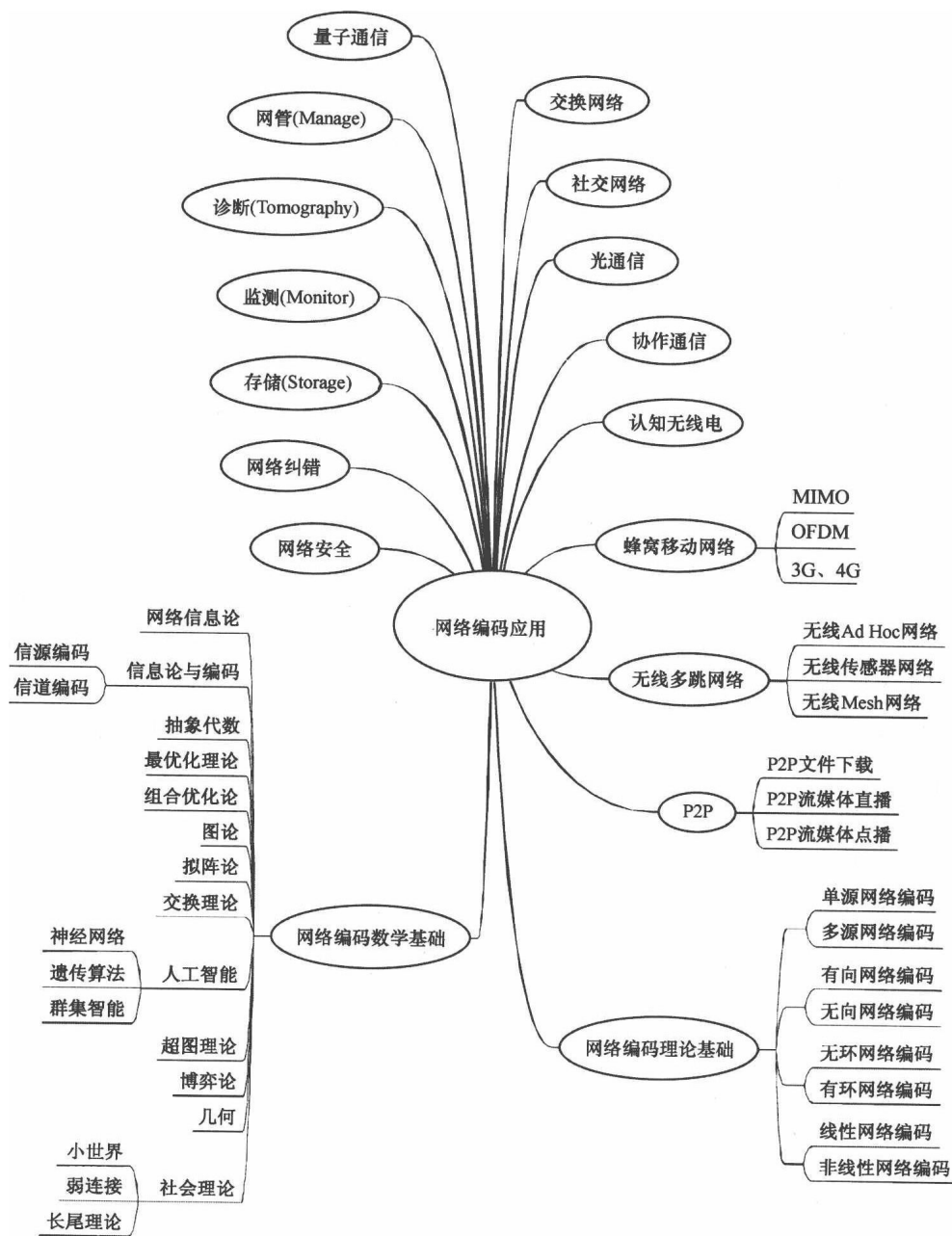


图 1-2-1 网络编码的知识图谱