

大容量数据存储系统编码

(荷) Kees A. Schouhamer Immink 著
徐端颐 雷志军 译

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍了存储系统中得到重要应用的调制编码,其内容可以分为3个部分:编码的理论基础知识(第1章~第3章),主要从信息论的角度介绍信息量与熵、信道容量以及频谱分析等;游程长度受限(RLL)码(第4章~第8章),主要介绍了RLL码的基本原理、编码/译码方案,以及多种RLL编码构造方法;编码的频谱控制(第9章~第14章),主要介绍为实现特定的频谱控制要求,各种编码方案的实现方法和性能比较。本书的最后还附有推荐阅读材料(第15章)。

本书可作为信息存储科学、通信系统工程等专业及相关专业的研究生、本科生、大专生的参考教材,同时也可作为通信系统与信息存储相关专业的工程技术人员和设计、生产人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大容量数据存储系统编码/(荷)Kees A. Schouhamer Immink 著;徐端颐,雷志军译. —北京:科学出版社,2004

ISBN 7-03-013379-X

I. 大… II. ①K…②徐…③雷… III. 大容量-存储器-编码
IV. TP333.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第038904号

策划编辑:鞠丽娜/ 责任编辑:丁 波
责任印制:吕春珉/ 封面设计:北新华文

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)
2004年6月第一次印刷 印张:17
印数:1—3 000 字数:307 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

中文版序

数字信息存储已经成为了现代社会的基础,大容量数字存储技术的发明已经宣告了一个新时代的来临,其重要性可以与印刷技术的发明相媲美。数据总量以及需要存取这些数据的用户数量急剧增长,推动着存储系统向容量更大、速度更快、功能更强的方向发展,当然,这也需要性能革新的主机以处理这些需求。数字存储系统,如 CD-ROM 和 DVD-ROM,已经成为了家庭娱乐的常见设备,其他一些更高容量的存储系统也已在策划之中。

上面提及的所有产品都成为了音频和视频电子重放革命的重要里程碑。爱迪生迈出了革命的第一步,他率先实现了将音乐记录在柱面存储器上,后来存储在盘片上。工程师们不懈地努力,将起源于不同领域的众多发明创造及典型技术引入了现在的记录系统。

本书介绍的是大容量数据存储系统中的信道编码技术。如果没有这种编码技术,就不可能有实际可靠的数据存储系统。自 1980 年下半年作者开始撰写本书的第一版以来,许多问题已经发生了变化。这些年来,人们对于信道编码的兴趣有了明显的提高,尤其是在相关的学术研究领域。我还很清楚地记得,我 1982 年的一篇关于记录编码的文章是此研究领域发表在 IEEE Information Theory Transactions 上的第一篇。而现在,International Symposia on Information Theory 年会已经有 4 个专题专门讨论记录编码技术。

中国正在成为数字存储系统设计、制造和基础研究中的主要成员之一。因此,将本书翻译成中文是非常及时的。作者衷心感谢提出将此书以中文出版的清华大学的徐端颐教授,以及参与将本书全文从英文翻译为中文的艰巨工作的清华大学的雷志军先生、胡恒先生和沈全洪先生。显然,这项翻译工作将为本书增加数以十亿计的读者。

Kees A. Schouhamer Immink
Rotterdam, March 2004

译者序

Immink 教授是我的老朋友,他长期从事大容量数字信息存储系统编码的研究。早在 1972 年,光盘存储技术还处于研究阶段时,他就进入荷兰 Philips 公司从事光盘存储编码技术的研究工作,是本领域的先驱之一。他在数据存储编码方面具有深入的理论基础和丰富的实践经验,曾先后出版过《光记录原理》(Principles of Optical Disc Systems, Adam Hilger, 1985)、《数字记录编码技术》(Coding Techniques for Digital Recorders, Prentice-Hall, 1990)、《里德—所罗门码及其在 CD 光盘中的应用》(Reed-Solomon Codes and the Compact Disc' in RS Codes and Their Applications, 1994)、《数字消费电子手册》中的《数字记录编码》部分(Codes for Digital Recorders' in Digital Consumer Electronics Handbook, McGraw-Hill, 1996),以及我们这次翻译出版的《大容量数据存储系统编码》(Codes for Mass Data Storage Systems, Shannon Publishers, 1999)等专著。

1999 年,他全面修订出版的《大容量数据存储系统编码》一书是系统阐述存储编码原理的专著,曾作为他在德国 Essen 大学和新加坡国立大学任教时的教材。编码是光盘数据存储中的核心技术之一,是存储信息与记录媒体之间的桥梁,直接影响所存储信息的可靠性与数据格式,同时,也是进一步提高系统存储容量与效率的重要突破口,例如,从容量为 650MB 的 VCD 光盘发展到容量为 4.7GB 的 DVD 光盘时,总容量共提高了 7.23 倍。其中,通道码调制方式的优化及纠错码冗余度的降低对光盘容量提高的贡献为 1.3 倍。与光盘机光学系统的改进(光学头数值孔径从 0.45 提高到 0.60,使信息凹坑宽度减少)对容量提高的贡献相当。更重要的是,如果不掌握编码技术,设计具有独立知识产权的光盘几乎是不可能的。

我国掌握光盘编码技术的科技人员十分匮乏,国内目前还没有同类专著或教材。令人十分高兴的是,Immink 教授此书出版后就赠送给我了,我拜读后觉得内容系统性及实用性都很好,且很适合作为教材使用。为此,征得 Immink 教授的同意,决定将此书译成中文出版。Immink 教授对我的决定也欣然支持,并通过他的努力协调,取得原出版商的同意,免收了版权费,使得本书译文在我国能顺利发行。本书的翻译与出版由国家重点基础研究项目(G1999033000)资助。

为解决我国在此领域的空白,尽快让此书与广大读者见面,特组织了 my 几位博士研究生雷志军、沈全洪和胡恒翻译此书。他们本身的研究任务也很重,基本上都是利用业余时间进行翻译的。能在短期内将本书译成中文,充分显示了年轻人对科学的奉献精神。科学出版社对本书的出版也给予了积极的配合,鞠丽娜女士作为

策划编辑为本书的出版做出了重要贡献,特在此对她表示衷心的感谢。

由于时间仓促,手边可供参考的中文图书又比较少,不妥之处在所难免。特别是译文中有若干专业词汇过去在国内没有出现过,翻译时不得不“首创”,不妥之处请读者批评指正。

徐端颐

2003年10月于清华园

序

从 20 世纪 80 年代开始,我们有幸目睹了一场数字音频和视频的革命:CD (Compact Disc)已经成为一种非常流行的数字音频系统;CD-ROM 也成为了大容量计算机程序和文件发布领域中事实上的标准;多种数字音频和视频系统,如 CD-V,MiniDisc,DV 和 DVD 等,也很快普及和流行。以上提到的这些大容量存储系统,已成为现代电子娱乐业的支柱,但是,如果不是应用了先进的编码系统,这些成功都是不可能的。

人们认识到数字音频和视频记录的优点已经很长时间了,计算机向来就是在数字处理域里进行计算的。数字电路的日趋高速与廉价,促进了高清晰的数字视频和音频录放机的诞生,这是上一代传统的模拟系统不可能实现的。与模拟系统相比,数字处理系统的原理性优势在于:在设计完善的数字记录系统中,除了初始数字化阶段可能的损失外,被记录信号的品质可以一直保持到最后的播放环节中。而在模拟系统中,信号的品质在信号处理的每个阶段都可能受到损伤,从而限制了复制的次数。模拟记录系统,像退役的“老兵”,正在慢慢地退出历史的舞台。

在过去的 20 年中,基于光记录介质与磁记录介质的数据存储密度得到了极为显著的提高。其中很大一部分的贡献来自于读/写头、机械设计与记录材料的进步;同时也应该归功于信号处理和编码技术的发展。

数字记录设备的编码技术包括的主题很广泛,其研究的历史也很漫长。在数字记录(或传输)系统中,采用信道编码的目的是为了提高信道的效率和可靠性。通常,信道编码可以分为两个步骤,即纠错码与随后的调制码(或称为记录码)。

在信道编码的第一个步骤中,纠错控制是通过在传递的信息中添加额外的数据实现的。这些额外的数据使得信息的接收端有能力纠正所传递的信息中可能产生的错误。

在信道编码的第二个步骤中,输入数据被转换为另外的序列,该序列的性质能满足记录设备特定的“物理本质特性”。当然,精确地定义调制码的领域是很困难的,要用其他通俗易懂的方式来定义就更困难了。被记录的序列必须对自身的特性进行转换,以适应实际可用信道的物理特征,而这些特征被称为信道约束(或限制),例如,在光存储中,“1”被表示为坑,而“0”被表示为“岸”。由于物理上的原因,这些“坑”或者“岸”的长度既不能太长,也不能太短。因此,只有那些满足游程长度受限(Run Length Limited,RLL)条件的消息才能被记录。这就需要将任意可能的用户数据转化为符合给定限制条件的码。许多商用的记录设备,如 CD 与 DVD,都

采用了 RLL 码。

本书的大部分内容是从原理和实践的角度,集中介绍大容量存储系统的编码技术,这是为了从总体上提高系统的可靠性和效率。在任何数字记录系统中,调制码的成功运行都决定于记录设备不同子系统的特性。除了大量的实验以外,没有任何技术可以断言某种编码技术与实际系统是否适应。因此,也不可能存在一本可以指导如何选择“最好的”调制码的详细指南。

在本书中,理论知识与实践经验融合在一起进行介绍,以清楚展示编码理论是如何应用到编码器和译码器的设计之中的。从实践需求的观点来看,不应仅满足于提供一种理论上很优美的编码,而忽视其实现细节;译码器的复杂程度比目前最快的计算机还要复杂一百万倍。所有工作的最终目标就是“应用”,这是时刻都不能忘记的。另外,本书还介绍了一些更高级的研究工作,例如,编码技术的深入处理、硬件的设计和应用等。参考文献(包括许多美国专利)和推荐阅读材料中尽可能详细地列出了有关文献,以供希望更深入了解某些专题的读者阅读。

1998 年冬天,我在新加坡停留的时候就决定更新我的前一本书“Coding Techniques for Digital Recorders”,该书已由 Prentice-Hall(UK)出版社于 1991 年出版。做出此决定的根本原因在于过去的十年中我们所见证的编码技术在数字记录设备中的成功应用。本书的主题曾经属于工程研究领域,目前也成为了学术研究中的活跃领域,例如,在 IEEE 信息论国际论坛(International Symposium on Information Theory, ISIT)和 IEEE 通信国际会议(International Conference on Communications, ICC)上,现在通常会用 3 个专题来讨论受限编码的各方面内容。结果是令人兴奋的、反映新成果的会议报告和论文不断涌现,因此,更新我的前一本书也就是必然的了。

我必须感谢以下单位为我提供了撰写这本书的机会:Institute of Experimental Mathematics, University of Essen, Germany; Data Storage Institute (DSI), Singapore 和 National University of Singapore; Princeton University, US。许多人都在这本书成型的工作中帮助过我,其中必须特别感谢 Ludo Tolhuizen (Philips Research Eindhoven)详细阅读了我的手稿并提出了许多重要的建议。最后,我还必须感谢我的两位合作者 Guido Janssen 和 Henk Hollmann (Philips Research Eindhoven),本书的许多章节都选自他们的论文。

Kees A. Schouhamer Immink

1999. 11 Geldro

目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 熵与容量	7
2.1 引言	7
2.2 信息量与熵	8
2.2.1 无记忆信源的熵	8
2.2.2 马尔可夫链	10
2.2.3 马尔可夫信源的熵	13
2.3 受限信道的容量	16
2.3.1 马尔可夫信源的容量	17
2.3.2 具有变长码元的信源	19
第 3 章 频谱分析	23
3.1 引言	23
3.2 频谱特征	23
3.3 马尔可夫信源的频谱	27
3.4 编码器和译码器的描述	28
3.5 分组码信号的频谱	32
3.6 摩尔机的频谱分析	35
第 4 章 RLL 序列理论	42
4.1 引言	42
4.2 (dk) 序列的计数	44
4.3 渐进信息率	45
4.3.1 状态转移矩阵	49
4.3.2 重要特性	51
4.4 熵最大的 RLL 序列	52
4.4.1 熵最大的 RLL 序列的频谱	53
4.4.2 结果比较	56
4.5 其他游程约束	58
4.5.1 不对称的游程约束	58
4.5.2 多步距的 RLL 序列	59
4.5.3 $(0, G/I)$ 序列	61

4.6	二维 RLL 约束	62
4.7	附录	63
第 5 章	RLL 分组码	66
5.1	引言	66
5.2	定长(d, k)码	66
5.3	最小长度的定长码	68
5.3.1	Franaszek 递归消除算法	68
5.3.2	状态无关译码	72
5.4	基于(d, k, l, r)序列的定长码	73
5.4.1	生成函数	74
5.4.2	构造方法 1 和 2	75
5.5	最佳定长分组码	76
5.6	分组码的例子	78
5.6.1	EFM 码	79
5.6.2	码率为 $4/5$ 的 $(0, 2)$ 码	79
5.6.3	码率为 $8/9$ 的 $(0, 3)$ 码	79
5.6.4	其他 k 约束码	80
5.6.5	含非编码码元的高码率(k, l, r)码	82
5.7	可分组译码的 RLL 码	83
5.8	近似可分组译码	88
5.8.1	3PM 码	89
5.8.2	构造方法 3, 4 和 5	89
5.8.3	普遍性的构造方法	92
5.8.4	结果与比较	93
5.9	附录	93
第 6 章	枚举编码	95
6.1	引言	95
6.2	枚举的基本概念	96
6.3	(d, k, l, r)序列的枚举编码	98
6.3.1	使用浮点算法的枚举	100
6.3.2	浮点算法的效果	101
6.3.3	很长的分组码	102
6.3.4	在 k 受限序列上的应用	105
6.4	错误的传播	106
6.5	标准编码方案的替代	108

6.6 附录	111
6.6.1 容量损失计算	111
6.6.2 渐进方法	112
第7章 滑块分组编码	114
7.1 引言	114
7.2 变长码	114
7.2.1 同步变长 RLL 码	115
7.2.2 同步变长码举例	115
7.2.3 码率为 $1/2$ 的 $(2,7)$ 码	116
7.2.4 码率为 $2/3$ 的 $(1,k)$ 码	117
7.3 前瞻编码技术	119
7.4 ACH 算法	121
7.4.1 高阶有向图	123
7.4.2 状态划分	125
7.4.3 滑块分组译码器	128
7.4.4 Baldwin 码	129
7.4.5 讨论	130
第8章 前缀同步的 RLL 序列	132
8.1 引言	132
8.2 预备知识	133
8.3 序列枚举	134
8.4 编码设计	140
8.4.1 有向图描述	141
8.4.2 结果	141
8.4.3 实用的例子	142
8.4.4 附加限制	143
第9章 熵最大的直流平衡序列	145
9.1 引言	145
9.2 直流平衡序列的性质	145
9.3 直流受限序列的容量	146
9.4 熵最大序列的频谱	149
9.5 性能评估	153
第10章 直流平衡编码	158
10.1 引言	158
10.2 简单编码方案	160

10.2.1	零不平衡度编码方法	160
10.2.2	低不平衡度编码方法	161
10.2.3	频谱计算	164
10.3	性能评估	169
10.4	8b10b 码	175
10.5	码长为奇数的直流平衡编码	177
10.6	码字平衡	179
10.7	附录	181
10.7.1	数字和方差的计算	181
10.7.2	相关性的计算	182
第 11 章	高阶频谱为零的编码	184
11.1	引言	184
11.2	预备知识	185
11.3	序列枚举	185
11.4	零不平衡度码字的编码	187
11.5	状态相关的编码	190
11.6	更高阶的直流受限编码	191
第 12 章	其他位置频谱为零的编码	194
12.1	引言	194
12.2	其他位置频谱为零	195
12.3	码的设计	196
12.4	频谱计算	198
12.4.1	相关性计算	199
12.4.2	数字和方差	202
12.5	在乃奎斯特频率点频谱为零, $k=2$	203
12.6	序列交错	204
第 13 章	导向扰频技术	206
13.1	引言	206
13.2	导向扰频算法	207
13.3	多模式直流平衡编码分析	209
13.3.1	随机抽取模型	210
13.3.2	有限状态机的转移概率	210
13.3.3	计算结果	211
13.3.4	其他选择判据	212
13.4	弱限制条件	215

13.4.1 弱(dk)受限信道的容量	215
13.4.2 弱受限码	218
第 14 章 直流平衡的 RLL 码	221
14.1 引言	221
14.2 DCRL 序列的容量	221
14.3 DCRL 编码的例子	227
14.3.1 数据级和码字级直流控制对比	227
14.3.2 具有平衡度保持的字分配特性的编码	228
14.3.3 零调制码	230
14.3.4 Miller-Miller 码	232
14.4 再谈 EFM 编码	232
14.4.1 EFM 码	232
14.4.2 EFM+ 码	234
14.4.3 EFM 码的其他方案	237
14.4.4 EFM 类编码方案的性能	239
第 15 章 推荐阅读材料	241
参考文献	245

第1章 绪 论

由于对诸如光盘和磁盘等大容量存储系统 in 提高存储容量和减少访问时间方面的持续要求,人们对存储系统编码技术的兴趣越来越浓则不足为怪,这种研究兴趣从机械式的计算机内存第一次进入人们的视野时就已开始。当然,记录材料、读写头和机械部件等多方面的进步可极大地提高存储系统的容量,但即使是在当前最先进的存储系统中,存储密度的提高也离不开信道编码的贡献,而这正是本书将要叙述的内容。

为了理解数字数据是如何在磁介质上实现存储和读出的,首先需要回顾一些基本的原理。磁盘或磁带上的磁介质可以被看成连续排列在一起的磁性小点(或称为磁畴),各个磁畴可以被读写头磁化为两个不同的方向。在当前的系统中,数字信息沿着磁介质上特定的路径(信息道)存储。在最简单的情况下,可以通过改变信道上磁畴的磁向(磁化为两个相反的方向之一)而将二进制数据存储在信道上。目前有两种等效的转换方法可将存储的二进制数据与信道上磁畴的方向对应起来。其中一种转换方法称为 NRZ(Non Return to Zero,非归零制),按照这种方式,一个磁化方向对应于数据“1”,而另外一个磁化方向对应于数据“0”。另外一种转换方法称为 NRZI(Non Return to Zero, Inverted,反转不归零制),按照这种方法,磁化方向变化对应于数据“1”,磁化方向不变对应于数据“0”。

在磁存储中,被存储的二进制数据通常是指通道位。在本书中只讨论同步的存储系统,其通道位以每秒 $1/T_c$ 个的固定速率出现,其中, T_c 为一个通道位持续的时间长度。在当前广泛应用的所有磁存储系统中,磁介质与用来写入和/或读出数据的磁头之间都是相对运动的。如果这种相对运动的速度是固定的(例如,以米/秒或节等单位来度量),则固定的通道位时间(例如,以秒为单位来度量)就可以转化为信道上通道位的固定长度(例如,以微米为单位来度量)。

正如许多作者已经注意到的情况,存储系统中数据的存储与获取实际上是数字通信信道的一个特例。既然信息论为数字通信提供了理论基础,同样也可以很好地应用于数字存储系统中。信道编码通常被定义为:在信道存在缺陷的情况下,在尽可能应用信道容量的同时实现高传输可靠性的技术。可靠性通常用接收到错误信息的概率来表示,所谓错误信息是指与最初传输或者存储的信息不相同的信息。对于非专业人士而言,编码系统似乎是在近期才出现的,在纯商业应用的环境下可以这样理解。但实际上,编码技术的研究可以追溯到香农(Shannon)^[214]的开创性的工作,且深深植根于信息论中。香农提出了“信息论的基本理论”,其表述为:对一

条无噪声的信道,以任意低于信道容量的速率和任意小的错误概率通过此信道传递信息是可能的。这就导致了下一个问题:实践中如何实现这种理论上所预言的任意小的错误概率?这个问题目前还没有答案。一个事实上的公论是:码的结构是“好的”。这里所谓的码实际上是一套将源(或输入)序列转换为另一记录序列的规则集合。这种转换的目的是提高记录信道的可靠性和/或效率。

在记录系统中,信道编码通常分为两步来完成:纠错码和记录(或调制)码。不同的编码步骤如图 1.1 所示,该图是此类数据存储系统的示意图。其中,源数据经过连续的两个步骤——纠错编码和记录编码后被转换为信道序列。ECC 编码器产生校验码,源数据与校验码一起被记录编码转换为受限输出序列。输出序列以二进制物理量的形式存储在记录介质上,例如,坑和岸,或正和反的磁化方向。在本文中,这种在第一编码后再次进行第二编码的方法被称为连接方案。

译码器使用已获取信号中的冗余信息尽可能精确地复原输入序列。纠错控制是通过在传输的消息中系统性地加入一些额外的码元来实现的。这些额外的码元使得信宿有可能检测和/或纠正收到的消息中可能出现的某些错误。主要的问题是,在消除不可避免的传输错误的同时,不要为此在增加额外码元方面付出过多的代价。纠错码的种类很多,其中在数据存储系统中得到主要应用的是里德—所罗门码^[23,24,242]。这种码之所以在大容量存储系统中得到青睐,是因为它既能纠正随机错误,也能纠正突发错误。纠错码和检错码在很多优秀的教科书中已经得到了阐述,本书中将不再讨论。

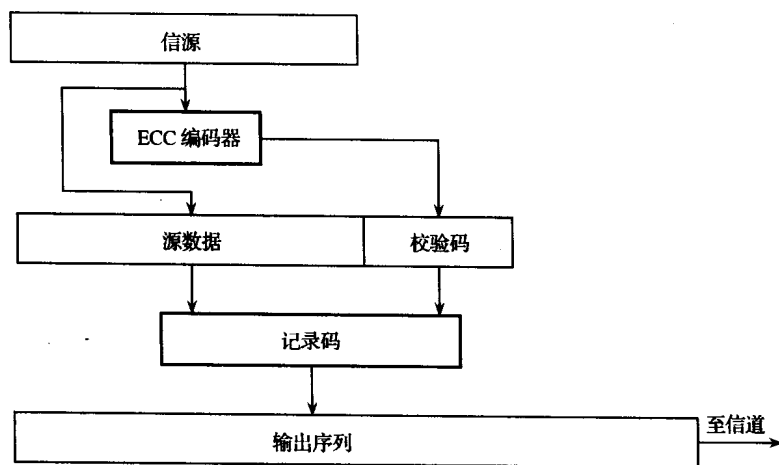


图 1.1 数据存储系统中两步编码方案示意图

本书集中介绍的通道码或称记录码,有时也指调制码或受限码,这种码将(已经通过纠错编码系统添加额外码元的)位流作为输入,并将位流转换为受限序列波

形,以适应特定记录设备的需求。在通过电缆或光纤进行的传输过程中,与记录码相关的技术被称为线路码。记录码通常包括了多种不同的码,因此,很难为此提供一个精确的普遍定义。特别是从表面上看,纠错控制码和调制/线路码之间的差别较小,容易造成读者的混淆。再者,有些调制码同时具有纠错的能力,或者正如一般人所想像的那样,有些纠错码也能满足特定的信道限制,这更容易使读者费解。

编码器的任务是把(二进制的)用户数据转换为符合给定信道限制的序列。 m 个二进制用户数据码元平均被转换为 n 个二进制信道码元。对信道码元序列集合的任何限制都会使得一个序列所携带的信息量(以位为单位计算)比其实际用到的二进制码元数目略少一些。由 m 与 n 的商 $R=m/n$ 衡量记录码的效率,其中 R 称为信息速率,或简称为码率;且定义码的冗余度为 $1-R$ 。由于只有序列集合的有限部分被使用,因此,将输入数据转换为受限序列的码率必定小于1。对给定输入限制的信道,其最大码率通常称为输入受限无噪声信道的香农容量,或简称为容量。一种“好”的码意味着其码率接近于受限序列的香农容量,且使用一种简单的实现方法,在译码环节还可以避免错误的传播,或更实际地说是对这些互相影响的限制条件的折中。

应该指出,频谱整形码和RLL码在CD、DAT、DVD等大容量存储系统消费品^[121]中得到了广泛的应用。目前大容量存储系统消费品中应用的记录码如表1.1所示。

表 1.1 记录码及其应用一览

设 备	编 码	类 型	参考文献
CD	EFM	RLL,直流平衡	[104]
MiniDisc	EFM	RLL,直流平衡	[250]
DVD	EFMPlus	RLL,直流平衡	[122]
DVR	(1,7)PP	RLL,直流平衡	[162]
R-DAT	8-10	直流平衡	[186]
软盘、硬盘	(2,7)或(1,7)	RLL	[76]
DCC	ETM	直流平衡	[114]
Scoopman	LDM-2	RLL,直流平衡	[106]
DVC	24→25	RLL,导频音	[143]

一种记录码能得到实际应用有多种原因,例如,相似码元较长的序列很可能干扰时钟恢复和自适应均衡器等接收端电路,因为这些电路建立于信号是平稳的假设上。因此,将这些序列从输入集中删除,就可以避免“伤脑筋的”波形出现。删除特定的序列,把最坏情况的影响降低到最小,这样的编码过程正是调制/线路码最好的例子。被记录序列必须调整其某些性质,以符合实际可用的传输信道的物理特

征,这就叫做信道限制。这里所考虑的信道限制条件是由信道的物理特性所决定的,并且一直有效。以上是在时域内描述信道限制的情况,包含很长的相似码元的序列不允许通过信道。另外,信道限制也可以在频域进行描述。常用的磁记录设备对低频信号无响应。为了减小接收数据的恶化,经常通过编码的方法消除被记录数据中的低频成分。

上述两种调制码的例子都是通过避免不合理序列的出现,而减少错误产生几率的。这些序列是先验可知与信道缺陷最可能发生冲突的,因此,也最可能带来错误。在 D1 数字视频磁带机^[91]等记录设备中应用的扰频技术是另外一种常用的消除数据中最坏情况的方法。扰频器使用伪随机序列将数据统计特性随机化,使其类似于一个平稳序列。但仍存在一些使扰频器失效的最坏输入情况,由于这种在输入和输出数据之间一对一的映射转换技术实际并没有剔除可能出错的序列,因此,仍然可能被有问题的输入干扰。

调制码也被用于为伺服系统提供位置信息或者为时钟恢复系统提供时钟信息。在这方面存在很多的编码方案,包括产生跟踪导频音和(在特定位置上)频谱为零的编码。实践证明,调制码技术已成为本领域系统设计师手中一种有效的和广泛适用的工具,前面所提到的所有编码技术都在当代的数字视频记录设备中得到了应用^[33]。

用物理量来表示数字码元的方式有很多种,但所有这些方法都是将某一物理变量的连续函数在特定范围内的波形,赋值为特定的数字码元。现在使用的大多数数字式数据存储系统都采用二进制的和同步的方式。这表示,在每个码元对应的时间段(或时间片)内存储两种特定状态(例如,坑或岸、正向或反向磁场)之一。在读出时,接收器在已校准的时钟控制下与输入数据同相,在每个时间段的中间位置采集读出信号。众所周知,一个单脉冲通过一个带宽受限的系统传输,由于与信道冲激响应函数的卷积作用,会在时间轴上产生“延展”。因此,在某个时间段中心的采样值实际上是几个相邻时间段内脉冲响应幅度的加权和。这种现象被称为码间串扰(Inter Symbol Interference, ISI)。如果各码元的时间段与系统带宽的乘积减小,则 ISI 增大。最终可能出现这种情况:即使不存在噪声干扰,ISI 效应也严重到无法分辨真正的信号,使系统开始产生错误。

为了减小 ISI 效应而调整存储序列的结构,或为特定的需要“裁减”其功率谱密度,都属于调制码(或传输码)研究的范畴。这类处理方法被称为消息序列的(频谱)编码。举一个最普通的例子,如信道的高通滤波或交流耦合效应,这也是一种基线漂移码间串扰,消除这种 ISI 效应的常规方法就是采用在低频段无频谱分量的编码。

根据乃奎斯特关于无失真传输的经典准则^[188],在检测信号之前采用能够从本质上展平或均衡信道特征的线性滤波器,就可以完全消除 ISI 影响。但是在实际工

作中,提供任何时候都合适的均衡器是很困难的。磁带表面的凹凸不平和介质的不均匀都可能导致磁头接触紧密度的变化或波动,这将使得高频段响应发生变化,且比低频段响应的改变要大得多。在磁盘系统中,磁道半径的变化可导致线密度变化1倍;而且,磁头与盘片之间气隙的厚度是磁头飞行速度的函数,它也是经常变化的。在光盘系统中,主轴的摆动和盘片的翘曲使得焦平面持续抖动,由于聚焦伺服系统的带宽有限,导致聚焦光点质量的变化。即使采用自适应均衡器来跟踪动态的变化,在动态条件下维持一个优化的均衡器也是很困难的。自适应均衡器精度有限,而且对动态变化反应较慢。因此,调制码的设计必须在一定程度上能“承受”上述自适应均衡器或固定系数均衡器无法消除的动态变化。这种设计对DAT和CD系统尤为重要,因为这些产品是为家用设计的,不可能再次调整系统的机械参数。

上述物理参数只涉及到一维的通信信道研究。设计高的线密度(沿着磁道方向)并不是惟一的目标。在系统研究中,必须同时考虑道密度和线密度。设计整个记录系统时,优化各子系统(伺服、材料等)之间的互相影响是显著提高信息密度的关键。在磁记录设备中,信号幅度和信噪比与道间距成正比。因此,必须妥善处理线密度与道密度间的平衡。为了便于机械设计,高性能的数字磁带记录设备(如DAT磁带)都设计为具有相当高的线密度和较低的道密度。在这样设计的记录设备中,与(加性)噪声相比,ISI是限制信息密度的主要因素。对光存储设备而言尤其如此,因为这些设备中的这种噪声实际是不存在的。遗憾的是,分析和量化各子系统的影响非常困难,例如,相邻道之间的串扰等。这种分析需要耗费大量的时间与精力,还需要系统工程师的大量实验,并且还需要理论分析与实验结果取得一致。利用误码率来评价编码方案的性能较为方便,但同时必须注意,这并非评价数据存储系统的惟一有效工具。必须指出,如果由于不正确地选择跟踪伺服方法,或由于过多的盘片或磁带损坏导致磁道丢失,则任何形式的错误检测和纠正措施都是无效的。

本书能为“在一个特定的数据存储系统中应该采用何种编码”这样的问题提供答案吗?一个最简单的回答就是:没有任何编码能够满足这种普遍的条件。选择和设计编码的实际过程往往是对多种互相冲突的条件进行平衡,如信噪比、时钟精度、非线性度和码间串扰等。其他限制条件,例如,装备的局限、编码译码是否简易,以及防止在信源码元和信道码元之间出现特定的对应关系等,都会影响编码方案的选择。同时,选择编码的问题还进一步与一些非技术性的因素有关,如对专利保护的熟悉程度(对偏见和保守的一种委婉解释)等,这些因素在一定程度上都是有影响的。一个更深层次的(并不一定是最不相干的)因素是成本,任何编码方案都只是系统中的一部分,其成本必须与其在系统中的重要程度成正比。

当然,在一个实际的环境中定义最适宜的信道限制和评估编码的性能仍然是存在困难的。必须指出,虽然关于磁或光记录信道的现有知识似乎已经很详细,但