

# 基础和应用

# CHACUO KONGZHI BIANMA JICHU HE YINGYONG

林舒 科斯特洛 著 王育民 王新梅 译

人民邮电出版社

# 差错控制编码

## 基础和应用

林舒 著  
科斯特洛

王育民 译  
王新梅  
梁传甲 校

人民邮电出版社

SHU LIN  
DANIEL J. COSTELLO, JR.  
ERROR CONTROL CODING  
*Fundamentals and Applications*

1983

内 容 提 要

本书在《纠错码入门》的基础上，大大加强了编码在数字传输与存储系统中的应用部分，用通俗易懂的方式讲述数据传输中纠正错误所需的纠错编码技术，着重物理意义的阐述，深入浅出，具有实用价值。全书共十七章，循序渐进，可作为有关专业的大学生、研究生和从事通信和计算机等领域的工程技术人员参考书。

差 错 控 制 编 码

基 础 和 应 用

林 舒 科斯特洛 著

王育民 王新梅 译

梁传甲 校

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：850×1168 1/32      1986年12月第一版  
印张：23 28/32 页数：382      1986年12月河北第一次印刷  
字数：635 千字      印数：1—2,300册

统一书号：15045·总3111—无6350

定价：5.25 元

## 译 文 前 言

由林舒(*Shu Lin*)和D.J.科斯特洛(*Costello*), Jr.二位教授合著的“差错控制编码基础和应用”一书是一本深入浅出的好书。译成中文出版对我国有关专业的大学生、研究生和从事通信和计算机等领域的工程技术人员都是很有帮助的。本书第一位作者林教授在1970年曾出版了《纠错码入门》。该书以通俗易懂的方式介绍了纠错码的理论。其中译本由人民邮电出版社出版,受到了国内广大读者的欢迎,对于普及纠错码理论知识起到了促进作用。

通过有噪声信道实现有效而可靠通信的问题是信息论的中心论题。由香农和汉明奠基的纠错码理论则是解决通信可靠性的一个重要手段。它产生于五十年代初期。在前二十年的发展中,人们致力于解决如何设计好码、好码的译码方法、以及最好码在理论上可以达到的上、下限等问题。七十年代以来,由于大规模集成电路技术的发展,也由于卫星和计算机通信网的发展,使纠错码的研究重点转向工程应用。当前差错控制技术已在深空通信、军事通信、数据通信、信息检索以及计算机的大规模外存系统中得到了广泛的应用。在大规模和超大规模数字集成电路的设计中也开始采用差错控制技术。当前差错控制系统设计所能达到的性能已经与信息论基本定理所给出的极限大大接近了。对于白高斯干扰信道,在保证误码率小于 $10^{-6}$ 的条件下,传送一比特信息所需的信噪比为 $-1.6\text{dB}$ 。在六十年代不用编码的最佳相干PSK调制和解调系统所要求的信噪比为 $9.5\text{dB}$ 。七十年代采用卷积码和序列译码可达到3到 $5\text{dB}$ 范围。而八十年代采用码长 $n=255$ 的RS码作为外码,与约束长度为7、速率为 $1/2$ 的卷积码作内码进行级联,内码采用维特比(*Viterbi*)译码可使所要求的信噪比降到 $0.2\text{dB}$ ,这与理论极限值仅相差 $1.8\text{dB}$ ,

而整个编译码系统仅用三片集成电路就可实现<sup>\*</sup>。可以预见，在今后的通信和计算机系统设计，纠错码会得到越来越广泛的应用。

目前，编码和差错控制技术在我国许多工程技术中得到了重视和应用，不少大专院校的有关专业都为研究生和大学高年级学生开设了纠错编码的课程。关于本书的特点，著者在前言中已经全面阐明了。本书继承了《纠错码入门》的风格，并大大加强了关于卷积码、检错以及实际应用等方面的内容，在目前形势下，将本书翻译出版，一定会受到国内广大读者的欢迎。

陈太一  
一九八三年一月

---

<sup>\*</sup> I.S.Reed, "Application of Transforms to Coding and Related Topics," 1982 IEEE International Symposium on Information Theory, June 21-25, 1982, Les Arcs, France.

## 前 言

本书首先归功于1948年C. 香农的关于通过有扰传输信道实现可靠通信的先驱性著作。香农的中心论题是, 如果系统的传信率小于信道容量, 则适当选择编译码技术就能实现可靠通信。由汉明、斯列宾和其他人在五十年代初期所开创的设计好码和有效译码方法的工作, 后来受到了许多研究者的关注。这方面的许多著作在性质上是高度数学的, 因而需要有很多的近世代数和概率论的基础知识才能理解。这对许多致力于把这些技术应用于实际系统的实践工程师和计算机科学工作者来说无疑是一种障碍。目的之一是使只有很少数学基础知识的人能够理解和运用这种相当复杂的技术材料的主要内容。

五十年代和六十年代的编码工作主要致力于发展有效的编译码器。1970年第一位作者出版了一本名为《纠错码入门》的书, 它介绍了最初二十年分组码和卷积码技术中的基础知识。阐述问题的方式是通俗易懂而不求数学上的严格性。本书采用同样方法来介绍编码的基础知识。但整个手稿已重新编写, 并增加了许多新的内容。特别是在七十年代, 编码研究的重点已从理论转向实际应用, 因而新增了三章介绍编码在数字传输和存储系统中的应用。其它主要增加的内容有: 深入论述了分组码检错能力以及着重讲述了卷积码的概率译码。各章内容简述如下。

第一章综述编码在数据通信和存贮系统中控制错误的作用。简单讨论调制解调的目的是想在一个完整的系统中把编码放到适当的地位。第二章从近世代数的观点来介绍一些为理解后面各章内容所必需的概念。讲述的水平可以为高年级大学生和实践工程师及计算机科学工作者所理解。

第3到第8章详细介绍了纠随机错误分组码。第3章介绍线性码的基础知识,还包括了线性码检错一大节,这是一个在多数编码著作中仅有简单讨论的重要论题。实际中应用的大多数线性码是循环码。循环码的基本结构和特性在第4章中介绍。众所周知,译某些循环码的一种简单方法是捕错译码,这将在第5章中介绍。第6章详细介绍纠正多个错误的一类重要的码, **BCH码**;它包括**BCH译码器**的硬件和软件实现以及**BCH码**在检错中的应用。第7和第8章详细讨论了大数逻辑译码和大数逻辑可译码。分组码的基本内容以第9章关于纠突发错误作结束,这一讨论还包括了纠正突发和随机错误组合的码。

第10到14章致力于介绍卷积码的基础知识。第10章引入了卷积码。我们以编码器的状态图作为研究码的构造和距离特性的基础。对于硬的和软的解调判决的**维特比译码算法**在第11章中介绍。它还包括了基于码距特性的详细性能分析。第12章介绍两种基本的序列译码法:**堆栈算法**和**费诺算法**。我们对序列译码计算性能这一难题作了讨论,但未作详细的证明。第13章涉及卷积码的大数逻辑译码。这一章还包括了卷积码三种主要译码方法的比较。第14章介绍纠突发错误卷积码,其中一节是关于纠正突发和随机错误组合的卷积码。捕获突发码,即在卷积码中嵌入分组码,也将在本章中加以介绍。

第15到17章涉及到编码在近代数据通信和存储系统中的各种应用。虽然这三章不可能包罗万象,但给出了编码作为一种差错控制方法的许多不同应用途径。强调实际应用使得这本书在编码著作中独树一帜。第15章专门讨论数据通信中的自动要求重传(**ARQ**)差错控制方式。对纯**ARQ**(检错重传)和混合**ARQ**(纠错和检错组合重传)都进行了讨论。第16章介绍分组码在数据存贮系统中差错控制的应用,这包括计算机存贮、磁带、磁盘和光存贮系统中的编码技术。最后,第17章中介绍卷积码在数字通信系统中的广泛应用,它包括实际用于许多空间和卫星系统中的码,以及有关卷积码

用于混合ARQ系统的一节。

更有一些特写使得本书无论是作为教材，或作为从事差错控制系统设计的工程师和计算机科学工作者的一本综合参考书，都有裨益。给出的三个附录包括了用于构造分组码的代数结构细节。全书列出了给定译码方式下许多最佳已知码的表。这些对于设计者寻求某一特定应用中的最佳码将是具有价值的。每一章末都给出一组问题。虽然有些问题深一些，但解多数问题可相当直接地应用书中所讲的内容。总共有250多个问题。将有一本题解可供采用此教材的教师使用。书中列出了300多篇参考文献。虽然我们打算编辑完整的编码书目，但所列的参考目录可提供书中所涉及论题的细节。

本书可作为大学高年级或研究生第一年的纠错码及其应用的入门教材。也可以作为想了解编码的基础知识和如何用于设计差错控制系统的工程师和计算机科学工作者的自修指南。

本书可作为编码理论及应用这一课程的教材，分为两个学期讲授。第一学期可以包括1至9章有关分组码部分，第二学期为10至17章有关卷积码及应用。另一种可行方案是在一学期中讲授本书部分内容。一种可能的方案是讲授1至6章和10至12章，这包括了分组码和卷积码的基本知识。分组码及应用的课程可以由1至6章、第9、15和16章组成，而1至3章、10至14章和第17章则包括了卷积码及其应用以及分组码的初步概念。本书是在原来的教学笔记基础上写成的。两位作者都曾在大学课程和工业短期训练班上试用过这些教材，效果完全令人满意。

很难一一指出许多人士若干年来对本著作所起的作用。我们两人都衷心感谢我们的论文导师，保罗·E·菲弗尔(Paul E. Pfeiffer)教授和詹姆斯L·梅西(James L. Massey)教授。在我们的早年研究过程中，如果没有他们激励我们致力于这个令人振奋的领域，没有他们的一贯鼓励与指导，这本书是不可能写成的。

本书前半部分有关分组码的大部分内容应主要归功于W·威斯里·彼得森(W·Wesley Peterson)和嵩忠雄(Tadao Kasami)教



授。他们在代数编码方面的先驱著作和他们的有价值的讨论和建议对这部分内容的写作有深刻的影响。本书第二部分关于卷积码的论述则受到詹姆斯·L·梅西教授的极大影响。他那种把很复杂的问题清晰地分析出基本因素的风格对准备这部分材料帮助很大。特别是第14章的大部分是根据他所准备的笔记写成的。

我们对国家科学基金会和伊利亚斯·舒兹曼 (Elias Schutzman) 先生对我们在编码领域的研究所给的一贯支持表示感谢。没有这种协助, 我们在编码方面的兴趣决不可能发展到写这本书的地步。我们感谢夏威夷大学和伊利诺斯技术学院在写作本书时所给予我们的支持和提供的方便。我们还要感谢弗兰克林·F·郭 (Franklin F. Kuo) 教授是他建议我们写这本书, 并在准备手稿过程中一直给予鼓励和指导。还有许多研究生不断地提出新思想和新见解, 使我们受益非浅。对本书作出贡献的还有派瑞·切维莱特 (Pierre Chevillat), 法海得·海梅梯 (Farhad Hemmati), 亚利山大·得鲁卡也夫 (Alexander Drukarev) 和米切尔·J·米勒 Michael J. Miller 等博士。

我们对嵩忠雄, 米切尔·J·米勒和王育民等教授表示特别的谢意。他们认真地阅读了初稿, 改正了一些错误并提出了改进意见。我们还要感谢我们的秘书在打印手稿中的献身精神和耐心程度。得包拉赫·维地 (Deborah Waddy) 和米切尔·松本 (Michelle Masumoto) 小姐在准备本书手稿和改稿中所表现的毅力十分值得赞扬。

最后, 我们愿意对我们的双亲、妻子和孩子们在本书的写作过程中不断的关怀和支持表示深切的谢意。

林 舒 (Shu Lin)

Daniel J. Costello, Jr.

# 目 录

|                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| <b>第 1 章 用于可靠数传和存储的编码</b> .....  | ( 1 )  |
| 1.1 引言 .....                     | ( 1 )  |
| 1.2 码的类型 .....                   | ( 4 )  |
| 1.3 调制和解调.....                   | ( 6 )  |
| 1.4 最大似然译码 .....                 | ( 10 ) |
| 1.5 错误类型 .....                   | ( 14 ) |
| 1.6 差错控制方式 .....                 | ( 15 ) |
| 参考文献.....                        | ( 17 ) |
| <b>第 2 章 代数引论</b> .....          | ( 18 ) |
| 2.1 群 .....                      | ( 18 ) |
| 2.2 域 .....                      | ( 23 ) |
| 2.3 二元域算术 .....                  | ( 30 ) |
| 2.4 伽罗华域 $GF(2^m)$ 的构造 .....     | ( 36 ) |
| 2.5 伽罗华域 $GF(2^m)$ 的基本性质 .....   | ( 42 ) |
| 2.6 用于伽罗华域 $GF(2^m)$ 算术的计算 ..... | ( 49 ) |
| 2.7 向量空间 .....                   | ( 51 ) |
| 2.8 矩阵 .....                     | ( 57 ) |
| 问题.....                          | ( 60 ) |
| 参考文献.....                        | ( 63 ) |
| <b>第 3 章 线性分组码</b> .....         | ( 64 ) |
| 3.1 线性分组码引论 .....                | ( 64 ) |
| 3.2 伴随式和错误检测 .....               | ( 70 ) |
| 3.3 分组码的最小距离 .....               | ( 77 ) |
| 3.4 分组码的检错纠错能力 .....             | ( 80 ) |

|            |                         |                |
|------------|-------------------------|----------------|
| 3.5        | 标准阵和伴随式译码 .....         | ( 84 )         |
| 3.6        | 线性码经由BSC的不可检错概率 .....   | ( 94 )         |
| 3.7        | 汉明码 .....               | ( 98 )         |
|            | 问题.....                 | ( 101 )        |
|            | 参考文献.....               | ( 105 )        |
| <b>第4章</b> | <b>循环码 .....</b>        | <b>( 106 )</b> |
| 4.1        | 循环码的描述 .....            | ( 106 )        |
| 4.2        | 循环码的生成矩阵和一致校验矩阵 .....   | ( 114 )        |
| 4.3        | 循环码的编码 .....            | ( 118 )        |
| 4.4        | 伴随式计算和错误检测 .....        | ( 122 )        |
| 4.5        | 循环码的译码 .....            | ( 127 )        |
| 4.6        | 循环汉明码 .....             | ( 135 )        |
| 4.7        | 缩短循环码 .....             | ( 142 )        |
|            | 问题.....                 | ( 147 )        |
|            | 参考文献.....               | ( 151 )        |
| <b>第5章</b> | <b>循环码的捕错译码.....</b>    | <b>( 153 )</b> |
| 5.1        | 捕错译码 .....              | ( 153 )        |
| 5.2        | 捕错译码的一种改进 .....         | ( 162 )        |
| 5.3        | 戈莱码 .....               | ( 164 )        |
|            | 问题.....                 | ( 169 )        |
|            | 参考文献.....               | ( 170 )        |
| <b>第6章</b> | <b>BCH码.....</b>        | <b>( 172 )</b> |
| 6.1        | 码的描述 .....              | ( 172 )        |
| 6.2        | BCH码的译码 .....           | ( 184 )        |
| 6.3        | 伽罗华域算术运算的实现 .....       | ( 196 )        |
| 6.4        | 纠错的实现 .....             | ( 202 )        |
| 6.5        | 非二进制BCH码和里德-索洛门码.....   | ( 207 )        |
| 6.6        | 二进制BCH码的重量分布和错误检测 ..... | ( 215 )        |
|            | 问题.....                 | ( 218 )        |

|                              |                |
|------------------------------|----------------|
| 参考文献.....                    | ( 221 )        |
| <b>第7章 循环码的大数逻辑译码.....</b>   | <b>( 223 )</b> |
| 7.1 一步大数逻辑译码 .....           | ( 223 )        |
| 7.2 一步大数逻辑可译码类 .....         | ( 234 )        |
| 7.3 其它的一步大数逻辑可译码 .....       | ( 245 )        |
| 7.4 多步大数逻辑译码 .....           | ( 252 )        |
| 问题.....                      | ( 266 )        |
| 参考文献.....                    | ( 270 )        |
| <b>第8章 有限几何码.....</b>        | <b>( 271 )</b> |
| 8.1 欧氏几何码 .....              | ( 271 )        |
| 8.2 建立在欧氏几何基础上的大数逻辑可译码 ..... | ( 276 )        |
| 8.3 射影几何和射影几何码 .....         | ( 293 )        |
| 8.4 大数逻辑译码的修正 .....          | ( 300 )        |
| 问题.....                      | ( 310 )        |
| 参考文献.....                    | ( 312 )        |
| <b>第9章 纠突发错误码.....</b>       | <b>( 314 )</b> |
| 9.1 引言 .....                 | ( 314 )        |
| 9.2 纠单个突发错误循环码的译码 .....      | ( 316 )        |
| 9.3 纠单个突发错误码 .....           | ( 319 )        |
| 9.4 交错码 .....                | ( 331 )        |
| 9.5 纠定段突发错误码 .....           | ( 332 )        |
| 9.6 纠突发和随机错误码 .....          | ( 334 )        |
| 9.7 能同时纠正突发和随机错误的修正法尔码 ..... | ( 342 )        |
| 问题.....                      | ( 345 )        |
| 参考文献.....                    | ( 347 )        |
| <b>第10章 卷积码.....</b>         | <b>( 350 )</b> |
| 10.1 卷积码的编码.....             | ( 350 )        |
| 10.2 卷积码的构造特性.....           | ( 361 )        |
| 10.3 卷积码的距离特性.....           | ( 377 )        |

|                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| 问题.....                     | ( 381 )        |
| 参考文献.....                   | ( 384 )        |
| <b>第11章 卷积码的最大似然译码.....</b> | <b>( 385 )</b> |
| 11.1 维特比算法.....             | ( 385 )        |
| 11.2 卷积码的性能限.....           | ( 393 )        |
| 11.3 好卷积码的构成.....           | ( 403 )        |
| 11.4 维特比算法的实现.....          | ( 412 )        |
| 11.5 维特比算法的修正.....          | ( 422 )        |
| 问题.....                     | ( 423 )        |
| 参考文献.....                   | ( 426 )        |
| <b>第12章 卷积码的序列译码.....</b>   | <b>( 428 )</b> |
| 12.1 堆栈(叠式)存贮算法.....        | ( 428 )        |
| 12.2 费诺算法.....              | ( 440 )        |
| 12.3 序列译码的性能特点.....         | ( 445 )        |
| 12.4 用于序列译码的码的构造.....       | ( 456 )        |
| 12.5 其它的序列译码方法.....         | ( 462 )        |
| 问题.....                     | ( 468 )        |
| 参考文献.....                   | ( 471 )        |
| <b>第13章 卷积码的大数逻辑译码.....</b> | <b>( 473 )</b> |
| 13.1 反馈译码.....              | ( 473 )        |
| 13.2 错误传播和定译码.....          | ( 495 )        |
| 13.3 距离特性和码的性能.....         | ( 498 )        |
| 13.4 大数逻辑可译码的构造.....        | ( 505 )        |
| 13.5 与概率译码的比较.....          | ( 518 )        |
| 问题.....                     | ( 521 )        |
| 参考文献.....                   | ( 523 )        |
| <b>第14章 纠突发错误卷积码.....</b>   | <b>( 524 )</b> |
| 14.1 纠突发错误能力的限.....         | ( 524 )        |
| 14.2 纠正突发错误卷积码.....         | ( 525 )        |

|             |                                |                |
|-------------|--------------------------------|----------------|
| 14.3        | 交错卷积码.....                     | ( 537 )        |
| 14.4        | 纠突发 $\pi$ 随机错误卷积码 .....        | ( 540 )        |
|             | 问题.....                        | ( 555 )        |
|             | 参考文献.....                      | ( 558 )        |
| <b>第15章</b> | <b>自动要求重传(ARQ)方法.....</b>      | <b>( 559 )</b> |
| 15.1        | 基本ARQ方式.....                   | ( 559 )        |
| 15.2        | 采用有限接收缓冲器的选择重传ARQ .....        | ( 567 )        |
| 15.3        | 混合重传ARQ方式 .....                | ( 577 )        |
| 15.4        | 混合ARQ方式 .....                  | ( 579 )        |
| 15.5        | 一类半速率可逆码 .....                 | ( 584 )        |
| 15.6        | 利用有限接收缓冲器的Ⅱ型混合选择重传<br>ARQ..... | ( 586 )        |
|             | 问题.....                        | ( 599 )        |
|             | 参考文献.....                      | ( 600 )        |
| <b>第16章</b> | <b>分组码在数据存贮差错控制中的应用.....</b>   | <b>( 603 )</b> |
| 16.1        | 计算机主处理机和控制存储器的差错控制.....        | ( 603 )        |
| 16.2        | 磁带的差错控制.....                   | ( 608 )        |
| 16.3        | IBM 3850大容量存贮系统的差错控制 .....     | ( 625 )        |
| 16.4        | 磁盘的差错控制.....                   | ( 636 )        |
| 16.5        | 其它数据存贮系统中的差错控制.....            | ( 644 )        |
|             | 问题.....                        | ( 645 )        |
|             | 参考文献.....                      | ( 645 )        |
| <b>第17章</b> | <b>卷积码的实际应用.....</b>           | <b>( 646 )</b> |
| 17.1        | 维特比译码的应用.....                  | ( 646 )        |
| 17.2        | 序列译码的应用.....                   | ( 653 )        |
| 17.3        | 大数逻辑译码的应用.....                 | ( 658 )        |
| 17.4        | 用于纠突发错误.....                   | ( 662 )        |
| 17.5        | 卷积码在ARQ系统中的应用 .....            | ( 667 )        |

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| 问题.....                               | ( 674 ) |
| 参考文献.....                             | ( 675 ) |
| 附录A 伽罗华域的表.....                       | ( 677 ) |
| 附录B $GF(2^m)$ 中元素的最小多项式 .....         | ( 694 ) |
| 附录C 长度到 $2^{10}-1$ 的二元本原BCH码的生成多项式... | ( 698 ) |
| 英汉名词对照表.....                          | ( 719 ) |

# 第1章 用于可靠数传和 存储的编码

## 1.1 引言

近年来,对有效而可靠的数据传输和存储系统的需要日益增长。在军事上、政府和民间范围内,随着数字信息交换、处理和存储用的大规模、高速数据网的出现更加剧了这一需要。在这些系统的设计中,要求将通信和计算机技术结合起来。设计者主要关心的是控制差错,以实现数据的可靠重现。

1948年,香农在一篇具有历史意义的论文中曾经证明,对信息适当进行编码,在不牺牲信息传输或存储速率的情况下,可以将有扰信道或存储媒质引入的差错减到任意低的程度。自香农的著作发表以来,人们为了在有扰环境下控制差错而在设计有效的编译码方法方面作了大量的努力。近来的发展趋势是实现目前高速数字系统所要求的可靠性,并且差错控制编码的应用已成为现代通信系统和数字计算机设计中不可分割的一部分。

数字信息的传输和存储有很多共同之处。两者都是将数据从信源转移到目的地(或用户)。典型的传输(或存储)系统可用图1.1所示的框图表示。信源可以是人或机器(例如一台数字计算机)。被传送的信源输出可以是连续波形,也可以是离散的符号序列。信源编码器将信源输出变换成二元数字(bit)序列,这称为信息序列 $u$ 。在信源连续的情况下,还须进行模拟-数字(A/D)变换。把信源编码器理想地设计成:(1)为表示信源输出所要求的单位时间的比特数要小;和(2)信源输出可从信息序列 $u$ 确切地重新构造。本书不



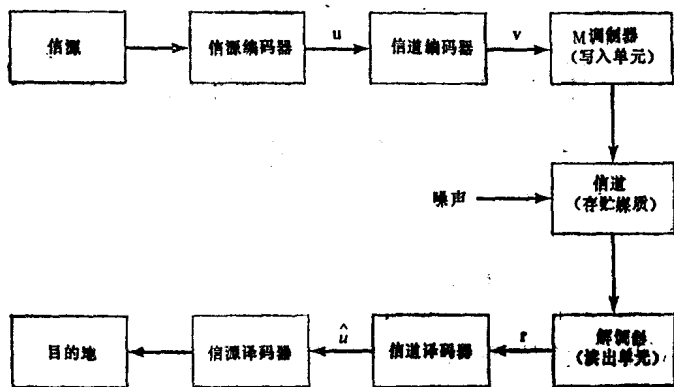


图 1.1 典型的数据传输或存储系统框图

讨论信源编码这一课题。这一重要论题的详尽论述可参阅文献 2 和 3。

信道编码器将信息序列  $u$  变换成离散的编码序列  $v$ ，这称为码字。虽然在某些应用中也用非二进制，但在大多数情况下  $v$  是二进制序列。信道编码器主要用来对付传输或存储码字的有扰信道，它的设计与实现问题是本书的主要论题之一。

离散符号不适用于在实际信道上传输、或记录在数字存储媒质上。调制器（或写入单元）把信道编码器的每个输出符号变换成适于传输（或记录）的持续时间为  $T$  秒的波形。这个波形进入信道（或存储媒质），并受噪声干扰。典型的传输信道有电话线路、高频无线线路、遥测线路、微波线路、卫星线路等。典型的存储媒质有磁芯和半导体存储器、磁带、磁鼓、磁盘文件、光存储器等。这些例子中的每一种都受到不同类型的噪声干扰。电话线路上，干扰可能来自开关脉冲噪声、热噪声、来自其它线路的串音、或闪电。磁带上的磁涂层缺损被看作是噪声干扰。解调器（或读出单元）处理接收到的每个持续时间为  $T$  秒的波形，并产生一个可能是离散的（量化的）、或连续的（未量化的）输出。相应于编码序列  $v$  的解调器