

高等学校教材

# 信息传输原理

黄端旭



南京工学院出版社

高等学校教材

# 信息传输原理

黄端旭

南京工学院出版社

## 内 容 提 要

本书经电子工业部高等学校《无线电技术与信息系统》教材编审委员会《无线电通讯》编审组审定为全国高等院校工科无线电技术等专业的统编教材。

本书以信息传输系统模型为基线,讲述信息传输基本原理。全书内容如下四大部分:第一部分介绍信号,包括确知信号和随机信号,着重分析随机信号和噪声;第二部分为香农信息论基础,分别讨论信源和信道;第三部分介绍调制,含模拟调制及数字调制;第四部分介绍数字通信基本理论和技术,包括基带和频带数据传输以及差错控制编码。各章均附有习题。

本书以阐述物理概念为主,强调实际应用,对必要的数学分析力求严谨,叙述简洁,层次分明,结论明确。本书为高等学校无线电技术专业教材。亦可供信息科学、通信及信号处理等专业的研究生及有关科技人员学习参考之用。

## 信息传输原理

黄端旭

南京工学院出版社出版

江苏南京市四牌楼2号

高淳印刷厂印刷 江苏省新华书店发行

开本 850×1168毫米 大32开 印张 15.25 字数 407千字

1987年9月第1版 1987年9月第1次印刷

印数 1—5000册

ISBN 7-81023-036(0)/S·36

---

统一书号: 15409·025 定价: 2.66元

责任编辑 朱经邦

# 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从1977年底到1982年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材195种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于1982年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了1982~1985年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社、天津科学技术

出版社和南京工学院出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本书系全国高等院校工科电子类无线电技术等专业的统编教材。

本书以信息传输系统模型为基线，讲述信息传输基本原理，全书共计十二章：第一章绪论阐述“信息”的科学涵义及研究信息传输的目的。除绪论之外，其后十一章分为四大部分：第一部分是分析信息传输的基本工具。它包括第二章确知信号分析及第三章随机信号和噪声，使读者在回顾已经熟悉的傅氏变换的基础上，了解希尔伯特变换，并且建立和掌握统计分析的概念和方法。本书从概率论基本知识到随机变量直至随机过程的分析中，均注意结合实例，尤其是应用于噪声分析，而不追求纯数学的推导。第二部分是信息论的基本知识。它包括第四章信源和第五章信道。作者认为，信息论基本内容是研究信息传输系统不可缺少的重要组成部分，它向读者指明提高信息传输的有效性及可靠性的途径。因此，本书强调香农理论的物理意义及其在编码中的应用。第三部分是实现模拟信息传输的技术措施。它包括第六章幅度调制，第七章角度调制，第八章脉冲调制和第九章数字脉冲调制。“调幅”与“调角”是在高频电子线路基础上进行有针对性的讨论；而对“脉冲调制”仅阐述其基本原理；至于“数字脉冲调制”则是分析模拟信号的数字传输。第四部分是数字信息传输基础。它包括第十章基带数据传输、第十一章数字调制以及第十二章差错控制编码。基带和频带数字信息传输是数字通信最基本的内容，而差错控制编码是提高数字信息传输可靠性的重要措施。另外，还分别讨论了各类噪声的特点以及各种通信方式的抗噪性能，它们是探讨有效地和可靠地传输信息所必需的内

容。

本书主审人是华中工学院刘华志副教授，安徽大学汪炳权副教授对本书的出版给予了大力支持和帮助，钱诚老师和丘洪杰老师也给予了帮助，姚士蓉老师为本书绘制了部分插图。在此对它们表示衷心的感谢。

当本书出版之际，作者不会忘记，在自己从事研究“信息传输”过程中，安徽大学无线电系戚作钧教授在“无线电通信理论基础”方面，中国科学院电子所陈宗鹭教授在“信息论”方面曾给予的热心指导。借此机会，谨向他们表示深切的谢意。

限于作者水平，书中定有不妥之处，谨希读者不吝指正。

黄端旭

1986年10月

# 目 录

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| <b>第一章 绪论</b> .....           | (1)  |
| § 1.1 信息的概念 .....             | (1)  |
| § 1.2 信息传输系统模型 .....          | (2)  |
| <b>第二章 信号分析</b> .....         | (4)  |
| § 2.1 频域和时域 .....             | (4)  |
| § 2.2 傅氏变换 .....              | (5)  |
| § 2.3 卷积定理 .....              | (7)  |
| § 2.4 功率密度谱 .....             | (8)  |
| § 2.5 相关函数 .....              | (11) |
| § 2.6 取样定理 .....              | (15) |
| § 2.7 希尔伯特 (Hilbert) 变换 ..... | (19) |
| 习题 .....                      | (23) |
| <b>第三章 随机信号和噪声</b> .....      | (25) |
| § 3.1 概率简述 .....              | (25) |
| § 3.2 随机变量 .....              | (28) |
| 3.2.1 随机变量的概念 .....           | (28) |
| 3.2.2 概率分布函数 .....            | (28) |
| 3.2.3 概率密度函数 .....            | (30) |
| 3.2.4 多维随机变量 .....            | (30) |
| 3.2.5 随机变量的数字特征 .....         | (32) |
| § 3.3 几种常用的概率分布 .....         | (35) |
| 3.3.1 二项式分布 .....             | (35) |
| 3.3.2 泊松 (Poisson) 分布 .....   | (37) |

|       |                             |      |
|-------|-----------------------------|------|
| 3.3.3 | 均匀分布                        | (38) |
| 3.3.4 | 指数分布                        | (40) |
| 3.3.5 | 正态(Normal)分布或高斯(Gaussian)分布 | (40) |
| 3.3.6 | 瑞利(Rayleigh)分布              | (43) |
| 3.3.7 | 赖斯(Rice)分布                  | (44) |
| § 3.4 | 随机过程                        | (45) |
| 3.4.1 | 随机过程的基本概念                   | (45) |
| 3.4.2 | 随机过程的概率分布                   | (46) |
| 3.4.3 | 随机过程的数字特征                   | (47) |
| 3.4.4 | 平稳随机过程                      | (50) |
| 3.4.5 | 高斯过程                        | (57) |
| § 3.5 | 随机信号通过线性网络                  | (60) |
| 3.5.1 | 输出随机过程的数字特征                 | (60) |
| 3.5.2 | 输入随机过程之和的系统响应               | (65) |
| § 3.6 | 噪声                          | (66) |
| 3.6.1 | 白噪声                         | (66) |
| 3.6.2 | 有色噪声                        | (67) |
| 3.6.3 | 窄带噪声                        | (72) |
| 3.6.4 | 窄带噪声加正弦信号的包络                | (77) |
| 3.9.5 | 噪声带宽                        | (79) |
| 习题    |                             | (80) |

#### **第四章 信源特性和信源编码**.....(84)

|       |                   |       |
|-------|-------------------|-------|
| § 4.1 | 信息量的定义            | (84)  |
| § 4.2 | 平均信息量——熵(Entropy) | (87)  |
| § 4.3 | 无记忆信源的扩展          | (92)  |
| § 4.4 | 编码的一些概念           | (94)  |
| § 4.5 | 信源编码的基本问题         | (98)  |
| § 4.6 | 香农(Shannon)第一定理   | (104) |
| § 4.7 | 哈夫曼(Huffman)码     | (107) |

|                              |              |
|------------------------------|--------------|
| § 4.8 连续信源.....              | (111)        |
| 习题 .....                     | (115)        |
| <b>第五章 信道特性和信道编码 .....</b>   | <b>(117)</b> |
| § 5.1 离散信道的统计模型和概率关系.....    | (117)        |
| 5.1.1 离散无记忆信道的统计模型.....      | (117)        |
| 5.1.2 信道中的一些概率关系.....        | (122)        |
| § 5.2 信道疑义度.....             | (123)        |
| § 5.3 交互信息.....              | (127)        |
| § 5.4 信道容量.....              | (134)        |
| § 5.5 连续信道.....              | (138)        |
| § 5.6 信道编码的基本思想.....         | (143)        |
| 5.6.1 信号受到干扰作用的情况.....       | (144)        |
| 5.6.2 码距与纠错能力之间的关系.....      | (145)        |
| § 5.7 纠错编码的一般概念.....         | (147)        |
| 5.7.1 奇偶监督码.....             | (147)        |
| 5.7.2 汉明码.....               | (147)        |
| § 5.8 率失真理论.....             | (151)        |
| 习题 .....                     | (153)        |
| <b>第六章 幅度调制系统 .....</b>      | <b>(156)</b> |
| § 6.1 调幅(AM) .....           | (156)        |
| 6.1.1 调幅波的波形和频谱.....         | (156)        |
| 6.1.2 调幅波的产生.....            | (163)        |
| 6.1.3 调幅波的解调.....            | (167)        |
| § 6.2 双边带抑制载波调幅(DSBSC) ..... | (168)        |
| 6.2.1 DSBSC波形和频谱 .....       | (168)        |
| 6.2.2 DSBSC波的产生 .....        | (170)        |
| 6.2.3 DSBSC波的相干检波 .....      | (172)        |
| § 6.3 单边带调幅(SSB).....        | (175)        |

|       |             |       |
|-------|-------------|-------|
| 6.3.1 | 单边带波的分析     | (176) |
| 6.3.2 | SSB波的产生     | (180) |
| 6.3.3 | SSB波的解调     | (181) |
| § 6.4 | 残留边带调幅(VSB) | (183) |
| 6.4.1 | 产生VSB波的滤波器  | (184) |
| 6.4.2 | 移相法产生VSB系统  | (187) |
| § 6.5 | 各种幅调系统的比较   | (189) |
| § 6.6 | 频分复用(FDM)   | (190) |
| § 6.7 | 幅度调制系统中的噪声  | (191) |
| 6.7.1 | DSBSC调幅系统   | (192) |
| 6.7.2 | SSB调幅系统     | (194) |
| 6.7.3 | 普通调幅(AM)系统  | (195) |

|    |       |
|----|-------|
| 习题 | (197) |
|----|-------|

## 第七章 角度调制系统 (200)

|       |               |       |
|-------|---------------|-------|
| § 7.1 | 窄带调频(NBFM)    | (202) |
| § 7.2 | 宽带调频(WBFM)    | (204) |
| § 7.3 | FM调制器         | (212) |
| 7.3.1 | 间接调频          | (212) |
| 7.3.2 | 直接调频          | (214) |
| § 7.4 | FM解调器         | (215) |
| § 7.5 | 调相(PM)        | (218) |
| § 7.6 | 调频系统中的噪声      | (222) |
| § 7.7 | 调频系统中的预加重和去加重 | (230) |

|    |       |
|----|-------|
| 习题 | (231) |
|----|-------|

## 第八章 脉冲调制系统 (233)

|       |           |       |
|-------|-----------|-------|
| § 8.1 | 脉幅调制(PAM) | (233) |
| 8.1.1 | PAM信号及频谱  | (233) |
| 8.1.2 | PAM的调制和解调 | (238) |

|            |                        |       |
|------------|------------------------|-------|
| § 8.2      | 时分复用(TDM).....         | (241) |
| § 8.3      | 脉宽调制(PWM或PDM) .....    | (243) |
| § 8.4      | 脉位调制(PPM) .....        | (245) |
|            | 习题 .....               | (247) |
| <b>第九章</b> | <b>模拟信号的数字传输</b> ..... | (249) |
| § 9.1      | 基本原理 .....             | (249) |
| § 9.2      | 信号的取样和重现 .....         | (252) |
| 9.2.1      | 低通信号的理想取样和重现 .....     | (252) |
| 9.2.2      | 带通信号的理想取样和重现 .....     | (252) |
| 9.2.3      | 随机信号取样和重现 .....        | (254) |
| 9.2.4      | 实际信号取样和重现 .....        | (254) |
| § 9.3      | 模拟信号的量化 .....          | (257) |
| 9.3.1      | 均匀量化 .....             | (258) |
| 9.3.2      | 非均匀量化 .....            | (261) |
| 9.3.3      | 差值量化 .....             | (264) |
| § 9.4      | 模拟信号的编码传输 .....        | (265) |
| 9.4.1      | 脉冲编码调制(PCM) .....      | (266) |
| 9.4.2      | 脉码调制系统的噪声 .....        | (269) |
| 9.4.3      | 增量调制(DM) .....         | (273) |
| 9.4.4      | 增量调制系统的噪声 .....        | (277) |
| 9.4.5      | 差值脉码调制(DPCM) .....     | (280) |
| § 9.5      | 传输模拟信号的各种方法比较 .....    | (282) |
| 9.5.1      | 数字脉冲调制的优点 .....        | (282) |
| 9.5.2      | 各种模拟信息传输系统性能比较 .....   | (283) |
|            | 习题 .....               | (286) |
| <b>第十章</b> | <b>基带数据传输</b> .....    | (290) |
| § 10.1     | 基本原理 .....             | (290) |
| 10.1.1     | 基带二进制PAM数据传输系统 .....   | (291) |

|        |              |       |
|--------|--------------|-------|
| 10.1.2 | 基带PAM系统的设计考虑 | (294) |
| § 10.2 | 基带脉冲整形       | (295) |
| 10.2.1 | 整形定理         | (295) |
| 10.2.2 | 对实际整形的考虑     | (297) |
| § 10.3 | 最佳发送和接收滤波器   | (299) |
| § 10.4 | 双二进制基带PAM系统  | (307) |
| 10.4.1 | 受控码间干扰       | (309) |
| 10.4.2 | 双二进制系统最佳滤波器  | (310) |
| § 10.5 | M进制系统        | (313) |
| 10.5.1 | 分析和设计        | (315) |
| 10.5.2 | 同二进制系统比较     | (324) |
| § 10.6 | 发送信号频谱的整形    | (327) |
| 10.6.1 | 双极性编码        | (328) |
| 10.6.2 | 孪生二进制编码      | (331) |
| § 10.7 | 均衡           | (332) |
| 10.7.1 | 横向均衡         | (333) |
| 10.7.2 | 自动均衡         | (336) |
| § 10.8 | 眼图           | (340) |
| § 10.9 | 同步           | (342) |
|        | 习题           | (343) |

## 第十一章 数字调制 (346)

|        |                     |       |
|--------|---------------------|-------|
| § 11.1 | 二进制数字调制的最佳接收机       | (346) |
| 11.1.1 | 二进制ASK、PSK及FSK信号的描述 | (346) |
| 11.1.2 | 差错概率                | (349) |
| 11.1.3 | 最佳滤波器的传输函数          | (353) |
| § 11.2 | 二进制幅移键控(BASK)       | (359) |
| 11.2.1 | 相干ASK               | (362) |
| 11.2.2 | 非相干ASK              | (364) |
| § 11.3 | 二进制相移键控(BPSK)       | (369) |

|             |                            |              |
|-------------|----------------------------|--------------|
| 11.3.1      | 相干PSK .....                | (369)        |
| 11.3.2      | 差分相移键控(DPSK) .....         | (371)        |
| § 11.4      | 二进制频移键控(BFSK) .....        | (376)        |
| 11.4.1      | 相干FSK .....                | (377)        |
| 11.4.2      | 非相干FSK .....               | (379)        |
| § 11.5      | 二进制数字调制系统性能比较 .....        | (383)        |
| § 11.6      | 正交多路信息传输系统 .....           | (386)        |
| 11.6.1      | 正交相移键控(QPSK) .....         | (388)        |
| 11.6.2      | 偏移正交相移键控(OQPSK) .....      | (390)        |
| 11.6.3      | 最小频移键控(MSK) .....          | (390)        |
| § 11.7      | 数字通信中的载波同步和位同步 .....       | (394)        |
| 11.7.1      | 载波同步 .....                 | (395)        |
| 11.7.2      | 位同步 .....                  | (396)        |
| 习题          | .....                      | (396)        |
| <b>第十二章</b> | <b>差错控制编码 .....</b>        | <b>(399)</b> |
| § 12.1      | 概述 .....                   | (399)        |
| 12.1.1      | 差错控制编码的主要特性 .....          | (401)        |
| 12.1.2      | 控制差错的方法 .....              | (401)        |
| 12.1.3      | 差错类型 .....                 | (403)        |
| 12.1.4      | 码型 .....                   | (404)        |
| § 12.2      | 线性分组码 .....                | (404)        |
| 12.2.1      | 矩阵描述 .....                 | (405)        |
| 12.2.2      | 检错和纠错能力 .....              | (410)        |
| 12.2.3      | 纠正单个差错的汉明码 .....           | (413)        |
| 12.2.4      | 利用标准阵列的查表译码 .....          | (416)        |
| § 12.3      | 二进制循环码 .....               | (420)        |
| 12.3.1      | 循环码的代数结构 .....             | (420)        |
| 12.3.2      | 利用 $(n-k)$ 比特移位寄存器编码 ..... | (426)        |
| 12.3.3      | 伴随式计算及检错和纠错 .....          | (429)        |

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| 12.3.4 特殊循环码 .....       | (432)        |
| § 12.4 突发差错纠正码 .....     | (434)        |
| § 12.5 纠正突发和随机差错的码 ..... | (438)        |
| § 12.6 卷积码 .....         | (440)        |
| 12.6.1 卷积码编码器 .....      | (440)        |
| 12.6.2 卷积码译码器 .....      | (442)        |
| 12.6.3 卷积码性能 .....       | (447)        |
| § 12.7 差错控制编码系统特性 .....  | (448)        |
| 12.7.1 纠错 .....          | (449)        |
| 12.7.2 检错 .....          | (452)        |
| 习题 .....                 | (458)        |
| <b>附录一 熵的计算用表 .....</b>  | <b>(463)</b> |
| <b>附录二 高斯概率 .....</b>    | <b>(467)</b> |
| <b>附录三 缩略词 .....</b>     | <b>(469)</b> |
| <b>参考资料 .....</b>        | <b>(471)</b> |

# 第一章 绪 论

## §1.1 信息的概念

我们所说的“信息”的概念是科学技术上的概念，它与日常生活中所谈的概念既有区别又有联系。

例如，在日常生活中，当我们收到一封电报，接到一个电话，听到电台或看到电视的一条新闻时，都认为得到了信息。可见这些电报里的文字、电话和广播中的语音，以及电视图象都包含有信息。对于这些生活中“信息”的概念往往和“情报”、“情况”、“知识”的概念分不清，当然也就更谈不上定量的测度了。

科学技术上“信息”的概念，就是要把这些实际生活中原始的、含糊不清的概念加以提炼、概括和深化。

我们把书信和电报中的文字、电话和广播中的语音、电视的图象都看成是“消息”的“集合”。这些消息集合具有一定的统计特性或概率特性。因而将“信息”定义为对消息的统计特性的一种定量描述。说得更具体些，人们看电报以前或在听到天气预报之前，对电报中的电文或天气预报的内容都有一种“不确定性”，信息就是对这种不确定性的一种定量描述。

看到电报或听过天气预报之后，消息由不确定变成确定。不确定性消除了，接收者就得到了信息。消除的不确定性越多，接收者得到的信息就越多。如果由于种种原因(例如噪声太大等)，听到电话后，对消息的不确定性依然存在，一点也没有消除，那么接收者就没有得到任何信息。

信息的不确定性是消息集合的一种概率特性，因此可以把信息定义为一个概率函数。

信息是消息的一种属性，是消息中不确定性的一种度量。因此，研究信息就必须研究消息的表现形式或即消息的传输过程。明确地说，就是研究信息传输和信息处理系统的一般规律。而研究信息的根本目的，就是为了提高信息传输和处理系统的可靠性和有效性。

## §1.2 信息传输系统模型

信息传输系统的模型就是将消息送至接收对象的模型。它使接收者最大程度地准确地了解从信源给出的消息。如图1-2-1所示。

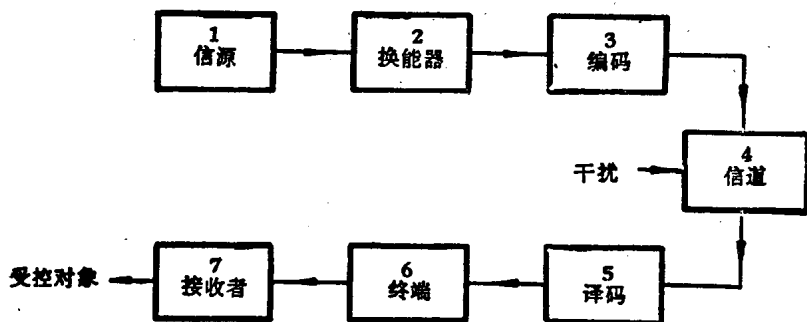


图 1-2-1 信息传输系统模型

图中方框1为“信源”，它代表多种具体类型的信源。例如，它既可以代表某个人的一些想法、某幅活动的图象、某个传感器的输出、以及某些声响，也可以代表某处的综合情况等等。

图中方框2为“换能器”，它可以是记者报导情况、摄像机摄取景象等。方框2一般会接受一些干扰，以及引入一些畸变。例