



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

通信原理学习指导

冯玉珉 郭宇春 张 星 编著



清华大学出版社



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

通信原理学习指导

冯玉珉 郭宇春 张 星 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书作为王秉钧主编的《通信原理》(清华大学出版社,2006)的配套教材,针对11章基本内容,逐章节引领认知思路,使读者明晰重要定义与概念,注重剖析主要技术的理论实质与物理机理。各章节有机穿插了与知识点相应的足量基本例题与典型应用例题,共180例。

本书适于高校通信、电子信息类专业学生、研究生作为辅助教材;也可供教师备课、工程技术人员和考研参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习指导/冯玉珉,郭宇春,张星编著. —北京:清华大学出版社,2008.9
(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-16182-0

I. 通… II. ①冯… ②郭… ③张… III. 通信理论—高等学校—教学参考资料
IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 148528 号

责任编辑:刘 彤

责任校对:梁 毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:22.5

版 次:2008年9月第1版

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

字 数:545千字

印 次:2008年9月第1次印刷

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:018089-01



编委会名单

顾问(按姓氏音节顺序):

李衍达	清华大学信息科学技术学院
邬贺铨	中国工程院
姚建铨	天津大学激光与光电子研究所

主任:

董在望	清华大学电子工程系
-----	-----------

编委会委员(按姓氏音节顺序):

鲍长春	北京工业大学电子信息与控制工程学院
陈 怡	东南大学高教所
戴瑜兴	湖南大学电气与信息工程学院
方达伟	中国计量学院信息工程学院
甘良才	武汉大学电子信息学院通信工程系
郭树旭	吉林大学电子科学与工程学院
胡学钢	合肥工业大学计算机与信息学院
金伟其	北京理工大学信息科技学院光电工程系
孔 力	华中科技大学控制系
刘振安	中国科学技术大学自动化系
陆大缙	清华大学电子工程系
马建国	西南科技大学信息与控制工程学院
彭启琮	电子科技大学通信与信息工程学院
仇佩亮	浙江大学信电系
沈伯弘	北京大学电子学系

- | | |
|--------|---------------------|
| 童家榕 | 复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院 |
| 汪一鸣(女) | 苏州大学电子信息学院 |
| 王福源 | 郑州大学信息工程学院 |
| 王华奎 | 太原理工大学信息与通信工程系 |
| 王 瑶(女) | 美国纽约 Polytechnic 大学 |
| 王毓银 | 北京联合大学 |
| 王子华 | 上海大学通信学院 |
| 吴建华 | 南昌大学电子信息工程学院 |
| 徐金平 | 东南大学无线电系 |
| 阎鸿森 | 西安交通大学电子与信息工程学院 |
| 袁占亭 | 甘肃工业大学 |
| 乐光新 | 北京邮电大学电信工程学院 |
| 翟建设 | 解放军理工大学气象学院 4 系 |
| 赵圣之 | 山东大学信息科学与工程学院 |
| 张邦宁 | 解放军理工大学通信工程学院无线通信系 |
| 张宏科 | 北京交通大学电子信息工程学院 |
| 张 泽 | 内蒙古大学自动化系 |
| 郑宝玉 | 南京邮电学院 |
| 郑继禹 | 桂林电子工业学院二系 |
| 周 杰 | 清华大学自动化系 |
| 朱茂镒 | 北京信息工程学院 |



序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步和市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向全国教学研究和教学主导型普通高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括如下:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易读易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用过程中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”编委会



前言

“通信原理”属于“迅速发展和应用性强”的通信电子类专业通用性基本原理课程。它是从基础课向多门专业课过渡的承上启下的纽带；而课程选材不断更新却是体现教学质量的要素之一。王秉钧教授主编的《通信原理》属于清华大学出版社推出的“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”，为了便于读者提高学习效率和青年教师参考，兹编订该书的配套学习指导。

本书的构成形式不同于一般习题集或解答模式，可归纳以下特点：

1. 注重阐明通信原理各章节主要知识点的思路、概念和分析方法与技巧，以揭示相关系统和模块的技术思路 and 性能实质。

2. 重视对各种编码与传输系统中信号变换的数学模型的分析过程，并阐明其物理机理，这种定性分析与定量分析的有机结合，更便于读者透彻理解课程内容。

3. 每章穿插了与重点节段内容紧密配合的例题，全书共 180 个，并分为三个层次：

- 典型例题每章 4~8 个(题号前标注⊙)；
- 数个与典型题相关的扩展性例题；
- 引发读者分析思路、联系实际应用的参考例题(标记*)。

典型例题有利于透彻理解重点内容，并具有举一反三的作用。

4. 各章后均附有多个随问随答式“填空”条目，覆盖全章基本要点，以引导读者全面掌握知识点。

另外各章只给出了适量或少量习题，一般为基本题目，不难不繁，与章节知识点相对应。

这些特点表明，本书不仅仅与主教材配套使用，而且各章节内容均具完整性，因此也可以作为独立教材或教师备课和出示考题参考，更有利于学生复习总结和备考参照。

在本书的书写过程中，本学科组卢燕飞副教授、张立军副教授，以及霍炎和付立两位博士生，提供了部分习题及答案。这里表示感谢。

限于作者水平有限，必存在考虑不周和疏漏之处，诚望业界专家、同仁和广大读者予以批评与指正。

作者

2007 年 3 月 于北京



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信与通信系统	1
1.1.1 信息、消息与信号	1
1.1.2 通信与通信系统	3
1.1.3 典型的现代数字通信系统	4
1.2 信道分类与特性	8
1.2.1 信道分类	8
1.2.2 几种常用信道基本特征	10
1.2.3 信道容量概念	12
1.3 通信频段划分和无线传播特点	14
1.3.1 通信频段划分和无线频谱规划	14
1.3.2 无线传播特点	16
1.4 通信系统的质量	17
1.5 填空简答	19
第 2 章 信号与噪声分析	21
2.1 确知信号时-频域特征	21
2.1.1 信号表示法	22
2.1.2 常用的傅氏变换对及其互易性	22
2.1.3 卷积与相关	23
2.1.4 能量谱与功率谱	25
2.2 随机变量统计特征	26
2.2.1 随机变量构成与特征	26
2.2.2 两种常用随机变量	29
2.2.3 随机变量间的统计关系	30
2.3 平稳随机过程统计特征	31
2.3.1 随机过程及其统计特征	31
2.3.2 平稳随机过程与广义平稳过程	33
2.3.3 遍历性平稳过程	35

36	2.3.4 平稳随机信号功率谱(密度)
37	2.4 随机过程通过线性系统的响应特征
39	2.5 高斯型随机过程和高斯白噪声
39	2.5.1 高斯随机过程和随机变量性质
39	2.5.2 高斯白噪声
43	2.6 窄带高斯噪声
43	2.6.1 窄带高斯噪声统计特征
43	2.6.2 窄带信道三种分布的关系
44	2.6.3 一个综合性典型例题
46	2.7 填空简答
48	2.8 习题
51	第3章 连续波调制系统
52	3.1 调制概念
52	3.1.1 调制的定义和功能
52	3.1.2 线性调制系统数学模型
53	3.1.3 线性调制系统信号分析
58	3.2 线性调制信号的解调与性能分析
58	3.2.1 AM信号的非相干解调
59	3.2.2 相干解调
60	3.2.3 性能比较与解调器信噪比得益
63	3.3 非线性调制
63	3.3.1 角度调制数学模型
64	3.3.2 单音调角
65	3.3.3 宽带调角信号的时-频域分析
68	3.4 WBFM非相干解调与特性分析
70	3.5 调频系统若干技术问题
70	3.5.1 门限效应
73	3.5.2 预/去加重改善解调信号高频性能
73	3.5.3 调频系统正常工作条件
76	3.5.4 复合调制——调幅/调频立体声广播系统
78	3.6 填空简答
80	3.7 习题
84	第4章 模拟信号的数字传输
84	4.1 数字化编码特点与优点
84	4.1.1 数字调制
85	4.1.2 PCM和数字信号优点

4.2	低通抽样	85
4.2.1	理想低通抽样定理要点	85
4.2.2	理想抽样特点	85
*4.2.3	平顶抽样	86
4.2.4	脉幅调制和时分复用	87
4.3	量化与性能分析	88
4.3.1	均匀量化与编码	88
4.3.2	编码方式	88
4.3.3	量化噪声与性能分析	89
4.4	非均匀量化	92
4.4.1	非均匀量化的必要性	92
4.4.2	语音信号非均匀量化策略	94
4.4.3	A 律 13 折线压扩特性	95
4.4.4	PCM 传输格式	96
4.5	线性预测编码	99
4.5.1	差分脉码调制	99
4.5.2	增量调制	101
4.6	填空简答	103
4.7	习题	104
第 5 章	数字信号的基带传输	107
5.1	数字基带信号码型、波形及其功率谱	107
5.1.1	选择码型的具体考虑因素	108
5.1.2	基带序列功率谱	108
5.2	奈奎斯特准则——消除码间干扰的理论与实践	110
5.2.1	符号间干扰 (ISI)	110
5.2.2	奈奎斯特第一准则	111
5.2.3	分析与实现第一准则	111
5.3	部分响应——奈奎斯特第二准则	115
5.3.1	部分响应概念	115
5.3.2	第 I 类部分响应的时-频域特性分析	115
5.3.3	第 IV 类部分响应	118
5.4	基带均衡	120
5.4.1	均衡概述	120
5.4.2	抽头-延迟线均衡	121
5.5	数字信号基带传输误码性能分析	123
5.5.1	数字基带信号传输与接收特点	123
5.5.2	误码性能分析方法	124
5.6	填空简答	128

5.7 习题	130
第6章 数字信号的频带传输	133
6.1 二元幅移键控	133
6.1.1 2ASK 信号分析	133
6.1.2 2ASK 信号解调与噪声性能	134
6.1.3 2ASK 信号信道传输	135
6.2 二元频移键控	136
6.2.1 2FSK 信号设计与分析	136
6.2.2 两种 FSK 模式	138
6.2.3 2FSK 信号相干性能分析	139
6.2.4 2FSK 非相干性能分析	140
6.3 二元相移键控系统分析	141
6.3.1 绝对相移键控(2PSK)特点	141
6.3.2 差分相移键控(DPSK)	142
6.4 三种二元数字调制的性能比较	145
6.5 多元数字调制系统	147
6.5.1 多元调制概念与要素	147
6.5.2 多元数字调幅(MASK)	148
6.5.3 多元数字调频(MFSK)	149
6.5.4 多元数字调相(MPSK)	150
6.6 填空简答	157
6.7 习题	158
第7章 常用的现代调制技术	159
7.1 正交调幅	159
7.1.1 正交调幅信号设计特征	159
7.1.2 QAM 信号空间——星座图特点	161
7.1.3 MQAM 与 MPSK 的性能比较	163
7.1.4 MQAM 相干性能	164
* 7.2 改进型 QPSK 或 OQAM	165
7.2.1 OQPSK——交错(或偏移)QPSK	165
7.2.2 IJF-OQPSK——无符号间干扰和抖动 OQPSK	165
7.2.3 $\frac{\pi}{4}$ 偏移 QPSK	165
7.3 最小频移键控	167
7.3.1 MSK 信号设计的特色	167
7.3.2 MSK 信号涉及的参量和指标	168

7.3.3	MSK 信号的相干接收和性能评价	169
7.3.4	改进型 MSK	171
7.4	正交频分复用	173
7.4.1	多载波和正交频分复用概念	173
7.4.2	OFDM 信号表示与变换处理	174
7.4.3	OFDM 系统模型	176
7.4.4	OFDM 传输系统性能评价	177
7.5	扩频调制	179
7.5.1	扩频特点和机理	179
7.5.2	PN 码与 m 序列	181
7.5.3	直接序列扩频(DS-SS)	183
7.5.4	射频 DS-SS 系统性能分析	185
7.5.5	跳频扩频	187
7.6	填空简答	190
7.7	习题	192
第 8 章	数字信号的最佳接收	194
8.1	最佳接收准则	194
8.2	匹配滤波器最佳接收	195
8.2.1	设计目标与构思	195
8.2.2	匹配滤波器性质综述	196
8.2.3	匹配滤波器如何接收随机相位信号	200
8.2.4	利用正交支路的匹配接收模式	202
8.3	相关接收	203
8.3.1	相关接收的基本模式	203
*8.3.2	利用相关器的正交接收机	204
8.3.3	数字编码和正交码的相关接收	205
*8.4	理想接收机模型	208
8.4.1	理想接收构思	208
8.4.2	似然函数统计特征与物理意义	209
8.4.3	理想接收与相关接收的等效性	210
8.5	最佳接收误码率分析	211
8.5.1	三种最佳接收机的等效性能	211
8.5.2	最佳接收误码率统计分析	213
*8.5.3	关于相干解调与最佳接收的比较	215
8.6	基带数字信号最佳接收误码性能	216
8.6.1	二元数字基带信号误码性能	216
*8.6.2	多电平基带信号最佳接收性能	217
8.7	填空简答	219

8.8 习题	220
第9章 多用户通信	224
9.1 多用户通信概述	224
9.1.1 多用户通信概念及其分类	224
9.1.2 复用与多址的特点	225
9.2 多址技术	226
9.2.1 频分多址(FDMA)	226
9.2.2 时分多址(TDMA)	228
9.2.3 码分多址(CDMA)	232
9.2.4 随机接入多址方式	234
9.2.5 其他多址技术	235
9.3 无线接入信道中的衰落与多径传播	236
9.3.1 视距传播和自由空间损耗	236
9.3.2 多径传播和多径衰落	238
9.3.3 多径衰落信道相干时间和相干带宽	239
9.3.4 多径衰落信道的分集技术	242
9.3.5 Rake 接收机	242
9.4 无线移动通信中的多址技术	243
9.4.1 蜂窝无线网原理	243
9.4.2 GSM 系统中的多址技术	246
9.4.3 蜂窝无线系统中的 CDMA	249
9.4.4 跳频多址(FHMA)系统信号分析	252
9.5 填空简答	255
9.6 习题	256
第10章 信息论基础	258
10.1 信息的度量	258
10.1.1 信息的含义与特征	258
10.1.2 离散事件的自信息	259
10.1.3 离散信源熵	259
10.1.4 平均互信息	262
10.1.5 离散无记忆信源的扩展	263
10.1.6 连续信源信息的度量	264
10.2 无失真信源编码	267
10.2.1 信源编码的概念	267
10.2.2 分组码特征	267
10.2.3 变长码	268

10.2.4	二元 Huffman 编码	270
* 10.2.5	L-Z 编码	272
10.3	信道容量和有噪信道编码	273
10.3.1	离散信道	273
10.3.2	离散无记忆信道容量	275
10.3.3	有噪信道编码	277
10.3.4	AWGN 信道容量	277
10.4	限失真信源编码	280
10.4.1	信息率失真概述	280
10.4.2	信息率失真函数	281
10.5	填空简答	282
10.6	习题	284
第 11 章	信道编码	286
11.1	差错控制概述	286
11.1.1	信道传输差错	286
11.1.2	信道编码定理	289
11.1.3	差错控制能力	289
11.2	线性分组码	290
11.2.1	几种简单的线性分组码	290
11.2.2	(n, k) 线性分组码的构成特点	291
11.2.3	解码伴随式与纠错	297
11.2.4	汉明码与完备码	298
11.3	(n, k) 循环码	303
11.3.1	循环码特点	303
11.3.2	关于 (n, k) 循环码的存在前提条件	305
11.3.3	循环码编码方法	306
* 11.3.4	循环码编码电路	308
11.3.5	循环码对偶码和缩短码	308
11.3.6	解码伴随式纠错	309
11.3.7	生成多项式矩阵	310
11.4	几种常用的 (n, k) 循环码	311
11.5	卷积码	312
11.5.1	卷积码特征	312
11.5.2	卷积码数学描述	313
11.5.3	卷积码图示法	314
11.5.4	卷积码的最大似然解码	317
11.5.5	卷积码自由距离和编码增益	319
11.6	复合编码	320

11.6.1 级联码(链接码).....	320
11.6.2 交织码.....	321
11.7 网格编码调制.....	324
11.7.1 组合编码调制的目标.....	324
11.7.2 TCM 实施步骤	324
11.7.3 抗干扰能力评价.....	326
11.8 填空简答.....	328
11.9 习题.....	330
附录 A 常用三角函数公式	333
附录 B 误差函数表	334
附录 C Q 函数表	336
部分习题答案	338
参考文献	344



第1章

绪 论

本章作为全书的开始部分,首先介绍有关通信知识和通信系统基本概念,并涉及一些常用的通信、信息技术方面的名词、术语,并着重介绍本书的基本构成内容和特点。

知识点

- 信息与通信的基本概念;
- 通信系统的构成、分类和通信方式;
- 信息的量度;
- 信道及其特征;
- 通信系统的质量指标。

要求

- 本章作为初学通信原理课程的通信知识性材料,要求能够进行通读,并理解有关名词、术语的概念;其中多数例题基本上属于常识性的。
- 通过本章阅读,希望能引起读者学习“通信原理”课程和本书的兴趣。同时当学完本书后,再来进一步理解本章所涉及的内容。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 信息、消息与信号

1. 信息

- 广义概念(定义)——“信息是事物运动的状态和运动方式”。世界或宇宙存在形形色色的、极大量的事物,各种事物均在不

断运动,而运动有其规则或客观规律。人类观察与认识各种事物,就是掌握其特点、特殊性,就可获得信息。

- 狭义概念——信息是对观察者来说取得的新知识,它是不可预测的,随机发生的,对当事人来说是他们感兴趣的、重要事物或事件的含义。
- 信息的层次——分三个层次,即语法、语义、语用信息。语法信息是事物本来表现形式,是其逻辑(结构)形态。如一幢房子、一张桌子,对任何人都可得到同样的直观信息;语义信息,如一段古文,只有具有相当文学知识(先验知识)的人,才能懂得其含义;语用信息是最高层次,只有具有某方面真知和能力及经验的人,才能利用信息去实施某种有益的事情。

2. 信息的度量

第10章“信息论基础”将详细介绍信息及其度量,这里先简单了解一些基本知识。

(1) 自信息——从数学模式来表明信息的含量,是以某事件或信源符号出现的概率作为要素,并将此概率 $P(A)$ 的对数作为事件 A 的自信息(量)定义,即

$$I(A) = -\log P(A) \quad (1.1-1)$$

其中“对数 $\log$ ”可以选用的“底”为 2、10、e 等,则自信息单位分别为“bit”(比特)、“Hat”(哈特)和“net”(奈特)等。按式(1.1-1)定义,不可能发生的事件($P=0$)和已经发生的事件($P=1$),都认为没有信息含量。

(2) 平均信息量——若 n 个事件或源符号序列 $\{x_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 概率分别为 $P(x_i)$, 自信息则各为 $-\log P(x_i)$, 它们的“平均信息量”应是各自信息的概率加权和,并称为熵,表示为

$$H(X) = \sum_{i=1}^n P(x_i) \log \frac{1}{P(x_i)} \quad (1.1-2)$$

- 二元数据序列的熵——一个二元序列,若 1,0 码概率相等,即 $P_1 = P_0 = \frac{1}{2}$, 因此该序列的熵为

$$H(X) = \frac{1}{2} \lg \frac{1}{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \lg \frac{1}{\frac{1}{2}} = 1 \text{ bit/二元符号} \quad (1.1-3)$$

因此,通常将计算机代码、PCM 序列等的 1 位二元符号说成“1bit”。

[例 1-1] 告警系统具有两个独立的离散信源,每隔 1 秒同步地向接收端发出两个码字,码字长度分别为 8bit 和 4bit,当接收端收到的 8bit 码字中若为 00001111 或 11110000,而 4bit 码字若为全 0,即 0000,此时显示黄色灯(预警);若 8bit 码字与 4bit 码字均收到为全 0,即 00000000 和 0000,则显示红灯(告警)。

(1) 预警发生概率和其自信息是多少比特?

(2) 告警出现的概率和其信息量是多少比特?

解 码长 $n=8\text{bit}$ 的码字集合共有 $2^8=256$ 个不同码字,4bit 码字集合共 16 个不同码字。

(1) 特定任一个 8bit 码字的发生概率为 $P_1 = \frac{1}{256}$, 而 00001111 或 11110000 之一发