通信原理课程建设教材系列

通信原理考研指导

TONGXIN YUANLI KAOYAN ZHIDAO

（第2版）

郝建军　尹长川　刘丹谱　等编

北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内容简介

本书在第一版的基础上，充分考虑了读者的反馈意见和近几年通信技术发展的实际情况，对原书进行了修改和完善，但仍保持了原书的结构：第一部分涵盖了"通信原理"课程研究生入学考试的所有内容。每章由本章要点、习题解答两部分组成。本书要点总结性地给出复习要点；习题解答对主要参考书的课后习题作了详尽的解答。第二部分则对近几年北京邮电大学研究生入学考试"通信原理"课程试题作了详尽的解答。本次修订重点对每章的要点部分进行了修订，力求概念更加准确，内容更加详尽。

本书既可作为报考硕士研究生的复习辅导书，也可作为相关专业课程学习或复习的指导书，还可作为有关教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理考研指导/郝建军等编．—2版—北京：北京邮电大学出版社，2006

ISBN 7-5635-1248-9

Ⅰ．通…　Ⅱ．郝…　Ⅲ．通信理论—研究生—入学考试—自学参考资料　Ⅳ．TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 048516 号

书　　名：通信原理考研指导(第2版)

编　　者：郝建军　尹长川　刘丹谱　李祥明　罗　涛

责任编辑：郑　捷

出版发行：北京邮电大学出版社

社　　址：北京市海淀区西土城路10号(100876)

北方营销中心：电话：010-62282185　传真：010-62283578

南方营销中心：电话：010-62282902　传真：010-62282735

E-mail：publish@bupt.edu.cn

经　　销：各地新华书店

印　　刷：北京源海印刷有限责任公司

开　　本：787 mm×960 mm　1/16

印　　张：17.75

字　　数：385千字

印　　数：1—5 000册

版　　次：2006年6月第2版　2006年6月第1次印刷

ISBN 7-5635-1248-9/TN·453　　定　价：28.00元

前　言

"通信原理"课程是通信与信息系统专业研究生入学考试课程之一，对考生在通信与信息系统领域的基础知识和独立工作能力有较高的要求。此书旨在帮助考生能在较短的时间内掌握本课程的主要内容，熟悉多种题型，掌握解题技巧。

本书以樊昌信教授等主编的《通信原理》(第 4 版)为主要参考书，同时参考了其他教材。全书共分两大部分，第一部分主要为习题解答，共分为 11 章：绪论，确定信号和随机信号分析，信道，模拟调制系统，数字基带传输系统，数字调制系统，模拟信号的数字传输，数字信号的最佳接收，差错控制编码，正交编码和伪随机序列，同步原理。每章由本章要点与习题解答组成，包括了研究生入学考试要求的绝大部分内容。第二部分主要选编了北京邮电大学"通信原理"课程近 5 年的研究生入学考试试题及其详细解答。

本书由北京邮电大学郝建军、尹长川、刘丹谱、李祥明、罗涛合作编写，郝建军负责全书的统稿。在本书编写过程中得到乐光新教授的悉心指导，在此表示衷心感谢。同时对本书选用的参考文献的著作者，我们表示真诚的感谢。

编者都是在一线长期从事"通信原理"课程教学的教师，在编写时力求文字通俗易懂，基本概念清晰明了，内容重点突出。但由于编者水平有限，编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者斧正。

编　者

2001 年 6 月

目　　录

第一部分　内容概要及习题解答

第 1 章　绪　论 …… 3

1.1　本章要点 …… 3

1.2　习题解答 …… 6

第 2 章　确定信号和随机信号分析 …… 9

2.1　本章要点 …… 9

2.2　习题解答 …… 17

第 3 章　信　道 …… 29

3.1　本章要点 …… 29

3.2　习题解答 …… 35

第 4 章　模拟调制系统 …… 42

4.1　本章要点 …… 42

4.2　习题解答 …… 51

第 5 章　数字基带传输系统 …… 68

5.1　本章要点 …… 68

5.2　习题解答 …… 75

第 6 章　数字调制系统 …… 97

6.1　本章要点 …… 97

6.2　习题解答 …… 105

第 7 章　模拟信号的数字传输 …… 121

7.1　本章要点 …… 121

7.2　习题解答 …… 132

第 8 章　数字信号的最佳接收 …… 144
8.1　本章要点 …… 144
8.2　习题解答 …… 149
第 9 章　差错控制编码 …… 163
9.1　本章要点 …… 163
9.2　习题解答 …… 170
第 10 章　正交编码与伪随机序列 …… 189
10.1　本章要点 …… 189
10.2　习题解答 …… 192
第 11 章　同步原理 …… 197
11.1　本章要点 …… 197
11.2　习题解答 …… 202

第二部分　北京邮电大学部分年度考研试题及详细解答

A　北京邮电大学 1997 年硕士研究生入学试题 …… 213
B　北京邮电大学 1998 年硕士研究生入学试题 …… 222
C　北京邮电大学 1999 年硕士研究生入学试题 …… 230
D　北京邮电大学 2000 年硕士研究生入学试题 …… 239
E　北京邮电大学 2001 年硕士研究生入学试题 …… 250
F　北京邮电大学 2005 年硕士研究生入学试题 …… 259
G　北京邮电大学 2006 年硕士研究生入学试题 …… 269
参考文献 …… 278

第一部分

内容概要
及习题解答

第 1 章　绪　论

1.1　本章要点

本章主要内容包括通信的基本概念、通信的模型、通信系统的分类及通信方式、信息的定义及其度量方法，以及通信系统的主要性能指标。

1. 通信的含义

通信按照传统的理解就是信息的传输与交换。

2. 通信系统组成

(1) 通信系统的一般模型

对于点对点的通信，其一般模型如图 1-1 所示。

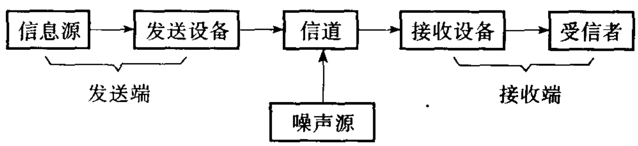


图 1-1　通信系统模型

(2) 模拟通信与数字通信系统模型

通信传输的消息可以分为两类：离散消息和连续消息。

离散消息——消息的状态是可数的和有限的；

连续消息——消息的状态连续变化。

消息被载荷在电信号的某一参量上，通过信道进行传送。对应于离散消息，电信号的该参量将取离散值，这样的信号称为数字信号；对应于连续消息，电信号的该参量连续取值，这样的信号称为模拟信号。根据信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

模拟通信系统的模型如图 1-2 所示。

数字通信系统的模型如图 1-3 所示。图中(a)和(b)分别对应于频带和基带数字通信

系统的一般模型。

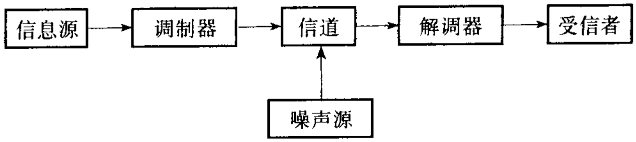


图 1-2　模拟通信系统模型

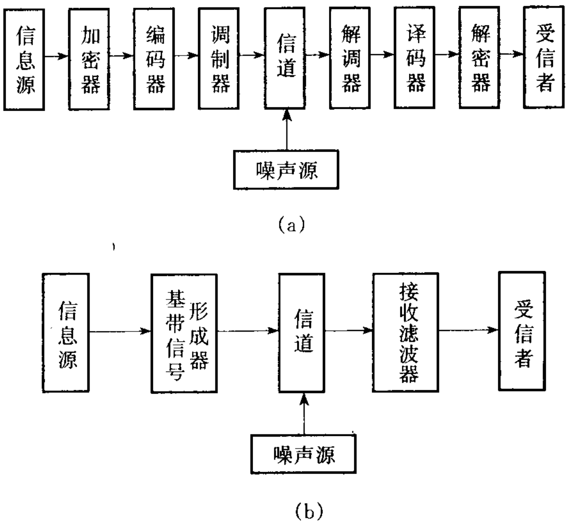


图 1-3　数字通信系统模型

数字通信相对于模拟通信的优势：

- 抗干扰能力强，数字信号可以再生而消除噪声积累；
- 传输差错可控，改善了传输质量；
- 易于使用现代数字信号处理技术对数字信号进行处理；
- 易于加密，可靠性高；
- 易于实现各种信息的综合传输。

与模拟通信相比，数字通信的缺点是：系统设备复杂，对同步要求高，比模拟通信占据更宽的系统频带等。

3. 通信系统的分类及通信方式

通信系统的分类方法有很多，从通信系统模型的角度可给出 5 种分类方法，分别为按消息的物理特征、按调制方式、按信号特征、按传输媒介、按信号复用方式进行分类。

实际的通信系统分为专线和通信网两类。“通信原理”课程重点讲述点与点之间的通信。点与点的通信是专线通信，多点间的通信是网通信。网通信的基础是点与点的通信。

对于点与点之间的通信，按消息传送的方向与时间关系，可分为单工、半双工及全双工3种通信方式；按照数字信号码元排列方法的不同，分为串序和并序两种通信方式。

4. 信息及其度量

消息中所含的信息量与该消息出现的概率 $p(x)$ 之间的关系定义为

$$I=\log_a \frac{1}{p(x)}=-\log_a p(x) \tag{1-1}$$

通常取对数底 $a=2$，则信息量 I 的单位为比特(bit)。

对于符号集是由 n 个符号 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 组成的离散信息源，若每个符号出现的概率分别为 $p(x_1), p(x_2), \cdots, p(x_n)$，且有 $\sum_{i=1}^{n} p(x_i)=1$，则平均每个符号所含的信息量为

$$H(x)=\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_2 \frac{1}{p(x_i)} \text{ 比特/符号} \tag{1-2}$$

$H(x)$ 又称为信息源的熵。当信息源的每个符号等概出现时，信息源具有最大熵，此时，$P(x_i)=1/n, i=1,2,\cdots,n$。

$$H(x)=\log_2 n \text{ 比特/符号} \tag{1-3}$$

5. 主要性能指标

从研究消息的传输角度来说，设计或评述通信系统的主要性能指标是传输信息的有效性和可靠性。有效性主要是指消息传输的“速度”，也即系统传输消息的效率/通信资源(频率、时间等)的充分利用程度，而可靠性主要是指消息传输的“质量”。这两个指标是相互矛盾的，通常依据实际系统要求取得相对的统一。

对于模拟通信系统来说，其有效性可用消息占用的有效带宽来度量，可靠性用接收端输出的信噪比来度量。

衡量数字通信系统有效性的主要性能指标是传输速率(可用码元速率或信息速率来表征)或频带利用率。可靠性的主要指标是差错率(可用误码率或误信率来表征)。

(1) 传输速率

传输速率可用码元传输速率(又称码速率或传码率)或信息传输速率(又称信息速率或传信率)来衡量。

码元速率 R_B 定义为单位时间(每秒)内传输码元的数目，单位为“波特”，常用“Baud”表示。由于码元速率并未限定码元的进制，而同一系统的各点上可能采用不同的进制，故给出码元速率时须说明码元的进制和该速率在系统中的位置。设二进制码元速率为 R_{B2}，N 进制码元速率为 R_{BN}，且有 $N=2^k$，k 为正整数，二进制与 N 进制的码元速率有

如下转换关系式

$$R_{B_2} = R_{B_N}\log_2 N \tag{1-4}$$

信息传输速率又称为信息速率或传信率,它定义为每秒钟传递的信息量,单位是比特/秒,或记为 bit/s(或者 bps)。在二进制下,码元速率与信息速率在数值上相等,只是单位不同;在 N 进制下,设信息速率为 R_b(bps),码元速率为 R_{B_N}(Baud),则有

$$R_b = R_{B_N}\log_2 N \quad \text{bps} \tag{1-5}$$

或

$$R_{B_N} = \frac{R_b}{\log_2 N} \ \text{Baud}$$

(2) 频带利用率

传输速率与系统带宽之比,单位为 bps/Hz 或 Baud/Hz。

(3) 差错率

差错率可用误码率或误信率两种方法来表述。误码率 p_e 定义为

$$p_e = \lim_{n\to\infty}\frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传送总码元数 } n} \tag{1-6}$$

误信率(又称误比特率)p_b 定义为

$$p_b = \lim_{n\to\infty}\frac{\text{错误接收的信息比特数量}}{\text{传送信息比特数总量 } n} \tag{1-7}$$

1.2　习题解答

1-1　设英文字母 E 出现的概率为 0.105, x 出现的概率为0.002。试求 E 及 x 的信息量。

解　英文字母 E 出现的概率为 $p(E)=0.105$,其信息量为

$$I_E = \log_2\frac{1}{p(E)} = \log_2\frac{1}{0.105} = 3.25 \text{ bit}$$

字母 x 出现的概率为 $p(x)=0.002$,其信息量为

$$I_x = \log_2\frac{1}{p(x)} = \log_2\frac{1}{0.002} = 8.97 \text{ bit}$$

1-2　某信息源的符号集由 A,B,C,D 和 E 组成,设每一符号独立出现,其出现概率分别为 1/4,1/8,1/8,3/16 和 5/16。试求该信息源符号的平均信息量。

解　该信息源符号的平均信息量为

$$\begin{aligned}H(x) &= -\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\log_2 p(x_i)\\ &= -\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - 2\times\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8} - \frac{3}{16}\log_2\frac{3}{16} - \frac{5}{16}\log_2\frac{5}{16}\\ &= 2.23 \text{ 比特/符号}\end{aligned}$$

1-3 设有 4 个消息 A,B,C,D 分别以概率 1/4,1/8,1/8 和1/2传送,每一消息的出现是相互独立的。试计算其平均信息量。

解 每个消息的平均信息量为

$$H(x)=-\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4}-2\times\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8}-\frac{1}{2}\log_2\frac{1}{2}$$
$$=1.75\ \text{比特/符号}$$

1-4 一个由字母 A,B,C,D 组成的字,对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码,00 代替 A,01 代替 B,10 代替 C,11 代替 D,每个脉冲宽度为 5 ms。

(1) 不同的字母是等可能出现时,试计算传输的平均信息速率;

(2) 若每个字母出现的可能性分别为

$$P_A=\frac{1}{5},P_B=\frac{1}{4},P_C=\frac{1}{4},P_D=\frac{3}{10}$$

试计算传输的平均信息速率。

解

(1) 每个字母的持续时间为 2×5 ms,所以字母传输速率为

$$R_{B4}=\frac{1}{2\times5\times10^{-3}}=100\ \text{Baud}$$

不同的字母等可能出现时,每个字母的平均信息量为

$$H(x)=\log_2 4=2\ \text{比特/符号}$$

平均信息速率为

$$R_b=R_{B_4}\cdot H(x)=200\ \text{bps}$$

(2) 每个字母的平均信息量为

$$H(x)=-\frac{1}{5}\log_2\frac{1}{5}-\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4}-\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4}-\frac{3}{10}\log_2\frac{3}{10}$$
$$=1.985\ \text{比特/符号}$$

所以,平均信息速率为

$$R_b=R_{B4}\cdot H(x)=198.5\ \text{bps}$$

1-5 国际莫尔斯电码用点和划的序列发送英文字母,划用持续 3 单位的电流脉冲表示,点用持续 1 个单位的电流脉冲表示;且划出现的概率是点出现概率的 1/3。

(1) 计算点和划的信息量;

(2) 计算点和划的平均信息量。

解

(1) 设点和划出现的概率分别为 $p_{点}$ 和 $p_{划}$,由已知条件知 $p_{划}=\frac{1}{3}p_{点}$,且 $p_{划}+p_{点}=1$,所以 $p_{划}=\frac{1}{4}$,$p_{点}=\frac{3}{4}$。故点的信息量为

$$I_{点}=\log_2\frac{1}{p_{点}}=\log_2\frac{4}{3}=0.415\ \text{bit}$$

划的信息量为

$$I_{划} = \log_2 \frac{1}{p_{划}} = \log_2 4 = 2\ \text{bit}$$

(2) 点和划的平均信息量为

$$H(x) = \frac{3}{4} I_{点} + \frac{1}{4} I_{划} = 0.81\ 比特/符号$$

1-6 设一信息源的输出由 128 个不同符号组成。其中 16 个出现的概率为 1/32,其余 112 个出现概率为 1/224。信息源每秒发出 1 000 个符号,且每个符号彼此独立。试计算该信息源的平均信息速率。

解 每个符号的平均信息量为

$$H(x) = 16 \times \frac{1}{32}\log_2 32 + 112 \times \frac{1}{224}\log_2 224 = 6.404\ 比特/符号$$

已知码元速率 $R_B = 1\ 000$ Baud,故该信息源的平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H(x) = 6\ 404\ \text{bps}$$

1-7 设某一数字传输系统传送二进制码元的速率为1 200 Baud,试求该系统的信息速率;若该系统改成传送十六进制信号码元,码元速率为 2 400 Baud,则这时的系统信息速率为多少?

解 若系统传送二进制码元的速率为 1 200 Baud,则系统的信息速率为

$$R_b = 1\ 200 \times \log_2 2 = 1\ 200\ \text{bps}$$

若系统传送十六进制码元的速率为 2 400 Baud,则系统的信息速率为

$$R_b = 2\ 400 \times \log_2 16 = 9\ 600\ \text{bps}$$

1-8 若题 1-2 中信息源以 1 000 Baud 速率传送信息,则传送1 小时的信息量为多少?传送 1 小时可能达到的最大信息量为多少?

解 题 1-2 中信息源符号的平均信息量为

$$H(x) = 2.23\ 比特/符号$$

则平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H(x) = 1\ 000 \times 2.23 = 2.23 \times 10^3\ \text{bps}$$

所以传送 1 小时的信息量为

$$I = R_b \cdot T = 2.23 \times 10^3 \times 3\ 600 = 8.028 \times 10^6\ \text{bit}$$

当信息源的每个符号等概出现时,信息源的熵最大,此时

$$H(x) = \log_2 5 = 2.322\ 比特/符号$$

传送 1 小时可能达到的最大信息量为

$$\begin{aligned} I &= R_B \cdot H(x) \cdot T \\ &= 1\ 000 \times 2.322 \times 3\ 600 \\ &= 8.359 \times 10^6\ \text{bit} \end{aligned}$$

第 2 章　确定信号和随机信号分析

2.1　本章要点

1. 傅氏变换

(1) 表达式：$f(t)\Leftrightarrow F(\omega)$

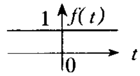
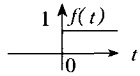
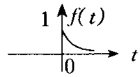
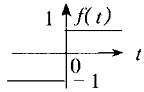
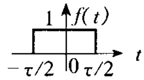
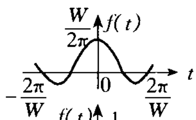
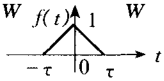
$$\begin{cases} f(t) = \dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{j\omega t}d\omega \\ F(\omega) = \displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t}dt \end{cases}$$

(2) 运算特性

	$f(t)$	$F(\omega)$
放大	$k_D f(t)$	$k_D F(\omega)$
叠加	$a_1 f_1(t)+a_2 f_2(t)$	$a_1 F_1(\omega)+a_2 F_2(\omega)$
复共轭	$f^*(t)$	$F^*(-\omega)$
标度换算	$f(at)$	$\dfrac{1}{\lvert a\rvert}F(\dfrac{\omega}{a})$
时移	$f(t-t_0)$	$e^{-j\omega t_0}F(\omega)$
频移	$e^{j\omega_0 t}f(t)$	$F(\omega-\omega_0)$
调制	$f(t)\cos\omega_0 t$	$\dfrac{1}{2}F(\omega+\omega_0)+\dfrac{1}{2}F(\omega-\omega_0)$
卷积	$f_1(t) * f_2(t)$	$F_1(\omega)\cdot F_2(\omega)$
	$f_1(t)\cdot f_2(t)$	$\dfrac{1}{2\pi}[F_1(\omega) * F_2(\omega)]$
对偶	$F(t)$	$2\pi f(-\omega)$
微分	$\dfrac{d^n}{dt^n}f(t)$	$(j\omega)^n F(\omega)$
积分	$\displaystyle\int_{-\infty}^{t} f(z)dz$	$\dfrac{1}{j\omega}F(\omega)+\pi F(0)\delta(\omega)$

(3) 常用信号的傅氏变换(见表 2-1)

表 2-1 常用信号的傅氏变换

$f(t)$	$f(t)$波形	$F(\omega)$
1		$2\pi\delta(\omega)$
$u(t)$		$\pi\delta(\omega)+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega}$
$\mathrm{e}^{-at}u(t)$		$\dfrac{1}{a+\mathrm{j}\omega}$
$\mathrm{sgn}(t)$		$\dfrac{2}{\mathrm{j}\omega}$
$\mathrm{rect}(\frac{t}{\tau})$		$\tau\mathrm{Sa}\left(\dfrac{\omega\tau}{2}\right)$
$\dfrac{W}{2\pi}\mathrm{Sa}\left(\dfrac{Wt}{2}\right)$		$\mathrm{rect}\left(\dfrac{\omega}{W}\right)$
$\mathrm{tri}\left(\dfrac{t}{\tau}\right)$		$\tau\mathrm{Sa}^2\left(\dfrac{\omega\tau}{2}\right)$
$\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} C_n\mathrm{e}^{\mathrm{j}n\omega_0 t}$	任意周期信号波形	$2\pi\sum\limits_{n=-\infty}^{\infty} C_n\delta(\omega-n\omega_0)$

2. 确定信号的表示

(1) 能量信号:能量 E 为有限值的信号 $f(t)\Leftrightarrow F(\omega)$

① $E=\int_{-\infty}^{\infty}|f(t)|^2\mathrm{d}t=\dfrac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|F(\omega)|^2\mathrm{d}\omega$

$$\triangleq\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}E(\omega)\mathrm{d}\omega=\int_{-\infty}^{\infty}E(f)\mathrm{d}f$$

② $E(\omega)\triangleq|F(\omega)|^2$——能量谱密度(J/Hz)。

③ $R(\tau)\Leftrightarrow E(\omega)$

$$R(\tau)=\int_{-\infty}^{\infty}f^*(t)f(t+\tau)\mathrm{d}t$$

$$E=R(0)$$

(2) 功率信号:平均功率有限的信号(见图 2-1)

① $S = \lim\limits_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} |f_T(t)|^2 \mathrm{d}t = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \lim\limits_{T\to\infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{T} \mathrm{d}\omega$

$\triangleq \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P_s(\omega)\mathrm{d}\omega = \int_{-\infty}^{\infty} P_s(f)\mathrm{d}f$

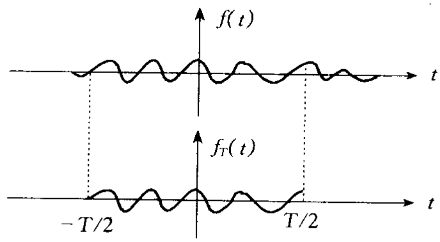


图 2-1　功率信号 $f(t)$及其截短函数

注:

$f_T(t)$——$f(t)$的截短函数(截短长度为 T)

$f_T(t) \Leftrightarrow F_T(\omega)$

② 功率谱密度

$$P_s(\omega) = \lim_{T\to\infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{T} \quad \text{W/Hz}$$

③

$$R(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f_T^*(t) f_T(t+\tau)\mathrm{d}t$$

$$R(\tau) \Leftrightarrow P_s(\omega)$$

$$S = R(0)$$

(3) 周期信号 $f(t)$

$f(t)$的指数形式傅里叶级数

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \mathrm{e}^{\mathrm{j}n\omega_0 t}$$

$$F_n = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}n\omega_0 t}\mathrm{d}t$$

周期信号 $f(t)$ 的傅里叶变换

$$\mathscr{F}[f(t)] = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \delta(\omega - n\omega_0)$$

其中

$$F_n = \frac{1}{T}F_T(\omega)\Big|_{\omega = n\omega_0}$$

$$F_T(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t$$

3. 随机过程：全部可能实现构成的总体

(1) 随机信号和噪声：依赖于时间参数 t 的随机过程。

(2) 统计特性

设 $\xi(t)$是一个随机过程，任意时刻 t_1 上 $\xi(t_1)$是一个随机变量，定义：

① 概率分布

a. 分布函数 $$F_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n) = P\{\xi(t_1)\leqslant x_1,\cdots,\xi(t_n)\leqslant x_n\}$$

b. 概率密度函数

$$f_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n)=\frac{\partial^n F_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n)}{\partial x_1\partial x_2\cdots\partial x_n}$$

② 数字特征

a. 数学期望： $$E[\xi(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_1(x,t)\mathrm{d}x = a(t)$$

b. 方差： $$D[\xi(t)]=E[\xi(t)-a(t)]^2 = E[\xi^2(t)]-a^2(t)\triangleq\sigma^2(t)$$

c. 自相关和自协方差函数

$$R(t,t+\tau)=E[\xi(t)\xi(t+\tau)]$$

$$B(t,t+\tau)=E\{[\xi(t)-a(t)][\xi(t+\tau)-a(t+\tau)]\} = R(t,t+\tau)-a(t)\cdot a(t+\tau)$$

d. 互相关和互协方差函数：设 $\xi(t)$和 $\eta(t)$分别表示两个随机过程，则

$$R_{\xi\eta}(t,t+\tau)=E[\xi(t)\cdot\eta(t+\tau)]$$

$$B_{\xi\eta}(t,t+\tau)=E\{[\xi(t)-a_\xi(t)][\eta(t+\tau)-a_\eta(t+\tau)]\}$$

4. 平稳随机过程

(1) 狭义平稳：$\forall\, n$ 和τ，$f_n(x_1,\cdots,x_n;t_1,\cdots,t_n) = f_n(x_1,\cdots,x_n;t_1+\tau,\cdots,t_n+\tau)$

① 一维分布与 t 无关：$f_1(x,t)=f_1(x)$

② 二维分布只与 τ 有关：$f_2(x_1,x_2;t_1,t_2)=f_2(x_1,x_2;t_1-t_2)$

(2) 广义平稳：

① $E[\xi(t)]=a$，$D[\xi(t)]=\sigma^2$

② $R(t,t+\tau)=R(\tau)$