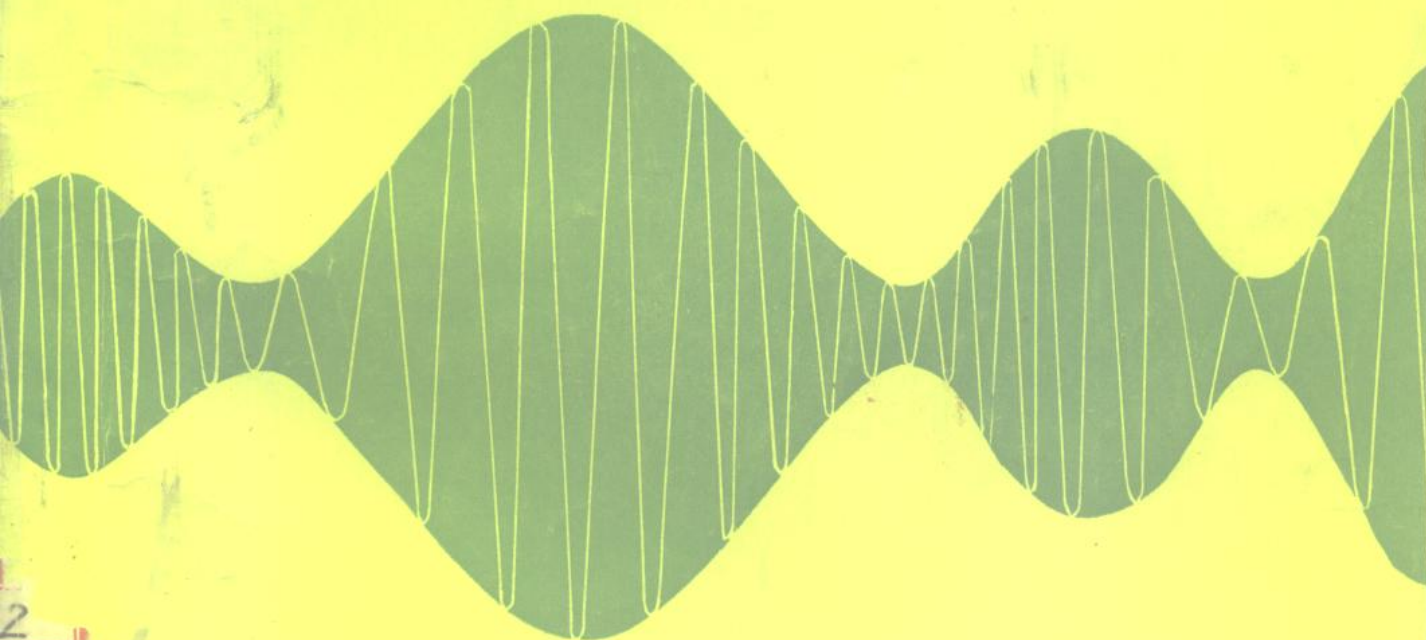


信号分析与遥测技术

赵松年 于允贤 编著



地震出版社

73.412
775

信号分析与遥测技术

赵松年 于允贤 编著

地震出版社

1983

内 容 简 介

本书从工程应用的角度比较全面地介绍了与遥测系统有关的理论与实际问题,内容包括:信号分析和变换原理,系统响应,遥测系统的品质指标与可靠性,信源与信道划分,传输系统,同步技术和抗干扰问题,遥测系统的总体设计与单元部件,并列举了典型的遥测系统供读者参考。

本书可供从事电路、通讯与遥测系统的设计、使用和维护的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生阅读参考。

责任编辑:裴 申

信号分析与遥测技术

赵松年 于允贤 编著

地震出版社出版

北京复兴路63号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 15印张 1插图 370千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷

印数:0001—4000

统一书号:13180·217 定价:2.30元

前 言

遥感技术在工业、农业、科学和国防方面起着重要作用。随着遥感技术的飞速发展，不断出现许多新的研究课题，在探讨和解决这些课题时，都要使用信号分析的理论和方法。我们可以说，信号分析是遥感技术建立与发展的基础，而遥感技术是信号分析理论的具体应用。

随着科学技术的深入发展，划分出越来越多的新学科。尽管这些学科研究的内容不同，但从信息的提取、加工、变换、传输和复原的角度来看，它们又有共同的规律。信号分析就是从广泛的意义上研究这些规律的基础理论。信号分析理论在通讯、电子学、地震学、生物医学等许多领域都得到广泛的应用。

本书按照由发信端到接收端的顺序，分别介绍遥感技术中的有关理论及遥感系统中的组成部分。在选择题材和内容时，力求做到简明扼要，把重点放在广泛应用的基本原理上，着重阐明数学公式所包含的物理概念及其应用，强调时域分析与频域分析之间的联系。

参与遥感系统设计、使用和维护的广大工程技术人员大多来自不同的专业，作者编写本书的目的是希望为他们提供一本简明扼要的参考资料。由于作者水平所限，书中谬误不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。作者希望本书能起抛砖引玉的作用，期待今后能有更多的论述遥感技术的著作出版，以促进这门学科的发展。

本书原稿由沈梦培同志审阅，并请作者的许多同事看过，他们提出了不少宝贵意见；书中插图由张振志同志绘制，书稿整理过程中得到张金荷同志的大力协助，作者在此一并表示衷心的感谢。

作 者

一九八二年一月于北京

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 信号的特征	1
§ 1.2 连续信号与断续信号	2
§ 1.3 信号的变换	4
§ 1.4 遥测系统的组成	6
§ 1.5 遥测系统的品质指标	8
第二章 信号分析	12
§ 2.1 线性系统	12
§ 2.2 正交信号空间	14
§ 2.3 周期函数的傅里叶级数	16
§ 2.4 傅里叶级数的其他形式	19
§ 2.5 傅里叶变换	22
§ 2.6 傅里叶变换的存在定理及基本性质	26
§ 2.7 变换域和频谱特性	30
第三章 系统响应	37
§ 3.1 脉冲函数	37
§ 3.2 卷积定理	42
§ 3.3 系统响应	44
§ 3.4 相关分析	47
§ 3.5 帕塞瓦尔定理	50
§ 3.6 能量谱密度与功率谱密度	51
第四章 连续信号的变换	54
§ 4.1 线性系统的滤波特性	54
§ 4.2 带通信号的表示	59
§ 4.3 振幅调制	60
§ 4.4 线性相干检测中的失真	69
§ 4.5 频谱分析的例子——残留边带传输技术	72
§ 4.6 幅度调制系统的性能	73
§ 4.7 角度调制	75
§ 4.8 频率调制信号的解调	83

第五章 数字信号的变换	86
§ 5.1 采样定理	86
§ 5.2 脉冲调制	90
§ 5.3 模/数变换	92
§ 5.4 数/模变换	99
第六章 信源和信道划分	102
§ 6.1 信源和信息量	102
§ 6.2 信号功率受限时的最大信息量	105
§ 6.3 信道容量	107
§ 6.4 信噪比, 带宽和时间的互换	109
§ 6.5 信道划分与复用技术	110
§ 6.6 交扰调制	112
第七章 传输系统	115
§ 7.1 信号的再变换	115
§ 7.2 连续信号的传输	116
§ 7.3 数字信号的变换与传输	117
§ 7.4 数字信号的检测原理	120
§ 7.5 脉码调制与增量调制技术	124
第八章 数字同步技术	131
§ 8.1 同步的意义	131
§ 8.2 同步传输与异步传输	132
§ 8.3 同步信息的提取	133
§ 8.4 巴克码同步技术	139
§ 8.5 数字滤波同步技术	143
§ 8.6 群同步的可靠性和群同步保护	144
§ 8.7 载波锁相同步技术	146
第九章 抗干扰问题	152
§ 9.1 干扰源与干扰形式	152
§ 9.2 随机过程	153
§ 9.3 信道与噪声	159
§ 9.4 线性系统对随机输入的响应	165
§ 9.5 抗高频干扰	166
§ 9.6 抗低频干扰	167
§ 9.7 最佳接收理论	168

§ 9.8 门限效应	173
§ 9.9 差错控制与编码技术	175
第十章 遥测系统总体设计	182
§ 10.1 系统设计概念	182
§ 10.2 方案的设计选择与评价	183
§ 10.3 分散终端的遥测系统	186
§ 10.4 卫星信道的利用和多址技术	188
第十一章 单元部件	191
§ 11.1 天线系统	191
§ 11.2 高频部件	193
§ 11.3 传输信道的分路器	198
§ 11.4 低频部件	202
第十二章 信号分析的应用与遥测系统的实例	213
§ 12.1 信息压缩技术	213
§ 12.2 图象识别	218
§ 12.3 遥测系统的实例	220
参考文献	232

第一章 概 论

§ 1.1 信号的特征

在通讯系统和遥测系统中所要处理的信号是多种多样的,光、电、声、热都可以当作信号的存在形式。特别是在遥测系统中,被测量的信号可以是电信号,也可以是机械量、化学量和物理量。然而,在大多数情况下电信号很容易测量、变换、传输和显示,还可以长期贮存起来(例如磁带记录);而其他非电量信号也能够精确地转换成电信号,所以在本书中只讨论电信号。所有非电量的电学测量属于一次测量装置,读者不难从自己所熟悉的领域中了解各种一次仪表和测量装置。这样一来,就能够用电信号概括各种原始信号,例如机械位移,心脏跳动,流体的压力、温度和流量,物体的运动速度,地面的脉动,等等。而按照转换成电信号的方法,原始信号所具有的特征也相应地变换成电信号的某一特征,这就是研究电信号的意义所在。

我们先来看简单的正弦波(用余弦函数表示)具有什么特征。设正弦波的幅度为 A , 角频率为 ω_0 , 相角为 ϕ_0 , 则有

$$f(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (1-1)$$

如果幅度 A 、角频率 ω_0 以及相角 ϕ_0 均为常数,则 $f(t)$ 是单频恒幅正弦波。如果将正弦波的概念加以扩展,使其幅度、频率和相角均为随时间变化的量,则 $f(t)$ 便能够携带一定的信息,其数学表达式为

$$f_s(t) = A(t) \cos[\omega(t)t + \varphi(t)]. \quad (1-2)$$

这时我们称 $A(t)$ 为幅度特征, $\omega(t)$ 为频率特征, $\varphi(t)$ 为相位特征,因为它们能够表示信号的变化。

其次再来看脉冲波形。一个脉冲波形也具有一些特征,如脉幅特征,脉宽特征和脉位特征,即脉冲的幅度大小,脉冲的宽度和脉冲的相对位置能够表示信号的变化。在本书的第二章中将讨论脉冲波形通过傅里叶级数表示成无穷正弦函数和的形式。此外还有脉冲的数目特征,频率特征和极性特征:用脉冲的总数目表示信号的变化就构成脉数特征;用单位时间内脉冲的数量表示信号的变化就形成了脉频特征;如果用正脉冲表示一种状态,负脉冲表示另一种状态,则组成脉冲极性特征。在极性特征中,因为只用了脉冲的正负两个极性表示信号的变化,所以是二极性特征;假如把没有脉冲看成是第三种状态,则构成三极性特征(零当作一种特殊的极性来看待)。

图 1-1 表示出几种不同的信号特征。

在实际的遥测系统中,可以根据具体的要求,任选上述某一信号特征来表示被测量,并通过遥测信道进行远距离传输。究竟选择那一种特征自然要视具体的遥测系统而定,不过仍可提出以下四个方面作为选择信号特征的依据,这就是:(1) 信号变换与反变换过程的失真程度;(2) 技术上实现的难易与实际装置的繁简;(3) 系统的可靠性要求与抗干扰能力;

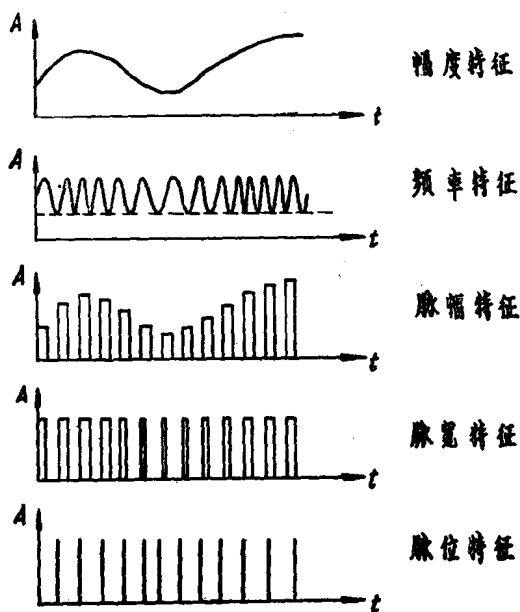


图 1-1

(4) 工作环境及传输信道的特殊要求。

不难看出,幅度特征容易受到各种干扰造成失真,相位特征和极性特征在技术实现上比较复杂。在遥测技术的发展初期,频率特征是比较常用的信号特征,但随着通讯理论的发展和大规模、超大规模数字集成电路的出现,特别是计算机在通讯及遥测技术各领域中的广泛应用,大大促进了数字传输系统的飞跃发展。尤其是脉幅特征与模数转换技术结合起来,形成脉码变换与脉码调制方式,是目前各种遥测系统中最常采用的一种方案。

关于信号特征,除了上述各种之外,还有编码特征,考虑到编码特征在近代通讯技术和遥测技术中的重要性,下一节将单独讨论这个课题。

§ 1.2 连续信号与断续信号

连续信号与断续信号通常也分别称为模拟信号与数字信号,这样称呼并不完全恰当,因为“断续的”或者说离散的信号,并不一定是数字形式的。现在仔细地研究连续信号与断续信号的特征。

所谓连续或断续信号是以信号幅度取值来区分,而不是以时间上的取值来区分的。因此,连续信号的特征是取值连续,例如幅度特征的取值可以有无穷多个连续值,因此脉冲幅度调制信号虽然在时间上的取值是不连续的,但幅度取值是连续的,所以是连续信号。相反,断续信号的特征是取值离散,或者说是断续的。一般来说,断续信号在时间上的取值也是离散的。

一个连续信号 $f_c(t)$ 能够变换成断续信号 $f_d(t)$, 仍然保留原信号的一切特征或信息。根据抽样定理可知,连续信号的频谱最高频率为 ω_m 或 f_m 时,则它可以用断续信号,就是按均匀间隔 $\Delta t = 1/2f_m$ 对连续信号抽样,以离散信号表示出来,如图 1-2 所示。而把 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 等时刻对连续信号 $f_c(t)$ 抽样的过程叫奈奎斯特抽样。抽样后所得信号 $f_d(t)$ 仍然是连续的,必须再经过一次量化才能变换成数字信号。量化就是用若干离散的数值来表示抽样值。说得详细一些,设连续信号为 $f_c(t)$, 其抽样后的函数为 $f_c(k\Delta t)$, 若把 $f_c(k\Delta t)$ 之最大特征值 $f_{cmax}(t)$ 分成 m 个均匀等级:

$$\delta = \frac{f_{cmax}(t)}{m}, \quad (1-3)$$

式中 δ 为相邻二等级之间隔,如图 1-3 所示, 其中 $f_c(k\Delta t)$ 不能任意取值, 而必须按照“四

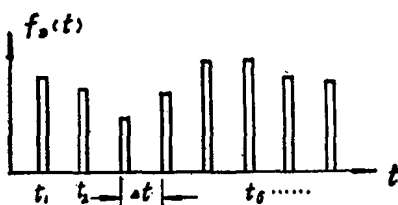
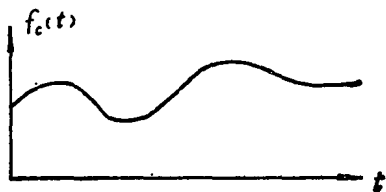


图 1-2

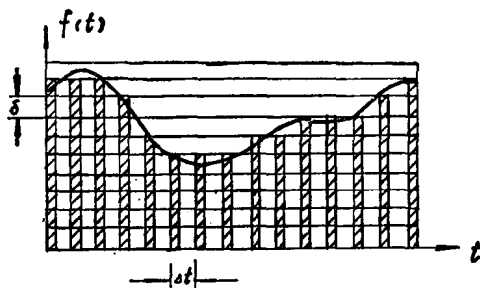


图 1-3

舍五入”的进位原则取最接近的 δ 之值的整数倍，这样得到的是脉冲序列 $f_k(k\Delta t)$ ，显然 $f_c(k\Delta t)$ 脉冲序列与 $f_k(k\Delta t)$ 脉冲序列的相应值并不相等，其差值为

$$|f_c(k\Delta t) - f_k(k\Delta t)| \leq \delta/2, \quad (1-4)$$

$\delta/2$ 称为量化噪声。由式(1-3)可知， m 愈大时， δ 愈小，但这一误差无论多么小却总是存在的。上述过程就是“量化过程”。

经过量化的信号 $f_k(k\Delta t)$ 的数值共分成 m 个等级，若只用一个脉冲来传输，则该脉冲的特征(例如脉冲幅特征)应当保证正确地分辨出 m 个不同等级值，这是非常难于实现的。为了解决这一实际困难，人们就研究出了用几个脉冲来表示一个量化等级的方法。若每一个脉冲能够分辨的特征数为 x ，则 n 个脉冲分辨的特征数为

$$x^n = m, \quad (1-5)$$

或者

$$x = m^{\frac{1}{n}}. \quad (1-6)$$

将量化所得的数据信号 $f_k(k\Delta t)$ 用一组编码代替，则原来的幅度特征变换为脉码特征。在断续遥测系统或通讯系统中，通过编码携带了信息，反过来，可用相应的解码(译码)恢复原来的信息。编码的方式有许多种，例如分组码，卷积码，BCH 码，汉明码等，详细内容将在第九章论述，在这里仅仅简单地说明一下有关编码的概念。

在遥测系统中，均采用二进制脉码特征，就是说 $x=2$ ，而 $m=2^n$ ；采用二进制的好处在于脉冲只有两个状态，技术上实现起来非常方便。例如 $m=8$ 时， $n=3$ ，由三个脉冲组成的编码为

$$\begin{array}{cccc} 000 & 001 & 010 & 011 \\ 100 & 101 & 110 & 111 \end{array}$$

它可以将处于八个均匀等级中的任何一个信号幅值 $f_k(k\Delta t)$ 表示为上述某一个编码，这八个脉码可以采用脉冲频率特征，脉冲幅度特征和脉冲宽度特征等，如图 1-4 所示。

§ 1.3 信号的变换

前面已经谈过, 可以用信号的特征来表示信息或信息的变化。这就是信号的一种变换, 实际上任何一个通讯系统或遥测系统就是对信息信号施行多次变换和反变换, 实现远距离传输的。

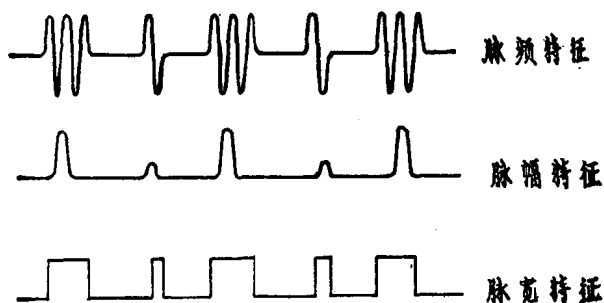


图 1-4

从广义上讲, 信号变换是一个专门的课题, 而且是一个迅速发展和进行深度研究的专门领域, 例如读者比较熟悉的傅里叶变换, 正交变换, 信息压缩技术以及编码理论等等, 都属于信号变换这个范畴。但是, 本节里我们拟讨论的范围仅仅限于通讯、遥测遥控系统常见的信号变换方法。

1. 一次变换

在遥测装置中一次变换主要是指各种非电量的电测法。也有许多作者称此为换能器或传感器, 例如温度、压力、流量、位移、速度和加速度、人体脉搏和心脏的跳动等等, 都可以通过相应的换能器变换成电信号。从非电量变换成电信号是一次测量变换过程, 在大多数情况下属于不同物理量之间的变换。今举一例说明: 如果需要测量物体的振动波, 比较简单的方法是采用电容换能器, 将电容换能器的一个极板置于被测物体的振动部位, 每当物体振动时这一极板随着振动, 而电容的另一极板固定不动, 则这两个极板因距离变化而引起电容器容量的变化, 其大小可由下式计算:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad \text{及} \quad C \pm \Delta C = \epsilon \frac{S}{d \pm \Delta d}, \quad (1-7)$$

或写成

$$C(t) = \epsilon \frac{S}{d(t)} = k_0 \cdot \frac{1}{d(t)}, \quad (1-8)$$

式中 S 是平行板电容器极板的面积, d 为极板之间距, ϵ 为空气介电常数。电容的变化可以通过电桥电路转变成电信号输出; 也可以把电容器作为振荡器的一个谐振元件, 将电容变化转变成振荡器频率变化。如果不是采用电容换能器, 而是采用动圈型换能器, 例如地震仪中拾震器的换能部分, 则是利用置于磁场中的线圈来测量物体(地面)的振动。通常线圈固定在拾震器的弹性支架上, 而产生磁场的磁钢则与仪器底座紧固在一起。地面发生振动时, 由于线圈支架的弹性作用能使线圈维持平衡状态, 而磁钢相对于线圈作垂直运动, 线圈切割磁力线。根据电磁感应定律可知, 线圈两端的感生电压与切割磁力线的速度成正比, 换句话说, 感生电压与地面振动的速度成正比, 即

$$e_0 = G \frac{dx}{dt}, \quad (1-9)$$

式中 x 是时间 t 的函数, 表示地面振动位移。只要通过一个积分电路对 $e_0(t)$ 进行积分即可得出 $x(t)$ 。

在这个简单的例子中可以看出, 同样一个被测量, 可以有許多不同的变换方法将其转变成电信号。

2. 中间变换

除了不同物理量之间的变换之外, 通常也有许多场合需要进行相同物理量之间的变换, 其中线性放大是最为人们熟悉的一种变换了, 这一过程可以表述如下:

$$f_s(t) = k f_i(t), \quad (1-10)$$

式中 $f_i(t)$ 是原始信号, k 是变换装置的放大倍数 (即增益), $f_s(t)$ 是变换后的信号。显然, 式 (1-10) 是一种很简单的线性变换。但是应当强调指出的是, 虽然这个变换的数学表示式是很简单的, 但在实际装置中在较宽的频带范围内, 真正实现微安、微伏甚至更小量级的信息信号不失真地放大几十万倍至几百万倍是很不容易的; 一个系统性能的好坏, 很大程度上取决于微弱信息信号的放大变换装置性能的优劣。

3. 二次变换

在经过一次变换后, 非电量被变换成电量 (电压或电流), 不过这种电信号一般都属于低频范围。如果要进行远距离通讯和测量, 直接对这些低频电信号进行有线或无线传输是不行的, 因为频率太低, 采用无线传输就需要若干公里长的天线, 这是不现实的。即使是采用有线传输方式, 由于大多数被测量均属于低频范围, 信号之间的频谱很可能互相重迭, 把这些互相重迭的信号通过一个有线信道 (明线, 架空线或电缆) 进行传输时, 在接收端根本无法将它们区分开来。所以, 为了实现通讯或遥测, 还必须对已获得的一次变换后的电信号再经过一次变换, 即所谓二次变换。

在遥测系统中, 二次变换通常是指信道变换, 也就是调制与反调制技术。若用数学公式来描述这个过程, 可一般性地说明如下:

若有一时间函数 $S(t)$, 它的一个特征参数 λ 与换能器或放大器的输出信号 (即一次变换后的信号) $U(t)$ 有关, 即 $U(t) = \lambda$, 那么调制过程可用下面的简单关系来说明

$$S(t) = f(\lambda, t), \quad \lambda = U(t), \quad (1-11)$$

即

$$S(t) = f[U(t), t]. \quad (1-12)$$

不言而喻, 式中的 λ 就是信号特征。当 $f(\lambda, t)$ 为连续信号时, λ 可为幅度特征、频率特征或相位特征等; 当 $f(\lambda, t)$ 为断续信号时, λ 就是脉冲幅度特征、脉冲相位特征或脉冲频率特征以及脉冲宽度特征等。

在电路中调制与反调制 (解调) 是用乘法装置或平方率器件的非线性特性来实现的。调制的目的无非是为了实现无线传输和信道的多路划分及复用; 反调制自然是为了由已调波恢复原来的信息信号。

前面提到的量化和编码都是信号的变换过程, 并且是属于二次变换的。将连续信号变换成断续信号既是为了提高传输的有效性, 也是为了提高可靠性。顺便指出, 一种编码方式也可以变换成另一种编码方式, 例如二进制编码与十进制编码之间的变换, 诸如此类的变换均属信号变换的范畴。

最近, 许多学者在通讯理论中致力于编码与信息压缩技术的研究, 并已取得显著的进展, 其中以图象编码的进展最为可观。利用图象的统计特性和视觉特性以及生理心理特性而研究出一些数字编码和信息冗余度的压缩方法, 促进了信号变换这个课题的深入发展。由此

可见，在通讯和遥测系统中，信号变换占有重要地位，信号的变换环节也是通讯和遥测系统的主要组成部分。

§ 1.4 遥测系统的组成

现在我们研究一个具体的遥测系统的组成模型。首先看一看图 1-5 所示的遥测系统方框图。在这个典型的系统方框图中，将外部干扰和噪声都集中于信道上，这样考虑问题主要是为了建立一个便于进行数学分析的模型，当然它也具有普遍性。

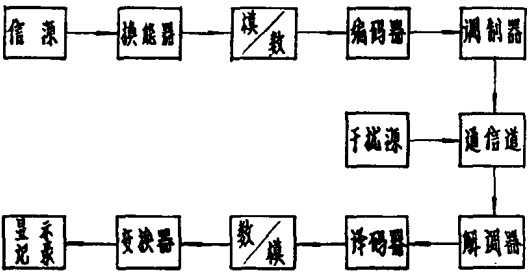


图 1-5

假定信号源本身是连续信号，经过换能器的变换而形成连续的电信号，再经过模/数变换器把连续信号转变成断续信号（即通过抽样过程），然后再进行编码、调制获得数字式已调波，经无线或有线信道传输至接收端。从图中可看出，接收端的各组成单元恰好是发送端的逆过程，已调信号通过接收端反变换而恢复成真正的信息信号，它还需经过功率放大至纸带记录器或是经电压放大至磁带记录器。

如果是模拟遥测系统，那么图中的模/数转换装置及编码器以及数/模转换器和译码器都是不必要的了，因而系统的结构可以简化。这一点是很重要的。因为结构简单，一般来说可靠性提高而成本降低，并且在接收端能直接从纸带记录器上实时观测信号波形，这是模拟遥测至今仍广泛应用的主要原因之一。指明这一点是有益处的，因为在多目标分散遥测的情况下，某些测点往往只需测量一个参数，至多也不过是几个测量参数，如果在每一个待测点配备一套数字传输装置将是很大的浪费。在那些分散的单参数或几个参数的遥测系统中，考虑到供电条件，无人看守等不利因素，采用模拟遥测方案是比较合适的。例如对大型水库水位的监测，某一特定地区降雨量的测量，就是属于分散目标的单参数遥测方式。在地震活动的观测中，为了快速测定地震的震源位置、发震时刻等参数，必须依靠相距几十公里到上百公里的若干地震观测子台所形成的台网。再如医疗部门在治疗心脏病人的过程中，对于那些能够自理的处于恢复期的病人，既希望他们在一定范围内进行适量的户外活动，又希望他们的心脏的生理活动情况随时处于治疗中心的监视之下，这就需要用到心电图遥测装置。每一个被监测的病人随身携带一台微型发射机，心脏的跳动通过换能器转变成电信号以遥测方式发送到医疗中心，在那里将原始心电图信号恢复并记录下来。当然心电图信号遥测装置可以有几种不同的方案，但它的特点是单参数分散目标的测量，因此采用模拟遥测方案是很可行的。

以上仅是简略的介绍了遥测制式的选择思路，更详细的论述留待第十章进行。下面介绍几种常见的遥测制式，使读者在研究本书以后各章的内容之前，对遥测系统的典型模式有一个概括的了解。

1. 模拟遥测 FM—FM 方式：

如图 1-6 及图 1-7 所示，发射端由信源、换能器、副载波振荡器（即电压控制振荡器

VCO)、集合放大器、发射机和天线等单元部件组成,副载波的中心频率的选取主要应考虑不小于或不等于各路副载波三次交扰调制产生的频率,由此计算出的副载波中心频率已标准化,并有相应的滤波器作为系列化产品。图中的集合放大器是为了将各路已调副载波迭加在一起进行适量的放大再去调制发射机;接收端除天线、接收机外,还有带通滤波器、鉴频器、低通滤波器和记录器。

已调波经过接收机的一次解调后恢复成多路

调频副载波的迭加信号,然后用中心频率与发射端副载波频率相对应的带通滤波器选出该通

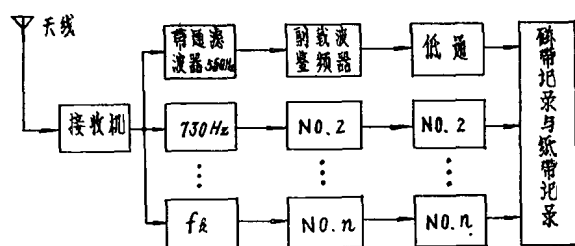


图 1-7

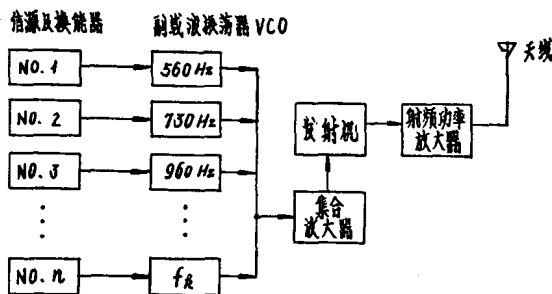


图 1-6

道的信号,再由鉴频器鉴出低频原始信号。这时残存的副载波被低通滤波器滤除,信号由纸带记录器和磁带机分别记录下来,既可实时监控被测参数的变化,又可在事后回放磁带时进行对比。

2. 数字遥测系统 PCM 方式:

前面(见图 1-5)已经说过,断续系统应当包括模/数转换器与数/模转换器、编码器与译码器等部件,它们的作用是将连续信号转换成断续信号,然后对断续信号进行再变换,其中模/数与数/模转换器应当包括抽样、量化、编码与译码这几个变换过程。一个典型的数字遥测系统如图 1-8 所示。

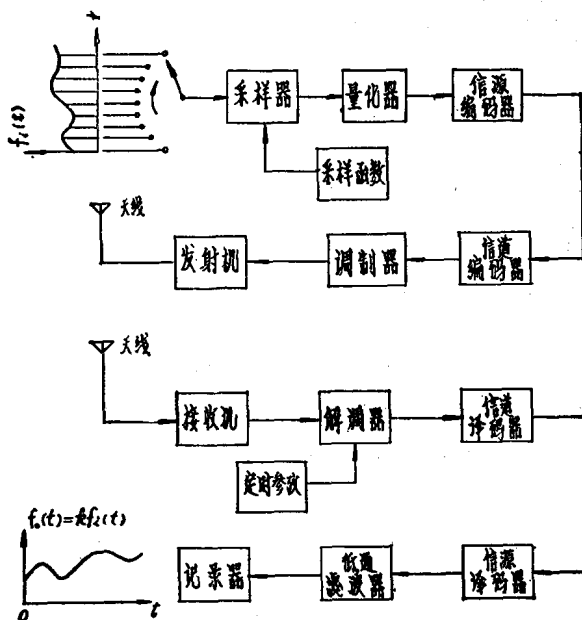


图 1-8

需要说明的是信道编码器，它的功能主要是在信号数字序列中加入多余码元，增加数码在传输中的抗干扰能力，降低接收端的错误率。换句话说，就是增加了信源编码后的标识特征，在解码时容易正确识别。

§ 1.5 遥测系统的品质指标

衡量和评价一个遥测系统性能优劣的主要依据有以下四个方面，即精度、响应速度、可靠度和抗干扰能力。此外还有系统组成结构的复杂程度、备件与工作件的互换性等等，但对遥测系统来说，能够作为普遍适用的品质指标，似乎仍以上面提出的四个方面为宜，现分述如下。

1. 精度

如果遥测系统的输入信号为 $V(t)$ ，而系统的最后输出信号为 $U(t)$ ，如果将系统的总放大倍数扣除， $U(t)$ 与 $V(t)$ 用同一物理单位计量，那么遥测系统的精度可以绝对精度 ε 和相对精度 Δ 来表示

$$\varepsilon = V(t) - U(t), \quad (1-13)$$

$$\Delta = \frac{\varepsilon}{V(t)_{\max}} = \frac{V(t) - U(t)}{V(t)_{\max}}. \quad (1-14)$$

事实上式 (1-13) 中的 ε 是时间 t 的函数，在不同的时刻具有不同的数值，所以 ε 是系统的动态误差。当 $U(t)$ 随着时间 t 的增长而逐渐趋于稳定时， ε 将与时间 t 无关，这时 $\varepsilon(0)$ 就是系统的静态误差。

一般而言，引起系统误差的原因是多方面的，需要仔细分析，例如各种变换环节的不稳定，元器件特性参数的不一致性，线性范围不够，通讯信道不是恒参信道而是变化的（尽管这种变化有时是很缓慢的），测量仪器仪表的精度较低等等。因此，在选择遥测方案时，应当研究信道及周围的干扰情况并加以综合，由此决定采用一种不易受外界干扰的载波信号特征来携带信息。

对于断续系统，精度误差主要是由于连续信号的抽样及整量化过程产生的。因为任何一种抽样开关（采样器）的断开不是无穷大阻抗，而接通也总是有一定电阻，这样信号经过采样器受到衰减，并且在整量化过程中又产生 $\delta/2$ 的量化误差[见式 (1-4)]。如果忽略采样器对信号的衰减，那么断续系统的相对精度可表示为

$$\Delta_D = \left| \frac{\delta}{2 V_{\max}} \right|, \quad (1-15)$$

并且 Δ_D 是与时间 t 无关的，它只决定于量化时的等级。因为量化等级可以做得很高，故 Δ_D 也可做到很小，不过这主要看对具体的遥测系统所提的要求而定。

一般来说，在精度方面，断续系统优于连续系统。

2. 响应速度

如果对遥测系统输入一个单位阶跃函数 $g(t)$ ，则系统将有一个相应的输出 $w(t)$ ， $w(t)$ 从零值上升到最大值所需要的时间 t_r 就能很好地表征系统响应速度。一般来说，系统的线性变换环节例如放大器、传感器、积分网络等对响应速度都有影响。在遥测系统中，主要由被测量的各种低频信号变化的快慢来确定系统应有的响应速度。

3. 可靠度

在这里“可靠度”一词自然包括整个系统的可靠度与元器件的可靠度。

考虑到遥测系统大都用于工业及国防部门,因而可靠度便成为遥测系统的重要性能指标。一个系统除了可靠度要求之外,其他的要求尽管也很重要,但终究不像可靠度那样与整个系统能否正常工作紧密相关联。不难想象,如果一个遥测系统经常出现故障而中断工作,那么这个系统的使用价值就值得怀疑了。同样也不难理解,对遥测系统来说,首先应当保证长时间连续可靠的运转。

所谓可靠度,就是一个系统和元件在规定的条件下,在规定的时间内能够无故障地完成它的使命的概率。假定故障是随机发生的,并且是按指数规律分布的,则在时间 t 中的可靠度 η 可表示为

$$\eta(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1-16)$$

式中 λ 为故障率。此外,系统或元件连续工作到因出现故障停止工作之前的无故障工作时间的平均值为

$$M_R = \int_0^{\infty} \eta(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1-17)$$

在考察一个系统的可靠性时,应首先了解它的结构和组成形式。一般来说,系统中的元件可能是串联的,也可能是并联的,甚至是二者兼有即串并联交叉联接。这样,对于串联情况,一旦一个元件出现故障就会影响整个系统,因此当每一个元件的可靠度为 η_k 时, n 个元件串联后的可靠度为

$$\eta_s = \eta_1 \eta_2 \cdots \eta_n = \prod_{k=1}^n \eta_k. \quad (1-18)$$

在最简单的情况下,每个元件的可靠度均相等,即 $\eta_1 = \eta_2 = \cdots = \eta_n = \eta_0$, 则总的可靠度为

$$\eta_s = \eta_0^n. \quad (1-19)$$

在并联的情况下,只要有一个元件工作正常,那么它就不会形成整个系统的故障。如果元件并联数目为 m 个,元件本身的可靠度为 η_i , 则系统的可靠度为

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \cdots (1 - \eta_m) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \eta_i). \quad (1-20)$$

当所有并联元件的可靠度相同时,则

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_0)^m. \quad (1-21)$$

对于航天遥测系统来说,可靠性的要求几乎达到 99.9% 以上。影响系统可靠性的因素有总体设计、分系统设计是否合理,元器件的稳定性与可靠性,系统中各备份的联接方式和切换速度等等。为了能更适于这种遥测系统的分析,将引入“运转率”的概念,它的定义如下:

$$A(\text{运转率}) = \frac{\text{平均故障间隔时间}}{\text{平均故障间隔时间} + \text{平均维修时间}} = \frac{1}{1 + \rho}, \quad (1-22)$$

式中 ρ 是维修比,即平均维修时间与平均故障间隔时间之比。

当整个系统的联接方式为图 1-9 所示的五种基本形式时,相应的运转率 A 可按下列各公式分别求得。

(a) 无备份系统制;

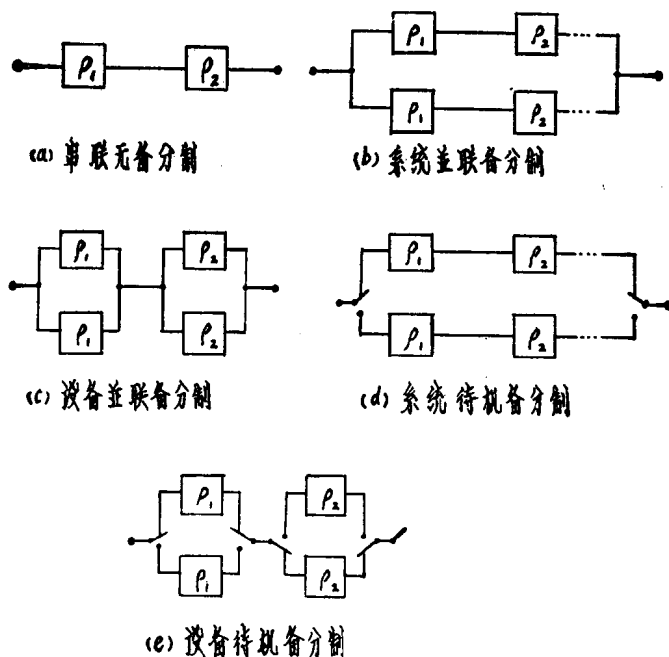


图 1-9

$$A = \prod_{i=1}^n \frac{1}{1 + \rho_i}; \quad (1-23)$$

(b) 系统并联备份制:

$$A = 1 - \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + \rho_i} \right) \right\}^2; \quad (1-24)$$

(c) 设备并联备份制:

$$A = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \left(\frac{\rho_i}{1 + \rho_i} \right)^2 \right\}; \quad (1-25)$$

(d) 系统待机备份制:

$$A = \frac{2 \prod_{i=1}^n (1 + \rho_i)}{1 + \left\{ \prod_{i=1}^n (1 + \rho_i) \right\}^2}; \quad (1-26)$$

(e) 设备待机备份制:

$$A = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{2(1 + \rho_i)}{1 + (1 + \rho_i)^2} \right\}. \quad (1-27)$$

公式 (1-23) 与 (1-24) 是很明显的, 公式 (1-25) 中 $[\rho_i / (1 + \rho_i)]$ 表示元件的故障率, 因为

$$1 - A_i = 1 - \frac{1}{1 + \rho_i} = \frac{\rho_i}{1 + \rho_i}, \quad (1-28)$$