

高等学校教材

电力系统远动技术

华北电力学院 刘贯宇 主编

水利电力出版社

高等学校教材

电力系统远动技术

华北电力学院 刘贯宇 主编

水利电力出版社

高等学校教材
电力系统运动技术
华北电力学院 刘贯宇 主编

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京丰华印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 376 千字
1986 年11月第一版 1986 年11月北京第一次印刷
印数 0001—7420 册 定价 2.75 元
书号 15143·6179



内 容 提 要

本书系统地讲述了电力系统远动技术的基本理论,并介绍了远动装置的原理。

本书的主要内容是:信号的频谱和带宽、时分多路制、PCM制,硬件式远动装置原理,移频键控和移相键控,循环码和BCH码,数字锁相、帧同步及陪集码。介绍了微型机远动原理,包括数据采集、处理、串行通信接口、信息的发送和接收等。

本书可供高等学校“继电保护、自动、远动技术”专业作为教材,也可供“发电厂及电力系统”专业选用,以及有关专业的工程技术人员参考。

前 言

本书是根据电力系统继电保护、自动、远动技术专业《电力系统远动技术》教学大纲编写的。它讲述了电力系统中所应用的远动技术基本理论,并介绍一些目前我国电力系统中远动装置采用的技术方法及其发展趋向。

第一章中介绍了远动技术的基本概念。第二章主要介绍信号的频谱特性和远动的基本技术——频分多路制和时分多路制,在电力系统中采用的主要是时分多路制中的PCM制。在第三章中借助于一个远动装置模型,来说明目前在电力系统中广泛应用的传统硬件式远动装置的原理。第四章是远动信号在信道上的传输原理,重点是数字调频和数字调相,同时也介绍了在基带系统中如何减小码间干扰。第五章是抗干扰编码,即纠错码,主要阐述远动中的编码和检错原理,着重于循环码的编、译码方法,并介绍了现在广泛采用的BCH码的基本原理。第六章主要介绍位同步中的数字锁相法和帧同步码,对载波同步也作了介绍。第七章是微型计算机远动,主要介绍它的原理,包括数据的采集和处理,串行通信接口,发送和接收等。

本书中第一、二、三、五章由华北电力学院刘贯宇同志执笔,第四、六章由东北电力学院李传伦同志执笔,第七章由成都科技大学李烈忠同志及刘贯宇同志执笔,全文由刘贯宇同志任主编。

本书中打“*”号的章节,不作为基本教学内容。全书内容是按“继电保护、自动、远动技术”专业的课程内容编写的,对于其他专业,远动课时较少者可只取第一章中的第一、二节,第二章中的第四、五节,第三章中的第一节到第六节,第四章中的第三、四、五节,第五章中的第一节到第四节,第六章中的第二、三节,第七章中的第一、二节。

本书由西安交通大学盛寿麟老师主审,详细审阅全文,并作了许多指正。东北电力学院马昭彦老师在百忙中非常关心本书的编写工作,阅完全稿后提了许多宝贵意见。在编写中其他同志也提供了材料并得到热情帮助,在此一并表示感谢。

由于水平有限,书中难免有错误和不恰当之处,诚恳请读者批评指正。

编 者

1985年12月

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
第一节 概 述	1
第二节 远动装置的基本环节	2
第三节 远动装置的主要技术要求及发展概况	3
第二章 远动信号分析和传送的基本原理	5
第一节 信息量和信号	5
第二节 信号分析	7
第三节 网络响应	15
第四节 信号的远距离传输技术	18
第五节 脉冲编码调制(PCM)原理	24
*第六节 滤波器简介	29
第三章 硬件式远动装置原理	36
第一节 信息格式	36
第二节 时序部件	37
第三节 遥测量的模数转换	41
第四节 遥测量的标度变换	46
第五节 信息的编码与发送	59
第六节 信息的接收	64
第七节 遥控、遥调概述	70
*第八节 问答式远动装置原理	71
第四章 调制与解调	81
第一节 信道与干扰	81
第二节 基带传输	84
第三节 振幅调制	88
第四节 移频键控	93
第五节 移相键控	98
第六节 数字信号的最佳接收	102
第七节 各种数字调制方式的比较	106
第五章 抗干扰编码	108
第一节 概 述	108
第二节 抗干扰编码的基本原理	109
第三节 线性分组码	111
第四节 循环码	116
第五节 BCH码	130
*第六节 卷积码	136
*第七节 采用抗干扰编码后的错收概率	143
第六章 同步原理	149

★ 第一节	载波同步	149
第二节	位同步	154
第三节	群同步码	160
★ 第四节	自同步——陪集码	164
第七章	微型计算机远动原理	171
第一节	微型计算机远动概念	171
第二节	微型机远动软件概念	172
第三节	开关量的采集	174
第四节	模拟量的采集	179
第五节	串行通信接口Z80 SIO	195
★ 第六节	遥信程序	231
★ 第七节	遥测量的处理程序	234
第八节	循环码的软件查表算法	238
第九节	发送和接收	244
★ 第十节	远动通信规约概述	252
参考文献		259

第一章 绪 论

第一节 概 述

在发电厂和变电站中设有主控制室，集中控制和管理整个厂、站的运行。电力系统由发电厂、变电站及输电线等组成，也设有一个集中控制管理中心，这就是电力系统调度所。由它统一指挥在正常或事故情况下电力系统的运行。

为了保证电力系统运行的可靠性、经济性和电能的质量，调度所必须收集系统的实时运行资料。例如主要发电厂的机组出力、母线电压和线路潮流等主要参数；还要收集主要设备的运行状态，例如开关的投入或切断等。过去这些工作都要通过电话来完成，每天由各厂、站的值班人员定时地轮流向调度所报告机组的出力、线路潮流、母线电压等参数，调度员参照这些资料，结合负荷预测情况，安排运行计划，检修计划及继电保护整定值等，并用电话通知下属厂、站值班人员，以达到控制管理的目的。这时的调度工具只有电话通信，主要是电力线载波通信。显然这种一来一往的通话需要较长的时间，调度员通过电话所掌握的资料缺乏实时性，是过去一段时间的情况，不能满足及时安全经济调度的要求。特别在处理事故时，电话通信不能使调度人员及时掌握故障情况，快速处理事故。这样，电力系统为了在正常及事故情况下，提高调度效率，采用了远动技术。远动技术的遥测、遥信、遥控及遥调功能显著地提高了实时调度效率。

电力系统远动技术在我国是五十年代兴起的，通过遥测、遥信将几百、几十公里以外的测量值和开关位置信号及时地传送到调度所，并在电力系统模拟盘上显示出来。这对于监视和控制系统的运行是一个十分有利的工具。它是实现系统实时调度和进一步实现调度综合自动化的基础。

目前国内电力系统中的远动装置主要功能是遥测、遥信、遥控和遥调。现分述如下：

1. 遥测(yC)

遥测是远方测量的简称，记为yC。它是将被监视厂、站的主要参数变量远距离传送给调度所。例如厂、站端的有功、无功功率，电度，电压，电流，频率等电气参数及热电厂的汽压，水电厂的水位等非电气参数。

2. 遥信(yX)

遥信是远方状态信号的简称，记作yX。它是将被监视厂、站的设备状态信号远距离传送给调度所。例如开关位置信号、报警信号及闸门位置信号等。

3. 遥控(yK)

遥控是远方操作的简称，记作yK。它是从调度所发出命令以实现远方操作和切换。这种命令只取有限个离散值，通常只取两种状态指令，例如命令开关的“合”、“分”指令。

4. 遥调(yT)

遥调是远方调整的简称，记作yT。它是调度所远方调整厂、站的参数。

例如远方直接调整发电厂的有功或无功功率等。

总之，远动技术是远距离传输消息以实现对电力系统或设备进行监视和控制的技术。

电力系统远动装置是远距离传送电力系统消息，以实现对厂、站监控的设备。

远动技术不只是在电力系统中采用，在石油、铁路等企业中都有广泛的应用，特别是在国防部门，远动更是一门重要的技术。远动技术内容很多，本书所讨论的是电力系统中目前所采用的数字式远动技术。

第二节 远动装置的基本环节

电力系统中厂、站端的参数、状态；调度所的操作、调整等命令都是“消息”。远动装置远距离传送这种消息，以实现遥测、遥信、遥控、遥调等功能。图 1-1 表示了数字式远动装置遥测、遥信原理框图。

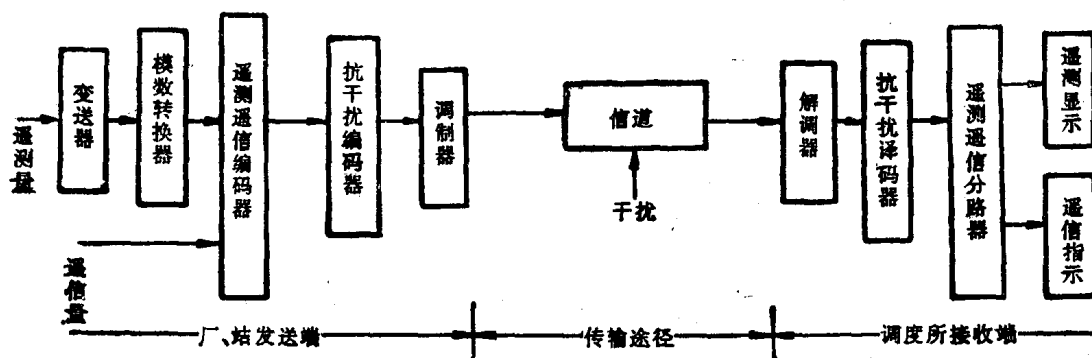


图 1-1 遥测、遥信原理框图

被监控的厂、站端要将遥测(yC)、遥信(yX)量送到调度所去显示或记录。遥测量是电量或非电量，经过变送器后，通常变成 5V 直流模拟电压，输入模数转换器。模数转换器将输入的模拟电压转换成数字量，送给遥测、遥信编码器，编码器将输入的并行数码，编成在时间上依次顺序排列的串行数字信号，而遥信是开关量，可以直接输入编码器。在远动系统中传送的信号，在传输过程中会受到各种干扰，可能使信号发生差错。为了提高传输的可靠性，对遥测、遥信的数字信息要进行抗干扰编码，以减小由于干扰而引起的差错。由于数字脉冲信号一般不适宜于直接传输，例如利用电话线路作为信号传输的途径(信道)时，线路的电感、电容会使脉冲信号产生很大的衰减和变形，所以要用调制器把数字脉冲信号变成适合于传输的信号。例如把数字脉冲信号变成正弦信号传输，这样，厂、站端就把经过调制后的遥测、遥信信号发送出去，送到调度所接收端。接收端首先用解调器把正弦信号还原成原来的数字信号，再由抗干扰译码器进行检错，检查信号在信道上传输时，是否因干扰的影响已经发生错码。检查出错误的码组就放弃不用，检查出正确的码组经遥测、遥信分路器将各路遥测、遥信分割开，分别去显示或指示。

对于遥控和遥调，调度端是发送端，厂、站端是接收端。遥控、遥调命令的传送原理和上述相同。遥控或遥调命令经命令编码器编成串行的数码，送到抗干扰编码器、调制器后发送出去。接收端经解调和抗干扰译码后，送给命令寄存器，以输出执行。要指出的是遥调、遥控命令的传输可靠性要求较高，特别是遥控，要求的可靠性更高。

如上所述，远动技术是将电力系统的数据、命令从一端传送到另一端去显示、记录或

控制执行。远动技术的传送方式分为两大类，即循环传送方式和问答传送方式。

循环传送方式是以厂、站端的远动装置为主，周期性地采集数据，并且周期性地以循环的方式向调度端发送数据。常用在点对点的远动装置中，由厂、站端传送遥测、遥信量给调度端。我国和日本的远动装置主要采用这种传送方式。

问答传送方式是以调度所为主，由调度所发出查询命令，厂、站端按发来的命令而工作，被查询的厂、站向调度所传送数据或执行命令。未收到查询命令时，厂、站端的远动装置处于静止状态。在西欧、美国及加拿大的系统中大都采用这种传送方式。

远动装置按工作方式分类，可分为(1:1)工作方式；(1:N)工作方式及(M:N)工作方式。(1:1)工作方式是基本的型式，它是指在厂、站侧装一台远动装置，在调度端对应地也装一台远动装置。(1:N)工作方式是指调度端一台远动装置对应着各被监控厂、站的N台远动装置。(M:N)工作方式是指调度端M台装置对应着厂、站端N台装置，常用M=2方式。

第三节 远动装置的主要技术要求及发展概况

对电力系统远动装置的主要技术要求是：

1. 可靠性要高

远动装置在电力系统中是作为监控的设备，自然要求它具有高度的可靠性。可靠性包括装置本身的可用性及信息的传输可靠性两个主要方面。

可用性是指装置正常运行的能力，它用平均故障间隔时间来衡量。平均故障间隔时间是指远动装置在两个相邻故障间的平均正常工作时间。国外的远动装置平均故障间隔时间已达到30000h。国内要求8000~10000h以上。

远动装置在传输信息过程中，会因为干扰而出现差错，传输可靠性是用信息的差错率来表示的。

$$\text{差错率} = \frac{\text{信息出现差错的数量}}{\text{传输信息的总数量}}$$

在通常情况，差错率要求在 10^{-10} 以下。

2. 实时性要强

调度所要求电力系统的实时信息，特别是在电力系统故障时，要求迅速地获得故障信息以及及时处理故障。实时性常用“传输时延”来衡量，它是指从发送端事件发生到接收端正确地收到该事件信息这一段时间间隔。例如，典型的最大容许时延，在正常传送遥测、遥信时为2~10s，在状态变化（例如开关跳闸）时为0.5~5s，在传送遥控、遥调等命令时为0.1~2s。

3. 功能要多

通常把遥测、遥信、遥控及遥调等对象的数量叫做远动装置的容量，首先远动装置的容量要满足电力系统远动化的要求。此外，遥测、遥信、遥控及遥调的功能也要扩大，例如现在电力系统要求遥测功角、电度等，遥信要求变位优先传送，并有时间记录等功能。随着技术的发展，远动装置还要完成事件记录、数据处理等功能。

下面介绍电力系统中远动技术的发展概况，我国在五十年代开始应用SF-58型有接点

遥控、遥信装置以及近距离遥测等装置。六十年代开始研制由晶体管构成的布线逻辑式远动装置，即现在电力系统中广泛运用的WYZ、SZY型硬件式远动装置，它大大地提高了调度效能。到七十年代中期出现了一批由集成电路构成的新型远动装置，例如SY-1、SYD-75、ZYD-75、SZY-30、SZY-3远动装置等等，在远动的功能、容量、传输速度等指标方面都有所提高。这时也出现了基于计算机原理构成的软件化远动装置，例如JYC-01型远动装置。七十年代后期，我国电力部门的一些研究单位开始研制微计算机型远动装置，至今已获得很大进展。

在八十年代，远动装置处于更新换代的年月。将由传统的布线逻辑式远动装置向微计算机型远动系统过渡。在厂、站端将采用8位微型机作为远动装置，在调度端则采用16位或32位小型机作为前置机，收集多个厂、站的远动信息，进行预处理后再送给主计算机。另一种方案是，在调度端以16位微计算机或小型机构成多机系统，既作远动功能用，又作调度自动化的主机用。

总之，在调度端发展的趋向是用微计算机或小型机构成前置系统，以实现远动功能。在厂、站端的发展趋向是远动装置的微型机化，多功能及智能化。在功能方面已从传统的遥测、遥信、遥控及遥调功能扩大到更多的数据采集和处理功能，例如故障时的事件记录和分析等。所谓智能化是指远动装置具有某种判断的功能，例如判断遥信变位，并优先传送，慢变化量（如电度遥测等）的定时传输，以及根据厂、站端的实际运行情况，对调度端发来的命令进行校验等。

第二章 远动信号分析和传送的基本原理

远动是远距离传输消息的技术，下面我们将介绍消息具有信息量，同时，消息是用信号传送的，所以我们要分析信号的一个重要特性——“频谱”，从而建立信号“带宽”的概念。信息量相当于信号的重量，信号带宽相当于信号的体积。这两个重要的概念和交通运输中货物的重量和体积两个指标的概念是很相似的。

远距离传送信号的基本技术采用频分多路制和时分多路制。电力系统远动技术中主要采用时分多路制中的脉码调制(PCM)方式，从而构成数字式远动装置，这也是远动技术中要建立的基本概念。

第一节 信息量和信号

远动是远距离传送消息的技术，消息是指通信的对象。例如：信件中的文字是消息；遥测、遥信中的数据是消息；遥控、遥调中的命令也是消息。

要传送的“消息”，对收信者来说是“不确定”的。如果是“确定”的，传送就没有意义了。例如厂站端的开关有两种状态：“合闸”和“分闸”，对调度员来说，在没有传送过来开关状态消息之前，开关状态是不确定的。消息的这种不确定性可以用“信息量”来表示，所以说消息具有信息量。

不同的消息，的确会有不同的信息量，一个必然发生的消息，对收信者来说没有任何收获，其信息量为零。一个很少出现的消息发生了，当收信者得知该消息后会感到收获很大，即该消息的信息量很大。抽象地说，一个事件发生的概率越小，它的信息量就越大。所以，对于要通信的事件——消息，其不确定性可用该事件出现的概率的倒数来表示。此外，当该事件分成若干个独立事件时，该事件的总信息量应是各个单独的信息量之和。显然对数函数能满足这个要求，所以，消息的信息量可按下式计算：

$$I = \log \frac{1}{P} \quad (2.1-1)$$

式中 P ——事件发生的概率；

I ——该事件发生时所得的信息量。

在(2.1-1)式中，对数的底取决于量度信息的单位。若取2为底，信息量的单位称为“比特”。

$$I = -\log_2 P \text{ (比特)} \quad (2.1-2)$$

我们只讨论各种事件都是等概率出现的情况。最简单事件(或消息)只有两种状态，例如开关的消息就是两种：“合闸”或“跳闸”。这种最简单的消息所含的信息量的计算公式为：

$$I = -\log_2 \frac{1}{2} = 1 \text{ (比特)}$$

在工程中，这就意味着：最简单的具有两种状态的消息可用一“位”二进制符号来表示。发出这样一个符号就说发出了1比特的信息量，收到这样一个符号就说收到了1比特的信息量。

如果一个消息有 2^n 个状态，它就有 n 比特的信息量，可以用 n 位二进制符号表示。这样，在等概率条件下，比特就可用二进制符号的“位”概念来解释。

一个消息如果用 N 进制符号表示，那么它的信息量就是：

$$I = \log_2 N \text{ (比特)} \quad (2.1-3)$$

在信息论中，把各种消息的传送概括定义为信息的传送。消息的信息量相当于被运送货物的“重量”，传送信息的多少就直观地使用“信息量”去衡量。

消息传送的速度可用信息（或码元）传送的速度来表征。

信息传输速率又称信息速率或传信率，它被定义为每秒钟传送的信息量，单位是比特/s。

在离散系统中，一个码元是一个 N 进制符号。消息的传送速度可用码元传输速度来表征。

码元传输速率，又称码元速率或传码率，定义为每秒钟传送的码元数目，单位是“波特”，常用符号“Bd”表示。例如某远动装置每秒钟传送250个码元，则该装置的码元速率是250Bd。需要特别指出的是(2.1-3)式中 N 可为任何正整数，当 N 为2时，这个码元就是二进制符号，叫做二进制码元， N 为4时是四进制码元，显然一个四进制码元可以用两个二进制码元表示。一般一个 N 进制码元可用 $\log_2 N$ （整数）个二进制码元表示。设二进制码元速率为 R_2 ， N 进制码元速率为 R_N ，则有如下转换公式：

$$R_2 = R_N \log_2 N \text{ (Bd)} \quad (2.1-4)$$

要注意码元速率与信息速率单位不同，而在数值上有一定的关系，每一个二进制码元有1比特信息量，所以在二进制下的码元速率与信息速率在数值上相等。设信息速率为 R_b ，则有下列数值关系，

$$R_b = R_N \log_2 N \text{ (比特/s)} \quad (2.1-5)$$

上面讲的是消息具有信息量，并有一定的传输速度。那么物理上怎样实现消息或信息的传输呢？消息或信息是用信号来传送的，传送信号的途径叫信道，例如电话信道，无线信道等。

信号有两种主要类型——随时间连续变化的模拟信号和随时间不连续变化的离散信号。模拟信号通常是单一正弦波或是正弦波的组合。离散信号是由在时间上离散出现的脉冲组成，脉冲可以是单个地以固定的周期出现，如图2-1(b)所示，也可以是以码组的形式出现，如图2-1(c)所示。

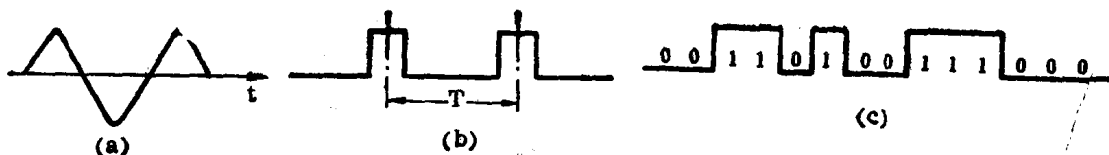


图 2-1 信号波形图

(a) 模拟信号；(b) 脉冲信号；(c) 脉冲编码信号

第二节 信号分析

信号波形是消息的携带者，可以把每个波形所含有的信息量当作它的“重量”，但是一样重的东西，体积并非一样大。在交通运输中，除了对货物重量有限制外，对体积也有限制，这是因为运输系统本身的容积是有限的。通信系统的容积就是信道频带宽度，例如电话信道的频带宽度限制在300~3400Hz以内。消息的“体积”就是携带消息的信号占有的频带宽度，所以信号频带一般不能太宽，否则通过信道时，信号失真很大，而信号频带宽度可以从信号的频谱分析中得到。

用傅氏变换可以把信号分解成许多频率分量，这些频率的范围叫做信号的“频谱”。频谱分量的幅度有大有小，其中幅度较大，对通信系统有意义的分量构成了信号的有效频带，而把幅度较小的分量可忽略不计。有效频带常简称为“带宽”。

频谱分析的基本出发点是：把信号的“时域”函数转换到“频域”上来分析。

一、傅氏级数

傅氏级数是用来分析周期性信号的。一个以 T_0 为周期的时间信号函数 $f(t)$ ，在 $[-\frac{T_0}{2}, \frac{T_0}{2}]$ 上能够展开成傅氏级数。 $f(t)$ 的傅氏级数的指数形式为：

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n e^{j\omega_n t} \quad (2.2-1)$$

$$C_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) e^{-j\omega_n t} dt \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2-2)$$

$$\omega_n = n\omega_0 = \frac{2n\pi}{T_0} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2-3)$$

$$C_n = |C_n| e^{-j\varphi_n} \quad (2.2-4)$$

$$\text{令 } A_n = 2|C_n| \quad (2.2-5)$$

则 A_n 是周期性函数 $f(t)$ 的第 n 次谐波振幅， φ_n 是 n 次谐波相角。按 $|C_n| - \omega_n$ 关系画出的图叫做振幅频谱图，按 $\varphi_n - \omega_n$ 关系画出的图叫做相位频谱图。这两个图完整地表示了信号的频谱特性。

对周期性信号， n 、 ω_n 取离散值时，对应的 A_n 、 φ_n 也为离散值，因此周期性信号的频谱是离散频谱，有时也称线频谱。

【例2.2-1】 分析周期性矩形脉冲的频谱，信号如图2-2所示。

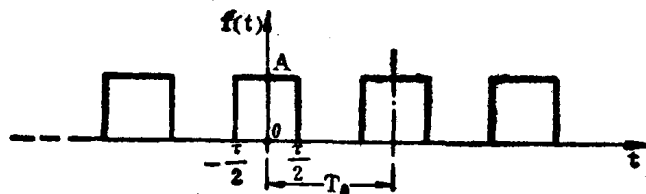


图 2-2 周期性矩形脉冲

解：设矩形脉冲的周期为 T_0 ，在一个周期内的表达式为：

$$f(t) = \begin{cases} A & -\frac{\tau}{2} \leq t < \frac{\tau}{2} \\ 0 & \text{其他}t \end{cases}$$

由 (2.2-2) 式得:

$$C_n = \frac{A\tau}{T_0} \frac{\sin \omega_n \frac{\tau}{2}}{\omega_n \frac{\tau}{2}} \quad (2.2-6)$$

由 (2.2-1) 式得:

$$f(t) = \frac{A\tau}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \omega_n \frac{\tau}{2}}{\omega_n \frac{\tau}{2}} e^{j\omega_n t} \quad (2.2-7)$$

这是傅氏级数的指数形式, 频率在 $(-\infty, +\infty)$ 内, 有负频出现。把它转换成三角级数形式:

$$f(t) = \frac{A\tau}{T_0} + \frac{2A\tau}{T_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \omega_n \frac{\tau}{2}}{\omega_n \frac{\tau}{2}} \cos \omega_n t \quad (2.2-8)$$

在 (2.2-8) 式中, 频率在 $(0, +\infty)$ 内, 没有负频出现。(2.2-7) 式中负频的出现完全是数学上的演变引进复数而造成的。傅氏级数的指数形式和三角级数形式可以相互转换, 是同一周期函数的两种不同表示方法。

在 (2.2-6) 式中, C_n 由 $\frac{\sin x}{x}$ 型函数表示, 这是一个常用的函数, 叫做抽样函数。记作:

$$S_s(x) = \frac{\sin x}{x}$$

抽样函数波形表示在图2-3中。

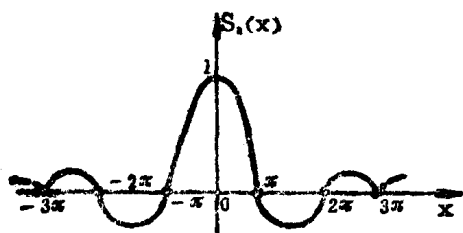


图 2-3 $S_s(x)$ 函数波形

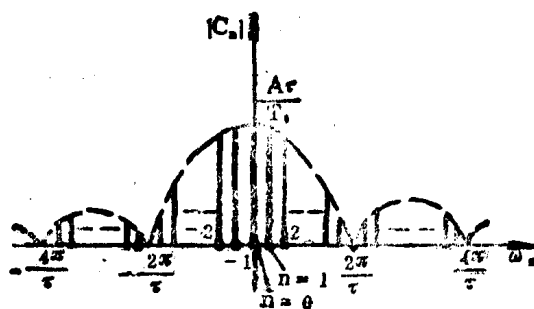


图 2-4 周期矩形脉冲的振幅频谱

函数 $S_s(x)$ 波动在纵轴两侧以周期 2π 起伏, 振幅向两侧逐渐衰减。在 $x = \pm\pi, \pm 2\pi,$

……等处出现零值，常称 $x = \pm\pi$ 为第一过零点。当 $x \rightarrow 0$ 时， $S_1(x) \rightarrow 1$ ；当 $x \rightarrow \infty$ 时， $S_1(x) \pm 3\pi \rightarrow 0$ 。

由 $S_1(x)$ 的性质可得到周期矩形脉冲的振幅频谱（以后相位频谱特性从略），如图2-4所示。

我们看到：周期性矩形脉冲序列的能量大部分集中在频谱特性的第一过零点范围内。

二、傅氏积分

对于非周期性函数，要用傅氏积分。非周期性函数 $f(t)$ 的傅氏积分的指数形式为：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.2-9)$$

式中：

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.2-10)$$

式中 $f(t)$ 代表时间信号的波形， $F(\omega)$ 称为 $f(t)$ 的频谱函数。已知信号 $f(t)$ ，用(2.2-10)式去计算频谱函数 $F(\omega)$ ，这种计算过程称为傅氏变换，记为：

$$F[f(t)] = F(\omega)$$

由(2.2-9)式用 $F(\omega)$ 求 $f(t)$ 叫傅氏反变换，记作：

$$F^{-1}[F(\omega)] = f(t)$$

这两种变换组成傅氏变换对，记作：

$$f(t) \longleftrightarrow F(\omega)$$

(2.2-10)式说明频谱函数为连续和（即积分）形式，所以非周期性函数的频谱是连续频谱。 $F(\omega)$ 一般是复函数，所以也有 $|F(\omega)|$ — ω 振幅频谱和 $\varphi(\omega)$ — ω 相位频谱。

【例2.2-2】分析单矩形脉冲的频谱，如图2-5(a)所示。

解：

$$f(t) = \begin{cases} A, & -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & \text{其他}t \end{cases}$$

$$F(\omega) = A\tau \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} = A\tau S_1\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \quad (2.2-11)$$

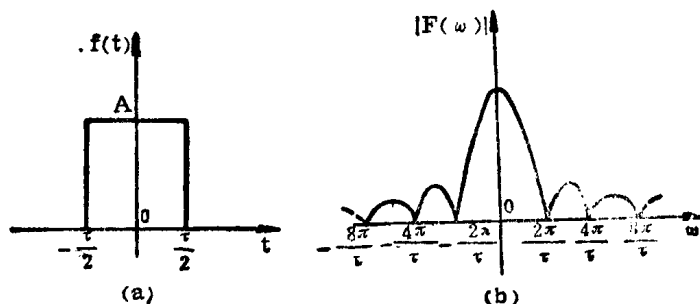


图 2-5 单个矩形脉冲及其振幅频谱
(a) 单脉冲波形； (b) 振幅频谱

振幅特性如图 2-5 (b) 所示, 它是连续频谱图。总的趋势是 ω 高时振幅比较小, 而在

$$\omega = \frac{2n\pi}{\tau} \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2-12)$$

处是零点。第一过零点在 $\frac{2\pi}{\tau}$ 处。我们看到单脉冲的能量集中在第一过零点以内。

傅氏变换的一个重要性质是频率搬移特性, 这种特性称为调制定理。频谱搬移通常是将信号 $f(t)$ 乘以正弦型波实现的。设 $f(t)$ 与 $F(\omega)$ 是傅氏变换对,

$$\begin{aligned} f(t)\cos\omega_0 t &= \frac{1}{2}[f(t)e^{j\omega_0 t} + f(t)e^{-j\omega_0 t}] \\ F[f(t)\cos\omega_0 t] &= \frac{1}{2}\{F[f(t)e^{j\omega_0 t}] + F[f(t)e^{-j\omega_0 t}]\} \\ &= \frac{1}{2}[F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)] \end{aligned} \quad (2.2-13)$$

式中 $F(\omega - \omega_0)$ —— 在正频域内的频谱搬移;

$F(\omega + \omega_0)$ —— 在负频域内的频谱搬移。

(2.2-13) 式也可写成,

$$f(t)\cos\omega_0 t \longleftrightarrow \frac{1}{2}[F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)] \quad (2.2-14)$$

这是说明信号 $f(t)$ 在时域上乘以 $\cos\omega_0 t$, 转换到频域上来分析是将原信号频谱向左右两侧分别搬移 ω_0 , 这就是调制定理的内容。这里仅是将频谱移动了, 而频谱的形状完全不变, 只是幅值按比例乘一个系数, 这叫做线性调制。图 2-6 上就说明了线性调制原理。

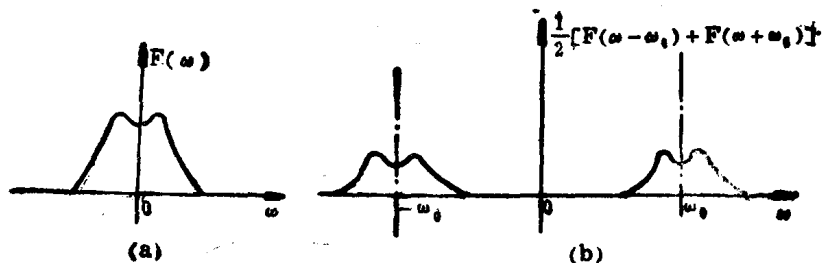


图 2-6 线性调制原理图
(a) 原信号频谱; (b) 调制后的信号频谱

三、冲激函数

冲激函数又叫 δ 函数, 在信号分析中是很有用的函数。

(一) 时域上的 δ 函数

单位冲激函数的定义是:

$$\delta(t - t_0) = 0 \quad t \neq t_0 \quad (2.2-15)$$

和

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \quad (2.2-16)$$