



高等学校教材

计算机继电保护原理与技术

华中理工大学 陈德树 主编



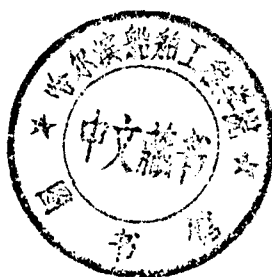
TM588
C38

360750

高等学校教材

计算机继电保护原理与技术

华中理工大学 陈德树 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号

EA15/25

内 容 提 要

本书主要介绍计算机继电保护的基本构成原理和实现技术,包括计算机保护的硬件结构、数字信号处理、计算方法、提高可靠性措施,以及计算机距离保护、发电机保护和变压器保护的若干实际应用等。本书作为高等学校电力系统及其自动化专业以及相近专业本科生和研究生的教材,亦可供从事继电保护专业工作的工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材

计算机继电保护原理与技术

华中理工大学 陈德树 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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 250千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数 0001—5110 册

ISBN 7-120-01571-0/TM·443

定价3.00元

前 言

本书是根据能源部一九九〇～一九九二年高等学校教材编审出版计划编写的教材，适用于电力系统及其自动化专业，作为研究生的选修课教材，也可将部分内容作为本科生选修课教材使用。

本书是在1987年初编者为湖北省电力局举办的计算机继电保护研究班编写的同名讲义的基础上修改补充而成的（其中第七、八、九章是新增加的）。该讲义曾先后在湖北、山东、广西、广东等地的电力部门和高等学校举办的计算机继电保护研究班、学习班上使用过，并曾多次在华中理工大学作为研究生和本科生的选修课教材讲授。在使用过程中，广大读者对该讲义提出过许多很好的意见。东南大学的史世文教授在审阅该讲义后，也曾提出过许多宝贵的意见。这些对完善这本教材有很大的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

全书共分九章。第二、三、五、六、八、九章由尹项根编写，第一、四、七章由陈德树编写，并由陈德树担任全书主编。全书承天津大学贺家李教授审阅，并提出了许多宝贵意见，特此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

一九九一年元月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 计算机继电保护的发展	1
第二节 计算机继电保护的基本构成	2
第三节 对计算机继电保护的估价	4
第二章 输入信号的预处理	6
第一节 概述	6
第二节 采样定理与前置模拟滤波	6
一、离散时间信号序列	6
二、离散时间序列的频谱特性	9
三、采样定理及叠混现象	11
四、前置模拟低通滤波	12
第三节 模拟量的变换与离散化	14
一、输入模拟信号电平变换	15
二、采样基本原理	15
三、理想采样	15
四、采样方式	17
五、采样保持	19
第四节 模数(A/D)转换原理	21
一、模数转换的原理和方式	21
二、模数转换器的主要技术指标	26
第五节 数字信号的数据更新与排队	26
一、暂存区扩展法	27
二、字节地址偏移循环存取法	28
三、循环记忆法	28
第三章 数字滤波	29
第一节 概述	29
第二节 数字滤波的基本前提与特性	30
一、电力系统故障频谱	30
二、数字滤波器的主要性能指标	31
第三节 简单滤波单元及其级联滤波	32
一、简单滤波单元的前提和基本原理	32
二、基本形式及其特性	33
三、简单滤波单元的組合	37

第四节 用零、极点配置法设计数字滤波器	39
一、零、极点对系统频率响应的影响	39
二、零、极点配置方法	41
三、全零点滤波器	43
四、狭窄带通滤波器	44
第五节 设计数字滤波器的经典方法	45
一、IIR滤波器的设计方法	45
二、FIR滤波器的设计方法	49
第四章 算法	54
第一节 概述	54
第二节 正弦函数模型的算法	55
一、最大值算法	55
二、半周积分算法	56
三、Mann-Morrison导数算法	57
四、Prodar-70算法	58
五、采样值积算法	59
六、关于算法的频率响应	62
七、与信号频率无关的三采样值算法	66
第三节 周期函数模型的算法	66
一、正交样品函数之一——傅氏算法	67
二、正交样品函数之二——沃尔什函数算法	68
三、傅氏算法的频率响应	71
四、衰减直流分量的影响	74
第四节 随机模型的算法	78
一、狭窄带通滤波加纯正弦模型算法	79
二、最小二乘滤波算法	79
三、卡尔曼滤波算法——最佳线性估计	81
第五节 输电线路简化物理模型的阻抗算法	85
一、R-L模型的微分方程算法	85
二、R-L模型的积分方程算法	87
三、单 π 模型的微分方程算法	88
第六节 继电器动作方程的采样值算法	89
第五章 微机保护装置的硬件典型结构	91
第一节 概述	91
第二节 插件式结构	91
一、总线形式	92
二、配线形式	92
第三节 CPU插件及人机对话辅助插件	93
一、CPU插件	93
二、人机对话辅助插件	98
三、定值调整的有关问题	98

第四节 数据采集系统及有关插件	100
一、模拟输入变换插件	100
二、前置模拟低通滤波插件	102
三、采样及A/D转换插件	102
第五节 开关(数字)量输入输出系统及有关插件	104
一、开关(数字)量I/O接口插件	105
二、继电器插件	105
第六章 提高微机保护装置可靠性的措施	109
第一节 概述	109
第二节 干扰和干扰源	110
一、干扰源	110
二、干扰形式	110
三、干扰的耦合途径	111
四、干扰对微机保护装置的影响	113
第三节 防止干扰进入微机保护装置的对策	114
一、接地的处理	114
二、屏蔽与隔离	115
三、滤波、退耦与旁路	116
四、对供电电源的要求	116
五、合理地分配和布置插件	117
第四节 抑制窜入干扰影响的软、硬件对策	117
一、采样数据的干扰辨识	117
二、防止程序运行出轨的对策	117
三、处理过程的校核措施	118
第五节 装置故障的自动检测技术	120
一、CPU的检测	120
二、A/D转换器的检测	121
三、EPROM芯片的检测	121
四、RAM芯片的检测	122
五、出口通道的检测	123
六、成组功能的检测	123
第六节 系统容错设计的概念	123
一、静态冗余法	124
二、动态冗余法	124
三、混合冗余法	125
第七节 软件可靠性问题	126
一、软件研制的特点和要求	126
二、提高软件可靠性的措施	127
第七章 计算机距离保护	129
第一节 保护功能计算基础	129
一、时差与移相算法	129

二、复数求模的近似算法	130
三、负序分量计算方法	131
四、比相式判据的计算方法	132
五、闭锁角或动作角的计算方法	133
第二节 阻抗与故障距离测量	134
一、测量阻抗式阻抗元件	134
二、按动作方程直接运算的阻抗元件	135
三、测距式阻抗元件	136
第三节 过渡电阻对阻抗(测距)元件影响的对策	136
一、微分方程法	137
二、自适应式接地电抗元件	137
三、 I_0 极化的电抗元件的改进	138
第四节 故障类型与相别判别	140
一、接地与否判别	140
二、单相接地判别	140
三、两相接地短路相别判别	142
四、三相短路判别	142
五、两相短路相别判别	142
第五节 计算机距离保护中的振荡闭锁	143
第六节 本线路第二段保护范围内短路的加速跳闸(相继速动)问题	143
第八章 计算机发电机保护	145
第一节 概述	145
第二节 计算机发电机纵差动保护	145
一、采样瞬时值纵差保护	145
二、基波相量纵差保护方案	146
三、纵差保护方案的改进措施	147
第三节 定子绕组不对称故障保护	147
第四节 定子绕组接地故障保护	149
第五节 发电机失磁保护	150
一、失磁保护方案举例	151
二、有关的算法	152
三、防误动措施	153
第九章 计算机变压器保护	154
第一节 概述	154
第二节 计算机变压器保护的特点	154
第三节 计算机变压器差动保护	156
一、计算机变压器差动保护的原理和算法	156
二、计算机变压器差动保护的软件流程	159
三、计算机变压器差动保护中的新原理和新算法	161
第四节 计算机变压器过励磁保护	166
参考文献	169

第一章 概 述

第一节 计算机继电保护的发展^[E1~E9]

近三十年来, 数字式电子计算机(简称计算机)技术发展很快。计算机的应用已广泛而深入地影响着科学技术、生产和生活的各个领域。它给各部门的面貌带来了巨大的并且往往是质的变化。计算机技术同样影响到继电保护技术的发展。

计算机除用作故障分析和保护动作性能分析外, 1965年开始就有人倡议用计算机构成继电保护。70年代, 计算机继电保护的研究工作主要是作理论探索(特别是算法研究、数据适配、数字滤波)及在试验室作样机试验, 只有个别单位作了一些现场试验。在这个阶段, 人们企图用一台小型计算机实现多种保护功能或保护多个电气设备。因为一台小型计算机的价格较原有的模拟式保护装置的价格高一个数量级以上。如果不能做到一机多用, 且性能特别优越, 则计算机保护就很难为人们所接受。由于要求一机多用和保护动作速度快, 这就要求计算机在极短时间内能处理大量的信息, 因而对计算机的要求又往往超出一般小型机的能力。在一个变电所内采用大、中型计算机显然是很不经济的。这是摆在当时继电保护工作者面前的主要矛盾和必须研究的问题。

在70年代初、中期, 计算机本身出现了重大突破, 大规模集成电路技术飞速发展, 微型处理器和微型计算机进入了实用阶段, 而且价格大幅度下降, 可靠性又大为提高, 这就促使计算机保护的研究出现了热潮。七十年代中、后期国外已有少数样机在电力系统中试运行。微型计算机保护逐渐趋于实用。

在计算机继电保护技术的发展过程中, 有些事件具有特别的意义。

1965年初, 英国剑桥大学的 P.G.McLaren 等提出利用采样技术实现输电线路的距离保护。接着, 1966年下半年, 澳大利亚新南威尔士大学的 I.F.Morrison 预测了输电线路和变电所采用计算机控制的前景, 包括计算机用作继电保护的前景, 接着他们进一步进行了计算机式保护的理论研究, 主要研究适用于继电保护的各种算法。

1969年前后, 美国西屋公司的 G.D.Rockefeller 等开始进行具体装置的研制, 并于1972年发表该装置的试运行样机的原理结构与现场试验结果。这是第一套比较完整的用于现场的计算机继电保护样机, 它具备了计算机保护的基本组成部分。

1972年7月, 在P.G.McLaren的指导下, 剑桥大学的G.K.Lagcock完成了一篇以计算机距离保护为研究课题的博士论文, 主要研究计算机保护中的信息处理技术。1977年英国巴士(Bath)大学的 M.A.Martin 又以计算机保护为题发表了他的博士论文, 主要是研究有限变换的频谱分析方法, 以缩短超高压长线路的计算机距离保护的动作时间。

自70年代初出现大规模集成电路后, 很快就为计算机式保护所应用。1975年初发表了英国 GEC 公司的 P.B.Allison 和 T.H.Lomas 的文章, 报导了他们用微处理机作为变电所的控制与自动重合闸的情况。

1977年日本人投入了一套以微处理机为基础的控制与继电保护装置，全部代替了老的设备，大大减少了变电所控制室的占地，并于1980年初发表了试运行的结果。

从70年代后半期至80年代初，各国都在这些方面继续作了很多努力，使计算机保护逐渐趋于实用。现在，不仅在国外，在我国国内也已有一些微机保护投入试运行和正式运行。国外一些厂商已有正式产品出售。我国一些继电器厂家也已出产一些正式装置供运行部门使用。

我国对计算机继电保护的研究从70年代后半期开始。开始是几个高等学校和水电部南京自动化研究所的一些继电保护工作者对国外计算机继电保护的发展作了广泛的介绍和综述分析。70年代末至80年代初则广泛地开展各种算法以至样机的研制。1984年上半年，华北电力学院研制的第一套以6809 (CPU) 为基础的距离保护样机投入试运行。1984年底在华中工学院召开了我国第一次计算机继电保护学术会议。标志着我国计算机保护的开发开始进入了重要的发展阶段。后来又有更多的高等学校作了许多探索。目前，已有多种样机在试运行和陆续正式投入运行，这预示着我国计算机继电保护技术的蓬勃发展。

第二节 计算机继电保护的基本构成

本节将简略地介绍用计算机构成继电保护的方法。计算机保护的主要部分是计算机本体，它被用来分析计算电力系统的有关电量和判定系统是否发生故障，然后决定是否发出

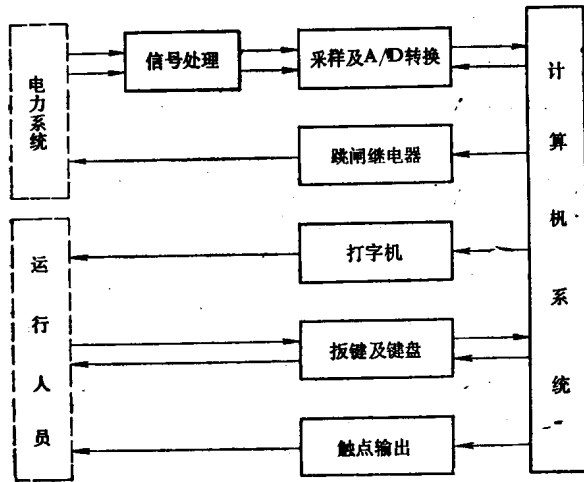


图 1-1 计算机保护的总框图举例

跳闸信号。因此，除计算机本体外，还必须配备自电力系统向计算机送进有关信息的输入接口部分和向电力系统送出控制信息的输出接口部分。此外计算机还要输入有关计算和操作系统，输出记录的信息，以供运行人员分析事故，即计算机还必须有人机联系部分。图 1-1 是早期的计算机保护的总框图。从框图可以看出计算机保护的基本构成。

关于计算机硬件，在有关课程中有专门的讲述，这里只对与电力系统联系的出入口部分作一些说明。

与一般的晶体管保护类似，计算机保护也是一个对电磁干扰很敏感的设备。为了防止来自电流、电压输入回路的干扰，在引入电流互感器CT和电容式电压互感器PT的电流、电压时，在输入信号处理部分装设一些起隔离、屏蔽作用的变换器 T_1 和 T_2 ，它除起屏蔽作用外，还将输入的电流、电压的最大值变换成计算机设备所允许的最大电压值(例如 $\pm 5V$)。此外还在变换器原边绕组两端跨接一个电容，输入导线对地也加装一个电容，以吸收随导线而来的干扰，并在每个变换器之后，为满足采样的需要还要经过一个低通滤波器 f ，然后

输入计算机的采样及A/D(模/数)变换部分。计算机保护的电压形成与低通滤波器回路如图1-2所示。

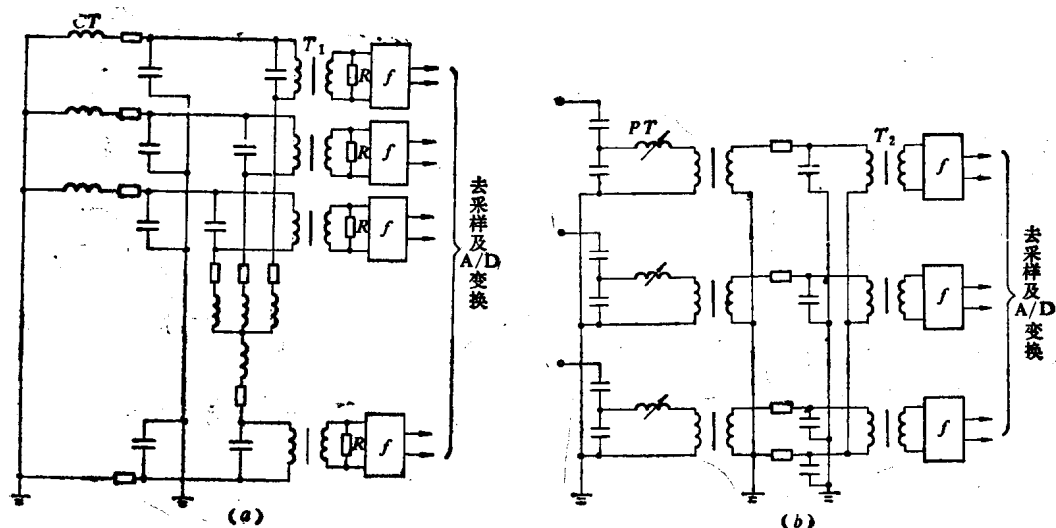


图 1-2 电压形成与低通滤波器回路

(a) 电流互感器回路; (b) 电压设备回路

根据采样定理:“如果被测信号频率(或信号中要保留的最高次谐波频率)为 f_s ,则采样频率 f_s (每秒钟的采样次数)必须大于 f_s 的2倍,否则,就不可能由采样值拟合还原成原来的曲线”。因此,在出现大于 $\frac{1}{2}f_s$ 频率的谐波,而且这些谐波又是无用的情况下,有必要在信号引进采样器以前装设一模拟式低通滤波器将频率等于和高于 $\frac{1}{2}f_s$ 的高次谐波滤掉。

数字式电子计算机的基本功能是进行数值及逻辑运算。为了让计算机从电力系统的状态量的情况来判定电力系统是否发生故障,就必须将电压互感器和电流互感器送来的电压、电流的模拟量变成数字量。这就需要经过“采样”及“模/数转换”两个环节,即在时间上离散化和在量值上离散化。

键盘和扳键以及数码管、信号灯等部分,用以送入整定值,召唤打印,临时察看程序,对数据或程序作临时修改,信号灯和数码管则用以显示程序、数据和保护装置的动作情况。

当实时的采样数据送入计算机系统后,计算机根据由给定的数学模型编制的计算程序对采样数据作实时的计算分析、判断是否发生故障,故障的范围、性质,是否应该跳闸等等。然后决定是否发出跳闸命令,是否给出相应信号,是否应打印结果等等。

保护的不同的动作原理和特性,主要是通过数学模型相对应的程序来实现的,因此,计算机继电保护的程序是多种多样的,但也有一些基本的、共同的特点。

第三节 对计算机继电保护的估价

从计算机保护的创议开始，一直到现在，都不断有人对它的发展、前途和优缺点等作出评述与估计。其中以美、英、日等国的分析较为全面。一般认为，计算机保护的优缺点如下。

优点：

- (1) 程序可以实现自适应性，可依系统运行状态而自动改变整定值和特性；
- (2) 有可存取的存储器；
- (3) 在现场可灵活地改变继电器特性；
- (4) 用数学方程方法较之用继电器元件特性方法可以使保护性能得到更大的改进；
- (5) 有自检的能力；
- (6) 有利于事故后分析；
- (7) 可与计算机交换信息；
- (8) 对现有硬件可增加其功能；
- (9) 可在低功率传变机构内工作。

缺点和问题：

- (1) 与传统的保护有根本性的背离；
- (2) 使用者较难维护；
- (3) 对硬件和软件都要求高度可靠；
- (4) 硬件很快地变成过时；
- (5) 在操纵和维护过程中，使用人员较难掌握。

愈来愈多的人认为，应该用微型机且与全变电所计算机控制作整体考虑。同时要用二重化、自检测等措施提高可靠性，而对丧失保护功能、丧失A/D变换功能等故障要研究对策，对运行维护人员要进行专门训练，此外还应研究便于检查的标准化程序。

计算机保护与半导体保护和电磁型保护的性能比较见表1-1。

表 1-1 计算机保护与半导体保护和电磁型保护的性能比较

性 能	半 导 体 式	计 算 机 式	电 磁 型
动作速度	可以高速	可以高速	一般稍慢
选择性	较电磁型易获得各种特性	较电磁型易获得各种特性	为高灵敏度和防止误动要花大功夫
输入波形异常	可能误动，要模拟滤波	要模拟及数字滤波	较左两者优越
耐浪涌	要慎重考虑	用LSI时，能力特弱	强
自动更改定值	难	可集中管理	难
可靠性	附加自检系统较电磁型强	要检测系统	高
盘面积	与电磁型大体相同(要另外电源)	较其他小	最大
经济性	同电磁型	可能提高经济性	——
检测监视	容易	最容易	复杂

计算机保护的优缺点一方面决定于技术本身，另一方面与各国的技术经济发展状况有关。例如，计算机继电保护对现有继电保护维护运行人员来说是完全不熟悉的，在计算机、微型机比较发达的国家来说比较容易克服，但对技术落后的国家来说，要普遍使用则是一个大问题。虽然如此，但技术本身的优缺点却仍是客观存在的。

计算机在技术上的两个重要优点，正在逐步引起重视。一个是它的良好记忆存储能力，一个是它的强大的运算能力。

利用计算机的记忆能力，可以方便地获取故障分量并保持较长的时间且有较好的准确性。而在模拟式保护装置，其记忆功能主要靠电感、电容元件的“惯性”来实现存储的，而这些“惯性的存储”是随时间而衰减的。因此要定量地利用所记忆的电量来准确地获取故障分量是不容易的。

利用计算机的强有力的运算能力，可以将自动控制理论方面的一些成果引入继电保护。如自适应控制、随机控制以及模糊控制等等。由于这些理论的应用，可以使继电保护的動作特性得到一些根本上的改进。这方面的发展还刚刚引起重视和初步的应用。

第二章 输入信号的预处理

第一节 概 述

电力系统中的电量显然都是模拟量，而数字继电保护的实现则是基于由微型计算机对数字量进行计算和判断。所以，为了实现计算机继电保护，必须对来自被保护设备和线路的模拟电量进行一系列预处理，从而得到所需形式的数字量提供给保护功能处理程序。

由电力系统输入到继电保护装置的模拟信号主要有两类，一类是来自 PT (或 CT) 的交流电压 (或电流) 信号，另一类是来自分压器 (或分流器) 的直流电压 (或电流) 信号。这些信号首先被转换到与微型计算机相匹配的电平，通过模拟滤波削去其中的高频成分，然后由采样保持环节将连续信号离散化。由于输入信号往往不止一个，故由多路转换器逐个交给 A/D 转换器变为数字量。这些数字量还应在存储器中按先后顺序排列以方便功能处理程序取用。上述全部步骤就是输入信号的预处理过程，如图 2-1 所示。

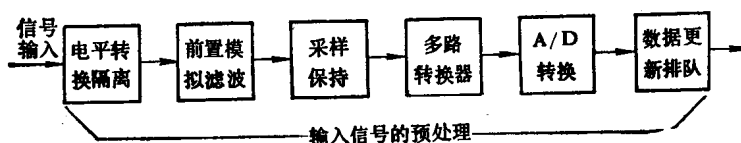


图 2-1 输入信号预处理流程框图

信号预处理中，还包括隔离和抑制随有用信号窜入的干扰，这对于提高保护装置的可靠性非常重要。设计信号预处理部分时，对此应作全盘考虑，采取合理措施，这一点将在第六章里进行专门讨论。

还有一类信号，如来自断路器、隔离刀闸等设备辅助接点以及其它继电器接点的开关量信号，或者来自别的微机保护或数字设备的数字量信号。这些信号通过干扰隔离环节，可由输入输出接口直接进入微机。本章主要讨论前一类模拟量信号的预处理。

第二节 采样定理与前置模拟滤波

一、离散时间信号序列

离散时间信号就是仅仅在离散的采样时刻上定义的信号。一般来说，采样是等间隔的，即 $t = nT_s$ ， T_s 是各相邻采样时刻之间的时间间隔。离散时间信号可以用一个时间-数的序列 (或简称序列) x 来表示，序列中的第 n 个数可记为 $x(n)$ ，如图 2-2 所示。因此序列 x 可用下式表述

$$x = \{x(n)\}, \quad -\infty < n < +\infty \quad (2-1)$$

这种无限序列可以对应于电力系统运行中的各种电量信号序列。在多数情况下，我们更关心在一个有限时间段（如从故障发生到故障切除时间段）内的信号。一个有限长序列的一般表达式为

$$x = \{x(n)\}, N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2-2)$$

$$\text{或 } x = \{x(nT_s)\}, N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2-3)$$

式(2-2)既适用于等间隔采样，也适用于不等间隔采样，而式(2-3)只适用于等间隔采样。在以后的讨论中假定 $\{x(n)\}$ ，或简记为 $x(n)$ ，均表示等间隔采样。

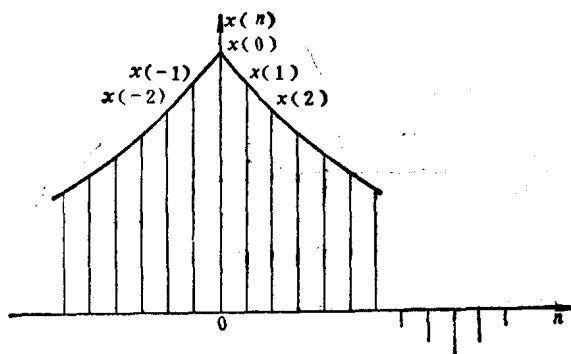


图 2-2 时间-数序列

数字式继电保护中的时间序列通常都是对模拟信号的连续波形采样而获得的。通过对图2-3(a)中的 $x(t)$ 进行等间隔采样，就可以得到图2-3(b)所示的序列。但要注意，一经得到序列，在相邻整数 n 之间的非整数值上， $x(n)$ 根本没有意义，而不能认为 $x(n)$ 在那里等于零。

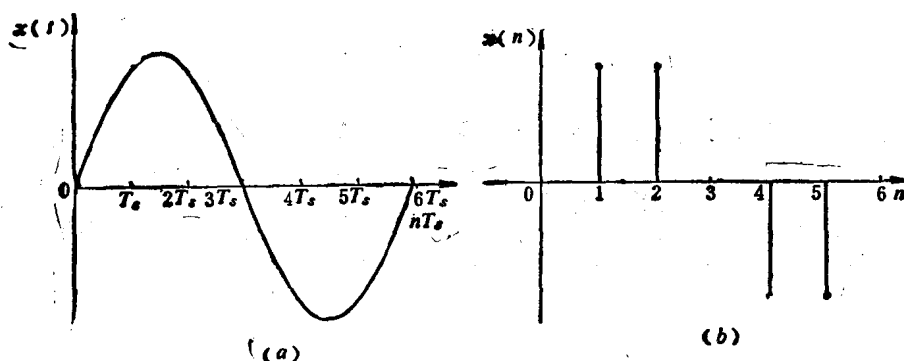


图 2-3 连续模拟信号及其采样
(a) $x(t)$ 曲线；(b)对 $x(t)$ 的采样序列 $x(n)$

下面是一些常见序列及序列的简单运算规则。

(1) 单位样本序列 $\delta_0(n)$ 它的定义为(参看图2-4)

$$\delta_0(n) = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

这个序列在离散时间序列分析中的作用与在连续时间系统分析中的狄拉克函数 $\delta(t)$ 的作用相似，不同之处在于单位样本序列（或称单位冲激函数序列）是一个脉冲信号，而 $\delta(t)$ 函数则是仅在广义函数意义下成立的一个函数。

(2) 单位阶跃序列 $u(n)$ 其定义为(参看图2-5)

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (2-5)$$

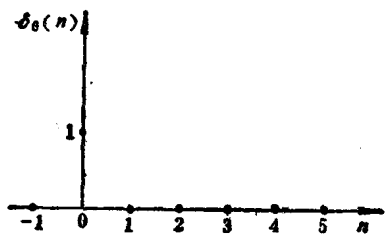


图 2-4 $\delta\delta(n)$ 序列

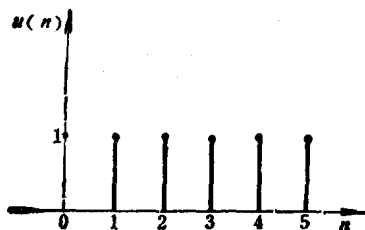


图 2-5 $u(n)$ 序列

$u(n)$ 与 $\delta\delta(n)$ 的关系为

$$u(n) = \sum_{k=-\infty}^n \delta\delta(k-n) \quad (2-6)$$

或者

$$\delta\delta(n) = u(n) - u(n-1) \quad (2-7)$$

(3) 线性增长和指数衰减序列 定义如下 (参看图2-6)

$$x(n) = \begin{cases} n, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (\text{线性增长序列}) \quad (2-8)$$

$$x(n) = \begin{cases} \alpha^n, & n \geq 0, \alpha < 1 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (\text{指数衰减序列}) \quad (2-9)$$

(4) 周期正(余)弦序列 余弦序列定义如下 (见图2-7)

$$x(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{N_s}\right) = \cos(\omega_s n) \quad (2-10)$$

式中 $\omega_s = \frac{2\pi}{N_s}$, 而 N_s 是整数。可以看出其周期为 N_s , 即

$$x(n) = x(n + mN_s), \quad m \text{ 为整数} \quad (2-11)$$

假如 N_s 不是整数, 而是一个有理分数, 该序列也将是一个周期性序列, 不过周期不同于 N_s 。

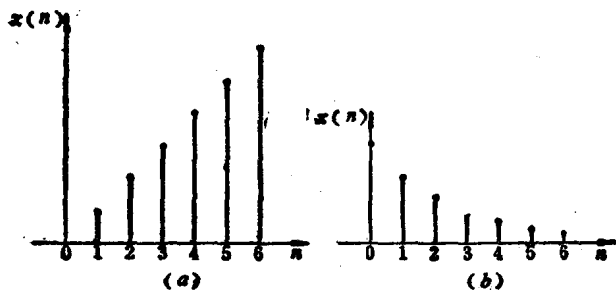


图 2-6 线性增长及指数衰减序列
(a) 线性增长序列; (b) 指数衰减序列

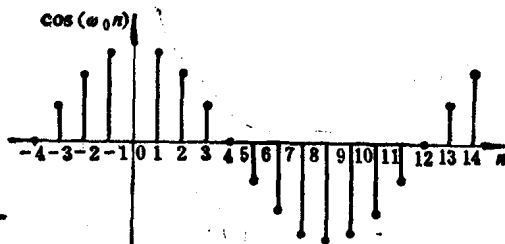


图 2-7 周期余弦序列

正弦序列定义可依此类推。

在离散信号及系统分析中, 需要用到序列的下列运算法则。

(1) 序列相加与相乘 两个序列的相加与相乘, 定义为两个序列中对应样本的相加与相乘, 即

$$x+y=\{x(n)+y(n)\} \quad (\text{相加}) \quad (2-12)$$

$$x \cdot y=\{x(n) \cdot y(n)\} \quad (\text{相乘}) \quad (2-13)$$

(2) 序列与常数相乘 序列与一个常数 α 相乘, 定义为序列中的每个样本都乘上 α , 即

$$\alpha \cdot x=\{\alpha \cdot x(n)\} \quad (2-14)$$

(3) 序列的时移 若序列 y 是序列 x 的时延序列, 时延为 n_0 , 则序列 y 可由下式表达

$$y(n)=x(n-n_0), \quad n_0 \text{ 为整数} \quad (2-15)$$

二、离散时间序列的频谱特性

分析连续时间信号的频谱特征常用傅立叶级数和傅立叶积分。前者用来分析周期性信号, 后者用来分析非周期信号。当引入 δ 函数后, 用傅立叶积分既可以分析非周期信号, 也可以分析周期信号。

运用傅立叶变换分析连续时间信号与其频谱的关系, 有下述结论: 一个非周期信号对应连续频谱; 一个周期信号对应于离散频谱, 谱线间隔宽度为 $\Omega=2\pi/T$, 或者 $f_0=1/T$, T 为基频周期。同样, 利用傅立叶变换的概念可以导出离散时间序列与频谱的关系。

设有一个持续时间有限的非周期信号 $f(t)$, 其频谱为 $F(\omega)$, $f(t)$ 与 $F(\omega)$ 都是连续函数。 $f(t)$ 是持续时间为 NT_0 的连续时间信号, $F(\omega)$ 是无限带宽的连续频谱密度函数, 如图 2-8 所示。

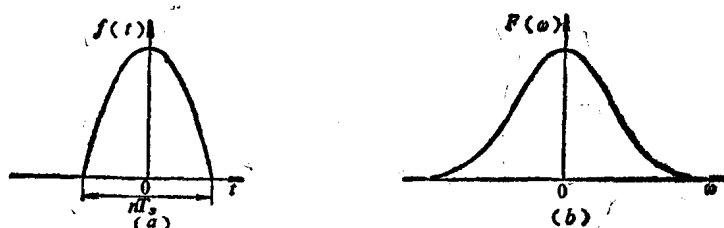


图 2-8 非周期信号及其连续频谱
(a) 连续时间信号 $f(t)$; (b) 连续频谱密度函数 $F(\omega)$

当以 NT_0 为周期无限重复 $f(t)$ 时, 可得到一个周期函数 $f_p(t)$ (下标 p 表示周期性)。 $f_p(t)$ 的频谱是离散的, 记作 $F^*(\omega)$ (上标 $*$ 表示离散化), 其谱线间隔为 $\Omega=2\pi/(NT_0)$, 如图 2-9 所示。这时 $f_p(t)$ 可用傅立叶级数表达, 即

$$f_p(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} D_k e^{jk\Omega t} \quad (2-16)$$

根据对周期函数进行傅氏变换的概念, 式 (2-16) 中,

$$D_k=\frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{+\frac{T_0}{2}} f(t) e^{-jk\Omega t} dt = \frac{F(k\Omega)}{T_0} \quad (2-17)$$