

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系系列精品教材



Foundation of Measurement and
Control Technology in
Mechanical Engineering

机械工程测控 技术基础

第②版

屠大维 赵其杰 王梅 ◎ 编著

双色印刷



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代机械工程系列精品教材

机械工程测控技术基础

第2版

屠大维 赵其杰 王 梅 编著



机械工业出版社

本书为“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

本书围绕机械工程测控技术,讨论信号分析、传感技术、系统特性、信号处理和计算机集成应用等问题,旨在形成一个较为完整、系统的知识和能力体系。全书共六章,前四章为信号、传感、系统特性、信号处理等方面的技术基础;第5章为计算机集成应用基础,介绍机械自动化系统中常用的计算机软硬件、通信、总线等基础知识;第6章为测控系统应用实例。

本书基本涵盖了机械工程测试技术、信号和传感技术等传统课程教学大纲的主要内容,在这一基础上强调测控系统集成应用。因此,本书既可以作为机械类专业、测控技术与仪器专业和其他相近专业本科高年级的教材,也可作为高校推行素质教育、工程教学改革的特色教材,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测控技术基础/屠大维,赵其杰,王梅编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2018.12

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
ISBN 978-7-111-61214-8

I. ①机… II. ①屠… ②赵… ③王… III. ①机械工程-计算机控制系统-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第243647号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 章承林 刘丽敏

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·418千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61214-8

定价:44.90元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

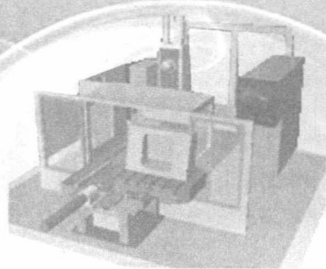
机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

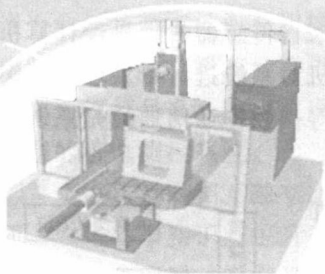
金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



目录

前言	
绪论	1
0.1 现代机械系统中的测控技术	1
0.2 本课程的学习内容和学习方法	2
第1章 信号及信号分析	4
1.1 概述	4
1.2 信号分类与描述	5
1.3 信号的时域分析	8
1.4 周期信号及其频域分析	13
1.5 非周期信号及其频域分析	21
1.6 随机信号及其分析	35
习题	51
第2章 传感技术基础	53
2.1 概述	53
2.2 传感器的分类与基本特性	54
2.3 机械式传感器	57
2.4 电阻传感器	58
2.5 电感传感器	70
2.6 电容传感器	77
2.7 压电传感器	83
2.8 磁电传感器	87
2.9 光电传感器	93
2.10 热电传感器	104
2.11 计数编码类传感器	110
2.12 图像传感器	117
2.13 微型、智能及网络传感器	121
习题	124
第3章 系统及系统特性分析基础	127
3.1 线性系统与常微分方程	128
3.2 系统传递函数	130
3.3 系统频率响应函数	135
3.4 系统脉冲响应函数	138
3.5 一阶、二阶典型系统特性分析	139
3.6 系统对任意输入的响应	147
3.7 系统不失真条件	148
3.8 系统负载效应	150
3.9 系统校正	151
3.10 系统的干扰源和抗干扰性设计	155
习题	157
第4章 信号处理基础	159
4.1 概述	159
4.2 模拟信号处理基础	160
4.3 数字信号处理基础	172
习题	191
第5章 计算机集成应用基础	193
5.1 概述	193
5.2 单片微控制器	194
5.3 数字信号处理器	198
5.4 嵌入式微处理器	203
5.5 可编程控制器	209
5.6 系统集成中的计算机接口技术	214
5.7 计算机通信原理与人机接口	217
5.8 计算机网络结构与网络协议	221
5.9 计算机测控系统集成体系结构	224
5.10 现场总线技术	228
习题	232
第6章 测控系统应用实例	234
6.1 物料自动分拣系统中的传感和系统集成	234
6.2 智能焊接机器人焊缝跟踪测控系统	241
6.3 电阻炉智能温度控制系统	249
6.4 虚拟仪器技术及其应用	258
习题	265
参考文献	267



绪 论

0.1 现代机械系统中的测控技术

现代机械种类繁多，但从其功能组成的角度看，不外乎由以下几个子系统组成：动力系统、传动系统、执行系统、检测和控制系统，如图 0-1 所示。动力系统是指动力机（或原动机）及其配套装置，是机械的动力源，常有旋转/直线电动机、液压马达、气动马达、液压缸、气缸等。传动系统是将动力机的动力和运动传递给执行系统的中间装置，具有实现变速、传递转矩、改变运动规律和动力传递方式等作用。执行系统一般处于机械系统的末端，直接与作业对象接触，它是利用机械能来改变作业对象的性质、状态、形状或位置达到预定要求的装置。检测和控制系统是指通过检测元件获取相关信号（信息），通过一定的处理和算法，经控制器输出控制信号，改变控制对象工作参数或运行状态的装置。传统机械系统以物质和能量的传递和变换为主；在现代机械系统中，信息流的作用日益显现，并与机械系统的其他各个子系统都有关（见图 0-1）。现代机械测控系统是以信息获取、信息变换和处理为主的系统。测控系统对机械自动化系统来说具有举足轻重的地位和作用。

随着电子技术、计算机技术，特别是微电子技术和信息技术的发展，现代先进机械系统已成为融合机械技术、微电子技术、计算机和信息处理技术、自动控制技术、传感与检测技术、伺服驱动技术、人工智能等现代高新技术为一体的高级综合智能机械系统。在这一智能系统中，微型

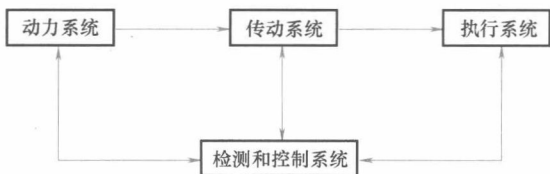


图 0-1 现代机械系统的组成

计算机具有独特的作用。一方面，在各种数字化运算和智能算法的支持下，测控系统成为智能测控系统；另一方面，对于整个机械系统来说，计算机因具有多通道、高运算速度、大存储量等特点而处于信息中心地位，发挥了系统集成作用，如图 0-2 所示。图 0-2 中前向通道是信息输入通道，包括模拟和数字通道，是微型计算机与测量装置相连接的单元，各种传感器的输出经前向通道信号调理变成满足微型计算机输入要求的信号后，输入到计算机；后

向通道是系统的伺服驱动控制单元，大多数需要功率驱动，是将来自传感器的信息经计算机处理后输出给执行机构的通道；人机交互通道是操作者通过计算机对系统进行干预以及了解系统运行状态和运行结果的单元，主要有键盘、显示器、打印机等；数据通信通道是系统通过计算机与其他系统间交换信息的接口，通常是串行通信口。

近年来，随着计算机网络技术的发展，机械系统无论是内部的各个组成部分和环节之间，还是与外部系统的交流、交互，网络的作用越来越明显。机械系统通过网络形成了内部、外部相互依存的信息集成化大系统。出现了网络传感器、分散

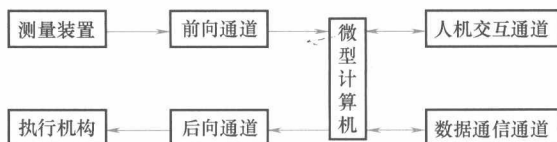


图 0-2 智能机械系统中的智能测控系统

控制系统（DCS）、现场总线控制系统（FCS）等新技术。在这一大系统中，多种不同型号的计算机、控制器、传感器和执行器，在不同的层次上进行着纵横交叉的数据通信。以 FCS 为例，图 0-3 所示为 FCS 体系结构，整个网络分主站级和现场级两个网络层，处于现场级网络的传感器和执行器通过链路设备同位于主站级网络的工作站相连接。通过网络把成百上千以至上万台设备变成网络节点，并把它们连接起来相互沟通信息，共同完成测量控制任务。在这一系统中，测量设备和控制设备可以不断扩展，而且加入的设备越多，系统的能力越强。

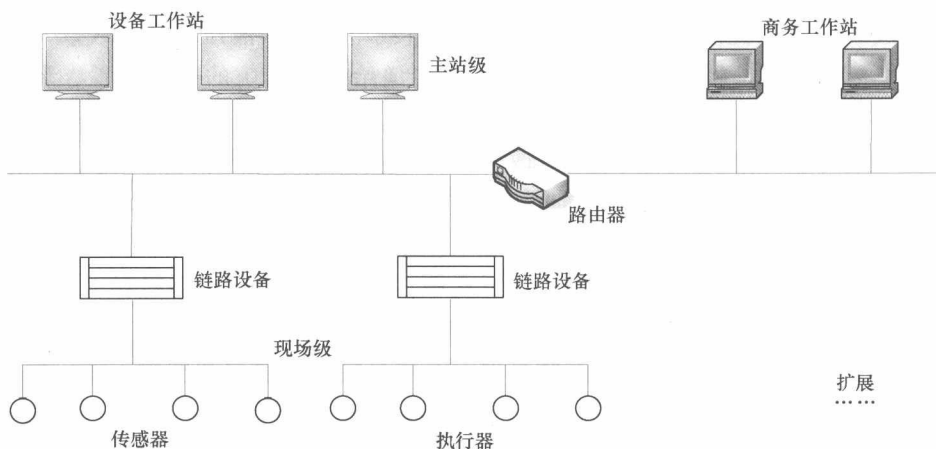


图 0-3 FCS 体系结构

因此，可以说检测、传感、信号处理、计算机、网络、总线等是现代机械测控系统的技术基础，而牢固树立系统集成应用的概念是工程实践的需要。

0.2 本课程的学习内容和学习方法

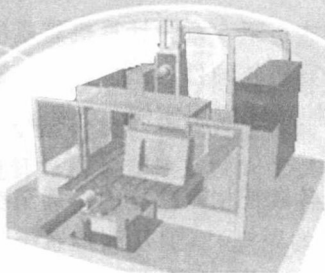
全书共六章。第 1 章为信号及信号分析，主要从数学描述上认识信号，介绍信号的基本概念和信号分析的基本原理；第 2 章为传感技术基础，主要从物理上获取信号，介绍机械系统应用中典型的传感器工作原理及其特点和应用特性；第 3 章为系统及系统特性分析基础，将具体的测控系统抽象为系统，从系统观念出发分析研究一般系统和典型系统的特性；第 4



章为信号处理基础,介绍模拟信号处理和数字信号处理的基本方法;第5章为计算机集成应用基础,从测控系统计算机集成应用的需要出发,介绍常用的计算机软硬件、通信、总线等基础知识,是系统集成应用的“大脑”和“神经”;第6章为测控系统应用实例,介绍几个典型的机电测控系统。

全书各章既相互独立,又相互联系。从技术基础的角度看,各章是相互独立的,甚至在同一章中各个知识点也有一定的独立性(如第二章中各种传感器的原理);但从测控系统集成应用的角度看,它们又相互联系。这种既相互独立又相互联系的特点,可较好地适应各学校教学计划、课时数、课程安排,甚至课程名称上的不同,各高校可以根据自己的教学实际,灵活使用本教材。第1~4章,基本涵盖了机械工程测试技术、信号和传感技术等传统课程的教学内容,较为系统深入,是本教材的重点,也可以作为那些传统课程的教材。第5章中对于计算机集成应用基础只做导论性的介绍,以满足测控系统集成应用的需要,各高校可根据相关专业开设计算机类课程的情况灵活舍取或充实相关内容;第6章中的几个实例只供教学参考,任课教师可选一两个介绍,也可不用这几个实例,而结合其他工程案例,或本单位教学实验装备等具体系统来讲解。

机械工程测控系统的技术和应用有很强的实践性。本书只是给出一些基本概念、技术与理论,而要真正掌握和运用这些技术和理论,娴熟地应用到具体的机械系统上来,达到全面、系统解决工程问题的效果,仅通过课堂教学或自学是远远不够的,必须充分利用各种实验平台、产学研基地等条件,结合设计性、综合性创新实验和工程教学案例,在真实的机械自动化工程氛围中,针对具体的测控问题,通过具体实践、积累经验,才能逐步提高信号检测、处理,系统分析和计算机软硬件集成应用的能力。



第 1 章

信号及信号分析

本章主要内容

本章主要从数学上来认识信号、掌握常用的信号分析方法。时域信号反映了信号的幅值随时间变化的特征，时域分析就是直接在时域中对信号进行分析和处理的方法。为了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值、相位关系，需对信号进行频谱分析。不同信号的频谱分析方法和频谱特性不同。周期信号的频谱分析方法是傅里叶级数展开，包括三角函数展开形式和复指数函数展开形式，其频谱是离散的，周期信号是功率信号，其功率也可以在频域用功率谱加以描述。瞬变非周期信号的频谱分析方法是傅里叶变换，其频谱是连续的，瞬变非周期信号是能量信号，其能量也可以在频域用能量谱加以描述。随机信号也是十分重要的信号，它蕴涵着丰富的信息，所不同的是对随机信号的描述必须用概率统计的方法。相关分析用来描述两个随机过程在某个时刻状态间的线性依从关系，或者一个随机过程自身在时移前后的状态关系，分别称为互相关和自相关。相关分析在工程上有两个重要应用，即相关滤波和延时测量。相关函数经傅里叶变换其物理意义具有随机信号功率谱密度函数的含义，称为随机信号的功率谱。自相关函数和互相关函数经傅里叶变换得到的功率谱分别称为自功率谱和互功率谱，其谱线都是连续的，自功率谱和互功率谱常被用来分析信号系统。

1.1 概述

信号是测控系统中信息的载体。具体的信号有电信号、光信号、位移信号、速度信号等不同物理量，但在研究、分析信号及其变换规律的科学中，往往并不考虑信号的具体物理性质，而是将信号抽象为变量之间的函数关系。

在这种函数关系中，信号的自变量有时域和频域之分。信号的时域描述主要反映信号的幅值随时间变化的特性。信号的频域描述主要反映信号的频率结构和特性。通过对信号时域、频域的分析，以及在信号能量、功率等方面展开讨论，人们可以认识测控对象的内部、外部规律和相互联系。



1.2 信号分类与描述

1.2.1 信号的分类

信号是物质,有能量,有波形。信号波形是信号幅度随时间的变化历程。认识信号并对信号进行分类离不开信号的波形特征和能量特征。

1. 确定性信号与非确定性信号

根据时域特征的表象分类法,信号分为两大类:确定性信号和非确定性信号。

(1) 确定性信号 可以用数学模型或数学关系完整地描述信号随时间变化的情形,因而可确定其任何时刻的量值。确定性信号又分为周期信号和非周期信号。

1) 周期信号。服从一定规律,按一定的时间间隔周而复始重复出现的信号称为周期信号。周期信号满足如下关系:

$$x(t) = x(t + nT_0) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-1)$$

式中, T_0 为信号的周期。

周期信号一般分为简谐周期信号、复杂周期信号。简谐周期信号是指单一频率的正余弦信号,如图 1-1a 所示。复杂周期信号是由多个频率的简谐周期信号复合而成的,各信号之间具有公共周期,如图 1-1b 所示。

2) 非周期信号。在确定性信号中那些不具有周期重复性的信号称为非周期信号。非周期信号又分为两种:准周期信号和瞬态非周期信号。其中准周期信号由多个简谐信号叠加而成,但各组成

谐波分量间无法找到公共周期,因而无法按某一时间间隔周而复始地出现。如 $x(t) = \sin t + \sin\sqrt{2}t$, 其波形如图 1-2a 所示。瞬态非周期信号是指时间历程短的信号。例如,图 1-2b 所示的正弦振荡指数衰减信号 $x(t) = 0.5e^{-2t}\sin 2\pi t$, 它随着时间的增加而衰减至零,是一种瞬态非周期信号。

(2) 非确定性信号 不能用数学关系式描述的信号称为非确定性信号,也称随机信号。随机信号又可分为两类:平稳随机信号和非平稳随机信号。

1) 平稳随机信号。信号的统计特征不随时间而变化(图 1-3a)。

2) 非平稳随机信号。信号的统计特征随时间而变化(图 1-3b)。

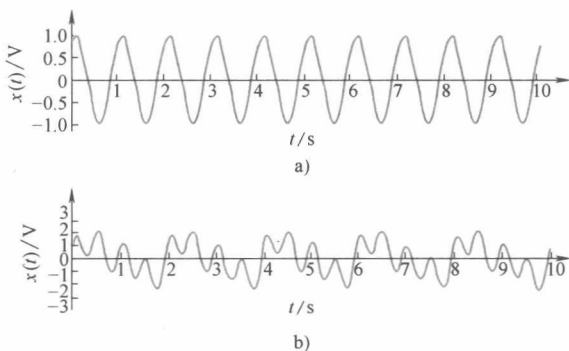


图 1-1 周期信号

a) 简谐周期信号 b) 复杂周期信号

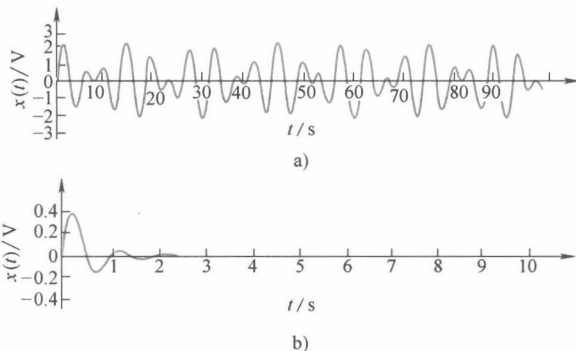


图 1-2 非周期信号

a) 准周期信号 b) 瞬态非周期信号

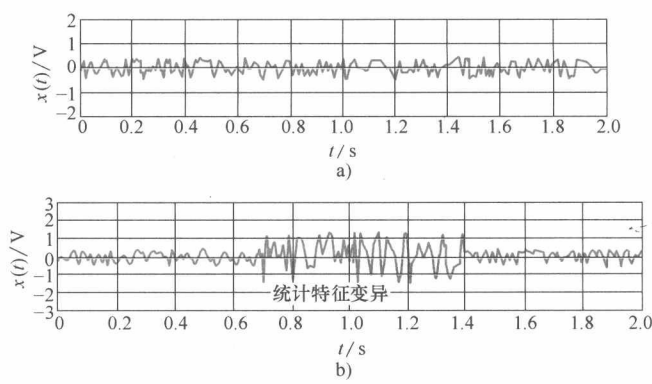


图 1-3 非确定性信号
a) 平稳随机信号 b) 非平稳随机信号

随机信号描述的现象是随机过程。自然界和人类生活中有很多随机过程，如机器工作时的振动和噪声、环境的温湿度等。随机信号服从统计规律，可以用概率统计方法由过去值来估计其未来值。

综上所述，信号按时域特征的表象分类有图 1-4 所示的多种类型。

2. 连续信号和离散信号

根据信号的独立变量及其幅值所具有的连续性特征，可以将信号分为不同的类别。

如果信号的独立变量（或自变量）是连续的，则称该信号为连续信号；如果信号的独立变量（或自变量）是离散的，则称该信号为离散信号。

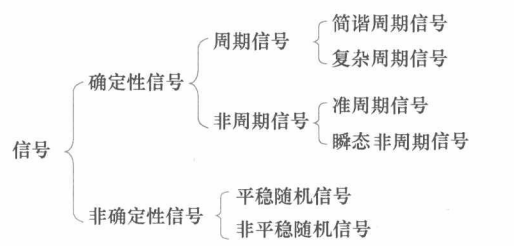
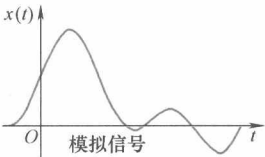
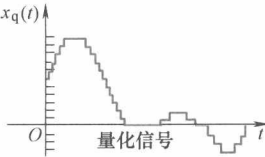


图 1-4 信号按时域特征的表象分类

对于连续信号来讲，其独立变量（时间 t 或其他量）是连续的，信号的幅值既可以是连续的，也可以是离散的。若信号的独立变量和幅值都是连续的，则称之为模拟信号；若信号的独立变量是连续的，而幅值为离散的，称这种信号为量化信号。

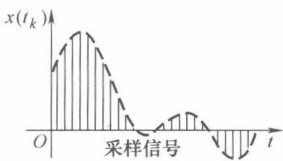
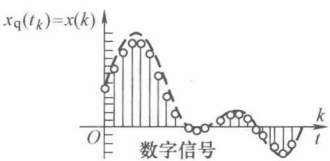
对于离散信号来讲，信号的独立变量是离散的。若幅值是连续的，则称为采样信号；若信号的独立变量和幅值都是离散的，则称为数字信号。表 1-1 列出了上述四种信号的表达形式。

表 1-1 信号按形态分类的形式

时间	幅 值	
	连 续	离 散
连续		



(续)

时间	幅 值	
	连 续	离 散
离散		

实际生活中的信号大多是模拟信号，而计算机的输入、输出都是数字信号，因此需要用数字来表示模拟量。例如用单片机测量温度时，由于自然环境里温度信号是模拟信号，所以要进行数字化。数字化要分为两步：首先利用中断功能，每隔一段时间单片机从环境中测量一次温度信息，从而得到时间上离散的离散信号，这一步称为采样；然后把温度幅值的取值数目加以限定，即用离散的数字表示温度的数值，如输入温度的范围是 $20.0 \sim 20.7^\circ\text{C}$ ，并假设它的取值就限定在 $20.0, 20.1, 20.2, \dots, 20.7$ 这 8 个值，这 8 个值称为离散数值，如果温度的值是 20.325°C ，它的取值应为 20.3°C ，如果温度的值是 20.476°C ，它的取值应为 20.5°C ，这一步称为量化。经过采样和量化之后，就完成了将自然环境的模拟温度信号转换为计算机能够处理的数字温度信号。

3. 能量信号和功率信号

在实际测量中，常把被测信号转换为电压或电流信号来处理。把电压信号加到单位电阻 R ($R=1\Omega$) 上，得到瞬时功率，即

$$P(t) = \frac{x^2(t)}{R} = x^2(t) \quad (1-2)$$

将 $x^2(t)$ 对时间积分得到能量 $E(t)$ ，即

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \quad (1-3)$$

若满足 $E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty$ ，则认为信号的能量是有限的，并称该信号为能量有限信号，简称能量信号，如矩形脉冲信号、衰减指数函数等。

若信号在 $(-\infty, \infty)$ 的能量是无限的，但在有限的区间 (t_1, t_2) 的平均功率是有限的，即

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt < \infty \quad (1-4)$$

则这种信号称为有限平均功率信号，或功率信号。

在实际使用中，人们不考虑信号的实际量纲，而把信号 $x(t)$ 的平方 $x^2(t)$ 及其对时间的积分分别称为信号的功率和能量。所以信号的功率和能量未必具有真实的功率和能量的量纲。

1.2.2 信号的时域描述和频域描述

直接观测或记录到的信号，一般是以时间为独立变量的，称其为信号的时域描述。信号的时域描述反映了信号的幅值随时间变化的特征，但不能明显揭示信号的频率组成关系。为

了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值、相位关系，应对信号进行频谱分析，即把信号的时域描述转变成信号的频域描述，在频域中以频率为独立变量来表示信号。

针对不同的时域信号特点，实现信号从时域变换到频域的途径有两条：一条是傅里叶级数展开，适合周期信号；另一条是傅里叶变换，适合瞬态非周期信号。这些内容将在下文专门介绍。

信号从时域变换到频域后，将组成信号的各频率成分找出来，按序列排列，得出信号所谓的“频谱”。若以频率为横坐标，分别以幅值和相位为纵坐标，便分别得到信号的幅频谱和相频谱。周期方波傅里叶级数展开得到其频域描述后，该周期方波的时域图形、幅频谱和相频谱三者的关系如图 1-5 所示。

信号时域、频域两种不同描述方法完全是为了解决不同问题，掌握信号不同方面的特征需要。例如，评定机器振动程度，需用振动速度的方均根值来作为判据，采用时域描述，就能很快求得方均根值。而在寻找振源时，需要掌握振动信号的频率分量，这就需采用频域描述。必须指出的是，这两种描述方法能相互转换，而且包含同样的信息量。

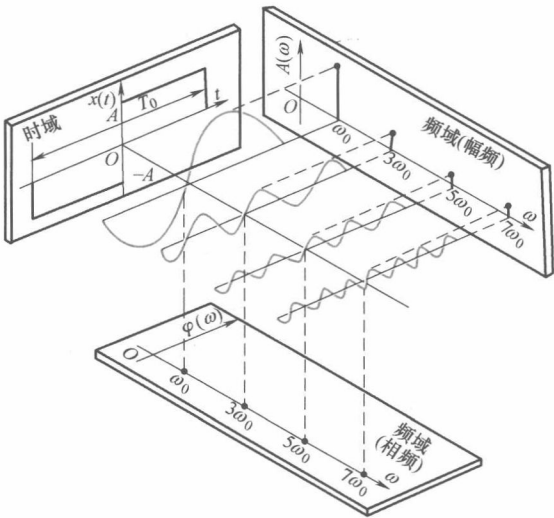


图 1-5 周期方波时域图形、幅频谱和相频谱三者的关系

1.3 信号的时域分析

信号的时域反映了信号的幅值随时间变化的特征。时域分析就是直接在时域中对信号进行分析和处理的方法。

1.3.1 信号分析中的常用函数

在信号与系统分析中，经常会用到一些数学函数，这些函数表示的信号大多为物理不可实现信号，仅在信号分析中使用。在此先做一简单交代，见表 1-2。

表 1-2 信号分析中的常用函数

序号	函数表达式	信号波形	备 注
1	指数函数 $f(t) = Ae^{\alpha t}$		A 为振幅； $\alpha > 0$ 为递增； $\alpha < 0$ 为递减



(续)

序号	函数表达式	信号波形	备 注
2	正、余弦函数 $f(t) = A\sin(\omega t + \theta)$		A 为振幅; ω 为角频率; θ 为初相位(或称初相角、初位相等)
3	复指数函数 $f(t) = Ae^{st}$		$s = \alpha + j\omega$ 为复数 根据欧拉公式 $e^{\pm j\omega t} = \cos\omega t \pm j\sin\omega t$ 得其与正、余弦函数关系,即 $\cos\omega t = \frac{1}{2}(e^{-j\omega t} + e^{j\omega t})$ $\sin\omega t = \frac{j}{2}(e^{-j\omega t} - e^{j\omega t})$
4	Sa 函数 $Sa(t) = \frac{\sin t}{t}$ $\text{sinc}(t) = \frac{\sin\pi t}{\pi t} = Sa(\pi t)$		广义偶函数 $Sa(t) = 0, t = n\pi$ $\text{sinc}(t) = 0, t = n$ ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$)
5	高斯函数(钟形脉冲函数) $f(t) = ke^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}$		k 为振幅
6	δ 函数 $\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases}$		也称单位脉冲函数

(续)

序号	函数表达式	信号波形	备 注
7	单位阶跃函数 $u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$		
8	单位斜坡函数 $R(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t \geq 0 \end{cases}$		$R(t) = tu(t)$
9	单位矩形脉冲函数 $G(t) = \begin{cases} 1 & t \leq \tau/2 \\ 0 & t > \tau/2 \end{cases}$		又称为门信号、门函数、矩形窗信号、矩形窗函数
10	符号函数 $\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ -1 & t < 0 \end{cases}$		$\text{sgn}(t) = 2u(t) - 1$

在信号分析中， δ 函数出现频率最高，它是一个广义函数。从数学上可以这样理解：对于一个矩形脉冲 $S_\varepsilon(t)$ ，其面积为 1（见图 1-6）。当 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时， $S_\varepsilon(t)$ 的极限就称为 δ 函数，也称单位脉冲函数。

1.3.2 信号的时域运算

信号的时域运算包括展缩、平移、翻转、相加、相乘、微分、积分、卷积等基本运算。微分运算会在函数幅值不连续点出现冲击，因此要注意微分运算。积分是在 $(-\infty, t)$ 区

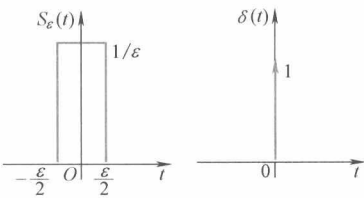


图 1-6 矩形脉冲和 δ 函数



间的积分。设函数为 $f(t)$ ，则其微分函数和积分函数如图 1-7 所示。

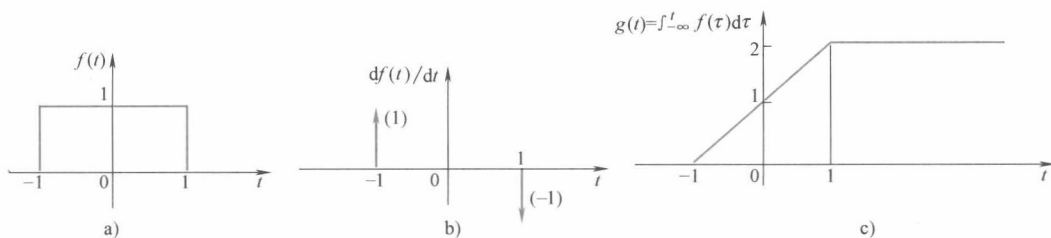


图 1-7 信号时域的微分、积分运算

a) 原函数 b) 微分函数 c) 积分函数

信号时域展缩是指 $x(kt)$ 与原信号 $x(t)$ 之间在时间轴上的扩展和压缩。当 $k < 1$ 时，原信号时域被扩展；当 $k > 1$ 时，原信号时域被压缩。图 1-8a 所示为原方波信号，图 1-8b 所示为 $k = 1/2$ 时的时域扩展后的方波，图 1-8c 所示为 $k = 2$ 时的时域压缩后的方波。

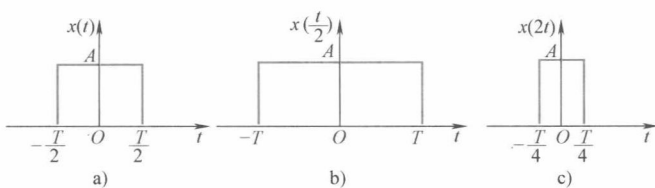


图 1-8 信号时域展缩

a) 原信号 b) 信号扩展 c) 信号压缩

卷积是线性系统中时域分析的重要方法之一。两函数 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 的卷积定义为

$$f_1(t) * f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau \quad (1-5)$$

卷积作为一种数学运算，服从如下一些代数定律：

(1) 交换律

$$f_1(t) * f_2(t) = f_2(t) * f_1(t) \quad (1-6)$$

(2) 分配律

$$f_1(t) * [f_2(t) + f_3(t)] = f_1(t) * f_2(t) + f_1(t) * f_3(t) \quad (1-7)$$

(3) 结合律

$$[f_1(t) * f_2(t)] * f_3(t) = f_1(t) * [f_2(t) * f_3(t)] \quad (1-8)$$

1.3.3 信号的时域分解

为便于在时域进行信号分析，一个复杂信号可以分解为一系列具有不同时延的矩形窄脉冲的叠加，如图 1-9 所示。

在任意时刻 $t = \tau$ 时，窄脉冲可表示为 $f(k\Delta\tau) \{u(t - k\Delta\tau) - u[t - (k + 1)\Delta\tau]\}$ ，将 k 从 $-\infty \sim \infty$ 的一系列矩形脉冲叠加，可得 $f(t)$ 的近似表达式为

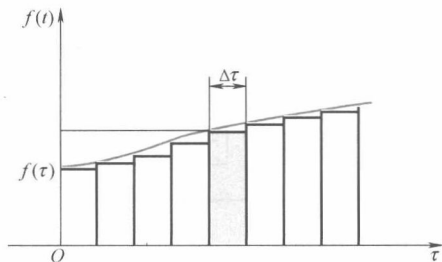


图 1-9 信号的时域分解

$$\begin{aligned} f(t) &\approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\Delta\tau) \frac{\{u(t - k\Delta\tau) - u[t - (k + 1)\Delta\tau]\}}{\Delta\tau} \Delta\tau \\ &= \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\Delta\tau) \delta(t - k\Delta\tau) \Delta\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 实质上是函数的卷积积分表达式。它表明：时域里任一函数等于这一函数与单位脉冲函数的卷积，卷积的几何解释就是上述一系列矩形窄脉冲的求极限过程。

1.3.4 周期信号的强度

周期信号的强度用峰值、绝对均值、有效值和平均值来表示（图 1-10）。

峰值 x_p 是信号出现的最大瞬时值，即

$$x_p = |x(t)|_{\max} \tag{1-10}$$

周期信号的平均值 μ_x 为

$$\mu_x = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) dt \tag{1-11}$$

周期信号经过全波整流之后再取均值，就是信号的绝对均值 $\mu_{|x|}$ ，即

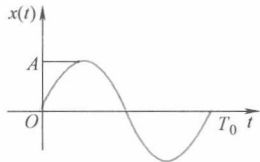
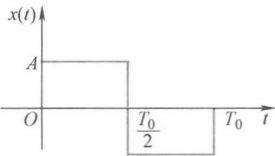
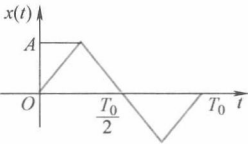
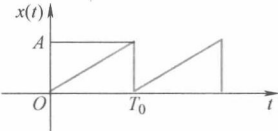
$$\mu_{|x|} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} |x(t)| dt \tag{1-12}$$

周期信号的有效值是信号的方均根 x_{rms} ，即

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x^2(t) dt} \tag{1-13}$$

表 1-3 列举了几种典型信号的峰值、平均值、绝对均值、有效值。

表 1-3 几种典型信号的强度

名称	波形图	傅里叶级数展开式	x_p	μ_x	$\mu_{ x }$	x_{rms}
正弦波		$x(t) = A \sin \omega_0 t$ $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$	A	0	$\frac{2A}{\pi}$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$
方波		$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right)$	A	0	A	A
三角波		$x(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left(\sin \omega_0 t - \frac{1}{9} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{25} \sin 5\omega_0 t - \dots \right)$	A	0	$\frac{A}{2}$	$\frac{A}{\sqrt{3}}$
锯齿波		$x(t) = \frac{A}{2} - \frac{A}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{\sin 2\omega_0 t}{2} + \frac{\sin 3\omega_0 t}{3} + \dots \right)$	A	$\frac{A}{2}$	$\frac{A}{2}$	$\frac{A}{\sqrt{3}}$

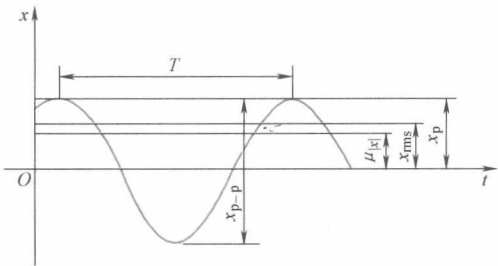
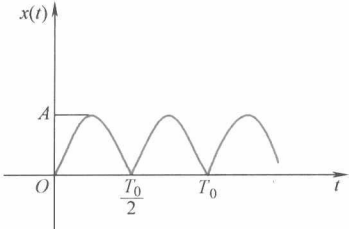


图 1-10 周期信号的强度表示

(续)

名称	波形图	傅里叶级数展开式	x_p	μ_x	$\mu_{ x }$	x_{rms}
正弦整流		$x(t) = \frac{2A}{\pi} \left(1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega_0 t - \frac{2}{15} \cos 4\omega_0 t - \frac{2}{35} \cos 6\omega_0 t - \cdots \right)$	A	$\frac{2A}{\pi}$	$\frac{2A}{\pi}$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$

信号的均值可以用直流电压表测量。即使信号是周期交变的，只要交流的频率较高，那交流的成分只能引起指针的微小晃动，不影响均值的读数。当频率较低时，表针就会有较大幅度的摆动，会影响读数。这时要在交流分量旁路并接一个电容器，但同时也要注意这个电容器对被测电路的影响。

对单一简谐信号来说，信号的有效值用一般的交流电压表就可以测量。这是因为一般的交流电压表把检波电路的输出和单一简谐信号的有效值的关系“固化”在了电压表中。但当测量非单一简谐信号的时候，各类检波电路的输出值和信号有效值的关系已经变了，从而造成了表上的刻度和实际的信号的有效值不同，造成了测量复杂信号有效值时的系统误差。

1.4 周期信号及其频域分析

1.4.1 傅里叶级数的三角函数展开式

若式(1-1)表示的周期为 T_0 的周期函数在有限的区间内满足狄利赫利(Dirichlet)条件，即①函数在任意有限的区间内连续，或只有有限个第一类间断点；②在一个周期内函数有有限个极大值或极小值，则该周期函数可以展开成傅里叶级数。一般的周期函数都满足狄利赫利条件。周期函数傅里叶级数三角函数展开形式为

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (1-14)$$

式中的常值分量

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \quad (1-15)$$

余弦分量

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (1-16)$$

正弦分量

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (1-17)$$

式中， n 为自然数， $n=1, 2, 3, \dots$ ； T_0 为周期； ω_0 为圆频率或角频率， $\omega_0 = 2\pi/T_0$ 。

将傅里叶级数的三角函数展开式中正弦、余弦的同频率项整合合并，可得信号 $x(t)$ 的另一种形式的傅里叶级数三角函数表达式，即

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1-18)$$