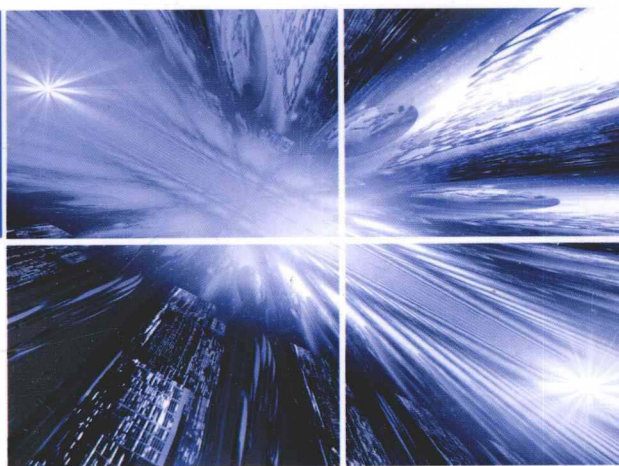


普通高等教育“十二五”规划教材



# 机械工程测控技术 基础及系统集成应用

屠大维 赵其杰 王梅 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

# 机械工程测控技术基础及 系统集成应用

屠大维 赵其杰 王 梅 编著  
曹其新 主审



机械工业出版社

本书以测控技术为基础,以测控系统计算机集成应用为目的,讨论信号的获取、传感、处理和反馈控制、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6章,前3章为信号、传感、处理等方面的技术基础;第4章为系统及系统特性分析基础;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的教学大纲内容,在这一基础上强调系统集成应用。因此,本书可作为机械工程及自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等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,也可供相关的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程测控技术基础及系统集成应用/屠大维,赵其杰,王梅编著.

—北京:机械工业出版社,2010.10

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-32081-4

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(2010)第199436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 张丹丹

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·393千字

标准书号:ISBN 978-7-111-32081-4

定价:29.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

先进的机电一体化产品及生产自动化系统是依靠检测和控制系统来对各种物理量进行在线检测和对执行机构进行反馈控制的。检测系统用来精确获取系统工作状态和结果；控制系统则根据检测结果，按照预先设计的控制规律计算出控制量，实时地向执行机构发出指令，使整个机电一体化系统能够按照一定的品质特征工作。在整个过程中，要求检测和控制环节在时间和空间上相互衔接，在数据和指令上相互印证。正因如此，通常将检测系统和控制系统组合后统称为测控系统。测控系统好比一个人的感官、神经和大脑，具备信息感知、传递和处理等功能。人的感官、神经和大脑是在长期的进化过程中逐步形成、相得益彰的，人类信息获取、处理、传递、反馈的协同工作机制堪称完美。对于机械自动化装置和系统来说，将信息获取、处理、传递、反馈等内容和环节系统加以考虑，达到优化组合、完美结合的效果，也是从事机械自动化系统设计的工程技术人员追求的目标。然而，传统的课程和教材，如信号和系统、机械工程测试技术、传感技术、计算机测控等以往以单元技术和单一目的为主，这对于因强调通识教学而减少专业课时后，再要着力强化工程实践能力的机械自动化工程创新人才培养尤感不足。这也正是作者不揣冒昧编写此书的目的，希望能对从事相关工作的工程技术人员，以及机械自动化工程专业及相关专业学生的实践能力培养有所裨益，同时真诚地期待更多的专家、学者有更好的教材和著作出版。

本书以测控技术为基础，以测控系统计算机集成应用为目的，讨论信号的获取、传感、处理和反馈控制、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6章，前3章为信号、传感、处理等方面的技术基础；第4章为系统及系统特性分析基础；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的教学大纲内容，在这一基础上强调系统集成应用。因此，本书既可以作为机械工程及自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等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，也可供相关的工程技术人员参考。

本书编写过程中参考了大量有关信号处理、检测传感、计算机应用等方面的教材、论著和文献，限于篇幅，不能在文中一一列举，在此一并对其作者致以衷心的感谢。

本书由屠大维、赵其杰、王梅编著，上海交通大学曹其新教授担任主审。

由于作者水平有限，书中内容难免存在不足和错误之处，恳请读者给予批评指正。

编 者  
于上海大学

# 目 录

## 前言

## 绪论 ..... 1

### 0.1 现代机械系统中的测控技术和系统集成 ..... 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 ..... 4

#### 1.2.1 信号的分类 ..... 4

#### 1.2.2 信号的时域描述和频域描述 ..... 7

### 1.3 信号的时域分析 ..... 8

#### 1.3.1 信号分析中的常用函数 ..... 8

#### 1.3.2 信号的时域运算 ..... 10

#### 1.3.3 信号的时域分解 ..... 11

#### 1.3.4 周期信号的强度 ..... 12

### 1.4 周期信号及其频域分析 ..... 13

#### 1.4.1 傅里叶级数的三角函数展开式 ..... 13

#### 1.4.2 傅里叶级数的复指数函数展开式 ..... 16

#### 1.4.3 周期信号的功率及功率谱 ..... 18

### 1.5 非周期信号及其频域分析 ..... 21

#### 1.5.1 傅里叶变换 ..... 22

#### 1.5.2 能量谱 ..... 24

#### 1.5.3 傅里叶变换的主要性质 ..... 25

#### 1.5.4 典型功率信号的频谱 ..... 28

### 1.6 随机信号及其分析 ..... 34

#### 1.6.1 概述 ..... 34

#### 1.6.2 随机信号的主要特征参数 ..... 35

#### 1.6.3 相关分析及其应用 ..... 38

#### 1.6.4 功率谱分析及其应用 ..... 45

### 参考文献 ..... 50

## 第2章 传感技术基础 ..... 51

### 2.1 概述 ..... 51

### 2.2 传感器分类及其基本特性 ..... 51

#### 2.2.1 传感器的分类 ..... 51

#### 2.2.2 传感器的基本特性 ..... 52

### 2.3 机械式传感器 ..... 54

### 2.4 电阻式传感器 ..... 55

#### 2.4.1 电位器式传感器 ..... 55

#### 2.4.2 电阻应变式传感器 ..... 58

### 2.5 电感式传感器 ..... 68

#### 2.5.1 可变磁阻式电感传感器 ..... 68

#### 2.5.2 涡流式电感传感器 ..... 70

#### 2.5.3 差动变压器式电感传感器 ..... 72

### 2.6 电容式传感器 ..... 74

#### 2.6.1 工作原理 ..... 74

#### 2.6.2 类型 ..... 74

#### 2.6.3 电容式传感器的特点及等效电路 ..... 76

#### 2.6.4 电容传感器测量电路 ..... 76

#### 2.6.5 电容传感器的应用 ..... 79

### 2.7 压电式传感器 ..... 80

#### 2.7.1 压电效应和逆压电效应 ..... 80

#### 2.7.2 压电式传感器简介 ..... 80

#### 2.7.3 压电式传感器的等效电路 ..... 80

#### 2.7.4 压电晶片的并联和串联 ..... 81

#### 2.7.5 压电式传感器的测量电路 ..... 81

#### 2.7.6 压电式传感器的应用 ..... 83

### 2.8 磁电传感器 ..... 84

#### 2.8.1 磁电感应式传感器 ..... 84

#### 2.8.2 霍尔传感器 ..... 87

### 2.9 光电传感器 ..... 89

#### 2.9.1 光电效应 ..... 89

#### 2.9.2 光电器件及其特征 ..... 91

#### 2.9.3 测量电路及应用 ..... 99

### 2.10 热电式传感器 ..... 100

#### 2.10.1 热电阻 ..... 101

#### 2.10.2 热敏电阻 ..... 102

|                              |     |                                 |     |
|------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 2.10.3 热电偶 .....             | 103 | 4.2.3 一些典型环节的传递函数 .....         | 159 |
| 2.11 计数编码类传感器 .....          | 106 | 4.2.4 传递函数框图及其等价变换 .....        | 160 |
| 2.11.1 感应同步器 .....           | 107 | 4.3 系统频率响应函数 .....              | 162 |
| 2.11.2 光栅传感器 .....           | 108 | 4.4 系统脉冲响应函数 .....              | 165 |
| 2.11.3 磁栅传感器 .....           | 111 | 4.5 一阶、二阶典型系统特性分析 .....         | 166 |
| 2.11.4 光电编码器 .....           | 112 | 4.5.1 一阶、二阶系统的动态特性 .....        | 166 |
| 2.12 图像传感器 .....             | 114 | 4.5.2 一阶、二阶系统对典型激励<br>的响应 ..... | 169 |
| 2.12.1 CCD 芯片 .....          | 114 | 4.6 系统对任意输入的响应 .....            | 173 |
| 2.12.2 CMOS 芯片 .....         | 116 | 4.7 系统不失真条件 .....               | 174 |
| 2.12.3 图像传感器的应用 .....        | 117 | 4.8 系统负载效应 .....                | 176 |
| 2.13 微型、智能及网络传感器 .....       | 117 | 4.9 系统校正 .....                  | 178 |
| 2.13.1 微型传感器 .....           | 117 | 4.10 系统的干扰源和抗干扰性设计 .....        | 181 |
| 2.13.2 智能传感器 .....           | 118 | 4.10.1 系统干扰源 .....              | 181 |
| 2.13.3 网络传感器 .....           | 119 | 4.10.2 供电系统干扰及其抗干扰 .....        | 182 |
| 参考文献 .....                   | 121 | 4.10.3 信道干扰及其抗干扰 .....          | 182 |
| <b>第3章 信号处理基础</b> .....      | 122 | 4.10.4 接地设计 .....               | 183 |
| 3.1 信号处理概述 .....             | 122 | 参考文献 .....                      | 184 |
| 3.2 模拟信号处理基础 .....           | 122 | <b>第5章 计算机集成应用基础</b> .....      | 185 |
| 3.2.1 模拟信号处理概述 .....         | 122 | 5.1 概述 .....                    | 185 |
| 3.2.2 信号放大 .....             | 122 | 5.2 单片微控制器 .....                | 185 |
| 3.2.3 调制解调 .....             | 123 | 5.2.1 单片微控制器的硬件结构 .....         | 186 |
| 3.2.4 滤波 .....               | 128 | 5.2.2 单片微控制器的指令系统 .....         | 188 |
| 3.3 数字信号处理基础 .....           | 135 | 5.2.3 单片微控制器的特点及应用 .....        | 189 |
| 3.3.1 数字信号处理概述 .....         | 135 | 5.3 数字信号处理器 .....               | 190 |
| 3.3.2 数字信号处理的基本步骤 .....      | 135 | 5.3.1 DSP 算法的特点及其硬件<br>要求 ..... | 190 |
| 3.3.3 A/D、D/A 转换器 .....      | 136 | 5.3.2 DSP 处理器的基本结构组成 .....      | 191 |
| 3.3.4 采样定理 .....             | 139 | 5.3.3 DSP 应用系统的优点及其应用 .....     | 193 |
| 3.3.5 泄漏与加窗处理 .....          | 142 | 5.4 嵌入式微处理器 .....               | 195 |
| 3.3.6 离散傅里叶变换 .....          | 147 | 5.4.1 嵌入式系统的概念 .....            | 195 |
| 3.3.7 栅栏效应 .....             | 149 | 5.4.2 嵌入式系统的组成结构 .....          | 196 |
| 3.3.8 常见数字信号处理 .....         | 150 | 5.4.3 嵌入式系统的特点 .....            | 200 |
| 参考文献 .....                   | 153 | 5.5 可编程序控制器 .....               | 201 |
| <b>第4章 系统及系统特性分析基础</b> ..... | 154 | 5.5.1 PLC 概述 .....              | 201 |
| 4.1 线性系统与常微分方程 .....         | 154 | 5.5.2 PLC 结构组成及工作原理 .....       | 203 |
| 4.1.1 系统分类和特点 .....          | 154 | 5.5.3 PLC 指令及其程序设计 .....        | 204 |
| 4.1.2 定常线性系统 .....           | 155 | 5.6 系统集成中的计算机接口技术 .....         | 205 |
| 4.2 系统传递函数 .....             | 156 | 5.6.1 系统集成中接口技术的作用 .....        | 205 |
| 4.2.1 传递函数的定义 .....          | 156 |                                 |     |
| 4.2.2 环节的串联、并联和反馈 .....      | 157 |                                 |     |



|                           |            |                                   |     |
|---------------------------|------------|-----------------------------------|-----|
| 5.6.2 系统集成中计算机接口 .....    | 206        | 集成 .....                          | 225 |
| 5.7 计算机通信原理与人机接口 .....    | 209        | 6.1.1 概述 .....                    | 225 |
| 5.7.1 计算机通信原理 .....       | 209        | 6.1.2 系统结构 .....                  | 225 |
| 5.7.2 人机接口 .....          | 212        | 6.1.3 系统集成 .....                  | 229 |
| 5.8 计算机网络结构与网络协议 .....    | 212        | 6.2 智能焊接机器人焊缝跟踪测控系统 .....         | 232 |
| 5.8.1 计算机网络 .....         | 212        | 6.2.1 概述 .....                    | 232 |
| 5.8.2 网络结构与协议 .....       | 214        | 6.2.2 智能焊接机器人的主要子系统<br>及其功能 ..... | 232 |
| 5.9 计算机测控系统集成体系结构 .....   | 215        | 6.2.3 智能焊接机器人的计算机集成 .....         | 234 |
| 5.9.1 计算机测控系统集成体系 .....   | 215        | 6.2.4 基于视觉的焊缝跟踪测量与<br>控制 .....    | 235 |
| 5.9.2 管控一体化集成体系 .....     | 219        | 6.2.5 基于视觉的焊缝跟踪软件流程 .....         | 239 |
| 5.10 现场总线技术 .....         | 220        | 6.3 虚拟仪器技术及应用 .....               | 239 |
| 5.10.1 现场总线简介 .....       | 220        | 6.3.1 概述 .....                    | 239 |
| 5.10.2 现场总线的结构特点与优点 ..... | 221        | 6.3.2 虚拟仪器技术与基本构成 .....           | 240 |
| 5.10.3 几种典型现场总线 .....     | 222        | 6.3.3 虚拟仪器的应用 .....               | 242 |
| 参考文献 .....                | 224        | 参考文献 .....                        | 247 |
| <b>第6章 测控系统应用实例</b> ..... | <b>225</b> |                                   |     |
| 6.1 物料自动分拣系统中的传感和系统       |            |                                   |     |

# 绪 论

## 0.1 现代机械系统中的测控技术和系统集成

物质世界中的任何系统（包括机械系统）存在输入、输出两个界面，而经由这两个界面的是物质流、能量流和信息流三者中的一个或多个。也就是说任何物质系统都是实现物质、能量和信息全部或部分传递、变换的系统。

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

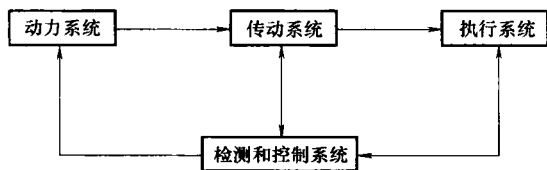


图 0-1 现代机械系统的组成

统，如图 0-1 所示。动力系统指动力机（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，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有用信号（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（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，使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，计算机因其具有多通道、高运算速度、大存储量等特点，使之处于信息中心地位，发挥了系统集成

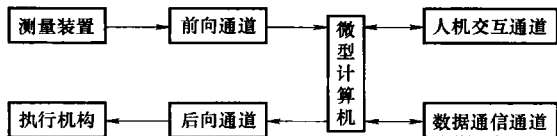


图 0-2 智能机械系统中的智能测控系统

的作用，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。

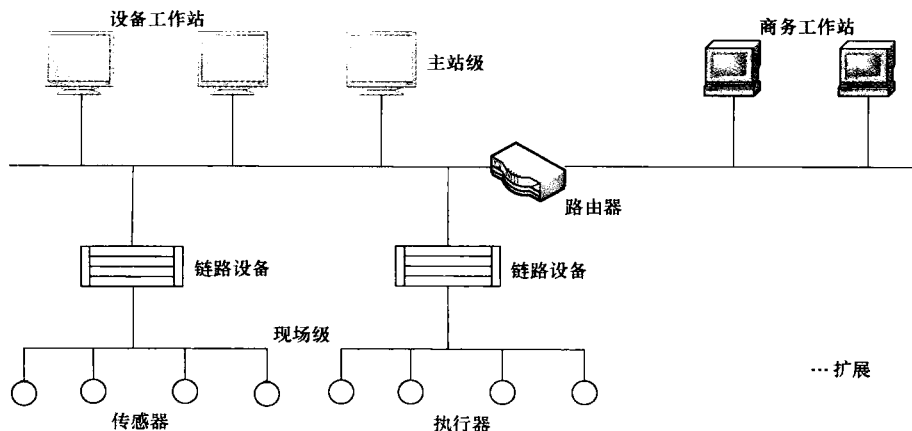


图 0-3 FCS 体系结构

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 6 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 章为信号处理基础，主要从对传感器获得的物理信号处理角度，介绍模拟信号处理和数字信号处理的基本方法；第 4 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 5 章为计算机集成应用基础，从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。

全书各章节既相互独立，又相互联系。从技术基础的角度看，各章节是相互独立的，甚至在同一章中各种知识点也有一定的独立性（如第 2 章中各种传感器原理）；但从系统集成角度看，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、课程的安排，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技术基础只作导论性的介绍,以满足读者对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1~2个介绍,也可不用这几个实例,而结合自己完成的工程案例,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,而要真正掌握这些技术和理论,并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,在具体的测控问题牵引下,通过解决问题、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

### 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、功率等方面的展开讨论，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。周期信号满足下面的关系，即

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

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(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)。

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。

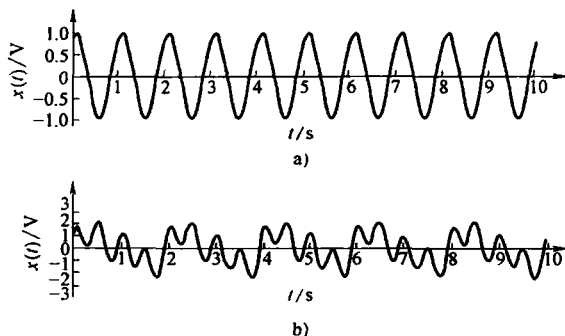


图 1-1 周期信号

a) 简谐周期信号 b) 复杂周期信号

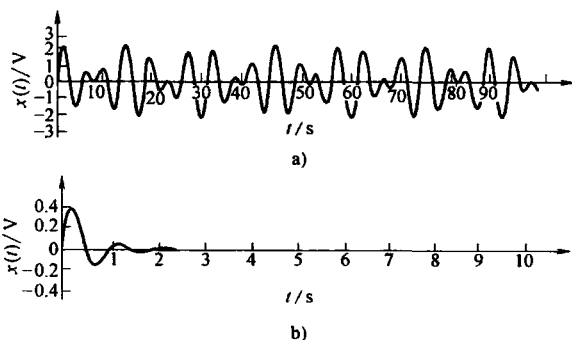


图 1-2 非周期信号

a) 准周期信号 b) 瞬态非周期信号

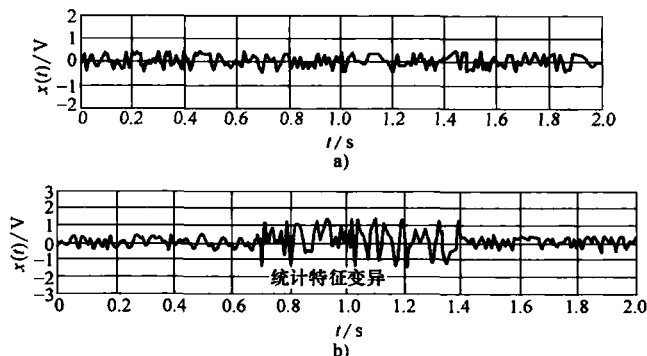


图 1-3 非确定性信号

a) 平稳随机信号 b) 非平稳随机信号

综上所述,信号按时域特征的表象分类有如图 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。

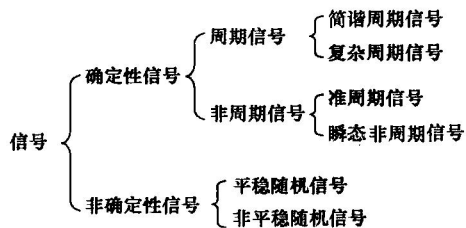


图 1-4 信号按时域特征的表象分类

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。当信号的独立变量和幅值都是连续的, 则称之为模拟信号; 当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, 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 | <p>模拟信号</p> | <p>量化信号</p> |
| 离散 | <p>采样信号</p> | <p>数字信号</p> |

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, 从而得到时间上是离散的离散信号, 这一步叫采样; 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  $20.325^{\circ}\text{C}$ , 它的取值应为  $20.3^{\circ}\text{C}$ , 如果温度的值是  $20.476^{\circ}\text{C}$ , 它的取值应为  $20.5^{\circ}\text{C}$ , 这一步叫做量化。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

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

当满足  $E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty$ , 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

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

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、分别以幅值或相位为纵坐标, 便分别得到信号的幅频谱或相频谱。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断, 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

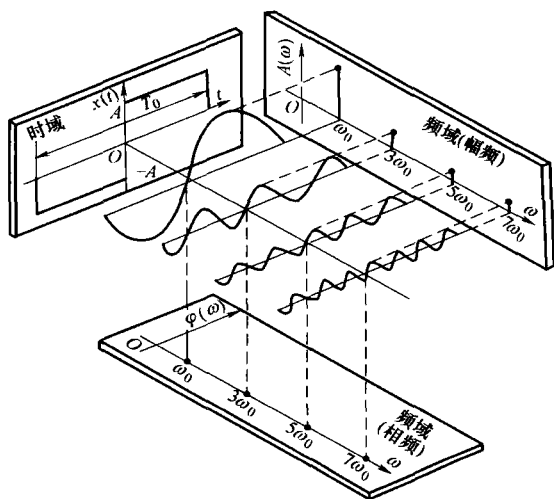


图 1-5 周期方波时域图形、幅频谱和相频谱三者的关系



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。

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。

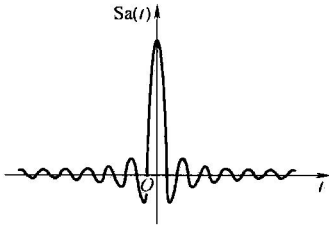
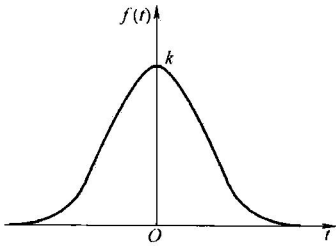
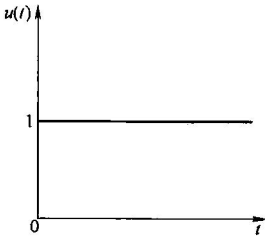
1.3.1 信号分析中的常用函数

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均为物理不可实现信号，仅在信号分析中使用。在此先作一简单交代，见表 1-2。

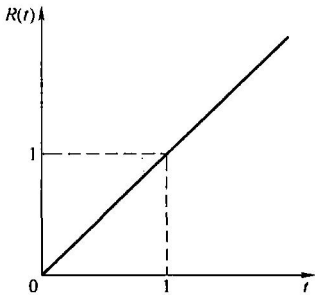
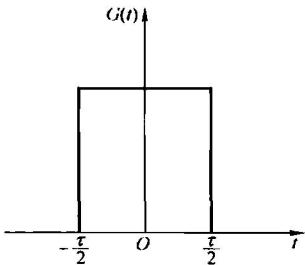
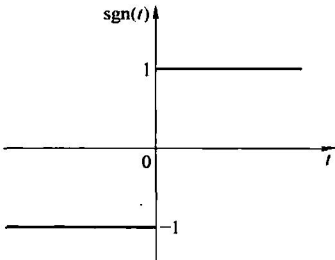
表 1-2 信号分析中常用函数

| 序号 | 函数表达式                                   | 信号波形 | 备 注                                                                                                                                                                                                                             |
|----|-----------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 指数函数<br>$f(t)=Ae^{at}$                  |      | A 为振幅； $a > 0$ 为递增； $a < 0$ 为递减                                                                                                                                                                                                 |
| 2  | 正、余弦函数<br>$f(t)=A\sin(\omega t+\theta)$ |      | A 为振幅； $\omega$ 为角频率； $\theta$ 为初相位（或称初相角、初位相等）                                                                                                                                                                                 |
| 3  | 复指数函数<br>$f(t)=Ae^{st}$                 |      | $s=\alpha+j\omega$ 为复数；<br>根据欧拉公式<br>$e^{\pm j\omega t}=\cos\omega t\pm j\sin\omega t$<br>得其与正、余弦函数关系，即<br>$\cos\omega t=\frac{1}{2}(e^{-j\omega t}+e^{j\omega t})$<br>$\sin\omega t=\frac{j}{2}(e^{-j\omega t}-e^{j\omega t})$ |

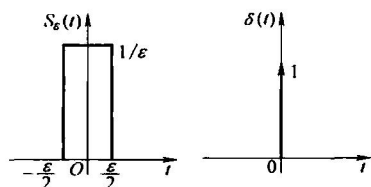
(续)

| 序号 | 函数表达式                                                                                                            | 信号波形                                                                                | 备 注                                                                                               |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4  | <p>Sa 函数</p> $\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t}$ $\text{sinc}(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi t} = \text{Sa}(\pi t)$    |    | <p>广义偶函数</p> $\text{Sa}(t) = 0, t = n\pi$ $\text{sinc}(t) = 0, t = n$ $(n = \pm 1, \pm 2, \dots)$ |
| 5  | <p>高斯函数(钟形脉冲函数)</p> $f(t) = ke^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}$                                                 |    | <p>k 为振幅</p>                                                                                      |
| 6  | <p>δ 函数</p> $\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases}$ |  | <p>也称单位脉冲函数</p>                                                                                   |
| 7  | <p>单位阶跃函数</p> $u(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t \geq 0 \end{cases}$                                       |  |                                                                                                   |

(续)

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

在信号分析中  $\delta$  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  $S_\epsilon(t)$ ,其面积为 1(图 1-6)。当  $\epsilon \rightarrow 0$  时,  $S_\epsilon(t)$  的极限就称为  $\delta$  函数,也称单位脉冲函数。

图 1-6 矩形脉冲和  $\delta$  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  $(-\infty, t)$  区间内的积分。设函数为  $f(t)$ ,则其微分函数和积分函数如图 1-7 所示。

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。