



教育部高等学校地矿学科教学指导委员会地质工程专业规划教材

JIAOYUBUGAODENGXUEXIAODIKUANGXUEKE

JIAOXUEZHIDAOWEIYUANHUI

DIZHIGONGCHENGZHUANYEGUTHUAJIAOCAI



# 地质工程 测试技术与仪表

彭环云 徐力生 贺茉莉 等 编著



 中南大学出版社  
[www.csupress.com.cn](http://www.csupress.com.cn)

# 地质工程测试 技术与仪表

彭环云 徐力生 贺茉莉 等编著

中南大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

地质工程测试技术与仪表/彭环云等编著. —长沙:  
中南大学出版社, 2010. 8  
ISBN 978-7-5487-0098-2

I. 地... II. 彭... III. ①工程地质—工程测量②地质勘探  
仪器 IV. P642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 169354 号

---

地质工程测试技术与仪表

彭环云 徐力生 贺茉莉 编著

---

☐责任编辑 陈海波

☐责任印制 周 颖

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙瑞和印务有限公司

---

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 15 ☐字数 371 千字

☐版 次 2010 年 9 月第 1 版 ☐2010 年 9 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0098-2

☐定 价 32.00 元

---

图书出现印装问题,请与出版社调换

# 前 言

地质工程测试技术与仪表是地质工程专业的一门技术基础课。本书是根据地质工程专业本科生教学计划和地质工程测试技术与仪表课程教学大纲内容编写的。

测试技术涉及的面非常广泛。为了使地质工程专业学生能够获得比较系统和完整的概念,本书分为两大部分:第一部分着重介绍从事测试工作,特别是动态测试工作所必需的基础知识。这部分内容以信号的获取、转换与处理为线索,详细介绍了检测技术理论基础、各类传感器的工作原理与特性以及传感器输出信号的转换、处理与输出。第二部分结合地质工程检测领域的主要内容,对压力、流量、钻孔弯曲等几种典型参数的测试方法进行了叙述,这部分内容可以看作是上述基础知识的应用举例。并在此基础上,选取地质工程检测领域的最新检测系统进行了分析。

本书主要作为地质工程专业的本科生教材,对从事检测技术的工程技术人员也具有参考价值。

参加本书编写的有彭环云、徐力生、贺茉莉、谢穆武、李凤林等五位同志。

由于我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

**编者**

**2010年9月**

# 目 录

|           |     |
|-----------|-----|
| 绪 论 ..... | (1) |
|-----------|-----|

## 第一篇 检测技术的理论基础

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 第1章 检测的基础知识 ..... | (3) |
|-------------------|-----|

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 1.1 信号概述 .....                | (3)  |
| 1.1.1 信号的定义与分类 .....          | (3)  |
| 1.1.2 信号的分析 .....             | (6)  |
| 1.2 测量方法 .....                | (6)  |
| 1.2.1 直接测量和间接测量 .....         | (7)  |
| 1.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量 ..... | (7)  |
| 1.3 检测仪表与检测系统的组成 .....        | (8)  |
| 1.4 检测仪表的性能指标 .....           | (10) |
| 1.4.1 精度 .....                | (10) |
| 1.4.2 稳定性 .....               | (10) |
| 1.4.3 测量范围和量程 .....           | (11) |
| 1.4.4 仪表的输入、输出特性 .....        | (11) |
| 1.5 测量数据处理方法 .....            | (16) |
| 1.5.1 静态测量数据处理方法 .....        | (16) |
| 1.5.2 测量误差的估计和处理 .....        | (19) |
| 1.5.3 测量误差的合成与分配 .....        | (23) |
| 1.5.4 测量数据处理 .....            | (24) |
| 1.5.5 自动检测仪表的动态误差 .....       | (29) |

|                   |      |
|-------------------|------|
| 第2章 检测信号的获取 ..... | (33) |
|-------------------|------|

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 2.1 传感器概述 .....         | (33) |
| 2.1.1 传感器的定义及其重要性 ..... | (33) |
| 2.1.2 传感器的组成 .....      | (33) |
| 2.1.3 传感器的分类 .....      | (34) |
| 2.1.4 传感器的特性 .....      | (36) |
| 2.1.5 传感器的发展趋势 .....    | (37) |

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 2.2 电阻式传感元件 .....          | (38) |
| 2.2.1 电阻应变式传感元件 .....      | (38) |
| 2.2.2 热电阻式传感元件 .....       | (43) |
| 2.3 电感式传感元件 .....          | (43) |
| 2.3.1 自感式传感元件 .....        | (44) |
| 2.3.2 互感式传感元件 .....        | (44) |
| 2.3.3 电涡流式传感元件 .....       | (45) |
| 2.4 电容式传感元件 .....          | (47) |
| 2.4.1 电容式传感元件的工作原理 .....   | (47) |
| 2.4.2 电容式传感元件的类型与应用 .....  | (47) |
| 2.5 热电偶式传感元件 .....         | (50) |
| 2.5.1 热电偶的测温原理 .....       | (50) |
| 2.5.2 热电偶的结构类型 .....       | (53) |
| 2.5.3 热电偶的冷端温度误差及补偿 .....  | (54) |
| 2.6 霍尔式传感元件 .....          | (56) |
| 2.6.1 霍尔式传感元件的工作原理 .....   | (56) |
| 2.6.2 霍尔式传感元件的应用 .....     | (57) |
| 2.7 光电式传感元件 .....          | (59) |
| 2.7.1 常用光电器件的工作原理及特点 ..... | (60) |
| 2.7.2 光电式传感器的应用 .....      | (62) |
| 2.8 压电式传感元件 .....          | (65) |
| 2.8.1 工作原理 .....           | (65) |
| 2.8.2 压电材料 .....           | (66) |
| 2.9 超声波传感元件 .....          | (66) |
| 2.9.1 超声波的传输特性 .....       | (66) |
| 2.9.2 超声波换能器 .....         | (67) |
| 2.9.3 超声波传感器的应用 .....      | (68) |
| 2.10 光纤式传感器 .....          | (70) |
| 2.10.1 光导纤维及其导光原理 .....    | (70) |
| 2.10.2 光纤传感器的类型 .....      | (71) |
| 2.10.3 光纤传感器的应用举例 .....    | (72) |
| 2.11 振弦式频率传感器 .....        | (74) |
| 2.11.1 结构与工作原理 .....       | (74) |
| 2.11.2 频率测量方案 .....        | (75) |
| 2.11.3 振弦式传感器应用举例 .....    | (76) |
| 2.12 光栅式传感器 .....          | (77) |
| 2.12.1 光栅的种类 .....         | (77) |
| 2.12.2 光栅的基本工作原理 .....     | (81) |
| 2.12.3 莫尔条纹的形成原理和特点 .....  | (81) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 2.12.4 光栅传感器的结构和工作原理 .....  | (82)         |
| <b>第3章 检测信号的转换与处理 .....</b> | <b>(87)</b>  |
| 3.1 电桥 .....                | (87)         |
| 3.1.1 直流电桥 .....            | (87)         |
| 3.1.2 交流电桥 .....            | (91)         |
| 3.1.3 平衡电桥 .....            | (93)         |
| 3.2 调制与解调 .....             | (93)         |
| 3.2.1 调幅与其解调 .....          | (94)         |
| 3.2.2 调频与其解调 .....          | (99)         |
| 3.3 滤波器 .....               | (104)        |
| 3.3.1 理想滤波器 .....           | (104)        |
| 3.3.2 实际滤波器 .....           | (105)        |
| 3.3.3 常用带通滤波器的类型 .....      | (109)        |
| 3.4 模拟/数字转换 .....           | (110)        |
| 3.4.1 D/A 转换器 .....         | (111)        |
| 3.4.2 A/D 转换器 .....         | (114)        |
| <b>第4章 检测信号的输出 .....</b>    | <b>(119)</b> |
| 4.1 概述 .....                | (119)        |
| 4.2 动圈式磁电指示机构 .....         | (119)        |
| 4.3 数字显示系统 .....            | (120)        |
| 4.3.1 计数器 .....             | (120)        |
| 4.3.2 译码器 .....             | (120)        |
| 4.3.3 数码显示器 .....           | (120)        |
| 4.3.4 图像显示器 .....           | (122)        |
| <br><b>第二篇 地质工程典型参数的检测</b>  |              |
| <b>第5章 压力检测 .....</b>       | <b>(124)</b> |
| 5.1 概述 .....                | (124)        |
| 5.1.1 压力的定义 .....           | (124)        |
| 5.1.2 压力的计量单位 .....         | (125)        |
| 5.1.3 压力测量分类 .....          | (125)        |
| 5.2 常用的压力传感器 .....          | (125)        |
| 5.2.1 应变式压力传感器 .....        | (126)        |
| 5.2.2 压阻式压力传感器 .....        | (128)        |
| 5.2.3 压电式压力传感器 .....        | (129)        |
| 5.2.4 振弦式压力传感器 .....        | (129)        |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 5.3 应变片式力参量测量方法 .....          | (130)        |
| 5.3.1 应力状态与应力计算 .....          | (130)        |
| 5.3.2 测量各种力参量时的贴片和接桥方法 .....   | (131)        |
| <b>第6章 流量流速检测 .....</b>        | <b>(138)</b> |
| 6.1 节流式流量计 .....               | (138)        |
| 6.2 转子流量计 .....                | (139)        |
| 6.3 涡街流量计 .....                | (140)        |
| 6.4 电磁流量计 .....                | (140)        |
| 6.4.1 工作原理 .....               | (140)        |
| 6.4.2 电磁流量计的构成 .....           | (141)        |
| 6.5 质量流量计 .....                | (145)        |
| 6.6 涡轮式流量计 .....               | (146)        |
| 6.6.1 涡轮流量计的结构 .....           | (146)        |
| 6.6.2 涡轮流量计原理 .....            | (147)        |
| 6.6.3 特点和应用 .....              | (147)        |
| 6.7 超声波流量计 .....               | (148)        |
| <b>第7章 钻孔弯曲与地层水平位移测量 .....</b> | <b>(149)</b> |
| 7.1 概述 .....                   | (149)        |
| 7.2 钻孔轨迹的基本要素 .....            | (150)        |
| 7.3 钻孔弯曲测量的原理 .....            | (151)        |
| 7.3.1 顶角测量原理 .....             | (151)        |
| 7.3.2 方位角测量原理 .....            | (153)        |
| 7.4 常用测斜仪 .....                | (154)        |
| 7.4.1 JXY-2 型磁针测斜仪 .....       | (154)        |
| 7.4.2 JJX-3 型磁针测斜仪 .....       | (154)        |
| 7.4.3 JDL-1 型陀螺测斜仪 .....       | (157)        |
| 7.4.4 CX 系列测斜仪 .....           | (158)        |
| 7.4.5 磁场强度传感器 .....            | (161)        |
| 7.5 钻孔轨迹的绘制 .....              | (162)        |
| 7.5.1 均角全距法 .....              | (162)        |
| 7.5.2 曲率半径法 .....              | (162)        |

### 第三篇 地质工程测试系统

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| <b>第8章 现代测试系统 .....</b> | <b>(164)</b> |
| 8.1 概 述 .....           | (164)        |
| 8.1.1 智能仪器 .....        | (164)        |

|             |                           |              |
|-------------|---------------------------|--------------|
| 8.1.2       | 自动测试系统 .....              | (165)        |
| 8.1.3       | 虚拟仪器 .....                | (165)        |
| 8.2         | 现代测试系统的基本组成 .....         | (165)        |
| <b>第9章</b>  | <b>灌浆自动检测系统 .....</b>     | <b>(167)</b> |
| 9.1         | LJ 灌浆测控系统组成 .....         | (167)        |
| 9.2         | 传感器与单片机的接口与编程 .....       | (168)        |
| 9.2.1       | 硬件接口 .....                | (168)        |
| 9.2.2       | 接口编程 .....                | (169)        |
| 9.3         | LJ 灌浆测控系统现场安装 .....       | (170)        |
| <b>第10章</b> | <b>测井系统 .....</b>         | <b>(171)</b> |
| 10.1        | JGS-1 智能工程测井系统组成与功能 ..... | (171)        |
| 10.1.1      | JGS-1 主机 .....            | (171)        |
| 10.1.2      | 绞车及绞车控制器 .....            | (172)        |
| 10.1.3      | 探管 .....                  | (173)        |
| 10.2        | JGS-1 智能测井系统工作原理 .....    | (179)        |
| 10.2.1      | 系统结构 .....                | (179)        |
| 10.2.2      | 系统工作原理 .....              | (180)        |
| 10.3        | JGS-1 智能测井系统应用 .....      | (182)        |
| 10.4        | 数字式全景钻孔摄像系统 .....         | (182)        |
| 10.4.1      | 系统的总体结构 .....             | (183)        |
| 10.4.3      | 基本原理 .....                | (185)        |
| 10.4.4      | 应用 .....                  | (186)        |
| 10.5        | 随钻测量 .....                | (187)        |
| 10.5.1      | 传输系统 .....                | (190)        |
| 10.5.2      | 随钻测量传感器 .....             | (194)        |
| 10.5.3      | 随钻测井系统介绍 .....            | (199)        |
| 10.5.4      | 随钻测井资料的应用 .....           | (201)        |
| <b>第11章</b> | <b>钻孔漏失与流速流向仪 .....</b>   | <b>(202)</b> |
| 11.1        | 钻孔漏失测量概述 .....            | (202)        |
| 11.1.1      | 用测漏仪及流速流向仪研究漏失层 .....     | (202)        |
| 11.1.2      | 研究漏失层的物探方法 .....          | (202)        |
| 11.2        | 钻孔流速流向仪的结构与工作原理 .....     | (206)        |
| 11.3        | 电路工作原理 .....              | (207)        |
| 11.3.1      | 磁电转换电路 .....              | (207)        |
| 11.3.2      | 流向判别显示电路 .....            | (210)        |
| 11.4        | 流速流向仪的应用 .....            | (211)        |

|               |                              |              |
|---------------|------------------------------|--------------|
| 11.4.1        | 一次混合抽水试验测分层出水量 .....         | (211)        |
| 11.4.2        | 测定各含水层的互补关系 .....            | (212)        |
| 11.4.3        | 在勘探钻孔中测漏(涌) .....            | (214)        |
| 11.4.4        | 压水试验 .....                   | (215)        |
| <b>第 12 章</b> | <b>边坡自动化监测系统 .....</b>       | <b>(216)</b> |
| 12.1          | 同轴电缆形变 TDR 监测系统 .....        | (217)        |
| 12.1.1        | TDR 技术的基本原理 .....            | (217)        |
| 12.1.2        | TDR 检测系统构成 .....             | (219)        |
| 12.1.3        | 软件系统设计 .....                 | (222)        |
| 12.1.4        | 现场应用 .....                   | (222)        |
| 12.2          | 自动化边坡监测系统 .....              | (223)        |
| 12.2.1        | 传感部分 .....                   | (223)        |
| 12.2.2        | 监测数据的存储与远距离发送 .....          | (225)        |
| 12.2.3        | 系统的集成方法 .....                | (225)        |
| 12.3          | 无线 GPRS/CDMA 自动化数据采集系统 ..... | (226)        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>                 | <b>(228)</b> |

## 绪 论

通常所讲的检测是指使用专门的工具,通过实验和计算,进行比较,找出被测参数的量值或判定被测参数的有无。

检测的过程就是用敏感元件将被测参数的信息转换成另一种形式的信息,通过显示或其他形式被人们所认知。

例如,人们为了表示时间而发明的“日晷”,就是最原始的时间测量装置。但是,作为一门独立的技术基础学科,现代检测技术是近半个世纪才发展起来的。随着科技的发展,检测技术的测量对象已遍及所有的理、工、医、农学科和某些社会科学领域。检测技术水平的高低,已成为衡量一个国家科技现代化的重要标志之一。检测技术已广泛地应用于工农业生产的各个领域,随着半导体技术、光导纤维、计算机技术、自动化技术以及近代物理、数理统计、控制论、信息论等科学技术的进步,检测理论与技术水平得到了飞速的发展。反过来,拥有高水平的检测理论和检测系统又会促进新科技成果的不断发现和创新。例如,材料压阻、压磁和压电特性的发现促进了传感技术的发展,使参数检测范围得到了扩大,精度得到了提高。

当前,检测技术正朝着高精度、小型化和智能化的方向发展。

当代检测技术主要有四个方面的内容:

- (1) 各种参数的测定;
- (2) 自动化过程中参数的反馈、反馈调节和自控;
- (3) 现场实时检测和监控;
- (4) 实验过程中的参数测量和分析。

地质工程主要包括地下工程、边坡工程、地基工程、地质灾害整治工程或地质环境治理工程等,其工作的对象主要是岩土体。随着科学技术的发展,检测技术在地质工程中发挥了越来越大的作用。

例如,在钻探生产过程中,常常需要实时掌握钻压、泵压、泵量、转速、扭矩、钻速和回次进尺等参数,以及时判断地层变化情况,优化钻进规程。

在灌浆工程中,流量、压力和水灰比是灌浆过程控制的三大参数,对它们的实时检测可以保证灌浆施工过程按设计要求进行,避免地层抬动、堵管事故和浆液浪费,并为工程费用的计算提供准确数据。

在深基坑开挖施工过程中,为了确保基坑支护结构和相邻建筑物的安全,必须对在施工过程中引发的土体性状、支护结构、邻近建筑物、地下设施等的变化进行检测。在基坑工程施工中,围护结构和相邻环境中地层、房屋等的水平位移和沉降的检测,不但可为施工开展提供及时的反馈信息,而且可以作为施工开挖方案修改的依据。在路基工程中,路基填土的密实度和含水量都要用仪器进行测量。

目前,地质工程测试内容包括下面几方面的内容:

- (1) 土体物理力学性质测试:包括土体基本物理性质指标(成分、密度、湿度、可塑性),

土体力学性质指标(变形参数、强度参数),土体力学性质(渗透性、孔隙压力);

(2)岩体物理力学性质测试:包括岩体基本物理性质指标,岩体力学性质指标(变形参数、强度参数、软化系数);

(3)地应力测试:包括地应力大小、地应力方向、地应力集中带位置等;

(4)水文地质测试:包括地下水水位、地质体渗透性、地下水水温、水质;

(5)地温测试:不同位置深度处地温大小、地温梯度、大地热流密度;

(6)岩土体及其支挡结构受力与变形(位移)测试;

(7)工程施工过程参数的实时检测,包括钻孔测量、注浆过程检测等。

目前,检测技术在地质工程的各个方面都有了广泛的应用,一些具有较高技术水平的检测系统已应用到现场检测中。但是,由于工作环境的限制和起步较晚,在地质工程的很多方面检测技术水平还较低。例如,在基坑工程和地下隧洞工程的监测中,测试过程的全部或大部分操作、调试及计算工作还须由测试人员直接参与并取得结果,不但费时费力,占用施工时间,而且无法保证及时发现问题。这一现状阻碍了我国地质工程勘测、设计、施工和监测技术水平的提高。因此,加快地质工程专业仪器和检测系统的开发研究,特别是国产仪器的开发研究,是促进地质工程检测技术发展、满足现场检测需要的迫切要求。

# 第一篇 检测技术的理论基础

## 第1章 检测的基础知识

### 1.1 信号概述

#### 1.1.1 信号的定义与分类

信息(information)是客观事物的时间、空间特殊性,是无所不在、无时不存的,是一个场的概念。信号(signal)是某一特定信息的载体,是工程测试的对象。人们用各种技术手段将信号表达出来,供观察和分析。在检测过程中信号一般以状态参数的形式来记录。例如钻机钻进过程的特征用钻压、转数等参数来表征,灌浆过程的状态用压力、流量和水灰比等参数来描述。

噪声(noise)也是一种信号,任何干扰对其他信号感知和解释的现象称为噪声。信号与噪声的区别纯粹是人为的,且取决于使用者对两者的评价标准。因此,信号理论包括噪声理论。

信号分类方法很多,有基于信号的演变类型、信号的预定特点、或者信号的随机特性进行分类的表象(phenomenological)分类法;基于信号的幅值或者独立变量是连续还是离散的进行分类的形态(morphological)分类法;基于信号模型中独立变量个数的维数(dimensional)分类法以及基于信号频谱的频率分布形状的频谱(spectral)分类法等。以下主要介绍时域分类法和形态分类法。

##### 1.1.1.1 时域分类法

测试信号一般是随时间变化的时间函数。因此,一般根据信号随时间变化的规律来描述信号,对信号进行分类,即时域分类法。

按时域分类法可将信号分成两大类,即确定性信号和随机信号。

确定性(deterministic)信号是指可以用合适的数学模型或数学关系式来完整地描述或预测(predicable)其随时间演变情形的信号。

随机(random)信号是具有不能被预测(unpredictable)的特性且只能通过统计观察来加以描述的信号。

##### (1)确定性信号

确定性信号分为周期信号和非周期信号。

如果一个信号满足下面关系式,则称为周期(periodic)信号。

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

式中:  $T$  表示周期。

周期信号一般又分为正余弦信号、多谐复合信号和伪随机信号。

正余弦(harmonic)信号具有如下的一般表达式:

$$x(t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \alpha\right) = A \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t + \tau)\right] \quad (1-2)$$

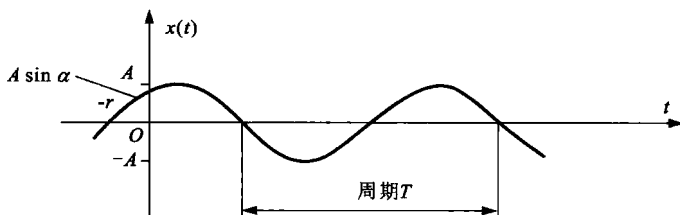


图 1-1 正、余弦信号

多谐复合信号即复杂周期信号,是由若干频率之比为有理数的正弦信号组合而成的信号。其一般表达式为:

$$x(t) = A \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + B \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \quad (1-3)$$

式中:  $\omega_1/\omega_2$  为有理数。

伪随机(pseudo-random)信号组成周期信号的一个特殊范畴,它们具有准随机的特性。

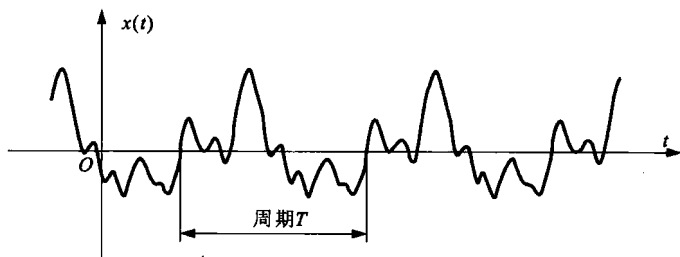


图 1-2 伪随机信号

不具有上述性质的确定性信号称为非周期(nonperiodic)信号。

非周期信号又可分成准周期信号和瞬态信号两类。

准周期信号是由多个具有不成比例周期的正弦波之和形成,或者组成信号的正(余)弦信号的频率比不是有理数。

瞬态信号是时间历程短的信号,如矩形脉冲信号、衰减指数脉冲信号与正弦脉冲信号等。其典型形式见图 1-3。

## (2) 随机信号

随机信号又可分成两大类:平稳(stationary)和非平稳(nonstationary)随机信号。平稳(stationary)随机信号的统计特性不随时间的平移而变化,或者说不随时间原点的选取而变化。即:如果对于时间  $t$  的任意  $n$  个数值  $t_1, t_2, \dots, t_n$  和任意实数  $\varepsilon$ , 随机过程  $\{x(t)\}$  的  $n$  维分布函数满足关系式

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1 + \varepsilon, t_2 + \varepsilon, \dots, t_n + \varepsilon) \quad (1-4)$$

式中:  $n = 1, 2, \dots$

对于一个平稳随机过程, 若它的任一单个样本函数的时间平均统计特征等于该过程的集合平均统计特征, 则该过程称为各态历经(ergodic)过程。

工程中遇到的许多过程都可认为是平稳的, 其中大部分过程都具有各态历经性。

平稳随机信号的统计特征是不变的(图 1-4), 非平稳随机信号则不具有上述特点(图 1-5)。

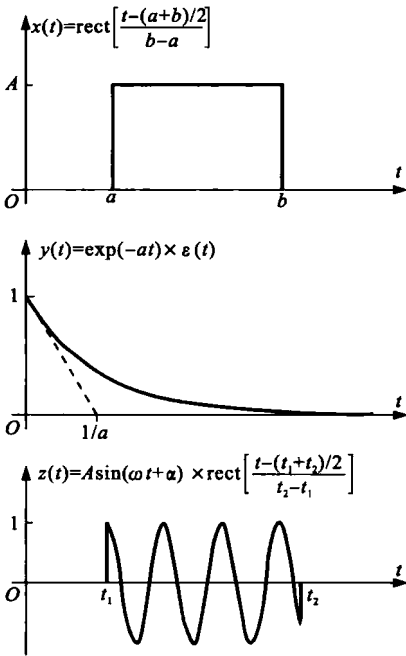


图 1-3 瞬态信号

$x(t)$ —矩形脉冲信号;  
 $y(t)$ —衰减指数脉冲信号;  $z(t)$ —正弦脉冲

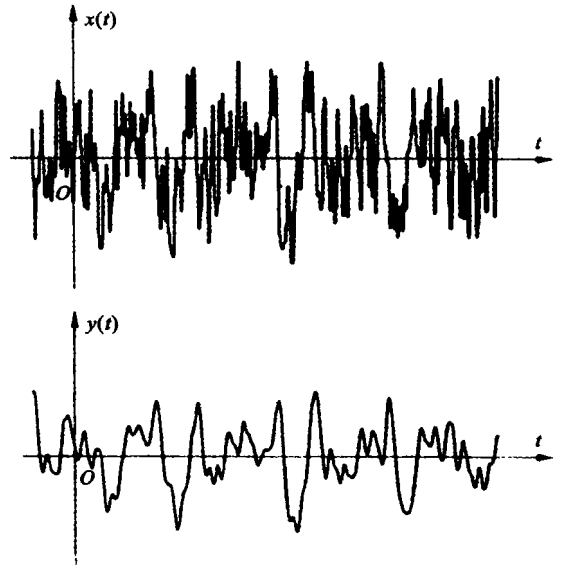


图 1-4 平稳随机信号

$x(t)$ —宽带信号(白噪声);  $y(t)$ —经低通滤波后的信号

#### 1.1.1.2 形态分类法

形态分类法即根据信号的幅值或者独立变量是连续还是离散的这一特点将信号分为连续信号和离散信号。其分类依据有两个:

- (1) 信号的幅值是连续的还是离散的;
- (2) 自变量(即时间  $t$ )是连续的还是离散的。

在此基础上, 又可将信号进一步划分。对于连续信号(continuous signal), 自变量和幅值均为连续的信号称模拟(analog)信号; 自变量是连续、但幅值为离散的信号, 则称为量化(quantized)信号。对于离散信号(discrete signal), 信号的自变量及幅值均为离散的, 则称为数字(digital)信号; 信号的自变量为离散值、但其幅值为连续值时, 则称该信号为被采样(sampled)信号。

信号按形态分类法加以区分的四种形式见图 1-6 所示。

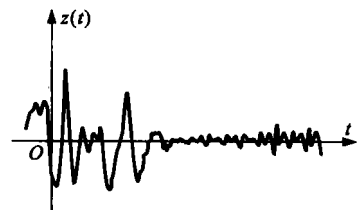


图 1-5 非平稳随机信号

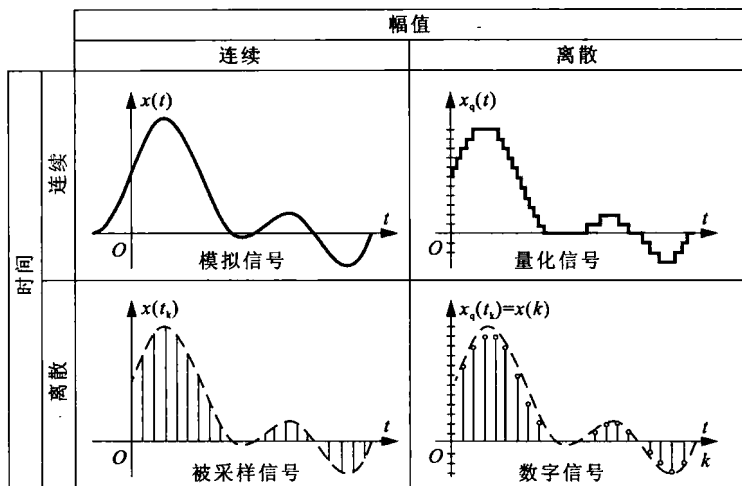


图 1-6 连续信号和离散信号

### 1.1.2 信号的分析

信号分析是将一复杂信号分解为若干简单信号分量的叠加,并以这些分量的组成情况去考察信号的特性。信号分析一般运用数学工具进行分析研究,为正确选用和设计测试系统提供依据。

信号的描述主要有两种方法:

#### (1) 信号的时域描述法(time-domain description)

时域描述法主要反映信号的幅值随时间变化的特征。分析系统时,除采用经典的微分或差分方程外,还引入单位脉冲响应和单位序列响应的概念,借助于卷积积分的方法。这种方法的优点是直观、物理概念清晰,缺点是复杂信号分解困难。

#### (2) 信号的频域分析法(frequency-domain description)

将信号和系统的时间变量函数或序列变换成对应频率域中的某个变量的函数,来研究信号和系统的频域特性。信号的频域描述即是将一个时域信号变换为一个频域信号,将该信号分解成一系列基本信号的频域表达形式之和,从频率分布的角度出发研究信号的结构及各种频率成分的幅值和相位关系。对于连续系统和信号来说,常采用傅里叶变换和拉普拉斯变换;对于离散系统和信号则采用  $Z$  变换。频域分析法将时域分析法中的微分或差分方程转换为代数方程,给问题的分析带来了方便。

信号分析的基本方法是把频率作为信号的自变量,在频域里进行信号的频谱分析。

实际信号的形式常常是比较复杂的。因此常常将复杂的信号分解成某些特定类型(易于实现和分析)的基本信号之和,如正弦信号、复指数型信号、阶跃信号、冲激信号,等等。

## 1.2 测量方法

测量方法指被测量与其标准单位进行比较的具体方法。测量方法的分类多种多样,按被测量变化的快慢可分为静态测量与动态测量,按测量手段可分为直接测量和间接测量;按测量方式可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

### 1.2.1 直接测量和间接测量

#### (1) 直接测量

通常测量仪器已标定好, 用它对某个未知量进行测量时, 就能直接读出测量值, 称为直接测量。例如, 用磁电式仪表测电流、电压; 用弹簧管式压力表测量锅炉压力等就属直接测量。直接测量的优点是测量过程简单、迅速, 缺点是测量精度不高。这种测量方法在一般的工程中大量采用。

#### (2) 间接测量

首先确定被测量的函数关系式, 然后用标定好的仪器测量函数关系式中的有关量, 最后代入函数关系式进行计算, 得到被测数, 称为间接测量。例如, 测量导线电阻率, 其函数关系式为:

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l} \quad (1-5)$$

需要先直接测量导线的电阻  $R$ 、导线长度  $l$  和导线直径  $d$ , 然后代入上式, 求出电阻率的值。间接测量广泛用于科学实验中。

### 1.2.2 偏差式测量、零位式测量和微差式测量

#### (1) 偏差式测量

以仪表指针的偏移量表示被测量值。

举例: 磁电式电流表。当有电流流入电流表时, 在电磁力的作用下, 经传动机构带动指针转动, 并压缩表内的弹性元件, 若弹性元件的反作用力矩与电磁力矩平衡, 指针就稳定指示在刻度盘的某个位置。若该电流表的刻度已用标准量具进行校准, 则该位置就对应于所测电流的值。缺点: 精度较低, 且要消耗被测对象的部分能量, 损失部分信号。

#### (2) 零位式测量

通过改变可知的基准量使之与被测量达到平衡状态, 从而确定被测量的值。

举例: 电位差计, 如图 1-7 所示。在进行测量前, 应先调节  $R_1$ , 校准工作电流  $I$ 。测量时, 接入被测电压  $U_x$ , 使与基准电压  $U_k$  进行比较, 差值  $\Delta U$  为:  $\Delta U = U_x - U_k$  作为检零放大器  $G$  输入信号, 其输出电压  $U_c$  控制伺服电动机, 通过小型减速装置带动电位计滑动触头  $A$  及指针, 从而亦改变基准电压  $U_k$ , 直至  $\Delta U = 0$ , 系统达到新的平衡。此时  $U_k$  的指示值即为被测电压  $U_x$ 。优缺点: 精度高, 但测量过程中要进行平衡运行, 速度不快。适用于测量变化较缓慢的信号。

#### (3) 微差式测量

与它的量值只有微小差别的已知量相比较, 并测出这两个量值间的差值, 以确定被测量。测量时分两步进行: ①将被测量基本工作点与标准量进行比较, 并调节达到平衡状态; ②当被测量离开工作点时(有微小变动), 测量仪器便离开平衡状态, 此时仪器的指示值即为变动部分的值。

举例: 稳压电源输出电压随负载变动而引起的微小变化值的测量, 如图 1-8 所示。

图中:  $R_L$  为稳压电源的负载,  $G$  为高灵敏电流计。在测量之前, 预先调整  $r_1$ , 使电位差计的工作电流  $I$  为标准值, 然后, 在某一负载时, 调整电位计  $R$ , 使高灵敏电流计  $G$  指零。系