

卓越工程师培养计划 · 电子信息

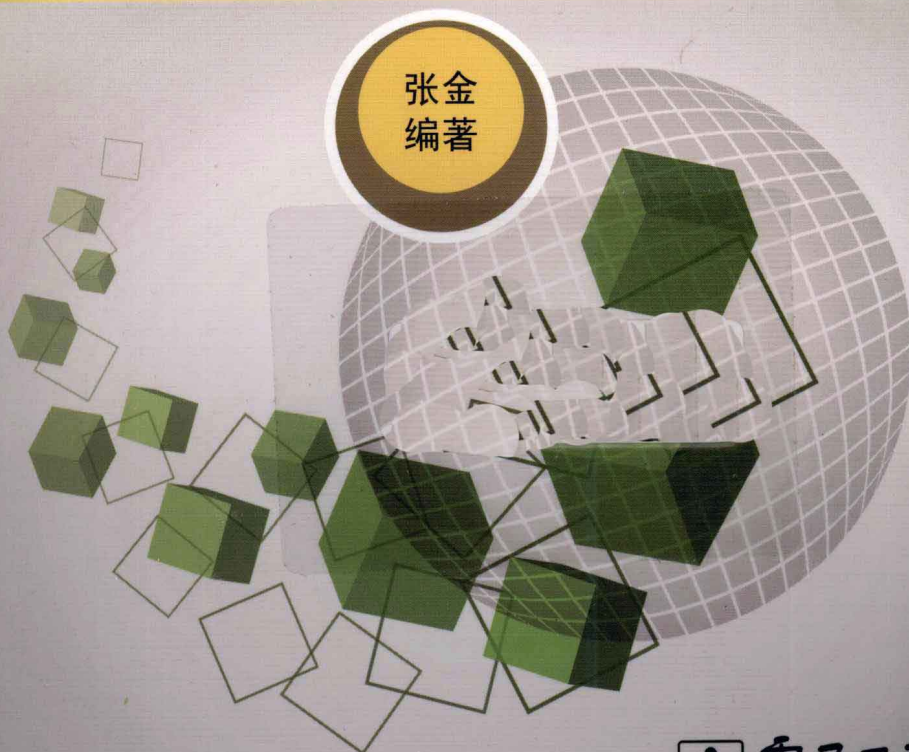
# 模拟信号调理技术

## 电子设计必备!

### 读者对象

- 电子设计竞赛参赛者
- 电子设计工程师
- 电子设计爱好者
- 高等院校师生

张金  
编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

卓越工程师培养计划·电子信息

# 模拟信号调理技术

张 金 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了现代电子信息系统中模拟信号调理的概念、功能及技术途径,并且重点介绍了传感器激励、信号变换、信号放大、信号滤波、调整与补偿、集成模拟信号调理及调制与解调等模拟信号调理常见技术的实现手段。全书理论与实践相结合,通过具体的分析和详细的实例,可让读者对模拟信号调理技术有全面深入的理解。

本书结构清晰,体系完整,实例丰富,叙述浅显易懂,可作为电子设计工程师的培训和参考用书,也可作为电子信息工程、通信工程、测试技术与仪器、自动控制、电气控制、机电一体化等相关专业研究生、本科生的教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟信号调理技术 / 张金编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.1

(卓越工程师培养计划)

ISBN 978-7-121-15245-0

I. ①模… II. ①张… III. ①模拟信号处理 IV. ①TN911.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 241584 号

策划编辑: 王敬栋 (wangjd@phei.com.cn)

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京丰源印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 24.25 字数: 621 千字

印 次: 2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

## 序

本书是教育部“卓越工程师教育培养计划”中电子信息类课程群中的重要一环，也是作者多年来从事电子技术系列课程教学内容与体系改革，以及传感探测学科领域科学研究的经验总结。

21 世纪初，麻省理工学院等提出了 CDIO 工程教育理念(C 代表 Conceive, D 代表 Design, I 代表 Implement, O 代表 Operate)，它以产品研发到产品运行的生命周期为载体，让学生以主动的、实践的、课程之间有机联系的方式学习工程。我国高等工科教育培养规模居世界前列，但工程教育创新、人才培养质量等指标仍与世界水平相差甚远。为此，教育部和中国工程院提出了“卓越工程师教育培养计划”，旨在建立具有大工程观、大系统观、大集成观的工程教育体系，培养造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量工程技术人才，为国家走新型工业化发展道路、建设创新型国家和人才强国战略服务。

不同于数字信号处理，模拟信号调理及其电子电路的设计、调试除系统的基础理论知识外，更多的是工程师的经验和技巧，使得模拟信号调理成为现代电子信息系统设计的难点和制约系统性能的关键因素。进入 21 世纪，从表面上看来，电路的核心元件既没有从电子管到晶体管这样显著的变化，也没有从晶体管到集成电路这样剧烈的改变，更没有从机械、气动到电动那样本质的变化，好像仅仅是集成电路集成度的变化，却带动传统的模拟信号调理技术向着无放大器化、SoC 化、信号处理数字化、调试指令化、误差补偿数字化方向发展。虽然总的发展趋势是从模拟走向数字，但模拟信号处理永远是数字信号处理的基础。作者在学习和参考同行专家微弱信号调理、模拟电子技术基本理论的基础上，总结多年来从事电子技术系列课程的教学和科研经验，以信号采集、传输和处理流程为主线构建了模拟信号调理技术理论体系，通过详细的理论分析和具体的实例介绍，系统阐述了模拟信号调理的概念、理论及技术途径，是即将走上科研岗位的相关专业高等院校毕业生和青年科技工作者难得的参考书和工具书，对卓越电子设计工程师的培养具有重要的引导作用。

清华大学教授、博士生导师：

2011 年 11 月于清华园

## 前 言

模拟信号调理技术及相关电子电路的设计、调试既是现代电子信息系统设计的难点，也是制约系统性能的关键因素。目前关于模拟电子技术和数字信号处理技术的专业教材和专著不少，但还没有就模拟信号调理的内容进行专门论述的相关参考书，本书正是从理论和实践两个方面系统介绍了现代电子信息系统信号采集、传输和处理流程中模拟信号调理技术的相关概念、功能和实现手段。本书体系完善，结构清晰，内容翔实新颖，针对性强。

本书共分 8 章，由中国人民解放军陆军军官学院张金副教授统稿和撰写。第 1 章主要介绍模拟信号调理的基础知识，包括现代电子信息系统的组成及信号调理的概念、内容；信号及其描述方法、获取与传输途径，以及传感器的输出信号类型及调理方法。第 2 章着重介绍现代信息系统中的噪声和干扰源，常用器件和模块的噪声特性，以及干扰抑制措施。第 3 章重点叙述传感器激励、电桥设计，以及  $I/U$ 、 $U/I$ 、 $U/F$ 、 $F/U$ 、 $A/D$ 、 $D/A$  和交流/直流等常见信号变换电路的设计，信号整形及峰值检测调理电路的设计。第 4 章从最基本的分立元件放大电路分析和设计方法入手，重点讨论基于集成运放的比例放大、前置放大、仪用放大、隔离放大、采样保持、增益可控放大、电荷放大，以及锁相放大电路的设计方法和应用实例。第 5 章以滤波器的概念、作用、分类为切入点，首先介绍低通、高通、带通、带阻 4 种基本形式的滤波器性能、设计方法及实例电路，接着叙述状态变量滤波器、开关电容滤波器、相关滤波器、统计平均滤波器等新型滤波技术和器件，最后通过实例说明滤波器的综合应用情况。第 6 章介绍电平调整、温度补偿及非线性补偿的概念、手段和电路设计实例。第 7 章从信号检测的角度分别介绍幅值调制与解调、频率调制与解调、相位调制与解调、脉宽调制与解调的概念、功能和实现途径。第 8 章首先论述了模拟信号调理技术的发展趋势，然后重点介绍了基于在系统可编程的 ispPAC 系列信号调理 SoC 器件的特性和应用，最后给出了一个单片集成模拟信号器件应用的实例。

本书在编写过程中参考了许多专家同行们的著作，无法一一列出，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在错漏之处，恳切希望读者批评指正。

编著者

2011 年 11 月于清华园

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 概述            | 1  |
| 1.1 现代电子信息系统        | 1  |
| 1.1.1 电量测量技术        | 1  |
| 1.1.2 非电量测量技术       | 2  |
| 1.1.3 现代电子信息系统组成    | 3  |
| 1.2 信号及其描述          | 4  |
| 1.2.1 概述            | 4  |
| 1.2.2 信号的定义与分类      | 5  |
| 1.2.3 信号的描述方法       | 7  |
| 1.2.4 随机信号的描述       | 8  |
| 1.2.5 信号特征对系统的基本要求  | 13 |
| 1.3 信号的获取及传输        | 15 |
| 1.3.1 信号的获取         | 15 |
| 1.3.2 信号的传输         | 17 |
| 1.4 信号调理概念及传感器      | 18 |
| 1.4.1 信号调理的概念与内容    | 18 |
| 1.4.2 传感器的输出信号类型及调理 | 20 |
| 第 2 章 噪声及干扰         | 24 |
| 2.1 噪声类型            | 24 |
| 2.1.1 白噪声           | 24 |
| 2.1.2 限带白噪声         | 25 |
| 2.1.3 窄带白噪声         | 26 |
| 2.1.4 色噪声           | 27 |
| 2.2 信号噪声比及信噪改善比     | 28 |
| 2.3 元器件噪声源及其噪声特性    | 29 |
| 2.3.1 热噪声           | 29 |
| 2.3.2 散弹噪声          | 32 |
| 2.3.3 低频噪声          | 32 |
| 2.3.4 分配噪声          | 34 |
| 2.4 噪声系数和噪声因数       | 35 |
| 2.4.1 噪声系数          | 35 |
| 2.4.2 噪声因数          | 36 |
| 2.4.3 级联放大器的噪声系数    | 36 |
| 2.4.4 可检测的最小信号      | 36 |
| 2.5 放大器的噪声特性        | 37 |

|            |                 |           |
|------------|-----------------|-----------|
| 2.5.1      | 放大器的噪声模型        | 37        |
| 2.5.2      | 放大器的噪声性能        | 38        |
| 2.5.3      | 最佳源电阻与噪声系数      | 39        |
| 2.5.4      | 噪声因数等值图         | 40        |
| 2.6        | 半导体分立元件的噪声特性    | 41        |
| 2.6.1      | 半导体二极管的噪声特性     | 41        |
| 2.6.2      | 双极型晶体管的噪声特性     | 42        |
| 2.6.3      | 场效应管的噪声特性       | 47        |
| 2.7        | 运算放大器的噪声特性      | 51        |
| 2.7.1      | 运算放大器的等效输入噪声模型  | 51        |
| 2.7.2      | 运算放大器的噪声性能      | 52        |
| 2.8        | 干扰噪声            | 54        |
| 2.8.1      | 干扰噪声源           | 54        |
| 2.8.2      | 干扰噪声的频谱分布       | 58        |
| 2.9        | 干扰噪声的耦合途径       | 59        |
| 2.9.1      | 传导耦合与公共阻抗耦合     | 59        |
| 2.9.2      | 电源耦合            | 60        |
| 2.9.3      | 电场耦合            | 61        |
| 2.9.4      | 磁场耦合            | 63        |
| 2.9.5      | 电磁辐射耦合          | 67        |
| 2.10       | 屏蔽              | 68        |
| 2.10.1     | 场传播与波阻抗         | 68        |
| 2.10.2     | 屏蔽层的吸收损耗        | 70        |
| 2.10.3     | 屏蔽层的反射损耗        | 71        |
| 2.10.4     | 屏蔽效果            | 74        |
| 2.11       | 接地              | 77        |
| 2.11.1     | 电子信息系统的接地种类     | 77        |
| 2.11.2     | 屏蔽电缆的接地         | 78        |
| 2.11.3     | 电磁波辐射屏蔽         | 84        |
| 2.11.4     | 接地方式            | 85        |
| 2.11.5     | 放大器输入信号回路接地     | 87        |
| 2.12       | 隔离及其他降噪技术       | 91        |
| 2.12.1     | 隔离              | 91        |
| 2.12.2     | 纵向扼流变压器         | 92        |
| 2.12.3     | 其他措施            | 94        |
| 2.13       | 常用干扰抑制措施        | 95        |
| <b>第3章</b> | <b>测量转换电路设计</b> | <b>96</b> |
| 3.1        | 电桥              | 96        |
| 3.1.1      | 直流电桥            | 96        |
| 3.1.2      | 交流电桥            | 99        |

|              |                 |            |
|--------------|-----------------|------------|
| 3.1.3        | 变压器式电桥          | 102        |
| 3.1.4        | 电桥电路设计与信号调理     | 103        |
| 3.2          | 传感器激励           | 111        |
| 3.2.1        | 激励方式            | 112        |
| 3.2.2        | 工作方式            | 112        |
| 3.2.3        | 布线方式            | 113        |
| 3.2.4        | 交流激励            | 116        |
| 3.2.5        | 传感器激励电路         | 119        |
| 3.3          | 电流/电压变换与电压/电流变换 | 122        |
| 3.3.1        | 电流/电压变换         | 122        |
| 3.3.2        | 电压/电流变换         | 128        |
| 3.4          | 电压/频率变换与频率/电压变换 | 132        |
| 3.4.1        | 电压/频率变换         | 132        |
| 3.4.2        | 频率/电压变换         | 136        |
| 3.5          | 交流/直流变换         | 139        |
| 3.5.1        | 半波整流器           | 139        |
| 3.5.2        | 全波整流器           | 141        |
| 3.5.3        | 交流/直流转换         | 142        |
| 3.6          | 信号整形            | 143        |
| 3.6.1        | 电压比较器           | 143        |
| 3.6.2        | 施密特触发器          | 145        |
| 3.6.3        | 由运放组成的脉冲波形钳位电路  | 147        |
| 3.7          | 峰值及真有效值检测       | 148        |
| 3.7.1        | 峰值检测            | 148        |
| 3.7.2        | 真有效值检测          | 150        |
| 3.8          | 模/数转换与数/模转换     | 151        |
| 3.8.1        | 模/数转换           | 151        |
| 3.8.2        | 数/模转换           | 159        |
| <b>第 4 章</b> | <b>信号放大技术</b>   | <b>165</b> |
| 4.1          | 放大电路概述          | 165        |
| 4.2          | 分立元件放大电路的设计     | 166        |
| 4.2.1        | 三极管放大电路的设计      | 166        |
| 4.2.2        | 场效应管放大电路的设计     | 170        |
| 4.3          | 集成运算放大器的基本知识    | 172        |
| 4.3.1        | 集成运算放大器的内部框图    | 172        |
| 4.3.2        | 集成运算放大器的主要参数    | 172        |
| 4.3.3        | 理想集成运放          | 175        |
| 4.3.4        | 集成运放的封装及命名方法    | 178        |
| 4.3.5        | 常用运算放大器类型       | 179        |
| 4.3.6        | 集成运放的选用原则       | 182        |

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 4.4    | 比例放大电路的设计            | 185 |
| 4.4.1  | 同相比例放大电路             | 185 |
| 4.4.2  | 增益可调的反相比例放大电路        | 186 |
| 4.4.3  | 单运放差动比例放大电路          | 187 |
| 4.5    | 前置放大电路的设计            | 187 |
| 4.5.1  | 前置放大电路的设计原则          | 188 |
| 4.5.2  | 音频前置放大电路的设计          | 188 |
| 4.5.3  | 基于 NE5532 的前置放大电路的设计 | 191 |
| 4.5.4  | 宽带前置放大电路的设计          | 193 |
| 4.5.5  | 微弱光信号前置放大电路的设计       | 198 |
| 4.6    | 仪用放大电路的设计            | 203 |
| 4.6.1  | 概述                   | 203 |
| 4.6.2  | 三运放仪用放大器             | 204 |
| 4.6.3  | 双运放仪用放大器             | 206 |
| 4.6.4  | 单片集成仪用放大器            | 207 |
| 4.7    | 隔离放大电路的设计            | 215 |
| 4.7.1  | 概述                   | 215 |
| 4.7.2  | 光电耦合隔离放大电路的设计        | 216 |
| 4.7.3  | 变压器耦合隔离放大器           | 218 |
| 4.8    | 采样保持放大电路的设计          | 220 |
| 4.8.1  | 概述                   | 220 |
| 4.8.2  | SHC5320 高速双极性采样/保持器  | 221 |
| 4.9    | 增益可控放大电路的设计          | 222 |
| 4.9.1  | 概述                   | 222 |
| 4.9.2  | 单片集成增益可控放大器          | 223 |
| 4.9.3  | 自动增益控制电路             | 225 |
| 4.10   | 电荷放大电路的设计            | 230 |
| 4.10.1 | 基本原理                 | 230 |
| 4.10.2 | 电荷放大电路的特性            | 231 |
| 4.10.3 | 电荷放大电路               | 231 |
| 4.11   | 锁相放大电路的设计            | 233 |
| 4.11.1 | 锁相放大器的基本组成           | 233 |
| 4.11.2 | 锁相放大器应用中应注意的问题       | 235 |
| 4.11.3 | 锁相放大器的应用实例           | 236 |
| 4.11.4 | 多通道锁相放大器的设计          | 237 |
| 第 5 章  | 信号滤波技术               | 240 |
| 5.1    | 概述                   | 240 |
| 5.2    | 低通滤波器 (LPF)          | 241 |
| 5.2.1  | 低通滤波器的一般特性及特征参数      | 241 |
| 5.2.2  | 低通滤波器的传递函数           | 244 |

|              |                  |            |
|--------------|------------------|------------|
| 5.2.3        | 低通滤波器的设计         | 245        |
| 5.2.4        | 有源低通滤波器          | 248        |
| 5.3          | 高通滤波器 (HPF)      | 252        |
| 5.4          | 带通滤波器 (BPF)      | 254        |
| 5.5          | 带阻滤波器 (BEF)      | 258        |
| 5.6          | 状态变量滤波器          | 260        |
| 5.6.1        | 状态变量滤波器的原理及类型    | 260        |
| 5.6.2        | 集成状态变量滤波器        | 262        |
| 5.7          | 开关电容滤波器          | 267        |
| 5.7.1        | 开关电容滤波器的原理       | 267        |
| 5.7.2        | 开关电容滤波器的设计       | 268        |
| 5.7.3        | 集成开关电容滤波器        | 270        |
| 5.8          | 相关滤波器及统计平均滤波器    | 280        |
| 5.8.1        | 相关滤波器            | 280        |
| 5.8.2        | 统计平均滤波器          | 281        |
| 5.9          | 滤波器的综合运用         | 281        |
| 5.9.1        | 无源 RC 滤波器的串联     | 281        |
| 5.9.2        | 滤波器的并联           | 282        |
| 5.9.3        | 带通滤波器在信号频率分析中的应用 | 285        |
| <b>第 6 章</b> | <b>调整与补偿技术</b>   | <b>289</b> |
| 6.1          | 电平调整技术           | 289        |
| 6.1.1        | 无源电平调整电路         | 289        |
| 6.1.2        | 有源电平调整电路         | 290        |
| 6.1.3        | 压力传感器有源电平调整电路    | 291        |
| 6.2          | 温度补偿技术           | 295        |
| 6.2.1        | 零点温度补偿           | 295        |
| 6.2.2        | 灵敏度温度补偿          | 296        |
| 6.3          | 信号的非线性补偿技术       | 297        |
| 6.3.1        | 开环非线性补偿          | 297        |
| 6.3.2        | 闭环非线性反馈补偿        | 300        |
| 6.3.3        | 增益控制式非线性补偿       | 301        |
| 6.3.4        | 实现非线性补偿的具体方法     | 303        |
| 6.3.5        | 非线性补偿实例          | 307        |
| <b>第 7 章</b> | <b>调制与解调技术</b>   | <b>312</b> |
| 7.1          | 幅值调制与解调          | 312        |
| 7.1.1        | 幅值调制             | 312        |
| 7.1.2        | 幅值调制的解调          | 316        |
| 7.1.3        | 常用解调电路           | 321        |
| 7.2          | 频率调制与解调          | 323        |
| 7.2.1        | 频率调制             | 323        |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 7.2.2        | 频率调制的解调                  | 328        |
| 7.3          | 相位调制与解调                  | 328        |
| 7.3.1        | 相位调制                     | 328        |
| 7.3.2        | 相位调制的解调                  | 329        |
| 7.4          | 脉宽调制与解调                  | 330        |
| 7.4.1        | 脉宽调制                     | 330        |
| 7.4.2        | 脉宽调制的解调                  | 331        |
| 7.5          | 调制与解调电路设计实例              | 332        |
| 7.5.1        | 设计要求                     | 332        |
| 7.5.2        | 方案设计                     | 332        |
| 7.5.3        | 调制与解调电路设计                | 333        |
| <b>第 8 章</b> | <b>集成模拟信号调理</b>          | <b>336</b> |
| 8.1          | 模拟信号调理技术的发展趋势            | 336        |
| 8.1.1        | 高分辨力模/数转换器               | 337        |
| 8.1.2        | SoC 技术                   | 338        |
| 8.1.3        | 在系统可编程技术                 | 339        |
| 8.1.4        | 高速运算                     | 339        |
| 8.1.5        | 非易失性大容量存储器               | 339        |
| 8.2          | 基于在系统可编程的模拟信号调理技术        | 340        |
| 8.2.1        | 内部结构与基本原理                | 340        |
| 8.2.2        | 基本开发流程                   | 341        |
| 8.2.3        | 主流器件与核心技术                | 342        |
| 8.3          | ispPAC 系列器件的应用与设计        | 343        |
| 8.3.1        | ispPAC 简介                | 343        |
| 8.3.2        | 在系统可编程模拟电路的结构            | 345        |
| 8.3.3        | ispPAC 接口的设计             | 352        |
| 8.3.4        | ispPAC 增益的调整方法           | 354        |
| 8.3.5        | ispPAC 滤波器的设计            | 358        |
| 8.3.6        | PAC-Designer 软件及开发实例     | 360        |
| 8.3.7        | 基于 ispPAC 系列芯片的温度测量与监控系统 | 367        |
| 8.4          | AD693 型多功能传感信号调理器        | 369        |
| 8.4.1        | AD693 的工作原理              | 369        |
| 8.4.2        | 典型应用                     | 372        |
|              | 参考文献                     | 377        |

# 概 述

知识的获取往往从测量开始，人类在其自身的社会发展中创造并发展了测量学科。英国物理学家开尔文勋爵（William Thomson）说过：“凡存在之物，必以一定的量存在。”“当你能测量你正谈及的实物并将它用数字表达时，你便有所了解；而当你不能测量它，不能将它用数字表达时，你的知识是贫瘠且不令人满意的。”开尔文勋爵的这两段描述既指出了测量的广博性，也指出了测量的内涵及其科学性。

## 1.1 现代电子信息系统

概括地讲，凡是可以完成一个特定功能的完整的电子装置都可以称为电子系统，大到航天飞机的测控系统，小到电子计时器。现代电子信息系统是以新型智能电子元器件为核心，通过电子设计自动化（EDA）技术设计完成的具备外界环境信息感知、信号处理、信号传输和显示输出等功能的电子系统。外界环境信息的感知包括电量和非电量的测量。在早期，非电量的测量多采用非电测量方法，如用尺子测量长度，用秤称重等。随着科学技术的发展，早期的测量方法已不能满足社会发展的要求。现在非电量的测量大部分是用电测量的方法去完成，其中的关键技术就是如何将非电量转换成电量，即传感器技术（或称敏感技术）。

测量是人类对自然界各种现象及实体取得量化观念的一种认识过程，包括电量测量和非电量测量。

### 1.1.1 电量测量技术

电量测量是指对电量及电路元件参数的测量。通常按被测信号的频率特性将电量测量分为直流测量和交流测量。直流测量参数通常包括直流电压  $U$ 、直流电流  $I$ 、功率  $P$ 、电阻  $R$ 。交流测量参数通常包括交流电压  $u$ 、电流  $i$ 、有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、视在功率  $S$ 、电能  $W$ 、功率因数  $\cos\varphi$ 、相位  $\varphi$ 、频率  $f$ 、交流阻抗  $Z$ 、电容  $C$  和电感  $L$  等。

电量测量指示仪表要想将被测量变换为指针的角位移，就需要一个能够在被测量作用下引起指针偏转的机构，该机构称为测量机构。一般测量机构中能够直接通过的电流较小，须通过一定的测量电路将被测量变换为测量机构能够接受的中间量，起这种作用的电路称为测量电路。

测量机构是电量测量指示仪表的核心，它可将与被测量呈一定函数关系的中间量变换为活动部分的角位移，并能准确而迅速地指示出被测量的大小。因此，测量机构应由驱动

装置、控制装置、阻尼装置和指示装置组成。

### 1.1.2 非电量测量技术

非电量测量就是指通过传感器将非电量转换成电量（电流  $I$  或电压  $U$ ），再通过测量电量（电流  $I$  或电压  $U$ ）的方法和措施呈现出非电量的数值。非电量无论是在种类上还是在数量上都比电量和磁量多。在科学技术研究及工业生产应用的过程中，对非电量往往不仅要进行测量，而且要对其进行控制、变换、传输、显示、记录、存储等。

#### 1. 非电量的分类

非电量涉及机械、热工、化学、光学和声学等不同领域，这些量有大有小、有强有弱；有些不随时间而变化，有些随时间而变化；有些是标量，有些是矢量；有些是离散的，有些是连续的。总体来说，非电量主要可归纳为以下四类。

（1）热工量：温度、热量、比热、热流、热分布；压力、压强、压差、真空度；流量、流速、风速；物位、液位、界面等。

（2）机械量：位移、尺寸、形状、形变；力、应力、力矩、扭矩；重量、质量；转速、线速度；振动、加速度、噪声。

（3）物理和成分量：气、液体化学成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、硬度；密度、比重。

（4）状态量：颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏等。

#### 2. 非电量测量的分类

非电量测量依据探测转换原理的不同而有不同的分类方法。归纳起来，它可分为以下几类。

（1）电磁检测，包括以下几类。

① 电阻式：电位计式、应变片式、压阻式。

② 电感式：自感式、互感式（差动变压器）、电涡流式、压磁式、感应同步器。

③ 电容式：电容式、容栅式。

④ 磁电式：磁电感应式、磁栅式、磁敏式（霍尔式）。

⑤ 热电式：热电偶、热电阻、热敏电阻。

⑥ 压电式：正压电式、声表面波式。

⑦ 谐振式：振弦式、振筒式、振片式。

（2）光学检测，包括光电式、激光式、红外线式、光栅式、光导纤维式、光学编码器式等。

（3）超声波检测。

（4）同位素检测。

（5）微波检测。

（6）电化学检测。

### 1.1.3 现代电子信息系统组成

一个完整的现代电子信息系统一般包括信息的获取、转换、显示和处理等几个部分，其原理框图如图 1.1.1 所示。

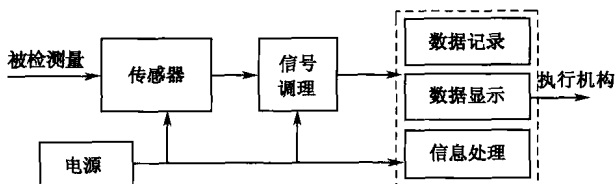


图 1.1.1 现代电子信息系统原理框图

传感器用于从被测对象获取有用的信息，它是一种能感应被测参量功能的转换元件（或装置），能将光、磁、热、力、超声、气体、射线和酶等物理学、化学、光学、生物学的非电量转换成与之有对应关系或容易精确处理的电量和其他形式的信号。对于一个测量任务来说，第一步便是能够有效地从被测对象取得能用于测量的信息，因此传感器在整个现代电子信息系统中的作用十分重要。

对于不同的被测物理量要采用不同的传感器。例如，在测量物体的振动时，可以采用磁电式传感器，将物体振动的位移或振动速度通过电磁感应原理转换成电压变化量。从传感器出来的信号往往具有光、机、电等多种形式，而且混杂有各种有害的干扰和噪声。信号调理就是对从传感器所输出的信号进行转换、匹配、放大、滤波、隔离屏蔽、重放、调制解调、模拟和数字计算等进一步的加工和处理，最终希望获取能便于传输、显示和记录，以及可做后续处理的信号。例如，传感器为电参量式的，即被测信号的变化引起传感器的电阻、电感或电容等参数的变化，传感器输出为电路参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$ ，则应通过基本转换电路将其转换为容易测量的电量（如电压、电流或电荷等）。如果被测模拟量要通过计算机处理，则必须把模拟量转化为相应的数字量，此工作由模数（A/D）转换电路来完成。若需推动控制系统的执行元件或模拟显示、记录仪器，则要将计算机处理输出的数字信号转换成模拟信号，即进行必要的数模（D/A）转换，此工作由数模转换电路来完成。数据显示和记录是指将经信号调理部分处理过的信号用便于人们观察和分析的介质和手段进行记录或显示。

常用的显示方式有三种：模拟显示、数字显示和图形显示。模拟显示就是利用表头指针的偏转角度的大小来显示读数，常用的有毫伏表、毫安表、微安表等指示器。数字显示就是用数字形式来显示读数，实际上是一只专用的数字电压表、数字电流表或数字频率计。图形显示是指通过屏幕显示读数或被测参数变化的曲线。在测量过程中有时不仅要读出被测参数的数值，还要了解它的变化过程，特别是动态过程的变化。动态过程的变化根本无法用显示仪表指示，因此就需要将信号送至记录仪进行自动记录。常用的自动记录仪有笔式记录仪（如电平记录仪、 $x$ - $y$  函数记录仪等）、光线示波器、磁带记录仪、电传打字机等。对于动态信号的测量过程，有时需要对测得的信号数值加以分析和进行数据处理，如对复杂波形要进行频谱分析和运算。属于信号处理的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪、逻辑分析仪等。

智能处理器在测量中的应用使现代电子信息系统产生了极大的飞跃，极大地提高了系统的信息处理能力。例如，计算机数据采集系统、智能数据采集系统及虚拟设备技术等都是计算机技术在测量系统中应用的结果。测量数据的微机处理，不仅可以对信号进行分析、判断、推理，产生控制量，还可以用数字、图表显示测量结果。如果在微机中采用多媒体技术，可以使测量结果的显示更逼真。

现代电子信息系统是用来感知被测信号的，被测信号在经系统的加工和处理之后以不同的形式在系统的输出端输出。系统的输出信号应该真实地反映原始被感知信号，这样的测量过程被称为“精确测量”或“不失真测量”。信号调理是现代电子系统信息链（感知—调理—传输—后处理）中实现“不失真测量”的关键环节。

## 1.2 信号及其描述

### 1.2.1 概述

现代电子信息系统的被测对象称为信源，信息是由信源产生的。信源以信号的形式发出信息。信号是信息的载体，信息只有装载在信号上才能进行变换与传递。人们常说的信息传递、信息处理，实际上是指传递、处理载有信息的信号。

如图 1.2.1 所示为一个接收物体振动信号的测试系统结构框图。图中假设被测量为一物体的简谐振动，其振动的位移为  $x$ ，频率为  $f_x$ 。首先采用位移传感器将振动信号转换为毫伏量级的电压信号。但同时该传感器也敏感到邻近设备的高频干扰信号（噪声），该信号也将叠加到有用信号上。然后采用放大器将信号放大到足以方便计算机进行记录和处理电平（图中的增益为 100）。同时为去除干扰噪声信号再串联一级低通滤波器。最后，经过滤波后的信号送给计算机系统进行记录或显示。

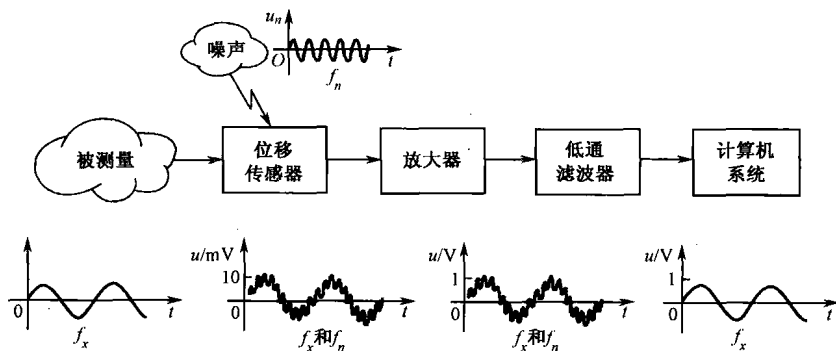


图 1.2.1 一个接收物体振动信号的测试系统结构框图

在工程实际中，在对待属性各异各类系统时，常常略去系统具体的物理含义，而将其抽象为一个理想化的模型，目的是为了得到系统共性的规律。将系统中变化着的各种物理量，如力、位移、加速度、电压、电流、光强等称为信号，客观地研究信号作用于系统的变化规律，可以揭示系统对信号的传递特性。因此，信号与系统是紧密相关的。信号按一定规律作用于系统，系统在输入信号的作用下，对它进行“加工”，并输出“加工”后的

信号。通常将输入信号称为系统的激励，而将输出信号称为系统的响应。信号理论包括信号分析、信号处理和信号综合。信号的分析主要涉及信号的表示和性质。

## 1.2.2 信号的定义与分类

信号是指信号本身在其传输的起点到终点的过程中所携带的信息的物理表现。信噪比 $\xi$ 表达为信号功率 $P_S$ 与噪声功率 $P_N$ 之比：

$$\xi = P_S / P_N \quad (1-2-1)$$

通常将信噪比用对数刻度来表示（单位为分贝）：

$$\xi_{dB} = 10 \lg \xi \quad (1-2-2)$$

噪声与信号的区分纯粹是人为的，取决于使用者对两者的评价标准。

信号的分类方法很多，主要有以下几种。

（1）形态分类法：该分类法是基于信号的幅值或者独立变量是连续还是离散的特点来进行的，可将信号分为连续信号和离散信号两大类。

如图 1.2.2 所示，若信号的独立变量或自变量是连续的，则称该信号是连续信号，否则称为离散信号。对于连续信号而言，信号的自变量和幅值均为连续的信号称为模拟信号；自变量是连续的，但幅值为离散的信号，则称为量化信号。对于离散信号而言，信号的自变量及幅值均为离散值，则称为数字信号；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信号。

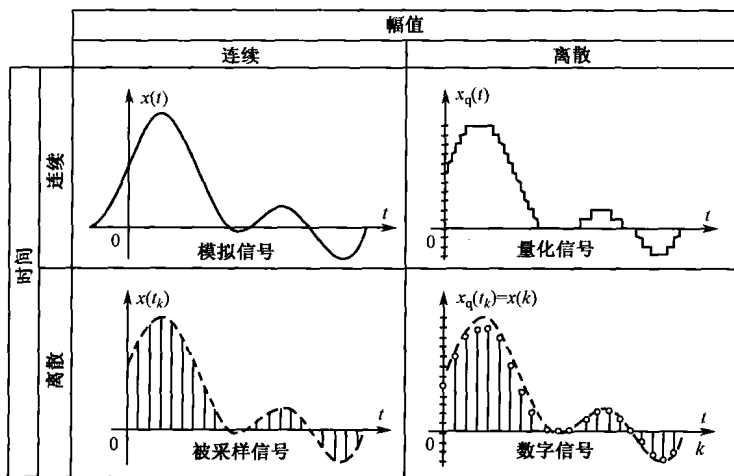


图 1.2.2 信号按形态分类法区分的 4 种形式

（2）能量分类法：这种分类方法规定了两类信号，即具有有限能量的信号及具有有限平均功率和无限能量的信号。

当信号 $x(t)$ 满足条件：

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

则称信号 $x(t)$ 为有限能量信号，简称能量信号。矩形脉冲、衰减指数信号等均属这类信号。

当信号 $x(t)$ 满足条件：

$$0 < \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (1-2-4)$$

即信号具有有限的（非零）平均功率，则称信号为有限平均功率信号，简称功率信号。

（3）表象分类法：这种分类法是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（信号沿时间轴演变的特性）的分类方法，可将信号分为确定性信号和随机信号。

确定性信号：可以用合适的数学模型来完整地描述或预测其随时间演变情形的信号。

随机信号：具有不能被预测的特性且只能通过统计观察来加以描述的信号。

确定性信号又分为周期信号和非周期信号。

周期信号：按一定时间间隔重复出现的信号，即有

$$x(t) = x(t + kT) \quad (1-2-5)$$

式中， $T$  为周期。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。伪随机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，如图 1.2.3 所示。

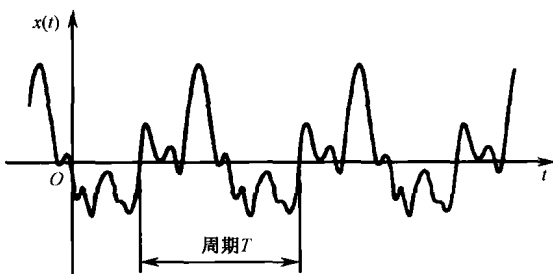


图 1.2.3 伪随机信号

非周期信号：指不具有上述性质的确定性信号，又可分成准周期信号和瞬态信号两类。

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

瞬态信号：时间历程短的信号，如矩形脉冲信号、衰减指数脉冲信号、正弦脉冲等。

随机信号又可分成两大类：平稳随机信号和非平稳随机信号。

平稳随机信号：信号的统计特征是时不变的，或者说不随时间原点的选取而变化的信号称为平稳随机信号，如图 1.2.4 所示。

非平稳随机信号是指不具有上述特点的随机信号，如图 1.2.5 所示。

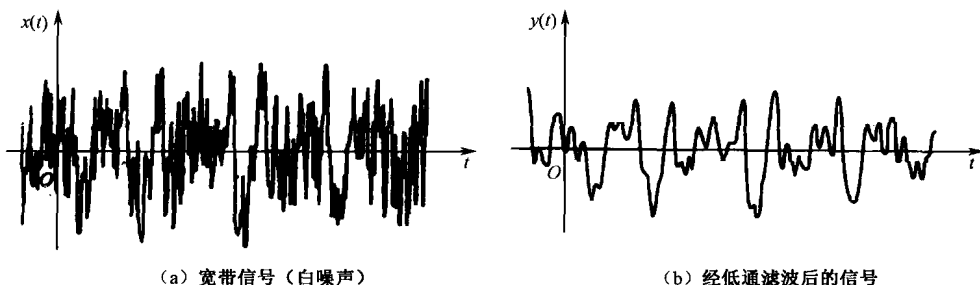


图 1.2.4 平稳随机信号