

高等职业教育示范专业规划教材  
上海市精品课程

# 电子感测技术 项目化教程

周南山 罗丁喆 苏桂英 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高等职业教育示范专业规划教材  
上海市精品课程

# 电子感测技术

## 项目化教程

周南山 罗丁喆 苏桂英 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书把内容紧密联系的传感器技术、自动检测技术和电子测量技术,有机整合为一门《电子感测技术》课程,具有电路基础、传感器、电子测量、仪器和射频等重要知识点。其内容按项目化教程分为3个单元,单元1概述传感器和电子测量的基础知识,单元2介绍典型传感器及检测技术,单元3讲授电压、频率和电路元器件的测量方法,并涉及信号的时域、频域、数字域、随机域和射频的测量仪器(含虚拟仪器)。每个项目设有知识点与能力目标,以及例题、思考题和练习题。每一单元均有技能综合训练,并提出能力目标、预习要求和实训报告要求,力求实现“教、学、做”一体化教学。特别是增写了附录A、B、C,为教、学双方提供了方便。

本书可作为高等职业院校的应用电子技术、通信技术、光电子技术和安全防范技术等专业的教学用书,也可作为相关专业本科生的教材,以及作为从事电类、机电类专业的工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子感测技术/周南山,罗丁喆,苏桂英编著. —  
上海:上海交通大学出版社,2012  
项目化教程  
ISBN 978-7-313-08115-5

I. ①电… II. ①周…②罗…③苏… III. ①传感器—自动检测—教材②电子测量技术—教材 IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第008046号

### 电子感测技术

#### 项目化教程

周南山 罗丁喆 苏桂英 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路951号 邮政编码200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销  
开本:787mm×960mm 1/16 印张:12.25 字数:218千字

2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷

ISBN 978-7-313-08115-5/TP 定价:29.00元

---

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-54742979

# 前 言

自 2001 年起,本教材在上海科学技术职业学院使用,经历届教学与实训后编写而成,于 2007 年出书,2009 年被评为上海市精品课程。本次新版力求在原有基础上作较大改进,以更适合高等职业教育培养应用型、技能型的人才,并努力实现兴趣教学。本书的内容与教学方法是以前传感器为先,以电子测量为主,以实训为基础。传感器是信息技术系统的感官,是国家优先发展的核心技术之一,起到促进传统产业和新兴产业的技术跳跃。电子测量是测量技术的主体和主导,泛指以电子技术进行的测量,如与传感技术相结合,也称非电量电测。对于电子工程的测量,其主要任务是测量电压、频率和阻抗,并用大小、正负、单位和误差来表达测量结果。

本书内容按项目化教程分为三个单元,单元 1 概述传感器和电子测量的基础知识,包括测量误差理论与数据处理方法,是学习后续内容的必备要点。单元 2 介绍典型传感器的原理、技术与应用,并简介传感器的信号处理电路。单元 3 讲授电子测量技术基础,侧重于电压、频率和电路元器件的测量方法,并涉及各种专用仪器和虚拟仪器,其中噪声测量和电磁兼容,以及射频网络特性参数测量和应用等内容,更适合于通信技术专业和相关专业的本科生。每个项目的内

容具有相对独立性,适于不同课时安排和学生自学。全书具体有以下一些特色:

**1. 以简应繁。**根据“乐学,能记忆,才能应用”的常理,我们采取“少展开,多综合和通俗化”的措施,把内容紧密联系的传感器技术、自动检测技术和电子测量技术这三门学科整合为一门课程,反映了电、光、仪产业的结合。设置能力目标,明确学习目的,以朴应冗,成为多学科领域精要的新型薄型教材。授课时间仅为其中一门的时间,即 51 学时,三个单元教学时间分别为 9、19、23 学时,实训为 34 学时左右。

**2. 面广灵活。**具备电路基础(附录 B)、传感器、电子测量(时域、频域、数字域、随机域测量与误差处理)、电子仪器(含虚拟仪器)和射频等知识点。这样可根据不同专业的要求,设定重点内容,例如有的专业需要强化第 2 单元传感器的检测技术,则可简化第 3 单元内容,增做传感器应用的实训;有的专业则需把第 2 单元要点,融入第 1 单元传感器分类中去讲,理论课可缩至 34 学时,并可选择实训项目中的电子测量部分。授课安排举例如下:

类别	学时 (实训)	学分 (实训)	理论课 周学时	授课周 (含假期)	考试 (2 小时)	试卷和实 训讲解	实训周 (6 学时/个)
A	51(34)	3(1)	3+2	1~11	第 11 周末	第 12 周	13~17 (5 个)
B	34(18)	2(0.5)	3+2	1~7	第 8 周	第 9 周	10~12 (3 个)

**3. 易教易学。**每个单元中的例题、思考题和练习题,归纳了重点内容与应用方法,按题可实行少讲、勤练、多讨论的教学方法。附录 C 中的答题方法为教、学双方提供了方便,嵌入的顺口溜希望能达到“乐记形象语,应用句中理”的目的。另外,PPT 课件虽然可以做到形象地分解难点、增加信息和趣味,但不要依赖 PPT 授课,应该还教室的自然态,本书的许多内容使用板书的效果会更好。每届授课都要有新意和新的教学方法,能有利于提高学习兴趣、有助于学生理解新概念和集中注意力记住更多内容。

**4. 理论实训相互联系。**实训指导书中的提问,既能说明实训原理,又复习了理论知识。5 个实训内容力求向结合能力目标联系实际、结合专业使之综合

性、结合考证与产品具有职业性的方向改进：以专用仪器的测量方法来训练学生的操作技能；以虚拟仪器的设计方法来测量多种电参数；以电子产品的检验与测试来进行体验性教学；以学过的知识与技能，通过应用来获得能力。为此，实训内容必须进行阶段性取舍、重组和更新。

**5. 实训效果环环加强。**先上理论课，培养班内优秀学生，使他们可以成为教师的助手，加强了实训的指导力量；实训报告按规定格式（见附录 A）与预习报告一体化，在实训前查看和实训后进行批阅，并当场进行“操作/口试”考查；五个初具综合性、职业性的实训在同一实训室中轮流做，还能为学生创造弥补上次实训和预习下次实训的机会，便于以学生为主体的任务训练，使学生学到真知实技。

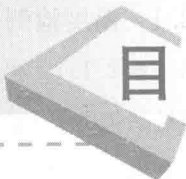
**6. 考核方法不断完善。**为体现对高职理论教学的低标准，以及对學生听课、实训和平时表现的严要求，理论课笔试采用只能看笔记原件的半开卷考法（不能看书、习题本和复印件等），成绩占 50%；在实训中进行当场考查，并完成实训报告，各次成绩的平均分占 30%；还有 20%是平时积分，包括查看笔记、课堂纪律和练习等。

本书除作阶段性修改外，还会在“教学指南”中不断完善，请有此需要的教师发 Email 至邮箱：[wincy\\_zhe@163.com](mailto:wincy_zhe@163.com) 进行联系，在教学及编写过程中金洲浪老师为本书的实训内容与设备的更新做了大量工作，并经上海大学通信与信息学院施惠昌教授审阅，提出许多宝贵意见，在此谨致衷心的感谢。

最后对在本书编写过程中给予帮助的张跃、张东、傅丰钰等教师表示衷心的感谢，同时也对本书的出版给予多方支持的有关编委们表示感谢。

周南山

2011 年 12 月



# 目 录

<b>单元 1 电子感测基础知识</b> .....	1
<b>项目 1.1 传感器概述</b> .....	3
知识链接 1.1.1 传感器的组成、基本特性和选用要点 .....	3
知识链接 1.1.2 传感器的融合和光电检测 .....	7
思考题 .....	8
练习题 .....	8
<b>项目 1.2 电子测量任务和方法</b> .....	9
知识链接 1.2.1 电子测量的任务 .....	9
知识链接 1.2.2 电子测量的方法 .....	10
思考题 .....	11
练习题 .....	11
<b>项目 1.3 测量误差与处理</b> .....	12
知识链接 1.3.1 误差理论 .....	12
知识链接 1.3.2 数据处理 .....	16
思考题 .....	21

练习题 .....	21
技能综合训练 .....	22
<b>单元 2 传感器及检测技术 .....</b>	<b>23</b>
<b>项目 2.1 温度检测 .....</b>	<b>25</b>
知识链接 2.1.1 温标 .....	25
知识链接 2.1.2 温度传感器的介绍 .....	26
思考题 .....	33
练习题 .....	34
<b>项目 2.2 压力检测 .....</b>	<b>34</b>
知识链接 2.2.1 压强的概念及单位 .....	34
知识链接 2.2.2 压力传感器的介绍 .....	36
思考题 .....	40
练习题 .....	40
<b>项目 2.3 流量检测 .....</b>	<b>41</b>
知识链接 2.3.1 流量及测量方法 .....	41
知识链接 2.3.2 体积流量和质量流量的检测 .....	42
思考题 .....	46
练习题 .....	46
<b>项目 2.4 光学量测量和位移传感器 .....</b>	<b>46</b>
知识链接 2.4.1 光学量测量方法和传感器 .....	47
知识链接 2.4.2 位移检测 .....	53
思考题 .....	60
练习题 .....	60
<b>项目 2.5 传感器信号处理 .....</b>	<b>61</b>
知识链接 2.5.1 模拟信号处理电路的结构 .....	61
知识链接 2.5.2 传感器信号的加工及接口 .....	64
思考题 .....	72

练习题 .....	72
技能综合训练 .....	73
<b>单元3 电压、频率和电路元器件的测量</b> .....	<b>75</b>
项目 3.1 电压、电平、功率和噪声的测量 .....	77
知识链接 3.1.1 电压和相对电平的测量 .....	77
知识链接 3.1.2 功率和射频功率的测量 .....	82
知识链接 3.1.3 噪声测量和电磁兼容 .....	85
思考题 .....	88
练习题 .....	89
项目 3.2 射频网络特性参数测量和应用 .....	89
知识链接 3.2.1 射频简介 .....	90
知识链接 3.2.2 单口网络的反射参数 .....	91
知识链接 3.2.3 双口网络的散射参数 .....	93
知识链接 3.2.4 S参数的测量 .....	93
知识链接 3.2.5 应用举例 .....	95
思考题 .....	96
练习题 .....	97
项目 3.3 频率和频、时域的测量方法 .....	97
知识链接 3.3.1 计数法测量 .....	97
知识链接 3.3.2 示波器的时域测量 .....	100
知识链接 3.3.3 信号失真与频域测量 .....	101
思考题 .....	105
练习题 .....	105
项目 3.4 电路元件和半导体管的检测 .....	106
知识链接 3.4.1 电阻、电容和电感的测量 .....	107
知识链接 3.4.2 半导体管的检测 .....	111
思考题 .....	112

## 4 电子感测技术

练习题 .....	112
项目 3.5 计算机测试技术 .....	114
知识链接 3.5.1 智能仪器和自动测试系统 .....	114
知识链接 3.5.2 虚拟仪器技术 .....	115
思考题 .....	122
练习题 .....	122
技能综合训练 .....	122
实训 1 电路元器件及产品指标的测试 .....	123
实训 2 信号参数测量及产品检验与性能分析 .....	128
实训 3 传感器的特性测试和应用设计 .....	135
实训 4 电磁兼容性的测试方法 .....	145
实训 5 虚拟仪器技术 .....	149
附录 A 实训报告格式 .....	163
附录 B 电路基础知识要点 .....	165
附录 C 思考题的答题方法 .....	173
参考书目 .....	186

DIANZI GANCE JISHU

# 单元 1

## 电子感测基础知识

本单元概述传感器和电子测量必要的基础知识,并介绍误差理论和数据处理方法,是学习本书后续内容的关键。



## 项目 1.1

## 传感器概述

### 知识点与能力目标

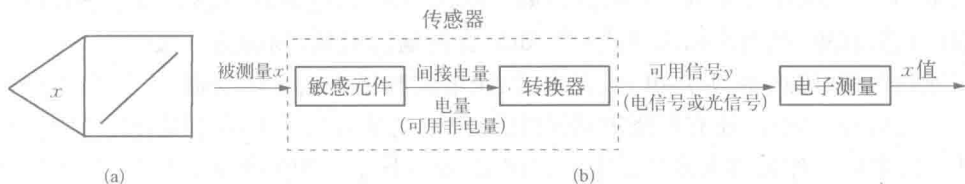
- ◇ 理解传感器的框图和基本特性,能对指定的传感器作出分析和评价,从而逐步学会选用方法。
- ◇ 熟悉光子和光路的特性,能与电信号进行比较,并会应用光信号。

传感器技术是信息技术的源头,它与通信、计算机构成信息技术的三大支柱,牵制着信息技术的发展水平和速度,是一门综合性、多学科交叉渗透的高新科学技术。

### 知识链接 1.1.1 传感器的组成、基本特性和选用要点

#### 1) 传感器的组成和结构形式

传感器是与人的感觉器官“一感二传”的功用相对应的元器件,又称“电五官”,它的定义是:“能够感受规定的被测量,并按照一定的规律转换成‘可用信号’的器件或装置”。从“感受”和“转换”的功能来看,传感器应由敏感元件和转换器等所组成,可分别用等边三角形和正方形的图形符号来示意,见图 1.1(a)。



( $x$  表示感受的被测量,斜线表示输入、输出的转换功能)

图 1.1 传感器组成

(a) 传感器图形符号; (b) 传感器的输入、输出量

图 1.1(b)所示传感器中的敏感元件直接感受被测量  $x$ ,  $x$  多数是非电量,还可以是电磁场、光学量或射线等电量。其输出可能有 3 种:如果是可用非电量(位移

或变形)或间接电量(电路参数),则转换器的作用是把它们变成易于传输和处理的可用信号  $y$ ;如果是电量(微弱信号),则转换器可以进行放大、调制或转换(电流和电压相互转换、模拟量和数字量相互转换、光信号和电信号相互转换)。电子测量的电路除了有放大、解调和转换作用外,还有非线性校正、温度补偿、运算和显示(输出驱动)等功能,最后显示被测量  $x$  值。例如, $x$  是温度,敏感元件可能是伸缩体和压敏电阻,前者输出可用非电量,后者输出间接电量的电阻值,转换器则是电桥,把电阻变化转变成电压变化,经过处理,显示温度数值。温度变化也可通过热电偶转变成电压变化,也可用水银温度计直接读出温度。

传感器的结构形式,应“精于‘芯’简于形”,例如把敏感元件和转换器等做成固态器件或芯片,并含有恒压(流)电路,对外只有两条引线,作供电和信号输出用;又如把敏感元件、转换器和测量电路集成一体,直接显示被测量;当需要长距离传输时,又把转换器和测量电路分开,用电缆来连接测试现场和监控中心;最简单形式的传感器只有敏感元件,其能源可来自被测量(热、光或力等)、外加电源和辅助电源(如磁铁等),还有多种敏感元件融合用于多侧面和多参数的测量。敏感元件除了半导体(单晶、PN 结和陶瓷)及贵金属(含合金)外,还有高分子材料(含光纤)、纳米材料和智能材料等,后者具有形状记忆功能和生命特征。另外,传感器的内部结构形式有固定信号的直接结构、补偿信号的抵消结构、双向信号的差动结构、多路信号的平均结构、平衡信号的闭环结构 5 种形式可供选择。

## 2) 传感器的分类和任务

传感器种类繁多,分类方法也形形色色,简而言之,就是以敏感元件为中心进行分类。若以敏感元件输入的被测量来区分,则有温度传感器、压力传感器、流量传感器和位移传感器等。若以敏感元件输出量来区分,如果输出间接电量,则称间接型(又称无源型或结构型)传感器,如电阻式传感器、电容式传感器和电感式传感器(自感、互感、电涡流和压磁式)等;如果直接输出电量,则称为直接型(又称有源型或物性型)传感器,如热电式、光电式、压电式和磁电式等传感器,它们均能直接产生电信号。此外,还有围绕敏感元件的材料、制备方法或应用范围来命名的。上述传感器的工作原理大多数是电子物理型,也有化学型和生物型。另外,基于贵金属、半导体和高分子等材料做成的基础传感器,加上纳米技术、生化技术和量子光技术等新技术,使传感器的品种不断更新,如机械微传感器、体感应传感器、移动灵巧传感器等。

近来重点开发的传感器有微传感器(机械、热、光、声等)、环保传感器和医疗传感器等,其中仿生传感器和智能传感器是当今研究的前沿,同时信息时代需要网络

化传感器。研究新效应、开发新材料、检测新范围、提高准确度和可靠性是今后发展传感器技术的任务,随着芯片技术和计算机技术的发展,传感器系统将更加小型化(微功耗、固态化和毫米级尺寸)、超敏感、多功能、更智能和可跟踪,能逐步做到赶上并超过生物体的感觉功能。

### 3) 传感器的基本特性

传感器的基本特性主要分为静态和动态,可以表征其性能优劣,用得较多的静态转换特性曲线如图 1.2 所示,可归纳为以下 3 种形式。

(1) 直线型的方程  $y = y_0 + Sx$ , 表示线性传感器的灵敏度  $S = \frac{dy}{dx} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  常数; 量程(满度)  $y_m = y_2 - y_1$ ; 测量(线性)范围  $x_m = x_2 - x_1 = y_m/S$ ; 校零后  $y_1 = y_0 = 0$ , 则  $y = Sx$ , 直线型应用最方便,也是研制传感器的目标。

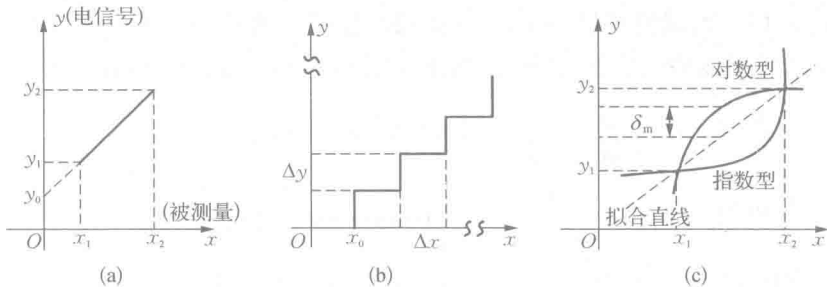


图 1.2 传感器的转换特性曲线

(a) 直线型; (b) 阶梯型; (c) 对数和指数型

(2) 如果直线型  $y = Sx$  转换特性放大后,就是阶梯型。当一个传感器的输入从零开始增加时,只有在达到了某一最小值后才测得输出信号,这个最小值  $x_0$  就称为传感器的阈值。分辨率是指当一个传感器的输入从非零的任意值开始增加时,只有在超过某一输入增量  $\Delta x$  后输出才显示有变化  $\Delta y$ ,这个输入增量  $\Delta x$  称为传感器的分辨率,表达式可为  $\Delta x = \frac{1}{S} \Delta y$  ( $\Delta y$  为单位测量值或称测量值的最小变化量)。阈值说明了传感器的最小可测出的输入量;分辨率说明了最小可测输入变化量,分辨率就是不灵敏度,即死区。如果灵敏度过高,  $\Delta x$  过小,干扰影响就会显著增加。

(3) 对数型或指数型的非线性传感器是普遍的,其灵敏度不是常数,且随工作点和工作区间而变,工作区间可用拟合直线的斜率  $S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  来代替。此时其非

线性误差为

$$\gamma = \frac{\delta_m}{y_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

$\delta_m$  是实际曲线与拟合直线间的最大差值, 如果非线性较严重 ( $\gamma \geq 10\%$ ), 往往可分成多段直线型, 用计算机来处理。

当传感器感受动态信号时, 输出对输入的响应特性称为动态特性。动态特性好的传感器, 其输出随时间变化的规律  $y(t)$  将再现输入随时间变化的规律, 但两者往往不会具有相同的时间函数, 造成了动态误差。动态性能指标分为时域和频域两种, 时域用阶跃波输入传感器可测出时间常数、上升时间、响应时间和超调量; 频域用正弦波测出传感器的谐振(固有)频率、带宽(分为  $-3$  dB 通频带和  $-1$  dB 工作频带)及相位差(在工作频带内相位误差应  $< 10^\circ$ )。静态和动态特性指标并不全面, 在选用时还应考虑输入阻抗和可靠性等。

[例 1.1] 测试位移量  $x(\text{mm})$  传感器输出电流的方程为  $I = 4 + 2x = 4 \sim 20$  mA, 求传感器的灵敏度、每毫安(mA)的分辨率和测量  $x$  的范围。

解: 灵敏度  $S = \frac{dy}{dx} = \frac{dI}{dx} = \frac{d}{dx}(4 + 2x) = 2(\text{mA}/\text{mm})$

分辨率  $\Delta x = \frac{1}{S} \Delta y = \frac{1}{2}(\text{mm})(\Delta y = 1 \text{ mA})$

测量范围 当  $4 + 2x_1 = 4(\text{mA})$  时,  $x_1 = 0 \text{ mm}$

当  $4 + 2x_2 = 20(\text{mA})$  时,  $x_2 = 8 \text{ mm}$

[例 1.2] 参见习题 1.1, 求题图 1.1(a) 的灵敏度  $S = \frac{U_{ab}}{\Delta R/R}$  的表达式。

解: 当转角时,  $U_{ab} = U_b - U_a = U \frac{R}{2R} - U \frac{R - \Delta R}{2R} = \frac{U}{2} \frac{\Delta R}{R}$

则  $S = \frac{U}{2}$

#### 4) 选用传感器的要点

从传感器的功能命名中可知其基本应用, 传感器的应用选择要借助于传感器的分类表、比较表和产品目录等作参考, 其测量要求和使用条件选择的方法如下所述。

(1) 首先要熟悉被测对象所处的环境, 如温度范围、有害影响和干扰等, 还有

安装条件(供电、连线和保护)和观测空间;还需满足用户要求,如测量时间和方式(接触或非接触;在线或取样),以及被测参数极限范围和常用范围、输出信号类型和标准化要求等;最后往往还要了解已有用户的使用情况。

(2) 在多种传感器的指标(精度、灵敏度或分辨率、线性度和响应速度等)均能满足要求的情况下,还需考虑工作可靠(稳定度、影响量、牢固度和校正周期)、维修方便与售后服务、先进性和性价比等因素,以便从中选定一种。

(3) 每种传感器往往不可能满足所有要求,选用时应侧重解决主要问题或折中顾及各重要指标。

(4) 如果采用多种传感器确定必要的信息,需用传感器融合技术。

## 知识链接 1.1.2 传感器的融合和光电检测

### 1) 传感器融合技术

通过综合多种传感器信息来得到单个传感器所不能得到的信息,称为传感器融合技术。例如,仅靠烟雾检测器来判断是否发生了火灾并不可靠,因为它区别不了是吸烟、炊烟还是火灾的烟雾。但如仅用紫外线检测器来识别火焰,又不能排除无明火火灾的发生。因此,必须考虑采用多种传感器的组合。又如,判断是否有人进入商场时,可用红外线或微波传感器来感知有无和动静,再用超声波距离传感器和摄像机辨别出人的位置、时间及特征等。对来自各个传感器的信号进行综合判断,可减少漏报和误报。进而,人们需要监视和控制客观世界中发生的许多复杂过程,这就导致了需要能够处理一系列传感器信号的阵列,以及众多传感器节点通过某种有线或无线通信协议联结的传感器测控网络。

### 2) 光电检测

目前,光信息技术已经异军突起,除电信号外,光信号也已成为促进快速、高效处理与传输的可用信号,传感器的概念也将发展成为能把外界信息转换成光信号输出的器件,这是因为光和电均是电磁量,都有波、粒二相性,可在空间作无线传播和在导线中传输。把被测量的变化转换成光信号的变化,再通过光电传感器转换成电信号,这就是光电检测技术。光是由光子组成的,每个光子具有  $h\nu$  的能量 ( $h = 6.63 \times 10^{-34}$  焦耳·秒,为普朗克常数; $\nu$  为光的频率),光照到物体上,使一个自由电子能量增加  $h\nu = \omega_0 + \frac{1}{2}mv_0^2$ , 用来克服逸出功  $\omega_0$  和作为电子逸出时具有