

上海市精品课程

适合技能型本科、高职和中职本科贯通教学用书

(修订版)

电子感测技术

主编 周南山 罗丁喆

参编 叶 明 苏桂英 李艳敏

上海大学出版社

上海市精品课程

适合技能型本科、高职和中职本科贯通教学用书

电子感测技术

(修订版)

主编 周南山 罗丁喆

参编 叶 明 苏桂英 李艳敏

上海大学出版社

· 上 海 ·

内 容 提 要

“感测”是传感器和电子测量的缩写与综合。第1章概述传感器和电子测量的基本知识;第2章介绍典型传感器及检测技术;第3~6章分别叙述电压、电路元器件和时、频域等的测量方法与仪器,并涉及射频领域。每章提出知识点与能力目标,并配有例题、思考题、练习题和实训项目。特别是增写了附录A、B、C,其基础知识和答题方法,为教、学双方提供了方便。

本书可作为技能型本科、高职和中职本科贯通的电子信息技术、应用电子技术、通信技术和安全防范技术等专业的教学用书,也可作为从事电信类、机电类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,罗丁喆主编;叶明,苏桂英,李艳敏编. —修订本. —上海:上海大学出版社, 2016.9

ISBN 978-7-5671-2466-0

I. ①电… II. ①周…②罗…③叶…④苏…⑤李… III. ①传感器-自动检测②电子测量技术 IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 198428 号

责任编辑 王悦生

封面设计 柯国富

技术编辑 章 斐

电子感测技术(修订版)

周南山 罗丁喆 主编

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路99号 邮政编码200444)

(<http://www.press.shu.edu.cn> 发行热线021-66135112)

出版人:郭纯生

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海市印刷四厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 12.25 字数 306 千

2016年9月第1版 2016年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5671-2466-0/TP·063 定价:38.00 元

PREFACE

>>>>>>>>>>

1. 充实和调整了部分例题、思考题、练习题(以下简称“三题”)和实训项目;
2. 增添了相关的传感器,内容编排也作相应调整;
3. 修改了部分内容,包括附录 A、B、C,保持和完善了原书的特点:

(2) “三题”比较完整。另备“教学指南”，内有题解、试题和教学方法等，并不断完善，因此易教易学。请有此需要的教师发 Email 至邮箱：wincy_zhe@163.com 或 llyymm01@126.com 进行联系。

本书可作为电信类、机电类专业的专业基础课教材。第1章的传感器和电子测量的基本知识、误差处理方法,以及比较完整的“三题”,可作为相对独立的导论;第2章的传感器介绍自成模块,不同专业易于选用和调整;第3~6章分述了电子测量的原理、技术与应用,并扩展到射频领域和虚拟仪器,其中分贝计算与应用、射频网络参数测试、计算机测试技术、噪声检测和电磁兼容等,可根据学习目标进行单独选用。另外,如作为中职本科贯通的教材,可选用第1章和第2~6章的部分内容,以及作为先修课的“电路基础”(附录B)。

本书由周南山和罗丁喆主编,全书由周南山和罗丁喆共同统稿、定稿。叶明、苏桂英和李艳敏参加编写。在本次再版中,周炳辉副教授提供了宝贵的资料,金洲浪为实训设备的更新做了大量工作,并得到了上海大学出版社的多方支持,在此表示衷心感谢。

2016年3月

目 录 CONTENTS

电子感测技术

>>>>>>>>>>

第 1 章 电子感测基本知识	1
1.1 传感器概述	1
1.1.1 传感器的组成和基本特性	1
1.1.2 传感器应用	4
1.2 电子测量任务和方法	7
1.2.1 电子测量的任务	7
1.2.2 电子测量的方法	7
1.3 测量误差与处理	9
1.3.1 误差理论	9
1.3.2 数据处理	12
思考题 1	16
练习题 1	17
第 2 章 传感器及检测技术	19
2.1 温度检测	19
2.1.1 温标	19
2.1.2 温度传感器的介绍	20
2.2 压力与位移的检测	26
2.2.1 压强的概念及单位	27
2.2.2 压力传感器的介绍	28
2.2.3 位移传感器的介绍	32
2.3 流量与速度的检测	38
2.3.1 流量及测量方法	38
2.3.2 体积流量和质量流量的检测	39
2.3.3 速度传感器的介绍	42
2.4 光学量与气体浓度的检测	43
2.4.1 光学量测量方法和传感器	44
2.4.2 气体浓度传感器的介绍	49

2.5 传感器的信号处理	51
2.5.1 模拟信号处理电路的结构	52
2.5.2 传感器信号的加工及接口	54
2.6 物联网传感技术简介	61
2.6.1 物联网的关键技术	62
2.6.2 物联网的构成与应用	64
思考题 2	66
练习题 2	67
第3章 电压、功率和噪声的测量	70
3.1 电压和电路元器件的测量	70
3.1.1 交、直流电压表的结构和测量原理	70
3.1.2 交流电压的量值及转换	72
3.1.3 电路元件和半导体管的测量	74
3.2 功率和射频功率的测量	79
3.2.1 交、直流功率的测量	79
3.2.2 射频功率的间接测量	79
3.2.3 分贝的计算与应用	81
3.3 噪声检测和电磁兼容	83
3.3.1 噪声电压有效值的测量	83
3.3.2 放大器噪声的测量	83
3.3.3 电磁兼容和抗干扰措施	85
思考题 3	86
练习题 3	86
第4章 射频网络特性参数测量与应用	89
4.1 射频特性及网络参数	89
4.1.1 射频特性简介	89
4.1.2 射频网络参数	90
4.2 S参数的测量	92
4.2.1 网络分析仪的组成和类型	93
4.2.2 网络分析仪的工作原理	93
4.3 应用举例	94
4.3.1 微波传感器的检测原理	94
4.3.2 透射式测量	95
4.3.3 反射式测量	95

思考题 4	96
练习题 4	96
第 5 章 信号参数的时、频域测量	97
5.1 计数器和示波器的测量方法	97
5.1.1 测量频率与周期	97
5.1.2 测量时差与相位差	99
5.1.3 示波器的时域测量	100
5.2 信号失真和频域的测量	101
5.2.1 非线性失真度的测量	101
5.2.2 线性失真特性的测量	102
5.2.3 频谱分析仪的工作原理与应用范围	103
思考题 5	105
练习题 5	105
第 6 章 计算机的测试技术	106
6.1 智能仪器与自动测试系统	106
6.1.1 智能仪器简介	106
6.1.2 频率响应测试举例	106
6.2 虚拟仪器技术	107
6.2.1 LabVIEW 虚拟仪器简介	107
6.2.2 创建简单的测试程序	108
思考题 6	114
练习题 6	114
实训部分	115
模块 I 传感器的测试与应用	115
实训 1 热敏电阻的测试与应用	115
实训 2 热电偶测温和串、并联应用	118
实训 3 应变电阻电桥的测试与应用	121
实训 4 光敏元件的性能测试	123
实训 5 霍尔元件和光纤传感器的测试与应用	126
示教与练习	130
模块 II 测量仪器的使用和测量误差的处理	131
实训 6 万用表测量半导体管和波形参数	131
实训 7 电子血压计的测量误差处理	133

实训 8 示波器测量内阻和元件测量值的误差处理	136
实训 9 失真度计的三种应用	139
实训 10 扫频仪测量频率特性	141
示教与练习	143
模块Ⅲ 虚拟仪器技术的应用	144
实训 11 LabVIEW 软件基本操作	144
实训 12 LabVIEW 软件基本应用	146
实训 13 LabVIEW 软件进行频谱分析	149
实训 14 用 LabVIEW 软件仿真温度测量	152
实训 15 基于虚拟仪器的温度实测	155
参考文献	160
附录	161
附录 A 实训报告格式和查考方式	161
附录 B 电路基础知识要点	163
附录 C 思考题的答题方法	174

第 1 章 电子感测基本知识

电子感测技术

>>>>>>>>>>

本章概述传感器和电子测量有关的基本知识,并介绍误差理论和数据处理方法。配有较完整的例题、思考题、练习题和实训项目,可作为相对独立的导论。

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,并应用光信号。

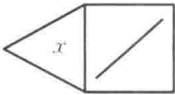
传感器是信息技术的源头,它与通信、计算机构成信息技术的三大支柱,牵制着信息技术的发展水平和速度,是一门综合性、多学科交叉渗透的高新科学技术。

1.1.1 传感器的组成和基本特性

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)。

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。其输出可能有三种:如果是可用非电量(能转换成可用信号的非电量)或间接电量(电阻、电感、电容等),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,敏感元件可能是热胀体和压敏电阻,前者输出可用非电量“压力”,后者输出间接电量的电阻,转换器则是电桥,把电阻变化变成电压变化,经过处理,显示温度数值。温度也可通过热电偶变成电压变



(a) 传感器图形符号
(x 表示感受的测量,斜线表示输入、输出的转换的功能)



(b) 传感器的输入、输出量

图 1.1 传感器组成

化,用水银柱直接读出温度。

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)和贵金属(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,五种形式可供选择。

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。以敏感元件输入的被测量来区分,如温度传感器、压力传感器、流量传感器和位移传感器等。以敏感元件输出量来区分,如果输出间接电量,则称间接型传感器(又称无源型传感器或结构型传感器),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,则称为直接型传感器(又称有源型传感器或物性型传感器),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。同时看到,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 SCIO 红外光谱分子微传感器、体感应传感器、移动灵巧传感器,以及植入光纤使纳米晶体敏感度大增,实现远距离测量微粒子或单个活细胞,为感测带来了各种的可能性。

近来重点开发的有传感器微系统(原子传感器与测量芯片植入组件中)、环保传感器和远程医疗传感器等,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(低功耗、固态化和毫米级尺寸)、超敏感、多功能、更智能和可跟踪,赶上和超过人的感觉功能。

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,可归纳为以下三种形式:

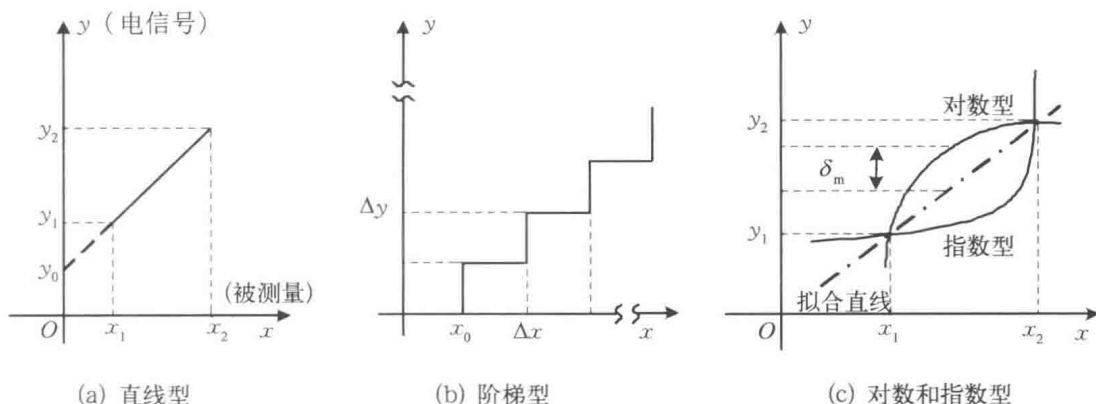


图 1.2 传感器的转换特性曲线

(1) 如图 1.2(a)所示,直线型的方程 $y = y_0 + Sx$, 其斜率表示线性传感器的灵敏度。

$S = \frac{dy}{dx} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \text{常数}$; 量程(满度) $y_m = y_2 - y_1$; 测量(线性)范围 $x_m = x_2 - x_1 = \frac{y_m}{S}$; 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。

(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 Δx 后输出才显示有变化 Δy , 这个输入增量 Δx 称为传感器的分辨率,表达式可为 $\Delta x = \frac{1}{S} \Delta y$ (Δy 为单位测量值,或称测量值的最小变化量),如图 1.2(b)所示。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。如果是灵敏度过高, Δx 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,如图 1.2(c)所示,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:

$$\gamma = \frac{\delta_m}{y_m} \times 100\% \quad (1.1)$$

δ_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)及相位移(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、输出阻抗和可靠性等。

【例 1.1】 测试位移量 $x(\text{mm})$ 传感器输出电流的方程为 $I = 4 + 2x = 4 \sim 20 \text{ mA}$, 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: $S = \frac{dy}{dx} = \frac{dI}{dx} = \frac{d}{dx}(4 + 2x) = 2 \text{ mA/mm}$

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】 参见练习题 1.3, 求图(a)的灵敏度 $S = \frac{U_{ab}}{\frac{\Delta R}{R}}$ 的表达式。

解: 当转角时

$$U_{ab} = U_b - U_a = U \frac{R}{2R} - U \frac{R - \Delta R}{2R} = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

则

$$S = \frac{U}{2}$$

1.1.2 传感器应用

1. 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,从测量要求和使用条件选择,方法如下:

(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;然后须满足用户要求,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) 在传感器的多种指标(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,这时应考虑工作可靠性(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,选用时应有所侧重解决主要问题或折中顾及重要指标。

(4) 如果采用多种传感器确定必要信息,需用传感器融合技术和采用物联网传感技术。

2. 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。如用紫外线检测器识别火焰,但无烟的火灾也是有的。因此,必须考

虑采用多种传感器的组合。又如,判断是否有人入侵商场时,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,以减少漏报和误报。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协议的传感器测控网络。现举例介绍传感器融入物联网在家庭信息服务中的应用。

【例 1.3】 本例介绍基于物联网的传感器技术在智能家居中的应用,其系统框图及说明如下。

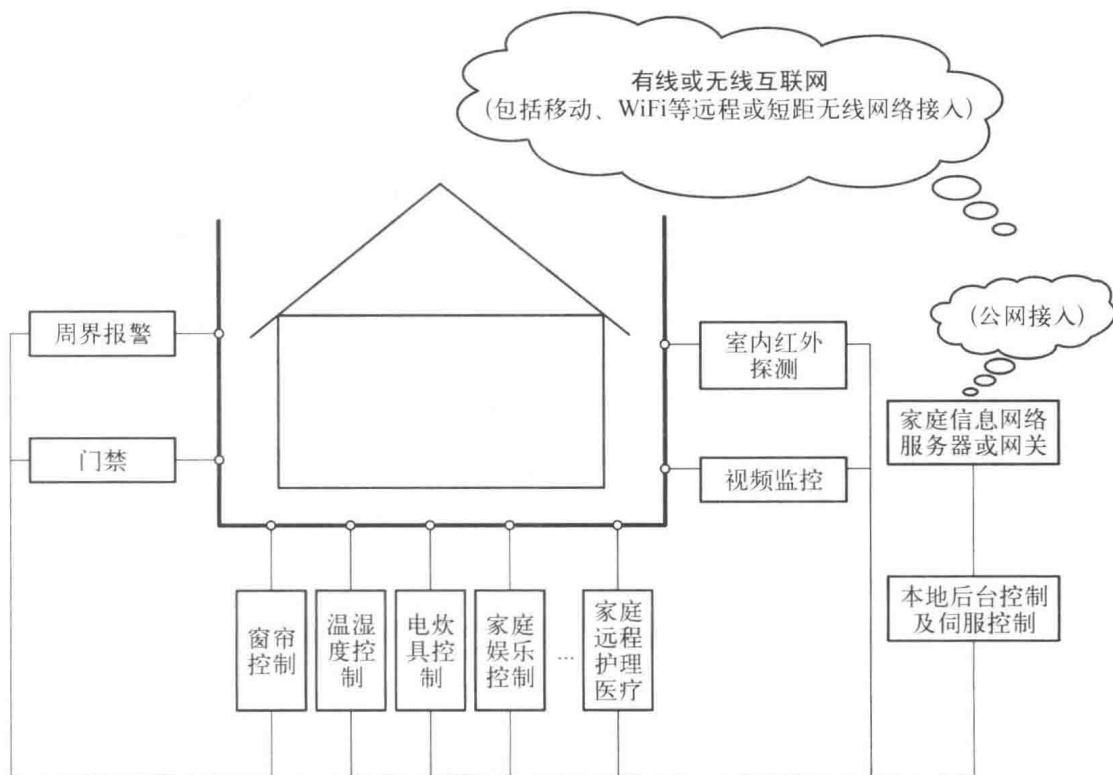


图 1.3 典型智能家居应用系统框图

这里,每个子系统都含有专门功能的传感网,它们由各特殊功能的传感器通过有线通信或无线通信组成网络实现。每个子系统必须依据信息变化的要求作出响应,并进行动作执行。系统框图中各重要模块功能简介如下:

(1) 远程医疗子系统,其信息前端设备是由各类生物医学传感器构成。

(2) 家庭安防子系统,图中的周界报警、门禁以及室内外红外探测、视频监控等都属于家庭安防子系统。

(3) 智能家居子系统:如图中的窗帘控制、温湿度控制、电炊具控制、家庭娱乐控制等部分。下面将这些部分的功能进行介绍:

① “窗帘控制部分”的功能。这部分功能是在室内窗户处的光亮度传感器得到的窗外自然光强信号进行处理和判断。当光强低于某一阈值,系统就认为时间已进入傍晚,应该自动合上窗帘,营造温馨的家庭环境。当然,第二天室外大亮时,“窗帘”又将依据光强,自动打

开,使阳光照入室内,营造朝气蓬勃的一天。

②“室内温湿度控制部分”的功能。这部分功能是由室内合理分布的温度与湿度传感器进行检测,当环境的温度或湿度明显偏离预先设定的阈值,说明可以启动空气调节系统进行反向调节。当然,为了节省能源和环保,系统可同时配合定时程序或是有无人的检测,得到一个开启空调的策略,使主人回家或在家有一个良好舒适的生活环境。

③“电炊器具的控制部分”的功能。这部分功能是由一系列的传感技术与程序控制技术实现的。当时间到达开启烧饭的时间时,电炊具会将开启主人要求的烹调程序,自动进行烧饭、蒸菜等动作,可方便地使主人回家后,稍作休息就可以吃晚饭。在这子系统里,由于动作和情况复杂,传感器的运用甚至传感网的应用是不可缺少的,否则,饭菜生熟程度、饭菜温度、火焰、烟雾等安全控制保障都将是重大的问题。在这些计划的基本功能外,用户也可以通过在线的个人终端,如办公室电脑、个人平板电脑、手机等固定或移动设备,实时调整和更新计划,以及实时操作。

④“家庭娱乐部分”的功能。主人辛苦工作了一天,晚餐后进行一定的娱乐放松,会对第二天的工作带来好的心情和效率。因此,这部分功能可按程序或主人的喜好,分别对公共电视节目、卫星电视、网络点播节目、自播视频或音频节目等进行多角度的选择和控制,为居住者的生活提供精神上的享受。

3. 光信号

目前,光信息技术已经异军突起,除电信号外,光信号也成为便于快速、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、粒两重性,以及可在空间作无线传播或在导线中传输,其实质是波振荡、粒直射、叠加行;量子态、隐形传、广通信。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。光是由一群光子所组成的,每个光子具有 $h\nu$ 的能量 ($h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, ν 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 ω_0 和作为电子逸出时具有初速度 v_0 的动能 $\frac{1}{2}mv_0^2$ (m 为电子质量)。当 $h\nu \leq \omega_0$ 时,即使光通量或光强很大,也不可能有电子逸出,这个最低频率 ν_0 称为红限频率,对应的波长称为红限波长;当 $h\nu > \omega_0$ 时,即入射光频率 $\nu > \nu_0$ 的情况下,光通量越大,逸出的光电子数目也越多,电路中的光电流也越大。另外,光在传输或作为信息时,许多特性也优于电子:

- (1) 光子轻于电子,反应快,开关时间短,光路传输速率高;
- (2) 光子不带电,相互不排斥,光电不干扰,光路无接地问题;
- (3) 光频极高 ($\nu > 300 \times 10^9 \text{ Hz} = 300 \text{ GHz} = 0.3 \text{ THz}$), 光路频带极宽,可容信息量大,一条光纤可双向传输 10 万以上用户同时通话;
- (4) 光纤传输损耗小(约 0.2 dB/km),传输距离与同轴线电路(衰耗约 45 dB/km)相比,可增加 100 倍以上;
- (5) 光纤细小、价低和设备简单,以及温度系数小、稳定可靠和光通信保密性强等。

基于“多自由度量子隐形传态”理论,以及随着量子比特的矩阵问世,可解决光存储器和光逻辑门等器件的开发,有望实现全光电路和全光通信。另外,将表面等离子体与纳米的光

子技术相结合,用单个光子记录和读取信息,可突破传统集成电路的局限,有望研发出一种比现今计算机更为强大的新型“量子信息系统”,推动传感器融合技术的发展。

1.2 电子测量任务和方法

知识点与能力目标

- ◇ 明确电子测量的主要任务,能用“四要素”表达测量结果;
- ◇ 理解直接、间接和组合的测量方法,能选用三种测量方法。

1.2.1 电子测量的任务

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,如与传感器技术相结合,也称为非电量电测。本书所说的电子测量,面向电子工程,是指电磁量而言,其主要任务如下:

(1) 测量三参数:电压、频率和阻抗(集总参数为电阻、电感和电容)。

(2) 表达四要素:一个测量结果应由大小、正负、单位和误差来表达。

如图 1.4 所示,在一个电阻 R_1 上测得直流电压范围 $U = 4.75 \sim 5.25 \text{ mV}$,则

(1) 数值的大小为 5,是测量值的平均值,也是最接近被测量的近似值。

(2) 不是 -5,也不是 ± 5 。

(3) 单位 $\text{mV} = \frac{\text{V}}{1\,000}$ 。

(4) 被测量的测量结果 $U = 4.75 \sim 5.25 \text{ mV}$,也可写成 $5.00 \pm 0.25 \text{ mV}$ 或 $5 \text{ mV} \pm 5\%$,表明测量的绝对误差为 $U - 5 \text{ mV} = \pm 0.25 \text{ mV}$,而相对误差为 $\pm \frac{0.25}{5} = \pm 5\%$ 。

必须指出,不带误差的测量结果不可信,没有单位的测量数据无价值(少数相对值和规定量除外)。一般 R_1 已知,则电流 $I = \frac{U}{R_1}$ 和功率 $P = \frac{U^2}{R_1}$ 可算得,因此,电压测量是其派生参数的测量基础。

1.2.2 电子测量的方法

1. 直接测量

测量值或仪表示值 $y = x$,直接从仪表上读出被测量 x ,是最基本、最简便的测量方法,应用也最广。

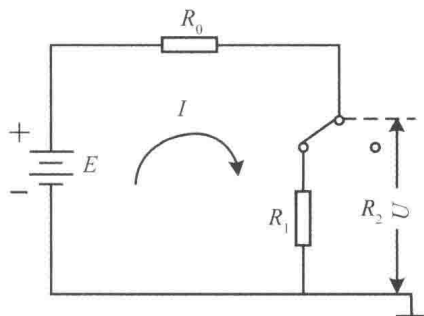


图 1.4 直流电路

2. 间接测量

$y = f(x_i)$, 对有函数关系的几个被测量 x_i 进行测量, 例如测量功率 $P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$, 这里 $y = P, x_1 = U, x_2 = I, x_3 = R$, 测得后三者中的两个, 才可计算功率。间接测量常用于下列情况:

(1) y 不能直接测量, 如不能直接测量电阻、电容和电感值, 在以后可以学到用伏安法、电桥法、电路变换法和谐振 Q 表法等间接测量求得, 这里以电路变换法为例加以说明。

【例 1.4】 参见练习题 3.12, 按图求出被测元件 L_x 和 C_x 的表达式。

解: 由题图或画直角坐标指出 U 、 U_R 和 U_x , 可得:

$$U^2 = U_R^2 + U_x^2 \text{ 和 } U_x = U_R \sqrt{\left(\frac{U}{U_R}\right)^2 - 1} = IX, \text{ 电抗 } X \text{ 可为 } X_L = \omega L_x \text{ 或 } X_C = \frac{1}{\omega C_x}$$

通过调节和测量电位器 R 上电压 U_R , 使其达到半电压点, 即 $U_R = \frac{U}{2}$ (达到半功率点

$$U_R = \frac{U}{\sqrt{2}} \text{ 也可})。$$

$$\text{测量电容 } C_x \text{ 时: } U_x = \frac{I}{\omega C_x} = \sqrt{3}U_R = \sqrt{3}IR, \text{ 则 } C_x = \frac{1}{2\pi f \sqrt{3}R}$$

$$\text{测量电感 } L_x \text{ 时: } U_x = I\omega L_x = \sqrt{3}IR, \text{ 则 } L_x = \frac{\sqrt{3}R}{2\pi f}$$

已知频率 f 和测出 R 值, 便可算得 L_x 和 C_x 的值。

(2) 有时直接测量比较困难, 如测量电流 $I = \frac{U}{R}$, 为了不断开电路串接电流表, 测量电压 U 和电阻 R 比测量 I 更方便。

(3) 间接测量精度更高, 例如分别测量电阻两端电压 U_{ab} 及 $U_a - U_b$, 由于电压表内阻的并联, 直接测量 U_{ab} 的误差较大, 而分别测量 U_a 和 U_b 后之差, 使误差减小, 即测量精度较高。

3. 组合测量

$y_i = f(x_i)$, 多个未知被测量 x_i 组成相同数量的联立方程 y_i , 通过改变测量条件进行多次测量, 如图 1.4 有 $E = IR_0 + U$, 其中电源 E 的内阻 R_0 是一个看不到、摸不着的未知量, 可改变负载电阻, 测出 R_1 、 R_2 所对应的 U_1 和 U_2 值, 代入方程

$$E = I_1 R_0 + U_1 \quad E = I_2 R_0 + U_2$$

求得:

$$R_0 = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} = \frac{U_2 - U_1}{\frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_2}}$$

当 $R_2 = \infty$ 时,

$$R_0 = \left(\frac{U_2}{U_1} - 1\right)R_1 \quad (1.2)$$

由于电压表内阻 $R_v \neq \infty$, 将产生与 R_0 值成正比的误差(详见 3.1.3 伏安法)。

总之, 电测有三法, 多数直接测, 遇到“三不”(直测不可能、不方便、不准确)时, 应用间接测(含组合测量)。

1.3 测量误差与处理

知识点与能力目标

- ◇ 理解误差公式, 能计算绝对误差、相对误差和不确定度;
- ◇ 掌握直接测量数据的整理和计算方法, 能对三种不同性质的误差进行处理, 以求得最接近被测量的近似值及其误差范围。

1.3.1 误差理论

1. 电子测量误差来源

- (1) 仪表误差: 由仪表本身性能不完善、不稳定所致。
- (2) 影响误差: 由环境变化、温度高低、电源波动和干扰情况等所引起。
- (3) 人为误差: 决定于操作熟练程度和所采用的测量方法。

2. 测量误差的表示

(1) 绝对误差

$$\Delta = x - a_0$$

式中, x 为被测量的测定值; a_0 为真值, 是一个理论值或期望值。在误差存在的情况下, 是一个不可知的量, 所以在实际应用时, 常用实际值 a 来代替 a_0 。则上式可表示为

$$\Delta = x - a \quad (1.3)$$

这里, Δ 有正有负, 实际值 a 可有三种情况:

- ① 相对真值: 用精度高一级仪表或新仪表的测定值 x_a , 则 $a = x_a$;
- ② 近真值: 测量次数 N 足够大时, 采用算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, 则 $a = \bar{x}$;
- ③ 修正后值 $x + c$, 修正值 $c = -\Delta$, 则 $a = x + c$ 也为近真值。

(2) 相对误差, 绝对误差仅能说明测量值偏离实际值的情况, 相对误差可以说明测量的准确程度, 可有三种表示形式:

实际相对误差:

$$\gamma_a = \frac{\Delta}{a} \times 100\%$$

在要求不太严格的场合, 可用 x 代替 a 。

测量相对误差: