



从校园到职场

工业检测技术

从入门到精通

董永贵 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



从校园到职场

工业检测技术从入门到精通

董永贵 编著



机械工业出版社

本书共 10 章, 分别介绍了电子测量基础知识、常用测试仪器、基础敏感元件的检测方法、各种物理或化学量传感器及其检测技术、抗干扰技术, 以及工业检测中的常用知识。尤其是从实际应用角度, 将工业检测问题按照热、辐射、机械、磁、化学量进行分类介绍, 为读者的阅读参考提供了便利。

本书可供从事工业检测以及相关领域的工程技术人员学习和参考, 也可供高等工科院校中检测技术相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工业检测技术从入门到精通/董永贵编著. —北京: 机械工业出版社, 2009.2

(从校园到职场)

ISBN 978-7-111-26068-4

I. 工… II. 董… III. 检测—技术 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 008321 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: 舒 雯 责任编辑: 舒 雯 关晓飞 王 琪

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

责任印制: 李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

• 2009 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 22.25 印张 · 383 千字

0001--3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26068-4

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379733

封面无防伪标均为盗版

前言

《论语》中有这样一段对话：“子夏问曰：巧笑倩兮，美目盼兮，素以为绚兮。何为也？子曰：绘事后素。”翻译成现代的语言，就是“子夏问：诗经上所说的，丽质天生的美女，穿上素色的衣服就更会显得光彩夺目了。这是为什么呢？孔子回答说：这就像画画一样，先画上各种色彩，最后以白色分布其间，才能凸显出色彩的美丽”。孔子所处的那个时代，绘画用的画布不是白色的，所以要在绘画后，在空白处添加上白色的衬底。白色本身很普通，但能够衬托出其他色彩的美丽。

之所以引用上面的一段对话，是想说明这样一件事情：工业检测技术所涵盖的范围很广，就像自然界中的色彩，不胜枚举。从专业角度来看，本书内容的深度一般，甚至有些泛泛，就像绘画中的白色，但这正是本书与专业教科书的区别所在。本书的目标读者，是那些从事工业检测工作的工程技术人员。本书尽可能地覆盖了工业检测技术工作需要的知识，对工业检测领域常见器件的工作原理、外部特性、检测系统构成及其应用技术等方面的问题，进行分类介绍，旨在帮助读者在了解工业检测常用知识的基础上，提高将专业课程中所学到的知识应用到具体工程实践中的能力。

本书共分 10 章。第 1 章介绍了工业检测技术的一些基本知识，以及实际工作时所需要的一些常见概念；第 2 章介绍了工业现场以及室内检测中经常用到的基础测试仪器；第 3 章从检测电路的角度，对工业检测中常见的电阻、电容、电感式传感器及其检测方法，进行了分析阐述；第 4~8 章，按照检测对象的能量形式，分别对热、辐射、机械、磁、化学量检测的基本概念以及常用技术进行了介绍；第 9 章从检测系统的角度，对工业检测领域的干扰、噪声问题进行了分析阐述，并介绍了一些常用的抗干扰技术；第 10 章结合笔者从事科研、教学工作的一些体会，介绍了数据分析表达、常用电子元件、信号调理电路等常用的知识与技术，并总结了工业检测中的一些常用物理原理，可作为读者日常技术工作中的参考。

需要强调的是，本书并不是一本教材，所以各章节之间的联系不是很紧密。

IV

对于部分读者来说,本书某些内容可能有些浅显,读者可根据自己的情况,自行挑选需要了解的章节。为方便读者的阅读理解,有些概念从专业角度来看可能不是很严格。如果读者对本书涉及的一些专业知识需要更深入的了解、学习,还需参考其他类型的专业文献。

本书可供从事工业检测工作以及相关领域的工程技术人员学习和参考,也可供高等工科院校中检测技术相关专业的师生参考。

由于编著者水平所限,书中难免存在不当之处,恳请读者不吝赐教。

董永贵
于清华园

目 录

前言

第 1 章 工业检测技术简介	1
1.1 电子技术基础	1
1.1.1 基本的电参量	1
1.1.2 电信号的基本参数	20
1.1.3 测量信号的获取	26
1.1.4 数据采集卡的选用	29
1.2 测量技术基础	33
1.2.1 测量中的误差	33
1.2.2 工业检测中的常用技术指标	37
1.2.3 实例：称重传感器的性能测试	41
1.3 工业过程的检测	42
1.3.1 传感器与测量系统	42
1.3.2 信号的接口技术	46
1.3.3 实例：性能监测系统	50
第 2 章 常用基础测试仪器及其使用	53
2.1 万用表	53
2.1.1 万用表的选用	53
2.1.2 万用表的基本测试功能	55
2.2 示波器	59
2.2.1 示波器的基本功能	59
2.2.2 利用示波器进行基本测量	63
2.2.3 示波器的选用	65
2.3 其他基础测试仪器	70
2.3.1 信号发生器	70
2.3.2 频率计	72

2.3.3 逻辑分析仪	73
2.3.4 频谱分析仪	76
第3章 初级敏感元件及其检测技术	78
3.1 电阻式敏感元件及其检测	78
3.1.1 电阻值的变化范围	78
3.1.2 电阻的测量	79
3.1.3 单臂电桥及其变形	81
3.2 电容式敏感元件及其检测	85
3.2.1 导体间的电容	86
3.2.2 电容检测基础	88
3.2.3 电容检测电路	93
3.3 电感式敏感元件及其检测	98
3.3.1 自感式传感器	99
3.3.2 互感式传感器	101
3.3.3 电涡流传感器	103
第4章 热学量的检测	110
4.1 热学量与温度	110
4.1.1 基本的热学量	110
4.1.2 温度与温标	112
4.1.3 温度传感器	115
4.2 热电偶	117
4.2.1 泽贝克效应	118
4.2.2 热电偶的测量原理	119
4.2.3 热电偶的应用	121
4.3 热电阻	124
4.3.1 热电阻的温度特性	124
4.3.2 热电阻的类型	125
4.3.3 热电阻的测量	126
4.4 热敏电阻	127
4.4.1 正温度系数热敏电阻	127
4.4.2 负温度系数热敏电阻	132

4.5 热膨胀式温度传感器	134
4.5.1 玻璃管式温度计	134
4.5.2 压力表式温度计	135
4.6 集成温度传感器	136
4.6.1 模拟型集成温度传感器	136
4.6.2 逻辑输出型集成温度传感器	137
4.6.3 数字型集成温度传感器	138
第5章 辐射量的检测	139
5.1 工业检测中的辐射量	139
5.1.1 核辐射与电磁辐射	139
5.1.2 计量核辐射的参量	141
5.1.3 计量电磁辐射的参量	144
5.2 核辐射的检测	148
5.2.1 盖革计数器	148
5.2.2 闪烁计数器	150
5.2.3 核辐射检测仪表	151
5.3 光电检测技术	153
5.3.1 光探测器	154
5.3.2 图像传感器	159
5.3.3 光敏传感器应用举例	162
5.4 红外检测技术	164
5.4.1 红外辐射	164
5.4.2 红外辐射探测器	166
5.4.3 红外测温仪	172
第6章 机械量的检测	176
6.1 工业检测中的机械量	176
6.2 压力的测量	177
6.2.1 压力的测量方式	177
6.2.2 常见的压力传感器	179
6.2.3 压力检测仪表的选择与使用	183
6.3 流量的测量	184

6.3.1 流量测量的相关定义	184
6.3.2 流量计及其应用	185
6.4 物位的检测	191
6.4.1 液位的检测	191
6.4.2 固体料位的检测	193
6.4.3 相界面的检测	194
6.5 运动量的检测	194
6.5.1 位移传感器	194
6.5.2 速度传感器	206
6.5.3 加速度传感器	207
6.6 力的检测	210
第7章 磁学量的检测	212
7.1 磁场的测量	212
7.1.1 磁场的描述	212
7.1.2 磁传感器	213
7.2 低强度磁场的测量	215
7.2.1 超导量子干涉器	215
7.2.2 探测线圈	216
7.2.3 其他低强度磁场探测器	216
7.3 中等强度磁场的测量	218
7.3.1 磁通门	218
7.3.2 磁感应传感器	219
7.3.3 各向异性磁阻传感器	220
7.4 高强度磁场的测量	222
7.4.1 干簧管	222
7.4.2 霍尔元件	224
7.4.3 磁敏电阻	231
7.4.4 磁敏二极管及磁敏晶体管	232
7.4.5 巨磁阻元件	233
第8章 化学量的检测	236
8.1 化学量检测的基本概念及定义	236

8.1.1	化学量检测的目标	236
8.1.2	物质的含量	237
8.1.3	化学量传感器	239
8.2	电化学检测技术	243
8.2.1	电极电位	244
8.2.2	电化学检测的基本概念	247
8.2.3	电化学分析系统	253
8.3	气体的检测	256
8.3.1	气体检测的需求	256
8.3.2	电化学气体传感器	258
8.3.3	气体传感器与气体检测系统	262
8.4	离子选择电极	265
8.4.1	离子选择电极原理	266
8.4.2	pH 电极	267
8.4.3	其他类型离子选择电极与 pH 电极的区别	268
8.4.4	离子选择电极的使用	269
8.5	生物检测技术	273
8.6	环境污染的检测	276
8.6.1	大气环境污染及其检测	277
8.6.2	水环境的污染及其监测	281
第 9 章	工业检测系统的抗干扰技术	285
9.1	干扰与噪声	285
9.1.1	干扰	286
9.1.2	噪声	287
9.2	接地与电磁屏蔽	289
9.2.1	接地技术	289
9.2.2	电磁屏蔽	291
9.3	阻抗匹配	293
9.4	印制电路板的抗干扰设计	296
9.4.1	印制电路板的布局	296
9.4.2	去耦电容	298

9.4.3 接地	300
9.4.4 电路连线与引脚屏蔽	302
9.5 仪器的连线	305
第 10 章 工业检测中的常用知识	311
10.1 数据的记录与表达	311
10.1.1 单位制	311
10.1.2 有效数字	314
10.1.3 数据的分析与表达	316
10.2 常用的电子器件	321
10.2.1 二极管	321
10.2.2 晶体管	324
10.2.3 集成电路	326
10.2.4 其他常用器件	328
10.3 工业检测中的信号调理	332
10.3.1 传递函数	332
10.3.2 信号调理电路	334
10.4 工业检测中的常用物理原理	336
参考文献	343

第 1 章 工业检测技术简介

- ◆ 基本的电参量
 - ◆ 电阻、电容、电感元件
 - ◆ 电信号的基本参数
 - ◆ 模拟信号的采样
 - ◆ 工业检测中的常用技术指标
 - ◆ 传感器与测量系统中的接口技术
 - ◆ 传感器、数据采集及监测系统
-

1.1 电子技术基础

我们生活在一个电子技术占主导地位的时代。20 世纪 70 年代，在我国的工厂里，还可以见到简单的、没有任何电子电路的机械式仪表。科学技术发展到今天，如果没有电子电路的知识，对于工业检测环境中可能出现的各种形式的仪器仪表，不要说了解，就是简单的使用，也几乎是一种奢求。

本章介绍的电子技术知识，如果从电子电路的角度来看，可能太简单了一些。然而，与教材中繁复的分析阐述相比，在工业检测中，深刻理解并在实践中迅速应用基本的物理概念，是提高工作效率的基础。清楚地了解、掌握这些基本概念，不仅应该成为工业检测技术的起点，还应该始终贯穿于工作实践过程中。

1.1.1 基本的电参量

电子元器件及其电路，是组成工业检测系统的基本单元。了解一套检测系统，首先需要掌握关于电子元器件的一些基本概念，这些基本概念是了解本书其他内容的基础。

1. 电流(current)

电荷的运动产生电流，在电子电路中，主要是电子的运动产生电流。

电流的基本定义为电荷流动的速率：

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中， i 为电流； q 为电荷； t 为时间。国际单位制中，电流的单位为 A。电荷的单位为 C，所以， $1\text{C} = 1\text{A} \cdot \text{s}$ 。在检测系统的电子电路中，电流一般不会大到 A 的量级，经常采用的单位是 mA， $1\text{mA} = 1 \times 10^{-3}\text{A}$ 。

电流 $i(t)$ 是一个与时间有关的变量。如果电流的大小不随时间变化，则称为直流 (DC) 电流，用大写字母 I 表示，相应的电子电路则称为直流电路；相反，如果电流的大小是随时间变化的，尤其是在电子电路中，最常见的情况是电流大小的变化符合正弦规律，称为交流 (AC) 电流，相应的电子电路称为交流电路。

在各种文献资料中，直流的参量一般采用大写字母表示，而交流的参量则用小写字母表示。

电流是有方向的。由于电子是带负电荷的，所以在导线中，电流方向是与电子流动方向相反的。在数学上，电流的取值可正可负。图 1-1 中，虽然箭头所标方向相同，但 I_2 的电流由于取负值，电荷流动方向恰好与 I_1 相反。

2. 电压(voltage)

电荷的流动需要有驱动力，这个驱动力是由电场产生的。电场的势能通过对电子做功，转化为电子的动能，形成电流。描述电场势能的参量就是电压。

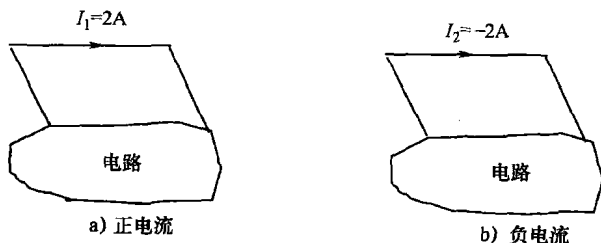


图 1-1 电路中的电流

电压的基本定义为：电场力对单位正电荷由场中一点移动到另一点所做的功，即

$$u(t) = \frac{W(t)}{q} \quad (1-2)$$

式中， u 为电压； W 为电场所做的功。在国际单位制中，电压的单位为 V，功的单位为 J， $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ ，因此， $1\text{V} = 1\text{J}/\text{C} = 1\text{N} \cdot \text{m}/\text{C}$ 。

在电路中，还有一个与电压相关的电参量，称为电位。空间中某一位置电位的定义是：把单位正电荷从无限远处（电位为零）带到该位置时所耗的电能。根据这一定义，电位的单位与电压相同，也是 V。

由电位的定义不难看出，电路中某一点的“绝对”电位实际上是无法测量的。在实际电子电路中，人们能够测量的是两个不同位置的电位差，这一电位差（或称电位降）就是电压：

$$u(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t) \quad (1-3)$$

式中， φ_1 、 φ_2 分别为位置 1 及位置 2 的电位。

大部分检测系统中，电位的概念往往在理论探讨时才有用。在实际应用中，还有一个词“电势”，有时指的是电位，有时指的是电压。在英语中，电位、电势、电压这三个概念有时会用同一个词“potential”，汉译时往往混淆。实际上，当人们遇到“电位”、“电势”或“电压”等词时，一般都是指“电位差”，即电压。

需要指出的是，在电化学系统中，电极本身的电位（称为电极电位）大小是有应用意义的，此时的“电位”与“电压”是两个不同的概念。一般会用“电位”描述某个电化学电极的电位，用“电势”或“电压”描述该电极与其他电极之间的电位差。

与电流的情况相同，如果电压的大小是不随时间变化的，称为直流电压，用大写字母表示；反之，如果电压的大小是随时间变化的，则称为交流电压，用小写字母表示。

电压也是有正负的。例如，电路中 A 点到 B 点的电压为 2V，则 B 点到 A 点的电压为 -2V。

3. 电阻(resistance)

电阻是所有电子电路中使用最多的元件。电阻的主要物理特征是变电能为热能，也可说它是一个耗能元件，电流经过它就产生内能，导致电阻发热。电路中，电阻的符号为 R 。对信号来说，交流与直流信号都可以通过电阻。

电阻的大小用电阻值来表示，它代表这个电阻对电流流动阻挡力的大小。电阻的单位为 Ω 。欧姆定律给出了电阻的定义：

$$U = IR \quad (1-4)$$

根据式 (1-4)，当在一个电阻器的两端加上 1V 的电压时，如果在这个电阻器中有 1A 的电流通过，则这个电阻的阻值为 1Ω 。

实际的电阻元件中， Ω 这个单位太小，常用的电阻单位为 $k\Omega$ 、 $M\Omega$ ， $1k\Omega = 1 \times 10^3\Omega$ ， $1M\Omega = 1 \times 10^6\Omega$ 。

电阻的倒数称为电导，单位为 S， $1S = 1/\Omega$ 。

电阻可以用来描述材料的导电特性。长度为 L ，截面积为 A 的均匀截面导电材料，其电阻为

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1-5)$$

式中， ρ 为材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。典型导电材料的电阻率如表 1-1 所示。

表 1-1 典型导电材料的电阻率

材 料	电阻率/ ($10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$)
铝	2.8
碳	4000
康铜 (镍铜合金)	44
铜	1.7
金	2.4
铁	10
银	1.6
钨	5.5

需要注意的是，电流流过电阻时，会导致电阻本身发热。大部分电阻的阻值会随着温度的上升而增加，因此，式 (1-4) 所描述的实际上是一种理想情况，实际电阻的电流—电压曲线如图 1-2 所示。

电路中常见电阻器的图形符号如图 1-3 所示。图 1-3 中左侧的表示方式为我国标准画法，常见于中国及欧洲产品的文献资料中；右侧的表示方式则在美国、日本的文献资料中更为常见。

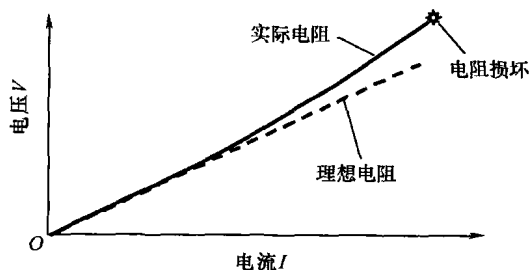


图 1-2 实际电阻的电流—电压曲线

图 1-4 给出了固定电阻及电位器的几种外观封装形式。色环电阻

及表面贴装电阻都是单个电阻元件，双列直插电阻排及单列直插电阻排则是多个电阻的集成形式。电位器的外观形式比较多样，有些是直线型的，大部分是旋转型的，利用螺钉旋具调节。根据旋转的圈数可分为单圈电位器及多圈电位器。仪器面板上的旋钮、对电阻值要求不高的电路，可选用单圈电位器。需要精确调节电阻值时，宜选用多圈电位器。

色环电阻是最常用的固定电阻，其电阻参数采用不同颜色的色标表示。色环电阻有 4 个色环的，也有 5 个色环的，各个色环代表的意义如图 1-5 所示。

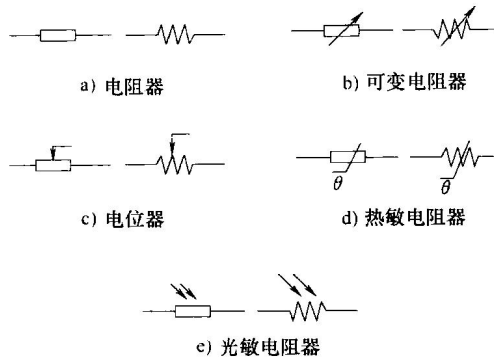


图 1-3 电路中常见电阻器的图形符号

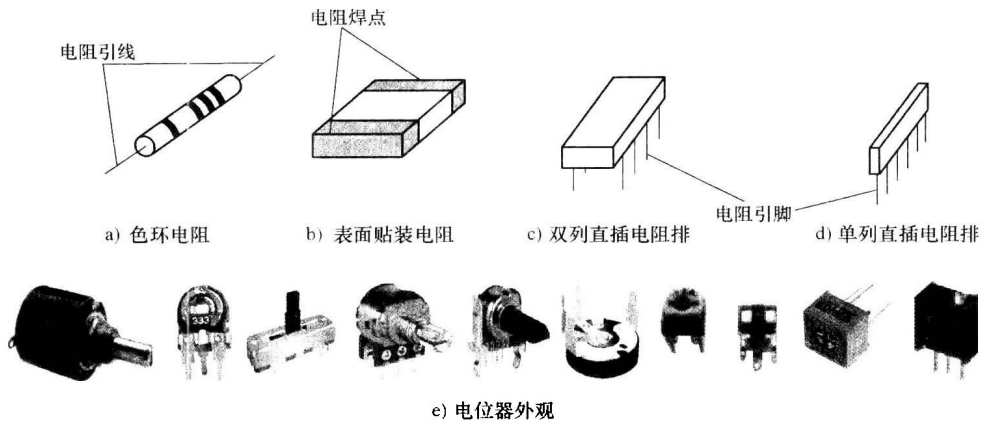


图 1-4 固定电阻及电位器

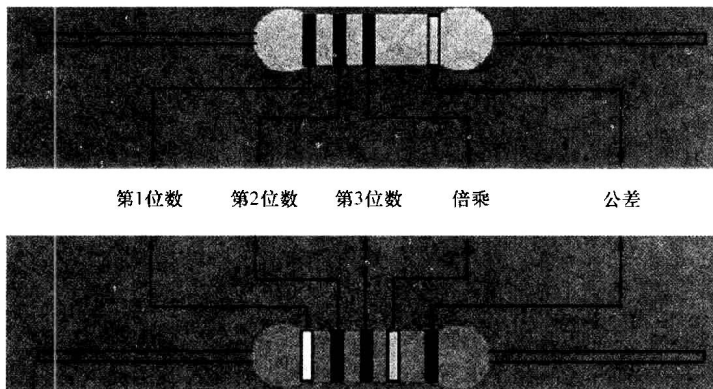


图 1-5 各个色环代表的意义

表 1-2 给出了色环颜色所代表的数值，数值单位为 Ω 。常见色环电阻的公差为 $\pm 1\%$ （棕色）、 $\pm 5\%$ （金色）、 $\pm 10\%$ （银色）、 $\pm 20\%$ （无表示公差的色环）。

表 1-2 色环颜色代表的数值

颜 色	数 值	倍 乘 值	公 差
黑色	0	$\times 1$	—
棕色	1	$\times 10$	$\pm 1\%$
红色	2	$\times 100$	$\pm 2\%$
橙色	3	$\times 1000$	—
黄色	4	$\times 10000$	—
绿色	5	$\times 100000$	$\pm 0.5\%$
蓝色	6	$\times 1000000$	$\pm 0.25\%$
紫色	7	$\times 10000000$	$\pm 0.10\%$
灰色	8	—	$\pm 0.05\%$
白色	9	—	—
金色	—	$\times 0.1$	$\pm 5\%$
银色	—	$\times 0.01$	$\pm 10\%$
无色环	—	—	$\pm 20\%$

读取色环电阻的参数，首先要判断读数的方向。一般来说，表示公差的色环离开其他几个色环较远并且较宽一些。判断好方向后，就可以从左向右读数。

例如，某 4 色环电阻的颜色从左到右依次为红（2）、紫（7）、黄（ $\times 10000$ ）、银（ $\pm 10\%$ ），则此电阻的阻值为 $27\Omega \times 10000 = 270000\Omega$ ，即 $270k\Omega$ ，公差为 $\pm 10\%$ 。

再如，某 5 色环电阻的颜色从左到右依次为红（2）、绿（5）、蓝（6）、红（ $\times 100$ ）、棕（ $\pm 1\%$ ），则此电阻的阻值为 $256\Omega \times 100 = 25600\Omega$ ，即 $25.6k\Omega$ ，公差为 $\pm 1\%$ 。

色环电阻的读数，即使对于许多电子类的工程师来说，常常也是比较困难的事情：颜色所代表的读数往往记不住。下面是两种比较容易的记忆方式：

- 1) 按照光谱的颜色记忆：记住赤、橙、黄、绿、蓝、紫的顺序（青没有），