



普通高等教育“十二五”规划教材
国家精品课程配套教材

Modern detecting technologies
and system

现代检测 技术与系统

© 胡向东 唐贤伦 胡蓉 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材
国家精品课程配套教材

现代检测技术与系统

胡向东 唐贤伦 胡蓉 编著



机械工业出版社

本书是国家精品课程和重庆市精品资源共享课程配套系列教材之一。本书重点介绍了现代检测技术与系统的基本概念、基本原理和应用,内容包括检测技术基础、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器、数字式传感器、其他传感器、检测系统设计、检测系统的信号处理、检测系统的抗干扰、现代检测系统。本书定位清晰明确,以教学适应性强为目标,偏重基于基本检测技术与系统理论引导的工程实践与应用能力培养。

本书主要面向高等教育的本科一般院校、专科院校和职业院校的自动化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程、车辆工程、交通工程、物联网工程等专业,也可供现代检测技术与系统领域的相关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代检测技术与系统/胡向东,唐贤伦,胡蓉编著. —北京:机械工业出版社, 2015. 3

普通高等教育“十二五”规划教材. 国家精品课程配套教材

ISBN 978-7-111-48798-2

I. ①现… II. ①胡…②唐…③胡… III. ①自动检测—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第286583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:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2015年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·398千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48798-2

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是国家精品课程和重庆市精品资源共享课程配套系列教材之一。该系列教材和教学资源已被全国众多高校选用，其内容体系优化基于长期的教学实践和国家级精品课程建设的经验积累，并得益于相关教改研究成果的应用推广。

随着信息技术应用广度与深度的不断拓展，以及“工业化与信息化深度融合”的巨大需求，作为信息技术的源头，现代检测技术正迎来一个快速发展期；技术的进步、应用的研发、仪器的使用与维护都需要大批的专门人才作为支撑；与此同时，它们也对人才培养的内容和目标提出了与时俱进的新要求。

本书是针对高等教育的本科一般院校、专科院校和职业院校等的自动化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、电子信息工程、车辆工程、交通工程、物联网工程等专业的教学需要而编写的，内容包括检测技术基础、电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器、数字式传感器、其他传感器、检测系统设计、检测系统的信号处理、检测系统的抗干扰、现代检测系统。本书定位清晰明确，以教学适应性强为目标，偏重基于基本检测技术与系统理论引导的工程实践与应用能力培养，而且有 PPT、FLASH 动画、题库、课程网站等丰富的教学资源支持，更多的信息请访问 <http://ac.cqupt.edu.cn/asp/course/sensor/>。

本书由胡向东、唐贤伦、胡蓉编著，秦晓鹏、王凯、贾子漠、牟海明、刘竹林、唐飞、熊文韬、陈国军、林家富、白银、刘可、刘玥、白浩浩、李林乐、杨子明等研究生参与了部分书稿的资料整理搜集、图表绘制、案例撰写等工作；胡向东负责全书的统稿。要特别感谢参考文献中所列各位作者，包括众多未能在参考文献中一一列出的作者。本书的编写得到重庆市基础与前沿研究计划项目（cstc2013jcyjA40002）的资助。

现代检测技术与系统应用广泛、内容丰富、需求多样，且技术本身处于不断的发展进步中，本书的出版是我们在此领域的再一次努力尝试。限于自身的水平和学识，书中难免存在疏漏和错误之处，诚望读者不吝赐教，以利修正，让更多的读者获益。联系邮箱：huxd@cqupt.edu.cn。

编著者

目 录

前言

第1章 检测技术基础	1
1.1 引言	1
1.2 传感器的定义、组成与分类	2
1.3 测量方法	4
1.3.1 测量的基本概念	4
1.3.2 测量方法的分类	5
1.4 检测系统的基本特性	7
1.4.1 静态特性	7
1.4.2 动态特性	10
1.5 误差及其处理	10
1.5.1 误差的概念	10
1.5.2 随机误差的处理	14
1.5.3 系统误差的处理	16
1.5.4 粗大误差的处理	18
能力拓展：生活中的传感器	18
习题云	19
第2章 电阻式传感器	20
2.1 应变电阻式传感器	20
2.1.1 工作原理	20
2.1.2 电阻应变片的种类	22
2.1.3 测量电路	23
2.1.4 应变电阻式传感器的应用	27
2.2 气敏电阻	32
2.2.1 气敏电阻的定义	32
2.2.2 气敏电阻的主要参数及特性	32
2.2.3 工作原理	33
2.2.4 气敏电阻的主要类型	35
2.2.5 气敏电阻的应用	36
2.3 湿敏电阻	37
2.3.1 湿度的定义及其表示方法	37
2.3.2 湿敏电阻的性能和主要特性参数	37
2.3.3 工作原理	38
2.3.4 测量电路	40
2.3.5 湿敏电阻的应用	41
能力拓展：电子秤的设计	42
习题云	42

第3章 电容式传感器	44
3.1 工作原理	44
3.1.1 变面积型	45
3.1.2 变介质型	47
3.1.3 变极距型	47
3.2 测量电路	49
3.2.1 调频电路	50
3.2.2 运算放大器	50
3.2.3 变压器式交流电桥	51
3.2.4 二极管双T形交流电桥	51
3.2.5 脉冲宽度调制电路	52
3.3 电容式传感器的应用	55
3.3.1 电容式压力传感器	55
3.3.2 电容式位移传感器	56
3.3.3 电容式加速度传感器	56
3.3.4 电容式厚度传感器	57
习题云	57
第4章 电感式传感器	59
4.1 变磁阻电感式传感器	59
4.1.1 工作原理	59
4.1.2 输出特性	61
4.1.3 测量电路	61
4.1.4 变磁阻电感式传感器的应用	63
4.2 差动变压器电感式传感器	64
4.2.1 螺线管式差动变压器	64
4.2.2 差动变压器电感式传感器的应用	68
4.3 电涡流电感式传感器	69
4.3.1 工作原理	69
4.3.2 等效电路	70
4.3.3 测量电路	70
4.3.4 电涡流电感式传感器的应用	71
习题云	72
第5章 压电式传感器	74
5.1 工作原理	74
5.1.1 压电效应	74
5.1.2 压电材料	75
5.2 测量电路	79
5.2.1 等效电路	79
5.2.2 前置放大器	80
5.2.3 压电元件的连接	82
5.3 压电式传感器的应用	83
5.3.1 压电式力传感器	83
5.3.2 压电式加速度传感器	84

习题云	84
第 6 章 磁敏式传感器	85
6.1 磁电感应式传感器	85
6.1.1 工作原理	85
6.1.2 磁电感应式传感器的结构	86
6.1.3 测量电路	88
6.1.4 磁电感应式传感器的应用	88
6.2 霍尔式传感器	89
6.2.1 工作原理	89
6.2.2 测量电路	92
6.2.3 霍尔式传感器的应用	93
习题云	94
第 7 章 热电式传感器	95
7.1 热电偶	96
7.1.1 工作原理	96
7.1.2 热电偶的材料、结构与种类	102
7.1.3 热电偶的冷端温度补偿	104
7.1.4 测量电路	106
7.1.5 热电偶的选用与安装	108
7.1.6 热电偶的应用	108
7.2 热电阻	109
7.2.1 铂热电阻	109
7.2.2 铜热电阻	110
7.2.3 测量电路	111
7.2.4 热电阻的应用	112
7.3 热敏电阻	112
7.3.1 热敏电阻的特性	113
7.3.2 热敏电阻的应用	114
能力拓展：火灾探测报警系统设计	115
习题云	115
第 8 章 光电式传感器	116
8.1 光电式传感器的概念及其基本形式	116
8.2 光电效应与光电器件	117
8.2.1 外光电效应型光电器件	118
8.2.2 内光电效应型光电器件	119
8.3 光纤传感器	130
8.3.1 光纤及其传光原理	130
8.3.2 光纤传感器的组成与分类	131
8.3.3 光纤传感器的应用	133
习题云	134
第 9 章 数字式传感器	136
9.1 光电式编码器	136
9.1.1 码盘式编码器	136

9.1.2	脉冲盘式编码器	139
9.1.3	两类编码器的对比	141
9.1.4	光电式编码器的应用	141
9.2	计量光栅	142
9.2.1	工作原理	143
9.2.2	计量光栅的组成	144
9.2.3	计量光栅的应用	147
	习题云	147
第10章	其他传感器	149
10.1	红外传感器	149
10.1.1	工作原理	149
10.1.2	红外传感器的应用	152
10.2	微波传感器	155
10.2.1	工作原理	155
10.2.2	微波传感器的分类	155
10.2.3	微波传感器的组成	155
10.2.4	微波传感器的特点	156
10.2.5	微波传感器的应用	156
10.3	超声波传感器	158
10.3.1	超声波及其物理性质	158
10.3.2	工作原理	160
10.3.3	超声波传感器的应用	162
10.4	新型传感器	167
10.4.1	智能传感器	168
10.4.2	模糊传感器	169
10.4.3	微传感器	170
10.4.4	网络传感器	172
10.4.5	生物传感器	174
	能力拓展: 入侵探测报警系统设计	176
	习题云	176
第11章	检测系统设计	178
11.1	检测系统的组成	178
11.1.1	数据采集系统	178
11.1.2	输入/输出通道	182
11.1.3	检测系统的软件	183
11.2	检测系统的基本设计方法	185
11.2.1	系统需求分析	186
11.2.2	系统总体设计	186
11.2.3	采样速率的确定	187
11.2.4	标度变换	188
11.2.5	硬件设计	189
11.2.6	软件设计	193
11.2.7	系统的集成与维护	193

能力拓展：无线温度采集系统设计	193
习题云	194
第 12 章 检测系统的信号处理	195
12.1 信号放大	195
12.1.1 运算放大器	195
12.1.2 仪用放大器（或测量放大器）	198
12.1.3 程控增益放大器	199
12.1.4 隔离放大器	201
12.2 信号滤波	202
12.2.1 滤波器的分类	202
12.2.2 模拟滤波器	203
12.3 信号转换	206
12.3.1 A/D 转换	206
12.3.2 D/A 转换	214
12.3.3 电压/电流转换	216
12.3.4 电流/电压转换	217
习题云	218
第 13 章 检测系统的抗干扰	219
13.1 噪声与干扰的危害	219
13.1.1 噪声与信噪比	219
13.1.2 干扰的危害	221
13.2 干扰的来源	221
13.2.1 内部干扰	222
13.2.2 外部干扰	222
13.3 干扰的耦合方式	222
13.4 干扰的抑制方法	224
13.4.1 抗干扰设计的基本原则	224
13.4.2 硬件抗干扰	226
13.4.3 软件抗干扰	229
习题云	232
第 14 章 现代检测系统	233
14.1 现代检测系统综述	233
14.1.1 总线技术	233
14.1.2 虚拟仪器	237
14.1.3 网络化测试技术	240
14.2 基于单片机的自动测温系统	241
14.3 基于无线传感器网络的智能家居安全测控系统	243
14.3.1 无线传感器网络的体系结构及应用领域	243
14.3.2 智能家居安全测控系统	247
14.4 现代检测系统的发展	249
习题云	251
附录 传感器样例	252
参考文献	255

第 1 章 检测技术基础

知识单元与知识点	<ul style="list-style-type: none">➤ 传感器的定义、组成与分类，传感器的共性、传感器的基本功能；➤ 测量方法；➤ 检测系统的基本特性；➤ 误差及其处理。
能力点	<ul style="list-style-type: none">◇ 深入理解传感器、测量和误差的概念；◇ 把握传感器的组成、传感器的基本功能和传感器的共性；◇ 理解传感器的分类方法和测量方法的分类；◇ 了解检测系统的基本特性；◇ 会识别不同种类的传感器；◇ 会分析和处理不同类别的误差◇ 会结合生活生产实际举例说明传感器的应用。
重难点	<ul style="list-style-type: none">■ 重点：传感器的定义、组成、分类；测量方法；误差及其处理。■ 难点：检测系统的基本特性；随机误差的处理。
学习要求	<ul style="list-style-type: none">✓ 了解检测技术的重要性；✓ 熟练掌握传感器的定义、组成以及测量和误差相关概念；✓ 掌握传感器的分类和误差处理方法；✓ 了解检测系统的基本特性。

1.1 引言

自古以来，检测技术就渗透到人类的生产活动、科学实验、日常生活的各个方面；现在，测量科学已成为现代化生产的重要支柱之一，也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础，它对促进生产力发展与社会进步起到举足轻重的作用。例如，在基础学科研究领域，宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙，微观上要观察小到 10^{-13} cm 的粒子世界，要观察长达数十万年的天体演化，也要观察短到 10^{-24} s 的瞬间反应；为深化物质认识、开拓新能源、新材料等，需要对各种极端技术，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等进行检测。总之，要获取大量的人类感官无法直接获取的信息，没有相应的检测技术的支撑，没有对检测仪器仪表的利用，是不可能实现的。许多基础科学研究的障碍，首先就在于研究对象的信息获取存在困难，而一些新机理和高灵敏度的检测仪器仪表的出现，则往往会带来该领域研究的突破；检测技术的发展，常常是一些边缘学科发展的先驱。我国所确定的八个高技术领域，即信息技术、生物技术、新材料技术、先进制造与自动化技术、资源环境技术、航天航空技术、能源技术、先进防御技术，都离不开检测技术和计量测试仪器仪表的保障作用。目前，世界上许多国家，特别是西方发达国家，都已投入大量人力、物力和财力，大力发展各类新型传感器，并将传感器与检测技术作为本国优先和重点发展的高技术

领域。以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的传感器与检测技术已经发展成为一门完整且活跃的技术学科，在促进生产力发展和科技、社会进步的广阔领域内发挥着重要作用。检测技术在国民经济中的地位日益提高。

由于人们的科学实验和生产实践，特别是自动控制系统中要获取的信息，通常都要通过检测技术获取并转换为容易传输和处理的信号（一般是电信号），因此自动化水平的高低将受制于检测控制类仪表及传感器的种类、数量和质量。而自动化水平是衡量一个国家现代化程度的重要指标，科技越发达，自动化程度越高，对检测技术的依赖也就越强烈，这就是自20世纪80年代以来，世界各国都将传感器与检测技术列为重点优先发展的高技术的重要原因。



交流与微思考

【问题】 ①“科学是从测量开始的”；②“仪器是认识和改造物质世界的工具”，“仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗机’，国民活动中的‘物化法官’”。这两个论断分别是哪两个著名科学家提出来的？

【提示】 19世纪发现元素周期律的俄国著名化学家德米特里·伊万诺维奇·门捷列夫；我国著名光学仪器和测试技术科学家王大珩院士。

1.2 传感器的定义、组成与分类

根据我国国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》，传感器定义为：能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置，通常由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受和响应被测量的部分；转换元件是指传感器中能将敏感元件的感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号的部分。传感器的共性就是利用物理定律或物质的物理、化学或生物特性，将非电量（如位移、速度、加速度、力等）输入转换成电量（电压、电流、电荷、电容、电阻等）输出。

根据传感器的定义，传感器的基本组成为敏感元件和转换元件两部分，分别完成检测和转换两个基本功能。值得指出的是，一方面，并不是所有的传感器都能明显地区分敏感元件和转换元件这两个部分，如半导体气敏或湿度传感器、热电偶、压电晶体、光电器件等，它们一般是将感受到的被测量直接转换为电信号输出，即将敏感元件和转换元件两者的功能合二为一了；另一方面，只由敏感元件和转换元件组成的传感器通常输出信号较弱，还需要信号调理与转换电路将输出信号进行放大并转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。信号调理与转换电路的作用：一是把来自传感器的信号进行转移和放大，使其更适合于作进一步处理和传输，多数情况下是将各种电信号转换为电压、电流、频率等少数几种便于测量的电信号；二是进行信号处理，即对经过转换的信号进行滤波、调制或解调、衰减、运算、数字化处理等。常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等。另外，传感器的基本部分和信号调理与转换电路还需要辅助电源提供工作能量。

传感器的典型组成如图 1.1 所示。

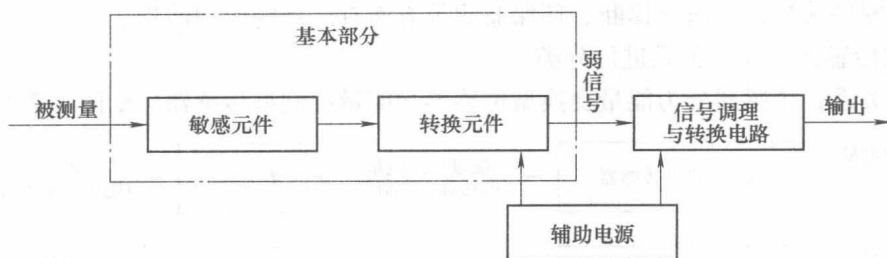


图 1.1 传感器的典型组成

传感器的输出信号一般为电信号，由于不同类型的传感器的检测与转换原理各不相同，因此它们输出的电信号有多种形式，如连续信号（模拟信号）与离散信号（脉冲信号、开关信号或数字信号等），周期性信号与非周期性信号，电压、电流、电荷信号或幅值、频率、相位信号等，传感器输出的电信号形式取决于其工作原理和设计要求。

传感器可按输入量、输出量、工作原理、基本效应、能量变换关系以及所蕴含的技术特征等分类，其中按输入量和工作原理的分类方式应用较为普遍。

(1) 按传感器的输入量（即被测参数）进行分类

按输入量分类的传感器以被测物理量命名，如位移传感器、速度传感器、温度传感器、湿度传感器、压力传感器等。这种分类方法通常在讨论传感器的用途时使用。

(2) 按传感器的输出量进行分类

传感器按输出量可分为模拟式传感器和数字式传感器两类。模拟式传感器是指传感器的输出信号为连续形式的模拟量；数字式传感器是指传感器的输出信号为离散形式的数字量。

(3) 按传感器的工作原理进行分类

根据传感器的工作原理（物理定律、物理效应、半导体理论、化学原理等），可以分为电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器等。这种分类方法通常在讨论传感器的工作原理时使用。

(4) 按传感器的基本效应进行分类

根据传感器敏感元件所蕴含的基本效应，可以将传感器分为物理传感器、化学传感器和生物传感器。

物理传感器是依靠传感器的敏感元件材料本身的物理特性变化或转换元件的结构参数变化来实现信号的变换。物理传感器按其构成可细分为物性型传感器和结构型传感器。物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理特性的变化来实现信号的转换，如水银温度计；结构型传感器是依靠传感器转换元件的结构参数变化来实现信号的转换，主要是通过机械结构的几何尺寸和形状变化引起相应的电阻、电感、电容等物理量的变化，进而检测出被测信号，如变极距型电容式传感器。

化学传感器是依靠传感器的敏感元件材料本身的电化学反应来实现信号的变换，用于检测无机或有机化学物质的成分和含量，如气敏传感器、湿度传感器等。化学传感器广泛用于化学分析、化学工业的在线检测及环境保护检测中。

生物传感器是利用生物活性物质选择性的识别来实现对生物化学物质的测量，即依靠传感器的敏感元件材料本身的生物效应来实现信号的变换，如酶传感器、免疫传感器等。生物

传感器近年发展很快，在医学诊断、环保监测等方面有广泛的应用前景。

(5) 按传感器的能量关系进行分类

按能量关系，传感器分为能量变换型传感器和能量控制型传感器，如图 1.2 所示。

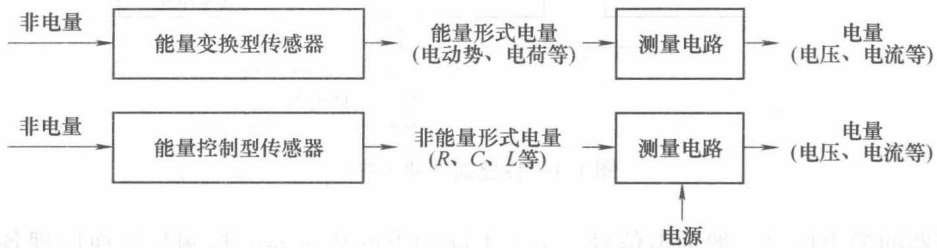


图 1.2 按能量关系分类

能量变换型传感器，又称为发电型或有源型传感器，其输出端的能量是由被测对象取出的能量转换而来的。它无需外加电源就能将被测的非电能量转换成电能量输出；它无能量放大作用，要求从被测对象获取的能量越大越好。这类传感器包括热电偶、光电池、压电式传感器、磁电感应式传感器、固体电解质气敏传感器等。

能量控制型传感器，又称为参量型或无源型传感器，这类传感器本身不能换能，其输出的电能量必须由外加电源供给，而不是由被测对象提供，即由被测对象的信号控制电源提供给传感器输出端的能量，并将电压（或电流）作为与被测量相对应的输出信号。由于能量控制型传感器的输出能量是由外加电源供给的，因此，传感器输出端的电能可能大于输入端的非电能量，所以这种传感器具有一定的能量放大作用。属于这种类型的传感器包括电阻式、电感式、电容式、霍尔式和某些光电式传感器等。

(6) 按传感器所蕴含的技术特征进行分类

按所蕴含的技术特征，传感器可分为普通传感器和新型传感器。

普通传感器发展较早，是一类应用传统技术的传感器。随着计算机、嵌入式系统、网络通信和微加工技术等的发展，现在出现了许多**新型传感器**，如传感器与微处理器的结合，产生了具有一定数据处理能力和自检、自校、自补偿等功能的智能传感器；模糊数学原理在传感器中的应用，产生了输出量为非数值符号的模糊传感器；传感器与微机电系统技术的结合，产生了具有微小尺寸的微传感器；网络接口芯片、嵌入式通信协议和传感器的结合，产生了能够方便接入现场总线测控网络或组建传感器网络的网络传感器。

1.3 测量方法

1.3.1 测量的基本概念

测量 (Measurement) 就是以确定被检测值 (被测量) 为目的的一系列操作，即利用物质的物理的、化学的或生物的特性，对被测对象的信息进行提取、转换以及处理，获得定性或定量结果的过程。

人们在进行测量时，通常要借助于一定的仪器或设备，将被测量与同性质的标准量 (或测量单位) 进行比较，从而确定被测量对标准量的倍数，即被测量的定量信息。测量过

程中使用的标准量应该是国际或国内公认的（即符合相关国际或国内标准）、以仪器或设备形式存在的、性能稳定的量。

经测量过程所获得的被测量的量值称为测量结果。测量结果有多种表示方式，如数值、曲线或图形等。无论采用何种表示方式，测量结果都应包括两个部分：比值和测量单位（严格地说，还应包括测量误差或测量精度，以表明测量结果的可信程度）。

1.3.2 测量方法的分类

测量方法就是将被测量与标准量进行比较，从而得出比值的方法。

很明显，不同的事物，有不同的性质和不同的度量标准，因此对应的测量方法也就各不相同，必须根据具体的测量任务确定合适的测量方法。测量方法的分类如下：

(1) 根据测量方式的不同可分为直接测量、间接测量和组合测量

直接测量：用按已知标准标定好的测量仪器对某一未知量进行测量，不需要经过任何运算就能直接得出测量结果的测量方法。例如，用电流表测量电路的电流，用弹簧管压力表测量压力等。

直接测量的优点：测量过程简单、迅速；缺点：测量精度不高。

间接测量：首先对与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量，然后通过已知的函数关系（如公式、曲线或图表等），求出该未知量，即需要将测量值经过某种函数关系变换才能确定被测量值的测量方法。例如在直流电路中，直接测出负载的电流 I 和电压 U ，然后根据功率 $P = IU$ 的函数关系，求出负载消耗的电功率。

间接测量的特点：测量过程复杂，测量所需时间较长，需要进行计算才能得出最终的测量结果。间接测量一般用于直接测量不方便、直接测量的误差较大或不能进行直接测量的场合。

前面两种测量方法都是针对单个的未知量进行测量的方法。在实践中也存在着同时对多个未知量进行测量的情况，这需要用到组合测量方法。

组合测量：在测量中，使各个待求未知量和被测量经不同的组合形式出现（包括改变测量条件来获得这种不同的组合关系），根据直接测量或间接测量所得到的被测量数据，通过解一组联立方程而求出未知量的数据的测量方法，即这种测量方法必须经过求解联立方程组才能得出最后结果。组合测量中，未知量与被测量间存在已知的函数关系（表现为方程组）。

例如，为了确定电阻的温度系数，可利用以下电阻值与温度间的关系：

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1.1)$$

式中 R_t ——温度 t 时的电阻值；

R_{20} ——20℃时的电阻值；

α 、 β ——电阻温度系数；

t ——测试时的温度（℃）。

为了确定电阻温度系数 α 、 β 的值，采用改变测量温度的办法，在三种温度下分别测得对应的电阻值，然后代入上述公式，得到一组联立方程组，解此方程组，便可求得 α 、 β 和 R_{20} （常用最小二乘法来确定）。

组合测量的特点：这是一种特殊的精密测量方法，操作手续复杂，花费时间较长，但易

达到较高精度。组合测量多用于科学实验或一些有特殊要求的场合。

(2) 根据测量方法的不同可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量

偏差式测量：用仪表指针的位移（即偏差）表示被测量量值的测量方法。该方法是事先用标准器具对仪表刻度进行校准，测量时，输入被测量并按照仪表指针在标尺上的示值决定被测量的数值。例如用弹簧压力表检测压力等，都是采用偏差式测量方法。偏差式测量的测量过程简单、迅速，但测量结果的精度较低。

零位式测量：用指零仪表的零位反映测量系统的平衡状态，在测量系统平衡时，用已知的标准量决定被测量的量值。在零位式测量时，已知标准量直接与被测量相比较，要求已知标准量应连续可调，指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等。例如天平测量物体的质量、电位差计测量电压等，都是采用零位式测量方法。零位式测量可以获得比较高的测量精度，但测量过程比较复杂费时，适用于测量变化缓慢的信号。

微差式测量：是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。零位式测量中的标准量不可能都是连续可调的，因而难以与被测量完全平衡，实际测量时必定存在差值。微差式测量只要求标准量与被测量接近（零位式测量），再用指示仪表测量标准量与被测量的微小差值（偏差式测量）。例如测量稳压电源的输出电压随负载电阻变化，其输出电压可表示为 $U_0 = U + \Delta U$ 。式中， ΔU 是负载电阻变化引起的输出电压变化量，相对于 U 来说它是一个较小量，如果采用偏差法测量，则仪表首先要有较大的量程以满足对 U_0 的测量，这将使得对 U_0 的微小变化较难准确测量。为了得到较高的测量精度，除了可选用零位式测量外，最好使用图 1.3 所示的偏差式测量方法。

图 1.3 中， R_i 和 E 分别表示稳压电源的内阻和电动势， R_L 表示稳压电源的负载， E_1 、 R_1 和 R_{RP} 表示高灵敏度电位差计的参数。测量前先调整 R_1 ，使电位差计工作电流 I_1 为标准值；然后，使稳压电源负载电阻 R_L 为额定值；调整 R_{RP} 的活动触点，使毫伏表指示为 0，相当于事先用零位式测量出额定输出电压 U 。正式测量时，只需增加或减小负载电阻 R_L 的值，负载变动所引起的稳压电源输出电压 U_0 的微小变化值 ΔU 即可由毫伏表指示出来。根据 $U_0 = U + \Delta U$ ，稳压电源输出电压在各种负载下的值都可以准确地测量得到。

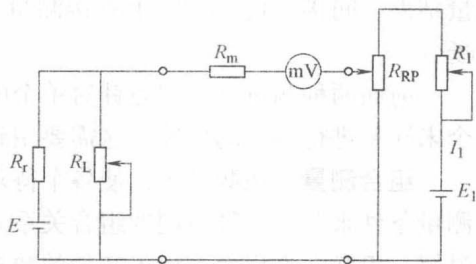


图 1.3 偏差式测量方法

微差式测量的标准量具装在仪表内并直接参与比较，省去了零位式测量中反复调节标准量以求平衡的步骤，只需测量两者的差值。微差式测量兼有偏差式测量速度快和零位式测量精度高的优点，特别适用于在线控制参数的测量。

(3) 根据测量精度要求的不同可分为等精度测量和非等精度测量

等精度测量：在同一测量环境下，用相同仪表与测量方法对同一被测量进行多次重复测量。

非等精度测量：用不同精度的仪表或不同的测量方法，由不同的测量人员或在环境条件不同（相差很大）时，对同一被测量进行多次重复测量。此时各个测量结果的可靠程度不一样，可用一个称为“权”的数值来表示对应测量结果的可信赖程度。

(4) 根据被测量变化的快慢可分为静态测量和动态测量

如果被测量在测量过程中是固定不变的,或随时间变化非常缓慢(变化周期远大于传感器或检测仪表的响应时间),对这种被测量的测量称为**静态测量**。静态测量不需要考虑时间因素。

如果被测量在测量过程中是随时间不断变化的(变化周期接近或小于传感器或检测仪表的响应时间),对这种被测量的测量称为**动态测量**。动态测量必须考虑时间因素对测量结果的影响,即测量结果中一定包含有时间量。

(5) 根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量

接触式测量是指测量敏感元件与被测介质直接接触的测量;否则,称为**非接触式测量**。



交流与微思考

【问题】 根据这里介绍的测量方法的分类,分析历史上著名的“曹冲称象”的故事,可将其中涉及的测量问题归入什么类别?

1.4 检测系统的基本特性

检测系统所测量的物理量基本上有两种形式:**稳态(静态或准静态)**和**动态(周期变化或瞬态)**。前者的信号不随时间变化(或变化很缓慢);后者的信号是随时间变化而变化的。检测系统的基本特性分为静态特性和动态特性。值得指出的是,这里讨论的检测系统基本特性的分析方法同样适用于传感器等组成的检测系统的各个环节。

1.4.1 静态特性

静态特性是检测系统在稳态信号作用下的输入-输出关系。静态特性所描述的输入-输出关系式中不含时间变量。

衡量静态特性的主要指标包括线性度、灵敏度、分辨率、迟滞、重复性、测量范围与量程、漂移等。

1. 线性度

线性度是指检测系统的输出与输入间成线性关系的程度。检测系统的理想输入-输出特性应是线性的,因为这有助于简化检测系统的理论分析、数据处理、制作标定和测试;但检测系统的实际输入-输出特性大都具有一定程度的非线性,在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段(多数情况下是用最小二乘法来求出拟合直线),这就是非线性特性的“线性化”,如图 1.4 所示。

所采用的直线称为拟合直线,实际特性曲线与拟合直线间的偏差称为非线性误差,取其最大值与输出满刻度值(Full Scale,即满量程)之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.2)$$

式中 γ_L ——非线性误差(线性度指标);

ΔL_{max} ——最大非线性绝对误差；

Y_{FS} ——输出满量程。

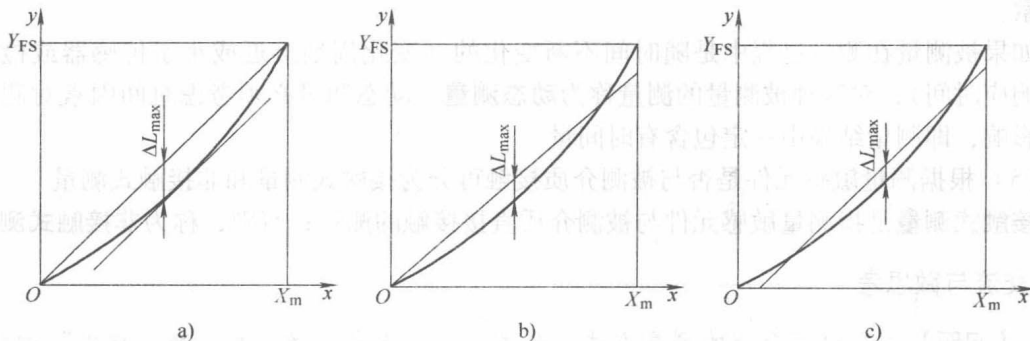


图 1.4 输出-输入特性的线性化

a) 切线或割线 b) 过零旋转 c) 端点平移

2. 灵敏度

灵敏度是检测系统在稳态下输出量变化对输入量变化的比值，用 S_n 来表示，即

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ 或 } S_n = \frac{dy}{dx} \tag{1.3}$$

对于线性检测系统，其灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率；非线性检测系统的灵敏度为一变量。很明显，曲线越陡峭，灵敏度越大；越平坦，则灵敏度越小。灵敏度的定义如图 1.5a、b 所示，分别对应线性测量系统和非线性测量系统；灵敏度的三种特征曲线如图 1.5c ~ e 所示。如果输入量和输出量有不同的量纲，则灵敏度也是有量纲的，例如输入量为温度（℃），输出量为标尺上的位移（格），则灵敏度的单位为“格/℃”；如果输入量和输出量是同类量，则此时的灵敏度实质上是一个放大倍数，它体现了检测系统对被测量的微小变化放大为显著变化的输出信号的能力，即检测系统对输入变量微小变化的敏感程度。

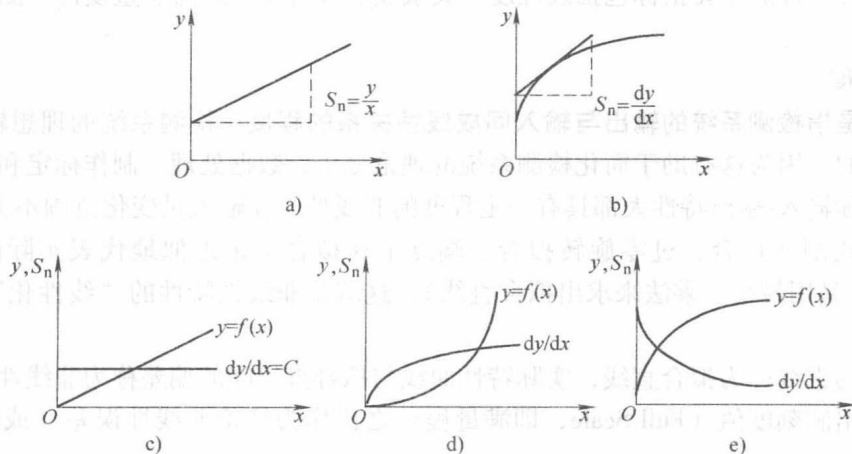


图 1.5 灵敏度定义及特例

a) 线性测量系统 b) 非线性测量系统 c) 灵敏度为常数
 d) 灵敏度随输入增加而增加 e) 灵敏度随输入增加而减小