



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Measurement Technology
and Applications

第二版

检测技术及应用

张朝晖 主编



中国质检出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

检测技术及应用

(第二版)

张朝晖 主 编

中国质检出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

检测技术及应用/张朝晖主编. —2 版. —北京: 中国质检出版社, 2011. 5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5026-3402-5

I. ①检… II. ①张… III. ①技术测量—高等学校—教材 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 010784 号

内 容 提 要

本书介绍了检测技术的基本概念, 评价指标, 十二大类传感器的工作原理, 四大类参数的测量方法, 检测仪表常用电路以及基础的检测信号处理方法。其中兼顾了较宽的传感器面, 较深入的参数测量过程, 体现了从方法、实现到评价的系统性。

本书可作为高等学校“测量技术”、“参数测量”等信息获取类课程的教材, 适于测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、物联网工程等专业的师生阅读; 如果忽略电路细节, 其他专业人员也可参考。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: 64275323 发行中心: 51780235

读者服务部: 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 19.75 字数 490 千字

2011 年 11 月第二版 2011 年 11 月第二次印刷

*

定价 45.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

第二版前言

本书自 2005 年出版第一版以来广受好评, 2006 年被评为北京高等教育精品教材。本书第二版入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书第二版在第一版基础上做了较大幅度的修改和完善, 特别是重新编写了参数检测部分, 减少了原来的应用技术部分, 去掉了软测量部分, 使本书更加聚焦于检测技术的核心内容。剥离部分建议另设课程单独介绍。

全书共分四篇:

第一篇简要介绍了检测技术的基本概念, 之后的评价指标不仅应为检测方案的设计者、检测仪器的使用者所首先关注, 而且也应成为新技术研究、新仪表开发的着眼点, 因为检测技术创新的目标就是为了提升这些指标。

第二篇较为全面地介绍了输出量为电阻、电感、电容、电势的传感器, 基于光电效应、电化学效应、吸附效应的传感器, 利用微波、声波、射线的传输、反射、吸收特性的传感器, 利用光纤传光特性的传感器, 以及基于微纳米加工技术的 MEMS 传感器等, 共计十二大类。

第三篇较为详细地介绍了温度、压力、流量、物位等四大类热工参数的测量方法, 特别是对近年来得到广泛应用的新型测量方法进行了深入剖析, 并兼顾了工程设计和应用的需求。

第四篇介绍了常见的检测仪表硬件电路和基础的信号处理方法。

本书适于作为高等学校信息获取类课程如“检测技术”、“参数测量”的教材, 预备课程是物理学和电子学。由于第三、四篇内容之间并无严格的递进关系, 所以也可以交叉选学部分章节。

书末配备了一些思考题, 可供学生讨论、练习用。

本书第 1、2、15、16、17 章和第 18 章由张朝晖编写, 第 3 章和第 5 章由史雪飞编写, 第 4、6 章和第 9 章由康瑞清编写, 第 7、8 章和第 11 章由蒋蔚和曹丽婷编写, 第 7 章第 8 节由赵小燕编写, 第 10、12 章和第 13 章由陈先中编写, 第 14 章和第 20 章由蓝金辉编写, 第 19 章由赵家贵编写。全书由北京科技大学张朝晖教授统稿。

由于编者水平有限, 书中一定存在不妥之处, 恳请读者指正。

编 者
2011 年 6 月

第一版前言

本书为高等学校测控技术及仪器专业、自动化专业的教学要求而编写，其主要内容如下：

第一章概述，介绍检测技术的概念、方法综述和检测系统构成；第二章检测技术的评价指标，主要介绍了功能指标、性能指标和物理指标；第三章传感器，针对电阻式、电感式、电容式、电势式、微波式、光电式、射线吸收式、声波式、光纤式、半导体式、电化学式和微机电系统（MEMS）等 12 大类传感器，分别介绍了它们的原理、构成和特性；第四章参数检测技术，介绍了热工量、机械量、电量、环境量等 10 大类参数的检测技术，属于传感器的基本应用；第五章软测量技术，介绍了动态设备的故障诊断、静态设备的无损检测及虚拟仪器，是传感器的综合应用；第六章应用技术，提炼出检测技术应用中的共性问题，介绍了信号获取方式、检测仪表选择、提高检测精确度的途径、调理电路、信号传输与通信及电磁兼容等内容。

本书可以作为“检测技术”、“参数测量”等两门相关课程的教材，便于前后衔接和相互查阅。

在本书编写过程中力图展现以下特点：

1. 检测技术的系统性。书中全面介绍了检测技术所涵盖的主要内容，同时重视突出其规律性和共性，使读者对检测技术有一个完整、系统的把握，对检测技术的创新和研发有一定的指导作用。

2. 加强和突出应用技术。学习检测技术的主要目的，除去研发外还在于应用。为此，在第二章中介绍了在实际应用中所关心的评价指标；在第四章中介绍了检测技术在参数测量中的应用；第五章介绍了检测技术在比较复杂场合的应用实例；第六章综合介绍了多种应用技术。

3. 反映检测技术的最新发展。检测技术既是信息领域的重要分支，也是一门多学科综合技术，近年来的发展非常迅速。为此，本书必须引入检测技术的最新发展。除介绍成熟的、传统的检测技术内容外，还增加了 MEMS 传感器、虚拟仪器、现场总线等较新内容。

本书由北京科技大学、北京化工大学、北京联合大学的教师承担编写工作。张朝晖教授为主编；陈先中博士、蒋蔚副教授、王建林教授为副主编。第一章、第三章第 1 节、第六章第 1、2、3、5 节由赵家贵教授编写；第二章和第五章第 1、2 节由张朝晖教授编写；第三章第 2、4 节由史雪飞讲师编写；第三章第 3、5、8 节由康瑞清副教授编写；第三章第 6、7、10 节和第六章第 6 节由蒋蔚副教授编写；第三章第 9、11、12 节和第四章第 6~11 节由陈先中博士编写；第三章第 13 节、第五章第 2 节、第六章第 4 节由蓝金辉博士编写；第四章第 1~3 节由王建林教授编写；第四章第 4、5 节由李永霞博士编写；第五章第 4 节由张东副教授编写。全书由赵家贵教授主审。

本书编写中参考了大量文献，在此对文献作者致以谢意！

由于编者水平有限，书中不妥、错漏之处在所难免，恳请读者指正。

编 者
2005 年 6 月

目 录

第一篇 引 言

第 1 章 基本概念	(1)
1.1 检测技术	(1)
1.2 检测技术的分类	(1)
1.3 检测技术的主要内容	(4)
第 2 章 技术评价	(6)
2.1 指标	(6)
2.2 功能指标	(6)
2.3 性能指标	(8)
2.4 物理指标	(14)

第二篇 传感器

第 3 章 电阻式传感器	(15)
3.1 应变式电阻传感器	(15)
3.2 热电阻传感器	(25)
第 4 章 电感式传感器	(32)
4.1 自感式传感器	(32)
4.2 线性可调差动变压器	(37)
4.3 电涡流传感器	(41)
第 5 章 电容式传感器	(46)
5.1 工作原理及类型	(46)
5.2 灵敏度及非线性分析	(48)
5.3 传感器特点	(50)
5.4 转换电路	(51)
第 6 章 电势式传感器	(55)
6.1 压电传感器	(55)
6.2 霍尔传感器	(62)
6.3 热电传感器	(70)

第 7 章 微波传感器	(79)
7.1 微波的有关概念	(79)
7.2 微波的特性	(80)
7.3 微波器件	(80)
7.4 微波半导体器件	(81)
7.5 微波传感器	(82)
7.6 微波多普勒测速雷达	(83)
7.7 煤中含水量的微波测量	(85)
7.8 射频识别技术	(87)
第 8 章 光电式传感器	(91)
8.1 光谱	(91)
8.2 光电效应	(92)
8.3 光电电阻	(94)
8.4 光电池	(102)
8.5 光电二极管和光电三极管	(106)
8.6 光电式传感器的应用	(114)
8.7 电荷耦合器件	(116)
8.8 光电位置敏感器件	(121)
第 9 章 核辐射式传感器	(123)
9.1 射线的性质	(123)
9.2 核辐射传感器	(125)
9.3 辐射的防护	(129)
第 10 章 声波式传感器	(130)
10.1 超声波传感器	(130)
10.2 声表面波传感器	(138)
第 11 章 光纤传感器	(140)
11.1 光纤的结构及传光原理	(140)
11.2 光纤调制技术与光纤 传感器	(148)
11.3 光纤连接耦合技术	(161)

第 12 章 半导体传感器 (165)

12.1 半导体气敏传感器 (165)

12.2 半导体湿敏传感器 (169)

第 13 章 电化学气体传感器 (173)

13.1 主要特性 (173)

13.2 工作原理及类型 (174)

第 14 章 MEMS 传感器 (177)

14.1 压阻式加速度计 (177)

14.2 电容式加速度计 (178)

14.3 静电力平衡式加速度计 (178)

14.4 石英振梁式加速度计 (179)

14.5 石英音叉振动陀螺仪 (180)

14.6 硅双框架式振动陀螺仪 (180)

14.7 硅梳状驱动振动陀螺仪 (181)

第三篇 参数测量

第 15 章 温度测量 (183)

15.1 概述 (183)

15.2 复合材料测温 (185)

15.3 金属热电阻 (187)

15.4 半导体热敏电阻 (189)

15.5 热电偶 (190)

15.6 辐射测温 (197)

附表 常见热电阻、热电偶分度表 ... (207)

第 16 章 压力测量 (210)

16.1 概述 (210)

16.2 重力式压力测量 (215)

16.3 弹性式压力测量 (216)

16.4 硅压力传感器 (222)

16.5 压电式压力计 (223)

第 17 章 流量测量 (225)

17.1 概述 (225)

17.2 节流式流量测量 (225)

17.3 转子流量计 (233)

17.4 靶式流量计 (236)

17.5 涡轮流量计 (237)

17.6 涡街流量计 (240)

17.7 电磁流量计 (241)

17.8 超声波流量计 (242)

17.9 容积式流量计 (246)

17.10 科里奥利质量流量计 (248)

17.11 标准体积管流量测量系统 ... (252)

第 18 章 物位测量 (254)

18.1 概述 (254)

18.2 浮力式液位计 (255)

18.3 静压式液位计 (257)

18.4 电容和射频导纳式液位计 ... (259)

18.5 回波式物位测量 (263)

18.6 核物位计 (271)

18.7 锅炉汽包水位测量 (272)

第四篇 相关问题

第 19 章 基本考虑 (274)

19.1 被测参数的选择 (274)

19.2 采样点的选择 (274)

19.3 传感器的选择 (275)

19.4 检测信号的处理 (276)

第 20 章 信号调理电路 (285)

20.1 测量电桥与转换电路 (285)

20.2 调制与解调 (290)

20.3 电压/电流/频率变换 (292)

20.4 电压和电流信号放大 (294)

20.5 MEMS 传感器信号调理 ... (297)

思考题 (301)

索引 (306)

参考文献 (308)

第一篇 引言

第 1 章 基本概念

1.1 检测技术

当今时代是信息化时代。拨通手机，可以听到大洋彼岸朋友的问候；打开电脑，能够浏览国家图书馆最古老的书籍，甚至轻松搜索出某个偏僻的典故，而这在以往任何时代都是不可能做到的。毋庸置疑，这受益于有线或无线的网络传输技术，受益于计算机处理技术，还有更重要的就是检测技术。正是检测技术，将语音拾取起来转变成能够在网络上传送的电信号，将书籍上的图文扫描成光图像信号供人们共享。检测技术、计算机处理技术、通信技术、控制技术，构成了从物质世界到信息世界，又从信息世界反馈于物质世界的大闭环。

检测技术就是将物质世界中人们感兴趣的信息转变成易于处理的信号，然后经过与单位量的比较实现信号的量化的技术。检测技术具有三个特点：首先，物质世界本身包含着丰富的信息（按照信息论的说法，信息就是随机不确定性的下降），例如，你朋友的语音、图像、体温、体重，这些都是变化的、未知的，因此你才感兴趣，但是限于条件，在手机里你只关注他的语音，这就是检测技术、信息转换的针对性。其次，检测过程会涉及一系列的信号转换，例如，声波转换为驻极体麦克风的薄膜振动，再以电容的形式转换成电压信号。应该看到，这种信号转换是有目的、有倾向性的，即总是将不容易处理、不容易比较的信号转化成容易处理、容易比较的信号。本例中就是把声信号转换成电信号，而不是像扬声器那样的反向转换。最后，要对这种易于处理的信号进行量化，得出大小量值，或者是量化成二进制量 0、1，从而在媒介中传递。

在工业上，检测技术应用的例子更是常见。在一台燃烧的加热炉中会有温度、火焰光度、炉膛成分、炉膛压力等多个参数在变化，采用检测技术，选择测量某个部位的温度，并把它转换成温度计指针的偏转角度，或者转换成在液晶显示器上显示的数码，甚至是适合于远传的光纤信号。

1.2 检测技术的分类

鉴于物质的多样性、信息的多样性、转换后信号的多样性，相应检测技术的内容和方法是极其丰富的。例如，信息的种类可以是热、力、声、光、电、磁等；即使同为电信息，能

源输送中的高压电、通信调制后的高频电、溶液中的化学电势、生物体中的肌电等，其转换技术也肯定不会相同。这些检测问题本身往往也是物理、化学、生理科学及工程科学的重要组成部分。我们将其集中在“检测技术及应用”这样一本书里介绍，目的是概括其共性和基础，而特定领域的具体检测过程必然涉及该领域的专门知识。这些专门领域知识与检测技术知识是相辅相承的。

1.2.1 按检测量分类

下面列出一些常见的检测量：

- (1) 机械量：静态的长度、直径、角度和动态的位移、速度、加速度；
- (2) 热工量：温度、压力、流量、物位；
- (3) 电学量：电流、电压、功率、功率因数、场强等变量和电阻、电容、电感、特征阻抗、电容率等性质常量；
- (4) 磁学量：磁场强度、磁导率；
- (5) 光学量：发光强度、色调、光谱；
- (6) 声学量：响度、噪声功率；
- (7) 成分和物性量：浓度、湿度、密度、粘度、硬度；
- (8) 生物量：酶含量、细胞浓度等。

不同检测量的检测方法、检测仪器都是各不相同的。尽管如此，必须有一套标准的单位，从而将检测结果标准化。在国际计量大会 CGPM (Conférence générale des poids et mesures) 规定的国际单位制 SI (Système international d'unités) 中，将长度、质量、时间、电流、温度、物质的量、发光强度等 7 个量作为基本量，将平面角、球面角作为补充量，并定义了这些基本量的单位。其他各检测量的单位均由此导出，从而厘清了各单位之间的关系，实现了检测结果的标准化。

基本量的单位尽可能基于特定的基本物理性质来定义，以方便在不同实验室内复现。但限于目前物理科学发展的水平，仍有部分单位以人为的“原型”给出。目前基本量单位的定义如下：

- (1) 长度单位：1 米 = 真空中 1 秒光程 / 299792458；
- (2) 质量单位：1 千克 = 铂铱合金原型 IPK (International Prototype Kilogram) 的质量；
- (3) 时间单位：1 秒 = Cs^{133} 原子基态的两个超细能阶间跃迁所对应辐射的 9192631770 个周期的持续时间；
- (4) 电流单位：1 安培 = 真空中两根相距 1 米、长度无限、截面积可忽略的平行圆导体，通入恒定电流后在每米长度上产生 2×10^{-7} 牛顿力所需要的电流，这仅是一个理论上的定义；
- (5) 温度单位：1 开尔文 = 水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ ；
- (6) 物质的量：1 摩尔 = 0.012 千克同位素 C^{12} 所含的原子数目 (大约 6.022×10^{23})；
- (7) 发光强度：1 坎德拉 = 频率为 540.0154×10^{12} Hz 的单色辐射光源在某给定方向上的发光强度的 $1/683 \text{ W/sr}$ (sr 是立体角单位)。

可以看到，目前千克、摩尔、安培、坎德拉的定义并非是完全独立的，未来有改进的可能。

1.2.2 按检测量随时间变化的快慢分类

(1) 静态检测

对于恒定（但未知）或随时间缓慢变化的检测量，在常规检测仪器的采样周期内变化极微，处于误差允许范围之内，此时我们特别关注检测的准确度，而不太关注检测的速度，甚至会依靠长期观测、以牺牲速度换取更高的准确度，这种检测称为静态检测。

例如，用体温计测量体温，时间长些测量结果就会更准确，这就是静态测量。当然，过长时间的测量也是没有意义的。

(2) 动态检测

对于随时间快速变化的检测量，往往会要求测出其每一短暂时段内的值，从而了解其变化趋势、相位移动、幅度衰减等动态特征。此时我们更加关注检测仪器的快速响应能力，这种检测称为动态检测。

例如，一段语音的检测，若需要了解它的语义，就要动态地检测出音调的变化。当然，将语音看成噪声，若只需要测定它在一段时间内的平均分贝数，则采用静态测量更恰当。

1.2.3 按检测仪器与物质的接触情况分类

(1) 接触式检测

在检测过程中，如果检测仪器或其一部分必须与被检测物质直接相接触，则这种检测称为接触式检测。接触式检测受到的外界干扰往往较少，结果可靠；缺点是仪器自身也可能成为原信息的干扰源。

仍以体温计为例，它靠与身体的直接接触达到热平衡，将体温信息传递出来，这就是接触式检测。但若用这只温度计测量一个液滴的温度，则液滴的温度立即受到扰动而使测量失去意义。

(2) 非接触式检测

被测物体不与检测仪器直接接触，而是依靠调制载有信息的波或场，如声波、磁场、射线，从而由波或场传递出信息，这称为非接触式检测。这种波、场可以是由仪器专门施加的，也可能是从物质自身发出的。非接触式检测往往用于条件恶劣、无法直接接触的场合，或者仪器接触会破坏原有信息的场合，其缺点是在波、场传递过程中容易受到干扰。

例如，上述液滴的温度可以从其辐射的红外线波长分析出来，但液滴形状、大气吸收等都会干扰测量的结果，精确度往往较低。

1.2.4 按检测量是否需要外部激励分类

(1) 主动式检测

在检测某些表示物性的、恒定的未知量时，需要施加一定的激励才会得到期望的信号。例如，在测量电阻时，检测仪器应提供直流恒流源；测量阻抗时应提供交变电流源，之后才可以得到反映电阻、阻抗的电压信号。又如，利用光吸收来测量溶液的浓度时，检测仪器应提供入射光。这类检测可以称为主动式检测。

(2) 被动式检测

大部分变化的检测量都具有一定的能量，该能量即使作用在无源检测器件上也能够激发出一定的效应，这种检测就属于被动式检测。例如，利用化学电池测量溶液的浓度，浓度差会诱导出电势差，利用电势差就可以测量出浓度，这就是被动式检测。此后，尽管微弱的电势差被多级有源放大器放大了，但仍属于被动式检测。

1.2.5 按最终转换后的信号类型分类

如果检测的目的是给人们提供就地观察,一般应转换成角度等几何量。但如果检测的目的是为了送入电子系统进行处理,这就需要进行进一步转换成电量,因此这种检测又称为电测技术。

1.3 检测技术的主要内容

检测技术的内容可以概括为以下几个方面:

1.3.1 检测方案

检测方案是指测量某个参数或状态所依据的物理、化学或生物机理。鉴于被测对象、测量范围等具体情况,需要选择最适合的检测方案,才能获得最佳检测结果。

事实上,一旦确定了检测方案,在相当程度上也就决定了检测的性能指标。例如,基于科里奥利力的流量计,必定是测量质量流量而非体积流量的,因此在测量气体流量时不易受温度、压力的干扰,能够达到高的精确度;而基于流体力学中柏努利方程的流量测量,必定是与流动状态有关的,这意味着在小流量下将无法得到准确的结果。

为了制定一个好的检测方案,必须深入理解检测对象的专门知识。例如要检测带钢在轧制过程中的应力分布,就必须了解带钢的应变特征以及轧下、卷取的力学过程;为了利用光谱法检测物质的化学成分,就需要了解物质的晶体结构、微观能级分布等。

在本书第三篇中将介绍检测热工量的各种方案。

1.3.2 传感器

传感器是实现检测方案的硬件核心。作为检测仪器中的首个转换器件,要具备与被测物质匹配、适应被测环境、重复稳定性好、灵敏度高、无干扰或虽有干扰但干扰可控等优良性能。传感器的工作原理一般都基于特定材料的特定物理效应,并针对具体应用进行恰当的结构设计。

上述特定材料被称为功能材料,以区别于结构材料、建筑材料等。功能材料的结构非常稳定,主要形态是微观结构规则的晶体,包括金属晶体、半导体晶体等,从而保证了传感器具有高度的稳定性、一致性。功能材料受到被测量的作用后,表现为另外一个量的变化,因此这种物理效应实施了物理量的首次转化。随着新功能材料不断开发出来,新的物理效应不断被发现,新的传感器也将不断涌现,各项指标也将不断提升。物理效应和功能材料往往是物理学、材料科学的研究内容。

针对功能材料的物理效应,还要精心设计传感器的结构尺寸,选择物理量的作用方向,才能够获得最大灵敏度,并在最大程度上减少干扰,这是研发传感器所要关注的重点。以图1-1(a)所示的压电晶体为例,其晶格结构具有明显的方向性,只有在 x 或 y 方向上施加压力(或拉力),见图(b)和图(c),才能激发出电荷信号;而在垂直于纸面的方向施力,就不会激发出电荷信号。因此必须对压电材料沿着恰当方向切片,并在恰当的方向上引出电极,才能做成一只传感器。

在本书第二篇中我们将介绍十二大类传感器,这囊括了现有传感器的大部分种类。

1.3.3 调理电路

调理电路是配合传感器工作并对传感器输出信号继续实施转换的电路。它一般由模拟电路构成,是检测仪器的重要组成部分,因此也是实现检测方案的重要硬件支撑。

第一,调理电路要为传感器提供最佳的工作条件,避免工作条件不确定所带来的原始干

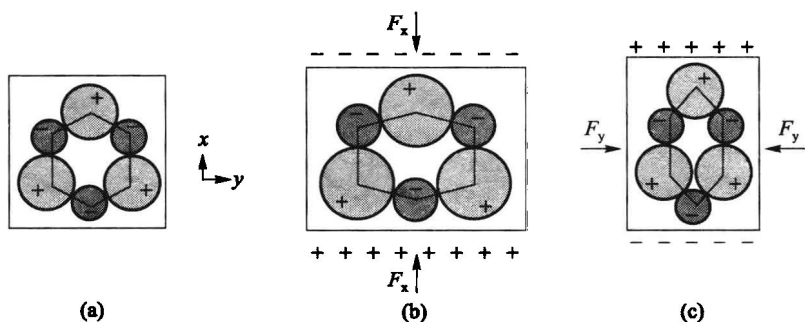


图 1-1 石英晶体的压电传感示意图

扰。很多传感器的物理效应需要特定的激励，例如，霍尔元件将磁场强度线性地转换成电势的前提是由外部提供恒流；应变片电桥将应变变量线性地转换成电势的前提是稳定的电桥电源电压。调理电路就是要提供这种高质量的激励条件。

第二，传感器与后续电路之间的阻抗匹配是由调理电路完成的。例如，电势式传感器总要求后续电路具备很高的输入阻抗，特别是高阻抗的电势传感器对后续电路阻抗的要求更高，此时的调理电路应具备阻抗变换的作用，通常采以反馈放大器将高输入阻抗转换成低输出阻抗。

第三，调理电路将形形色色传感器的输出量统一成电压量。例如，电感式位移传感器的输出是电感量，涡轮流量计中涡轮切割磁力线后的信号是磁感应强度，这都要由调理电路转换成模拟电压或电压脉冲，因为电压是最容易被后续电路接收的一种信号形式。

第四，传感器的输出信号往往是微弱的，因此需要在调理电路中进行放大，一般达到伏特级后才适合 A/D 转换并进入数字处理电路。

第五，调理电路还会对信号进行必要的预处理，如滤波、线性化等，以便提高信号的质量，降低后续处理单元的负荷。

可见，在检测仪器中，调理电路是传感器和数字处理电路之间的桥梁，这部分模拟电路往往是检测仪器开发的难点，也是保证检测仪器性能指标的关键。这部分内容将在第四篇中介绍。

此外，检测仪器的数字电路部分将实现信号的数字处理、赋予智能化功能，提供人机接口、数据通信等，它们是实现检测方案的软件支撑，也是检测技术、检测仪器的主要内容，将在其他专门课程中介绍。

检测技术中各部分内容的联系见图 1-2。

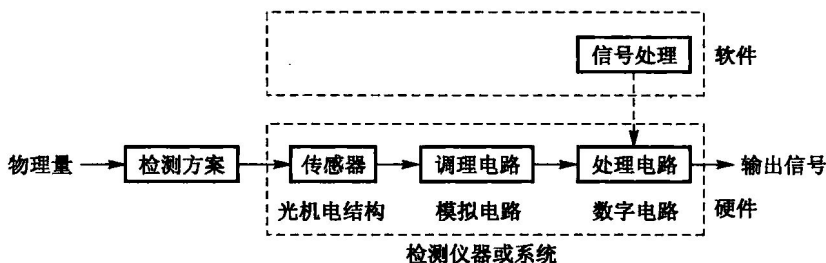


图 1-2 检测技术中各部分内容的联系

第2章 技术评价

2.1 指标

检测技术的外在表现是以指标 (Specification) 来描述的。通过指标对比,可以客观地评价某项检测方案或某台检测仪器的先进程度,而不是笼统地评论好与差;依托新原理、新材料、新器件、新工艺,实现检测技术的创新研发,也应该以提升指标为目的,否则就是没有意义的“哗众取宠的创新”;检测技术的应用,更离不开对仪器指标的仔细、综合筛选,从而在具体场合得到检测仪器的最佳配置,发挥最佳功效,这个过程就是检测工程设计。

指标不可能描述检测方案、检测仪器的所有性质,而只能简明扼要地描述其典型性质。技术、经济、环境方面的性质往往是我们所关注的,因此也就有了技术、经济、环境等三大类指标。

技术指标比较狭义,属于技术层面,具体包括功能指标、性能指标和物理指标三类;经济指标包括成本、价格、维护费等(常说的“性能/价格比”,实际是兼顾了技术指标和经济指标的综合指标);环境指标指检测方案、仪器使用过程中的环境代价,例如,是否会产生强电磁辐射、是否对电网回馈噪声、是否易导致人身伤害等。近年来,随着对环境保护的日益重视,政府制定了与环境协调发展的产业政策,从政策上鼓励研发高环境指标的检测方案及仪器,前景看好。

下面侧重介绍功能指标、性能指标和物理指标这三种技术指标。

2.2 功能指标

功能指标 (Functional Specification) 用于表明某检测方案、检测仪器所能够完成的功能,一般包括适用的工艺介质、被测量、被测量变化范围、输出信号类型等。功能指标在所有指标中是最基础的,是检测工程设计时首先要考虑的。

下面以压力测量仪器为例,说明功能指标。

(1) 工艺介质 (Process Media): 水、汽油。

这意味着本仪器可能不适于酸、碱等腐蚀性溶液,也不适于原油、食物油等高粘度易堵塞的液体。

(2) 测量范围 (Range): 100~1000kPa。

这表明所能测量的最小压力为 100kPa,最大压力为 1000kPa。若用于测量超出范围的压力,则无法保证精度等性能指标(见下节),甚至造成仪器的永久损坏。

测量范围的下限称为零点 (Zero)。为使用方便,该零点是可以人为调整的,甚至可调整到远离零的数值上(本例为 100kPa),此时的零点调整过程又称为“迁移”。

测量范围的上限与下限之差称为量程 (Span)。本例中量程是 900kPa。一般来说量程也

是可以人为调整的。

可见，测量范围的上限、下限都是可以调整的，以适合不同的测量场合。标注测量范围时，往往给出最小测量范围和最大测量范围，如标注为“0~500kPa 到 0~5000kPa”。

(3) 输出信号 (Output): 模拟 4~20mA。

这表明在压力为 100kPa 时仪器输出电流 4mA；在压力为 1000kPa 时输出电流 20mA；对于中间压力 P (单位 kPa)，相应线性地输出电流

$$I = 16 \times (P - 100) / (1000 - 100) + 4 (\text{mA}) \quad (2-1)$$

一般希望仪器的输入、输出之间具有线性关系。若为非线性或者是近似线性关系，应该在指标中声明 (见下节“线性度”)。

注意，仪器的输出信号模式是由行业协议、国家标准甚至国际标准所规定的，以便于不同厂家制造的仪器之间的互联。常用的输出信号模式有下面几种：

① 模拟电流 0~10mA 模式

这种模式在热工量、电量、机械量测量仪器中经常采用。若上述压力测量仪器采用这种模式，则输入、输出关系表示为

$$I = 10 \times (P - 100) / (1000 - 100) (\text{mA}) \quad (2-2)$$

② 模拟电流 4~20mA 模式

这是目前最广泛采用的一种输出模式。若某台仪器掉电，则输出电流必然降落到 0mA。这在 4~20mA 模式的仪器中很容易识别故障。但对采用 0~10mA 模式的仪器来说，也会误认为压力降低到了 100kPa。因此 4~20mA 模式比 0~10mA 模式更容易识别电源故障。

上述两种模式都采用电流而非电压来传递，这是因为在长距离传输时导线的电阻不会带来附加误差。这类仪器的输出级电路都是恒流源，或者说是受被测量控制的恒流源。当这类信号被传递到其它仪器时，考虑到后续仪器的输入级多为电压接收电路，应该利用“标准电阻” (一种高精度、低温度系数、具有较大功率的电阻) 进行电流电压的转换。

若信号传输距离不远 (如 1m 以内)，也可以采用 0~5V 或 1~5V 电压输出模式。这类仪器的输出级电路都是恒压源，或者说是受被测量控制的恒压源。其优点是不同仪器之间可以直接连接，而省去“标准电阻”。当然，具体连接时还必须考虑阻抗匹配、电平兼容等详细指标。

③ 总线传输模式

将模数转换 A/D、网络通信技术用于检测仪器的信号传输，就是所谓的总线化传输模式。其显著优点是数字信号抗干扰能力强，数据传输量大 (如可附带传输自检状态等)，双向传输 (如远地调零和调量程)，节省线缆数量，线路施工及日常维护量少。目前多个国际组织已经制定了多种总线协议，分别应用在不同领域里，例如，流程工业中普遍采用的 FF 总线，制造业采用的 ProfiBus 总线，汽车及船舶业的 CAN 总线，以及楼宇自动化的 Long-works 总线等。

④ HART 传输模式

HART (Highway Addressable Remote Transducer) 传输模式是在 4~20mA 模拟信号之上调制出小幅度的数字信号，以增大信息传输量。HART 传输模式曾经是从模拟电流模式到数字总线模式的过渡，现在已较少采用。

2.3 性能指标

性能指标 (Performance Specification) 以量化的形式来衡量仪器的功能。例如, 检测仪器的主要功能是实现特定的输入输出关系, 即被测量与输出信号之间的特定关系。而针对仪器的这一功能, 就有灵敏度、稳定性、重复性、线性、精度等多个性能指标来描述。

2.3.1 描述输入输出关系的性能指标

前一节曾经提到压力测量仪器的输入输出关系式 (2-1) 或 (2-2)。但是, 在检测方案及检测仪器的任何一个环节中都会存在很多影响因素, 实际的关系式是很复杂的。不妨将仪器输出 y 与输入 (被测量) x 之间的关系表示为三项之和, 即

$$y = w(x, t) + n_1 + n_2 \quad (2-3)$$

尽管有些噪声如调制噪声、增益噪声必须表示为乘积项, 但这种加性噪声的表示在大多场合下是恰当的。

式中, 第一项 $w(x, t)$ 的具体形式取决于仪器的结构原理, 是确定的函数关系, 被认为是输出中的信号部分, 即

$$s = w(x, t) \quad (2-4)$$

若仪器结构中含有动态元件, 如电感、电容、气容, 则该函数还以时间 t 为自变量; 若含有非线性因素, 如二极管、传动间隙、静摩擦力, 则该函数还会与被测量的变化方向 (即 dx/dt 的正负号) 有关。

第二项 n_1 是由可以预见的环境因素决定的, 例如, 工作温度变化会造成输出漂移。有些环境因素是可以人为控制的, 例如, 用空调恒定环境温度, 用风扇的启停调节芯片温度; 有些环境因素虽不能控但可测, 则可以利用补偿措施, 将 n_1 减到足够小。

第三项 n_2 囊括了大量不可控、不可测因素的影响, 被认为是输出中的随机噪声。随机噪声服从统计规律。如果随机噪声主要是电阻上的热噪声, 则它的功率谱是定值 (又称为白噪声), 幅度服从正态分布, 且正比于温度、阻值和带宽乘积的方根; 如果随机噪声来自 PN 结或其他不同材料之间的接触噪声, 其幅度也服从正态分布, 但功率谱是 $1/f$ 函数。此外, 还有散粒噪声、接触噪声等。经常以方差来描述随机噪声的强弱。

检测仪器的输入输出关系可以从静态和动态两个角度来衡量。在输入信号不变或慢变的场合, 可以不考虑式 (2-3) 中的时间变量 (认为 $t \rightarrow \infty$), 这种以代数式表达的静态关系见图 2-1。如果检测技术用于动态测试, 则会更关心以微分方程、传递函数、脉冲响应等表达的动态关系。

理想的、基于线性检测原理的信号 $w(x)$, 具有直线 $s \sim x$ 关系, 见图 2-1 中的直线 s_0 , 而实际信号 $w(x)$ 的 $s \sim x$ 关系见图中标注为 s 的两条曲线。造成这种差异的原因有两方面, 后面将分别用线性度和变差来描述。随机噪声体现为波动量 n_2 。

(1) 线性度 (Linearity)

线性度是表达输出信号 s 与输入 x 之间背离线性关系的程度。在检测仪器开发中, 往往希望将输出信号 $w(x, t)$ 设计成输入 x 的线性函数, 但实际的光机电仪器不可能是严格的输入输出线性关系。实际关系与线性关系的差异见图 2-1 中的 Δ_1 。定义线性度

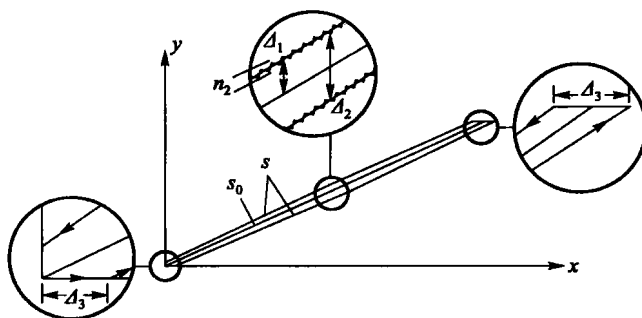


图 2-1 检测仪器的静态输入输出关系

$$\alpha = \Delta_1 / SPAN \times 100\% \quad (2-5)$$

来衡量这个差异。式中， $SPAN$ 为输出范围。

对于轻微非线性关系的检测仪器，也可以用线性度来描述。但是对于测量原理属于明显非线性的情况，例如孔板流量计中，输入量压差与流量指示之间呈方根关系，则不提线性度。

(2) 灵敏度和灵敏阈 (Resolution)

输出输入之间的系数关系称为灵敏度

$$k = dw/dx \quad (2-6)$$

一般来说，灵敏度 k 是有单位的量。例如，某压力检测仪器的灵敏度是 2.4mA/kPa ；某测温电桥的灵敏度是 $0.12\text{mV/V/}^\circ\text{C}$ 等，表明在电桥电源为 5V 的前提下，温度每变化 1°C 会产生 0.60mV 的输出变化。若输入输出的单位相同，灵敏度也称为增益并以分贝数表示。

仪器必须具有足够的灵敏度，以便准确测量微小的变化。但灵敏度过高，因输出信号受到上限的限制，所以量程必然会减小，此外还可能导致输出输入关系的不稳定。

一般地，总是希望灵敏度在整个测量范围内是常数，以便于读数，所以在检测仪器制作中尽可能将 $w(x, t)$ 设计成 x 的线性函数。对于测量原理呈非线性的情况，必须指明是在某个输入点的灵敏度，而且在可能出现极大、极小灵敏度的区域必须做相应的数据处理。仍以孔板流量计为例，在小流量（最大流量的 9% 以下）处灵敏度过高，此时应切换为线性运算。

由于仪器结构的各个环节可能会存在死区，例如，传递角位移的齿轮之间的啮合间隙，力传递机构中的静摩擦力等，并非任何微小的输入量变化都能够引起输出量的变化。只有当输入量的变化大于某个限值以后，才会引起输出量的变化。这个限值就称为仪器的灵敏阈，其单位与输入量的单位相同，它衡量了仪器的分辨能力。

(3) 变差 (Hysteresis)

当输入量从一个稳定值开始变化时，仪器内部结构环节中的死区会导致显著的灵敏阈。而当输入量不断地变化（同向或反向）时，死区的影响与变化率 dx/dt 的正负号（ x 升或降）有关，这使得输出与输入的变化步调不一致，见图 2-1 中的 Δ_2 和 Δ_3 。这个现象可以用变差 $\Delta_2 / SPAN \times 100\%$ 或 $\Delta_3 / Span \times 100\%$ 来衡量，其中 $SPAN$ 和 $Span$ 分别是输出范围和输入范围。

(4) 精确度 (Accuracy)

精确度用于表示被测量与真值之间的差异。

精确度只考虑式 (2-3) 中时间 t 趋于无限长后的输入输出关系, 是一种静态指标。假设此时输入输出关系表达为

$$y = w(x) + n_1 + n_2 \quad (2-7)$$

则必认为被测量

$$x = w^{-1}(y - n_1 - n_2) \quad (2-8)$$

这个测量结果显然与真实值 $x_0 = w^{-1}(y)$ 不同, 即存在测量误差

$$e = x - x_0 \quad (2-9)$$

从式 (2-3) 看, 测量结果不同于真值的原因来自两种噪声 n_1 和 n_2 。来自因素 n_1 的误差属于系统误差。此外, 零点或量程调校不准、各种漂移、原理不完善 (如电压表内阻不够高)、安装与要求不一致等, 也会导致系统误差。系统误差的特点是呈现确定性或依赖性规律 (例如总是偏正、偏负、随读数变、随时间变、随温度压力工况变)。通过试验或对测量数据进行阿贝准则检验 (周期性), 就能够发现系统误差的存在, 并可以通过定期调校、温度压力补偿等途径来消除。

来源于随机噪声 n_2 的误差称为随机误差。不可测环境、机电机构中的不确定性等众多因素都会导致随机误差。随机误差服从统计规律。由大量、独立、作用均匀 (都很微小) 的因素产生的误差, 按照“中心极限定理”将服从正态分布; 如果随机误差主要来自低精度 A/D 转换器的量化过程, 则它可能服从 (0, 1) 之间的均匀分布。类似于用方差 σ^2 表示随机噪声的强弱, 我们采用标准差 σ 表示随机误差的大小。如果一个固定的被测量允许被多次测量, 则可以通过数据处理来减小标准差; 如果只有一次测量结果, 我们至少应该知道误差的概率分布情况。

下面针对随机误差对测量结果的影响, 介绍精确度的几种表达方式:

① 最大允许误差 $\Delta_{\max}$

对于正态分布的随机误差而言, 因为测量结果 x 落在真值附近 $\pm 3\sigma$ 区间 ($x_0 - 3\sigma$, $x_0 + 3\sigma$) 的置信度达到了 99.7%, 所以认为 3σ 就是最大允许误差。或者说, 在对一个固定被测量的多次测量结果中, 选取最大的误差作为最大允许误差 $\Delta_{\max}$, 且认为 $\sigma = \Delta_{\max}/3$ 。

需要说明的是, 在标定一台仪器的最大允许误差时, 真值 x_0 往往都是未知的。可以选用最大允许误差比标称值小 3 倍的测量仪器作为标准仪器, 然后以标准仪器的读数 x'_0 作为真值, 不会影响置信度。

② 相对误差

很多类型的检测仪器, 其精确度若以最大允许误差来衡量并不恰当。例如, 体温表与高温计的最大允许误差都是 1°C , 此时的高温计已经属于很高精确等级了, 而体温表就显得太粗糙。为了衡量这类仪器的精确度, 定义相对误差

$$\delta = \Delta_{\max} / x'_0 \times 100\% \quad (2-10)$$

标准器具及测温仪器经常采用相对误差作性能指标, 如某热电偶的精确度标注为 $\pm 0.4\% t \text{ } ^\circ\text{C}$ 。