



教育部高等职业教育示范专业规划教材

生产过程自动化技术专业

# 检测技术及仪表

JIAN CE JI SHU JI YI BIAO

林锦实 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



随教学参考系列

教育部高等职业教育示范专业规划教材  
(生产过程自动化技术专业)

# 检测技术及仪表

主 编 林锦实  
副主编 宋艳丽 李忠明 祝洪宇  
参 编 荆 珂 闫 兵 林春丽  
主 审 李新光



机械工业出版社

本书共分6章,首先介绍了检测技术及测量仪表的一些基本概念、各种性能指标,测量误差的基本理论,测量准确度的评定与表示方法;然后按照测量参数的不同划分成5章,分别介绍了测量温度、压力、流量、物位和机械量的各种传感器和变送器的原理结构和应用。

本书简化了公式推导,讲解深入浅出,图文并茂,简明实用,附有相关的思考题和习题,便于教学和自学,可作为高等职业技术教育生产过程自动化技术专业、仪器仪表专业、工业自动化专业和机电一体化专业的教学用书,也可供大中专院校教师及相关技术人员参考。

为方便教学,本书配备电子课件和相关实习实训资料等教学资源。凡选用本书作为授课教材的教师均可登录机械工业出版社教材服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费下载。如有问题请致信 [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com),或致电 010-88379375 联系营销人员。

## 图书在版编目(CIP)数据

检测技术及仪表/林锦实主编. —北京:机械工业出版社,2008.8

教育部高等职业教育示范·生产过程自动化技术专业

ISBN 978-7-111-24234-5

I. 检… II. 林… III. ①自动检测-高等学校:技术学校-教材②检测仪表-高等学校:技术学校-教材 IV. TP274 TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第108962号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:曲世海 版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:鞠杨 责任印制:邓博

北京四季青印刷厂印刷(三河市杨庄镇环伟装订厂装订)

2008年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13印张·320千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24234-5

定价:21.00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)88379758

封面防伪标均为盗版

# 前 言

《检测技术及仪表》是教育部高等职业教育示范专业规划教材。根据高等职业技术教育培养目标的要求，本书力图使学生在学完本课程后能够系统地掌握现代检测技术的基本理论和应用，为将来从事科研和工业领域的技术工作奠定坚实的基础。

本书根据该课程涉及的学科面广、实践性强、内容分散、缺乏系统性和连续性的特点，避免了繁琐的理论推导，深入浅出地分析了各种测量技术和仪表的原理和特点，注意同参数、不同测量仪表间的相互比较，增强了实际应用方面的知识。本书尽可能地反映了国内外检测技术领域的新成果、新进展，充分体现了高等职业技术教育培养应用性人才的宗旨，有利于培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书共分6章，第1章主要介绍了测量的基本概念、测量仪表的性能指标、误差的分类方法和处理方法；第2章主要介绍了接触式、非接触式温度计和温度变送器的原理和使用方法；第3章介绍了压力和差压的测量方法和典型的差压变送器；第4章介绍了节流式流量计等10余种实用流量计的原理和使用方法，介绍了流量校验的方法；第5章介绍了物位的测量方法；第6章介绍了位移、转速、重量和厚度等机械量的测量方法。在附录中给出了标准化热电偶和热电阻的分度表。

本书可作为高等职业技术教育生产过程自动化技术专业、仪器仪表专业、工业自动化专业和机电一体化专业的教学用书，亦可供大中专院校教师及相关技术人员参考。本书参考学时约为78学时，各校可根据各自的专业方向选讲有关的工程实例，以减少相应的学时。

全书由林锦实统稿。第1章由辽宁石化职业技术学院的李忠明编写；第2章和附录由辽宁机电职业技术学院的林锦实编写；第3章由辽宁机电职业技术学院的宋艳丽编写；第4章由辽宁石油化工大学职业技术学院的荆珂、闫兵编写；第5章的5.1~5.5、5.7、5.8节和第6章由辽宁科技大学高等职业技术学院的祝洪宇编写；第5章的5.6节由辽宁科技大学高等职业技术学院的林春丽编写。

本书由东北大学的李新光教授担任主审，对全书内容进行了认真、负责、全面的审阅，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

为方便教学，本书配备电子课件和相关实习实训资料等教学资源。凡选用本书作为授课教材的教师均可登录机械工业出版社教材服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费下载。如有问题请致信 [cmpgaozhi@sina.com](mailto:cmpgaozhi@sina.com)，或致电 010-88379375 联系营销人员。

由于检测技术发展较快，编者水平有限，书中难免有不妥或遗漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 测量技术及误差理论基础 ..... 1

- 1.1 概述 ..... 1
  - 1.1.1 测量的概念 ..... 1
  - 1.1.2 测量方法 ..... 2
  - 1.1.3 测量仪表的基本功能 ..... 3
  - 1.1.4 测量仪表的基本性能指标 ..... 4
- 1.2 测量误差 ..... 10
  - 1.2.1 误差存在的绝对性 ..... 10
  - 1.2.2 误差的表示形式 ..... 10
  - 1.2.3 误差的分类 ..... 12
  - 1.2.4 仪表的准确度 ..... 13

本章小结 ..... 14

思考题和习题 ..... 15

## 第 2 章 温度的测量 ..... 16

- 2.1 概述 ..... 16
  - 2.1.1 温度和温标 ..... 16
  - 2.1.2 测温方法的分类 ..... 19
- 2.2 接触式测温方法及仪表 ..... 20
  - 2.2.1 膨胀式温度计 ..... 20
  - 2.2.2 压力式温度计 ..... 22
  - 2.2.3 热电偶温度计 ..... 23
  - 2.2.4 热电阻温度计 ..... 39
  - 2.2.5 接触式测温实例 ..... 46
- 2.3 非接触式测温方法及仪表 ..... 52
  - 2.3.1 辐射测温的基础理论 ..... 52
  - 2.3.2 光学高温计 ..... 54
  - 2.3.3 光电高温计 ..... 57
  - 2.3.4 全辐射高温计 ..... 59
  - 2.3.5 比色高温计 ..... 61
  - 2.3.6 前置反射器辐射温度计 ..... 62
  - 2.3.7 非接触式测温实例 ..... 63
- 2.4 新型温度传感器 ..... 65
  - 2.4.1 集成温度传感器 ..... 66
  - 2.4.2 光纤温度传感器 ..... 67
- 2.5 温度变送器 ..... 69
  - 2.5.1 仪表系列温度变送器 ..... 70
  - 2.5.2 一体化温度变送器 ..... 74

本章小结 ..... 75

思考题和习题 ..... 75

## 第 3 章 压力和差压的测量 ..... 77

- 3.1 概述 ..... 77
    - 3.1.1 压力和差压的概念及表示方法 ..... 77
    - 3.1.2 压力的度量单位 ..... 78
  - 3.2 液柱式压力计 ..... 79
    - 3.2.1 U 形管压力计 ..... 79
    - 3.2.2 单管压力计 ..... 80
    - 3.2.3 斜管压力计 ..... 81
    - 3.2.4 液柱式压力计的使用 ..... 82
  - 3.3 弹性式压力计 ..... 82
    - 3.3.1 弹性元件 ..... 82
    - 3.3.2 弹簧管压力计 ..... 84
  - 3.4 电气式压力传感器 ..... 86
    - 3.4.1 应变式压力传感器 ..... 86
    - 3.4.2 压电式压力传感器 ..... 92
  - 3.5 压力变送器 ..... 94
    - 3.5.1 电容式压力变送器 ..... 95
    - 3.5.2 扩散硅差压变送器 ..... 98
  - 3.6 压力计的校验和使用 ..... 100
    - 3.6.1 活塞式压力计及压力计的校验 ..... 100
    - 3.6.2 压力计的使用 ..... 102
- 本章小结 ..... 105
- 思考题和习题 ..... 106

## 第 4 章 流量的测量 ..... 107

- 4.1 概述 ..... 107
  - 4.1.1 流量的概念 ..... 107
  - 4.1.2 流量计的分类 ..... 108
- 4.2 差压式流量计 ..... 109
  - 4.2.1 节流式流量计的测量原理 ..... 110
  - 4.2.2 节流装置 ..... 111
  - 4.2.3 节流装置的其他辅件 ..... 115
  - 4.2.4 节流式流量计的安装使用 ..... 116
  - 4.2.5 其他差压式流量计 ..... 117
- 4.3 转子流量计 ..... 118
  - 4.3.1 转子流量计的原理及结构 ..... 118
  - 4.3.2 转子流量计的刻度换算与量程调整 ..... 120
  - 4.3.3 转子流量计的安装使用 ..... 121

4.4 靶式流量计 .....	122	5.4.4 静压式液位计的零点迁移 .....	159
4.4.1 靶式流量计的工作原理 .....	122	5.4.5 静压式液位计的特点及选型 .....	160
4.4.2 靶式流量计的结构及安装使用 .....	122	5.5 电容式物位计 .....	161
4.4.3 靶式流量计的标定 .....	122	5.5.1 导电介质用电容式物位计 .....	161
4.4.4 靶式流量计的特点 .....	123	5.5.2 非导电介质用电容式物位计 .....	162
4.5 速度式流量计 .....	123	5.5.3 固体物料用电容式物位计 .....	163
4.5.1 涡轮流量计 .....	123	5.5.4 油箱油量检测系统 .....	164
4.5.2 电磁流量计 .....	125	5.6 导电式液位计 .....	165
4.5.3 涡街流量计 .....	126	5.7 超声波式物位计 .....	166
4.5.4 超声流量计 .....	128	5.7.1 超声波的特性 .....	166
4.6 容积式流量计 .....	129	5.7.2 超声波式物位计的特点及其 分类 .....	167
4.6.1 椭圆齿轮流量计 .....	130	5.7.3 声速校正的方法 .....	169
4.6.2 腰轮流量计 .....	130	5.8 核辐射式物位计 .....	170
4.6.3 皮膜式家用煤气表 .....	131	5.8.1 核辐射式物位计的工作原理与 特点 .....	170
4.7 质量流量计 .....	131	5.8.2 利用核辐射式物位计测量物位的 方法 .....	172
4.7.1 热式流量计 .....	131	5.8.3 核辐射式物位计的使用与防护 .....	173
4.7.2 冲量式流量计 .....	132	本章小结 .....	174
4.7.3 科里奥利式质量流量计 .....	133	思考题和习题 .....	174
4.7.4 间接式质量流量的测量方法 .....	136	<b>第6章 机械量的测量</b> .....	175
4.8 流量校验系统 .....	138	6.1 概述 .....	175
4.8.1 流量校验装置 .....	138	6.2 位移的测量 .....	175
4.8.2 标准表校验法 .....	140	6.2.1 电感式位移传感器 .....	176
4.9 流量计的应用 .....	141	6.2.2 霍尔式位移传感器 .....	179
4.9.1 腐蚀性介质的流量测量 .....	141	6.2.3 光纤式位移传感器 .....	181
4.9.2 高粘度流体的流量测量 .....	142	6.2.4 计量光栅 .....	181
4.9.3 液固混合流的流量测量 .....	142	6.3 转速的测量 .....	183
4.9.4 气液两相流的流量测量 .....	143	6.3.1 模拟式测速法 .....	184
4.9.5 高饱和和蒸气压液体的流量测量 .....	143	6.3.2 计数式测速法 .....	185
4.9.6 大口径管路液体的流量测量 .....	146	6.3.3 激光式测速法 .....	188
本章小结 .....	147	6.4 力学量的测量 .....	189
思考题和习题 .....	148	6.4.1 荷重传感器与电子秤 .....	189
<b>第5章 物位的测量</b> .....	149	6.4.2 加速度与振动的测量 .....	190
5.1 概述 .....	149	6.5 厚度、直径的测量 .....	193
5.1.1 物位测量的一般概念 .....	149	6.5.1 厚度的测量 .....	193
5.1.2 物位测量的工艺特点和主要 问题 .....	150	6.5.2 直径的测量 .....	196
5.1.3 物位测量仪表的分类 .....	150	本章小结 .....	197
5.2 直读式液位计 .....	150	思考题和习题 .....	197
5.3 浮力式液位计 .....	151	<b>附录</b> .....	198
5.3.1 浮子式液位计 .....	152	附录A 标准化热电偶分度表 .....	198
5.3.2 浮筒式液位计 .....	154	附录B 标准化热电阻分度表 .....	201
5.4 静压式液位计 .....	157	<b>参考文献</b> .....	202
5.4.1 压力计式液位计 .....	157		
5.4.2 差压式液位计 .....	158		
5.4.3 法兰式压力变送器的应用 .....	158		

---

---

---

---

---

---

# 第 1 章

## 测量技术及误差理论基础

### 【内容提要】

本章是全书的基础部分，首先分析了检测技术和测量仪表在人类认识自然、改造自然中的重要作用；然后介绍了测量的基本概念、仪表性能指标的计算方法和测量误差的基本理论，分析了测量误差的产生原因及处理方法；最后介绍了有关测量准确度的评定与表示方法。

### 1.1 概述

在工业生产过程中，为了保证产品的质量和生产安全，不断地提高劳动生产率，需要对生产过程中的各种参数进行有效的测量和调节。例如，在氨的合成过程中，为了使化学反应进行得充分而迅速，既要保证控制化学反应所需要的温度和压力，又要控制氢气和氮气的比例和流量；在冶金、钢铁和机械工业中则又需要对某些机械参数如重量、加速度、位移及厚度等进行测量和控制。配合这些工艺参数测量的仪表种类很多，其结构原理也不尽相同，然而从使用仪表进行测量的实质来看，却都有相同之处。要控制一个参数，就必须不断地、尽可能正确地收集反映这个参数特征的信息，并进行量化，这个收集信息并量化的过程就是测量。

#### 1.1.1 测量的概念

所谓测量，就是借助专用的工具或装置，通过适当的实验方法或计算，收集被测对象信息的过程。测量的定义可分为狭义测量和广义测量两种。



### 1. 狭义测量

狭义测量就是指求出被测量是标准量多少倍的过程，这是古典测量的概念。

要知道一个参数的数量是多少，就要有标准量，即单位。单位必须是国家或国际上公认的。有了单位，就可以用专门的工具让被测量与同性质的标准量进行比较，求出被测量与标准量的比值（倍数），从而得出测量结果，可用下式表达：

$$K = \frac{X}{X_0} \quad (1-1)$$

式中， $X$  为被测量； $X_0$  为标准量，即单位； $K$  为比值（倍数）。

可见，被测量的数值就是比值乘以单位，即  $X = KX_0$ 。由于  $X_0$  往往取 1，所以比值  $K$  就代表了测量结果，但在比值后面要带上标准量  $X_0$  所选用的单位，即  $X = K$ （单位）。例如在测量压力时，若标准量  $X_0$  所选用单位为 1Pa，则压力可表示为  $X = K$ （Pa）。由此可见，比值  $K$  的大小与所选取的标准量的单位有关。对给定的被测量  $X$  而言， $X_0$  的单位越大，则  $K$  值越小； $X_0$  的单位越小，则  $K$  值越大。

由上可见，测量实际上是一个比较的过程。测量的结果应包含两部分：一部分是一个数值的符号（正或负）和大小；另一部分是测量单位。没有测量单位，测量结果是没有意义的。

### 2. 广义测量

所谓广义测量，就是对被测量检出、变换、分析、处理、判断、控制和显示等进行有机统一的综合过程，这是现代测量的概念和含义。也就是说，测量不仅仅是把被测量与标准量进行比较的过程，而是一个包括测量、变换、处理和控制在多功能的综合过程。

各种测量过程大体上都可以归纳为对比、示差、平衡和读数四个环节。以天平测量质量为例，在天平调整至零点之后，把被测量（物体质量）和标准量（砝码）分别放到天平两边的秤盘上对比；然后根据指针位置的变化值即示差，调整砝码的数值，使之平衡；最后，根据砝码的多少读出物体的质量，即读数。整个测量过程体现了上述四个环节。要改进测量工作，就应简化和完善这些环节。

#### 1.1.2 测量方法

测量方法的选择和测量工具一样，是十分重要的。如果测量方法不当，那么即使有精密的测量仪器和设备，也不能得到理想的测量结果。测量方法各种各样，按取得测量结果的形式来分，有直接测量法、间接测量法和组合测量法。

##### 1. 直接测量法

用测量精确程度较高的仪器测量被测量，直接得到测量结果的方法，称为直接测量法。比如，用椭圆齿轮流量计测量管道内流体的流量，用压力表测量某密闭容器的压力等，都能直接读出被测量的数值。

##### 2. 间接测量法

利用被测量与某些物理量间的函数关系，先测出这些物理量（间接量），再得出被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，利用物质的电阻率随温度变化的特征，通过测量电阻值而得到物体的温度。一般来说，间接测量法需要测量的量较多，因此测量和计算的工作量较大，引起误差的因素也较多。通常在采用直接测量很不方便或误差较大，或缺乏直接测量



仪器时，才使用间接测量法。

### 3. 组合测量法

当被测量与多个量存在多元函数关系时，可以直接测量出这几个相关的量，然后解方程组求出被测量，此种测量方法称为组合测量法。组合测量法较为复杂，多用于高精度的测量，有些参数惟有此法方能测量。在计算机广泛使用的今天，组合测量法的应用日益普遍。

## 1.1.3 测量仪表的基本功能

测量仪表或工具是实现测量任务的物质手段。为了实现各种复杂的测量任务，测量仪表必须具备许多基本的功能。概括起来，测量仪表的基本功能有四种，即变换、选择、比较和显示功能。下面分别予以简单叙述。

### 1. 变换功能

在生产过程中，有些参数不便于直接测量。例如，温度是表征物体内部分子热运动平均动能的物理量，此量不易测量，只能借助其他物质的某一物理性质受热变化的特性来测量。有些参数虽然能直接测量，但是，测量结果往往不便于传输、处理和比较。这时，需要将测量变换成便于传输的量，或者将被测量和标准量都变换成另一个便于比较和处理的量。这种利用物质的物理、化学性质，把被测量转变成便于测量、传输和处理的另一个物理量的过程，称为测量的变换。例如，炉温的测量，常常是利用热电偶的热电效应，把被测温度（热能）转换成热电动势（电能），再经毫伏检测仪表把热电动势转换成仪表指针的位移，然后与温度标尺相比较而显示出被测温度的数值；智能压力变送器把压力变换成电流信号，便于远距离传输、显示、调节和计算机控制。

总之，变换是测量仪表的主要功能之一。它可以使不能测量的参数实现测量，可以使同一参数的测量方法和途径更多，可以使测量结果的传输更方便、更迅速，也可以使测量精度大大提高。在传输信号统一化、规格化和计算机集中控制的今天，变换更必不可少。可以说，变换已经成了检测技术的基础和测量工作的核心。

根据材料的物理、化学性质对各种参数的敏感性，人们特意制成了一系列能够完成各种变换任务的元件，称为变换元件。使变换元件的功能更完善，使用起来更方便的组合装置称为传感器。

传感器或变换元件种类繁多，其变换的原理和类型也千差万别。但是，它们都是将被测量  $x$  变换成输出量  $y$ ，二者之间的函数关系  $y=f(x)$  就称为变换函数。变换函数可能是线性的，也可能是非线性的。

另外，在变换过程中，往往要求信号足够大，以便于传输和满足其他功能的要求，这时就要对信号进行放大。放大也是变换，是一种特殊形式的变换，即同性质的量的变换。

### 2. 选择功能

测量仪表或变换元件的输出量  $y$  与输入量  $x$  往往不是单一的函数关系，即

$$y=f(x, u_1, u_2, u_3, \dots, u_n) \quad (1-2)$$

式中， $u_1, u_2, \dots, u_n$  是干扰变量或其他分量。

为了实现测量，在设计制造测量仪表或变换元件时，应使其具有选择的功能，即选择有用测量信号而抑制其他干扰信号的功能。以 DDZ-III 型压力变送器为例，它是利用弹性元件受压变形产生位移，再将位移转变成电流信号的。但是，输出电流信号  $I$  与输入压力信号  $P$

不是单值函数关系，它受弹性元件的材质、几何尺寸和刚度的影响，受电源电压、频率波动的影响，受输出负载阻抗的影响，受环境温度、湿度及外磁场的影响等。因此，在设计、制造变送器时，除了对弹性元件进行合理设计，并进行稳定性工艺处理之外，还要根据力平衡原理，进行深度负反馈，在电路上进行温度补偿等，使变送器排除其他因素的干扰，具有只对被测压力敏感的选择功能。

### 3. 比较功能

在前面的测量方法中已经讲到，为了提高测量精度，大多数测量仪表都采取将被测量与标准量进行比较的方法，即测量仪表的比较功能。这里，标准量应保持稳定和准确。

### 4. 显示功能

测量的最终目的是获取测量结果。测量仪表将测量结果指示或记录下来的功能，称为显示功能。根据实际生产的需要，对测量结果的显示有瞬时值的显示，有时间历程的显示，也有累计值的显示。有的测量仪表能同时显示、记录若干个参数的测量值，有的测量仪表还能对许多参数进行巡回显示、记录。

测量仪表的显示形式可分为模拟式、数字式和图像式三种。各种指针式仪表的角位移、线位移属于模拟式显示；数码显示器的数字、数码显示或打印属于数字式显示；图像式屏幕显示还能显示曲线、表格、图像背景及被测量的动态变换过程。

测量仪表能否很好地实现它的基本功能，取决于仪表的一系列基本性能指标，如精确度、稳定性、抗干扰能力以及使用寿命等。这些指标是通过对比表的精心设计和制造来实现的。

## 1.1.4 测量仪表的基本性能指标

测量仪表所要测量的信号可能是恒定量或缓慢变化的量，也可能是随时间变化较快的量。无论哪种情况，使用测量仪表的目的都是使其输出信号能够准确地反映被测量的数值或变化情况。对测量仪表的输出量与输入量之间对应关系的描述就称为测量仪表的特性。理想的测量仪表特性在实际中是不存在的，人们所能做的就是使实际的特性尽量接近理想的特性，而这种接近的程度，通常用一些性能指标来加以衡量。

评价测量仪表性能的品质指标是多方面的，有静态的，也有动态的，有可靠性方面的，也有经济性方面的。在这里，主要针对评价测量能力的品质指标予以介绍。

### 1. 静态特性指标

所谓静态，是指被测参数不随时间变化，或随时间变化非常缓慢的状态。仪表的静态特性指标主要体现于其静态特性曲线。在被测参数处于稳定状态下，测量仪表的输出量  $y$  与输入量  $x$  的关系，称为仪表的静态特性。它可以用一个多项式表示，即

$$y = f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-3)$$

式中， $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\cdots$ 、 $a_n$  为常数。

静态特性如图 1-1 中的曲线 1 所示。当  $a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$  时， $y = f(x)$  呈现为过坐标原点的直线，如图 1-1 中的直线 2 所示，此时仪表的输出量与输入量呈理想线性关系。

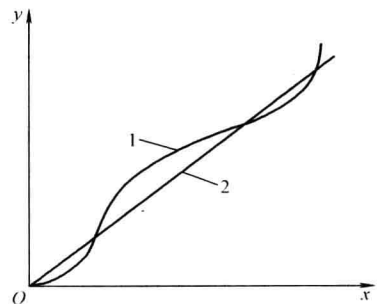


图 1-1 测量仪表的静态特性

(1) 非线性度 为了表征测量仪表的实际特性曲线与理想线性曲线的吻合程度，引入了非线性度的概念。

任何测量仪表都是有一定的测量范围。仪表的最大输入信号（上限） $x_{\text{上}}$  与仪表的最小输入信号（下限） $x_{\text{下}}$  之差，称为仪表的测量量程。与输入极值信号相对应的仪表的最大输出信号  $y_{\text{上}}$  与最小输出信号  $y_{\text{下}}$  之差，称为仪表的输出量程，简称量程。在静态特性坐标图上，将两个极值坐标点用直线连接起来，此直线就称为仪表的端基直线，如图 1-2 所示。

所谓非线性度，是指测量仪表的特性曲线与端基直线最大输出偏差值的绝对值与量程的比值百分数，即

$$E_e = \frac{|y_i - y'_i|_{\max}}{y_{\text{上}} - y_{\text{下}}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中， $y_i$  为偏差最大处仪表的输出值； $y'_i$  为端基直线上与  $y_i$  有相同输入信号  $x_i$  时所对应的坐标值。

(2) 灵敏度 在稳定状态下，测量仪表的输出增量对输入增量的比值，称为仪表的灵敏度。它就是仪表静态特性曲线上相应点的斜率，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-5)$$

如果特性曲线为直线，则各点斜率相等， $S$  为常数，此仪表为等灵敏度仪表，如图 1-3a 所示。如果特性曲线不是直线，则量程内各点斜率不相等，仪表在量程内的不同输入值时，有不同的灵敏度，如图 1-3b 所示。由于仪表的输入量与输出量有各种单位，故灵敏度的单位为复合单位，如 mA/Pa，mV/°C 等。由灵敏度定义表达式 (1-5) 可知，灵敏度实质上等同于仪表的放大倍数。只是由于  $x$  和  $y$  都有具体的量纲，所以灵敏度也有量纲，且由  $y$  和  $x$  确定，而放大倍数没有量纲。所以灵敏度的含义比放大倍数要广泛得多。

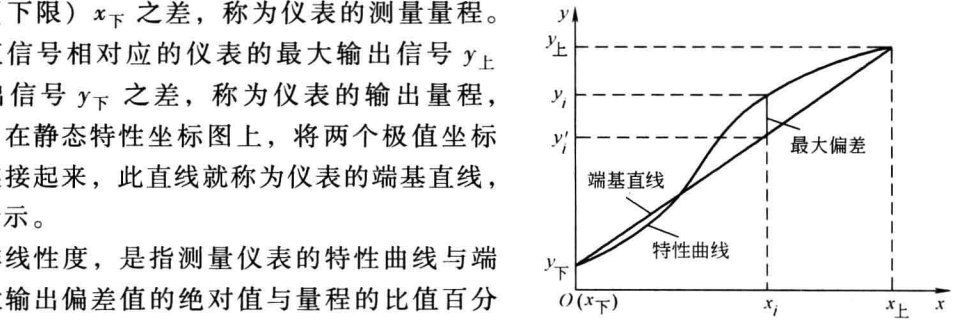


图 1-2 测量仪表的非线性度

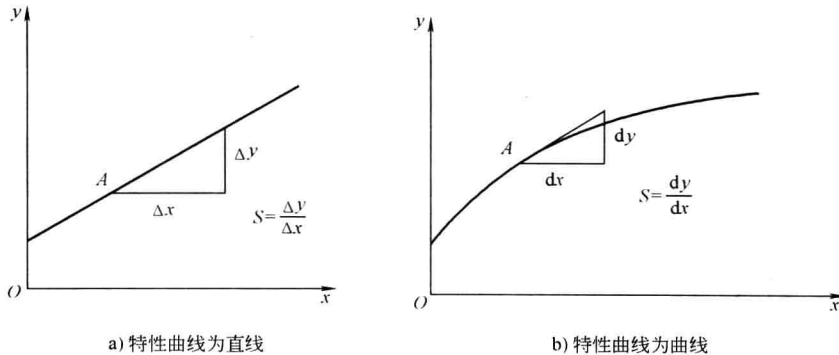


图 1-3 测量仪表的灵敏度

容易与仪表灵敏度混淆的是仪表分辨率。它是仪表输出能响应和分辨的最小输入量，又称仪表灵敏限。

分辨率是灵敏度的一种反映,一般说仪表的灵敏度高,则其分辨率同样也高。因此实际中主要希望提高仪表的灵敏度,从而保证其足够高的分辨率。

在由多个仪表组成的测量或控制系统中,灵敏度具有可传递性。例如首尾串联的仪表系统(即前一个仪表的输出是后一个仪表的输入),其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。

(3) 变差 校验仪表的线性度时,常在测量范围内给仪表以等分点的输入信号,观察其输出信号与理论值的差值大小。测量仪表的输出量随着输入量的增加而增加的过程称为仪表的升行程,反之称为降行程。所谓变差,是指测量仪表在同一输入量下,其升行程与降行程输出量的最大差值。变差通常也表示成相对百分数的形式,即

$$\delta_b = \frac{|y_i - y'_i|_{\max}}{y_{\uparrow} - y_{\downarrow}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中,  $y_i$ 、 $y'_i$  为变差最大处仪表升行程与降行程在同一输入量  $x_i$  下的输出值。

变差表征了仪表升、降行程特性曲线的差异程度,是测量仪表的重要性能指标。变差产生的原因主要是由于传动机构的间隙、摩擦或者仪表元器件吸收、释放能量所造成的。例如运动件的惯性、磁性元件的磁滞性、电容的充放电等。仪表升、降行程特性曲线不重合所形成的闭合曲线,称为滞环,如图 1-4 所示。

(4) 基本误差和精度 在测量仪表量程范围内,输出量和理论值的最大偏差值与量程比值的百分数,称做仪表的基本误差,即

$$\delta = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\uparrow} - y_{\downarrow}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中,  $\Delta y_{\max}$  为仪表输出示值与理论值偏差中最大的一个。

因偏差有正负,故  $\delta$  值有正负之别。为了表征仪表的性能优劣,各种仪表都规定其基本误差的允许范围。

仪表的精确度简称精度,是描述仪表测量结果准确程度的指标。工业仪表的精确度常用仪表的精度等级来表示,是按照仪表的精确度高低划分的一系列标称值。对各种测量仪器仪表,国家都统一规定了精度等级系列标准,常用的有 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0 等档次。例如 0.5 级的检测仪表,即表示其允许基本误差是  $-0.5\% \leq \delta_{\text{允}} \leq 0.5\%$ ,也就是说,在精度等级值前加上正、负号,后面加%即为其允许误差范围。仪表精度等级值越小,精确度越高,就意味着仪表既精密、又准确。仪表的精度等级在仪表面板上的表示符号通常为:  $\textcircled{1.5}$ 、 $\triangle 1.0$  等。

一种仪表的精度等级是根据生产实际的需要和该仪表的制造技术水平来决定的,关于精度的计算在 1.2.2 节中介绍。

## 2. 动态特性指标

在实际测量中,大量的被测量是随时间变化的动态信号,这就要求仪表的输出不仅能精确地反映被测量的大小,还要正确地再现被测量随时间变化的规律。

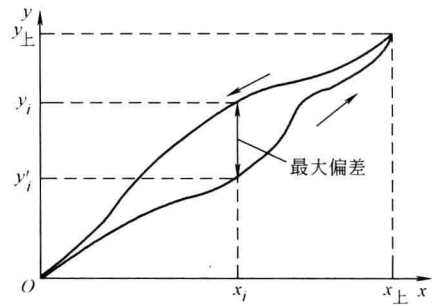


图 1-4 检测仪表的变差

仪表的动态特性是指仪表的输出对随时间变化的输入量的响应特性，反映了输出值真实再现变化着的输入量的能力。一个动态特性好的仪表，其输出将再现输入量的变化规律，即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性的环节外，由于仪表固有因素的影响，输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数，这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。研究仪表的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施。

由于绝大多数仪表都可以简化为一阶或二阶系统，所以研究测量仪表的动态特性可以从时域和频域两个方面，采用瞬态响应法和频率响应法分析。

(1) 瞬态响应特性 在时域内研究测量仪表的动态特性时，常用的激励信号有阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等，仪表对所加激励信号的响应称为瞬态响应。一般认为，阶跃输入对于一个仪表来说是最严峻的工作状态。如果在阶跃函数的作用下，仪表能满足动态性能指标，那么在其他函数作用下，其动态性能指标也必定会令人满意。在理想情况下，阶跃输入信号在仪表特性曲线的线性范围内。下面以仪表的单位阶跃响应评价仪表的动态性能。

1) 一阶仪表的单位阶跃响应。设  $x(t)$  和  $y(t)$  分别为仪表的输入量和输出量，均是时间的函数，则一阶仪表的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau \cdot s + 1} \quad (1-8)$$

式中， $\tau$  为时间常数； $k$  为静态灵敏度。

由图 1-5 所示的一阶仪表响应曲线可知，仪表存在惯性，输出的初始上升斜率为  $1/\tau$ ，若仪表保持初始响应速度不变，则在  $\tau$  时刻输出将达到稳态值。但实际的响应速率随时间的增加而减慢。理论上仪表的响应在  $t$  趋于无穷时才达到稳态值，但实际上当  $t = 4\tau$  时，其输出已达到稳态值的 98.2%，可以认为已达到稳态。 $\tau$  越小，响应曲线越接近于输入的阶跃曲线，因此一阶仪表的时间常数  $\tau$  越小越好。不带保护套管的热电偶是典型的一阶仪表。

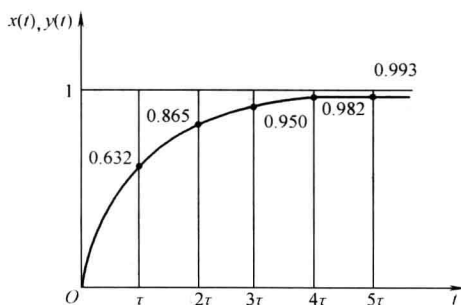


图 1-5 一阶仪表的单位阶跃响应

2) 二阶仪表的单位阶跃响应。二阶仪表的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-9)$$

式中， $\omega_n$  为仪表的固有频率； $\xi$  为仪表的阻尼比。

在单位阶跃信号作用下，二阶仪表阶跃响应曲线如图 1-6 所示。为了表征仪表的动态特性，引入以下性能指标：

- ① 上升时间  $t_r$ 。输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所需的时间。
- ② 响应时间  $t_s$ 。系统从阶跃输入开始到输出值进入所规定的允许误差范围内所需的时间。
- ③ 峰值时间  $t_p$ 。系统从阶跃输入开始到输出值达到第一个峰值所需的时间。
- ④ 超调量  $\sigma$ 。仪表输出超过稳态值的最大值  $\Delta A$ ，常用相对于稳态值的百分比  $\sigma$  表示，

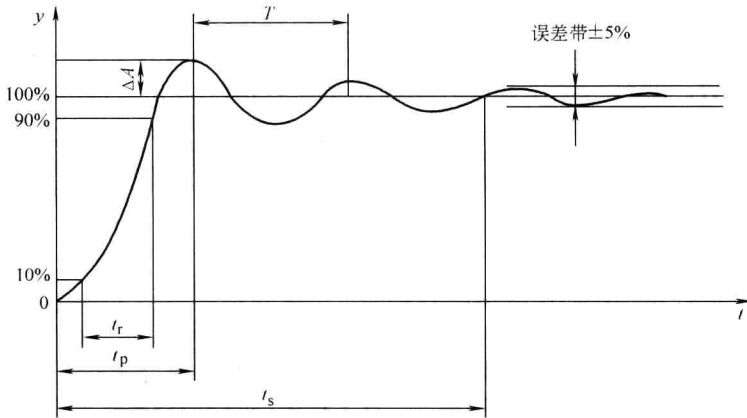


图 1-6 二阶仪表阶跃响应的性能指标

即  $\sigma = \frac{\Delta A}{y_{\infty}} \times 100\%$  (式中,  $y_{\infty}$  为输出稳态值)。

(2) 频率响应特性 仪表对一定频率和幅值的正弦输入信号的响应特性,称为频率响应特性。如果仪表的频率响应性能不好,会使仪表输出值的动差加大,甚至引起共振,使仪表不能正常工作。输出量的动差和相位移与仪表系统的阻尼有关,阻尼越大,动差和相位移越小,但是仪表的灵敏度也变小了。频率响应与系统的固有频率有关,如果仪表系统的固有频率  $f_0$  较大,则保持一定误差下的工作频率范围也就越宽。把输出动差值不超过运行误差范围的输入信号的频率上限  $f_m$  称为极限频率,显然,  $f_0$  越大,  $f_m$  也就越大,仪表的抗干扰能力也就越强。

### 3. 可靠性指标

仪表的可靠性是指仪表在规定的条件下和规定的时间内,实现规定功能的能力。它是仪表和各种产品的重要性能指标之一。任何产品要想发挥其作用,首先要求它能可靠地工作。但是,产品在使用过程中难免会发生各种功能失效的现象,特别是随着使用时间的延长,零部件乃至整个产品都要失效老化。永远保持完好的产品是没有的,如何延长仪表的使用寿命,使仪表在规定的运行期内减少失效发生的次数,花较少的费用取得较大的效益,这就是研究可靠性问题的目的。

仪表的可靠性取决于仪表设计上的先进合理和制造上的工艺精湛。要获得仪表整机的可靠,组成仪表的所有零部件也必须稳定可靠。另外,仪表的工作环境(如温度、湿度、腐蚀性、电源波动、外磁场及振动情况等)、仪表的负荷情况等也直接影响着仪表的可靠程度和使用寿命。对于可恢复性仪表,维修条件也直接影响着仪表的寿命。因此,可靠性是一门新兴的综合性技术。它既有设计制造问题,也有使用、维修问题;既有技术问题,也有管理问题;既要考虑性能,又要考虑成本、需求等。

仪表的可靠性指标主要有三项:可靠度、失效率和平均无故障工作时间(MTBF),下面分别予以简单介绍。

(1) 可靠度  $R(t)$  产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,称为产品的可靠度。

设有  $N$  台仪表，在规定的条件下运行时间  $t$ ，有  $N_S(t)$  台仪表失效，有  $N_w(t) = N - N_S(t)$  台仪表完好，则失效仪表所占概率为

$$Q(t) = \frac{N_S(t)}{N}$$

而完好仪表所占概率为

$$R(t) = \frac{N_w(t)}{N} = 1 - Q(t) \quad (1-10)$$

这里， $R(t)$  就称为这批仪表运行到  $t$  时间的可靠度。显然， $R(t)$  和  $Q(t)$  均是时间的函数。例如，有一批仪表  $R(t) = R(1000) = 0.8$ ，就表明这批仪表工作 1000 小时后，每 100 台仪表只有 80 台在可靠地工作着，即每台仪表的可靠度为 80%。

(2) 失效率  $\lambda(t)$  一批仪表在规定的条件下工作到  $t$  时刻，在尚未失效的仪表中，单位时间内发生失效的概率，称为仪表在该时刻的失效率。对于可修复性产品，又称为故障率。

失效率  $\lambda(t)$  是时间的函数。一般产品分为三个失效阶段：早期失效、偶然失效和损耗失效。

如图 1-7 所示，在产品运行的初期，由于制造、安装和运输上的缺陷，故障较多，这可以通过零件老化和试运行，减少其影响。产品工作到晚期，失效率迅速增大，这主要是由于产品零部件的老化失效、疲劳和磨损等原因造成的，应该更换仪表元器件乃至报废整个产品。偶然失效阶段是仪表的主要工作阶段。此阶段仪表运行稳定，虽然各种偶然的因素也会造成仪表出现故障，但失效率较低，且几乎是个常数，亦即  $\lambda(t) = \lambda$ ，此时

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-11)$$

这就是说，可靠度是按指数分布的， $\lambda$  的单位是  $1/h$ 。

产品或元器件的失效率，反映出一个国家或一个企业的产品质量和制造水平。随着材料性能和工艺水平的提高，产品或元器件的  $\lambda$  值将不断减小。

(3) 平均无故障工作时间 (MTBF) 对于不可修复产品，即一次性产品，从使用起到发生失效前的一段时间，称为产品的寿命。对于可修复产品，相邻两次故障间的时间，称为产品的无故障工作时间。一批同类产品的寿命或无故障工作时间的平均值，称为该批产品的平均无故障工作时间，即 MTBF。MTBF 是  $\lambda$  的倒数，即

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1-12)$$

例如，若压力计的  $\lambda = 1.3 \times 10^{-5} 1/h$ ，则  $MTBF = \frac{1}{\lambda} = 77000h$ 。若某二极管的  $\lambda = 10^{-8} 1/h$ ，则其  $MTBF = 10^8 h$ 。若电视机显像管的  $\lambda = 2.0 \times 10^{-4} 1/h$ ，则其  $MTBF$  (寿命) = 5000h。

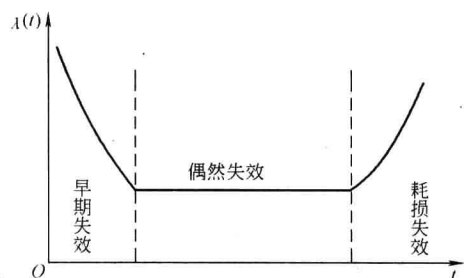


图 1-7  $\lambda(t)-t$  曲线



## 1.2 测量误差

在测量中，测量结果往往与被测量的真实值（简称真值）不相等，二者的差值称为测量误差。

### 1.2.1 误差存在的绝对性

测量的最终目的就是求得被测量的真实值。但是，测量的过程始终是多因素共同存在和影响的过程。被测对象、测量工具、测量环境以及测量者本身，每时每刻无不受到各种因素的干扰，这些影响造成测量值和真实值之间总是存在一定的差别。就是说，测量误差的存在是绝对的，真值是永远测量不到的。人们只能通过各种努力，减小测量误差，力求使测量结果逼近真值。在检定和计量仪表时，常把某些计量设备的示值称为标准值。实际上，这些标准值也是有误差的，只是其误差相对来说小些而已。

对于测量工作来说，人们总是希望测量得精确些，误差更小些。但是，从测量工作的经济效益和整体而言，并非要求所有的测量值都必须非常精确，误差都很小，那样会耗费大量的资金和时间。对于一定的测量任务，只要求测量结果达到规定的精度，满足实际需要就行了。

测量技术是随着科学技术的进步和生产的发展而发展的。为了满足对生产流程日益严格的控制和对各种参数精确测量的要求，许多新发明、新技术、新材料和新工艺无不首先应用到测量领域，使得测量理论、测量工具和测量方法不断得到改进，测量的精确程度也在不断地提高。

### 1.2.2 误差的表示形式

误差的表示形式有许多种，常见的有三种：

#### 1. 绝对误差

测量值与真实值的差值，称为绝对误差，即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-13)$$

式中， $x_0$  为真值； $x$  为测量值。

当测量值大于真值时，误差  $\Delta x$  为正，反之为负。绝对误差的单位与被测量相同。

很显然，绝对误差能够直观地反映出测量结果的正确程度，在金融和商业上使用较普遍，但是在工程上，使用较多的往往是相对误差。

#### 2. 相对误差

测量结果的绝对误差与真值的比值百分数称为相对误差，即

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-14)$$

相对误差无量纲，但有正负之分。与绝对误差的表示形式相比，相对误差能够反映出测量工作的水平。例如，在长度测量中，若测得上海到郑州的距离为 1001km，比实际距离多 1km，相对误差为 0.1%；若用米尺量布匹 100m，误差为 1m，尽管绝对误差比前者小得多，但相对误差却达到 1%。显然，后者测量水平不如前者。

在检测技术中，被测量的值可能在仪表量程的不同处。这时，如果仍用上述相对误差定义就会失去其意义。因为真值不同，尽管绝对误差相等，也会得到不同的相对误差值。所以，测量仪表往往使用另一种形式的相对误差，即引用误差。

### 3. 引用误差

所谓引用误差，就是测量仪表在量程范围内某点示值的绝对误差与其量程的比值百分数，即

$$\delta = \frac{\Delta x}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% = \frac{\Delta x}{M} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中， $\Delta x$  为示值的绝对误差； $M = y_{\max} - y_{\min}$  为仪表的量程。

由于引用误差是以量程作为相对比较量的，所以，引用误差又称为归算误差或满刻度相对误差。引用误差的最大值，就是仪表的基本误差。可以用最大引用误差表示仪表的精度等级。

例如精度为 1.5 级的仪表，其最大允许误差的引用误差形式为  $\delta_{\text{表允}} = \pm 1.5\%$ ，如果该仪表的量程为 4MPa，则仪表允许的绝对误差形式为

$$\Delta_{\text{表允}} = \delta_{\text{表允}} \times M = \pm 1.5\% \times 4\text{MPa} = \pm 0.06\text{MPa}$$

一般来说，一台合格仪表至少要满足：

$$\begin{aligned} |\delta_{\text{引max}}| &\leq |\delta_{\text{表允}}| \leq |\delta_{\text{工允}}| \\ \text{或 } |\Delta_{\text{max}}| &\leq |\Delta_{\text{表允}}| \leq |\Delta_{\text{工允}}| \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中， $\delta_{\text{引max}}$ 、 $\Delta_{\text{max}}$  为仪表在测量范围内的最大引用误差和可能产生的最大绝对误差； $\delta_{\text{表允}}$ 、 $\Delta_{\text{表允}}$  为表的允许相对误差和绝对误差； $\delta_{\text{工允}}$ 、 $\Delta_{\text{工允}}$  为工艺允许的相对误差和绝对误差。

下面通过例题来说明确定仪表精度和选择仪表精度的方法。

**例 1-1** 某台温度检测仪表的测温范围为 100 ~ 600℃，校验该表时得到的最大绝对误差为 3℃，试确定该仪表的精度等级。

**解：**由式 (1-15) 可知，该测温仪表的最大引用误差为

$$\delta_{\text{引max}} = \frac{\Delta_{\text{max}}}{M} \times 100\% = \frac{3}{600 - 100} \times 100\% = 0.6\%$$

去掉 % 后，该表的精度值为 0.6，介于国家规定的精度等级中 0.5 和 1.0 之间，而 0.5 级表和 1.0 级表的允许误差  $\delta_{\text{表允}}$  分别为  $\pm 0.5\%$  和  $\pm 1.0\%$ 。按式 (1-16)，这台测温仪表的精度等级只能定为 1.0 级。

**例 1-2** 现需选择一台测温范围为 0 ~ 500℃ 的测温仪表。根据工艺要求，温度指示值的误差不允许超过  $\pm 4\text{℃}$ ，试问：应选哪一级精度等级的仪表？

**解：**工艺允许相对误差为

$$\delta_{\text{工允}} = \frac{\Delta_{\text{工允}}}{M} \times 100\% = \frac{\pm 4}{500 - 0} \times 100\% = \pm 0.8\%$$

去掉  $\pm$  和 % 后，该表的精度值为 0.8，也是介于 0.5 ~ 1.0 之间，而 0.5 级表和 1.0 级表的允许误差  $\delta_{\text{表允}}$  分别为  $\pm 0.5\%$  和  $\pm 1.0\%$ 。按式 (1-16)，应选择 0.5 级的仪表才能满足工艺上的要求。

从以上两个例子可以看出，根据仪表校验数据来确定仪表精度等级时，仪表的精度等级应向低靠；根据工艺要求来选择仪表精度等级时，仪表精度等级应向高靠。