



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

传感器及 检测技术

(第二版)

主编 俞云强

CHUANGANQI JI JIANCE JISHU



江苏凤凰教育出版社 凤凰职教



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

传感器及检测技术

(第二版)

主 编 俞云强

图书在版编目(CIP)数据

传感器及检测技术 / 俞云强主编. —南京:江苏凤凰教育出版社, 2018. 6(2024. 8 重印)

ISBN 978-7-5499-3967-1

I. ①传… II. ①俞… III. ①传感器—检测 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 062315 号

机械电子类专业高职高专“十二五”规划教材
书 名 传感器及检测技术

主 编 俞云强
责任编辑 汪立亮
出版发行 江苏凤凰教育出版社
地 址 南京市湖南路 1 号 A 楼, 邮编: 210009
出 品 江苏凤凰职业教育图书有限公司
网 址 <http://www.fhmooc.com>
照 排 南京紫藤制版印务中心
印 刷 三河市鑫鑫科达彩色印刷包装有限公司
厂 址 三河市李旗庄镇崔家窑
电 话 0316-3456566
开 本 787 毫米×1 092 毫米 1/16
印 张 16.75
字 数 330 000
版次印次 2018 年 6 月第 2 版 2024 年 8 月第 7 次印刷
标准书号 ISBN 978-7-5499-3967-1
定 价 42.80 元
批发电话 025-83677909
盗版举报 025-83658893

如发现质量问题, 请联系我们。

【内容质量】电话: 025-83658873 邮箱: sunyi@ppm.cn

【印装质量】电话: 025-83677905

内容简介

本书在叙述了传感器及检测技术的基本概念、测量与误差处理知识、传感器的特性与正确选用等内容的基础上,介绍了各类常用传感器的结构、性能和原理;分析了传感器的测量转换电路和应用实例。同时对智能传感器、微型传感器、生物传感器、自动检测系统和系统的抗干扰技术、无线传感器网络技术等进行讲述。还介绍了传感器在检测系统中的综合应用实例。

本书在内容编排上,由实例引入,按照“任务提出”、“相关知识”、“任务实施”、“其他案例”和“训练一下”几个部分递进完成。采用任务引领的项目课程教学,将传感器与检测技术的知识和技能点融入项目的工作任务之中。

本书可作为高等职业院校机电一体化、自动化、应用电子、数控、机械等专业的教学用书,也可作为有关工程技术人员的参考与自学用书。

前言

随着科学技术的飞速发展,传感器及检测技术也在迅猛发展,传感器的种类越来越多,它的应用已广泛进入科学研究、国防、工农业生产和人们日常生活的各个领域。

本教材自 2010 年出版以来得到了广大读者的关注,使用量也较大。现根据读者的反馈意见以及科学技术发展的需要,对第一版内容进行了增加和修改:

(1) 新增的“新型传感器及应用”项目中,除介绍智能传感器外,还介绍了生物传感器、微型传感器等内容。

(2) 新增的“传感器在检测系统中的综合应用”项目中,除了介绍传感器在自动线中的应用外,还介绍了传感器在现代汽车中的应用、传感器在智能洗衣机中的应用等内容。

(3) 对部分章节内容进行了一些修改及补充。

本教材采用任务引领的项目课程教学法,将传感器及检测技术的知识和技能点融入项目的工作任务之中,在符合工作过程的基础上,充分考虑了学习者的认知心理过程,将课程内容划分为十个项目,再具化为多个工作任务的教学内容。每个工作任务从典型检测对象着手,选择合适的传感器,通过认识该类传感器的外形、性能指标,基本结构和基本概念,到测量原理的介绍,在掌握基本知识的基础上,介绍相应的测量转换电路、信号处理电路,来完成检测任务。再安排一个训练,供学习者在实践中掌握知识、提高技能。

书中还介绍了测量及误差处理的基本知识;传感检测新技术;自动检测系统和系统的抗干扰技术;无线传感器网络技术及传感器的几个综合应用实例等内容。

在本书的编写中,作者结合了多年来从事传感器与检测技术的教学、科研和生产的实践与体会,学习、吸收了国内外文献资料的精华撰写而成的。本书的编写以“够用、实用”为原则,尽可能地紧密结合生产实践和日常生活,突出应用,满足高职教育的需求。

本书由俞云强任主编。袁玉国参编了项目十,叶彩霞参编了项目四,黎雪芬参编了项目六,其他章节均由俞云强编写,王亚南等多位企业实践专家参与了本书部分章节的编写,并提供了很多素材。全书由机电类专业高职高专“十二五”规划教材编制委员会组织主审。

在本书的编写过程中参阅了多种教材和专著,在此向其编、著者表示衷心的感谢。

感谢。

由于本书编著者水平有限,时间仓促,书中难免有欠妥和错误之处,恳请广大读者批评、指正。

编者

目 录

绪 论	001
一、检测技术与传感器的作用和地位	001
二、检测系统简介	002
三、检测技术与传感器的发展趋势	003
四、本课程的内容、任务和学习方法	004
思考与练习	005
 项目一 检测技术与传感器的认知	006
任务一 传感器的认知	006
一、传感器的定义	006
二、传感器的组成	006
三、传感器的分类	007
任务二 测量误差的认知及处理	008
一、测量的概念及方法	008
二、测量误差的认知	010
三、测量误差的分类	012
四、测量误差的处理	013
任务三 传感器的特性及选用认知	017
一、传感器的特性	017
二、传感器的选用认知	019
思考与练习	021

项目二 速度检测	022
任务一 电涡流传感器用于转速检测	022
任务提出	022
相关知识	022
一、电涡流传感器外形结构和性能指标	023
二、电涡流传感器的工作原理	024
三、高频反射式电涡流传感器	024
四、低频透射式电涡流传感器	024
五、电涡流传感器的测量电路	025
任务实施	026
其他案例	027
训练一下	029
实验一 用电涡流传感器检测位移	029
任务二 汽车行车速度检测	031
任务提出	031
相关知识	032
一、霍尔传感器的外形结构和性能	032
二、霍尔传感器的工作原理	034
三、霍尔传感器的测量电路及补偿	035
四、霍尔集成传感器	036
任务实施	036
其他案例	038
训练一下	040
实验二 直流激励时用霍尔传感器检测位移	041
任务三 磁电式传感器用于转速检测	042
任务提出	042
相关知识	042
一、磁电式传感器的工作原理	042
二、变磁通式磁电传感器	043
三、恒磁通式磁电传感器	043
任务实施	043
其他案例	045
训练一下	046
任务四 光电传感器用于转速检测	047
任务提出	047
相关知识	047

一、光电传感器的工作原理	047
二、光电器件	048
三、光电传感器的组成及测量方法	052
任务实施	052
其他案例	053
训练一下	057
思考与练习	057

项目三 位移检测

060

任务一 数控机床的位移检测(光电编码器)

060

任务提出

060

相关知识

061

一、光电编码器和码盘的外形图

061

二、增量式编码器

061

三、绝对式编码器

062

任务实施

063

其他案例

065

训练一下

066

任务二 数控机床的位移检测(光栅传感器)

066

任务提出

066

相关知识

067

一、光栅传感器的外形与结构

067

二、光栅的类型与结构

068

三、莫尔条纹的形成及特性

068

四、光栅传感器的组成

069

五、光栅传感器测量位移的原理

069

六、光栅传感器的测量电路

070

任务实施

073

训练一下

074

任务三 数控机床的位移检测(磁栅传感器)

074

任务提出

074

相关知识

075

一、磁栅传感器的外形

075

二、磁尺

075

三、磁头的结构和原理

076

四、磁栅传感器的组成和测量原理

077

任务实施	077
训练一下	078
任务四 轴承滚柱的直径检测	078
任务提出	078
相关知识	078
一、电感式测微传感器的外形与结构	078
二、自感式电感传感器	079
三、互感式电感传感器	083
任务实施	086
其他案例	087
训练一下	088
实验三 差动变压器检测位移	088
思考与练习	089
 项目四 力检测	 091
任务一 电子台秤的重量检测	091
任务提出	091
相关知识	091
一、测力传感器中的弹性敏感元件	091
二、电阻应变式传感器	093
三、压阻式压力传感器	097
任务实施	098
其他案例	100
训练一下	100
实验四 金属应变片与单臂、半桥和全桥电路检测重量	101
任务二 桥墩水下部位缺陷的检测	105
任务提出	105
相关知识	105
一、压电传感器、压电材料的外形和技术指标	105
二、压电传感器的工作原理	106
三、压电传感器的等效电路与测量电路	109
四、压电传感器的使用注意事项	110
任务实施	110
其他案例	111
训练一下	113
思考与练习	113

项目五 温度检测	115
任务一 轧钢炉的温度检测	116
任务提出	116
相关知识	116
一、热电偶的外形结构、种类和特性	117
二、热电偶工作原理	119
三、热电偶的基本定律	120
任务实施	122
其他案例	124
训练一下	125
任务二 管道温度的检测	125
任务提出	125
相关知识	126
一、热电阻的外形、结构及性能	126
二、热电阻的工作原理	127
任务实施	127
其他案例	128
训练一下	129
任务三 电冰箱温度检测	129
任务提出	129
相关知识	130
一、热敏电阻的外形结构及符号	130
二、热敏电阻的工作原理	130
三、热敏电阻的分类	131
任务实施	131
相关案例	132
训练一下	134
任务四 空调器的温度检测	134
任务提出	134
相关知识	134
一、AD590 系列集成温度传感器	135
二、AN6701S 集成温度传感器	135
任务实施	136
其他案例	137
训练一下	137
任务五 非接触式体温检测	138

任务提出	138
相关知识	138
一、红外辐射	138
二、红外探测器	139
三、红外测温的特点	141
任务实施	141
相关案例	142
训练一下	144
思考与练习	144
项目六 液位检测	145
任务一 汽车油箱的液位检测	145
任务提出	145
相关知识	145
一、电容式液位传感器的外形	145
二、各种电容式传感器的结构	145
三、电容式传感器的工作原理	145
四、电容式传感器的测量电路	148
任务实施	152
其他案例	154
训练一下	156
实验五 电容式传感器检测位移	156
任务二 高压密闭容器的液位检测	158
任务提出	158
相关知识	158
一、超声波传感器的外形、结构和特性	158
二、超声波的特性	159
三、超声波传感器的工作原理	160
四、超声波探测用耦合剂	160
任务实施	160
其他案例	162
训练一下	164
思考与练习	165
项目七 环境量检测	167
任务一 厨房可燃气体泄漏检测	167

任务提出	167
相关知识	168
一、半导体气敏传感器	168
二、接触燃烧式气敏传感器	170
三、固体电解质气体传感器	170
四、电化学气体传感器	170
任务实施	171
其他案例	172
训练一下	173
任务二 粮仓湿度检测	174
任务提出	174
相关知识	174
一、湿度的概念	175
二、湿敏器件的外形	175
三、湿敏传感器的结构与工作原理	176
四、湿敏传感器的使用注意事项	177
任务实施	178
其他案例	180
训练一下	182
任务三 噪声检测	183
任务提出	183
相关知识	183
一、声波	183
二、声敏传感器的分类	184
三、常用传声器的介绍	184
任务实施	184
其他案例	185
训练一下	186
思考与练习	187
 项目八 新型传感器及应用	 189
任务一 智能传感器	189
一、智能传感器的概念	189
二、智能传感器的功能与特点	190
三、智能传感器的组成	191
四、智能传感器的实现	191

五、智能传感器的应用	192
任务二 生物传感器	194
一、生物传感器概述	194
二、生物传感器的基本原理	195
三、酶传感器及应用	196
四、微生物传感器及应用	197
五、免疫传感器及应用	198
任务三 微型传感器	199
一、微机电系统	199
二、微型传感器	200
三、常用微型传感器及应用	201
思考与练习	202
 项目九 检测系统与无线传感器网络	 203
任务一 检测系统	203
一、检测系统的组成框图	203
二、检测系统的工作原理	203
三、检测系统各部分介绍	204
任务二 检测系统的抗干扰技术	209
一、干扰与噪声	209
二、两种测量干扰	210
三、外部干扰的抑制	211
四、内部干扰的抑制	212
任务三 无线传感器网络	213
一、无线传感器网络的概念	213
二、无线传感器网络的主要功能	214
三、无线传感器网络的主要特征	214
四、无线传感器网络的组成	215
五、无线传感器网络的应用	218
思考与练习	219
 项目十 传感器在检测系统中的综合应用	 220
任务一 传感器在自动线中的应用	220
一、光电开关及应用	220
二、磁性开关及应用	222
三、霍尔接近开关及应用	224

四、电涡流式接近开关及应用	226
五、光纤传感器及应用	226
六、电容式接近开关及应用	227
任务二 传感器在模糊控制洗衣机中的应用	229
一、模糊控制系统的介绍	229
二、模糊控制洗衣机	229
三、模糊控制洗衣机中的传感检测系统	230
任务三 传感器在现代汽车中的应用	231
一、发动机控制用传感器	231
二、底盘控制用传感器	233
三、车身控制用传感器	233
四、胎压监测传感器	234
五、车用传感器发展趋势	234
思考与练习	235
附录 1 热电偶分度表	236
附录 2 热电阻分度表	244
附录 3 测量的基准、标准和单位制简介	246
附录 4 几种常用传感器的性能比较	248
参考文献	250

项目一 检测技术与传感器的认知



学习目标

1. 能掌握检测技术与传感器的基本概念。
2. 能了解检测技术与传感器的作用、地位和发展方向。
3. 能掌握传感器的组成及各组成部分的作用。
4. 能掌握误差的基本概念,熟悉几种测量误差的定义和表示。
5. 能区分各种测量误差并进行处理。
6. 能掌握传感器的基本特性和传感器的选用原则。

任务一 传感器的认知

一、传感器的定义

根据国家标准(GB/T 7665—2005)《传感器通用术语》,传感器(transducer/sensor 感觉)的定义为:“能感受(或响应)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或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用的输出信号的转换元件以及相应的电子线路所组成。”这一定义表述了传感器的主要内涵,包括了以下含义:

- ① 测量器件或装置——完成信息的获取任务。
- ② 输入量——感受规定的被测量。它可以是物理量、化学量、生物量等,但不能受其他量的影响。例如,温度传感器只能用来测温,不能受其他物理量的影响。
- ③ 输出量——可用的输出信号,即某种便于传输、转换、处理和显示的信号。它可以是光、气或电量等。
- ④ 输入输出间具有“一定规律”——输入与输出是对应关系,应具有一定的精确度。

由于电学量(电压、电流、电阻等)便于测量、转换、传输和处理,因此传感器一般都是以电量输出的,以至于可以简单地说:传感器是一种以一定的精确度把非电量转换为电量的器件或装置。

二、传感器的组成

传感器从字面上理解,具有一感二传的功能,即感受被测信息,再传送出去,因此,传感器由敏感元件和转换元件组成。但由于它的输出信号较弱,因此需要由后续的信号调节与转换电路进行放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的信号。随着半导体和集成电路技术的发展,传感器的信号调节与转换电路往往直接安装在传感器的壳体里或与敏感元件、转换元件一起集成在同一芯片内,这样,传感器就由敏感元件、转换元件和转换电路组成。其

组成框图如图 1-1 所示。

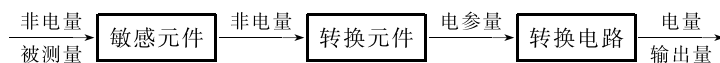


图 1-1 传感器的组成框图

1. 敏感元件

敏感元件是直接感受被测量、并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。它是传感器技术的核心，是设计和制作传感器的关键。

2. 转换元件

转换元件是将敏感元件的输出量转换成电路参数量的元件。

3. 转换电路

转换电路是将电参量转换成可直接利用的电信号的电路。

需要说明的是有些被测非电量可直接变换为电参量，这时传感器中的敏感元件和转换元件就合二为一了。

三、传感器的分类

传感器的种类繁多，即使同一种被测量也可以用不同类型的传感器来测量，如位置检测，可以用光电、磁电、电感、电容等多种传感器进行测量；而一种传感器又可测量多种物理量，如电容式传感器可用来测位移、压力、荷重、加速度等。因此，传感器的分类方法很多，常用的分类方法有：

1. 按被测量分类

按被测量分类，即按照传感器的输入信号分类，它能够很方便地表示传感器的功能，便于用户的使用。可以分为温度、压力、位移、转速、加速度、位置、湿度、气体浓度、流量、流速等传感器。

2. 按传感器的工作原理分类

按传感器的工作原理可分为电阻式、电感式、电容式、磁电式、光电式、压电式、热电式、霍尔式、超声波、激光、光纤等传感器。这种分类便于从原理上认识输入与输出之间的变换关系，有利于专业人员从原理、设计及应用上进行归纳性的分析与研究。

3. 按能量关系分类

按能量关系分类，可分为能量转换型和能量控制型两类。

能量转换型又称为发电型或有源传感器。这种传感器直接由被测对象输入能量使其工作，无需外加电源。如热电偶、压电片、光电池等传感器。

能量控制型又称参量型或无源传感器。这种传感器要从外部获得能量使其工作，需外加电源。如电阻式、电容式、电感式等传感器。

4. 按信号转换特征分类

按信号转换特征分类，可分为结构型和物性型两类。

结构型：通过传感器的结构参量发生变化实现信号变换。如电容式传感器根据两电极板的间距或面积发生变化从而使电容量改变。

物性型：利用某些物质的某些性质随被测参数变化来实现信号变换。如压电传感器是利用石英晶体的压电效应实现测量的。

任务二 测量误差的认知及处理

一、测量的概念及方法

（一）测量的概念

测量是人们认识和改造客观世界的一种必不可少的重要手段。它是把被测未知量与同性标准量进行比较,确定被测量对标准量的倍数,并用数字表示这个倍数的过程。

测量的结果包括数值大小和测量单位两个部分。数值的大小可以用数字表示,也可以用曲线或图形表示,但都必须标明单位,否则测量结果没有任何意义。

测量的步骤包括比较、示差、平衡和读数四个步骤。以天平测量为例:

- ① 比较:被测量和标准量(砝码)分别放到天平两边秤盘上比较。
- ② 示差:观察指针位置的变化值,即示差。
- ③ 平衡:调整砝码数值,使之平衡。
- ④ 读数:根据砝码多少,读出物体质量的值,即读数。

（二）测量方法

测量方法是实现测量过程所采用的具体方法。

1. 按测量手续分类

测量方法按测量手续分类:有直接测量、间接测量与联立测量。

（1）直接测量

直接测量是用精度较高的设备直接对被测量进行测量并得到测量结果。例如:温度计测温、万用表测电压、卡尺测工件的长度等。

特点:直接测量过程中不需要进行任何运算,简单而迅速,但是测量精度往往不容易达到很高。

（2）间接测量

间接测量是在使用仪表进行测量时,首先对与被测量有函数关系的几个量进行测量,将测量值代入函数关系式,经过计算得到测量所需要的结果。

例如:① 测功率 $P = IU$ 时,先分别测出 I 和 U 的值,再通过功率 $P = IU$ 的函数关系计算得到功率 P 。

② 测温度时,物质电阻率随温度而变化,因此可通过测物体的电阻值而得到温度值。

特点:手续较多,花费时间较长。通常用于不能直接测量或没有直接测量的仪表的场合。

（3）联立测量

联立测量是被测量与多个元素有关,必须经过求解联立方程组才能得到最后的结果。

进行联立测量时,一般要改变测试条件才能获得一组联立方程所需的数据。

例如:在 $0\sim 650^{\circ}\text{C}$ 时,热电阻的电阻值与温度之间的关系为:

$$R_t = R_0 + at + bt^2$$

式中, R_0 为温度 0°C 时的电阻值; a 、 b 为温度系数。

要求取温度系数 a 和 b ,必须在两种温度 t_1 和 t_2 下,分别测得对应的 R_{t_1} 和 R_{t_2} ,再代入公式解联立方程得到。

特点:手续复杂,花费时间长,仅适用于科学实验或特殊场合。

2. 按测量方式分类

测量方法按测量方式分类:有偏差法、零位法和微差法。

(1) 偏差法

偏差法是在测量过程中,用仪表指针的位移决定被测量的测量方法。

这种方法的仪表内没有标准量具,只有经过标准量具校正过的标尺或刻度盘。例如:用弹簧秤称重量;用电压表测量电压。

特点:测量过程简单而迅速,但是测量结果的精度较低。

(2) 零位法

零位法是在测量过程中,用已知的标准量去平衡或抵消被测量的作用,并用指零仪表的零位指示测量系统的平衡状态,在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定被测未知量的测量方法。

这种方法的测量系统内具有标准量具,测量误差取决于标准量具的误差。例如:天平称重。

特点:可以获得较高的测量精度,指零机构越灵敏测量分辨率越高。这种测量过程比较复杂,只适合于测量静态或缓变信号。

(3) 微差法

微差法是零位法和偏差法的组合。将被测的未知量与已知的标准量进行比较,并取得差值后,再用偏差法测得此值。

特点:反应快,测量精度较高。

3. 其他测量方法

(1) 接触测量和非接触测量

接触测量是传感器或测量器具的测量头在一定测量力的作用下,与被测物体直接接触的测量法。这种测量方式稳定可靠,但存在接触形式和测量力带来的影响。

非接触测量是传感器或测量器具的测量头与被测对象不发生机械接触的测量。它是利用物理、化学及声、光学的原理,使被测对象与检测器件之间不发生物理上的直接接触而对被测量进行检测的方法。这种测量无负载效应,对被测对象影响较小。

(2) 静态测量和动态测量

静态测量是指在测量期间的被测量是恒定值的测量。动态测量是为了确定随时间变化的被测量的瞬时值而进行的测量。

(3) 被动测量和主动测量

产品加工完成后的测量为被动测量;正在加工过程中的测量为主动测量。被动测量只

能发现和挑出不合格品;而主动测量可通过测得值的反馈,控制设备的加工过程,预防和杜绝不合格品的产生。

二、测量误差的认知

(一) 测量误差的基本概念

1. 测量误差

测量误差是检测结果与被测量的客观真值之间的差值。

2. 真值

真值是在确定的时间、地点和状态下,被测量表现出来的实际大小。真值是客观存在的,又是未知的。

3. 标称值

标称值是计量或测量器具上标注的量值,如标准砝码上标出的 1 kg。

4. 示值

示值是由测量仪器给出或提供的量值,也称测量值。

5. 精确度(精度)

精确度是测量结果中系统误差与随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度。

6. 重复性

重复性是在相同条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。

7. 误差公理

误差公理是指一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验的过程之中。

(二) 测量误差的来源

在测量过程中,误差的来源主要有以下几个方面:

1. 测量装置误差

测量装置误差包括传感器和测量仪器仪表的误差、标准件的误差以及装卡附件的误差。传感器和测量仪器仪表的误差如设计、制造误差;标准件的误差如标准量块、标准线纹尺、标准电池、标准电阻、标准砝码等所体现量值的误差;装卡附件的误差如装卡定位等造成的误差。

2. 测量方法误差

测量方法不完善或测量所依据的理论公式本身的近似性引起的误差。

3. 环境误差

各种环境因素与规定的标准状态不一致而引起的测量装置和被测量本身的变化所造成的误差。如温度、湿度、气压、振动、照明、电磁场等所引起的误差。

4. 人员误差

测量人员因技术能力、工作疲劳、固有习惯等因素引起的误差。它的大小取决于测量人员的操作技能和其他主观因素。

(三) 测量误差的表示法

1. 绝对误差

绝对误差 Δx 是指被测量的指示值 x 与真值 x_0 之间的差值。

$$\text{绝对误差 } \Delta x = \text{指示值 } x - \text{真值 } x_0 \quad (1-1)$$

由于真值是未知的,实际应用时用标准表的测量值代替真值,称为实际值 x_0 。

$$\text{绝对误差 } \Delta x = \text{指示值 } x - \text{实际值 } x_0 \quad (1-2)$$

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量。

绝对误差可用来评价相同被测量的测量精度,绝对误差越小,指示值越接近真值,测量精度越高。但这一结论不适用于不同值的测量精度。

例如:测量两个不同值的电阻:

真 值	指 示 值	绝 对 误 差	测 量 准 确 度
10 Ω	10.1 Ω	0.1 Ω (小)	低
1 000 Ω	1 001 Ω	1 Ω (大)	高

因此,绝对误差 Δx 不能准确反映不同值的测量精度,为此要引入相对误差的概念。

2. 相对误差

相对误差 γ 是用绝对误差 Δx 与真值(实际值) x_0 比值的百分数来表示的。因被测量指示值 x 与真值 x_0 接近,可近似用绝对误差与指示值的百分数来表示。

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-3)$$

相对误差可用于评价不同被测量的测量精度,相对误差越小,测量准确程度越高。

但相对误差不适用于衡量仪器仪表本身的质量。因为在正常工作条件下,通常认为仪器仪表在整个测量范围的最大绝对误差是不变的,同台仪器仪表随着被测量的减小,指示值 x 减小,相对误差会变大。要减小仪器仪表的相对误差,一般应在满量程 $\frac{2}{3}$ 以上进行测量。

为了正确衡量仪器仪表的质量,引入引用误差和最大引用误差。

3. 引用误差(或满度相对误差)

引用误差 γ_n 是绝对误差 Δx 与仪器仪表量程 x_m 比值的百分数。

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

4. 最大引用误差

最大引用误差 γ_{nm} 是最大绝对误差 Δx_m 与仪器仪表量程 x_m 比值的百分数。

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

最大引用误差常被用来确定仪表的精度等级 K ,即

$$K = \left| \frac{\Delta x_m}{x_m} \right| \times 100\% \quad (1-6)$$

我国电工仪表常见的精度等级有：0.1级、0.2级、0.5级、1.0级、1.5级、2.5级和5.0级七个等级。从仪表面板上可看到仪表精度等级的标志，精度等级数值越小，仪表精度越高，价格也越贵。

例如，用精度等级为1.0级、量程为10V电压表测电压，在使用时它的最大引用误差不超过±1.0%，可能产生的最大绝对误差为：

$$\Delta x_m = \pm 1.0\% \times 10\text{ V} = \pm 0.1\text{ V}$$

三、测量误差的分类

(一) 按测量误差出现的规律分类

测量误差按其产生的原因、出现的规律及其对测量结果的影响，可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

在相同的条件下，多次重复测量同一量时，误差的大小和符号保持不变，或在条件改变时，遵循一定规律变化的误差。

系统误差的产生原因是由测量仪器、量具本身制造、安装、调整或者是使用方法不当造成的。

系统误差表明测量结果的准确度，即仪表指示值有规律地偏离真值的程度。系统误差越小，测量结果准确度越高。

2. 随机误差

在相同的条件下，多次重复测量同一量时，误差的大小和符号均无规律变化的误差。

随机误差的产生原因是由周围环境的随机因素引起的。

随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度，即分散性，通常用精密度表示。随机误差越大，测量结果越分散，精密度就越低。

测量的精密度和准确度的综合反映，可用精确度（简称精度）来表示。

精密度、准确度和精确度三者的示意图如图1-2所示。

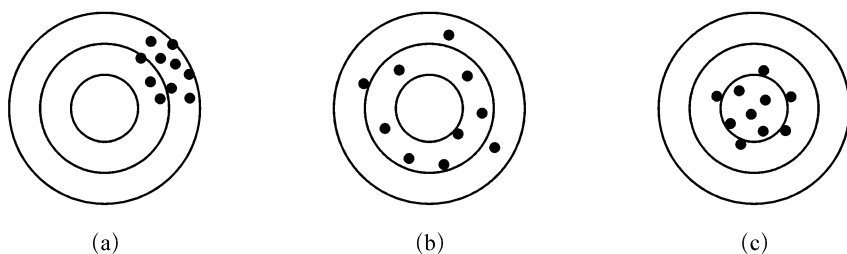


图1-2 精密度、准确度和精确度示意图

(a) 精密度高 (b) 准确度高 (c) 精确度高

系统误差和随机误差两者是同时存在,难以严格区分的。

3. 粗大误差

粗大误差是明显歪曲测量结果的误差。

粗大误差的产生原因是由于外界重大干扰、仪器仪表故障或人为因素等造成的。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,应剔除。

(二) 按被测量与时间的关系分类

测量误差按被测量与时间的关系可分为静态误差与动态误差两大类。

1. 静态误差

静态误差是在被测量不随时间变化时测得的测量误差。

2. 动态误差

动态误差是在被测量随时间变化过程中进行测量时所产生的附加误差。它的大小为动态中测量和静态中测量所得误差值的差值。

四、测量误差的处理

(一) 系统误差的处理

系统误差的特点是其出现的有规律性,因此对系统误差的处理可通过理论分析和实验方法来确定,采用修正值或补偿矫正的方法进行消除或减小。

1. 测量前采用的方法

① 从产生系统误差的来源上考虑,设法消除或尽量减小其影响。例如,发现测量值中系统误差的来源是传感器的零位误差,则可采取相应措施调整零位。

② 采用修正方法来消除。在测量前,送计量部门鉴定或通过标准的仪器设备比对,得到修正值。在测量中,只要在测量值中加入修正值,就可以消除或减小系统误差。

2. 测量中采用的方法

(1) 交换法

在测量中将引起系统误差的某些条件相互交换,而保持其他条件不变,使引起系统误差的因素对测量结果起相反的作用,从而抵消系统误差。

例如:用等臂天平称量时,由于天平左右两个臂长的微小差别,会引起称量的系统误差,如果被称物与砝码在天平左右秤盘上交换,称量两次,取平均值就能消除不等臂引起的系统误差。

(2) 抵消法

改变测量中的某些条件,使得前后两次测量结果的误差相反,取其平均值以消除系统误差。

例如:用安培表测量电流时,为消除恒定磁场对读数的影响,可以将电流表旋转 180° 再测量一次,取两次测量结果的平均值。

(3) 替代法

在测量条件不变的情况下,用已知量替换被测量,达到消除系统误差的目的。

例如:用天平测量时,先使被测物 X 与砝码 A 平衡,再取下被测物 X,放上砝码 B 与砝

码 A 平衡,则砝码 B 的重量就是被测物 X 的重量,而与天平的精度无关。

(4) 对称测量法

对称测量法用于消除线性变化的系统误差。事实上,很多随时间变化的系统误差,在短时间内均可看成线性变化的。复杂变化的系统误差,短时间内也可近似作为线性系统误差。因此,一切精密实验均可采用对称测量法。

例如:用标准温度计 a 来校正被检温度计 x 时,由于校正时炉温 T 随时间成线性变化,如图 1-3 所示,为了求得被检温度计的示值误差 δ ,采用对称测量法,标准温度计和被检温

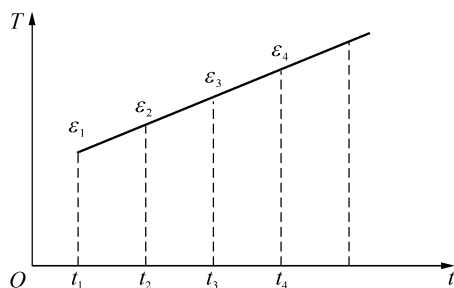


图 1-3 炉温随时间变化图

度计等时间间隔测量四次,测量顺序为 a 、 x 、 x 、 a 或 x 、 a 、 a 、 x ,则有:

$$t_1 \text{ 时: } a = T + \epsilon_1 \quad t_2 \text{ 时: } x = T + \epsilon_2 + \delta$$

$$t_3 \text{ 时: } x' = T + \epsilon_3 + \delta \quad t_4 \text{ 时: } a' = T + \epsilon_4$$

由于 $t_2 - t_1 = t_4 - t_3$, 则有 $\epsilon_2 - \epsilon_1 = \epsilon_4 - \epsilon_3$,

$$\text{得到 } \delta = \frac{x + x'}{2} - \frac{a' + a}{2}$$

所以误差测量值不受线性变化的系统误差 ϵ 的影响。

(5) 补偿法

在系统中采取补偿措施,自动消除系统误差。

例如:用热电偶测温时,冷端温度的变化会引起系统误差。在系统中采用补偿电桥,就可以自动消除误差。

(二) 随机误差的处理

存在随机误差的测量结果中,虽然单个测量值误差的出现是随机的,但就误差的整体而言是服从一定的统计规律的。因此通过增加测量次数,利用概率论的一些理论和统计学的一些方法,可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性,并进行测量结果的数据统计处理。

1. 概率和正态分布曲线

(1) 概率

概率是描述某一事件或现象出现的客观可能性的大小。

必然出现——概率=1;

必然不出现——概率=0;

可能出现的随机事件——概率=0~1。

例如:抛硬币:我们会发现出现正面和反面的可能性是一样的,即概率均为 0.5。

下面做一个试验,若现在为北京时间九点整,我们统计了全班 48 位学生的手表指示值(总数 $n = 48$),得到表 1-1 的数据。表中的频率为指示值或随机误差落在某个区间的相对次数。如果以随机误差 δ_i 为横坐标,频率 n_i/n 为纵坐标,画出它们的关系曲线即为频率直方图,如图 1-4 所示。

表 1-1 全班学生手表指示值

序 号	指 示 值	误差 δ_i	出现次数 n_i	频率 $n_i/n(\%)$
1	8:55	-5	1	2.1
2	8:56	-4	1	2.1
3	8:57	-3	3	6.3
4	8:58	-2	6	12.5
5	8:59	-1	8	16.7
6	9:00	0	10	20.8
7	9:01	+1	9	18.8
8	9:02	+2	5	10.4
9	9:03	+3	2	4.2
10	9:04	+4	2	4.2
11	9:05	+5	1	2.1

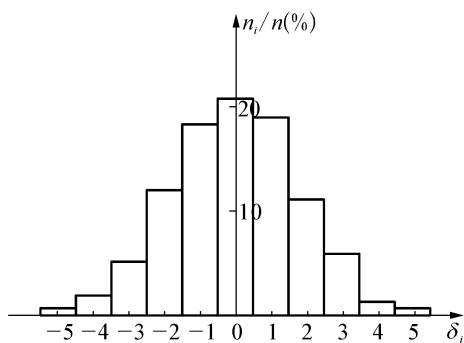


图 1-4 随机误差的频率直方图

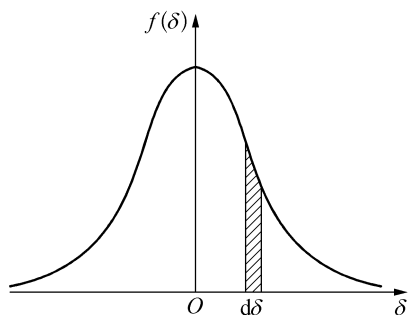


图 1-5 随机误差的正态分布曲线

(2) 正态分布曲线

当测量次数 $n \rightarrow \infty$, 测量误差 $\Delta\delta \rightarrow d\delta$ 时, 无限多个直方图的顶点的连线就称为随机误差的正态分布曲线, 如图 1-5 所示。

2. 随机误差的特性

多数随机误差服从正态分布规律, 测量结果符合正态分布曲线。对正态分布曲线进行分析, 也就发现了随机误差对于单次测量具有随机性, 但当多次重复测量时, 具有以下的特性:

(1) 对称性

绝对值相等、符号相反的误差在多次重复测量中出现的可能性相等, 即正负误差出现的概率相同。

(2) 有界性

绝对值很大的误差出现的概率趋于零, 即误差有一定的实际限度。

(3) 抵偿性

相同条件下,当 $n \rightarrow \infty$ 时,随机误差的代数和等于零。

(4) 单峰性

绝对值小的误差出现的概率大,绝对值大的误差出现的概率小。

由于随机误差具有上述特性,因此随机误差尽管不能消除,但在等精度重复测量次数足够大时,可用算术平均值替代真值,并用统计分析的方法估算出它可能的取值范围。

3. 算术平均值和标准误差

(1) 算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-7)$$

式中, $\bar{x}$ 为算术平均值; x 为测量值; n 为测量次数。

(2) 标准误差

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-8)$$

因此标准误差又称方均根误差。由于上式中的真值 x_0 是未知的,当测量次数为有限值 n 时,标准误差的估计值由贝赛尔公式给出:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-9)$$

式中, $\bar{x}$ 为算术平均值; v_i 为剩余误差。

(3) 算术平均值的标准误差

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-10)$$

从上式得出: 算术平均值的标准误差为单次测量值的标准误差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍。即在有限次等精度重复测量中,用算术平均值估计被测量值比用任何一个测量值更为合理和可靠。在实际测量中,一般测量次数取 5~10 次即可。

4. 测量结果的正确表示和置信度

具有随机误差的测量结果,可用算术平均值替代真值,并用标准误差给出可能范围。具体表示如下:

$$x_0 = \bar{x} \pm K\sigma(\bar{x}) = \bar{x} \pm K\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (1-11)$$

式中, K 为置信系数。

由理论计算可得:

当 $K = 1$ 时,测量结果落在 $\pm\sigma(\bar{x})$ 范围内的概率为 68.27%。

当 $K = 2$ 时,测量结果落在 $\pm 2\sigma(\bar{x})$ 范围内的概率为 95.45%。

当 $K = 3$ 时,测量结果落在 $\pm 3\sigma(\bar{x})$ 范围内的概率为 99.73%。

上面的数值范围称为置信区间;在该置信区间内包含真值的概率称为置信概率;置信区间与置信概率的结合称为置信度。图 1-6 所示为不同置信区间的概率分布示意图。

(三) 粗大误差的处理

在测量数据中发现有异常数据时,一般从以下两方面来考虑:

1. 定性分析

对测量设备、测量条件、测量步骤进行分析,看是否存在问题而引起出现异常数据。这种判断无严格规则,属于定性判断。

2. 定量判断

用概率统计和误差理论知识建立的粗大误差判断准则为依据,进行定量判断,以确定该异常值是否应剔除。在工程上常用拉依达准则(3σ 准则)来判断粗大误差。

拉依达准则是依据对于服从正态分布的等精度测量,其某次测量值与真值的误差大于 3σ 的可能性仅为 0.27%,因此将测量误差大于 3σ 的测量值作为坏值予以剔除。实际应用中,用算术平均值替代真值,则拉依达准则表达式为:

$$|\Delta x_k| = |x_k - \bar{x}| > 3\sigma \quad (1-12)$$

此时测量值 x_k 为坏值,应予剔除。

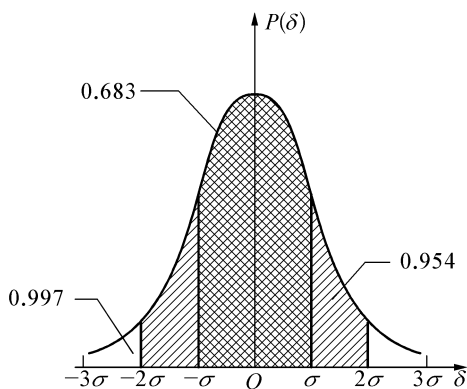


图 1-6 不同置信区间的概率分布示意图

任务三 传感器的特性及选用认知

一、传感器的特性

传感器的特性主要是指输入与输出的关系,包括静态特性和动态特性两类。

(一) 静态特性

定义:当被测量不随时间变化或变化缓慢时,认为传感器与检测系统的输入量和输出量都与时间无关。这样确定的检测装置的性能参数称为静态特性。静态特性主要由以下性能指标来描述。

1. 线性度

线性度又称非线性度或非线性误差,是指实际输入输出特性曲线与拟合直线(理想直线)之间的最大偏差与传感器满量程输出值的百分比,如图 1-7 所示。线性度可用公式(1-13)表示:

$$E_L = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中, $\Delta L_{\max}$ 是实际输入输出曲线与拟合直线之间的最大偏差; Y_{FS} 为输出满量程值。

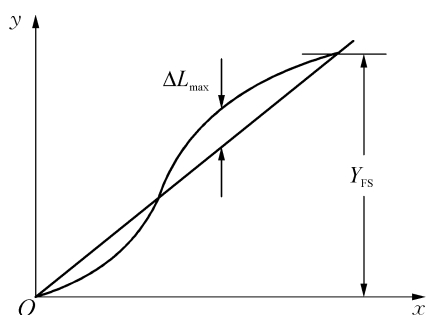


图 1-7 线性度示意图

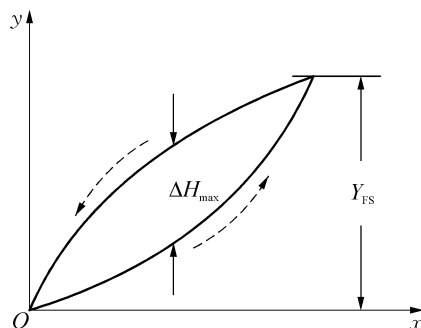


图 1-8 迟滞性示意图

2. 迟滞性

迟滞性又称回差或滞后,表示传感器与检测系统在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输入输出特性曲线之间最大差值与传感器满量程输出值的百分比,如图 1-8 所示。迟滞性可用公式(1-14)表示:

$$E_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 是输入输出特性曲线正反行程之间的最大差值。

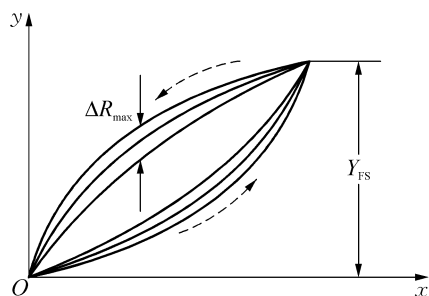


图 1-9 重复性示意图

3. 重复性

重复性是指输入量按同一方向作全量程连续多次测试时,所得特性曲线最大不重复误差与传感器满量程范围值的百分比,如图 1-9 所示。重复性可用公式(1-15)表示:

$$E_R = \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中, $\Delta R_{\max}$ 是输出最大不重复误差。

4. 灵敏度

灵敏度是指传感器与检测系统对被测量变化的反应能力。当输入量 x 有一个变化量 Δx 时,引起输出量 y 有相应的变化量 Δy ,则输入变化量与输出变化量之比称为灵敏度。灵敏度可用公式(1-16)表示:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-16)$$

灵敏度的注意点:

- ① 灵敏度 S 是有量纲的。但若 x 与 y 是同类量时, S 无量纲,为放大倍数 K 。

② 若系统是有多个环节组成的串联式系统,每个环节的灵敏度分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,如图 1-10 所示,则系统总灵敏度为各个环节灵敏度的乘积,即 $S = S_1 S_2 S_3$ 。

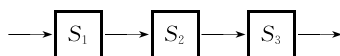


图 1-10 串联式系统示意图

③ 灵敏度越高,测量精度越高,但测量范围越窄,稳定性越差。

5. 分辨率

分辨率是指传感器能够检测出被测量的最小变化量,是有量纲的数。当被测量的变化小于分辨率时,传感器对输入量的变化无任何反应,对数字式仪表,该表的最后一位数值就是它的分辨率;一般模拟式仪表分辨率为最小刻度分格数值的一半。

灵敏度越高,分辨率越好。

6. 测量范围与量程

传感器所能测量的最大被测量称为测量上限,最小被测量称为测量下限。用测量上限和测量下限表示的测量区间称为测量范围。如某温度计测量范围为 $-20 \sim +200^{\circ}\text{C}$ 。

测量上限和测量下限的代数差称为量程。如上述温度计量程为 220°C 。

7. 稳定性

稳定性是指传感器在较长时间内保持其原性能的能力。即对于相同输入量,其输出量发生变化的程度。

8. 漂移

漂移是指在外界干扰的情况下,在一定的时间间隔内,传感器输出量发生与输入量无关的变化程度,包括时间漂移和温度漂移。时漂是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温漂是指周围温度变化引起的零点或灵敏度的变化。

(二) 动态特性

动态特性是指传感器与检测系统的被测量随时间变化很快时,输出对输入的响应特性。其通常是用实验方法求得的。

二、传感器的选用认知

(一) 传感器的选择要求

由于传感器在原理与结构上千差万别,即使是测量同一物理量,也有多种原理的传感器可供选用。如何合理选用传感器,是应用时首先要解决的问题。一般传感器的选择应根据测量对象与测量环境,从测试条件与目的、传感器的性能指标、传感器的使用条件、数据采集和辅助设备配套情况,以及价格、备件和售后服务等多种因素综合考虑。

1. 根据测量目的和测量对象确定传感器类型

① 测量目的是要直接得到被测量,作为过程控制量或是其他用途。

② 测量对象为固体还是液体;采用接触式还是非接触式传感器;静态测量还是动态测量;有无负荷效应及对被测量的影响;被测位置对传感器有无体积要求等。

③ 测量环境包括安装现场条件、环境条件(温度、湿度和振动等)、过载保护、信号传输距离、与传感器连接的系统负荷阻抗情况等。

2. 根据传感器技术指标确定传感器种类

- ① 静态特性要求,如测量范围、测量精度、灵敏度、分辨率、迟滞性和重复性等。
- ② 动态特性要求,如快速性和稳定性等。
- ③ 信息传递要求,如形式和距离等。
- ④ 过载能力要求,如机械、电气和热的过载能力。

3. 根据测量系统要求确定传感器的种类

- ① 系统要求的信号形式,如实时与否,数字还是模拟等。
- ② 与传感器连接的负荷阻抗特性等。
- ③ 传输和连接接口等。

4. 根据使用环境确定传感器种类

考虑温度、湿度、大气压力、振动、磁场、电场、附近有无大功率用电设备、加速度、倾斜、防火、防爆、防化学腐蚀以及是否有害于周围材料的寿命及操作人员的身体健康等。

5. 电源的要求

电源电压形式、等级、功率、波动范围、频率及高频干扰等。

6. 基本安全要求

绝缘电阻、耐压强度及接地保护等。

7. 可靠性要求

抗干扰、使用寿命、无故障工作时间等。

8. 管理要求

要求结构简单、模块化,有自诊断能力和故障显示等。

9. 购买与维修要求

考虑价格、交货方式与日期、保修期限、售后服务和零配件供应等。

上述要求又可分为两类:一类是共同的,如测量范围、精度、工作温度范围等;另一类是特殊要求,如过载能力、防火及防化学腐蚀要求等。对于一个具体的传感器,满足上述部分要求即可。

(二) 传感器的选用原则

在现代社会,传感器得到了广泛应用。各类传感器性能技术指标很多,如果要求一个传感器具有全面良好的性能指标,不仅可能给设计、制造带来困难,而且在实际应用中也没有必要。因此应根据实际需要与可能,在确保主要指标实现的基础上,放宽对次要指标的要求,以达到高的性能价格比。

传感器选用总的原则是:在满足检测系统对传感器所有要求的情况下,价格低廉、工作可靠、容易维修。

在具体选用传感器时,可按下列步骤进行:

- ① 借助传感器分类表,按被测量的性质,从典型应用中初步确定几种可供选用的传感器的类别。
- ② 借助常用传感器比较表,按被测量的范围、精度要求、环境要求等确定传感器类别。
- ③ 借助传感器的产品目录、选型样本,最后查出传感器的规格、型号、性能和尺寸。

以上步骤仅供广大读者对一般常用传感器选择时参考。



思考与练习

- 1-1. 什么是传感器?
- 1-2. 传感器由哪几部分组成? 各部分的作用是什么?
- 1-3. 描述测量的步骤和结果。联系实际举例说明。
- 1-4. 直接测量有几种方法? 它们各自的定义是什么?
- 1-5. 描述误差的分类及处理的方法。举出误差的实例并说明如何消除的。
- 1-6. 传感器有哪些基本特性? 它们有何实际意义?
- 1-7. 一线性位移测量仪, 当被测位移由 5 mm 变为 8 mm 时, 输出电压由 3 V 变为 4.5 V, 求仪器的灵敏度。
- 1-8. 有一温度计, 它的测温范围为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$, 精度为 0.5 级, 求:
 - (1) 该表可能出现的最大绝对误差。
 - (2) 当示值分别为 20°C 、 80°C 时的示值相对误差。
- 1-9. 有三台测温仪表, 量程均为 $0\sim 600^{\circ}\text{C}$, 精度等级分别为 1.0 级、1.5 级和 2.5 级, 要测量 500°C 的温度, 要求相对误差不超过 2.5%, 选用哪台仪表合适?
- 1-10. 欲测 240 V 左右的电压, 要求测量示值相对误差的绝对值不大于 0.6%。问: 若选用量程为 250 V 的电压表, 其精度应选择哪一级? 若选用量程为 300 V 和 500 V 的电压表, 其精度应分别选哪一级?
- 1-11. 简述传感器的技术指标和选用原则。