



普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

传感器及其信号 调理技术

◎ 徐湘元 王萍 田慧欣 编著

CHUANGANQI JIQI XINHAO
TIAOLI JISHU



免费电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

传感器及其信号调理技术

徐湘元 王 萍 田慧欣 编著



YZLI0890127979



机械工业出版社

本书讲述了多种常用传感器的结构、工作原理、性能特点,以及传感器输出电信号的加工调理与数据采集等技术,列举了检测元件在实践中的应用实例。本书选材典型、内容实用、表述清晰、理论结合实际,每章开始有内容提示,结尾有本章小结和练习题,便于教学与自学。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的本科教材或教学参考书,也可作为工程技术人员自学的读本。

图书在版编目(CIP)数据

传感器及其信号调理技术/徐湘元,王萍,田慧欣编著. —北京:
机械工业出版社, 2011. 12

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-36219-7

I. ①传… II. ①徐…②王…③田… III. ①传感器—信号处理—电路
—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 215757 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:王雅新 责任编辑:王雅新 韩 静

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:张 静 责任印制:乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 160mm · 16 印张 · 393 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 36219 - 7

定价: 32.00 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

社服务中心: (010)88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

传感器是一类将非电量(如速度、位移、温度、磁场和光源等)转换为电量的器件或装置,它与其输出信号的加工、调理一起,构成了检测技术的主要内容。随着社会生产力的发展,以及科学技术的进步,人们对信息的依赖程度越来越高。检测技术作为信息的主要获取手段,得到了人们的极大重视。

检测技术处在信息产生、处理、传送和使用这一运作链条的起始位置,信息的获取与质量对后续作业影响很大。高效、优质、实时地获得现场一线的数据信息,对于显示、分析、判断、决策和控制起着至关重要的作用。有人把传感器比作人体的“五官”,直接服务于机器和自动化系统,这是一种很形象的拟人说法。

本书在内容编排上,按照传感器及其信号处理两部分来组织。第一部分包括常用传感器的组成、工作原理、特性与应用举例,主要有电阻应变式、电容式、电感式、压电式、热电式、气敏式、湿敏式、磁敏式、光电式、数字式传感器和网络测量工具。不同类别的传感器有不同的转换机制,所以该部分各章内容联系不是非常紧密,具体内容见第2~8章。第9章网络测量是应网络技术发展和应用的需要增加的,内容较新,可作为选修内容(在目录和该章题目右上角中加有“*”)。第二部分涉及传感器输出信号调理和数据采集,以满足下一步计算机接口或控制与仪表显示的需要。该部分内容具有一定的共性,内容见第10和11章。

本书第1、6、7、8、9、10、11章和附录由徐湘元编写,第2、4章由王萍编写,第3章由田慧欣编写,第5章由田慧欣和徐湘元合写,最后由徐湘元定稿。为了方便教学,这次也制作了与本书配套的电子教学课件(PowerPoint版)。

本书根据近几年教学与实践过程中积累的经验和体会而写,同时参考了有关资料和文献,在此对这些参考材料的作者表示深深的谢意。

由于传感器及其信号处理技术涉及的知识面宽广(物理、化学、生物、电工、电子、控制和计算机等),编者对相关领域知识了解有限,书中难免存在不足或错误,欢迎读者提出批评意见或建议,以便有机会再版时加以改进,以提高本书的质量。来信可通过电子邮件发往下列地址:xyxu2001@163.com。

徐湘元

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 检测技术概要	1
1.1.1 检测系统的组成	1
1.1.2 获取信息的传感器	1
1.1.3 传感信号的调理	2
1.1.4 输出环节	2
1.2 传感器	2
1.2.1 传感器的组成与分类	2
1.2.2 传感器的基本特性	3
1.2.3 传感器的标定与校准	5
1.3 测量误差和测量方法	6
1.3.1 测量误差与分类	6
1.3.2 测量方法	8
1.4 检测技术的发展趋势	9
思考题与习题	10
参考文献	10
第2章 电阻应变式与电容式传感器	11
2.1 电阻应变式传感器	11
2.1.1 电阻应变片的工作原理	11
2.1.2 应变片温度误差及补偿方法	13
2.1.3 电阻应变式传感器的测量电路	14
2.1.4 电阻应变式传感器的应用	18
2.2 电容式传感器	19
2.2.1 电容式传感器的特点	19
2.2.2 电容式传感器的工作原理	20
2.2.3 测量电路	24
2.2.4 电容式传感器的应用	28
思考题与习题	30
参考文献	31
第3章 电感式与压电式传感器	32
3.1 电感式传感器	32
3.1.1 自感式传感器及其应用	32
3.1.2 互感式传感器及其应用	37
3.1.3 涡流式传感器及其应用	41

3.2 压电式传感器	44
3.2.1 压电式传感器的工作基础	45
3.2.2 常用压电材料及其主要特性参数	49
3.2.3 压电元件的常用形式与等效电路	50
3.2.4 压电式传感器的测量电路与应用	51
思考题与习题	54
参考文献	55
第4章 热电式传感器	56
4.1 概述	56
4.2 热电偶	56
4.2.1 常用热电偶及其结构	56
4.2.2 热电偶的测温原理、基本定律及温度补偿	59
4.2.3 热电偶的应用	63
4.3 热电阻	64
4.3.1 热电阻的测温原理	64
4.3.2 热电阻的种类及其特点	64
4.3.3 热电阻传感器的应用	66
4.4 集成温度传感器	67
4.4.1 基本原理	67
4.4.2 两种类型集成温度传感器	69
4.4.3 常用集成温度传感器及其应用	74
思考题与习题	77
参考文献	77
第5章 气敏传感器与湿敏传感器	78
5.1 气敏传感器	78
5.1.1 气敏传感器概况	78
5.1.2 电阻型半导体气敏传感器	79
5.1.3 非电阻型半导体气敏传感器	82
5.1.4 气敏传感器的应用	83
5.2 湿敏传感器	85
5.2.1 湿度的概念、分类及	

主要特性	86	图像传感器	131
5.2.2 湿敏器件	88	7.4.3 CCD 特性参数	132
5.2.3 湿敏传感器的应用	90	7.4.4 电荷耦合传感器的应用	133
思考题与习题	94	思考题与习题	135
参考文献	94	参考文献	136
第6章 磁敏传感器	95	第8章 数字式位移传感器	137
6.1 霍尔传感器	95	8.1 光栅传感器	137
6.1.1 霍尔效应及霍尔器件	95	8.1.1 光栅传感器的类型与结构	137
6.1.2 主要技术参数	97	8.1.2 光栅传感器的工作原理	138
6.1.3 温度误差与补偿	98	8.1.3 莫尔条纹细分技术	141
6.1.4 集成霍尔传感器	99	8.1.4 光栅传感器的应用	143
6.1.5 霍尔传感器的应用	101	8.2 旋转编码器	144
6.2 磁敏电阻传感器	104	8.2.1 旋转编码器的种类	144
6.2.1 磁阻效应、磁敏电阻及其 基本特性	104	8.2.2 光电式编码器的结构与 工作原理	145
6.2.2 磁敏电阻的应用	105	8.2.3 码盘误差及其处理	146
6.3 磁敏半导体传感器	106	8.2.4 旋转编码器的应用	147
6.3.1 磁敏二极管及其应用	106	8.3 感应同步器	147
6.3.2 磁敏晶体管及其应用	109	8.3.1 感应同步器的种类及其结构	148
思考题与习题	112	8.3.2 直线式感应同步器的工作原理	150
参考文献	112	8.3.3 感应同步器的输出信号处理	151
第7章 光电传感器	113	8.3.4 感应同步器的特点与应用	154
7.1 光与光电传感器	113	8.4 磁栅传感器	155
7.1.1 光的产生	113	8.4.1 磁栅传感器的类型与组成	155
7.1.2 常见光源	113	8.4.2 磁栅传感器的工作原理	157
7.1.3 光电传感器及其分类	114	8.4.3 磁栅传感器的应用	158
7.2 光电效应与光电器件	115	思考题与习题	159
7.2.1 外光电效应及光电器件	115	参考文献	160
7.2.2 光电导效应及光敏电阻	118	第9章 网络测量*	161
7.2.3 光伏特效效应及光电器件	120	9.1 概述	161
7.3 光电传感器的应用实例	124	9.1.1 网络测量技术	161
7.3.1 阅读环境照度监视器	124	9.1.2 网络化控制系统的测量	162
7.3.2 光电倍增管路灯控制	125	9.2 网络性能与流量测量	163
7.3.3 光电式转速测量	126	9.2.1 网络时延测量	163
7.3.4 光电池应用	127	9.2.2 丢包率测量	164
7.3.5 光敏晶体管控制的印刷 切纸机保护电路	128	9.2.3 网络带宽测量	165
7.4 电荷耦合图像传感器	128	9.2.4 网络流量测量	169
7.4.1 CCD 的 MOS 结构与基本 工作原理	129	9.3 面向网络应用的测量	173
7.4.2 线阵与面阵电荷耦合		9.3.1 P2P 业务测量	173
		9.3.2 控制应用测量	178
		9.4 网络测量仪表与测量系统	180

9.4.1 网络测量仪表	180	11.2.2 采样/保持器集成芯片	218
9.4.2 网络测量系统	182	11.3 A/D 转换	219
思考题与习题	183	11.3.1 A/D 转换器的分类与 技术指标	219
参考文献	184	11.3.2 A/D 转换器的类型与 转换原理	220
第 10 章 传感器信号的加工调理	185	11.3.3 几种 A/D 转换器简介	223
10.1 基本放大电路	185	11.3.4 A/D 转换器的选择与使用	226
10.1.1 同相和反相放大器	185	11.4 数据采集设计	227
10.1.2 差动放大器	186	11.4.1 调查与分析	227
10.1.3 电桥放大器	186	11.4.2 数据采集设计	227
10.2 测量信号放大器	189	11.4.3 采样速率	228
10.2.1 仪器放大器	189	11.4.4 硬软件设计	228
10.2.2 可编程序增益放大器	191	11.4.5 系统的抗干扰	229
10.2.3 隔离放大器	192	11.5 数据显示	230
10.3 硬件滤波	195	11.5.1 LED 数码管	230
10.3.1 滤波器的传递函数	195	11.5.2 LCD 显示器	232
10.3.2 模拟有源滤波器	197	11.5.3 数字存储示波器	233
10.4 非线性校正	200	11.6 数据采集与显示实例	233
10.4.1 模拟校正法	201	11.6.1 对测量指标的要求	234
10.4.2 数字校正法	206	11.6.2 硬件设计	234
10.5 信号变换	207	11.6.3 软件设计	235
10.5.1 V/I 变换	207	思考题与习题	237
10.5.2 V/F 变换	210	参考文献	237
思考题与习题	213	附录	238
参考文献	214	检测技术试题 1	238
第 11 章 检测信号的采集与显示	215	检测技术试题 2	242
11.1 概述	215	参考答案	245
11.2 信号的采样/保持	216		
11.2.1 采样/保持器的基本工作原理 与类型	216		

第 1 章 概 述

【内容提示】 检测技术作为获取信息的主要手段，在社会生产、科学实验和国防建设中起着重要的作用。本章概述检测技术的组成、传感器的分类和基本特性，同时给出了测量误差概念和测量基本方法，最后对未来检测技术的发展作了预测。这些内容对后续章节的进一步学习与掌握具有铺垫和指导作用。

1.1 检测技术概要

1.1.1 检测系统的组成

检测技术（Measuring Technique）是研究信息的提取、转换及其处理的一门应用技术科学。一个完整的检测系统包括三部分：传感器（Sensor/Transducer）、信号调理器（Signal Conditioner）和输出单元（Output Unit），其结构如图 1-1 所示。

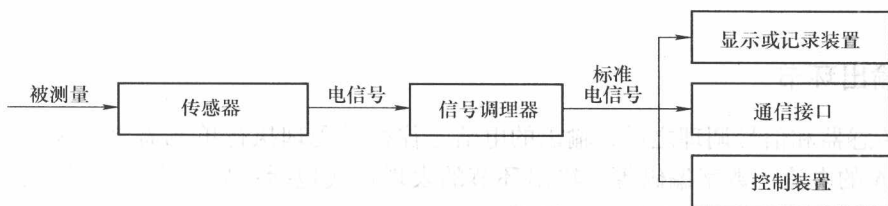


图 1-1 检测系统组成

传感器：将被测量（非电量）转换成电信号的器件或装置，一般由敏感元件、转换元件及其辅助部分组成。它涉及物理、化学、生物等多学科原理与知识，是检测系统中最重要的一环，决定着检测器的主要特征。

信号调理器：对传感器输出的电信号进行加工处理的单元，目的是使电信号规范化、标准化，便于与后续显示或应用环节衔接。主要有放大、滤波、非线性处理和信号变换等几大功能块，使用的工具主要是电子技术和计算机技术。

输出单元：对经过信号调理后的电信号进行显示、记录，或者传输至数据通信接口、控制执行装置等环节。这些涉及仪表、控制、计算机等学科领域，主要的问题有信号显示、数据采集与接口等。

除此以外，检测技术还涉及测量误差、信号分析与处理以及抵抗干扰等方面的知识与技术。

1.1.2 获取信息的传感器

在当今的物质世界中，电信号是一种产生比较容易、加工比较成熟、传输和使用比较方便的信号形式。所以，检测系统一般是先将非电量转变为与之成一定比例关系的电量，然后

通过对其进行加工调理,变为易与后续电路衔接的标准形式。在这一过程中,传感器是实现非电量到电量转换的关键工具,而实现这种转变的是敏感元件和转换元件。

虽然现有的敏感元件和转换元件种类各式各样,感应和转换原理也千差万别,承接的被测量形形色色,但它们却有一个共同点,那就是最终都要输出与被测量相关的电信号。只是这种电信号在质量上参差不齐,问题不少,一般难以满足后续工作的要求,迫切需要加工处理。

1.1.3 传感信号的调理

传感器输出的信号是一种原始的待处理电信号,一般不方便直接使用,需要进行加工处理,这就是传感信号的调理。传感信号的调理属检测系统的后续信号处理环节,其内容和技术具有一定的共性,也就是说,不论是哪类传感器,原则上都需经过这些技术处理,才能方便后续使用,只是具体到不同的传感器及其使用目的,处理的侧重点不同而已。

一般说来,经各种传感器输出的电信号普遍存在以下问题:输出信号微弱、噪声大、输入与输出之间不是线性关系、输出信号需要变换成其他形式传输和使用,等等。如果将这些未经处理的电信号直接送入仪表、控制器、执行器和计算机接口,将会出现各种问题,使得系统不能正常工作。所以,信号加工调理是检测系统不可或缺的一环。传感器输出信号加工处理的内容主要包括:测量信号的放大、滤波、非线性校正、信号变换、采样保持、模/数转换等。

1.1.4 输出环节

经过传感器和信号调理之后,输出的电信号往往是受理执行单元需要的标准信号形式,如4~20mA的电流、数字编码等。输出环节的表现形式包括:显示仪表和屏幕、记录仪和打印机、数据通信接口、控制执行装置等。

1.2 传感器

最初,人类观察和认识自然现象只能依靠自身的感觉器官,如眼、鼻、耳、舌、皮肤等,以及极为简单的工(量)具。随着科学技术的发展和社会的进步,今天的人类获取外部信息的手段和工具已经有了极大的进步。从观察微生物的显微镜,到探测宇宙的射电望远镜,从工业生产线上的探头,到气象、水文、地质的监测,到处都需要对我们关心的对象提供及时准确的信息,这就是检测问题。而实现检测功能的主要器件或装置就是传感器,并由此派生出传感器信号的调理和输出等一系列问题。

1.2.1 传感器的组成与分类

传感器是能感受规定的被测量,并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。面对各种各样的被测量,如热、光、力、磁、速度、湿度、浓度等,如何将它们正确地反映出来,并加以量化表述,然后将此信号输出,或显示,或实施,或提供给决策单元?这就是传感器的功能和作用。先将各类被测量通过传感器的敏感元件和转换元件,转化为电量,然后对其进行加工、传输、显示和实施。

传感器一般由敏感元件、转换元件及其辅助环节组成。其中,敏感元件直接感受和响应被测量,其输出可能是电量,也可能是另一非电量,但它们与被测量有对应关系;转换元件是将敏感元件输出的非电量转换成电路参数(如电阻、电感等)或者电量;辅助环节主要是支持被测量转换成电量的部分,例如,如果转换元件的结果是电路参数,该环节就将电路参数转换为电量,如电压、频率等形式。

由此可以看出,传感器的组成并不是一个固定的模式。有的仅需要敏感元件就可将被测量转换为电量(例如热电偶),有的需要经过敏感元件和转换元件,才能转变成电量(例如压电式加速度传感器),有的则需要经过敏感元件、转换元件和辅助环节,才能转换成电量。这正是传感器多样性和复杂性的体现。

迄今为止,传感器已经发展出了很多类型,按照不同的划分标准,可以有不同的类别。目前较为普遍的划分标准有两种:一是按输入被测量分,二是按工作原理分。

表 1-1 是按输入被测量划分的传感器。

表 1-1 按输入被测量划分的传感器

基本被测量	派生被测量
热工量	温度、热量、压力、压差、流量、流速、真空度、比热容等
机械量	位移、尺寸、形状、力、应力、力矩、振动、加速度等
物理化学量	气(液)体成分、浓度、盐度、粘度、湿度、密度、相对体积质量等
生物医学量	心音、血压、体温、气流量、脑电波、心电流、眼压等

按工作原理划分的传感器见表 1-2,本书基本上是按此标准来对传感器进行叙述的。

表 1-2 按工作原理划分的传感器

工作原理	举 例
电磁学	电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、霍尔传感器
热电	热电偶式传感器、热电阻
光电	模拟量光电传感器、开关量光电传感器
半导体	气敏传感器、湿敏传感器
其他	微波式传感器、射线式传感器

1.2.2 传感器的基本特性

鉴于传感器在检测系统中的重要地位,为了便于传感器的设计、评价和选择,有必要对其基本特性作些介绍。这里说的传感器基本特性是指传感器的输入与输出之间的关系特性,它包括静态特性(Static Characteristic)和动态特性(Dynamic Characteristic),可用基本参数和技术指标来描述,其参数包括静态参数与动态参数两大类。

1. 静态特性

传感器的静态特性:当被测量的各值处在稳定状态的时候,传感器的输出值与输入值之间的数学表达式、曲线或数表所表述的主要性质。描述传感器的静态特性的基本参数和技术性能指标有:灵敏度、阈值与分辨力、线性度、滞后度、精确度等。

(1) 灵敏度 灵敏度(Sensitivity)是指传感器在稳定条件下,输出变化量与输入变化量之比。对于线性传感器,灵敏度为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

式中, k 为常数; Δx 为输入变化量; Δy 为输出变化量。

对于非线性传感器有

$$k = \frac{dy}{dx}$$

(2) 阈值与分辨力

阈值 (Threshold Value) 是指传感器的输入从零开始缓慢增加时, 达到某一最小值才使传感器输出变化, 称此最小输入值为阈值, 该值为传感器最小可测出的输入量。

分辨力 (Resolution/Resolving Ability) 是指传感器的输入从非零的任意值缓慢增加, 超过某一输入增量后输出才变化, 该输入增量称为传感器的分辨力。它说明了传感器可测出的最小输入变量。该值除以满量程输入值, 然后乘以 100% 即为分辨率。

(3) 线性度 线性度 (Linearity) 是指度量传感器输出与输入之间线性程度的一种指标, 定义为输出—输入特性曲线与理论直线之间的最大偏差与输出满刻度值之比, 即

$$\xi_L = \frac{|\Delta y_{\max}|}{y_F} \times 100\%$$

式中, $|\Delta y_{\max}|$ 为输出与拟合直线之间最大偏差绝对值; y_F 为满量程输出。

ξ_L 越小, 线性度越好。当然, 理想直线 (拟合直线) 的确定不同, ξ_L 值会有差异。线性度示意图如图 1-2 所示。

(4) 滞后度 (Degree of Hysteresis) 传感器输入量增大行程 (正行程) 和输入量减小行程 (反行程), 输出—输入特性曲线不重合, 称为滞后。滞后误差又称回程误差, 或者变差:

$$\xi_H = \frac{\Delta y_{\max}}{y_F} = \frac{y_{20} - y_{10}}{y_F}$$

式中, $\Delta y_{\max}$ 为正反行程间, 对应某一输入, 例如, $x = x_0$ 时, 输出最大偏差; y_{10} 为 x 由小到大的输出值; y_{20} 为 x 由大到小的输出值, 如图 1-3 所示。

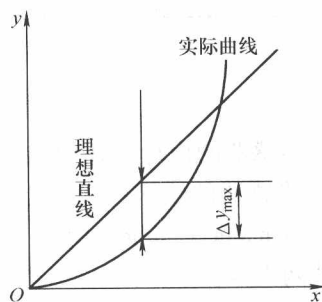


图 1-2 线性度示意图

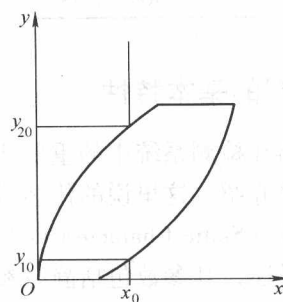


图 1-3 滞后度示意图

(5) 精确度

精密度: 对具有某特点的被测量, 由同一人、用同一传感器在短时间内连续重复测量多次, 以检验测量结果的分散程度。它表示随机误差大小。

准确度: 传感器输出值与真值的偏离程度。

精确度 (Definition/Precision): 简称精度, 它是精密度和准确度的综合, 即系统误差和随机误差的综合, 表示测量结果与真值的一致程度。精确度涉及真值, 由于真值的不可知性, 所以它仅是一个定性的概念。

(6) 漂移 漂移 (Drift) 是指传感器输入不变, 输出量随时间变化而发生的缓慢变化。它反映传感器的稳定性, 是由传感器结构或者环境原因产生的。

零漂 (Zero Drift/Zero Shift): 输入为零时产生的漂移。

2. 动态特性

在测量过程中, 许多被测量是随时间变化的动态信号, 这就要求传感器的输出能够及时准确地反映这种动态变化。传感器的动态特性就是传感器在测量动态信号时, 传感器输出对于随时间变化的输入量的响应特性。它反映传感器测量动态信号的能力。

在实际检测过程中, 如果传感器选择不当, 输出量不能跟随输入量的快速变化, 将会导致较大的测量误差, 所以, 研究传感器的动态特性有着十分重要的意义。

系统的动态响应特性一般用微分方程、传递函数、单位脉冲响应函数和频率响应函数等数学模型来进行研究。由于传感器的动态特性取决于传感器本身和输入信号的形式, 所以工程上常用正弦信号和阶跃信号作为输入, 通过对传感器输出响应的分析, 获得对传感器动态特性的评价。

例如, 给传感器输入一个阶跃输入信号, 传感器输出就有一个阶跃响应, 据此响应曲线可以确定传感器的过渡过程时间、延迟时间、超调量等, 从而可以对传感器的动态特性作出具体的评价。

对于数字式传感器而言, 主要问题是在工作中不要丢数。为此, 输入量的变化速度是一个关键因素。所以, 数字式传感器动态特性的指标是: 输入量的临界速度。

1.2.3 传感器的标定与校准

1. 传感器的标定 (Calibration)

用标准设备产生标准非电量 (或用基准量), 来确定传感器输出量 (电量) 与输入量 (非电量) 之间关系的过程, 就是传感器的标定。传感器的标定要在与使用条件相似的环境和状态下进行。

标定活动所需的设备有: 被测非电量 (标准) 发生器、被测非电量测试仪、待标定传感器配接的信号调理器、显示、记录器等。标定设备应有足够精度, 符合国家计量量值传递规定, 其量程范围与被标定传感器的范围相当, 性能稳定可靠。

标定内容包括静态标定和动态标定。静态标定用于确定传感器的静态特性指标; 动态标定用于确定传感器的动态性能指标。

静态标定: 输入已知标准非电量, 测出传感器的输出, 给出标定曲线、标定方程和标定常数, 计算灵敏度、线性度、滞后度等静态指标。

动态标定: 通过确定其线性工作范围、频率响应函数、幅频和相频特性曲线、阶跃响应曲线等, 来确定传感器频率响应范围、幅值误差、相位误差、时间常数等。

2. 传感器的校准 (Alignment/Adjustment)

传感器在使用了一定时间后, 需定期对其基本性能和参数进行检测, 判断其是否可以继续使用。如果可以继续使用, 应对有变化的主要指标进行数据修正, 确保传感器测量精度,

这一过程就是传感器校准。校准的内容与标定大致相同。

值得一提的是,本节所谈的传感器基本特性和传感器标定、校准是针对传感器的,而考虑了信号调理环节后的检测器(或称检测系统)基本特性可能会有些变化,例如,线性度可能有改善,检测器的标定和校准也因追加了信号调理器后会有所变化。因为调理环节的引入,使得输出信号从传感器的末端移到了检测系统的末端,某些参数和指标可能会有所改变(善),但是基本概念和方法仍一致。

1.3 测量误差和测量方法

传感器是用来度量被测量的,测量的方法、测量的结果、测量的误差都是不可避免的问题。所以,在此有必要谈谈测量误差(Inaccuracy of Measurement)与测量方法。

1.3.1 测量误差与分类

1. 测量误差的基本概念

在实际测量过程中,由于测量设备精度的限制、测量方法的不同、测量环境的影响,都会使测量结果与测量的真实值不一致。测量结果与被测量真实值之差,就是测量误差。测量误差的大小反映测量质量的好坏。

误差公理的概念是:所有测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验和测量实践之中。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律,找出减小误差的方法和途径,以获得尽可能接近真实值的测量结果。测量误差是不可避免的,测量的精度应与测量的目的相符合,盲目追求精准的测量结果,往往要付出很大的代价,其做法在实践中并不可取。

真值(True Value):被测物体在一定的时间及空间下,所体现的真实数值。它是一个理想的概念,客观存在,但不可测量。随着科学技术的发展,测量结果的数值会不断接近真值。在实际计量和测量工作中,常常使用“约定真值”和“相对真值”的概念。

约定真值(Conventional True Value):按照国际公认的单位定义,利用科技发展的最高水准复现的单位基准值,它常以法律规定或指定的形式出现。例如,在标准条件下,水的沸点是 100°C ,冰点是 0°C 。

相对真值(Relative True Value):在满足规定准确度时,用来代替真值使用的值,有时也叫实际值。

标称值(Nominal Value):计量或测量器具上的标注值。如标准砝码上标出的 1kg 。它受制造、测量环境条件变化影响,标称值并不一定等于它的实际值,一般在给出标称值的同时也应给出它的误差范围或精度等级。

示值(Indicating Value):由测量仪器给出或提供的量值,也称测量值。

2. 测量误差的分类与处理

(1) 测量误差的分类 测量误差目前有多种分类法,本文介绍的两种是比较常见的,一是按表示方法分类,二是按误差性质分类。

按表示方法分,误差可分为绝对误差、相对误差、引用误差、满度引用误差和容许误差等。

1) 绝对误差 (Absolute Error, AbsE): 某一被测量的值 x 与真值 x_0 的差, 即

$$\Delta x = x - x_0$$

式中, x 为测量值, 可以用测量仪器的示值、标准量具的标称值和标准信号源的调定值等。 x_0 为被测量的真值, 由于其不可知性, 常用约定真值或相对真值代替, 在实际测量中, 常用某一被测量多次测量的平均值, 或上一级标准仪器测得的示值作约定真值, 代替真值 x_0 ; 绝对误差不能说明测量质量的好坏。

2) 相对误差 (Relative Error): 用来表示测量精度的高低。它又分为实际相对误差和标称 (示值) 相对误差。

实际相对误差用绝对误差 Δx 与被测量约定真值 x_0 的百分比表示, 即

$$r_a = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\%$$

标称 (示值) 相对误差是绝对误差与仪器示值的百分比值,

$$r_b = \frac{\Delta x}{x} \times 100\%$$

误差相对较小时, r_a 与 r_b 相差不大, 可不加区分, 但误差较大时, 不应混淆。

3) 引用误差 (Fiducial Error): 也称满度相对误差, 它是用绝对误差与仪表量程 x_m 的百分比来表示的, 即

$$r_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\%$$

该误差是为了评价测量仪表精度而引入的, 但实际中常用最大引用误差 (满度引用误差) 来表述。

满度引用误差 (简称满度误差) 为

$$r_{mm} = \frac{|\Delta x|_{\max}}{x_m} \times 100\%$$

式中, $|\Delta x|_{\max}$ 为绝对误差最大值。

我国电工仪表中常用的仪表精度等级 S 是按满度误差分级的, 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七级。仪表精度的数字越小, 精度越高。例如, 某电压表 $S=2.5$, 则表示它的精度等级为 2.5 级, 即满度误差不超过 2.5%。假如此时电压表量程为 0~100V, 则最大绝对误差不超过 $\pm 2.5V$ 。

4) 容许误差 (Admissible Error): 根据技术条件的要求, 规定测量仪器误差不应超过的最大范围。它是衡量仪器的重要指标, 仪器的准确度和稳定度可用容许误差来表示。它常用绝对误差的形式来表达。

按误差性质分, 误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

1) 系统误差 (Systematic Residuals/Fixed Error): 相同条件下, 同一被测量被重复测量时, 误差固定不变, 或按照一定规律变化的误差。它定义为无限多次测量结果的平均值减去该被测量的真值。

系统误差的特点是大小和方向恒定不变, 或按一定规律变化。恒定不变的称为恒值系统误差, 在误差处理中可被修正; 按一定规律变化的称为变值系统误差, 在误差估计时可归结为系统不确定度。

系统误差的来源包括：测量设备的基本误差、偏离额定工作条件产生的附加误差、测量方法理论不完善带来的方法误差以及试验人员主观原因产生的误差。

2) 随机误差 (Accidental Error/Random Error)：在相同条件下，对同一物理量作多次重复测量时，受偶然因素影响而出现的没有一定规律的测量误差。它定义为测量示值减去在重复条件下同一被测量无限多次测量的平均值。

引起随机误差的原因是多方面的、微小的，且无法控制，一般用概率和数理统计来描述和计算，它服从统计规律。

3) 粗大误差 (Gross Error)：疏忽误差，测量结果明显偏离实值对应的误差。产生粗大误差的原因可能有：读数错误、记录错误、计量器具有缺陷、实验条件的突变等。处理方法是从小测量数据中剔除。

在测量中，系统误差、随机误差和粗大误差是同时存在的，但它们对测量过程及结果的影响是不同的。同时，测量误差的划分是人为的、有条件的，在不同测量场合和不同测量条件下，不同误差之间可以互相转化。

(2) 测量误差的处理 对误差的处理：消除或减小。能够消除的，应该消除；消除不了的，或者要付出过高代价才能消除的，应予以减小。

系统误差的发现与处理往往比随机误差困难得多，对它的消除或减小应考虑以下几方面：

- 1) 从来源上考虑，如选择仪器设备、测量环境、测量条件、测量方法、人员素质等。
- 2) 利用修正法，对测量结果进行修正，要定期检查和校准仪器。
- 3) 采用一些特殊的测量技术和方法。

对于随机误差，应根据随机误差的特点，多次测量，反复比较，用统计规律描述和确定。对于粗大误差，应采用剔除数据的方法。

1.3.2 测量方法

实现被测量与标准量比较，获得比较结果的方法叫测量方法。一个物理量的测量，可以通过多种方法进行，方法的正确与否，直接关系到测量结果的精度和测量的成本。测量方法影响测量的精度，决定测量的代价。

测量方法的分类有多种，按不同的准则，有不同的分法，下面两种是比较常见的分法。

1. 按获得测量值的方法分类

直接测量：在测量过程中，仪表读数不需经过任何运算就能表示测量结果的测量方法。直接测量的特点是，简单方便，精度不高。此法广泛用于工程测量。

间接测量：通过与被测量有一定函数关系的其他量的测量结果，获得被测量的数值。间接测量的特点是手续多，费时间，但测量精度较高，主要用于科研实验中的实验室测量。

混合测量：根据直接测量或间接测量得到数据，通过求解函数关系组成的联立方程组，获得被测量的数值。此法操作复杂、费时间，属特殊的精密测量法。此法仅适用于科学实验或特殊场合。

2. 按测量方式分类

偏差式测量：由仪表指针位移决定被测量大小。它要求事先用标准量具对仪表刻度进行标定。测量时，输入被测量，按仪表指针在标尺上的示值确定被测量数值。该测量方式在工

程中被大量采用。

零位式测量：也称平衡式测量，用仪表零位指示系统平衡，平衡时已知的标准量（基准量）即为被测量。天平称重、惠斯登电桥测电阻就是用该方法。特点是可获得较高精度，但过程费时，不适合测量快速变化的信号。

微差式测量：将被测的未知量与已知的标准量进行比较，取得差值，然后用偏差法测得此差值。由于它无需在零位测量中反复调节平衡，所以兼有偏差式测量快和零位式测量准的优点，很适合在线控制参数的测量。

1.4 检测技术的发展趋势

主要由传感器及其信号调理构成的检测技术，与计算机技术、控制技术、通信技术等一起，构成了信息技术的主体。在信息的获取、传输、加工和实施这一作业链条中，它处在开端的位置，其作用和功能是不可替代的，对于后续运行至关重要。根据未来信息技术的发展趋势，以及对测量的要求，检测技术将有序发展，这些主要体现在以下几个方面：

1. 利用新技术、新材料、新工艺发展传感器

科学技术是不断发展和进步的，随着新理论的问世、新技术的产生，不断有新成果问世，利用这些新成果，尤其是新材料、新工艺可以开发出新传感器，改造旧传感器，提高传感器的性能和质量，降低生产制造成本。半导体材料、陶瓷材料、有机材料、功能金属、光导纤维、超导材料、生物活性材料、纳米材料等为传感器的发展提供了物质基础；薄膜技术、集成技术、微加工技术、静电封装技术等新工艺为制作体积小巧、稳定可靠、性价比高的传感器提供了技术支持。

2. 检测器集成化、功能多样化

检测器的集成化、功能多样化是检测器的重要发展方向。用集成技术，将敏感/转换元件、加工调理电路等集成在一块基片上，做到虽然体积小、重量轻，但检测器的结构齐全、功能完备。这对于那些工作环境特殊的场所显得很重要，如军事、医学、汽车、航天航空等部门。这种集成化产品具有安装调试简单、可靠性高、成本低等特点。

检测器的多功能化是一个检测器具有多重检测功能。在一块芯片上，集成多种不同或相近功能的敏感/转换元件，采用相同或大体相同的信号调理电路，实现多重物理量的检测。这种接受多种被测量的检测器，可大大提高检测器的使用效率和应用范围。

3. 检测器智能化

检测器智能化是检测技术未来的主要发展方向。将检测技术与人工神经网络、模糊逻辑、专家系统等人工智能技术相结合，创造具有智能特征的检测器，使其在信息的采集、处理、传输等方面更具拟人的特点。具体来说，通过在检测器中引入微处理器，使其具有判断、运算和决策能力。在传感方面，根据被测量的强度、频率、体积和比例等理化特征实际，合理选择敏感/转换元件（如量程、结构等），使输出灵敏而准确；在信号加工处理方面，做到自动补偿、自动校正（准）、自动检测和诊断、自动运算与存储、自动传输与显示等。

4. 检测技术网络化

在检测技术中引入网络，使得检测网络化，实现采集的信息资源本地和远程共享。这一

发展方向特别适合现代化大生产和大型系统。分布于各处的传感器及时将被测的非电信号转化为电信号,并就近进行电信号的加工处理,然后通过网络向有关节点传输。当然,这里将会涉及许多有关网络接口、协议、调度、数据列队、网络延迟等新问题,但它们已经超出了检测技术讨论的范围。

本章小结

本章叙述了检测系统的基本结构,传感器的组成、分类、基本特性、标定和校准,对与测量相关的误差,以及测量方法作了简单的介绍,最后对检测器未来的发展进行了预测与展望。这些内容对后续章节的学习具有统领和指导作用,对初学者来说,本章是学习检测技术不应缺少的第一课。

思考题与习题

1-1 一个检测系统由哪几部分组成?各部分的功能如何?

1-2 什么是传感器的静态特性?描述其特性的技术性能指标有哪些?

1-3 传感器的输出信号加工调理主要有哪些内容?

1-4 假如有一块精度等级为 1.0 级、量程为 0~100mA 的电流表,其最大误差在 50mA 处为 1.2mA,问该电流表是否合格?

1-5 有一支温度传感器,其微分方程为

$$40 \frac{dy}{dt} + 4y = 0.16x$$

其中, y 为输出电压,单位为 mV; x 为输入温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$,试求该传感器的时间常数和灵敏度(静态)。

1-6 假设被测电压实际值为 10V,现有两块电压表,一块是量程为 0~150V,等级为 0.5 级,另一块是量程为 0~15V,等级为 2.5V。问:选择哪一块电压表误差较小?为什么?

参考文献

- [1] 李希文,赵建,李智奇,等. 传感器与信号调理技术 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [2] 张靖,刘少强. 检测技术与系统设计 [M]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 卜云峰. 检测技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [4] 余成波. 传感器与自动检测技术 [M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2009.