

电 气 设 备 丛 书

电气测量仪器

方昌林 徐 刚 编

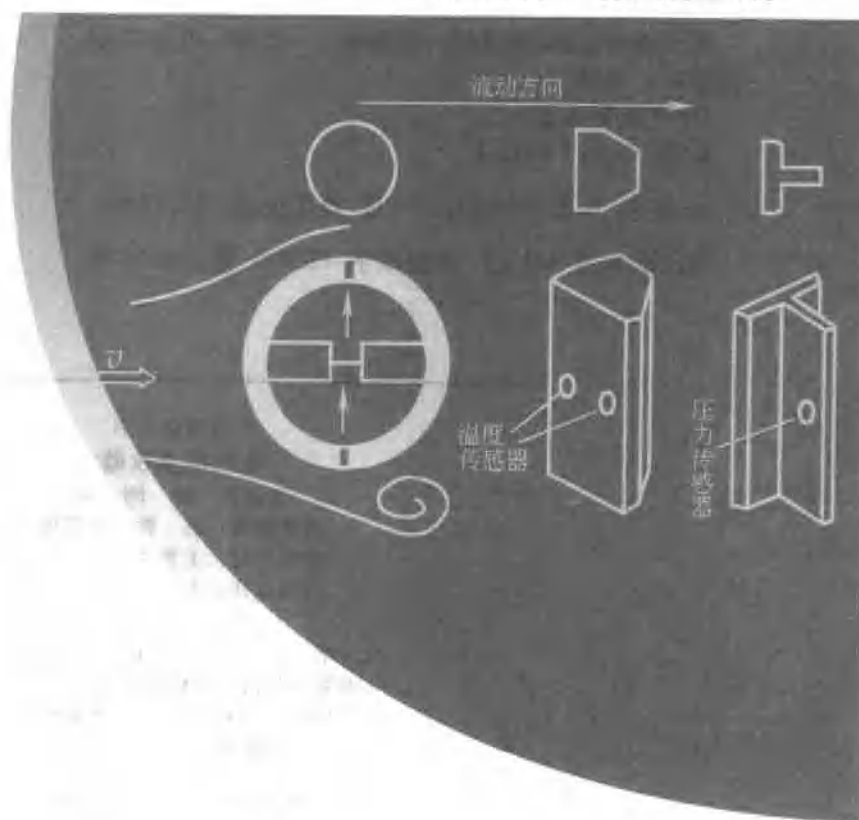


化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

电 气 设 备 丛 书

电气测量仪器

● 方昌林 徐 刚 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书为《电气设备丛书》之一。

本书扼要地介绍了电气测量仪器的组成、基本工作原理和技术要求,介绍了广泛用于各类测试的多种传感器,分析了用于现代模拟和数字测量仪器中的信号输入、采样、变换和调理电路。根据工业企业在设备设计、调试、运行维护中的实际需要,本书详细介绍了万用表、示波器、应变仪、称重控制器等常用仪器的工作原理、使用与维护,对现代仪器的发展和虚拟仪器技术也作了简要介绍。

本书注重理论联系实际,叙述力求简明实用,突出新颖性,适合从事仪器设计、安装、调试、运行与维护的技术人员及技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测量仪器/方昌林,徐刚编. —北京:化学工业出版社,2006.2

(电气设备丛书)

ISBN 7-5025-8213-4

I. 电… II. ①方…②徐… III. 电工仪表 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 006073 号

电气设备丛书

电气测量仪器

方昌林 徐 刚 编

责任编辑:刘 哲 周国庆

责任校对:王素芹

封面设计:于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行

工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 插页 3 字数 323 千字

2006年4月第1版 2006年4月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8213-4

定 价:29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

随着科学技术的迅猛发展,电气设备发展日新月异。尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展,使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化,传统的电气设备设计、制造技术不断吸收信息控制、材料、能源及管理等领域现代成果,综合应用于产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面,许多新的思想和概念不断涌现,而且,不同学科之间相互渗透、交叉融合,衍生新的研究领域,迅速改变着传统电气设备制造业的面貌,产品更新换代极为频繁。21世纪电气设备发展的总趋势是:强弱电技术的融合更为密切;多学科、多专业的交叉更为深入;我国电气产品与国际接轨的步伐将迈得更大,国内外的技术交流也将更为广泛。

当今世界,科学技术发展迅速,知识经济发展显现端倪,综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。为了适应社会主义现代化建设的需要,我们组织编写了这套《电气设备丛书》(以下简称《丛书》),满足广大电气工作者和爱好者的迫切需要。

《丛书》编写时从实用出发,力求理论与实际相结合,突出新颖性,介绍电气设备的结构、工作原理、技术参数、适用场合、技术操作要点、运行与维护经验等,并注重理论联系实际,融入应用实例,突出技能和技巧。

《丛书》本着求精避繁的原则,对电气设备的基础理论、材料、器件、应用电路、安装、调试、运行与维修等适用面广、使用频率高和实用性强的技术内容作了详细的阐述。同时,还从实际出发,介绍反映电工电子、电力电子、计算机、自动控制、传感器技术、机电一体化的相互交叉、纵横结合的发展大趋势。

本套丛书共10个分册:包括《防爆电器》、《防雷与接地装置》、《电气测量仪器》、《电热设备》、《开关电源技术》、《漏电保护器》、《高压电器》、《低压电器》、《变压器原理与应用》、《电机原理与应用》。

本书是《电气测量仪器》。

电气测量仪器是对物质世界的信息进行测量与控制的基本手段。它融合了微电子技术、计算机技术、通信技术、网络技术、新元器件新材料技术、现代测试技术、现代设计制造技术和现代工艺技术等,是现代工业产品中新技术应用最多、最快的产品之一。本书主要介绍了广泛使用的传感器,包括位移传感器、电磁量传感器、温度传感器、压力传感器、流量传感器、液位传感器、转速传感器、振动测量传感器、力传感器、电化学传感器等,分析了用于现代模拟和数字测量仪器中的信号输入、采样、变换、调理、显示与报警电路,详细介绍了万用表、示波器、应变仪、称重控制器等常用仪器的工作原理、使用与维护,简要介绍了虚拟仪器。

在编写过程中,由于编者水平所限,难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评和指正。

编者
2006年2月

目 录

第1章 概论	1
1.1 测量与测量仪器	1
1.2 电气测量仪器及其组成系统的工作原理	1
1.3 仪器、仪表的基本技术指标	2
1.3.1 仪器的静态性能指标	2
1.3.2 仪器的动态性能指标	3
第2章 传感器	5
2.1 传感器概述	5
2.1.1 传感器的概念	5
2.1.2 传感器的组成	5
2.1.3 传感器的分类	6
2.2 传感器的静态特性与动态特性	7
2.2.1 传感器的静态特性	7
2.2.2 传感器的动态特性	9
2.3 位移传感器	13
2.3.1 电感传感器	13
2.3.2 涡电流传感器	15
2.3.3 电容传感器	16
2.3.4 光栅式传感器	19
2.3.5 磁栅式传感器	20
2.3.6 感应同步器	21
2.4 电磁量传感器	22
2.4.1 霍尔电量传感器	22
2.4.2 磁敏传感器	24
2.4.3 光纤电流传感器	27
2.5 温度传感器	28
2.5.1 热电偶温度传感器	29
2.5.2 热电阻温度传感器	31
2.5.3 红外测温传感器	33
2.5.4 其他类型温度传感器	34
2.6 压力传感器	35
2.6.1 电阻应变式压力传感器	36
2.6.2 压阻式压力传感器	37
2.6.3 电感式压力传感器	38

2.6.4	电容式压力传感器	38
2.6.5	压电式压力传感器	39
2.7	流量传感器	39
2.7.1	差压式流量传感器	40
2.7.2	流阻式流量传感器	41
2.7.3	速度式流量传感器	42
2.7.4	涡旋式流量传感器	44
2.7.5	质量流量传感器	44
2.7.6	椭圆齿轮流量传感器	46
2.8	液位传感器	48
2.8.1	浮力式液位传感器	48
2.8.2	电容式液位传感器	48
2.8.3	超声波式液位传感器	49
2.8.4	雷达式液位计	51
2.9	扭矩和转速传感器	51
2.9.1	扭矩传感器	51
2.9.2	转速传感器	54
2.10	振动(振幅、速度和加速度)测量传感器	55
2.10.1	测振传感器的工作原理	55
2.10.2	磁电式速度传感器	58
2.10.3	电阻应变式加速度传感器	59
2.10.4	固态压阻式加速度传感器	60
2.10.5	压电式加速度传感器	60
2.11	力传感器	62
2.11.1	电阻应变式力传感器	62
2.11.2	差动变压器式力传感器	64
2.11.3	压电式力传感器	64
2.11.4	压磁式力传感器	65
2.12	电化学传感器	66
2.12.1	气敏传感器	66
2.12.2	湿度传感器	70
2.12.3	电导传感器	71
第3章	信号采集、变送与调理	74
3.1	测量电路	74
3.1.1	测量电桥	74
3.1.2	补偿电桥	76
3.1.3	非电桥式测量电路	76
3.2	电源电路	78
3.2.1	直流稳压电源电路	78

3.2.2 高频交流电源电路·····	79
3.3 放大电路·····	79
3.3.1 集成运算放大器及其基本放大电路·····	79
3.3.2 测量放大电路·····	83
3.3.3 功率输出放大电路·····	89
3.3.4 隔离放大器·····	90
3.4 滤波电路·····	92
3.4.1 滤波器的分类·····	92
3.4.2 低通滤波电路·····	93
3.4.3 高通滤波电路·····	94
3.4.4 巴特沃斯滤波器·····	95
3.4.5 带通与带阻滤波电路·····	97
3.4.6 数控滤波器及其集成电路·····	97
3.5 信号变换电路 ·····	100
3.5.1 电压/电流转换和电流/电压转换 ·····	100
3.5.2 信号幅值比较电路 ·····	100
3.5.3 电压/频率转换电路·····	102
3.6 数字信号的采集及其基本电路 ·····	105
3.6.1 数字信号采集技术 ·····	105
3.6.2 实时采样时的相关问题 ·····	105
3.6.3 模拟开关电路 ·····	106
3.6.4 采样/保持电路·····	107
3.6.5 数/模(D/A)转换电路(DAC) ·····	109
3.6.6 模/数(A/D)转换电路(ADC) ·····	114
3.6.7 数字信号采集与控制系统中 A/D、D/A 转换器的选用与布局·····	119
第4章 显示、记录与报警装置·····	123
4.1 显示装置 ·····	123
4.1.1 指针式显示装置 ·····	123
4.1.2 示波管 ·····	125
4.1.3 LED 与 LCD 数字显示器 ·····	127
4.1.4 数字 CRT 显示器 ·····	129
4.2 记录装置 ·····	132
4.2.1 模拟记录装置 ·····	132
4.2.2 数字记录装置 ·····	135
4.3 声光报警装置 ·····	139
4.3.1 555 集成电路及其构成的声光报警装置 ·····	139
4.3.2 声光报警专用集成组件介绍 ·····	140
第5章 常用仪器仪表·····	142
5.1 指针式与数字式电表 ·····	142

5.1.1	指针式万用表	142
5.1.2	兆欧表	146
5.1.3	数字式万用表 (DMM)	148
5.2	示波器	153
5.2.1	示波器的用途和基本工作原理	153
5.2.2	TD4652 型超低频双踪示波器	155
5.2.3	TDS1000 和 TDS2000 系列数字存储示波器	164
5.3	动态电阻应变仪	179
5.3.1	分类及特点	179
5.3.2	YD-28、YD-28A 型应变仪	179
5.4	GGD-33A 型称量控制器	188
5.4.1	技术指标及面板布置	188
5.4.2	仪器的调校使用	190
第 6 章	智能仪器与虚拟仪器	194
6.1	概述	194
6.2	ZJYWI 智能型转矩转速仪	194
6.2.1	技术指标	195
6.2.2	结构概述及工作原理	196
6.2.3	面板布置及各组件的作用	197
6.2.4	使用方法	199
6.3	虚拟仪器的分类与硬件构成	201
6.4	虚拟仪器的设计制作及其软件系统	203
6.5	YD-34 型动态数据采集分析仪	203
6.5.1	结构与特点	203
6.5.2	仪器的使用	204
6.5.3	使用主要事项和故障排除	207
参考文献		208

第 1 章

概 论

1.1 测量与测量仪器

测量是以确定被测物属性、量值为目的的全部操作。测试是测量和试验的综合。正确的测试是科学的根基，在工程技术领域中，工程研究、产品开发、品质监督、质量控制和性能测试等都离不开测试技术。广泛应用着自动控制技术的现代工程，越来越多地运用测试技术，其测试装置已成为整个控制系统的重要组成部分。

测量仪器是完成测量的工具。由于现代测量常常不是单个物理量，也不是有限几个常量的测量。现代测量常常需要完成代表设备状态的多个变化物理量的测量。对于测量的结果，除了要能正常显示、记录以便让人们了解外，还将通过控制或调节器参与系统、设备工作的控制或调节。因此，测量仪器的组成变得更为复杂，更为多样，出现了将测量结果与记录、调节仪表结合在一起的多功能结构；或者将整个仪器划分并制作成若干个能独立完成一定功能，并能以标准联络信号相互联系的标准单元，然后根据实际需要选择一定的单元，积木式地把各单元组合起来，构成多种复杂程度不同的测试测控系统。

根据完成各类物理量信号测量所用的不同能源形式，测量仪器可以有机械的、光学的、气动的、电动的等。其中气动仪表比电动仪表出现早，价格便宜，结构简单，特别对石油化工等易燃易爆介质现场，具有自身特有的安全防爆特性，因而在相当长的一段时间里，一直处于优势地位。但从 20 世纪 60 年代起，电动仪表的晶体管化、集成电路化和控制功能的日益完备，为进一步限制进入易燃易爆场所的能量并清除引起燃烧或爆炸的“危险火花”提供了保证。这样，当限制电动仪表使用的一个最主要障碍被清除以后，由于电信号比气信号传递更快，传输距离更长，传输线路的安装更方便，特别是与工业控制计算机结合实现生产过程的综合自动化的独特优点，使电动仪器、仪表近年来在各类测量仪表中赢得了无可比拟的优势。

1.2 电气测量仪器及其组成系统的工作原理

一般来说，传感器、模拟变送器或数字信号采集仪、显示和记录仪均属测量仪器，即测量系统由各仪器单元组成，如图 1-1 所示。

根据以上组成，其工作原理是传感器首先将被测物理量（电量或非电量）转化为电信号（如被测量为电量，先转换为量值与变化形式上为仪器所能接受的电信号），经过模拟信号变送单元的调理、放大（或数字信号的采集、处理），最后由显示单元进行显示或记录装置进行记录获得所需结果。整个测量过程由操作控制单元手动或自动控制完成。

以被控对象为中心选择各仪器单元组合成一个测控系统或设备，除了完成检测、变送、

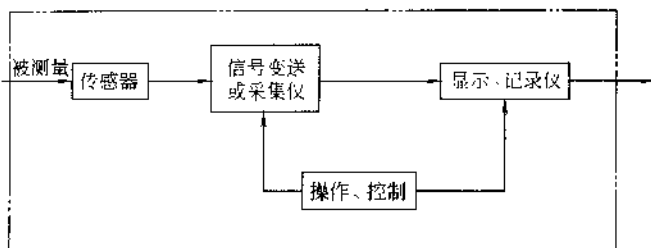


图 1-1 电气测量仪器及其组成的测量系统

显示、记录等传统仪器的功能外，还同时具有对被控变量进行控制、调节的功能。系统的工作原理如图 1-2 所示。

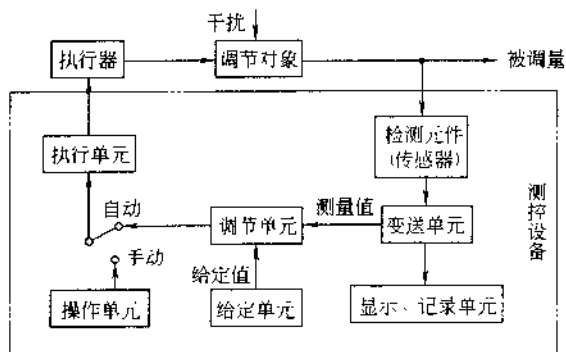


图 1-2 用各仪器单元组合构成的测控系统工作原理

根据框图所示，它已经不是传统意义上的电气测量仪器，而是兼有测、控双重功能的新的自动化系统或设备了。为了实现对被控对象的实时控制，这类设备不仅需要具备静态性能，而且需要具备为被控对象所要求的动态性能：不仅具有必要的测量精度，而且需要有很快的速度对被控对象进行调节与控制，消除因外部干扰或内部参数变化引起的被控变量的变化。

本书第 6 章所讲的以计算机为核心的虚拟仪器系统将为上述的测控设备的构建提供参考。

1.3 仪器、仪表的基本技术指标

传统的测量仪器仪表或由仪器单元组合而成的测控设备，在保证稳定可靠工作的前提下，有如下一些衡量其性能优劣的基本指标。

1.3.1 仪器的静态性能指标

(1) 精度 任何仪器都有一定的误差，使用仪器仪表时必须先知道该仪器仪表的精度，以便估计测量结果与真实值的差距，即估计测量误差大小。

仪器仪表的精度一般不用绝对误差（测量值和真实值的差）和相对误差（绝对误差与真实值之比）来表示，这是因为真实值难求，绝对误差又不能体现对不同量程仪器的合理要求，而相对误差则容易引起人们对仪表精度的误解。例如，对一只满量程为 100mA 的电流表，在测量零电流时，由于机械摩擦使表指针的示数略偏离零位而得到 0.2mA 的读数，若按上述相对误差的定义，则可算出相对误差为无穷大，似乎这个仪表完全不能用，但实际的经验告诉我们，这根本不值得大惊小怪，或许它还是一只比较精确的仪表呢！

一般仪器仪表的精度，应以测量范围中最大的绝对误差和该仪器的测量范围之比来衡量，这种比值称为相对百分误差，即相对于满量程的误差百分数。

例如，某压力表刻度从 0~40MPa，即其测量范围为 40MPa，若在此范围内，最大误差不超过 0.6MPa，其相对百分比误差 δ 为：



$$\delta = 0.6/40 = 1.5\% \quad (1-1)$$

仪表工业规定, 去掉上式中的“%”称为仪表的精度(精确度)。它一般划分为若干等级, 如0.1级、0.2级、0.5级、1.0级、1.5级、2.0级等。可见, 上述压力表的误差为1.5级。另外, 仪器仪表还根据使用条件分为基本误差和附加误差两种。基本误差是指仪表在正常工作条件下的最大相对百分误差。若仪器不在规定的正常条件下工作, 例如周围温度、电源电压等的变化而引起的额外误差, 称为附加误差。仪器仪表的精度等级都是按基本误差确定的。

(2) 灵敏度和分辨力 灵敏度表示测量仪表对被测参数变化的敏感程度, 常以仪表输出量与被测参数变化量之比表示。例如某应变仪, 被测构件中的应变量为 Δx 时, 其应变仪的输出变化了 Δu (V), 则应变仪的电压灵敏度(设为 S_n):

$$S_n = \Delta u / \Delta x \text{ (V/}\mu\epsilon\text{)} \quad (1-2)$$

仪表灵敏度可用增大放大系统的放大倍数来提高, 但放大倍数的提高可能会带来系统的不稳定, 另外, 过小的仪表读数的分格值(小于仪表允许误差的绝对值时), 将失去应有的价值。所以, 仪表的灵敏度还应和仪表的精度相匹配。

仪表的分辨力(或称灵敏度极限)是指仪表能感受并发生动作的输入量之最小值。

(3) 回程误差(迟滞或滞后误差) 在外部条件不变的情况下, 使用同一仪表对被测参数由小到大或由大到小变化进行反复测量所产生的输出量的最大差值与测量范围之比称为回程误差。造成回程误差的原因很多, 如传动机构间存在的间隙和摩擦, 磁元件的磁滞等。在设计 and 制造仪表时, 必须尽量减小回程误差的数值。仪表的回程误差越小, 其测量的重复性越好。

1.3.2 仪器的动态性能指标

仪器仪表除上述静态性能指标外, 当被测量为随时间变化的时变量(周期变化或非周期变化)时, 由于仪器内部(包括传感器在内)的惯性、滞后和储能环节的影响, 仪器的输出相对于输入有着一定的动态传递特性。对如图1-2所示的测控系统, 其动态特性不仅影响自身的输出, 还影响整个调节系统的调节质量。

一般来说, 仪器或其组成系统的动态性能决定于诸组成环节或组成单元的特性, 其指标可以用时域性能指标或频域性能指标表示。时域性能主要有上升时间、响应(过渡过程)时间、超调和稳态误差等。对于许多采用含有较低无阻尼自振频率显示、记录仪的测量系统来说, 响应时间应是显示、记录仪瞬时自由振动消失的时间, 因为此类显示记录单元中含有较大惯性的物件(质量或转动惯量), 在系统诸组成单元中响应最慢。频域的响应特性一般有截止频率和通频带宽。所谓截止频率(以 ω_0 表示)一般是指仪器或其组成系统对谐波输入的响应与输入信号的幅值之比下降到0.707倍(或对数幅频的-3dB)时对应的信号频率。而 $0 \sim \omega_0$ 这个频率范围称为系统的通频带宽。显然, 为使测量值正确地反映被测量, 必须要求被测信号频谱中的最高谐波频率低于 ω_0 。

在过去生产的诸多模拟仪表仪器中, 不少只用于静态测量, 即测量不变或缓变的信号。由于被测信号不变化, 故允许等候足够长时间让仪器到达稳态而正确无误地显示被测信号。对于动态信号的测量, 必要求在组成测量系统的传感器与显示记录单元中频响特性较慢者的截止频率仍高于被测信号中的最高谐波频率方能正确进行。例如用光线示波器记录动态信号



时,就必须正确选用振动物,要使所选用的振动物具有足够高的固有频率和恰当的阻尼值。当被测谐波信号频率(或非正弦周期信号中不可忽视的最高谐波频率)远小于等于此固有频率时,方能保证动态测量精度。为此,在仪器附带的振动物技术数据中均会给出振动物的工作频率范围,以指导动态测量。关于阻尼,因为过小的阻尼值会造成仪器在显示被测量时读数的振摆,故一般取合适的阻尼比的值为 0.707 左右。在此阻尼比时,仪器输出对输入的频率响应将既不会出现谐振而又有较快的响应速度。例如光线示波器所用的油阻尼振动物均按 0.7 进行制造。在使用电磁阻尼振动物时,必须使与上述记录式示波器相连的变送单元的输出阻抗等于一个合适的值(以 R_k 表示);如不等于此值,示波器还设计有振动物外电阻调节装置,即外加的电位器电阻与输出阻抗相串联、并联后的等效电阻应等于 R_k 。

现代可进行动态信号测量并进行显示记录的仪器均应明确相关的动态性能,例如在数字存储式示波器中均给出了带宽。当用于对不同频率信号测量时,为避免“假波”现象,还应按采样定理给出不同的采样速率,并以相应的时基保证采样点数的一致。

第 2 章

传 感 器

2.1 传感器概述

2.1.1 传感器的概念

在自动化检测过程中，常通过测量的方法获取各种被测信号的信息，这里担当信号检测任务的就是传感器。

广义地讲，传感器是一种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。这一定义包含的意思是：①传感器是检测装置，能完成检测任务；②感受的被测量可以是物理量、化学量或生物量；③它的输出是便于传输、转换、处理、显示的某种物理量，这种量可以是气、光和电量，主要是电量，如电压、电流、电荷、电阻、电容、电感、相位和频率等；④输出、输入有对应关系。

关于传感器，有些国家和有些学科技术领域称之为变换器、转换器、换能器、检测器或探测器等，它们的内涵相同或相似。虽然对传感器的定义，时至今日在国外、国内尚无统一的定义，但目前在国内已趋于统一使用传感器这个名称了。从字面上看，传感器具有一感二传的功用，即感应被测量，并把被测量的响应传送出去。

需要说明的是，随着信息科学和微电子技术，特别是微型计算机与通信技术的迅猛发展，近期传感器的发展走上了与微处理器、微型计算机相结合的必由之路，传感器的概念得到了进一步的扩充。如智能传感器，它是一种带有微处理器，并具有检测判断与信息处理的多功能传感器。可以预料，当人类进入光电子时代，光信息成为便于快速、高效地处理和传输的可用信号时，能把外界信息转换成光信号输出的新概念传感器将应运而生。

2.1.2 传感器的组成

一般讲传感器由敏感元件和转换元件组成。其中敏感元件是指传感器直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。转换元件指传感器中能将敏感元件输出转化为电路参数量的元件。由于传感器的输出信号一般都很微弱，需要转换电路与信号调理电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录或显示的形式。随着半导体与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调理和转换电路可能直接安装在壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此，信号调理与转换电路以及所需电源也视作传感器的组成部分。如图 2-1 所示。



图 2-1 传感器组成框图



常见的信号调理与转换电路有电桥、放大器、振荡器、调制器、电荷放大器等，它们分别与相应的传感器相结合。

实际上并不是所有的传感器都能明显地区分敏感元件与转换元件两部分，有些传感器很简单，有些则较复杂。传感器的具体构成方法视被测对象、转换原理、使用环境以及性能要求等具体情况不同而有很大差异。图 2-2 所示为几种典型传感器的构成形式。

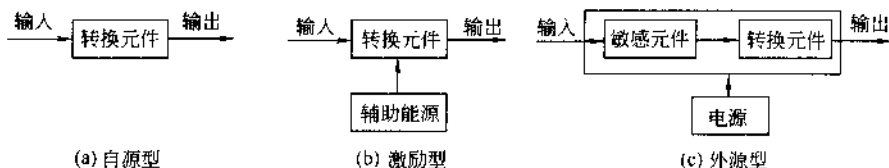


图 2-2 传感器的构成形式

(1) 自源型 为仅含有转换元件（敏感元件与转换元件两者合一）的最简单、最基本传感器结构形式。此形式特点是不需要外电源，其转换元件直接感受被测量，转换为电量输出，如热电式、压电式传感器等。

(2) 激励型 它是转换元件外加辅助能源构成的形式，这里的辅助能源起激励作用，它可以是电源，也可以是磁源、光源、热源和气源等。此形式特点是不需要信号调理与转换电路即可有较大的电量输出，如某些磁电式和霍尔式传感器。

(3) 外源型 由利用被测量实现阻抗变换的转换元件构成，它必须通过带外接电源的转换电路才能获得电量输出，如电阻应变式、电感式传感器等。

2.1.3 传感器的分类

工程应用的传感器种类很多，往往一种被测量可应用多种传感器来测量，而同一原理的传感器通常又可以测量多种非电量。表 2-1 列出了目前一些流行的分类方法。

表 2-1 传感器的分类方法

分 类 法	传 感 器 种 类	说 明
按输入量分类	位移、压力、温度、流量、气体等传感器	以被测物理量命名(按用途分类法)
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、压电式、电热式等	以传感器工作原理命名
按结构原理分类	结构型(如差动变压器、电容、电感式传感器)	以转换元件结构参数变化实现信号转换
	物性型(如光电、半导体传感器)	以转换元件物理特性变化实现信号转换
按能量分类	能量转换型(基于热电效应、压电效应、光电动势效应等传感器)	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型(基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应、 R 、 L 、 C 等电参量传感器)	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式	输出为模拟量
	数字式	输出为数字量

本章将按照输入量分类的方法，主要介绍在电气测量仪器中与电测法有关的常用传感器。



2.2 传感器的静态特性与动态特性

传感器所测量的物理量经常会随时间发生各种各样的变动。例如,用一压力传感器测量某一液压系统的压力时,作用到传感器的压力在一段时间内可能十分稳定或者仅有缓慢变化,这时对传感器要求主要是输出应稳定正确;而在另一段时间里,作用到传感器的压力又可能是一种周期的脉动变化,甚至出现突变的尖峰压力,这时对输入信号响应的快速性成了对传感器的主要要求。因此,传感器的性能将直接影响着整个工作系统的工作状态和质量。传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系。当输入量为常量或缓慢变化时,这一关系称为静态特性。当输入量随时间变化时,这一关系称为动态特性。对于那些用于静态测量的传感器,一般只需利用静态特性指标来考察其质量。在动态测量中,不仅需要用静态特性指标,而且还需要用动态特性指标来描述传感器的质量,因为两方面的特性都会影响测量结果。

2.2.1 传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测输入量是处于稳定状态时的输出-输入关系。衡量传感器静态特性的主要技术指标有线性度、灵敏度、回程误差、重复性、阈值、分辨率、稳定性和漂移等指标。

(1) 线性度 (linearity) 线性度又称非线性误差,是表征传感器输出-输入校准曲线(又称标定曲线)与所选定的拟合直线之间的吻合(或偏离)程度的指标。通常用相对误差来表示“线性度”的大小,即传感器的正行程平均校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差绝对值与满量程(full span)输出之比来表示。图2-3中,非线性误差 e_L 为

$$e_L = \frac{|\Delta y_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中 $|\Delta y_{\max}|$ ——输出平均值与拟合直线最大偏差绝对值;

y_{FS} ——满量程输出。

满量程输出用检测上限标称值 y_H 与检测下限标称值 y_L 之差的绝对值表示,即 $y_{FS} = |y_H - y_L|$ 。显然,选定的拟合直线不同,计算得的线性度数值也就不同。目前常用两种拟合方法:一种是端点法,即以校正曲线两端点间的连线作为拟合直线,如图2-3(a)所示;另一种是按最小二乘法原理求其拟合直线,该直线与校准数据的残差平方和最小,如图2-3(b)所示。本书推荐采用最小二乘法。

(2) 灵敏度 (sensitivity) 灵敏度是传感器输出量变化(Δy)与输入量变化(Δx)之比。线性传感器的灵敏度就是拟合直线的斜率。定义灵敏度为

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-2)$$

非线性传感器的灵敏度不是常数,应以 $S_n = dy/dx$ 表示。灵敏度是一个有量纲的量,其单位取决于输出、输入量之比。

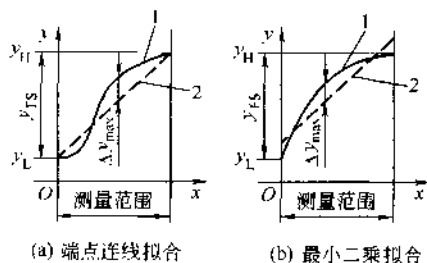


图 2-3 校正曲线与非线性误差

1·校正曲线; 2·拟合曲线



(3) 回程误差 (hysteresis) 回程误差又称为迟滞或滞后误差,它是反映传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程过程中输出-输入曲线的不重合程度,如图 2-4 所示。也就是说对应于同一大小的输入信号,传感器的正反行程时输出信号的大小不相等。产生这种现象的主要原因是传感器的机械部件和结构材料等问题,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦等。回程误差通常由实验确定,其值以满量程输出 y_{FS} 的百分比表示,即

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \quad (2-3)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正反行程输出值间的最大差值。

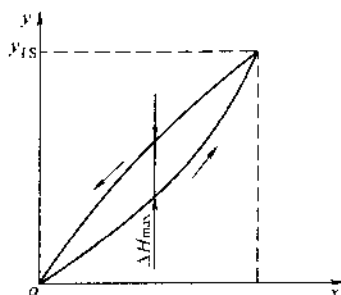


图 2-4 回程误差

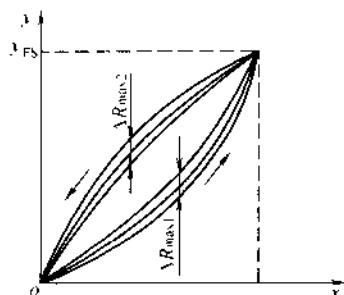


图 2-5 重复特性

(4) 重复性 (reconstruction) 重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得输出-输入特性曲线不一致性程度,如图 2-5 所示。多次重复测试的曲线重复较好,误差也小。重复特性的好坏与许多因素有关,与产生迟滞现象具有相同的原因。

重复性误差通常用输出最大不重复误差 $\Delta R_{\max}$ 与满量程输出 y_{FS} 的百分比表示,即

$$e_R = \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2-4a)$$

重复性误差是属于随机误差的性质,按上述方法计算就不太合理。因此应根据标准偏差来计算

$$e_R = \frac{(2 \sim 3)\sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2-4b)$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——各校正点正行程与反行程输出值的标准偏差中之最大值。误差服从正态分布,标准偏差 σ 可以根据贝塞尔公式来计算。

(5) 分辨力和阈值 分辨力是传感器在规定测量范围内能检测出被测输入量的最小变化量。分辨力可用绝对值表示,也可用该值与满量程输入值之百分数表示,则称为分辨率。

阈值是指能使传感器输出端产生可测变化量的最小被测输入量的值,即零位附近的分辨力。阈值大的传感器,其迟滞必然大,但分辨力不一定差。

(6) 稳定度和漂移 稳定度是指传感器在一定的工作条件下,保持输入信号不变时,输出信号随时间或温度的变化而出现的缓慢变化程度。随时间变化而出现的漂移称为时漂;随环境温度变化而出现的漂移称为温漂。输出的温漂或时漂又常以零点漂移和灵敏度漂移来定



量表示。

2.2.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。用传感器检测动态信号时,希望传感器的输出量随时间变化的关系复现输入量随时间变化的关系,但实际上除了理想比例特性的环节以外,输出的信号不会与输入信号完全一致。为了掌握与使用传感器,充分了解其特性是必要的。

(1) 传感器动态特性的数学模型 为了便于分析和处理传感器的动态特性,必须建立数学模型。数学上精确建立传感器的动态数学模型是很困难的,常常忽略一些影响不大的因素,如非线性和随机变量等复杂因素,将传感器作为线性定常系统来考虑。

① 时域表示方法——微分方程。对于线性时不变系统,动态数学模型可以用常系数线性微分方程表示

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-5)$$

式中, $x=x(t)$ 为输入信号; $y=y(t)$ 为输出信号; $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ 均为与传感器结构有关的常数。

常见传感器的物理模型通常可分别用零阶、一阶和二阶的常微分方程描述其输出-输入动态特性,分别称零阶环节、一阶环节和二阶环节,或称零阶、一阶和二阶传感器,即

$$a_0 y = b_0 x \quad (\text{零阶环节})$$

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (\text{一阶环节})$$

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (\text{二阶环节})$$

显然,阶数越高,传感器的动态特性越复杂。最常用的是一阶和二阶传感器。

② 复频域表示法——传递函数。在工程上,为了计算方便,通常采用拉普拉斯变换来研究线性微分方程。当初始条件均为零时,输出量的拉氏变换与输入量的拉氏变换之比为:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (2-6)$$

称为拉氏形式的传递函数,并记为 $G(s)$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2-7)$$

显然,传递函数是以代数式的形式表征系统的动态特性。式(2-6)分母中 s 的幂次 n 代表了系统的微分方程的阶数,如 $n=1, 2, \cdots$ 分别表示一阶系统、二阶系统、...的传递函数。

③ 频域表示法 频率响应函数。频率响应函数是在频域中描述和考察系统特性的,它是指系统在简谐信号的激励下,其稳态输出对输入的幅值比、相位差随激励频率 ω 变化之间的关系。如果把稳态输出信号和输入信号的幅值比被定义为该系统的幅频特性,记为 $A(\omega)$,稳态输出对输入的相位差被定义为该系统的相频特性,记为 $\varphi(\omega)$,此时,幅频、相频特性分别表征系统对输入信号中各频率分量幅值的缩放能力和相位角前后移动的能力。在