



高职高专“十一五”规划教材

机械电子类

传感器与 检测技术

李娟 主编



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

内 容 简 介

本书介绍了工程中常用传感器的工作原理和测量电路,以及自动检测系统的设计。全书共分10章,主要内容包括:传感器与检测技术基础,电阻式传感器,电容式传感器,电感式传感器,磁电式传感器,热电式传感器,光电式传感器,其他传感器简介,传感器信号的处理,自动检测系统设计。第2~8章具有相对独立性,以便不同层次、不同专业、不同学时学生选用。

本书理论深入浅出,突出实际应用,适合于高职高专机电一体化、自动控制、电气自动化和机械制造等各专业作为教材使用,也可供工程技术人员及相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/李娟主编. —北京:冶金工业出版社,
2009.1
ISBN 978-7-5024-4853-0

I. 传… II. 李… III. 传感器—检测 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 012597 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 刘 源

ISBN 978-7-5024-4853-0

北京天正元印务有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 1 月第 1 版, 2009 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11.75 印张; 268 千字; 178 页; 1-3000 册

25.00 元

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

本书理论深入浅出,突出传感器在检测过程中的应用。对传感器原理部分以“理论够用为度”,讲清物理概念,对于传感器的应用部分则充分结合生产和工程实践,详细讲解传感器的类型、结构、参数以及检测原理,并且注意补充新器件、新技术的内容。本书适合于高职高专机电一体化、自动控制、电气自动化和机械制造等专业作为教材使用,也可供工程技术人员及相关人员参考。

全书共分10章。参考教学课时为40~60课时。

第1章介绍传感器的定义、分类、特性、应用和发展,简要介绍测量的基本知识,测量数据的处理方法;第2章介绍电阻应变式、压阻式、电位器式电阻传感器的工作原理,性能特点,常用结构形式及应用;第3章介绍各种形式电容传感器的工作原理,性能特点与应用;第4章介绍自感式、差动变压器式、电涡流式传感器的工作原理,性能特点及应用;第5章介绍磁电感应式、霍尔式传感器的工作原理,转换电路,性能特点及应用,感应同步器的工作原理与应用;第6章介绍热电偶、热电阻的工作原理及应用;第7章介绍光电器件、光栅、光纤、红外线、激光传感器的原理,特点及应用,光电式传感器的典型应用;第8章介绍气体、湿度、微波和图像等传感器的工作原理及应用;第9章介绍传感器输出信号的特点,常用的转换、放大、滤波电路和抗干扰技术;第10章介绍检测技术的基本概念,以单片机为控制中心的自动检测系统的设计方法和应用实例,简单介绍系统可靠性的概念。

本书由李娟任主编,杨富超、宋娟、张兰红、陈琪任副主编,宋晓玲、韩燕参加编写。

由于编者水平所限,书中如有不足之处敬请使用本书的师生与读者批评指正,以便修订时改进。如读者在使用本书的过程中有其他意见或建议,恳请向编者(bjzhangxf@126.com)踊跃提出宝贵意见。

编 者

目 录

第 1 章 传感器与检测技术基础	1
1.1 传感器的定义、组成及分类	1
1.1.1 传感器的定义和组成	1
1.1.2 传感器的分类	2
1.2 传感器的应用领域和发展趋势	3
1.2.1 传感器的应用	3
1.2.2 传感器的发展状况	4
1.3 传感器的特性	5
1.3.1 传感器的静态特性	5
1.3.2 传感器的动态特性	7
1.4 传感器的标定和校准	9
1.4.1 传感器的标定	9
1.4.2 传感器的校准	9
1.5 测量的一般知识	10
1.5.1 测量方法	10
1.5.2 测量数据的处理及表述	11
1.6 误差理论基础	13
1.6.1 误差的定义	13
1.6.2 误差的分类	14
1.6.3 误差的表示方法	14
习题	15
第 2 章 电阻式传感器	16
2.1 电阻应变式传感器	16
2.1.1 电阻应变片的工作原理	16
2.1.2 电阻应变片的主要特性及参数	17
2.1.3 电阻应变片的种类	18
2.1.4 测量电路	20
2.2 压阻式传感器	25
2.2.1 半导体的压阻效应与压阻系数	25
2.2.2 影响压阻系数的因素	26
2.2.3 压阻传感器的测量电路与温度补偿	27
2.2.4 压阻传感器举例	29
2.3 电位器式传感器	31
2.3.1 电位器式传感器的工作原理	31
2.3.2 电位器式传感器的输出特性	32
2.3.3 电位器式传感器的结构	33
2.4 电阻式传感器应用举例	33
2.4.1 测力传感器	33
2.4.2 压力传感器	34
2.4.3 扭矩传感器	34
2.4.4 电位器式位移传感器	35
习题	35
第 3 章 电容式传感器	36
3.1 电容式传感器的工作原理和分类	36
3.1.1 变极距型电容传感器	36
3.1.2 变面积型电容传感器	40
3.1.3 变介质型电容传感器	41
3.2 电容式传感器的测量电路	42
3.2.1 等效电路	42
3.2.2 测量电路	43
3.3 电容式传感器的主要性能特点	45
3.4 电容式传感器的应用	46
3.4.1 电容式加速度传感器	47
3.4.2 电容式液位(料位)传感器	47
3.4.3 电容式压力传感器	48
3.4.4 容栅式传感器	49
习题	50
第 4 章 电感式传感器	51
4.1 自感式电感传感器	51

4.1.1 工作原理	51	习题	75
4.1.2 输出特性	52	第 6 章 热电式传感器	76
4.1.3 测量电路	53	6.1 热电偶	76
4.2 差动变压器式传感器	55	6.1.1 热电偶的工作原理	76
4.2.1 工作原理	55	6.1.2 热电偶的基本定律	77
4.2.2 差动变压器式传感器 测量电路	56	6.1.3 热电偶的类型	78
4.3 电涡流式传感器	57	6.1.4 热电偶的结构形式	80
4.3.1 工作原理	57	6.1.5 热电偶冷端的温度补偿	81
4.3.2 电感传感器的应用	57	6.2 热电阻	82
习题	59	6.2.1 金属热电阻传感器	82
第 5 章 磁电式传感器	60	6.2.2 半导体热敏电阻	84
5.1 磁电感应式传感器	60	习题	84
5.1.1 磁电式传感器的工作原理	60	第 7 章 光电式传感器	85
5.1.2 动圈式传感器的基本结构 和工作原理	60	7.1 光电效应与光电器件	85
5.1.3 磁阻式传感器的基本结构 和工作原理	61	7.1.1 光电效应及分类	85
5.1.4 磁电感应式传感器的测量 电路	62	7.1.2 光电器件	86
5.2 霍尔式传感器	63	7.1.3 光电器件的应用	91
5.2.1 霍尔效应	63	7.2 光纤传感器	92
5.2.2 霍尔元件的基本结构和 主要技术参数	64	7.2.1 光纤	92
5.2.3 霍尔元件的测量误差 及其补偿	66	7.2.2 光纤传感器	93
5.2.4 霍尔式传感器的应用	69	7.3 光栅式传感器	95
5.3 感应同步器	70	7.3.1 光栅的结构	95
5.3.1 感应同步器的基本结构 与工作原理	71	7.3.2 光栅的基本工作原理	96
5.3.2 感应同步器输出信号的 检测	72	7.3.3 光栅式传感器的应用	99
5.4 磁电式传感器应用举例	73	7.4 红外线传感器	99
5.4.1 CD-1 型振动速度传感器	73	7.4.1 红外辐射	100
5.4.2 磁电感应式转速传感器	74	7.4.2 红外传感系统	100
5.4.3 磁电感应式扭矩仪	75	7.4.3 热释电型红外线传感器	101
		7.5 激光传感器	102
		7.5.1 激光的形成	102
		7.5.2 激光的特点	103
		7.5.3 常用的激光器	104
		7.5.4 激光检测技术的应用	104
		7.6 光电编码器	106
		7.6.1 增量式光电编码器	107

7.6.2 绝对式光电编码器	107	第 9 章 传感器信号的处理	131
7.6.3 光电编码器的应用	109	9.1 传感器信号的预处理	131
7.7 光电式传感器及其应用实例	111	9.1.1 传感器输出信号的特点	131
7.7.1 光电式传感器的应用类型	111	9.1.2 传感器信号的预处理方法	131
7.7.2 应用实例	111	9.2 传感器信号的放大电路	132
习题	112	9.2.1 高精度、低漂移运算 放大器	132
第 8 章 其他传感器简介	114	9.2.2 高输入阻抗运算放大电路 及仪表放大器	132
8.1 气体传感器	114	9.2.3 隔离放大器和隔离 放大系统	133
8.1.1 接触燃烧式气体传感器	114	9.2.4 程控增益放大器	134
8.1.2 半导体式气体传感器	116	9.3 信号的调制与解调	135
8.1.3 氧化锆氧气传感器	116	9.3.1 信号调制的概念	135
8.1.4 气体传感器的应用	117	9.3.2 电桥调幅的原理	135
8.2 湿度传感器	118	9.3.3 电桥调幅波的解调	136
8.2.1 湿度表示法	118	9.3.4 应用举例	137
8.2.2 湿度传感器的分类及 工作原理	118	9.4 滤波电路	137
8.2.3 湿度传感器的测量电路	119	9.5 传感器信号的非线性校正	138
8.3 微波传感器	120	9.5.1 校正曲线的求取	138
8.3.1 微波传感器及其分类	121	9.5.2 模拟量的非线性校正	139
8.3.2 微波传感器的结构及 工作原理	121	9.5.3 数字量的非线性校正	139
8.3.3 微波传感器的应用——微波 温度传感器	121	9.6 A/D 转换器的选择	140
8.4 图像传感器	122	9.6.1 A/D 转换器的性能指标	140
8.4.1 CCD 图像传感器	122	9.6.2 A/D 转换器的选择	141
8.4.2 CMOS 图像传感器	124	9.7 抗干扰技术	141
8.5 生物传感器	125	9.7.1 干扰的来源	142
8.5.1 生物传感器的基本原理	125	9.7.2 抗电磁干扰技术	142
8.5.2 生物传感器的分类	125	习题	145
8.5.3 酶传感器	126	第 10 章 自动检测系统设计	146
8.5.4 微生物传感器	126	10.1 自动检测技术概述	146
8.5.5 免疫传感器	127	10.1.1 检测仪表的组成	146
8.6 机器人传感器	127	10.1.2 检测仪表的分类	146
8.6.1 内部检测传感器	127	10.1.3 变送器	147
8.6.2 外界检测传感器	128	10.2 自动检测系统设计	148
习题	130		

10.2.1 传感器的选择	148	10.4.2 提高可靠性的措施	163
10.2.2 主计算机选型	149	附录一 CSY 型传感器试验仪	
10.2.3 输入、输出通道设计	150	实验指导	165
10.2.4 软件设计	150	实验一 电阻应变片性能实验	165
10.2.5 计算机检测系统设计的		实验二 差动变面积式电容传感器	
基本步骤	151	的应用	166
10.3 基于单片机的自动检测系统		实验三 差动变压器式电感传感器的	
设计实例	151	应用——测位移	167
10.3.1 电阻炉自动温度控制		实验四 电涡流式传感器的应用	169
系统	152	实验五 霍尔传感器的应用	170
10.3.2 转速的实时测量及		实验六 光纤传感器的应用	171
数据处理	155	实验七 单臂、半桥、全桥功能比较	172
10.3.3 车载信息系统	157	附录二 热电偶分度表	175
10.4 自动检测系统的可靠性	161	参考文献	178
10.4.1 可靠性的基本概念	162		

第 1 章 传感器与检测技术基础

在现代工业生产中，为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象，使它们处于最佳工作状态，就必须掌握描述它们特性的各种参数，即首先要测量这些参数的大小、方向和变化速度等。所谓检测，就是人们借助仪器、设备，利用各种物理效应，采用一定的方法，将客观世界的有关信息通过检查和测量获取定性或定量信息的认识过程。这些仪器和设备的核心部件就是传感器。

1.1 传感器的定义、组成及分类

1.1.1 传感器的定义和组成

传感器是能感受被测量并转换为与之有确定对应关系的有用输出信号(一般为电量)的器件或装置，以满足信息的传输、记录、显示和控制等要求。有些国家的学科领域，将传感器称为变换器、检测器或探测器等。

传感器一般由敏感元件、传感元件和其他辅助元件组成，有时也将信号调节与转换电路、辅助电源作为传感器的组成部分，如图 1-1 所示。传感器根据使用要求的不同，可以做得很简单，也可以做得很复杂；可以是带反馈的闭环系统，也可以是不带反馈的开环系统。因此，传感器的组成将依不同情况而有所差异。

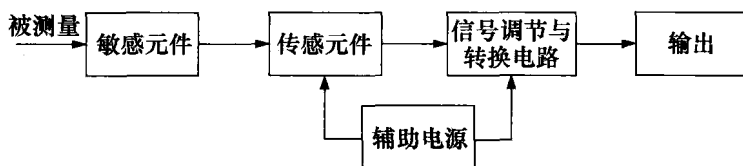


图 1-1 传感器组成原理框图

敏感元件——感受被测量，并输出与被测量成确定关系的其他量的元件，如膜片和波纹管可以把被测压力变成位移量。若敏感元件能直接输出电量(如热电偶)，就兼为传感元件。还有一些新型传感器，如压阻式和谐振式压力传感器以及差动变压器式位移传感器等，其敏感元件和传感元件完全融为一体。

传感元件——又称转换元件，是传感器的重要组成部分。它可以直接感受被测量(一般为非电量)而输出与被测量成确定关系的电量，如热电偶和热敏电阻。传感元件也可以不直接感受被测量，而只感受与被测量成确定关系的其他非电量。例如，应变片式压力传感器并不直接感受压力，而只是感受与被测压力成确定关系的弹性膜片的变形量，然后输出电量。一般情况下使用的都是这种传感元件。

信号调节与转换电路——能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录和控制的有效信号的电路。信号调节与转换电路根据传感元件类型的不同有很多种类，常用的电路

有电桥、放大器、振荡器和阻抗变换器等。

1.1.2 传感器的分类

测试中,应用传感器的种类繁多,不胜枚举。有的传感器可以用于测量多种参数,而有时对于一种物理量又可用多种不同类型的传感器测量。因此,传感器的分类方法很多。传感器的常用分类方法有以下几种。

1.1.2.1 按被测非电量分类

传感器的输入非电量大致可分为热工量、机械量、物性和成分量、状态量 4 大类,其具体分类见表 1-1。按照输入非电量分类可将传感器分为位移传感器、力传感器和速度传感器等。这种分类能够明确地指出传感器的用途,便于使用者选择。这是商业产品常用的分类法。但这种分类法的缺点是各自品种繁多,对建立传感器的基本概念、掌握基本原理和分析方法是不利的。

表 1-1 被测非电量的分类

输入非电量	测量参数
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力、压差、真空度、流量、流速、风速、物位、液位、界面
机械量	位移(角位移)、长度(尺寸、厚度、角度等)、力、应力、力矩、重量、质量、转速、线速度、角速度、振动、加速度、噪声
物性和成分量	气体化学成分、液体化学成分、酸碱度、盐度、浓度、黏度、湿度、密度
状态量	颜色、透明度、颗粒度、硬度、磨损度、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量

1.1.2.2 按工作原理分类

按工作原理可以分成参量传感器、发电传感器及特殊传感器。其中,参量传感器有电阻式传感器、电感式传感器和电容式传感器等;发电传感器有光电池、热电偶传感器、压电式传感器和磁电式传感器等;特殊传感器是不属于以上两种类型的传感器,如超声波探头、红外探测器和激光检测等。

这种分类方法的优点是可以把传感器按工作原理分门别类地归纳起来,避免名目过多,且较为系统,有利于专业人士对传感器进行归纳性的研究。本书将基本按照此分类方法介绍各种传感器。

有时还将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。有源传感器犹如一台微型发电机,能将非电功率转换为电功率,传感器起能量转换的作用,因此又称为发电型传感器。如磁电式、压电式和热电式等传感器,其所配的测量电路通常是信号放大器。无源传感器并不起换能作用,被测量仅对传感器中的能量起控制作用,必须有辅助能源(电源),如电阻式、电容式和电感式传感器等。无源传感器本身不是一个信号源,所以配合的测量电路通常是电桥式谐振电路。这种分类法有利于对传感器的内在联系作统一概括的分析和深入的研究。

由于传感器门类繁多,涉及的学科面广,因此还有不少分类方法,如按输出信号把传感器分为模拟式传感器和数字式传感器;按工作特点把传感器分为结构型和物性型传感器

等。这里不一一介绍。

为了明确表示传感器的用途,又反映其工作原理,还可将用途和原理结合在一起称谓,如电感式位移传感器和压电式加速度传感器等。

1.2 传感器的应用领域和发展趋势

1.2.1 传感器的应用

传感器早已渗透到工业生产、军事国防、宇宙探测、海洋开发、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程、文物保护、安全防范和家用电器等领域。因此,从茫茫太空到浩瀚海洋,从各种复杂工程系统到日常生活的衣食住行,几乎每一个领域都离不开各种各样的传感器。可以毫不夸张地说,21世纪的社会将是充满传感器的世界。

在电力工业中,检测发电机组各转动部分的轴承温度及转子的动平衡情况,测量和控制汽轮机进汽流量、速度、压力和温度,可调节发电机组的功率和频率等,保证供电质量。同时对锅炉液位、粉煤仓物位以及锅炉温度进行自动检测与控制,实现自动加煤添水,保证安全生产。

在工业生产自动化过程中,检测、监视和控制温度、压力、流量、液位和 pH 值等参数,以便使设备工作在最佳状态,成本消耗最低,产品质量最高,同时,在生产过程中将各个环节的参数转为电信号,并与计算机接口,实现生产自动化。

在机械制造业中,利用传感技术对铸件内有无气泡、裂纹进行无损检测;在机械加工过程中,采用各种传感器对刀架压力、工件被夹是否变形及自动进刀量等进行控制,对车床振动的检测以及工件加工完毕后对加工精度、表面光洁度、平面度、同轴度、圆度和锥度等进行检测,有利于保证和提高工件加工质量。

冶金部门对液态金属温度的测量,大型钢厂需要 2 万多台传感器和自动化仪器对轧机的压力、转矩、转速以及对板材厚度的在线不停机自动检测和控制等;石油化工部门对温度、压力、流量及液位等参数的多点循环检测与控制,是保证产品质量的关键。

在航空航天技术中,传感器用得早且多。用来检测飞机及各种宇宙飞行器的飞行参数、运行状态、发动机推力、燃烧室液体燃料喷嘴的压力和温度,管道中液体燃料的流量和流速,空中各种卫星、宇宙飞行器的能源供给,侦察卫星对地面军事设施、重要建筑物的监视和拍照等。美国阿波罗 10 号宇宙飞船使用大量传感器对 3 295 个参数进行监测。我国“神州”号宇宙飞船,仅信息产业部第 49 所就提供了 400 余套 2 000 余支传感器,对飞船中各种参数进行检测与控制。

造纸、纺织和烟草等轻工部门也离不开传感器。使用传感器对纸、纱的张力进行测量,检查布匹有无断纱次品,检测、控制空气中的温度和湿度,对保证纸张、棉纱、卷烟的质量有很大好处。

在交通运输部门,为研究飞机的强度,要在机翼上贴几百个应变片;在试验飞行时,还要利用传感器测量发动机的转速、转矩和振动等参数,以及飞机上各相关部位的应力、温度、燃油流量及液位等参数;汽车工业也要用 30 多种传感器检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量和温度等参数。美国研制成功的无人驾驶飞机和正在试验的无人驾驶汽车,

则要用到更多的传感器。此外,在乘飞机、火车、轮船之前,对旅客行包中有无危险品或易燃品的检查,海关对集装箱内货物品种的检查,对车、船所装货物重量及载荷分布情况的检测,对桥梁安全运行状态的监控,以及在夜晚、大雾或云层中行驶的车、船和飞机预防相撞等,都要借助传感器。

在军事方面,现代战争是科技战争,也就是传感器战争。从20世纪初的探测地雷,到现代的阻击导弹,从20世纪末的海湾战争,到21世纪初的美伊之战,打的都是传感器技术。为寻找伊拉克所谓的大型杀伤性武器,联合国的武器检查组使用传感器搜查了伊拉克的每个角落,甚至隐藏于地下近百米深的军事设施也不能幸免。

在医疗卫生方面,众多的检查仪器都采用了传感器,如同位素扫描、B超、磁振、脑电图及心电图等。还有利用生物传感器对人体血液内的糖、尿含量进行检测,以便确诊病情。现在还有一种非常小的传感器,用注射器注入人体血管内,用来检测血管壁厚度、血压、血稠、血栓、动脉硬化以及心脏内部结构情况等。

在安全防卫和环境保护方面,用传感器检测森林火灾,预报地震、山崩、滑坡、海啸,对洪水、洪峰以及大堤管涌的检测预报等,还有对河流、湖泊、海水、空气的污染程度进行检测,以及噪声、有害气体对环境污染的检测都要用到传感器。

海洋工程需要许多传感器。海洋占地球表面积的70%,海洋是人类21世纪重点开发的新的生存空间,是蕴藏巨大自然资源的宝库,是未来高技术条件下局部战争的主要战场。要开发利用海洋,必须首先认识海洋。因此,对海底重力场、磁场强度、地形地貌、地质断层、矿藏种类及含量的检测,对海洋水文信息、气象信息、化学成分以及对潮汐潮流的检测都要用到传感器。特别是对5000m以下的深海探测,主要依赖于各种传感器,因为那里有许多值得开采的矿藏,如锰结核等。此外,近海的石油钻探和开采也需要传感器。

考古方面用传感器探测古迹遗址,检测、鉴定文物制造年代;地质勘探方面用传感器探测地下矿藏、检测放射性元素、探测地下水、鉴定化石形成时间;仿生学领域制造电子鼻和电子复眼等仿生传感器,至于智能机器人的视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉能模仿人的功能,则要用到多种传感器。

用于办公用具和家用电器中的传感器越来越多,例如在复印机中装有位移、照度和温度等传感器;电冰箱、空调机上都装有温度、湿度传感器;洗衣机上装有液位、振动及湿度传感器;电饭锅中装有热电传感器;抽油烟机中装有防煤气泄漏的气敏传感器和防火灾的烟雾传感器;以及收录机、录像机、VCD、电视机和血压计等都需要很多传感器。

1.2.2 传感器的发展状况

现代科技水平的不断发展,为传感与测试技术水平的提高创造了物质条件;反之,拥有高水平的传感与测试技术又会促使新科技成果的不断出现。这两者之间,相辅相成。大致进行归纳,传感与测试技术有以下几个方面的发展。

1.2.2.1 传感器向新型、微型和智能型发展

传感器是信号检测的器具,精度高、灵敏度高且测量范围大及小型化是传感器的发展方向。新的材料特别是新型半导体材料方面的成就,已经促使发展了很多对力、热、光、磁等物理量及气体化学成分敏感的器件。光导纤维不仅可用来作信号传输,而且可作为物

性型传感。另一个引人注目的发展是微电子的发展使得有可能把某些电路乃至微处理器和传感检测部分做成一体,而使传感器具有放大、校正、判断和一定的信号处理功能,组成所谓的“智能传感器”。例如在机器人工程的发展中,需要研制灵敏度高、小型化、微型化的新型视觉、触觉、听觉和嗅觉传感器等。

1.2.2.2 测量仪器向高精度和多功能发展

测量仪器及整个测量系统性能的提高,使测得数据的可信度也相应提高。在产品研制过程中要进行大量实验,测量某些性能参数,然后对新测数据进行统计分析。在相同条件下要实验若干次,新测参数才能具有一定的可信度。仪器精度的提高,可减少实验次数,从而减少实验经费,降低产品成本。在提高测量仪器精度的同时,扩大仪器的功能也是目前的发展趋势,特别是计算机技术的发展也使传感与测试技术产生了革命性的变化。在许多测试系统中,计算机的应用使仪器的测量精度更高,功能更全。

1.2.2.3 参数测量与数据处理向自动化方向发展

一个产品的大型综合性实验,准备时间长,待测的参数多,少则有几十,多则有几百个通道。这些通道状态如果完全依靠人工检查,就要耗费很长时间;众多的数据若依靠手工处理,不仅处理周期长,处理结果精度也低。现代传感与测试技术的发展是采用以计算机为中心的自动测试系统。这种系统能实现自动校准、自动修正、故障诊断、信号调制、多路采集及数据的分析处理,并能打印输出测试结果。实现多参数的自动测量与处理,可以大大提高测量精度,缩短实验周期,加速产品的开发。

1.3 传感器的特性

如果测量时,测试装置的输入、输出信号不随时间而变化,则称为静态测量。静态测量时,测试装置表现出的响应特性称为静态响应特性。如果测量时,测试装置的输入、输出信号随时间而变化,则称为动态测量。动态测量时,测试装置表现出的响应特性称为动态响应特性。

1.3.1 传感器的静态特性

表示静态响应特性的参数,主要有灵敏度、非线性度和回程误差。为了评定测试装置的静态响应特性,通常采用静态测量的方法求取输入—输出关系曲线,作为该装置的标定曲线。

理想线性装置的标定曲线应该是直线,但由于各种原因,实际测试装置的标定曲线并非如此。因此,一般还要求出标定曲线的拟合直线。

可选用的拟合直线有多种,常用的有以下几种,如图 1-2 所示。

(1) 端点连线。如图 1-2(a)所示,将静态特性曲线上对应于测量范围上、下限的两点的连线作为工作直线。

(2) 端点平移连线。如图 1-2(b)所示,平行于端点连线,且与实际静态特性(常取平均特性为准)的最大正偏差和最大负偏差的绝对值相等的直线。

(3) 过零旋转拟合。如图 1-2(c)所示,经过零点,且与实际静态特性(常取平均特性为

准)的最大正偏差和最大负偏差的绝对值相等的直线。

(4) 最小二乘直线。如图 1-2(d)所示, 对于各标定点偏差的平方和最小的直线。

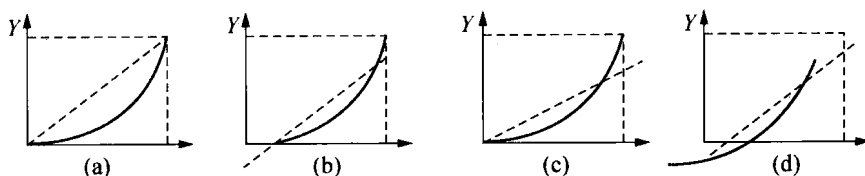


图 1-2 直线拟合方法

(a) 端点连线; (b) 端点平移连线; (c) 过零旋转拟合; (d) 最小二乘直线

----- 拟合直线; ————— 标定曲线

1.3.1.1 非线性度

标定曲线与拟合直线的偏离程度就是非线性度。标定曲线与拟合直线之间的最大偏差, 称为非线性误差。若在标定(全量程)输出范围 Y 内, 非线性误差为 Δ_{MAX} (如图 1-3(a)所示), 则定义非线性度为

$$\text{非线性度} = \pm (\Delta_{\text{MAX}} / Y) \times 100\% \quad (1-1)$$

1.3.1.2 灵敏度

当测试装置的输入 x 有一增量 Δx , 引起输出 y 发生相应的变化 Δy 时(如图 1-3(b)所示), 则定义灵敏度为

$$S = \Delta x / \Delta y \quad (1-2)$$

线性装置的灵敏度 S 为常数, 是输入—输出关系直线的斜率, 斜率越大, 其灵敏度就越高。非线性装置的灵敏度 S 是一个变量, 即 X — Y 关系曲线的斜率, 输入量不同, 灵敏度就不同, 通常用拟合直线的斜率表示装置的平均灵敏度。灵敏度的量纲由输入和输出的量纲决定。应该注意的是, 装置的灵敏度越高, 就越容易受外界干扰的影响, 即装置的稳定性越差。

1.3.1.3 重复性

传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时, 所得特性曲线不一致的程度称为重复性。如图 1-3(c)所示, 正行程的最大重复性偏差为 ΔR_{MAX1} , 反行程的最大重复性偏差为 ΔR_{MAX2} 。重复性误差取这两个最大偏差中的较大者, 再以满量程输出的百分数表示

$$\text{重复性} = \pm (\Delta_{\text{MAX}} / Y) \times 100\% \quad (1-3)$$

1.3.1.4 迟滞现象(回程误差)

实际测试装置在输入量由小增大和由大减小的测试过程中, 对应于同一个输入量往往有不同的输出量。在同样的测试条件下, 若在全量程输出范围内, 对于同一个输入量所得到的两个数值不同的输出量之间差值最大者为 h_{max} (如图 1-3(d)所示), 则定义回程误差为

$$\text{回程误差} = (h_{\text{max}} / Y) \times 100\% \quad (1-4)$$

回程误差是由迟滞现象产生的,即由于装置内部的弹性元件、磁性元件的滞后特性以及机械部分的摩擦、间隙和灰尘积塞等原因造成的。

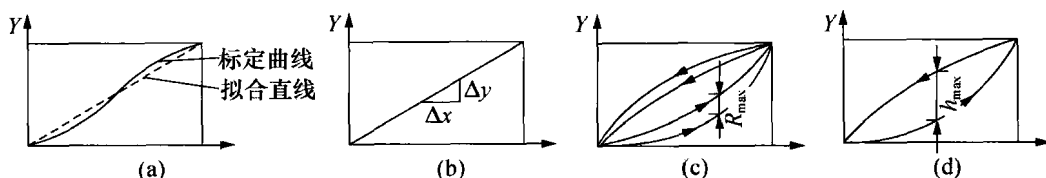


图 1-3 测试系统静态特性

1.3.1.5 静态响应特性的其他描述

描述测试装置的静态响应特性还有其他一些术语,现分述如下:

- (1) 精度。精度是与评价测试装置产生的测量误差大小有关的指标。
- (2) 灵敏阈。灵敏阈又称为死区,用来衡量测量起始点不灵敏的程度。
- (3) 分辨力。分辨力指能引起输出量发生变化时输入量的最小变化量,表明测试装置分辨输入量微小变化的能力。
- (4) 测量范围。测量范围指测试装置能正常测量最小输入量和最大输入量之间的范围。
- (5) 稳定性。稳定性指在一定工作条件下,当输入量不变时,输出量随时间变化的程度。
- (6) 可靠性。可靠性是对测试装置无故障工作时间长短的一种描述。

1.3.2 传感器的动态特性

在对动态物理量(如机械振动的波形)进行测试时,测试装置的输出变化是否能真实地反映输入变化,取决于测试装置的动态响应特性。系统的动态响应特性一般通过描述系统的传递函数和频率响应函数等数学模型来进行研究。

1.3.2.1 传递函数

对线性测量系统,输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间的关系可以用常系数线性微分方程来描述,即

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_1 y^{(1)}(t) + a_0 y^{(0)}(t) = b_m x^{(m)}(t) + b_{m-1} x^{(m-1)}(t) + b_1 x^{(1)}(t) + b_0 x^{(0)}(t) \quad (1-5)$$

但直接考察微分方程的特性比较困难。如果对微分方程两边同时进行拉普拉斯变换,建立与其对应的传递函数的概念,就可以更简便、有效地描述测试系统特性与输入、输出的关系。对微分方程两边同时进行拉普拉斯变换,得

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

定义传递函数 $H(s) = Y(s)/X(s)$, 则有

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-7)$$

传递函数与微分方程两者完全等价,可以相互转化。考察传递函数所具有的基本特性,比考察微分方程的基本特性要容易得多。这是因为传递函数是一个代数有理分式函数,其特性容易识别与研究。

传递函数有以下几个特点:

(1) $H(s)$ 和输入 $x(t)$ 的具体表达式无关。传递函数 $H(s)$ 用于描述系统本身固有的特性,与 $x(t)$ 的表达式无关。 $x(t)$ 不同时, $y(t)$ 的表达式也不同,但二者拉普拉斯变换的比值始终保持为 $H(s)$ 。

(2) 不同的物理系统可以有相同的传递函数。各种具体的物理系统,只要具有相同的微分方程,其传递函数也就相同,即同一个传递函数可表示不同的物理系统。例如,液柱温度计和简单的 RC 低通滤波器同是一阶系统,具有相同的传递函数;动图式电表、振动子、弹簧—质量—阻尼系统和 LRC 振荡电路都是二阶系统,具有相同的传递函数。

(3) 传递函数与微分方程等价。由于拉普拉斯变换是一一对应变换,不丢失任何信息,故传递函数与微分方程等价。

1.3.2.2 频率响应特性

考虑到拉普拉斯变换中, $s = \sigma + j\omega$, 令 $\sigma = 0$, 则有 $s = j\omega$, 将其代入 $H(s)$, 得到

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1-8)$$

如将 $H(j\omega)$ 的实部和虚部分开, 有

$$H(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (1-9)$$

其中, $P(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 都是 ω 的实函数, 以频率 ω 为横坐标, 以 $P(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 为纵坐标所绘的图形分别称为系统的实频特性图与虚频特性图。又若将 $H(j\omega)$ 写成

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-10)$$

其中

$$\begin{aligned} A(\omega) &= |H(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \\ \varphi(\omega) &= \arctan \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \end{aligned} \quad (1-11)$$

用频率响应函数来描述系统的最大优点是它可以通过实验来求得。实验求得频率响应函数的原理比较简单明了: 依次用不同频率 ω_i 的简谐信号去激励被测系统, 同时测出激励和系统的稳态输出的幅值 X_i 、 Y_i 和相位差 φ_i 。这样对于某个 ω_i , 便有了一组 $Y_i/X_i = A_i$ 和 φ_i , 全部的 $A_i-\omega_i$ 和 $\varphi_i-\omega_i (i=1,2,3,\dots)$ 便可表达系统的频率响应函数。

也可在初始条件全为零的情况下, 同时测得输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$, 由其傅里叶变换 $X(\omega)$ 和 $Y(\omega)$ 求得频率响应函数 $H(\omega) = Y(\omega)/X(\omega)$ 。

需要特别指出, 频率响应函数是描述系统的简谐输入和相应的稳态输出的关系。因此, 在测量系统频率响应函数时, 应当在系统响应达到稳态阶段时才进行测量。

尽管频率响应函数是对简谐激励而言的, 但如前所述, 任何信号都可分解成简谐信号的叠加。因而在任何复杂信号输入下, 系统频率特性也是适用的。这时, 幅频、相频特性分别表征系统对输入信号中各个频率分量幅值的缩放能力和相位角前后移动的能力。

1.4 传感器的标定和校准

1.4.1 传感器的标定

用实验的方法确定传感器的性能参数的过程称为标定。任何传感器在制成以后,都必须按照技术要求进行一系列的试验,以检验它是否达到原设计的要求,并最后确定传感器的基本性能。这些基本性能一般包括灵敏度、线性范围、重复性和频率响应等。标定实际上就是利用某种标准或标准器具对传感器进行刻度。标定时应按传感器规定的安装条件进行安装。标定分为静态标定和动态标定。

1.4.1.1 静态标定

静态标定指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、非线性度、迟滞和重复性等传感器的静态指标。静态标定用于检测传感器的静态特性指标。标定设备应具有比被标定的传感器及其系统高一个等级的精度,且符合国家计量量值传递的规定。

对测量系统进行标定时,一般应在全量程范围内均匀地取定5个或5个以上的标定点(包括零点),从零点开始,由低至高,逐次输入预定的标定值,此称标定的正行程;然后再倒序由高至低依次输入预定的标定值,直至返回零点,此称标定的反行程。按要求将以上操作重复若干次,记录下相应的响应—激励关系。

1.4.1.2 动态标定

动态标定用于确定传感器的动态性能指标。通过确定其线性工作范围(用同一频率、不同幅值的正弦信号输入传感器,测量其输出)、频率响应函数、幅频特性和相频特性曲线、阶跃响应曲线来确定传感器的频率响应范围、幅值误差和相位误差、时间常数、阻尼比以及固有频率等。

1.4.2 传感器的校准

一般来说,传感器的性能指标通常随时间环境的变化而改变,而且这种变化常常是不可逆的,预测也极其困难。因此,不仅在传感器出厂时或安装时要进行标定,而且在传感器的使用过程中还需定期校准。

校准就是定期检测传感器的基本性能参数,判断是否可以继续使用,如果能继续使用,则应对其变化的主要指标(如灵敏度)进行数据修正,确保传感器的测量精度的过程。校准与标定的内容基本相同。

与传感器的标定、校准相关联的技术之一,便是传感器的互换性。传感器使用一段时间后,由于性能变坏或完全损坏,就需要新的传感器进行替换,能进行替换的前提不仅是安装外形尺寸不冲突,而且要求传感器的性能与被替换的传感器有良好的一致性,否则需要重新标定。

1.5 测量的一般知识

1.5.1 测量方法

在科学研究和工程试验中,往往需要探求物理现象之间的定量关系。为了确定被测对象的量值而进行的实验过程称为测量。测量是人类认识客观世界,获取定量信息的重要手段。测量的最基本形式是比较——将待测的未知量和给定的标准作比较。由测量所得到的被测对象的量值表示为数值和计量单位的乘积。

对于测量方法,从不同的角度出发,有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手段分类的直接测量、间接测量和联立测量,以及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

1.5.1.1 按测量手段分类

1. 直接测量

直接测量法是工程上广泛采用的方法。这种在使用测量仪表进行测量时,对仪表读数不需要经过任何运算就能直接得到测量结果的方法,称为直接测量法。例如用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速,缺点是测量精度不易达到很高。

2. 间接测量

在使用仪表进行测量时,首先对与被测物理量有确定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的结果,这种测量称为间接测量。例如,导线电阻率 ρ 的测量就是间接测量。由于

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4Rl} \quad (1-12)$$

式中 R 、 l 、 d ——导线的电阻值、长度和直径。

这时,只有先经过直接测量得到导线的 R 、 l 、 d 以后,再代入 ρ 的表达式,才能经计算得到最后所需要的结果 ρ 值。

这种测量过程手续较多,花费时间较长,但有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量,工程测量中也有应用。

3. 联立测量

在应用仪表进行测量时,若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最后结果,则称这样的测量为联立测量。在进行联立测量时,一般需要改变测试条件,才能获得一组联立方程所需要的数据。联立测量操作手续复杂,花费时间长,是一种特殊的测量方法,只适用于科学实验或特殊场合。

1.5.1.2 按测量方式分类

1. 偏差式测量

在测量过程中,用仪表指针的位移(即偏差)决定被测量的测量方法,称为偏差式测量法。应用这种方法进行测量时,标准量具不装在仪表内,而是事先用标准量具对仪表刻度