

全国普通高等院校
电子信息与通信类精品教材

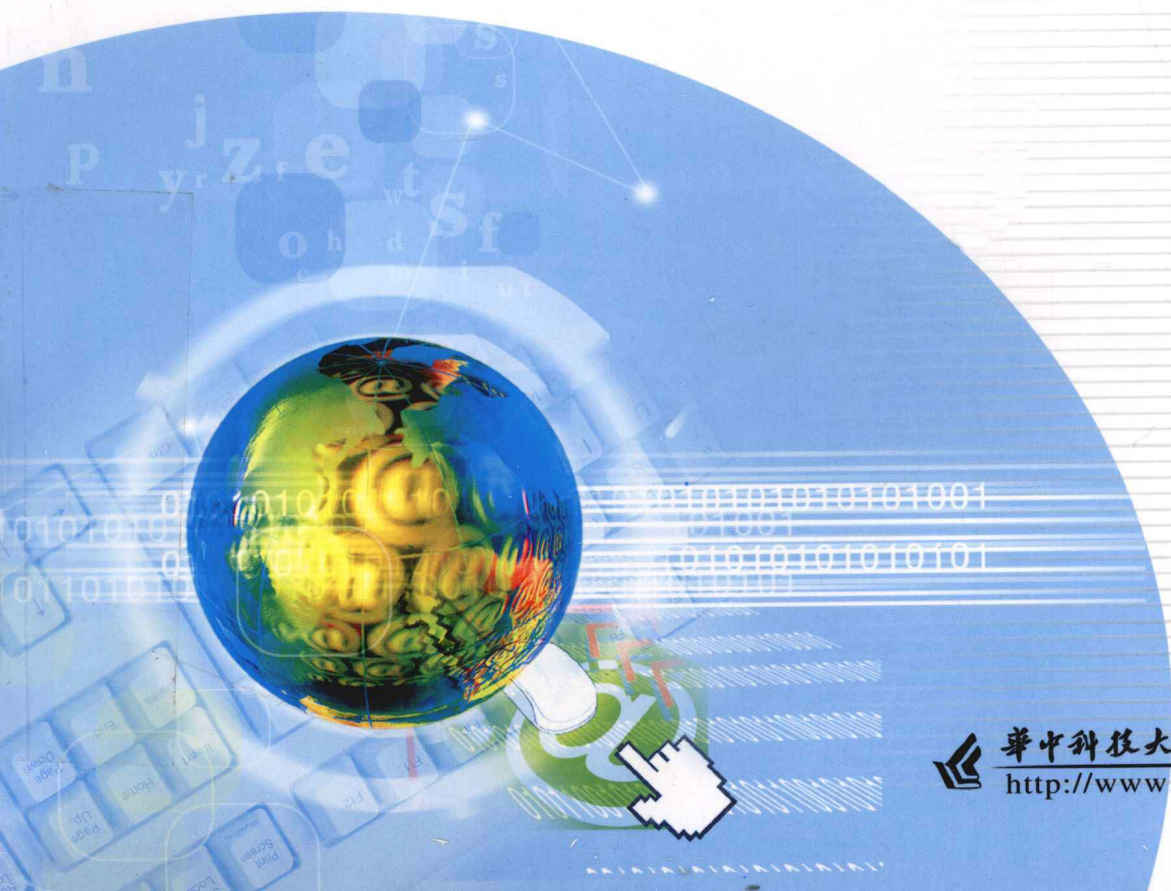
QUANGUO PUTONG GAODENG YUANXIAO DIANZI XINXI YU TONGXINLEI JINGPIN JIAOCAI



传感器原理与应用

余成波 聂春燕 张佳薇 主编

Sensors application



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与应用/余成波 聂春燕 张佳薇 主编. —武汉:华中科技大学出版社, 2010年1月

ISBN 978-7-5609-5726-5

I. 传… II. ①余… ②聂… ③张… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 177551 号

传感器原理与应用

余成波 聂春燕 张佳薇 主编

策划编辑:江 津

责任编辑:余 涛

责任校对:张 琳

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:荆州市今印集团有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:14.25

字数:337 000

版次:2010年1月第1版

印次:2010年1月第1次印刷

定价:24.80元

ISBN 978-7-5609-5726-5/TP·709

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是作者在多年来从事传感器教学及科研的基础上写成的。其内容丰富、全面、新颖,叙述力求由浅入深,对传感器原理尽量讲清物理概念,对传感器的应用充分结合生产和工程实践,使本书具有一定的实用和参考价值。本书突出应用性和针对性,强化实践能力的培养;将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,更进一步应用这方面的知识,以解决工程检测中的具体问题;同时,在编写过程中,注意补充反映新器件、新技术的内容,力求使读者了解学科前沿。

本书既可以作为电气工程及自动化、机械设计制造及自动化、机电一体化、自动化、电子信息、测控技术与仪器等专业本科生的相关教材,也可作为从事检测技术开发与应用的广大工程技术人员的自学用书。

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,人们在研究自然现象和规律及生产活动中,必须从外界获得信息,要及时、正确地获取这些信息,就必须合理地选择和应用各种传感器和检测技术。21世纪是信息时代,其特征是人类社会活动和生产活动的信息化,使得传感器和检测技术的重要性更为突出。本书是作者在多年来从事传感器教学及科研的基础上写成的,根据高校电气工程及自动化、机械设计制造及其自动化、机电一体化、自动化、电子信息及测控技术与仪器等专业的传感器与检测技术课程的基本要求,吸收近年来各高校的教学经验,力求内容丰富、全面、新颖,叙述由浅入深,对传感器原理尽量讲清物理概念,按照少而精和理论联系实际的原则编写,使本书具有一定的实用和参考价值。本书突出应用性和针对性,强化实践能力的培养;将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,更进一步地应用这方面的知识,以解决工程检测中的具体问题;同时,在编写过程中,注意补充反映新器件、新技术的内容,力求使读者了解前沿学科。

本书由余成波、聂春艳、张佳薇任主编,陶红艳、杨如民任副主编,余成波负责全书的统稿和审校。另外参加部分内容编写的还有谢东坡、秦华锋、李泉、龚智、胡柏栋、许超明、崔焱喆、杨数强、张冬梅、彭秋、刘贺、刘彦飞、张方方等。在编写过程中得到了众多高等学校、科研单位、厂矿企业等的大力支持和帮助,并获得了许多宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

热忱地期望各位读者和同仁对本书的错误和不足提出修改意见和建议。

编 者

2008年10月

目 录

第 1 章 传感器的基本概述	(1)
1.1 传感器的定义及作用	(1)
1.1.1 传感器的定义	(1)
1.1.2 传感器的作用	(1)
1.2 传感器的组成与分类	(2)
1.2.1 传感器的组成	(2)
1.2.2 传感器的分类	(3)
1.3 传感器技术的发展方向	(4)
1.4 传感器的特性及标定	(5)
1.4.1 传感器的数学模型概述	(5)
1.4.2 静态参数	(7)
1.4.3 动态参数	(10)
1.4.4 传感器的标定	(14)
第 2 章 电阻式传感器	(15)
2.1 金属电阻应变片	(15)
2.2 半导体应变片	(16)
2.3 应变片的命名	(17)
2.4 电阻式传感器的测量电路	(17)
2.5 电阻式传感器的应用	(21)
第 3 章 电容式传感器	(23)
3.1 电容式传感器的特点	(23)
3.2 电容式传感器的工作原理和结构	(24)
3.3 电容式传感器的测量电路	(27)
3.4 电容式传感器的应用举例	(30)
第 4 章 电感式传感器	(33)
4.1 自感式传感器	(33)
4.2 互感式传感器	(35)
4.3 电感式传感器的应用	(38)
第 5 章 电涡流式传感器	(40)
5.1 高频反射涡流传感器	(40)
5.2 低频透射涡流传感器	(41)
5.3 测量电路	(42)
5.4 应用举例	(43)
第 6 章 压电式传感器	(45)
6.1 压电效应和压电材料	(45)

6.2	压电式传感器的等效电路和测量电路·····	(49)
6.3	压电式力传感器的合理使用·····	(52)
6.4	压电传感器的应用·····	(53)
第7章	磁电式传感器 ·····	(56)
7.1	动圈式磁电传感器·····	(56)
7.2	磁阻式磁电传感器·····	(57)
7.3	磁电式传感器的测量电路·····	(57)
第8章	热电式传感器 ·····	(58)
8.1	热电偶传感器·····	(58)
8.2	热电阻传感器·····	(69)
第9章	光电式传感器 ·····	(76)
9.1	光电效应·····	(76)
9.2	光电导器件·····	(77)
9.3	光生伏特器件·····	(78)
9.4	光电耦合器件·····	(80)
9.5	电荷耦合器件(CCD)·····	(83)
9.6	光电式传感器的其他应用·····	(85)
第10章	霍尔式传感器 ·····	(89)
10.1	霍尔元件·····	(89)
10.2	霍尔集成传感器·····	(95)
10.3	霍尔传感器的应用·····	(97)
第11章	光纤传感器 ·····	(101)
11.1	光纤传感器的组成·····	(101)
11.2	光纤传感器的分类·····	(101)
11.3	光纤传感器的工作原理·····	(102)
11.4	光纤传感器的实际应用·····	(103)
第12章	超声波传感器 ·····	(108)
12.1	超声检测的物理基础·····	(108)
12.2	超声波传感器的原理及结构·····	(109)
12.3	超声波传感器的基本应用电路·····	(111)
第13章	微波传感器 ·····	(115)
13.1	微波的基本知识·····	(115)
13.2	微波传感器及其分类·····	(115)
13.3	微波传感器的优点与存在的问题·····	(116)
13.4	微波传感器的应用·····	(116)
第14章	红外传感器 ·····	(120)
14.1	红外传感器·····	(120)
14.2	红外线传感器的应用·····	(121)
第15章	核辐射传感器 ·····	(124)
15.1	核辐射的基本概念·····	(124)

15.2	核辐射式传感器的原理及组成	(124)
15.3	辐射式传感器的应用	(127)
第 16 章	化学传感器	(130)
16.1	气敏传感器	(130)
16.2	湿敏传感器	(134)
16.3	离子敏传感器	(139)
第 17 章	数字式传感器	(143)
17.1	数字式传感器的概述	(143)
17.2	编码器	(144)
17.3	光栅式传感器	(148)
17.4	感应同步器	(160)
17.5	磁栅式传感器	(164)
17.6	容栅式传感器	(169)
第 18 章	生物传感器	(174)
18.1	生物传感器的原理、特点及分类	(174)
18.2	几种生物传感器	(176)
第 19 章	智能式传感器	(181)
19.1	智能传感器的特点	(181)
19.2	智能传感器的实现	(182)
19.3	智能传感器的应用	(183)
19.4	智能传感器的设计思路	(185)
第 20 章	微型传感器	(187)
20.1	MEMS 技术与微型传感器	(187)
20.2	压阻式微型传感器	(188)
20.3	电容式微型传感器	(193)
20.4	电感式微型传感器	(196)
20.5	热敏电阻式微型传感器	(198)
20.6	隧道效应式微型传感器	(198)
第 21 章	模糊传感器	(200)
21.1	模糊传感器的概念及特点	(200)
21.2	模糊传感器的结构	(200)
21.3	典型模糊传感器举例	(203)
第 22 章	网络传感器	(206)
22.1	网络传感器的概念	(206)
22.2	网络传感器的类型	(206)
22.3	基于 IEEE1451 标准的网络传感器	(207)
22.4	网络传感器所在网络的体系结构	(212)
习题与思考题		(214)
参考文献		(217)

第1章 传感器的基本概述

1.1 传感器的定义及作用

1.1.1 传感器的定义

传感器的概念源自“感觉(sensor)”一词。人们在研究自然现象时,仅仅依靠人的五官来获取外界信息是远远不够的。于是人们发明了能代替或补充人体五官功能的传感器,工程上也将传感器称为“变换器”。

根据国家标准《传感器通用术语》(GB 7665—1987),传感器(transducer/sensor)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。”这一定义所表述的传感器的主要内涵包括以下几点。

(1) 从传感器的输入端来看,一个指定的传感器只能感受规定的被测量,即传感器对规定的物理量具有最大的灵敏度和最好的选择性。例如,温度传感器只能用于测温,而不能同时受其他物理量的影响。

(2) 从传感器的输出端来看,传感器的输出信号为“可用信号”。这里所谓的“可用信号”是指便于处理、传输的信号,最常见的是电信号、光信号等。可以预料,未来的“可用信号”或许是更先进、更实用的其他信号形式。

(3) 从输入与输出的关系来看,输入与输出之间的关系应具有“一定规律”,即传感器的输入与输出不仅是相关的,而且可以用确定的数学模型来描述,也就是具有确定规律的静态特性和动态特性。

由传感器的定义可知,其基本功能是检测信号和进行信号转换。因此,传感器总是处于测试系统的最前端,用来获取检测信息,其性能将直接影响整个测试系统,对测量精确度起着决定性作用。

1.1.2 传感器的作用

人类社会已进入信息时代,信息技术对社会的发展、科学的进步起着决定性的作用。人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发与获取以及传输与处理来进行的。信息的采集离不开传感器技术,传感器作为一个将被测的非电量转换成电量的器件,是连接被测对象和检测系统的接口,科学研究与自动控制过程中所获取的所有信息,都要通过传感器获取,并通过它转换为容易处理的电信号。传感器位于信息采集系统的前端,属于感知、获取及检测信息的窗口,并提供给系统赖以进行处理和决策所必需的原始信息。没有传感技术,整个信息技术的发展就成为一句空话。科学技术越发达、自动化程度越高,信息控制技术对传感器的依赖性就越大。

传感器技术是新技术革命和信息社会的重要技术基础,是现代科技的开路先锋,也是当代科学技术发展的一个重要标志,它与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱。如果说

计算机是人类大脑的扩展,那么传感器就是人类五官的延伸。当集成电路、计算机技术飞速发展时,人们才逐步认识到信息摄取装置——传感器没有跟上信息技术的发展,而惊呼“大脑发达,五官不灵”。从 20 世纪 80 年代起,业界逐步在世界范围内掀起了一股“传感器热”。美国早在 20 世纪 80 年代就声称世界已进入传感器时代,日本则把传感器技术列为十大技术之首。日本工商界人士声称“支配了传感器技术就能够支配新时代”。世界技术发达国家对开发传感器技术都十分重视。美、日、英、法、德等国都把传感器技术列为国家重点开发关键技术之一。关于美国国家长期安全 and 经济繁荣至关重要的 22 项技术中,有 6 项与传感器信息处理技术直接相关。关于保持美国武器系统质量优势至关重要的关键技术中,有 8 项为无源传感器。美国空军 2000 年列举出 15 项有助于提高 21 世纪空军能力的关键技术,传感器技术名列第二。日本科学技术厅制订的 20 世纪 90 年代重点科研项目中的 70 个重点课题,其中有 18 项与传感器技术密切相关。美国早在 20 世纪 80 年代初就成立了国家技术小组(BTG),帮助政府组织、领导各大公司和国家企事业部门进行传感器技术开发的工作。美国国防部将传感器技术视为 2007 年的 20 项关键技术之一,日本把传感器技术与计算机、通信、激光、半导体、超导并列为六大核心技术,德国视军用传感器为优先发展技术,英、法等国对传感器的开发投资逐年升级,俄罗斯军事航天计划中的第五条列有传感器技术。

正是由于世界各国普遍重视和加大投入,传感器发展十分迅速,在近十几年来其产量及市场需求年增长率均在 10% 以上。目前世界上从事传感器研制、生产的单位已增至 5 000 余家。美国、欧洲各国、俄罗斯从事传感器研究和生产的厂家有 1 000 余家,日本有 800 余家。

基于上述原因,愈来愈多的科技工作者和企业对传感器技术予以了高度重视,促使传感器技术加速发展,以适应信息处理技术的需要。因此,20 世纪 80 年代以来世界各国都将传感器技术作为重点研究领域。

1.2 传感器的组成与分类

1.2.1 传感器的组成

传感器是一个完整的测量装置(或系统),能把被测非电量转换为与之有确定对应关系的有用电量输出,以满足信息的传输处理、记录、显示和控制等要求。

传感器一般由敏感元件、变换元件和其他辅助元件组成。但是随着传感器集成技术的发展,传感器的信号调理与转换电路也会安装在传感器的壳体内或者与敏感元件集成在同一芯片上。因此,信号调理电路及所需辅助电源都应作为传感器组成的一部分,如图 1-1 所示。

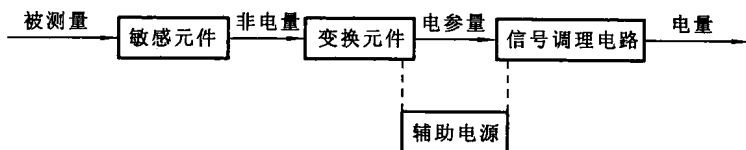


图 1-1 传感器组成框图

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、差动变压器式位移传感器等,其敏感元

件和传感器就完全是融为一体的。

变换元件——又称传感元件,是传感器的重要组成元件。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,差动变压器式压力传感器,并不直接感受压力,而只是感受与被测压力成确定关系的衔铁(被测体)位移量,然后输出电量。一般情况下使用的都是这种传感元件。

信号调理与转换电路——能把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录 and 控制的有用信号的电路。信号调理与转换电路根据传感元件类型的不同可分成很多种类,常用的电路有电桥、放大器、振荡器和阻抗变换器等。

1.2.2 传感器的分类

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。

传感器的种类繁多。往往同一种被测量可以用不同类型的传感器来测量,如压力可用电容式、电阻式、光纤式等传感器来进行测量;而同一原理的传感器又可测量多种物理量,如电阻式传感器可以测量位移、温度、压力及加速度等。因此,传感器有许多种分类方法,常用的分类方法如下。

1. 按被测量分类

机械量:位移、力、力矩、扭矩、速度、加速度、振动、噪声……

热工量:温度、热量、流量(速)、风速、压力(差)、液位……

物性参量:浓度、黏度、密度、酸碱度……

状态参量:裂纹、缺陷、泄漏、磨损、表面质量……

……

这种分类方法也就是按用途进行分类,给使用者提供方便,容易根据测量对象来选择传感器。

2. 按测量原理分类

按传感器的工作原理,传感器可分为电阻式、电感式、电容式、压电式、光电式、磁敏式、超声波等。现有传感器的测量原理都是基于物理、化学和生物等各种效应和定律,这种分类方法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、设计及应用上作归纳性的分析与研究。

3. 按信号变换特征分类

结构型:主要是通过传感器结构参量的变化实现信号变换的。例如,电容式传感器依靠极板间距离的变化引起电容量的改变。

物性型:利用敏感元件材料本身物理属性的变化来实现信号变换。例如,水银温度计是利用水银的热胀冷缩现象测量温度,压电式传感器是利用石英晶体的压电效应实现测量等。

4. 按能量关系分类

能量转换型:传感器直接由被测对象输入能量使其工作。如热电偶、光电池等,这种类型的传感器也称为有源传感器。

能量控制型:传感器从外部获得能量使其工作,由被测量的变化控制外部供给能量的变

化。如电阻式、电感式等传感器,这种类型的传感器必须由外部提供激励源(电源等),因此也称为无源传感器。

表 1-1 所示是按能量转换型和能量控制型对常用传感器的工作原理进行归纳分类。

表 1-1 传感器的工作原理按能量关系分类

能量转换型	能量控制型
压电效应(压电式)	应变效应(应变片)
压磁效应(压磁式)	压阻效应(应变片)
热电效应(热电偶)	热阻效应(热电阻、热敏电阻)
电磁效应(磁电式)	磁阻效应(磁敏电阻)
光生伏特效应(光电池)	内光电效应(光敏电阻)
热磁效应	霍尔效应(霍尔元件)
热电磁效应	电容(电容式)
静电式	电感(电感式)

除以上分类方法外,还可按照输出信号的形式分为模拟式传感器和数字式传感器,按照测量方式分为接触式传感器和非接触式传感器等。虽然分类方法各不相同,但了解传感器的分类可以加深理解,便于合理选用传感器。本书选用第二种分类方法,这种分类方法有利于对传感器工作原理的阐述和分析研究。

1.3 传感器技术的发展方向

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进新科技成果的不断出现和创新。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. 测量仪器向高精度和多功能方向发展

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。在科学技术的进步与社会发展过程中,会不断出现新领域、新事物,需要人们去认识、探索和开拓。为此,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,在许多测试系统中利用计算机可使仪器的测量精度更高,功能更全。

2. 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,少则有几个、多则几百个数据通道。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去处理,不仅处理周期长,而且处理结果精度也低。现代传感与测试技术的发展是采用以计算机为核心的自动测试系统,这种系统能实现自动校准、自动修正、故障诊断、信号调制、多路采集和自动分析处理,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,加速产品的更新

与开发。

3. 传感器向智能化、集成化、微型化、量子化、网络化的方向发展

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,已经促使很多对力、热、光、磁等物理量及气体化学成分敏感的器件得以发展。光导纤维不仅可用来作信号传输,而且还可作为物性型传感器。另一个引人注目的发展是,由于微电子技术的发展使得有可能把某些电路乃至微处理器和传感测量部分做成一体,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”。另外,现在的军用智能传感器还大量采用了并行处理、模式识别等先进的信息处理方式,为提高传感器的性能开辟了新的天地。

集成化是指将敏感元件、信号调理电路及电源等部分集成在一个芯片上,从而使检测及信号处理一体化。或者将多个相同传感器配置在同一个平面上形成阵列,或者是研制能检测两个以上不同物理量的传感器。微型化传感器是以微机电系统(MEMS)技术为基础,目前,已有较多成熟的微型传感器,如压力传感器、加速度传感器等。量子化是指利用量子力学的一些效应研制用于检测极微弱信号的传感器。例如,利用核磁共振效应做成的磁敏传感器,可将量限扩展到地磁场的 10^{-7} ;利用约瑟夫森(Josephson)效应做成的热噪声传感器,可测出 10^{-6} K的超低温等。传感器技术的网络化主要是将传感器技术、通信技术及计算机技术相结合,从而构成网络传感器,实现信息采集、传输和处理的一体化。

另外,在机器人工程的发展中,需要研制出灵敏度高、小型化、微型化的新型视觉、触觉、听觉、嗅觉传感器等。

4. 开展极端测量

相对而言,一般常规测量技术相对比较成熟,而一些极端情况下的测量,如超高温和超低温的测量、大尺寸及微纳尺寸的测量、超高压力的测量等需要解决更多的技术问题。以压力测量为例,在火炮膛压测试技术中,常规火炮膛压小于600 MPa的测试,采用铜柱(铜球)测压器或电测传感器均可满足要求。为提高火炮的射程和射击精度,增大威力,在高膛压火炮的研究中,膛压可高达800~1 000 MPa,并伴随着 $105 \times 9.8 \text{ m/s}^2$ 的高冲击加速度。这就促使膛压测试技术要有相应的发展,研制量程更大的压力传感器及配套的压力动态标定装置,而且研制的测压传感器和测温传感器要能在高冲击加速度下稳定工作。

1.4 传感器的特性及标定

在生产过程和科学实验中,要对各种各样的参数进行检测和控制,要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地变换成相应的电量,这取决于传感器的基本特性,即输出-输入特性。如果把传感器看做二端口网络,即有两个输入端和两个输出端,那么传感器的输出-输入特性是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

1.4.1 传感器的数学模型概述

从系统角度来看,一种传感器就是一种系统。根据系统工程学理论,一个系统总可以用一个数学方程式或函数来描述。即用某种方程式或函数表征传感器的输出与输入间的关系和特性,从而,用这种关系指导对传感器的设计、制造、校正和使用。但是准确地建立一个系统的数

学模型是困难的。在工程上,总是采用一些近似方法建立起系统的初步模型,然后,经过反复模拟实验确立系统的最终数学模型,这种方法同样适用于传感器数学模型的建立。下面介绍传感器静态和动态数学模型的一般描述方法。

1. 静态模型

静态模型是指在静态信号(输入信号不随时间变化的量)作用下,描述传感器输出与输入量间的一种函数关系。如果不考虑蠕动效应和迟滞特性,传感器的静态模型一般可用以下多项式来表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中, x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器线性灵敏度,常用 K 或 S 表示; $a_2, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定系数。

传感器的静态模型有三种有用的特殊形式:

$$y = a_1 x \quad (1-2)$$

$$y = a_1 x + a_2 x^2 + a_4 x^4 + \cdots \quad (1-3)$$

$$y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots \quad (1-4)$$

式(1-2)表示传感器的输出与输入量呈严格的线性关系,式(1-3)和式(1-4)均为非线性关系。

2. 动态模型

动态模型是指传感器在准动态信号或动态信号(输入信号随时间而变化的量)作用下,描述其输出与输入信号的一种数学关系。动态模型通常采用微分方程和传递函数等来描述。

(1) 微分方程

绝大多数传感器都属模拟(连续变化)系统之列。描述模拟系统的一般方法是采用微分方程。在实际的模型建立过程中,一般采用线性时不变系统理论描述传感器的动态特性,即用线性常系数微分方程表示传感器输出量 y 与输入量 x 的关系。其通式如下:

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

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$ 为传感器的结构参数(是常量)。对于传感器,除 $b_0 \neq 0$ 外,一般取 $b_1, b_2, \cdots, b_m$ 为0。

对于复杂的系统,其微分方程的建立、求解都是很困难的。但是一旦求解出微分方程的解,就能分清其暂态响应和稳定响应。为了求解的方便,常采用拉普拉斯变换(简称拉氏变换)将式(1-5)变为算子 S 的代数式,或采用下面将要介绍的传递函数来研究传感器的动态特性。

(2) 传递函数

如果 $y(t)$ 在 $t \leq 0$ 时, $y(t)=0$,则 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(S) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-6)$$

式中, $S = \sigma + j\omega, \sigma > 0$ 。

对式(1-5)两边取拉氏变换,则得

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

定义输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(S)$ 与输入 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(S)$ 的比为该系统的传递函数 $H(S)$,故有

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-8)$$

对 $y(t)$ 进行拉氏变换的初始条件是 $t \leq 0, y(t) = 0$ 。传感器被激励之前所有的储能元件如质量块、弹性元件、电气元件均符合上述初始条件。由式(1-7)可知,它与输入量 $x(t)$ 无关,只与系统结构参数 $a_i, b_j (i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m)$ 有关。因此, $H(S)$ 可以简单而恰当地描述其输出与输入的关系。

只要知道 $Y(S)$ 、 $X(S)$ 、 $H(S)$ 三者中任意两者,第三者便可方便地求出。由此可见,无需了解复杂系统的具体内容,只要给系统一个激励信号 $x(t)$,便可得到系统的响应 $y(t)$,系统特性就能被确定。它们可用图 1-2(a)所示框图表示。

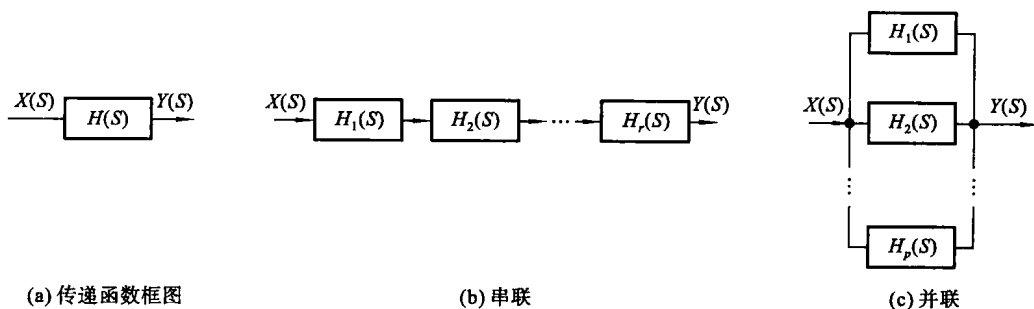


图 1-2 传感器的传递函数框图表示法

对于多环节串、并联组成的传感器,如果各个环节阻抗匹配适当,可忽略相互间的影响,则传感器的等效传递函数可按下列代数方式求得。

若传感器由 r 个环节串联而成,如图 1-2(b)所示,其等效传递函数为

$$H(S) = H_1(S) * H_2(S) * \dots * H_r(S) \quad (1-9)$$

若传感器由 p 个环节并联而成,如图 1-2(c)所示,其等效传递函数为

$$H(S) = H_1(S) + H_2(S) + \dots + H_p(S) \quad (1-10)$$

其中, $H_i(S)$ 为各个环节的传递函数。

1.4.2 静态参数

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出-输入关系。只考虑传感器的静态特性时,输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。

衡量静态特性的重要指标主要由下列几种性能指标来描述。

1. 线性度

所谓线性度就是其输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度,又称为非线性误差。非线性误差可用下式表示:

$$E = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为输出量和输入量实际曲线与拟合直线之间的最大偏差; Y_{FS} 为输出满量程值。

根据式(1-1)、式(1-2)、式(1-3)和式(1-4)的静态模型,它们所呈现的非线性程度是不一样的,可用图 1-3(a)、(b)、(c)和(d)表示。

从图 1-3(d)可以看到,仅具有奇次方的多项式模型的检测系统,在相当大的输入范围内有较宽的准线性。图 1-3(b)所示为理想线性特性,几乎每一种检测系统都不具备此特性,即都存在非线性,因此在使用非线性检测系统时,必须对检测系统输出特性进行线性处理。常用

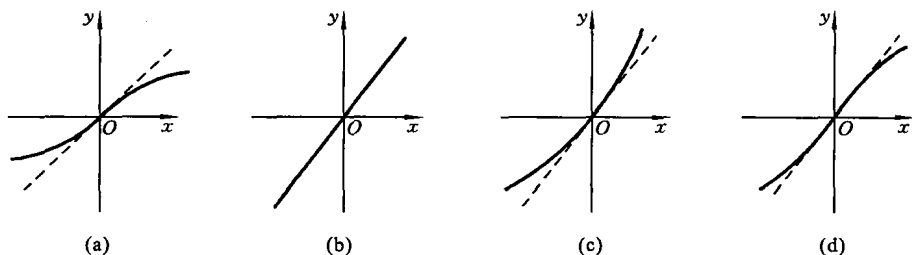


图 1-3 线性度表示

的方法有理论直线法、端点线法、割线法和切线法、最小二乘法和计算程序法等。

2. 灵敏度

灵敏度是在稳态下输出增量 Δy 与输入增量 Δx 的比值,常用 S_n 来表示,即

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-12)$$

对于线性检测系统,其灵敏度就是它的静态特性的斜率,如图 1-4(a)所示,即

$$S_n = \frac{y - y_0}{x} \quad (1-13)$$

非线性检测系统的灵敏度是一个变量,如图 1-4(b)所示,即用 $\frac{dy}{dx}$ 表示检测系统在某一工作点的灵敏度。

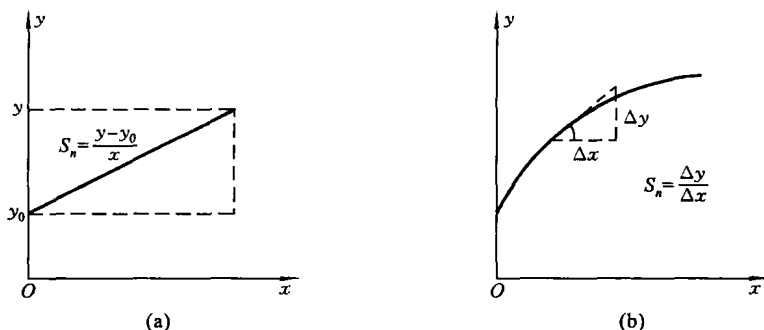


图 1-4 灵敏度定义

3. 重复性

重复性表示检测系统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性的程度(见图 1-5)。多次按相同输入条件测试的输出特性曲线越重合,其重复性越好,误差也越小。检测系统输出特性的不重复性主要由检测系统机械部分的磨损、间隙、松动,部件的内摩擦、积尘,以及辅助电路老化和漂移等原因产生。

不重复性一般采用下式的极限误差式表示:

$$E_x = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为输出最大不重复误差; Y_{FS} 为满量程输出值。

4. 迟滞

迟滞特性表明检测系统在正向(输出量增大)行程和反向(输出量减小)行程期间输出-输入曲线不重合的程度。如图 1-6 所示,对于同一大小的输入信号 x ,在 x 连续增大的行程中,

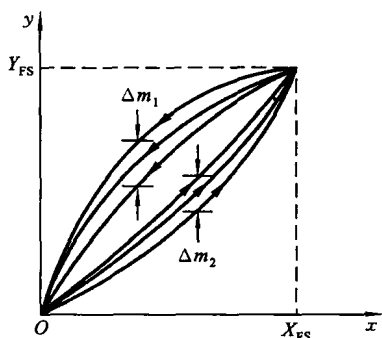


图 1-5 重复性

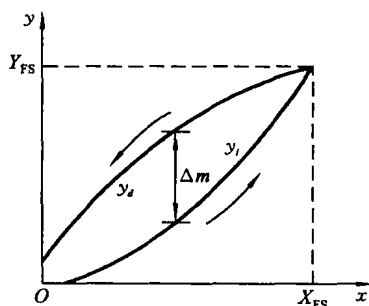


图 1-6 迟滞现象

对应某一输出量为 y_i ，在 x 连续减小过程中，对应于输出量为 y_d 之间的差值叫做滞环误差，这种现象就是迟滞现象。该误差用 E 表示为

$$E = |y_i - y_d| \quad (1-15)$$

在整个测量范围内产生的最大滞环误差用 Δm 表示，它与满量程输出值的比值称为最大滞环率 $E_{\max}$ ，可用下式表示：

$$E_{\max} = \frac{\Delta m}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-16)$$

产生这种现象的主要原因类似于重复误差的原因。

5. 精确度

精确度(精度)指标有三个：精密性、正确度和精确度。

(1) 精密性 δ

它说明测量结果的分散性，即对某一稳定的对象(被测量)由同一测量者用同一检测系统和测量仪表在相当短的时间内连续重复测量多次(等精度测量)，其测量结果的分散程度。 δ 愈小，则说明测量愈精密(对应随机误差)。

(2) 正确度 ϵ

它说明测量结果偏离真值大小的程度，即示值有规则地偏离真值的程度，即指所测值与真值的符合程度(对应系统误差)。

(3) 精确度 τ

它含有精密性与正确度两者之和的意思，即测量的综合优良程度。在最简单的场合下可取两者的代数和，即 $\tau = \delta + \epsilon$ 。通常精确度是以测量误差的相对值来表示的。

在工程应用中，为了简单表示测量结果的可靠程度，引入一个精确度等级概念，用 A 来表示。检测系统与测量仪表的精确度等级 A 以一系列标准百分数值(0.001, 0.005, 0.02, 0.05, ..., 1.5, 2.5, 4.0, ...)进行分档。这个数值是检测系统和测量仪表在规定条件下，其允许的最大绝对误差值相对于其测量范围的百分数。它可以用下式表示：

$$A = \frac{\Delta A}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-17)$$

式中， A 为检测系统的精度； ΔA 为测量范围内允许的最大绝对误差； Y_{FS} 为满量程输出。

检测系统设计和出厂检验时，其精度等级代表的误差是指检测系统测量的最大允许误差。

6. 分辨力

分辨力是用来表示检测系统或仪表装置能够检测被测量最小变化量的能力，通常是以最小量程的单位值来表示。当被测量的变化值小于分辨力时，检测系统对输入量的变化无任何

反应。例如,电压表的分辨力是 $10\ \mu\text{V}$,即能测的最小电压为 $10\ \mu\text{V}$,当增加 $7\ \mu\text{V}$ 或 $8\ \mu\text{V}$ 的电压时,电压表不会作任何反应。

7. 漂移

漂移是指在外界的干扰下,在一定时间间隔内,输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化。温度漂移为环境温度变化而引起的零点或灵敏度的漂移。

1.4.3 动态参数

传感器的动态特性是指其输出与随时间变化的输入量之间的响应特性。当被测量随时间变化(即是时间的函数)时,传感器的输出量也是时间的函数,其间的关系要用动态特性来表示。一个动态特性好的传感器,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外,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。因此,研究传感器的动态特性具有十分重要的意义。对于传感器系统的动态响应特性,一般通过描述系统的微分方程、传递函数、频率响应函数、单位脉冲响应函数等数学模型来进行研究(如前面传感器的数学模型)。为了分析方便,下面仅介绍几种常见测试装置的传递函数。

1. 一阶系统

传递函数

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1}{TS + 1} \quad (1-18)$$

式中, T 为时间常数,单位为 s 。

例如,液柱式水银温度计(见图 1-7),设 $x(t)$ 为被测环境温度, $y(t)$ 为水银柱输出温度值, C 表示热容量, R 表示热阻。由热力学方程有

$$\frac{x(t) - y(t)}{R} = C \frac{dy(t)}{dt}$$

令 $T = RC$, 两边同时作拉氏变换,整理得

$$G(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1}{TS + 1}$$

2. 二阶系统

传递函数

$$G(S) = \frac{k\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (1-19)$$

式中, k 为系统的灵敏度; ξ 为系统的阻尼比; ω_n 为系统的无阻尼固有频率。

例如,RLC 振荡电路(见图 1-8),输入为 u_i ,输出为 u_o ,根据电路基本定律,有

$$u_i(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_o(t)$$

$$i(t) = C \frac{du_o(t)}{dt}$$

上式两边同时作拉氏变换,并消去中间变量 $I(S)$,得到系统的传递函数为

$$G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{1}{LCS^2 + RCS + 1}$$