

高等学校试用教材

传 感 器

哈尔滨工业大学 强锡富 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

高等学校试用教材

传 感 器

哈尔滨工业大学 强锡富 主编

机械工业出版社

本书是全国精密仪器专业《传感器》课程的统编教材，主要内容是用于几何量、机械量以及有关物理量检测的各类传感器的基本工作原理、结构和转换电路、特性分析、工程设计方法、应用举例以及分析研究和选用方面的基本知识。

本书具有内容较全面、结合我国实际、分类清晰、例题丰富等特点，对国内外传感技术领域的新成果新进展有所反映，对特性分析、精度分析等方面亦有所加强。

本书除可用作大学精密仪器专业和仪器仪表类专业的教材外，亦可供有关工程技术人员参考。

传 感 器

哈尔滨工业大学 强锡富 主编

责任编辑 贡克勤 责任校对 丁丽丽
责任印制 张俊民 版式设计 乔 玲

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $18^{3/4}$ · 字数 459 千字
1989年6月北京第一版·1989年6月北京第一次印刷
印数 0,001—6,500 · 定价 3.75元

ISBN 7-111-01451-0/TM · 182 (课)

前 言

本教材是根据1984年4月在天津召开的全国16所高等院校精密仪器专业有关课程教学大纲会议所拟订的、并经精密仪器专业教材编审委员会批准的《传感器》课程教学大纲而编写的统编教材。

本教材主要叙述几何量、机械量以及其它有关物理量检测中所使用的传感器，主要内容为各种传感器的工作原理、一些工程设计方法以及分析研究和选用的基本知识。

本教材具有如下特点：全部按工作原理分章，条理清晰；内容的选取基本上反映了我国当前工业生产和科学研究的实际；同时也加强了精度分析的内容。

本书可作为高等学校精密仪器专业学生的试用教材，亦可供其它有关专业学生和有关工程技术人员参考。

哈尔滨工业大学强锡富负责全书的主编工作。参加编写的有哈尔滨工业大学强锡富（绪论、第一章、第三章、第六章§6-3、第七章§7-8）、于汶（第七章§7-6）、清华大学周汉安（第二章、第八章、第十章）、天津大学金篆芷（第四章、第六章§6-1和§6-2、第七章§7-7）、南京工学院王其生（第五章、第七章§7-1~§7-5、第九章）。

成都科技大学张凝负责主审工作。1987年10月在南京召开了本教材初稿的审稿会，与会16个单位20多名代表提出了宝贵意见。在此谨向上述单位和同志们表示衷心的感谢！

由于我们的业务水平和思想水平有限，实践经验不足，不当和错误之处一定很多，恳切希望读者提出批评。

编 者

1988.3.80

目 录

绪论	1
----------	---

第一章 传感器的一般特性	1
--------------------	---

§ 1-1 传感器的静特性	7
---------------------	---

一、线性度	7
-------------	---

二、迟滞	9
------------	---

三、重复性	9
-------------	---

四、灵敏度与灵敏度误差	11
-------------------	----

五、分辨力与阈值	11
----------------	----

六、稳定性	10
-------------	----

七、温度稳定性	10
---------------	----

八、各种抗干扰稳定性	10
------------------	----

九、静态误差	10
--------------	----

§ 1-2 传感器的动特性	11
---------------------	----

一、接触式传感器的动特性	11
--------------------	----

二、模拟式传感器的动特性	17
--------------------	----

三、数字式传感器的动特性	23
--------------------	----

§ 1-3 传感器的技术指标	24
----------------------	----

第二章 电阻式传感器	26
------------------	----

§ 2-1 应变片式电阻传感器	26
-----------------------	----

一、电阻应变效应	26
----------------	----

二、金属电阻应变片主要特性	27
---------------------	----

三、温度误差及其补偿	32
------------------	----

四、电阻应变片的粘结	33
------------------	----

五、转换电路	35
--------------	----

六、应变片式电阻传感器举例	39
---------------------	----

§ 2-2 压阻式电阻传感器	44
----------------------	----

一、压阻效应	44
--------------	----

二、半导体应变片结构及特性	46
---------------------	----

三、压阻式传感器	47
----------------	----

§ 2-3 电位器式电阻传感器	50
-----------------------	----

一、工作原理及特点	50
-----------------	----

二、线性与函数电位器	50
------------------	----

三、负载特性与负载误差	52
-------------------	----

四、电位器的结构与材料	53
-------------------	----

五、电位器式电阻传感器应用举例	54
-----------------------	----

§ 2-4 电触点式传感器	54
---------------------	----

一、工作原理	54
--------------	----

二、结构与电路	55
---------------	----

三、误差及其测定	56
----------------	----

第三章 电感式传感器	58
------------------	----

§ 3-1 自感式传感器	58
--------------------	----

一、工作原理	58
--------------	----

二、自感计算及特性分析	59
-------------------	----

三、自感线圈的等效电路	64
-------------------	----

四、转换电路和传感器灵敏度	67
---------------------	----

五、零点残余电压	70
----------------	----

六、应用举例	73
--------------	----

七、自感式传感器的设计	74
-------------------	----

§ 3-2 差动变压器式传感器	78
-----------------------	----

一、工作原理	78
--------------	----

二、互感计算与特性分析	79
-------------------	----

三、转换电路	85
--------------	----

四、零点残余电压的补偿	86
-------------------	----

五、应用举例	88
--------------	----

§ 3-3 涡流式传感器	89
--------------------	----

一、工作原理	89
--------------	----

二、参数计算与分析	90
-----------------	----

三、转换电路	93
--------------	----

四、低频透射涡流传感器	95
-------------------	----

五、涡流式传感器的应用	95
-------------------	----

§ 3-4 压磁式传感器	98
--------------------	----

一、压磁效应	98
--------------	----

二、工作原理	98
--------------	----

三、结构举例	99
--------------	----

四、压磁元件	99
--------------	----

五、测量电路	100
--------------	-----

六、压磁式传感器的应用	101
-------------------	-----

§ 3-5 感应同步器	101
-------------------	-----

一、概述	101
------------	-----

二、工作原理	102
--------------	-----

三、类型与结构	104
---------------	-----

四、信号处理方式	106
----------------	-----

五、设计举例	109
--------------	-----

六、误差分析	111
--------------	-----

七、感应同步器的接长	111	一、环境温度的影响	150
第四章 电容式传感器	113	二、湿度的影响	151
§ 4-1 工作原理和类型	113	三、横向灵敏度和它所引起的误差	151
一、工作原理	113	四、电缆噪声	152
二、类型	113	五、接地回路噪声	152
§ 4-2 电容式传感器的主要性能	117	§ 5-8 压电声表面波传感器	152
一、静态灵敏度	117	一、基本工作原理	152
二、非线性	118	二、SAW力和加速度传感器	154
三、动态特性	119	§ 5-9 聚偏二氟乙烯PVDF及其应用	155
§ 4-3 电容式传感器的特点		一、PVDF的结构	156
和设计要点	119	二、PVDF的工作原理和基本特性	157
一、特点	119	三、PVDF传感器设计的一般方法	159
二、设计要点	120	四、应用举例	160
§ 4-4 转换电路	124	第六章 磁电式传感器	161
一、对转换电路的要求	124	§ 6-1 磁电感应式传感器	161
二、电桥电路	125	一、工作原理和类型	161
三、差动脉冲调宽电路	126	二、动态特性	163
四、调频电路	127	三、主要元件的设计计算	166
五、运算放大器式电路	129	四、应用	170
§ 4-5 电容式传感器的应用	130	§ 6-2 霍尔式传感器	172
一、电容式差压传感器	131	一、工作原理与特性	172
二、电容式加速度传感器	131	二、霍尔元件的误差及其补偿	175
三、电容式位移传感器	131	三、应用	178
第五章 压电式传感器	133	§ 6-3 磁栅式传感器	178
§ 5-1 压电转换元件的工作原理	133	一、磁栅	179
一、压电效应表达式	134	二、磁头	181
二、石英晶体压电效应的机理	135	三、信号处理方式	183
三、压电元件的基本变形	136	四、磁栅传感器的特点与误差分析	184
四、压电常数和耦合系数	137	第七章 光电式传感器	185
§ 5-2 压电材料	138	§ 7-1 光电效应及光电器件	185
一、石英晶体	138	一、光电发射型	185
二、钽酸锂晶体	139	二、光电导型	187
三、压电陶瓷	139	三、光电导结型	188
§ 5-3 压电元件常用结构形式	141	四、光伏型	189
§ 5-4 等效电路	142	五、半导体光电元件的特性	190
§ 5-5 测量电路	143	§ 7-2 光电式传感器的测量电路	193
一、电压放大器	143	一、光源	193
二、电荷放大器	144	二、测量电路	193
§ 5-6 压电式传感器的应用举例	146	§ 7-3 一般形式的光电传感器	195
一、压电式测力传感器	146	一、模拟式光电传感器	195
二、压电式加速度传感器	147	二、脉冲式光电传感器	197
三、压电阻抗头	150	§ 7-4 光纤传感器	198
§ 5-7 压电式传感器的误差	150	一、光导纤维	198

二、光纤传感器	200
§ 7-5 电荷耦合器件	264
一、CCD的工作原理	204
二、CCD的结构	206
三、CCD的应用举例	207
§ 7-6 光栅式传感器	208
一、概述	208
二、基本工作原理和计量光栅的种类	209
三、莫尔条纹	212
四、光学系统	219
五、零位光栅	224
六、光栅式传感器设计要点	226
七、光栅式传感器的结构和应用举例	232
§ 7-7 激光式传感器	235
一、激光的特性和激光的频率稳定	235
二、激光干涉传感器	237
三、激光衍射传感器	241
四、激光扫描传感器	244
§ 7-8 码盘式传感器	245
一、工作原理	246
二、码制与码盘	246
三、二进制与循环码的转换	248
四、双盘编码器	249
五、应用举例	251
第八章 热电偶、超声波、核辐射检测	253
§ 8-1 热电偶	253
一、工作原理	253
二、常用热电偶	256
三、热电偶测温线路	257
§ 8-2 超声波传感技术	258
一、超声波及其传播	258
二、超声波的物理性质	259

三、超声波检测技术的应用	262
§ 8-3 核辐射检测	265
一、工作原理	265
二、射线源	266
三、探测器	266
四、核辐射检测的应用	268
五、放射性辐射的防护	269
第九章 谐振式传感器	270
§ 9-1 振筒式传感器	270
一、结构与工作原理	270
二、振筒的固有振动频率和振型	271
三、振动频率和压力的关系	272
四、测量电路	272
五、振动管式密度传感器	274
§ 9-2 振弦式传感器	275
一、工作原理与激励方式	275
二、振弦的固有频率与输出特性分析	277
三、振弦式传感器应用举例	279
§ 9-3 振膜和振梁式传感器	281
一、振膜式传感器	281
二、振梁式传感器	282
§ 9-4 压电式谐振传感器	282
一、石英晶体谐振式压力传感器	283
二、谐振梁式差压传感器	285
第十章 力平衡式传感器	288
§ 10-1 工作原理	288
§ 10-2 传感器特性	288
一、微分方程的建立及传递函数	288
二、静特性	290
三、动特性	291
§ 10-3 应用	292
参考文献	293

绪 论

(一) 传感器的地位与作用

新技术革命的到来,世界开始进入信息时代,在利用信息的过程中,首先要解决的就是要获取准确可靠的信息,而传感器是获取自然科学领域中信息的主要途径与手段。

传感器是现代测控系统中的关键环节,它处于连接被测控对象和测控系统的接口位置,构成了系统信息输入的主要窗口,提供着系统赖以进行处理和决策所必需的原始信息。如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量,那么无论是信号转换和处理,或者是最佳数据的显示和控制,都将失去意义。因为优良的二次仪表可以高保真度地再现传感器的输出,但却无法添加新的检测信息或消除传感器所引入的误差。

以现代飞行器为例,它装备着各种各样的显示和控制系统,以保证各种飞行任务的完成。反映飞行器飞行参数和姿态、发动机工作状态的各种物理参数,都要利用传感器予以检测,一方面显示出来提供给驾驶人员去控制与操纵,另一方面传输给各种自动控制系统,进行飞行器的自动驾驶和自动调节。例如“阿波罗10”的运载火箭部分,检测加速度、声学、温度、压力、振动、流量、应变等等参数的传感器共有2077个,宇宙飞船部分共有各种传感器1218个。数量是很大的,要求是很高的。在飞行器研制过程中,也要用各种传感器对样机进行大量的地面测试和空中测试,才能确定是否符合各项技术性能指标。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在最佳状态或正常状态,并使产品达到最好的质量。因此可以说,没有众多的优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

现代计算机的生产和发展,给人类文明带来了巨大的影响。特别是大规模和超大规模集成电路出现之后,计算机的核心部件有了惊人的发展,同时也要求外部设备与之相配合。计算机输入的外部硬件主要就是传感器。传感器的发展将使计算机的功能得到充分的利用,同时也将促进计算机的进一步发展,传感器的不足将极大地限制了计算机功能的发挥,就如一个人具有发达的大脑而欠灵的五官一样。有人说,计算机与传感器的协调发展,才能决定技术的将来。这句话是有一定道理的。

在基础学科研究中,传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展,进入了许多新的领域:例如在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙,微观上要观察小到 10^{-13}cm 的粒子世界,纵向上要观察长达数十万年的天体演化,短到 10^{-24}s 的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识。开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术的研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等等。显然,要获取大量人类感官无法获取的信息,没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现,往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

目前,传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、健康管理、生物工程、甚至文物保护等等极其广泛的领域中。可以毫不夸张地说,从茫茫的

太空，到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。

由此可见，传感技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用，是十分明显的。但是这一点只是在不久之前才被人们所认识。据有人统计，目前世界上大约有70多个国家正致力于新型传感器的研制开发工作。世界各工业发达国家，如美国、英国、日本、联邦德国等国都把传感器的研制摆在十分重要的地位，纷纷增加投资，加速传感技术的研究工作。例如，日本有80多家公司致力于传感器的研制，70年代共有3000多项专利，80年代将更突破。美国航空与航天管理局制定了空间传感器发展计划，海军研究实验室制定了光纤传感器系统的研究计划，很多公司在传感器领域获有很多专利。各国还成立了相应的组织，如日本“电子工业振兴会”下面设有“传感器委员会”，英国由国家工业部和主要产业联合成立了“传感器联合开发协会”，我国也成立了“传感器学会”等。这些组织积极开展各种学术活动，作了大量调查与推动工作。相信不久的将来，传感技术将会出现一个飞跃，达到与其重要地位相称的新水平。

(二) 传感器的定义与组成

传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置。

这一定义包含了以下几方面的意思：①传感器是测量装置，能完成检测任务；②它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量；④输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

关于传感器，我国曾出现过多种名称，如发讯器、传送器等，它们的内含相同或相似，所以近来已逐渐趋向统一，大都使用传感器这一名称了。从字面上可以作如下解释：传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。

另外，还有一些行业称之为换能器。后面将要提到，传感器可分为能量控制型和能量转换型两大类。能量转换型传感器在进行不同物理量的信息转换时，总是要伴随着能量转换过程。从这一点看，称为转换器还是可行的。不过，传感器的内含，从广义考虑是进行信息转换而不是能量转换较为确切。况且，能量控制型传感器，就不明显地存在以能量转换为主的过程。因此，作为一个广泛适用的名称而言，还是通称传感器为宜。

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成，组成框图见图0-1。

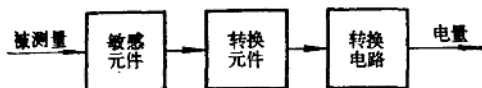


图0-1 传感器组成框图

敏感元件：它是直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。图0-2是一种气体压力传感器的示意图。膜盒2的下半部与壳体1固接，上半部通过连杆与磁芯4相连，磁芯4置于两个电感线圈3中，后者接入转换电路5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 p_0 相通，内部感受被测压力 p 。当 p 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参数量。在图0-2中，转换元件是可变电感3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

转换电路：上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,有些则较复杂,大多数是开环系统,也有些是带反馈的闭环系统。

最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶就是。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如电压式加速度传感器,其中质量块是敏感元件,压电片(块)是转换元件。有些传感器,转换元件不只一个,要经过若干次转换。

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起的,而转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起,不过由于空间的限制或者其它原因,转换电路常装入电箱中。尽管如此,因为不少传感器要在通过转换电路之后才能输出电量信号,从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。这里顺便说明一下:一般情况下,转换电路后面的后续电路,如信号放大、处理、显示等电路就不再也不应包括在传感器范围之内了。

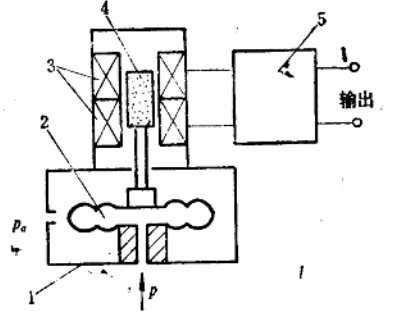


图0-2 压力传感器

(三) 传感器的分类与对它的一般要求

传感器行业是一个知识密集技术密集的行业,它与许多学科有关,它的种类十分繁多。为了很好地掌握它、应用它,需要有一个科学的分类方法。

下面将目前大家采用的分类方法作一简单介绍。

首先,根据传感器的工作机理,可分为结构型与物性型两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律和运动定律等构成的。物理学中的定律一般是以方程式给出。对于传感器来说,这些方程式也就是许多传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大关系。以差动变压器为例,无论是使用坡莫合金或铁淦氧做铁芯,还是使用铜线或其它导线做绕组,都是作为差动变压器而工作的。

物性型传感器是利用物质法则构成的。物质法则,是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是以物质本身的常数形式给出。这些常数的大小,决定了传感器的主要性能。因此,物性型传感器的性能随材料的不同而异。例如,光电管就是物性型传感器,它利用物质法则中的外光电效应。显然,其物性与涂复在电极上的材料有着密切的关系。又如,所有半导体传感器,以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷、合金等性能变化型传感器,都属于物性型传感器。

其次,根据传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

能量控制型传感器,在信息变换过程中,其能量需要外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属此类。

能量转换型传感器,同时又是能量变换元件,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属此类。

第三,按照物理原理分类,可分为

①电参量式传感器。包括电阻式、电感式、电容式等三个基本型式,以及由此而派生出

来的电触式、差动变压器式、涡流式、压磁式、感应同步器式、容栅式等；

②压电式传感器；

③磁电式传感器。包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等；

④光电式传感器。包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式、摄像式等；

⑤气电式传感器；

⑥热电式；

⑦射线式；

⑧波式传感器。包括超声波式、微波式等；

⑨半导体式传感器；

⑩其它原理的传感器等。

有些传感器的工作原理具有两种以上原理的复合形式，如半导体式传感器，不少也可看成电参量式传感器。有些传感器不属于前列九类，则可列入第10类，如振弦振筒式传感器，力平衡式传感器等。

第四，可以按照传感器的使用来分类。例如位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等等。表0-1列举了各种被测参数的分类。

表0-1 被测参数的分类

长 度	长度、角度、位移、厚度、几何位置、几何形状、表面波度和粗糙度
力 学	力、力矩、振动、转速、加速度、质量、流量、硬度、真空度
温 度	温度、热量、比容、热分布
湿 度	湿度、水分
频 率	频率、时间
电 量	电流、电压、电阻、电容、电感、电磁波
磁 性	磁通、磁场
光 学	照度、光度、颜色、图像、透明度
声 学	声压、噪声
射 线	射线剂量、剂量率
化 学	浓度、成分、pH值、浊度
生 理	心音、血压、脉搏、血氧饱和量、体温、心电图、脑电

另外，根据传感器输出是模拟信号还是数字信号，可分为模拟传感器和数字传感器；根据转换过程可逆与否，可分为双向传感器和单向传感器等。

各种传感器，由于原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，其技术指标也不可能相同。但是有些一般要求，却基本上是共同的，这就是：①可靠性；②静态精度；③动态性能；④抗干扰能力；⑤通用性；⑥小的轮廓尺寸；⑦低成本；⑧低能耗等。

可靠性、静态精度与动态性能的要求是不言而喻的。传感器是通过检测功能来达到各种技术目的的，很多传感器要在动态条件下工作，精度不够、动态响应不行或出现故障，整个工作就无法进行。在某些系统中或设备上往往要装上许多传感器，若有一个传感器失灵，会

影响全局，后果将不堪设想。所以传感器的工作可靠性、静态精度和动态性能是最基本的要求。

抗干扰能力也是十分重要的，因为使用现场总会存在这样那样的干扰，总会出现各种意想不到的情况，因此要求传感器应有这方面的适应能力，同时还应包括在恶劣环境下使用的安全性。通用性主要是指传感器应可用于各种不同的场合，以免一种应用要搞一种设计，达到事半功倍的目的。其它几项要求不言自明，不再赘述。

(四) 传感器的发展动向

传感技术的发展，目前正处于方兴未艾状态。从目前的情况来看，传感器的发展动向有下列几个方面

1. 采用新原理

新原理的采用往往给传感器的发展带来质的飞跃。约瑟夫逊效应传感器可以作为采用新原理的代表。一种基于约瑟夫逊效应的红外探测器，响应速度极快，对光通信的贡献很大。

老原理的新应用，对促进传感器发展也有极大的作用。如光导纤维，其原理可以说是老早就有的，但用于传感器是一种创新，产生的效果是很大的。

2. 填补传感器的空白

有些被测量，到现在为止还没有合适的传感器予以检测，或者功能还差得很远。例如相当于人的味觉传感器，完全没有解决，甚至连头绪也没有找到。相当于人的嗅觉的气体传感器，是利用固体电路可随吸附在该固体表面及包围在固体周围的物质种类和数量变化这一原理工作的，但其制作尚处于探索阶段。不少仿生传感器都有待于研究。

3. 大力开发物性型传感器

结构型传感器发展得较早，目前日趋成熟。结构型传感器的检测原理明确，受环境影响小，一般来说它的构造复杂、体积偏大、价格偏高。物性型传感器大致与之相反，具有不少诱人的优点，加之过去发展也不够。世界各国都在物性型传感器方面投入了大量人力物力，加强研究，从而使它成为值得注意的发展动向之一。

4. 集成化

集成化主要是指将传感器与电路连接成一个完成一定功能的整体。例如把霍尔器件连同放大、激励输出的电路做在一块硅片上，以制作无接触键。又如在一块半导体单晶片上形成很多光电器件的固体光导摄像管，也是集成电路技术发挥了作用。

5. 多功能化与智能化

多功能化是指一器多能，例如一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。或者，例如利用CCD器件的把一维或二维光学图像转换成时序电信号的传感器，因为阵列化的光电探测器的光电转换功能与扫描功能综合在一起，也可算成多功能化传感器。

智能化一般是指带微芯片的传感器，具有信息处理、量程变换、误差修正、反馈控制、自诊断及其它有关“智能”功能。

(五) 本课程的特点和任务

《传感器》课程主要讲授把各种几何量、机械量以及有关其它物理量转换成电量的各种传感器（包括转换电路）。

传感器是与现代科学技术紧密相连的正在发展的一门新兴学科，其种类很多，涉及的工

作原理十分丰富。传感器是精密测量仪器和自动控制系统的首要环节，与生产实际和科学研究的关系十分密切。所有这些就决定了《传感器》课程是一门综合性、理论性和实践性都很强的课程。

本课程的主要任务是：①使学生掌握各类传感器的基本理论，掌握几何量、机械量及有关物理量测量中常用的各种传感器的工作原理、主要性能及其特点；②使学生能合理地选择和使用传感器；③使学生掌握常用传感器的工程设计方法和实验研究方法；④了解传感器的发展动向等。

学习《传感器》课程，涉及到机、电、光等多方面知识，学习之前应有所准备。学习中要把握全书重点和各章重点，弄懂基本概念，理论联系实际。

第一章 传感器的一般特性

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,或变化极慢时,这一关系就称为静特性;当输入量随时间变化时,这一关系就称为动特性。

一般说来,传感器输出与输入关系可用微分方程来描述。理论上,将微分方程中的一阶及以下的微分项取为零时,便可得到静特性,因此,传感器的静特性只是动特性的一个特例。实际上,传感器的静特性要包括非线性和随机性等因素,如果把这些因素都引入微分方程,将使问题复杂化。为避免这种情况,总是把静特性和动特性分开考虑。

传感器除了描述输出输入关系的特性之外,还有与使用条件、使用环境、使用要求等有关特性。

§1-1 传感器的静特性

静特性表示传感器在被测量各个值处于稳定状态时的输出输入关系。

人们总是希望传感器的输出与输入成唯一的对应关系,而且最好呈线性关系。但一般情况下,输出输入不会完全符合所要求的线性关系,同时由于存在着迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素的影响,以及外界条件的影响,使输出输入对应关系的唯一性也不能实现。考虑了这些情况之后,传感器输入输出作用图大致如图1-1所示。图中的外界影响不可忽视,影响程度取决于传感器本身,可通过传感器本身的改善来加以抑制,有时也可以对外界条件加以限制。图中的误差因素就是衡量传感器静特性的主要技术指标。

一、线性度

传感器的输出输入关系或多或少地都存在非线性问题。在不考虑迟滞、蠕变等因素的情况下,其静特性可用下列多项式代数方程来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中

y —— 输出量;

x —— 输入量;

a_0 —— 零点输出;

a_1 —— 理论灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ —— 非线性项系数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形式。

静特性曲线可用实际测试获得。在获得特性曲线之后,可以说问题已经解决。但是为了标定和数据处理方便,希望得到线性关系。这时可采用各种方法,其中也包括计算机硬件

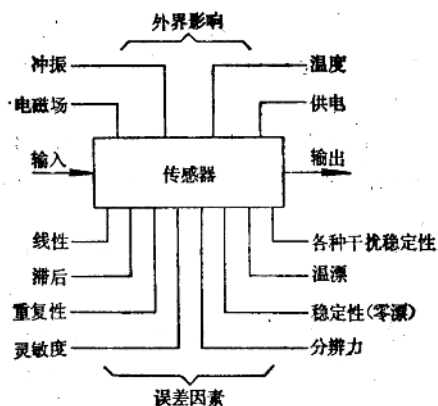


图1-1 传感器的输入输出作用图

或软件补偿, 进行线性化处理。一般来说, 这些办法都比较复杂。所以在非线性误差不太大的情况下, 总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时, 输出输入的校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差, 就称为非线性误差或线性度, 通常用相对误差 γ_L 来表示, 即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{L_{max}}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 $\Delta_{L_{max}}$ ——非线性最大偏差;

y_{FS} ——满量程输出。

由此可见, 非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同, 非线性误差也不同。所以, 选择拟合直线的主要出发点, 应是获得最小的非线性误差。另外, 还应考虑使用是否方便, 计算是否简便。

目前常用的拟合方法有①理论拟合; ②过零旋转拟合; ③端点拟合; ④端点平移拟合; ⑤最小二乘拟合等。前四种方法如图1-2所示。图中实线为实际输出的校正曲线, 虚线为拟合直线。

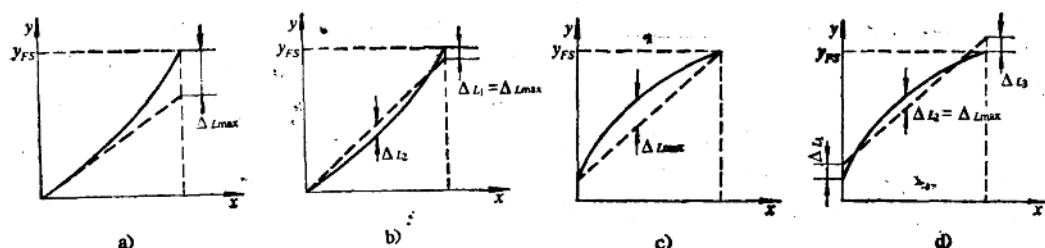


图1-2 各种直线拟合方法

a) 理论拟合 b) 过零旋转拟合 c) 端点拟合 d) 端点平移拟合

在图 a 中, 拟合直线为传感器的理论特性, 与实际测试值无关。这种方法十分简便, 但一般说来 $\Delta_{L_{max}}$ 很大。

图 b 为过零旋转拟合, 常用于校正曲线过零的传感器。拟合时, 使 $\Delta_{L1} = |\Delta_{L2}| = \Delta_{L_{max}}$ 。这种方法也比较简单, 非线性误差比前一种小很多。

图 c 中, 把校正曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便, 但 $\Delta_{L_{max}}$ 较大。

图 d 在图 c 基础上使直线平移, 移动距离为原先 $\Delta_{L_{max}}$ 的一半。这样, 校正曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta_{L1} = |\Delta_{L2}| = |\Delta_{L3}| = \Delta_{L_{max}}$, 与图 c 相比, 非线性误差减小一半, 提高了精度。

采用最小二乘法拟合时, 设拟合直线方程式为

$$y = kx + b \quad (1-3)$$

若实际校准测试点有 n 个, 则第 i 个校准数据 y_i 与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1-4)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值, 也就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 k 和 b 的一阶偏导数等于零, 即

$$\frac{\partial}{\partial k} \Sigma \Delta_i^2 = 2 \Sigma (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \Sigma \Delta_i^2 = 2 \Sigma (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-6)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} \quad (1-7)$$

$$b = \frac{\Sigma x_i^2 \Sigma y_i - \Sigma x_i \Sigma x_i y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} \quad (1-8)$$

在获得 k 和 b 之值后代入式(1-3)即可得到拟合直线, 然后按式(1-4)求出残差的最大值 $\Delta_{i \max}$ 即为非线性误差。

顺便指出, 大多数传感器的校正曲线是通过零点的, 或者使用“零点调节”使它通过零点。某些量程下限不为零的传感器, 也应将量程下限作为零点来处理。

二、迟滞、

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出输入曲线不重合称为迟滞。迟滞特性如图1-3所示, 它一般是由实验方法测得。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示, 即

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时, 可选择几个测试点。对应于每一点的输入信号, 传感器正反行程趋近, 输出信号出现差值。差值中最大者即为回程误差。

三、重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

图1-4所示为校正曲线的重复特性, 正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$, 反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个最大偏差中之较大者为 $\Delta R_{\max}$, 再以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示, 即

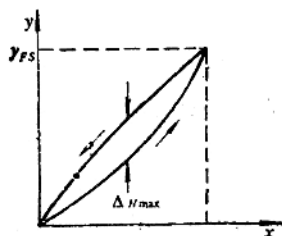


图1-3 迟滞特性

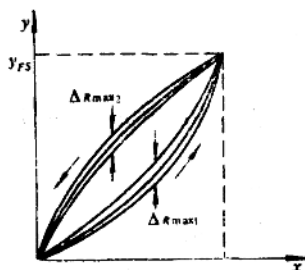


图1-4 重复特性

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取几个测试点, 对应每一点多次从同一

方向趋近, 获得输出值系列 $y_{11}, y_{12}, y_{13} \dots y_{1n}$, 算出最大值与最小值之差或 3σ 作为重复性偏差 Δ_{R1} , 在几个 Δ_{R1} 中取出最大值 Δ_{Rmax} 作为重复性误差。

四、灵敏度与灵敏度误差

传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入变化量 Δx 之比即为其静态灵敏度, 其表达式为

$$k = \Delta y / \Delta x$$

由此可见, 传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度。线性传感器, 其特性的斜率处处相同, 灵敏度 k 是一常数。以拟合直线作为其特性的传感器, 也认为其灵敏度为一常数, 与输入量的大小无关。

由于某种原因, 会引起灵敏度变化, 产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示, 即

$$\gamma_s = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \quad (1-11)$$

五、分辨力与阈值

分辨力是指传感器能检测到的最小的输入增量。有些传感器, 如电位器式传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只像阶梯变化, 则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。

分辨力可用绝对值表示, 也可用与满量程的百分数表示。

在传感器输入零点附近的分辨力称为阈值。

六、稳定性

稳定性是指传感器在长时间工作情况下输出量发生的变化。有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。测试时先将传感器输出调至零点或某一特定点, 相隔 4h、8h 或一定的工作次数后, 再读出输出值, 前后两次输出之差即为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示, 也可用绝对误差表示。

七、温度稳定性

温度稳定性又称为温度漂移, 它是指传感器在外界温度变化情况下输出量发生的变化。测试时先将传感器置于一定温度 (例如 20°C) 下, 将其输出调至零点或某一特定点, 使温度上升或下降一定的度数 (例如 5°C 或 10°C), 再读出输出值, 前后两次输出之差即为温度稳定性误差。温度稳定性误差用每若干 $^\circ\text{C}$ 的绝对误差或相对误差表示。每 $^\circ\text{C}$ 的误差又称温度误差系数。

八、各种抗干扰稳定性

这是指传感器对各种外界干扰的抵抗能力。例如抗冲击和振动的能力、抗潮湿的能力、抗电磁场干扰的能力等。评价这些能力比较复杂, 一般也不易给出数量概念, 需要具体问题具体分析。

九、静态误差

静态误差是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论输出值的偏离程度。

静态误差的求取方法如下: 把全部校准数据与拟合直线上对应值的残差, 看成是随机分布, 求出其标准偏差 σ , 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2} \quad (1-12)$$