

15

TP212
H42

上海市研究生教育用书

现代测试技术

主编 洪水棕
编者 方之楚
单雪雄

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了在工程领域和科学实验中广泛应用的3种传统型传感器(电阻应变计式传感器、压电式传感器、温度传感器)和6类新型传感器(压阻式传感器、光纤传感器、固体图像传感器、智能式传感器、数字式传感器和现代流体测试用传感器)的原理、结构、特性及其应用技术,并介绍了信号处理技术的基础与应用知识,例如动态信号的采集、转换与分析处理技术(如模态分析与谱分析等)。最后,本书还分别介绍传感器技术和信号处理技术在工程领域与新兴学科实验研究中的应用基础知识与实例。

本书适用从事于机械工程、航空航天工程、发电与电机工程、冶金工程、动力机械工程、造船工程、生物医学工程、机器人工程和力学以及塑性成形加工等领域的工程技术人员,也可作为大学本科生、研究生的教材或教学与科研的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术/洪水棕主编. —上海:上海交通大学出版社,2002

ISBN7—313—02821—0

I. 现... II. 洪... III. 传感器—应用
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第068189号

现代测试技术

洪水棕 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路877号 邮政编码200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22.5 字数:556千字

2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

印数:1—1050

ISBN7—313—02821—0/TP·475 定价:36.00元

前 言

本书本着科学技术面向国民经济建设、面向现代科学技术发展的精神,主要阐述4个方面的内容。第一篇在论述传感器的作用、分类、特性、组成与发展前景的基础上,主要阐述已获得各个领域最广泛应用的3种常见的传统型的传感器,即电阻应变计式传感器、压电式传感器和温度传感器;第二篇则是在论述新型传感器的总貌后,介绍了6种具有新颖特色和应用前景的新型传感器,即压阻式传感器、光纤传感器、固体图像传感器、智能式传感器、数字式传感器和流体参数测试新型传感器等;第三篇描述了信号处理技术,包括5个方面的内容,即数据处理技术基础、数据采集和转换技术、动态参数的数字信号处理基础、现代谱分析技术和模态分析技术;第四篇分别论述了传感器技术和信号处理技术在各个工程生产领域与科学实验中的应用基础知识与实例,即它们分别在航空航天工程、现代汽车工程、家用电器工程、石化、电力与机械工程、生物力学与生物医学工程、复合材料与复合结构力学以及机器人工程中的应用;最后还介绍了具有一定特色的现代流体测试技术在工程中的应用。

编著本书的主要目的是为了适应综合性理工科大学中的研究生与本科生的教学需要,改革传统的流体力学、固体力学、一般力学各自为政讲述测试技术的弊病,进行有机交叉与分析组合,并紧密结合与开拓其在各个工程与学科领域中的测试技术。本书主要内容曾作为上海交通大学的全校博士生公共基础课进行教学实践,颇受研究生的欢迎。

本书的第10章和第16章的第16.8节由单雪雄编写,第14章和第15章由方之楚编写,其他章节由洪水棕编写。由于作者水平有限,加上经验不足,书中错误与不当之处在所难免,恳请同行与广大读者批评指正。

洪水棕

1999年12月

目 录

第一篇 常用传感器及其应用技术	1
第 1 章 传感器技术总论	1
1.1 概述	1
1.2 传感器系统的作用、分类与组成.....	2
1.3 传感器的特性	5
1.4 传感器技术的发展前景.....	16
第 2 章 电阻应变计式传感器	18
2.1 电阻应变计.....	18
2.2 电阻应变计式传感器的基础知识.....	24
2.3 电阻应变计式测力传感器.....	32
2.4 电阻应变计式压强传感器.....	38
2.5 电阻应变计式位移传感器.....	40
2.6 电阻应变计式扭矩传感器.....	41
2.7 电阻应变计式加速度传感器.....	41
第 3 章 压电式传感器	44
3.1 概述.....	44
3.2 压电效应.....	44
3.3 压电材料.....	45
3.4 压电传感器的结构形式与测量电路.....	50
3.5 压电式力传感器.....	54
3.6 压电式压力传感器.....	60
3.7 压电式加速度传感器.....	65
3.8 压电式传感器精度的影响因素.....	76
3.9 压电式超声波传感器.....	77
3.10 压电式声发射传感器	78
第 4 章 温度传感器	82
4.1 概述.....	82
4.2 热电偶.....	83
4.3 金属测温电阻器.....	86

4.4	半导体瓷热敏电阻温度传感器	87
4.5	晶体温度传感器	97
4.6	NQR 温度计	98
4.7	非接触型温度(热)传感器	100
第二篇 新型传感器及其应用技术		102
第 5 章 压阻式传感器		102
5.1	概述	102
5.2	压阻式传感器的工作原理	103
5.3	晶面与晶向的表示方法	103
5.4	压阻系数及其影响因素	104
5.5	硅压力膜片的应力分布	108
5.6	硅压阻式传感器中的硅芯片设计	109
5.7	硅压阻式压力传感器的制造	112
5.8	硅压阻式压力传感器的测量与补偿电路	114
5.9	硅压阻式压力传感器的结构及其应用	116
5.10	硅压阻式加速度传感器	117
5.11	硅压阻式扭矩传感器	119
5.12	硅压阻式力传感器	119
第 6 章 光纤传感器		120
6.1	概述	120
6.2	光导纤维	120
6.3	光纤传感器的特性	122
6.4	光纤位移传感器	122
6.5	光纤测压传感器	124
6.6	光纤测温传感器	125
6.7	频率调制型光纤传感器	126
6.8	分布式光纤传感器	127
第 7 章 固体图像传感器		133
7.1	固体图像传感器的特点与种类	133
7.2	CCD 图像传感器	134
7.3	固体图像传感器的应用	137
第 8 章 智能传感器		140
8.1	概述	140
8.2	Smart 传感器的基本组成	141

8.3	Smart 传感器的软件设计	143
8.4	Smart 传感器的应用实例	143
8.5	Smart 传感器的发展趋势	145
第 9 章	数字式传感器	147
9.1	概述	147
9.2	数字式传感器的特点	147
9.3	数字式传感器的分类	148
9.4	直接编码式传感器	148
9.5	频率式传感器	154
9.6	数字式传感器的发展趋势	160
第 10 章	流场测试技术	161
10.1	概述	161
10.2	激光多普勒测速原理	161
10.3	激光多普勒流速计的光学系统	165
10.4	多普勒信号的分析处理	173
10.5	频移技术及多维流场的测量	178
10.6	热线测速基础	184
10.7	恒温式热线流速计的校准	188
10.8	热线的数据处理与修正	190
10.9	HWFA 多维速度测量	191
10.10	粒子图像测速技术(PIV)基本原理	193
10.11	PIV 系统的组成	194
10.12	PIV 系统的数据处理	195
第三篇	信号处理技术	197
第 11 章	数据处理技术基础	197
11.1	概述	197
11.2	平稳随机过程	199
11.3	随机数据的特征值	200
11.4	常见的几种随机过程	208
11.5	动态数据处理系统	211
第 12 章	数据转换与采集技术	218
12.1	概述	218
12.2	采样与量化	219
12.3	数据采集系统中的主要功能电路	227

12.4	微型机控制的 A/D 与 D/A 通道	230
12.5	D/A 转换器	231
12.6	A/D 转换器	233
12.7	数据采集系统的软件与连接总线	237
第 13 章	动态参数的数字信号处理基础	243
13.1	概述	243
13.2	FFT 频谱分析技术	243
13.3	动态激励信号分析	250
13.4	动态校准方法与装置	258
13.5	动态数学模型的建立	259
13.6	系统的动态性能指标	262
第 14 章	现代谱分析技术初步	269
14.1	估计质量的评价	270
14.2	随机信号数字特征的估计	272
14.3	功率谱估计的非参数方法	274
14.4	功率谱估计的参数方法	277
第 15 章	现代模态分析与参数识别技术	286
15.1	振动模态分析的基本理论	286
15.2	模态参数频域识别法	290
15.3	模态参数时域识别法	298
第四篇	现代测试技术在工程建设和新学科研究中的应用	303
第 16 章	现代测试技术在工程建设和新学科研究中的应用	303
16.1	在航空航天工程中的应用	303
16.2	在现代汽车工程中的应用	309
16.3	在家用电器工程中的应用	311
16.4	在石化电力与机械工程中的应用	316
16.5	在生物力学与现代医学工程中的应用	324
16.6	在复合材料与复合结构力学中的应用	331
16.7	在机器人工程中的应用	341
16.8	流场测试技术的应用实例	347
参考文献		350

第一篇 常用传感器及其应用技术

第 1 章 传感器技术总论

1.1 概述

在高度发展的现代社会中,科学技术的突飞猛进和生产过程的高度自动化已成为人所共知的必然发展趋势,而它们的共同要求是必须建立在有着不断发展与提高的信息工业基础上。人们只有从外界获取大量准确、可靠的信息后,经过一系列的科学分析、处理、加工与判断,进而认识和掌握自然界与科学技术中的各种现象与其相关的变化规律,并通过相应的系统与方法加以实现科学实验研究与生产过程的高度自动化。换言之,工业生产过程的现代化面临的第一个问题是必须采用各种传感器来检测、监视和控制科学实验与生产过程的各个静动态参数,使设备与系统以及科学研究工作能正常运行和处于最佳状态,从而保证科研工作的成功与生产的高效率、高质量。所以,进行信息采集的传感器技术是重要的前期基础工作。此后,才有后期的信息分析、处理、加工技术问题。当然,人们在早期是通过人体自身的感觉器官与外界保持接触,在一定的程度上和一定的范围内获得颇有意义与有限的重要信息,以维持与指导人类的正常生活与开展生产活动。例如人类的耳朵能听到声波在音频段的声音,但却听不到声波中的超低频段或超高频段的声音;又如人类的眼睛能视辨出自然光或白光中的主要光波颜色,但却无法视辨到红外光或紫外光。因而,多年来人们不仅研究出具有人类感觉器官上所具有的感觉功能的检测元件——传感器,而且还千方百计地开发出了人类感觉器官所不具备的感觉功能的传感器。

特别要指出的是近 30 年来快速发展的 IC 技术与电子计算机技术,为传感器的高速发展提供了非常良好与可靠的科学技术基础,也提出了更高的要求与强有力的鞭策。若面临着先进的计算机技术和信息技术与落后的传感器技术的现实差距,那将是“脑子发达,五官迟钝”而大大影响科学技术的高度发展与生产过程的高度自动化。所以,在近 20 年中,世界各国都将传感器技术列为尖端技术,尤其是在经济发达的美、英、德、俄、日等国与我国,对传感器及其技术更是倍加重视。由于现代的人们已经认识到现代信息技术的三大基础是信息的采集、传输和处理技术,即传感器技术、通信技术与计算机技术分别构成了信息技术系统的“感官”、“神经”和“大脑”,而信息采集系统的最前端正是传感器。现代通信技术与计算机技术已经达到高度发展与成果累累的地步,所以,人们常说:“征服了传感器,就等于征服了科学技术”。美国在 20 世纪 80 年代就称其是传感器的时代,日本把十大技术之首定位于传感器,俄罗斯国防发展

中的“军事航天”计划也把传感器技术列为重点,英、德、法等国也拨出专用巨款来发展传感器技术,我国在“八五”规划中也把传感器技术列为重点发展技术和 21 世纪发展的高科技项目之一。鉴于我国对传感器的研究与发展较晚,基础较差,所以为了缩小差距,必须加速与促进我国传感器技术的发展。改革开放 20 多年来,国内经常举办传感器的大型国际学术会议与展览会就是一个证明。传感器是探索与测量自然界各种参数的检测元件,有人曾通俗称其为“探头”(Probe),英语中还有“Sensor”(敏感元件)与“Transducer”(传感器)之称,我国常有“传感器”、“换能器”与“变换器”之称。国际标准协会“ISO”和日本工业标准“JIS-Z103”定义为“对应于被测量、能给出易于处理的输出信号的变换器”。实际上,能够完成两种量(光、热、电、力学量、机械量等)之间的变换或转换关系,都符合于传感器的定义范围。从目前实际应用情况而言,鉴于目前电学及其器件与系统的高度发展,往往是传感器配用测量电路以后的输出量都是电学量,所以在一些资料与参考书中,把电学量作为输出量的传感器称其为电子传感器。当然,本书的描述也是如此。

1.2 传感器系统的作用、分类与组成

1.2.1 传感器系统的作用

随着现代科学技术的迅猛发展和生产过程的高度自动化,以及人类生活质量的不断提高,以传感器-微机为核心的现代测试与控制系统正在越来越广泛地应用于航天、航空、兵器、舰船、交通运输、电力、冶金、机械制造、动力机械、化工、轻工、生物医学工程等部门和技术领域。可以说,现代测试与控制系统已覆盖了国民经济中的第一、二、三产业的各个领域。日益发展的载人航天飞机与卫星以及现代化的多功能信息家用电器,无一不是使用传感器-微处理器或微机组成的测试与控制系统。以电阻应变计式的负荷传感器组成的电子秤计量测试系统已是国内外公认的高精度与高可靠性的广泛应用于室内外的计量标准,更是成为科学研究、工业生产自动化领域以及商品交换与流通领域的有力计量工具,发挥着巨大的作用。所以,人们常说“测试技术与自动化控制技术的水平高低是衡量科学技术现代化程度的重要标志”,而科学技术中很多新的发现与突破,或者说新兴交叉边缘学科的兴起与发展,都是以实验测试与研究为基础并发挥着先导作用的。现代传感器起着工业控制眼睛的作用已成为人们的共识。

现代测试与控制系统,常常是以信息的流通过程来划分为如图 1-1 所示的开环测试系统和如图 1-2 所示的闭环测试系统。

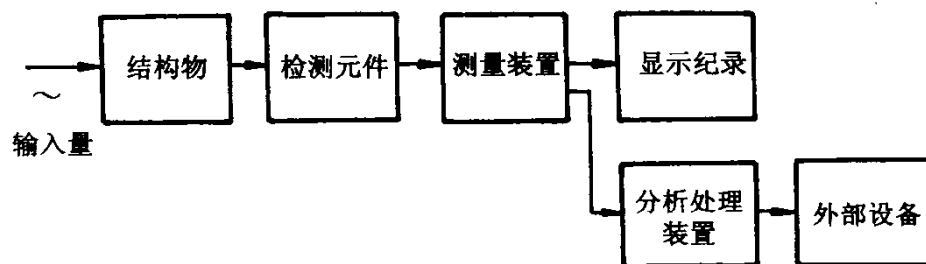


图 1-1 开环测试系统

在开环测试系统中,我们常把测试系统中位于前端和放置于被测对象上或近邻的传感器

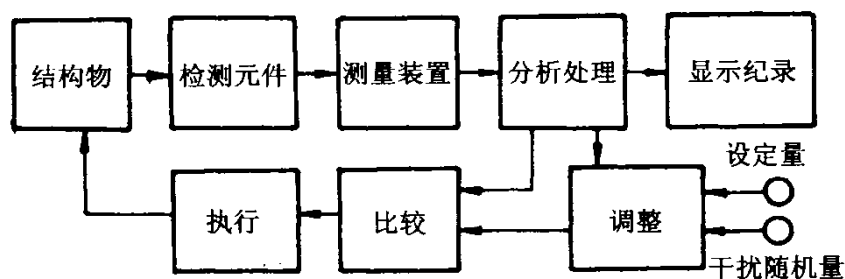


图 1-2 闭环测试系统

完成参数检测功能的部分称为一次仪表；而其后完成的电信号放大与极性辨别以及噪声信号的滤除的测量仪器装置称为二次仪表；而对二次仪表输出的被测量参数的电信号进行指示、显示或记录动态变化信号曲线的记录仪器或装置称为三次仪表。在现代测试系统中，人们再把二次仪表输出的被测量参数的连续变化模拟电信号，经过模拟-数字变换器(A/D)转换成数字信号后，进入电子计算机完成信号的分析处理与加工，得到数字结果，以反映被测量对象的静动态物理属性的客观变化规律。若人们想要得到形象的曲线等方式的描述结果，可以再通过数字-模拟变换器(D/A)把电子计算机得到的数字形式结果转换为连续变化模拟信号加以实现。

若是在闭环的现代测试与控制系统中，则还需要把计算机分析、处理、加工后的结果返回到执行机构，进而实现对被测量对象的参数调整与控制，以达到优化的生产或变化过程的自动调节与控制。所以，现代的测试系统是综合多种科学技术实现测量、处理与控制的一体化的多功能、智能化的现代测试系统。随着传感器技术与微机技术以及网络信息技术的日益发展，将有力地推动与加速现代测试技术的发展。

1.2.2 传感器的组成

一般地说，传感器由两个基本元件组成，即敏感元件与转换元件。相对于传感器的参数转换作用而言，常称敏感元件为预变换器。因为在完成非电量到电量的变换时，并非所有的非电量参数都能一次直接变换为电量，往往是先变换一种易于变换成电量的非电量(如位移、应变等)，然后，再通过适当的方法变换成电量。因而，人们把能够完成预变换的器件称为敏感元件。所以，在传感器中，建立在力学结构分析上的各种类型的弹性元件(如梁、板等)常称为敏感元件，并统称为弹性敏感元件。而转换元件是能将感受到的被测非电量参数转换为电量的器件，如应变计、压电晶体、热电偶等。当然，转换元件是传感器的核心部分，它是利用各种物理、化学、生物效应等原理制成的。在自然界中，新的物理、化学、生物效应的被发现与开拓，常被用到研制与开发新型传感器上，使其品种与功能日益增多，应用领域更加宽广。

应该指出的是，并不是所有的传感器都包括敏感元件与转换元件，有一部分传感器不需要预变换作用的敏感元件，例如热敏电阻、光电器件等。此外，还有一部分传感器采用先进工艺技术和材料后，能使敏感元件与转换元件合为一体，例如通过半导体材料集成的(IC)技术，便能使其合为整体的固态压力传感器。

1.2.3 传感器分类

传感器的输出电量 y 与输入的非电量 x 的函数关系 $y = f(x)$ 称为变换函数，它表示传感器的输入-输出特性，但传感器在实际测量应用中，传感器的输入量除了被测量 x 以外，尚有

被测对象与测量环境的许多干扰量,如温度、湿度、噪声、振动、电磁感应等因素导致的干扰量。所以,传感器的变换函数是一元函数,仅是一种理想状态。严格地说,它应该是多元函数 $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$,为此,设计与选用传感器时,传感器要近似满足 $y=f(x)$ 的单值对应关系式,就必须考虑到具有选择性能的转换元件和配用相应的传感器电路,使被测量以外的各种干扰量对传感器输出量的影响限制在最低的水平,才能保证传感器有足够的测量精度和良好的稳定性。

转换元件的物理特性的内在规律或者它所依据的物理、化学、生物效应是设计传感器的理论基础。因而,按不同的方法对传感器进行分类,将有助于人们从总体上来认识和掌握传感器的原理、性能与应用。

人们利用传感器来测量自然界中的物理量名目繁多,但从本质上看,它们仅是一些基本物理量和由其派生出来的其他物理量,如能了解基本物理量与派生量之间的关系,将有助于人们认识与划分传感器的类型(见表 1-1)。

表 1-1 基本物理量和派生物理量

	基本物理量	派生物理量	基本物理量	派生物理量	
位移	线位移	长度 厚度 应变	加速度	线加速度	振动 冲击力 质量 应力
		磨损 不平度 振动		角加速度	角振动 角冲击 扭矩 转动惯量
	角位移	偏转角 姿态 角振动			
时间	频率	计数 统计分布	力 压力	重量 推力 应力 密度 力矩	
速度	线速度	振动 流量 动量	温度	热容量 涡流 流量角 气体速度	
	角速度	转速 角振动 角动量	光	光通量与密度 光谱分析 应变 转矩	

传感器的分类:

根据被测量分类——如加速度传感器、速度传感器、位移传感器、压力传感器、负荷传感器、扭矩传感器、温度传感器等等。这种分类方法对于用户与生产单位的商业专用产品者来说是一目了然与方便的。但是,这种分类方法的弊病造成了传感器名目品种繁多,又把原理互不相同的同一用途的传感器归为一类,这就很难找出各种传感器在转换原理上的共性与差异,难于使人们建立起对传感器的基本概念,不利于掌握传感器的原理与性能的分析方法。

依据传感器的工作原理分类——这种分类方法是以传感器的工作原理为依据的,如电阻应变式、压电式、电容式、涡流式、动圈式、电磁式、差动变压器式等等。这种分类法的优点是避免传感器的名目繁多,使传感器的划分类别较少,并有利于传感器专业工作者对传感器的工作原理与设计作归纳性的分析研究,使设计与应用更具有理性与灵活性,但其缺点是会使对传感器不够了解的用户感到不便。

按照能量的传递方式分类——从能量观点来看,所有的传感器可分为有源传感器与无源传感器两大类。前者可把传感器视为一台微型发电机,能将非电功率转换为电功率,它所配用的测量电路通常是信号放大器。所以,有源传感器是一种能量变换器,如压电式、热电式(热电偶)、电磁式、电动式等等。在有源传感器中,有些传感器的能量转换是可逆的,另一些是不可逆的,并且有些有源传感器通常附有力学系统,只能用在接触式的测量中才便于能量的传递,如压电式加速度传感器。这类传感器不具有直流响应,只能运行在动态测量中,如温度传感

器,它是利用两种不同金属的温差所产生的电势进行测温的;无源传感器不进行能量的转换,被测的非电量仅对传感器中的能量起着控制或调节的作用。所以,它必须具有辅助能源(电源),例如电阻、电容、电感式的传感器等等。遥感技术中的微波、激光等传感方法也可以归结为此类。无源传感器本身并不是一个信号源,所以,它所配用的测量放大器和有源传感器不一样,通常是电桥电路或谐振电路,并且无源传感器具有直流响应,一般不配以质量块弹簧以及阻尼的力学系统,因而适应于静动态测量,其采用的静态标定设备与技术显得简易与方便,有时还可以用在非接触的测量场合。表1-2列出了这种分类法。显然将传感器的工作原理、内在联系作统一的概括分析,并能得到一些统一的计算公式,将有助于对传感器进行深入的研究。

表1-2 传感器按能量传递方式的分类

能量变换原理(有源传感器)		能量控制或调节原理(无源传感器)	
压电式	磁致伸缩式	电阻式	磁敏电阻式
电动式	电致伸缩式	电容式	湿敏电阻式
电磁式	静电式	电感式	光游离式
热电偶	电化学式	热敏电阻式	放射性吸收式
光电式		光敏电阻式	

根据输出信号的性质分类——有模拟传感器与数字式传感器两大类。模拟传感器要通过A/D变换器才能配合应用电子计算机进行信号分析加工与处理;数字式传感器则直接可输送信号到电子计算机进行工作,可以将被测非电量直接转换成脉冲、频率或二进制数码输出,这些信号可以远距离传输,并显现出较强的抗干扰能力,脉冲可以由可变的磁阻器件或光栅的摩尔干涉条纹等方法产生,其频率输出可以由振荡槽路、振动线或石英晶体来产生,利用多普勒效应可将速度的测量转换为频率的测量,而数码盘能将被测位移转换成二进制码输出。

1.3 传感器的特性

传感器的输入量有两大类,即静态量与动态量。前者是指固定状态的量,后者通常包括有周期性信号、随机性信号与瞬变信号3种类型。

一般说来,传感器的性能指标按其输入量与输出量的关系为定常的线性系统,可划分为静态特性与动态特性两个部分。

1.3.1 传感器的主要静态特性

额定容量——也称为量程。它是指传感器预期要测量的被测量值的设计上限值,其量值视传感器要测量的被测量而有所不同。

过载率——分为允许过载率和极限过载率两种:

① 允许过载率——指传感器允许承受被测量的最大输入量。此时,传感器虽不能全部满足规定的性能指标,但在其卸载后,传感器仍能正常工作。

② 极限过载率——指传感器承受使传感器结构呈现处在超载时破坏的最大输入量。

非线性——指传感器输入参数与输出参数之间的特性图上呈现的线性误差，一般指零点状态和额定值输出点间相连接的理论直线或回归直线与校准点的偏差值对满量程输出值的百分比。

设传感器的输出量为 y ，输入量为 x ，其关系可表示如下：

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

式中： $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 为系数。人们期望的理想情况是： $y = a_0x$ ，则呈现如图 1-3(a) 所示的理想直线；如果式(1-1)只含有奇数项，即 $y = a_0x + a_2x^3 + a_4x^5 + \cdots$ ，则呈现出如图 1-3(b) 所示的对称于原点且有足够宽的近乎于线性刻度范围；如果式(1-3)中只含有偶数项，即 $y = a_0x + a_1x^2 + a_3x^4 + \cdots$ ，则呈现出人们所不希望的如图 1-3(c) 所示的严重非线性；如果式(1-3)中包含有奇偶次项的话，则呈现出人们不希望的如图 1-3(d) 所示的严重非线性。当然，造成传感器非线性的原因除材料的滞后、蠕变、后效等因素外，还有电气敏感元件与测量电路的非线性的影响。

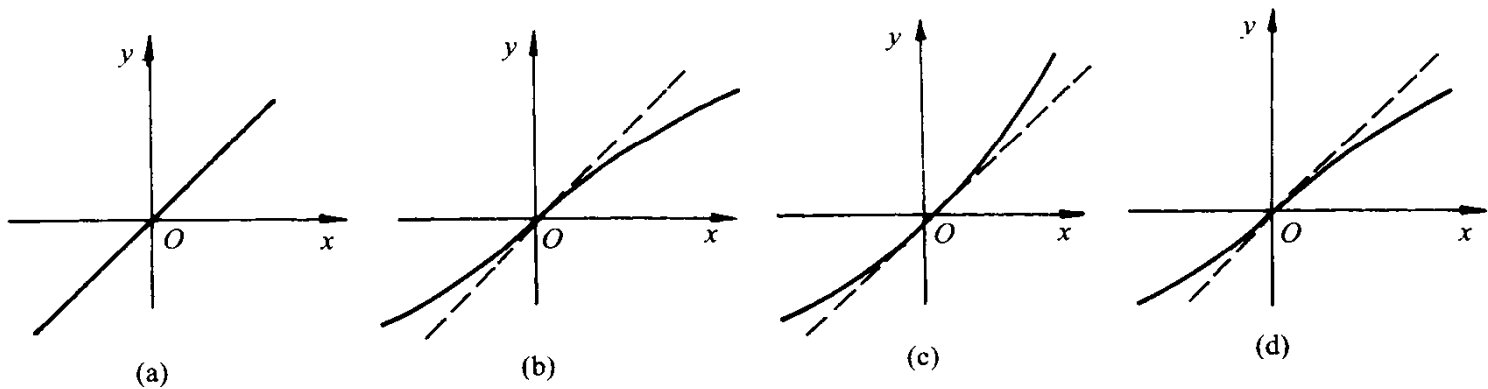


图 1-3 传感器的非线性特性

(a) $y = a_0x$; (b) $y = a_0x + a_2x^3 + a_4x^5 + \cdots$; (c) $y = a_0x + a_1x^2 + a_3x^4 + \cdots$; (d) $y = a_0x + a_1x^2 + a_2x^3 + a_3x^4 + \cdots$

蠕变——指在标准的试验环境下，传感器加载到额定值后，输出参数随着时间的变化值与额定输出值之间的百分比。

滞后——指在标准的试验环境下，传感器在加载与卸载时的输入与输出特性曲线上的最大差值和额定输出值之间的百分比。

重复性——指在同一试验环境条件下，传感器多次重复加载到额定值时，各次试验同一校准值之间的最大偏差和平均输出值的百分比。

灵敏度——指传感器的输出参数增量与被测输入参数增量之比，通常以传感器的工作直线的斜率 $b = dy/dx$ 加以表示，若传感器是有源传感器，则应该说明在多少电源电压(或电流)值下所具有的灵敏度。

分辨率——指在输入量达到满量程附近时传感器所能探测到的最小输入增量，并用这个增量与满量程值的百分比给出。这里要说明的是，分辨率与工作环境条件优劣和激励电源质量以及二次仪表的分辨率密切相关。

阈值——指传感器最小量程(通常是零输入)附近的分辨率。有的传感器在零输入附近有严重的非线性，形成所谓的“死区”，则把“死区”的大小叫阈值。在更多的情况下，阈值主要取决于传感器的噪声大小。因而，有的传感器给出噪声电平的量值。

额定输出电压——指在确定的供桥电源下传感器达到额定值时电桥的输出电压值。

稳定性——指在确定的环境条件下，传感器工作在一定的规定时间中，其输出与起始标定

时的输出差异程度,表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。

零漂——表示传感器在零输入状态下输出值的漂移。可以划分为时间漂移与温度漂移:

① 时间漂移——指在确定的环境条件下零输入状态时的时间漂移和满量程输入状态时的灵敏度的时间漂移量两个部分。

② 温度漂移——指传感器的零点温度特性和输出灵敏度温度特性:

Ⓐ 零点温度特性——传感器处于零位状态下,环境温度每变化 1°C 时的输出值与额定输出值的百分比。

Ⓑ 输出灵敏度温度特性——传感器在额定输出条件下,环境温度每变化 1°C 时输出参数的变化与额定输出值的百分比。

工作温度范围——指传感器保持正常工作的温度范围。

1.3.2 传感器的主要动态特性

在动态测量中,传感器的输出量是否能够及时、准确地反映被测动态变化的输入量是一个很重要的问题,否则,它将会导致明显的动态误差,其量值可达到百分之几十到百分之几百。因而,这就要求人们必须认真地分析传感器的动态响应特性。然而在研究传感器的动态响应特性时,由于数学上的困难,一般都忽略传感器的非线性和随机变化等复杂因素的影响,把传感器看成为线性的定常系统加以考虑,并把其作为集总参数系统。用常系数线性常微分方程来描述传感器的输入量与输出量动态变化关系,即

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

式中: $x=x(t)$ 为传感器的输入信号;

$y=y(t)$ 为传感器的输出信号;

a_i, b_i 为反映传感器物理属性的系数。

当然,式(1-2)的阶数越高,传感器的动态特性越复杂。一般地说,在零阶环节的理想状态下, $a_0 y = b_0 x$, 说明不论 $x=x(t)$ 如何变化,传感器的输出量 y 总是与输入量成简单的正比例关系。处于实际工作中的传感器只有在一定的条件与一定的范围内才能接近于满足上述理想状态下的关系,近似地被看作为零阶环节。通常所遇到的传感器是处于一阶或二阶环节状态,即

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x, \quad (1-3)$$

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x. \quad (1-4)$$

现举例如下:

例 1 图 1-4 所示的测温传感器,其端部为敏感部分,被测温度为 T_1 ,敏感部分的温度为 T_2 ,敏感部分的温度增量 dT_2 应与它吸收(或释放)的热量 dQ 成正比,而与其他热容量 mC 成反比(其中 m 为质量, C 为比热容),即 $dT = dQ/mC$,其吸收的热量 dQ 与物体的表面积 S 、热传导系数 h 以及温差 $(T_1 - T_2)$ 和时间增量 dt 等成正比,即 $dQ = hS(T_1 - T_2)dt$ 。联立 dT 与 dQ 两式后,可得到

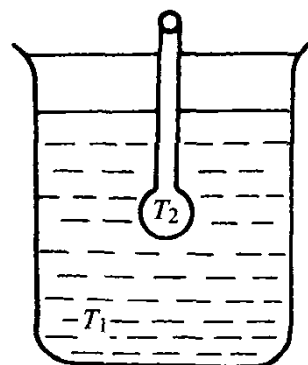


图 1-4 温度传感器简化模型

$$\frac{mC}{hS} \cdot \frac{dT_2}{dt} + T_2 = T_1, \quad (1-5)$$

式(1-5)就是描述测温传感器输入量(T_1)和输出量(T_2)动态变化关系的一阶常系数微分方程。显然,这里的 $a_1 = \frac{mC}{hS}$, $a_0 = 1$, $b_0 = 1$ 。

例 2 图 1-5 所示的加速度传感器,其外表与被测物结构连接,利用质量块 m 相对于外壳的位移 x_0 ,外壳相对于地球的加速度 $a_i = \frac{d^2 x_i}{dt^2}$;质量块 m 为分析对象,它受到弹簧力 $-kx_0$ 和阻尼力 $-c \frac{dx_0}{dt}$ 的作用,由牛顿第二定律知道:

$$m \frac{d^2(x_0 + x_i)}{dt^2} = -c \frac{dx_0}{dt} - kx_0, \quad (1-6)$$

上式经整理运算后得到

$$m \frac{d^2 x_0}{dt^2} + c \frac{dx_0}{dt} + kx_0 = -ma_i. \quad (1-7)$$

显然,这是一个二阶常微分方程,其 $a_2 = m$, $a_1 = c$, $a_0 = k$, $b_0 = -m$ 。

式中: a_i 为传感器输入信号; \ddot{x}_0 为传感器的输出信号。

当然,有了反映传感器动态特性的微分方程以后,如果知道输入信号 $x = x(t)$,便可把其代入微分方程而求得 $y = y(t)$,然后,比较 $x(t)$ 和 $y(t)$,就可以知道其动态误差量值。然而,困难在于 $x(t)$ 正是传感器要测量的千变万化的未知量,不可能一一代入微分方程进行求解。所以,人们常用的解决方法是选定几种最典型、最简单的输入函数代入上述几种典型的环节,找出动态误差的规律,据此确定一些评定传感器动态性能的指标。人们在分析与检验传感器动态特性时使用最多的输入信号有指数函数、冲激函数(δ 函数)、阶跃函数和正弦函数等,后面的两个函数不仅便于求解,而且在物理上也较容易实现。因此,它是在检定传感器时的最常用的信号,其相应输出值的一些特征值和曲线,也就是人们常说的阶跃响应特性和频率响应特性。而前面的指数函数与 δ 函数,虽然在微分方程的分析中有着重要的特殊作用,但限于物理实现的困难而没能在传感器的特性检验中应用。

传感器动态响应的基本特点——传感器的动态响应可以由线性非齐次常微分方程加以描述,即

$$(a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) y(t) = b_0 x(t), \quad (1-8)$$

式中:微分算子 D ,即 $D = d/dt$;

$x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为传感器输入信号和输出信号。

由常微分方程基本理论知道, $y(t)$ 的通解由它的线性齐次常微分方程的通解 y_1 (可称为余函数)和它的线性非齐次常微分方程的特解 y_2 (可称为特积分)相加得到,即 $y = y_1 + y_2$ 。这里,余函数 y_1 为无输入信号时的零输入响应,它只和系统本身的特性及其初始条件有关,因此, y_1 又称为解的固有项,只反映传感器系统的固有响应;在系统稳定和无外界能量补充的条件下,系统的运动将会很快衰减,只留下特积分 y_2 ,它是最终能满足式(1-8)左右两边的等式关系,它不仅与传感器系统本身特性有关,还与输入函数 $x(t)$ 密切相关。换言之,它反映了

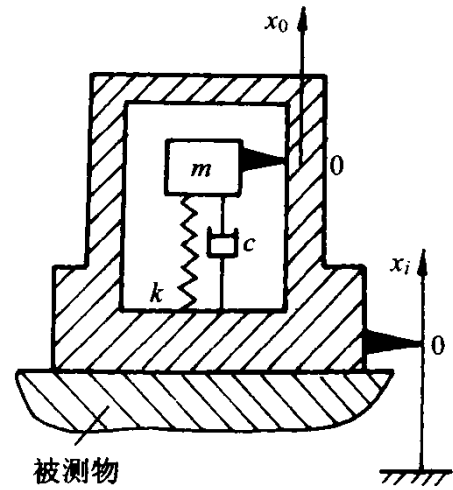


图 1-5 加速度传感器示意图

$x(t)$ 作用于传感器所引起的响应——强迫响应,这在数学上称为强制项。为了便于分析,人们在求 y_2 时,往往假设系统处于静止状态(即零初始状态),这样求得的特解称为零(初始)状态响应。显然,考虑到零输入响应时固有项很快衰减的特点,这里的零状态响应是由被测信号引起的输出信号,它应当尽可能与被测信号成简单的正比例关系。所以,人们研究传感器的动态响应就是要分析它在哪些条件下,能使零状态响应与被测信号近似成比例关系以及分析其近似的程度。

传递函数——它是描述线性定常系统的输入-输出关系的一种函数。因此,它也能表示系统的动态特性,而且,它是以代数式的形式反映了系统本身的传输、转换特性,其与系统的初始状态与激励情况无关。因而,同一个传递函数可能表征着几个完全不同的物理系统,这只能说明它们具有相似的传递特性。

传递函数在数学上的定义是:初始条件为零时,系统的输出量(响应函数)与输入量(激励函数)两者的拉普拉斯 Laplace 变换之比,即线性系统激励 $x(t)$ 与响应 $y(t)$ 之间关系为

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + a_{n-2} y^{n-2} + \cdots + a_0 y = b_m x^m + b_{m-1} x^{m-1} + \cdots + b_0 x, \quad (1-9)$$

上式经过 Laplac 变换以后,得到

$$(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + a_1 S + a_0)Y(S) = (b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0)X(S), \quad (1-10)$$

式中: S 为 Laplac 变换的自变量(复数), $S = \sigma + j\omega$; σ 称为收敛因子; ω 是角频率; $j = \sqrt{-1}$ 。传递函数 $H(S)$ 定义为

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{(b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \cdots + b_1 S + b_0)}{(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \cdots + a_1 S + a_0)}. \quad (1-11)$$

对于传感器来说,一般 $m \leq n$,分母中 S 的幂次代表了系统微分方程的阶数,如 n 为 1 或 2 就分别称为一阶系统或二阶系统的传递函数。

式中: $Y(S) = L[y(t)] = \int_0^{+\infty} y(t)e^{-st} dt$ 为输出量 $y(t)$ 的 Laplac 变换;

$X(S) = L[x(t)] = \int_0^{+\infty} x(t)e^{-st} dt$ 为输入量 $x(t)$ 的 Laplac 变换。

在实际应用中,由于不知道系统的输出,无法分别计算输入输出的拉氏变换,再来计算传递函数,因而,一般常用的途径是先把实际物理系统抽象为数学模型,即建立系统的运动微分方程式,再通过输入输出的拉氏变换的比值来计算与确定传递函数。前面说过是以代数形式表征了系统的动态特性,在已知系统的传递函数后,便可以写出系统的频率响应函数、幅频与相频特性式,以便分析输入输出间的差异以及给出动态误差的途径。这里应该指出传递函数的如下两个特点:

① $H(S)$ 不因输入信号 $x(t)$ 的不同而变化,它只反映系统自身的固有特性。

② $H(S)$ 虽和 $x(t)$ 无关,但其描述的系统对任一具体的 $x(t)$ 却都能唯一确定相应的 $y(t)$ 。 $H(S)$ 通过系数 $a_n, a_{n-1} \cdots a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1} \cdots b_1, b_0$ 真实地反映系统的传输与转换特性。当然,不同的物理系统有着不同的系数纲。

若是有多多个通过串联或并联形式组合起来的话,在它们之间的阻抗匹配条件下,即相互不影响

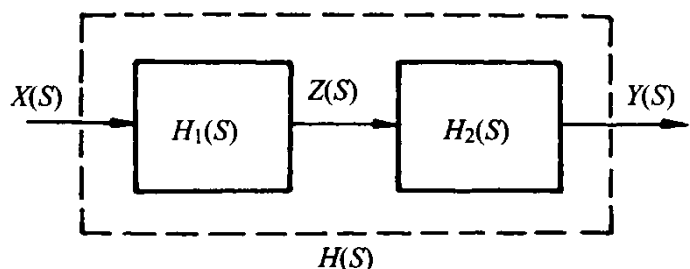


图 1-6 两个系统的串联

独立工作时,总的系统的传递函数 $H(S)$ 可进行如下的分析计算:

① 两个系统的串联:

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \left[\frac{Z(S)}{X(S)} \right] \cdot \left[\frac{Y(S)}{Z(S)} \right] = H_1(S) \cdot H_2(S) \quad (1-12)$$

对于 n 个系统

$$H(S) = \prod_{i=0}^n H_i(S); \quad (1-13)$$

② 两个系统的并联:

$$\begin{aligned} H(S) &= \frac{Y(S)}{X(S)} = \left[\frac{Y_1(S)}{X(S)} \right] + \left[\frac{Y_2(S)}{X(S)} \right] \\ &= H_1(S) + H_2(S), \end{aligned} \quad (1-14)$$

对于 n 个系统

$$H(S) = \sum_{i=0}^n H_i(S). \quad (1-15)$$

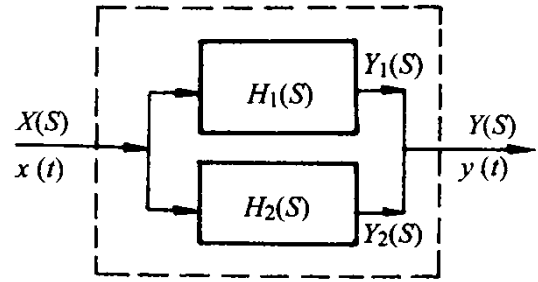


图 1-7 两个系统的并联

前已阐述,传感器一般可以简化为集总参数的线性与特性参数不随时间变化的定常系统,其传递函数的一般形式为

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{(b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots + b_1 S + b_0)}{(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0)}, \quad (1-16)$$

对于大多数传感器而言,可以认为 $b_m = b_{m-1} = \dots = b_1 = 0$, 故而 $H(S)$ 可以改写为

$$H(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{b_0}{(a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots + a_1 S + a_0)}, \quad (1-17)$$

式中的分母为变量 S 的实系数多项式,并可分解为一次与二次的实系数因子:

$$H(S) = A \prod_{i=1}^r \left[\frac{1}{(S + p_i)} \right] \prod_{j=1}^{(n-r)/2} \left[\frac{1}{(S^2 + 2\zeta_j \omega_{nj} S + \omega_{nj}^2)} \right], \quad (1-18)$$

式中的每一个因子可以看作为一个子系统的传递函数, A 为零阶系统传递函数; $\frac{1}{(S + p_i)}$ 为一

阶系统传递函数,而 $\frac{1}{(S^2 + 2\zeta_j \omega_{nj} S + \omega_{nj}^2)}$ 为二阶系统传递函数。所以,一个复杂的高阶系统可以

分解为若干个零阶、一阶与二阶的子系统串联组合而成。同样, $H(S)$ 等式的右边部分通过分式展开,可以得到下面的等价形式:

$$H(S) = \sum \left[\frac{q_i}{(S + p_i)} \right] + \sum \left[\frac{(\alpha_j + \beta_j)}{(S^2 + 2\zeta_j \omega_{nj} S + \omega_{nj}^2)} \right]. \quad (1-19)$$

这个关系式表明一个复杂的高阶系统也可以视为由若干个一阶与二阶的子系统并联组合而成。若 Laplac 变量 $S = \sigma + j\omega = 0 + j\omega = j\omega$, 则 $H(S)$ 为 $H(j\omega)$, 称其为复频率特性或 Fourier 传递函数。鉴于一阶与二阶系统为基本子系统,我们便可进行较为详细的分析。

(1) 一阶系统的动态响应——一阶系统的输入输出信号间的关系可用下面的一阶常系数微分方程加以描述:

$$(a_1 D + a_0) y = b_0 x, \quad (1-20)$$

在采用时间常数 $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ 后,上式可改写为

$$(\tau D + 1) y = kx, \quad (1-21)$$