

CHUANGANQI YU JIANCER JISHU

传感器与检测技术

主 编 刘光定

参 编 王 鹏 张 伟

主 审 祁建中



长安大学出版社

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

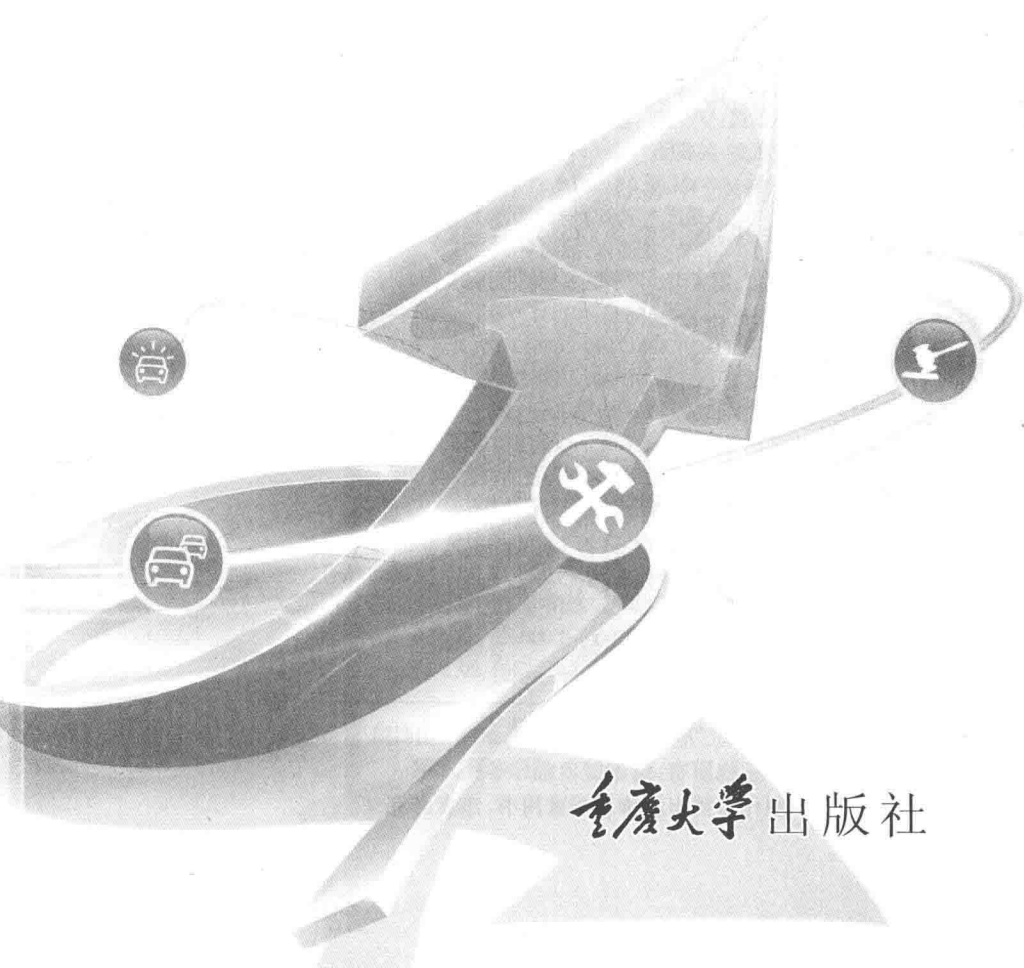
传感器与检测技术

CHUANGANQI YU
JIANCE JISHU

主 编 刘光定

参 编 王 鹏 张 伟

主 审 祁建中



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书以被测物理量为研究对象,采用“任务式”的编排方式,每一任务以一个具体的工程任务导航为主线,主要介绍了常用传感器的工作原理、基本结构及相应的测量电路,并介绍了大量的应用实例。在取材上,强调理论够用,强调实用性和先进性,突出基本技能的培养,加强了实验内容。

本书主要介绍了:传感器基本知识,电阻式、变磁阻式、电容式、热电式、霍尔式、光电式、压电式等常用传感器及新型的光纤传感器,在每一任务最后还安排了传感器的实验内容。在各任务中都列举了大量的应用实例,以帮助读者理解传感器知识。

本书可作为高等职业院校机电一体化技术、数控技术、汽车检测与维修技术、生产过程自动化技术、电气自动化、应用电子技术、计算机控制及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/刘光定主编. —重庆:重庆大学出版社,2016.8

高职高专机电一体化专业系列教材

ISBN 978-7-5689-0063-8

I. ①传… II. ①刘… III. ①传感器—检测—高等职业教育—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 194181 号

传感器与检测技术

主 编 刘光定

参 编 王 鹏 张 伟

主 审 祁建中

策划编辑:周 立

责任编辑:文 鹏 姜 凤 版式设计:周 立

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:12.25 字数:306 千

2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5689-0063-8 定价:29.50 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

本书是为满足教育部对高等职业教育教学改革的要求而编写的,全书采用任务化的编写模式,书中内容体现了岗位需求,并邀请了企业人员参与编写;既是理论教材,也是一本实用性较强的实践教材。

传感器与检测技术是一门融合众多学科的技术,但对于一般的技术人员来说,重点在于传感器的应用,即如何通过检测电路将被测物理量转换成电压、电流或频率信号,供后续电路处理。传感器及其检测电路则为传感器应用中的核心技术,应用传感器则要重点解决传感器的选型和接口技术,本书正是为解决这些问题而编写的。

在本书的编写过程中,与多家企业进行了紧密合作,并紧扣教育部课程改革的要求,具有以下特点:

(1)在总内容的安排上,采用“任务式”的模式,将同一被测物理量放在同一任务中,每一任务则介绍几种不同传感器的应用。

(2)在每一任务中,以传感器应用为主线,结合传感器的原理、技术参数及选用原则,并通过具体的电路来加深对以上内容的理解。

(3)在每一任务的内容组织上,适当保留传统的理论知识,但放在整个内容的最后;而将每个传感器的应用电路放在前面,突出了传感器的应用电路。

(4)对于每一任务,从传感器的参数入手,设计出具体的应用电路,分析了电路的工作原理,并对电路的制作与调试作了阐述;通过各任务学习,可以提高学生的动手能力及分析、解决问题的能力,培养了学生的职业能力,实现了“教、学、做”一体化。

本书由郑州电力职业技术学院的刘光定任主编,刘光定编写任务1、任务3、任务4、任务6、任务7和任务8,王鹏编写任务2和任务9,张伟编写任务5和附录,全书由刘光定统稿,祁

建中教授任主审。在本书的编写过程中,还得到了上海西欧电子科技有限公司等传感器生产企业技术人员的大力支持,同时还参考了许多教材、文献及网络资料,在此深表感谢。

由于编者水平有限及企业工作经验不足,加之时间仓促,书中疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2016 年 2 月

目 录

任务1 认知传感器与检测技术装置	1
1.1 传感器的定义及组成	1
1.2 传感器的基本特性	4
1.3 传感器的敏感元件	8
1.4 传感器技术的发展趋势	14
1.5 XO-155 型传感器与检测技术实验	15
* 任务小结	18
任务自测	18
任务2 电阻式传感器	19
2.1 电位式传感器	20
2.2 电阻应变式传感器	23
2.3 压阻式传感器	33
2.4 气敏电阻传感器	36
2.5 湿敏电阻传感器	39
2.6 热电阻传感器	42
2.7 金属箔式应变片——单臂电桥性能实验	52
任务小结	54
任务自测	54
任务3 变磁阻式传感器	56
3.1 自感式传感器	56
3.2 变压器式传感器	61
3.3 电涡流式传感器	66
3.4 变磁阻式传感器的应用	70

3.5 电涡流传感器位移特性实验	73
任务小结	74
任务自测	74
任务4 电容式传感器	76
4.1 电容式传感器的工作原理	76
4.2 测量电路	84
4.3 电容式传感器的应用	88
4.4 电容式传感器的位移实验	89
任务小结	90
任务自测	91
任务5 热电偶传感器	92
5.1 热电偶基本原理	92
5.2 热电偶的材料、结构及种类	96
5.3 热电偶的冷端补偿	102
5.4 热电偶测温线路	104
5.5 K型热电偶测温性能实验	106
任务小结	107
任务自测	107
任务6 光电式传感器	109
6.1 光电效应及光电器件	109
6.2 红外传感器	117
6.3 光电式传感器的应用	119
6.4 光电开关和光电断续器	123
6.5 CCD图像传感器	125
6.6 光电转速传感器的转速测量实验	129
任务小结	130
任务自测	130
任务7 霍尔式传感器	131
7.1 霍尔元件工作原理	131
7.2 霍尔元件的基本结构和主要特性参数	133
7.3 霍尔元件的测量电路及补偿	135
7.4 霍尔集成电路	138

7.5 霍尔传感器的应用	140
7.6 直流激励时霍尔式传感器位移特性实验	142
任务小结	143
任务自测	144
 任务8 压电式传感器	146
8.1 压电效应	146
8.2 压电材料	148
8.3 压电式传感器测量电路	150
8.4 压电式传感器的应用	153
8.5 压电式传感器测振动实验	156
任务小结	157
任务自测	158
 任务9 光纤式传感器	159
9.1 光纤式传感器的原理、结构及种类	160
9.2 光的传输原理	162
9.3 光导纤维传感器的类型	163
9.4 功能型光纤传感器	165
9.5 非功能型光纤传感器	169
9.6 光纤传感器的应用	171
9.7 光纤传感器的位移特性实验	174
任务小结	175
任务自测	175
 附 录	176
附录1 常用传感器的性能及选择	176
附录2 中华人民共和国法定计量单位	177
附录3 本书涉及的部分计量单位	180
附录4 工业热电阻分度表	183
附录5 镍铬-镍硅 K 热电偶分度表	184
 参考文献	186

任务1 认知传感器与检测技术装置

任务导航

在信息社会的一切活动领域中,检测是科学地认识各种现象的基础性方法和手段。现代化的检测手段在很大程度上决定了生产、科学技术的发展水平,而科学技术的发展又为检测技术提供了新的理论基础和制造工艺,同时对检测技术提出了更高的要求。检测技术是所有科学技术的基础,是自动化技术的支柱之一。

传感器与检测技术是一门以研究检测系统中信息提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的应用技术学科,本任务是传感器与检测技术的理论基础。

学习目标

1. 知识目标

- (1)知道传感器的定义;
- (2)了解传感器的基本组成部分及其分类;
- (3)掌握传感器的基本特征参数;
- (4)掌握弹性敏感元件;
- (5)了解传感器与检测技术实验装置的组成。

2. 能力目标

- (1)能识别实验台配置的相关传感器;
- (2)会应用传感器实验系统软件;
- (3)能说出实验台各模块的作用及面板功能;
- (4)会计算传感器的非线性误差及灵敏度;
- (5)知道岗位操作规程,具有安全操作意识;
- (6)完成实验报告。

学习活动

1.1 传感器的定义及组成

现代信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术等。计算机相当于人的大脑,通信相当于人的神经,而传感器则相当于人的感觉器官。如果没有各种精确可靠的传感器去检测

原始数据并提供真实的信息,即使是性能非常优越的计算机,也无法发挥其应有的作用。

1.1.1 传感器的定义

从广义上讲,传感器就是能够感觉外界信息,并能按一定规律将这些信息转换成可用的输出信号的器件或装置。这一概念包含了以下 3 个方面的含义:

- ①传感器是一种能够完成提取外界信息任务的装置。
- ②传感器的输入量通常指非电量,如物理量、化学量、生物量等;而输出量是便于传输、转换、处理、显示等的物理量,主要是电量信号。例如,电容式传感器的输入量可以是力、压力、位移、速度等非电量信号;输出量则是电压信号。
- ③传感器的输出量与输入量之间精确地保持一定规律。

1.1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路 3 个部分组成,如图 1.1 所示。

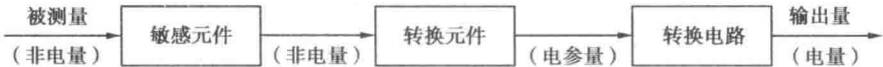


图 1.1 传感器组成框图

1) 敏感元件

敏感元件是传感器中能直接感受被测量的部分,即直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量。例如,弹性敏感元件将压力转换为位移,且压力与位移之间保持一定的函数关系。

2) 转换元件

转换元件是传感器中将敏感元件输出量转换为适于传输和测量的电信号部分。例如,应变式压力传感器中的电阻应变片将应变转换成电阻的变化。

3) 转换电路

转换电路将电量参数转换成便于测量的电压、电流、频率等电量信号。例如,交、直流电桥,放大器,振荡器,电荷放大器等。

应该注意的是,并不是所有的传感器必须同时包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量,它就同时兼为转换元件,如热电偶;如果转换元件能直接感受被测量,而输出与之成一定关系的电量,此时的传感器就没有敏感元件,如压电元件。

1.1.3 传感器的分类

传感器千差万别,种类繁多,分类方法也不尽相同,常用的分类方法有以下 4 种类型。

1) 按被测物理量分类

按被测物理量可分为温度、压力、流量、物位、位移、加速度、磁场、光通量等传感器。这种分类方法明确表明了传感器的用途,便于使用者选用,如压力传感器用于测量压力信号。

2) 按工作原理分类

按工作原理可分为电阻传感器、热敏传感器、光敏传感器、电容传感器、电感传感器、磁电传感器等,这种方法表明了传感器的工作原理,有利于传感器的设计和应用。例如,电容传感器就是将被测量转换成电容值的变化。表 1.1 列出了这种分类方法中各种类型传感器的名称及典型应用。

3) 按转换能量供给形式分类

按转换能量供给形式可分为能量变换型(发电型)和能量控制型(参量型)两种。

能量变换型传感器在进行信号转换时不需另外提供能量,就可将输入信号能量变换为另一种形式的能量输出,例如,热电偶传感器、压电式传感器等。

能量控制型传感器工作时必须有外加电源,如电阻、电感、电容、霍尔式传感器等。

4) 按工作机理分类

按工作机理可分为结构型传感器和物性型传感器两种。

结构型传感器是指被测量变化时引起了传感器结构发生改变,从而引起输出电量变化。例如,电容压力传感器就属于这种传感器,外加压力变化时,电容极板发生位移,结构改变引起电容值变化,输出电压也发生变化。

物性型传感器是利用物质的物理或化学特性随被测参数变化的原理构成,一般没有可动结构部分,易小型化,如各种半导体传感器。

习惯上常把工作原理和用途结合起来命名传感器,如电容式压力传感器、电感式位移传感器等,见表 1.1。

表 1.1 传感器分类表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参数	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器传感器	位移
		改变电阻丝或片的尺寸	电阻丝应变传感器、半导体应变传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应 (电阻温度系数)	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻温度传感器	温度、辐射热
			热敏电阻传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏电阻传感器	光强
		利用电阻的湿度效应	湿敏电阻	湿度
	电容	改变电容的几何尺寸	电容传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量

续表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参数	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感传感器	位移
		涡流去磁效应	涡流传感器	位移、厚度、硬度
		利用压磁效应	压磁传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器	位移
			自整角机	位移
			旋转变压器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用数字编码	角度编码器	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电量	电动势	温差电动势	热电偶	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电传感器	速度、加速度
		光电效应	光电池	光强
	电荷	辐射电离	电离室	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电传感器	动态力、加速度

1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间的关系。由于传感器测量的参数一般有两种形式：一种是不随时间的变化而变化（或变化极其缓慢）的静态特性；另一种是随时间的变化而变化的动态特性。传感器动态特性的研究方法与控制理论中介绍的相似，故不再赘述，下面仅介绍静态特性的一些指标。

传感器的静态特性是指传感器输入信号处于稳定状态时，其输出与输入之间呈现的关系。表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n$$

(1.1)

式中 y ——传感器输出量；
 x ——传感器输入量；

a_0 ——传感器的零位输出;

a_1 ——传感器的灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项系数。

衡量静态特性的主要指标有:精确度、稳定性、灵敏度、线性度、迟滞和可靠性等。

1) 精确度

精确度是反映测量系统中系统误差和随机误差的综合评定指标。与精确度有关的指标有精密度、准确度和精确度。

(1) 精密度

说明测量系统指示值的分散程度。精密度反映了随机误差的大小,精密度高则随机误差小。

(2) 准确度

说明测量系统的输出值偏离真值的程度。准确度是系统误差大小的标志,准确度高则系统误差小。

(3) 精确度

精确度是准确度与精密度两者的总和,常用仪表的基本误差表示。精确度高表示精密度和准确度都高。

如图 1.2 中的射击例子有助于对准确度、精密度及精确度 3 个概念的理解。图 1.2(a) 表示准确度高而精密度低;图 1.2(b) 表示精密度高而准确度低;图 1.2(c) 表示准确度和精密度都高,即它的精确度高。

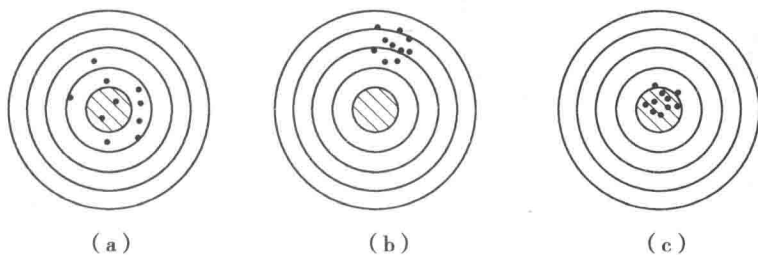


图 1.2 射击例子

2) 稳定性

传感器的稳定性常用稳定度和影响系数表示。

(1) 稳定度

稳定度是指在规定工作条件范围和规定时间内,传感器性能保持不变的能力。传感器在工作时,内部随机变动的因素有很多,例如,发生周期性变动,漂移或机械部分的摩擦等都会引起输出值的变化。

稳定度一般用重复性的数值和观测时间的长短表示。例如,某传感器输出电压值每小时变化 1.5 mV,可写成稳定度为 1.5 mV/h。

(2) 影响系数

影响系数是指由于外界环境变化引起传感器输出值变化的量。一般传感器都有给定的标

准工作条件,如环境温度 20 ℃、相对湿度 60%、大气压力 101.33 kPa、电源电压 220 V 等。而实际工作时的条件通常会偏离标准工作条件,这时传感器的输出也会发生变化。

影响系数常用输出值的变化量与影响量的变化量的比值表示,如某压力表的温度影响系数为 200 Pa/℃,即表示环境温度每变化 1 ℃,压力表的示值变化 200 Pa。

3) 灵敏度

灵敏度 S 是指传感器在稳态下输出变化量 Δy 与输入变化量 Δx 的比值,即

$$S = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1.2}$$

显然灵敏度表示静态特性曲线上相应点的斜率。对线性传感器,灵敏度为一个常数;对于非线性传感器,灵敏度则为一个变量,随着输入量的变化而变化,如图 1.3 所示。

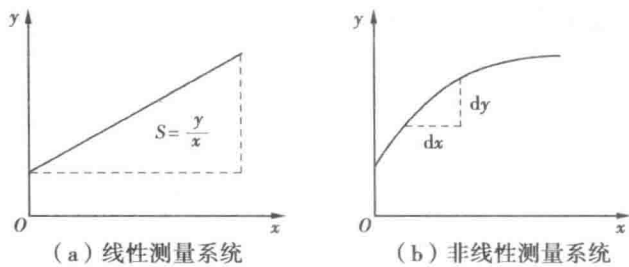


图 1.3 灵敏度的定义

灵敏度的量纲取决于传感器输入、输出信号的量纲。例如,压力传感器灵敏度的量纲可表示为 mV/Pa。对于数字式仪表,灵敏度以分辨力表示。所谓分辨力是指数字式仪表最后一位数字所代表的值。一般地,分辨力数值小于仪表的最大绝对误差。

在实际中,一般希望传感器的灵敏度高,且在满量程范围内保持恒定值,即传感器的静态特性曲线为直线。

4) 线性度

线性度 γ_L , 又称非线性误差,是指传感器实际特性曲线与其理论拟合直线之间的最大偏差 Δ_{Lmax} 与传感器满量程输出 y_{FS} 的百分比,即

$$\gamma_L = \frac{\Delta_{Lmax}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1.3}$$

理论拟合直线选取方法不同,线性度的数值也就不同。如图 1.4 所示为传感器线性度示意图,图中的拟合直线是一条将传感器的零点与对应于最大输入量的最大输出值点(满量程点)连接起来的直线,这条直线称为端基直线,由此得到的线性度称为端基线性度。

实际上,人们总是希望线性度越小越好,即传感器的静态特性接近于拟合直线,这时传感器的刻度是均匀的,读数方便且不易引起误差,容易标定。检测系统的非线性误差多采用计算机来纠正。

5) 迟滞

迟滞是指传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程中输出曲线不重合的现象,如

图 1.5 所示。

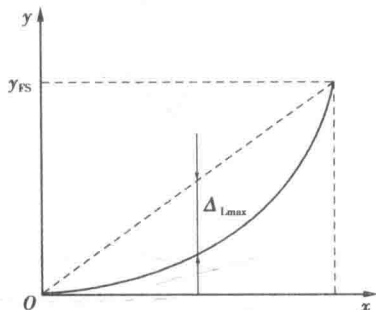


图 1.4 传感器线性度示意图

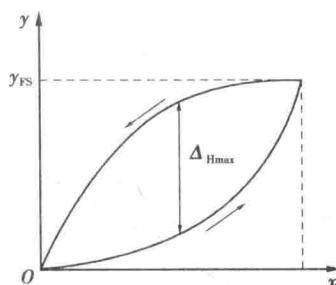


图 1.5 传感器迟滞示意图

迟滞 γ_H 用正、反行程输出值间的最大差值 Δ_{Hmax} 与满量程输出 y_{FS} 的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta_{Hmax}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4)$$

造成迟滞的原因有很多,如轴承摩擦、间隙、螺钉松动、电路元件老化、工作点漂移、积尘等。迟滞会引起分辨力变差或造成测量盲区,因此,一般希望迟滞越小越好。

6) 可靠性

可靠性是指传感器或检测系统在规定的工作条件和规定的时间内,具有正常工作性能的能力。它是一种综合性的质量指标,包括可靠度、平均无故障工作时间、平均修复时间和失效率。

(1) 可靠度

传感器在规定的使用条件和工作周期内,达到所规定性能的概率。

(2) 平均无故障工作时间 (MTBF)

MTBF 是指相邻两次故障期间传感器正常工作时间的平均值。

(3) 平均修复时间 (MTTR)

MTTR 是指排除故障所花费时间的平均值。

(4) 失效率

失效率是指在规定的条件下工作到某个时刻,检测系统在连续单位时间内发生失效的概率。对可修复性的产品,又称故障率。

失效率是时间的函数,如图 1.6 所示。一般分为 3 个阶段:早期失效期、偶然失效期及衰老失效期。

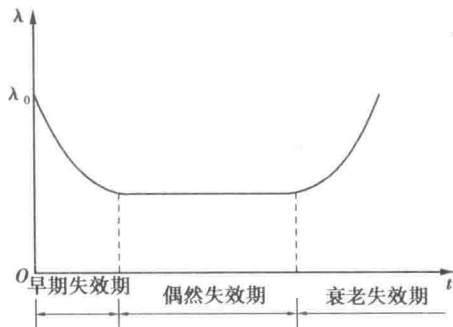


图 1.6 失效率变化曲线

1.3 传感器的敏感元件

物体在外力作用下改变原来尺寸或形状的现象称为变形。若外力去掉后物体又能完全恢复其原来的尺寸和形状,这种变形称为弹性变形。具有弹性变形特性的物体称为弹性元件。

弹性元件在传感器技术中占有极其重要的地位。它首先把力、力矩或压力转换成相应的应变或位移,然后配合各种形式的传感元件,将被测力、力矩或压力变换成电量。

根据弹性元件在传感器中的作用,可分为两种类型,即弹性敏感元件和弹性支承。前者感受力、力矩、压力等被测参数,并通过它将被测量变换为应变、位移等,也就是通过它把被测参数由一种物理状态转换为另一种所需要的相应物理状态。它直接起到测量的作用,故称为弹性敏感元件。

1.3.1 弹性敏感材料的弹性特性

作用在弹性敏感元件上的外力与由该外力所引起的相应变形(应变、位移或转角)之间的关系称为弹性元件的弹性特性。弹性特性可由刚度或灵敏度来表示。

1) 刚度

刚度是弹性敏感元件在外力作用下抵抗变形的能力,其数学表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx} \quad (1.5)$$

式中 F ——作用在弹性元件上的外力;

x ——弹性元件产生的应变。

若刚度 k 是常数,则元件的弹性特性是线性的,否则是非线性的,如图 1.7 所示。

2) 灵敏度

灵敏度是刚度的倒数,可表示为

$$K = \frac{dx}{dF} \quad (1.6)$$

从式(1.6)可知,灵敏度就是单位力产生应变的大小。与刚度相似,如果元件弹性特性是线性的,则灵敏度为常数;若弹性特性是非线性的,则灵敏度为变数。

3) 弹性滞后

弹性元件在弹性变形范围内,弹性特性的加载曲线与卸载曲线不重合的现象称为弹性滞后现象,如图 1.8 所示。

4) 弹性后效

弹性敏感元件所加载荷改变后,不是立即完成相应的变形,而是在一定时间间隔中逐渐完成变形的现象称为弹性后效现象。由于弹性后效存在,弹性敏感元件的变形不能迅速地随作用力的改变而改变,引起测量误差。

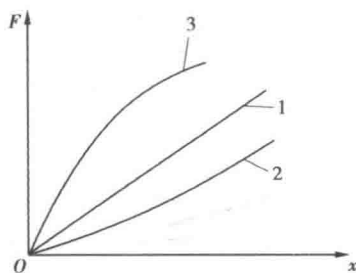


图 1.7 弹性特性

1—线性;2,3—非线性

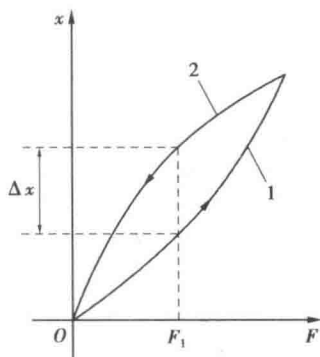


图 1.8 弹性滞后现象

1—正向行程曲线;2—反方向行程曲线

1.3.2 弹性敏感元件的材料及其基本要求

因为弹性敏感元件在传感器中直接参与转换和测量,所以对它有一定的要求。在任何情况下,它应保证有良好的弹性特性、足够的精度和稳定性,以及在长时间使用中和温度变化时都应保持稳定的特性。因此,对材料的基本要求如下:

- ①具有良好的机械特性(强度高、抗冲击、韧性好、疲劳强度高等)和良好的机械加工及热处理性能。
- ②良好的弹性特性(弹性极限高、弹性滞后和弹性后效小等)。
- ③弹性模量的温度系数小且稳定,材料的线膨胀系数小且稳定。
- ④抗氧化性和抗腐蚀性等化学性能良好。

1.3.3 弹性敏感元件的变换原理

下面介绍几种常用弹性敏感元件及其将力与压力转换为所需物理量的原理。

1) 弹性圆柱

柱式弹性元件具有结构简单的特点,可承受很大的载荷,根据截面形状可分为圆筒形与圆柱形两种,如图 1.9 所示。

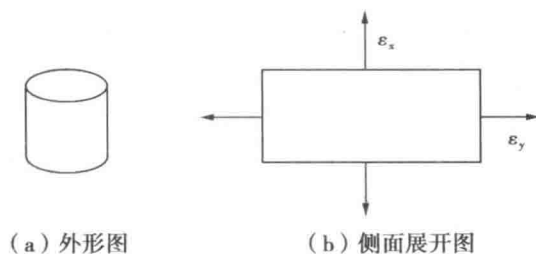


图 1.9 弹性圆柱

在力的作用下,柱式弹性元件产生应变。在受到轴向拉或压的作用力 F 时,在与轴线成 90° 的侧面上产生轴向应力和横向应力,其轴向应力的应变量为