

▶ 传感器

设计与应用实例

刘少强 张 靖 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

TP212
134
12

传感器

设计与应用实例

刘少强 张 靖 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书分两篇介绍了传感器的一般设计基础和应用实例。设计基础篇的主要内容
包括传感器与测量系统的基础理论,常用传感器的基本原理,传感器研究和设计的
一般方法,常用基本参量传感器的设计基础和传感器信号调理电路设计;应用篇介
绍传感器设计的应用实例,主要内容包括力、位移及相关量传感器,温度、压力、
流量传感器,家电传感器,汽车传感器,电力传感器,以及多功能化、集成及智能
化传感器。

本书组织与编排新颖、实用,内容系统、易懂,各章内容均具有一定的独立
性,可作为非仪器类专业硕士研究生和测控仪器以及电子信息、自动化、计算机等
专业本科生的学习和自学教材,也可作为有关科研和工程技术人员的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

传感器设计与应用实例/刘少强,张靖编. —北京:
中国电力出版社, 2008
ISBN 978-7-5083-6105-5

I. 传… II. ①刘…②张… III. 传感器
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第157557号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年1月第一版 2008年1月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 23.5印张 574千字
印数 0001—3000册 定价 36.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

传感器是获取物质世界信息的重要工具,是信息系统的源头。信息时代使传感器的应用领域越来越广,同时,也促使传感器技术有了长足的进步。传感器的设计与应用受到各行各业的广泛重视。

传感器技术的学科跨度非常大,理论性和应用性强。这给传感器的学习、研究、应用和设计带来了相当大的困难。虽然目前已有不少有关学习传感器知识的书籍,但涉及研究设计方法的较少,不能满足读者的实际需求。为了便于传感器应用设计的学习,适应有关专业研究生和本科生的学习和教学要求,作者根据实际需求和实践经验,从传感器的设计基础理论、共性问题处理方法与应用两方面入手,编写了本书。全书分设计基础和应用两篇,介绍了一般传感器的基础理论、设计思想与实现方法,汇集了具有代表性和值得读者研习或借鉴的国内外的传感器设计实例。

设计基础篇主要围绕有关传感器设计的一般基础理论和方法,分为传感器及测量基础、传感器基本原理简介、传感器研究和设计的一般方法、常用非电量传感器的设计基础、常用信号调理电路设计和集成化信号调理电路设计六章,介绍了一般传感器设计的基础理论、构成法、性能提高方法、常用敏感元件选用、典型力学量传感器结构、调理电路设计和新型信号调理集成器件及应用。

传感器实际应用情况复杂,对硬件进行标准化实际应用意义不大。在传感器设计 and 应用中,一般都存在多种技术选择,没有普遍性的固定模式。并且,传感器的应用设计与设计者的知识、经验密切相关,而知识和经验除了通过实践去获得之外,分析研究现有方案是另一条有效途径。通过对不同的传感器设计实例学习研究,可了解、掌握不同应用要求的传感器的设计思想、方法及经验、技巧。因此应用篇主要从国内外相关文献中选择、组织了具有一定代表性和借鉴参考价值的传感器的结构、电路设计以及性能研究的实例,具体为:力、位移及相关量传感器设计,温度、压力、流量传感器设计,家电传感器设计,汽车传感器设计,电力传感器设计和多功能化、集成及智能化传感器设计。实例选择的原则是传感器的构成或设计方法具有普遍意义,或者传感器具有特殊性能要求,或者其解决方案、方法有突出特点。实例选择的内容主要从设计方法及其比较和特定行业需求的角度考虑组织编排,其内容虽不能完全体现上篇所介绍的设计方法,但从中能体会传感器研究设计的基础理论中的不同方法和技术在实际中的灵活和有效应用。另外有关传感器的集成器件越来越多,从实例中还可看到传感器技术步骤的模块化为设计应用带来的益处和便利。

本书各章内容具有一定的独立性,可根据需要进行选读。本书适用于有传感器应用或研发需要,而未系统学习过传感器技术课程的学生和相关科研和工程技术人员,以及仅学习过传感器原理而需进一步了解或需要从事传感器设计、开发的测控仪器专业学生使用。本书可作为测控仪器、电子信息、自动化、计算机等专业高年级本科生的学习和自学教材(36~48学时)。

本书由中南大学刘少强和东南大学张靖编写,东南大学黄惟一教授审阅了书稿,并对本

书的编写提出了宝贵意见和建议，在此深表感谢。在本书编写过程中，参考、引用了多位专家、学者的论文或著作，在此一并表示衷心感谢。

由于传感器领域的知识深广、相关技术发展迅速，传感器设计往往还涉及具体的工艺经验等方面，而编者的学识、水平有限，书中不妥和错误之处难免，敬请专家、读者批评指正。

编者

2007年11月

目 录

前言

第1篇 设计基础篇

第1章 传感器及测量基础	2
1.1 传感器概述	2
1.2 传感器的静态特性	5
1.3 传感器的动态特性	16
1.4 现代传感器的技术特点及发展趋势	24
1.5 传感器测量基础	27
第2章 传感器基本原理简介	38
2.1 阻抗变换式传感器	38
2.2 电量式传感器	52
2.3 光电变换式传感器	71
2.4 其他类型传感技术简介	84
第3章 传感器研究和设计的一般方法	91
3.1 传感器研发概述	91
3.2 传感器构成法	95
3.3 改善传感器性能途径与方法	102
3.4 传感器建模与优化设计	113
3.5 传感器设计基础	119
第4章 常用非电量传感器的设计基础	128
4.1 常用敏感元件的选用原则和方法	128
4.2 传感器中常见结构型敏感元件及原理结构	134
4.3 力学量传感器的常见结构和设计	139
第5章 常用信号调理电路设计	161
5.1 信号调理电路的设计原则	161
5.2 测量电桥电路	165
5.3 信号放大电路	169
5.4 信号滤波电路	176
5.5 信号变换电路	184
5.6 抗干扰设计	190
第6章 集成化信号调理电路设计	195
6.1 专用型集成信号调理器件	195
6.2 多功能型集成信号调理器件	199

6.3 集成信号处理系统	209
--------------------	-----

第2篇 应用篇

第7章 力、位移及相关量传感器	228
7.1 电容式膨胀尺寸传感器设计	228
7.2 应变式机器人腕力传感器设计	230
7.3 采用 PSD 的光电式柔性腕力传感器设计	238
7.4 采用半导体磁阻元件的非接触旋转传感器设计	242
7.5 采用随动测量方法的霍耳式位移传感器设计	246
第8章 温度、压力、流量传感器	250
8.1 热电偶温度传感器电路设计	250
8.2 采用微悬臂梁的温度传感器设计	252
8.3 采用声表面波谐振器的无线温度传感器设计	256
8.4 光纤式压力温度复合传感器设计	258
8.5 流体压力、差压复合式传感器设计	261
8.6 耐氢脆、耐腐蚀、中温、高压传感器设计	263
8.7 双膜盒式光纤压力传感器设计	266
8.8 检测高温的电涡流传感器设计	270
8.9 工程机械液压系统监测传感器的设计	274
第9章 家电传感器	278
9.1 红外线耳式体温传感器设计	278
9.2 洗衣机的位移传感器设计	283
9.3 恒定光源浑浊度传感器设计	287
9.4 变光源型浑浊度传感器设计	289
9.5 人体探测/防盗报警传感器设计	291
第10章 汽车传感器	295
10.1 汽车传感器概述	295
10.2 热线式空气流量传感器设计	297
10.3 汽车踏板力传感器设计	299
10.4 磁电式汽车轮速传感器设计	302
10.5 光学式燃油性质传感器设计	305
10.6 电容式燃油性质传感器设计	308
第11章 电力传感器	312
11.1 电能计量中的大电流检测传感器原理和设计	312
11.2 霍耳效应式电流传感器设计	317
11.3 三相无功电流传感器设计	321
11.4 光学组合互感器设计	326
11.5 光电混合式电流传感器设计	331
11.6 高压电气设备泄露电流传感器设计	336

第 12 章 多功能、集成及智能化传感器	342
12.1 采用专用集成芯片的液位传感器设计.....	342
12.2 采用铂电阻和 AD 693 的温度传感器设计	346
12.3 微型风速风向传感器设计.....	349
12.4 智能单向加速度/速度/位移传感器设计.....	351
12.5 基于集成调理器的电容式含水率传感器设计.....	354
12.6 同时测量位移和角度的电容式传感器设计.....	356
12.7 基于单一元件的多功能触觉传感器设计.....	360
参考文献.....	365

设计基础篇

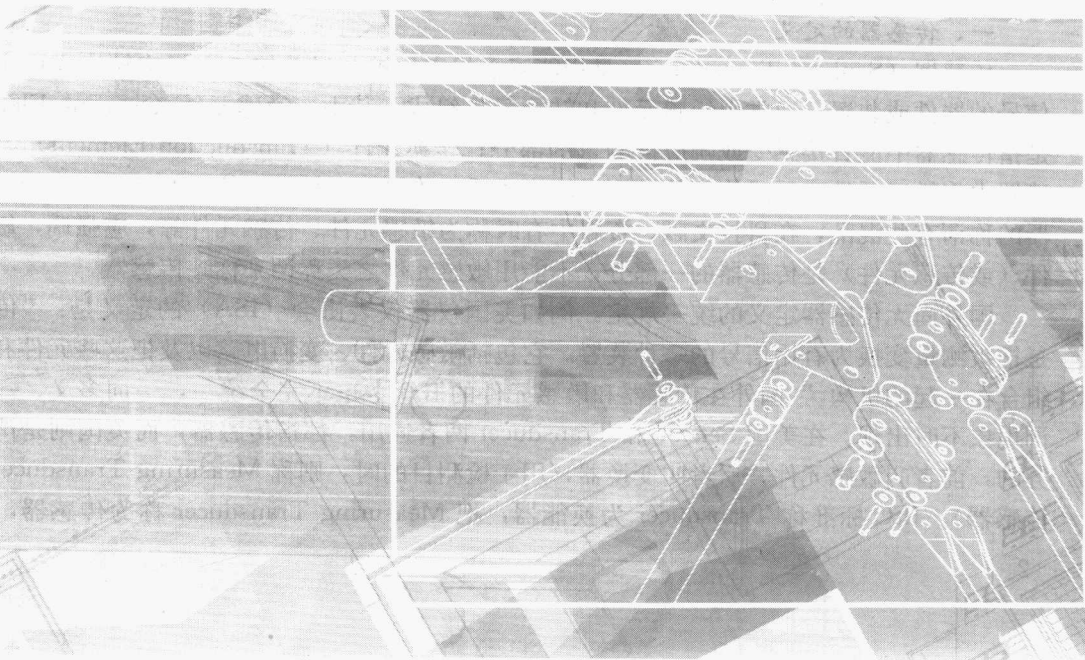
传感器的变换原理和种类繁多,应用也千差万别,因此具体应用中传感器的解决方案一般都有多种选择。不断出现的新型传感元件和信号调理器为传感器的设计和应用带来了更多的变化,而已有的典型方案或传感器产品(成品)不可能适应众多不同或变化的应用需求,需要根据具体任务要求,不断改进或提出新的解决方案或设计新的传感器。因此要求传感器应用者进行自己的设计或改进(可能是改造设计,或者是全新设计)。

从传感器的新品开发到面向具体应用的产品改进,除需要了解或掌握传感器原理以外,还必须学习一般设计方法和过程。传感器主要包括敏感或转换元件、结构、电路以及电源等,其设计过程大致为:

- (1) 选择合适的变换原理及相应敏感材料或敏感器件以及转换元件。
- (2) 设计合适的敏感功能结构,研究调理电路。
- (3) 结合前面两部分研究,制备传感器(含电路)。
- (4) 传感器特性测试及分析。
- (5) 重复上述(1)、(2)、(3)、(4),直到最满意传感器产生。

传感器设计中的首要关键是针对任务的原理性设计或解决方案(包含结构设计)。而其他如工艺、安装等方面则更多以经验为主,需要从具体的实践中不断认识、总结和提高。

本篇主要围绕有关传感器设计的一般基础理论和方法,结合实例,介绍传感器设计的基础理论、构成法、性能提高方法、基本敏感元件选用、应用最广的典型力学量传感器结构、调理电路设计和信号调理集成器件。



第 1 章

传感器及测量基础

1.1 传感器概述

1.1.1 传感器的作用

现代信息科学技术的三大支柱是传感技术、通信技术和计算机技术,传感器是系统获取信息的首要部件。系统自动化技术水平越高,对传感器技术的依赖程度越大。“没有传感器技术就没有现代科学技术”的观点已为全世界公认。因此世界各国都将传感器技术列为尖端技术。

目前传感器已广泛地应用于工农业生产、交通运输、科学研究、军事、航空航天、生物、医疗、环保、家居等方面。可以说从茫茫太空到浩瀚海洋,从各种复杂的工程系统到人们日常生活的衣食住行,每一个现代化的内容都离不开各种各样的传感器。

传感器的作用如下:

(1) 信息的收集。科研中的计量测试、产品制造与销售中的计量等都要由测量获得准确的定量数据。例如检测目标物的存在状态,需要传感器把状态信息转换为数据;由传感器监测系统或装置的运行状态,来发现异常并发出告警信号和启动保护电路,以保证系统或装置的正常运行与安全管理。产品的合格判断,或人体各部位的异常诊断等都需由传感器的测量来完成。

(2) 信息数据的交换。把以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据,或者读出记录在各种媒介体上的信息并进行转换。如磁盘、光盘信息的读出探头就是一种传感器。

(3) 控制信息的采集。检测控制系统的状态信息,并由此控制系统的状态,或跟踪系统变化的目标值。

1.1.2 传感器的定义与组成

一、传感器的定义

传感器(Sensor/ Transducer)是指能感受规定的被测量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件(Sensing Element)是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件(Transduction Element)是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输和测量的电信号的部分。目前对传感器的称谓有些混乱,在科技文献、资料中有时称为敏感元件、传感元件等,应强调,敏感元件(或传感元件)是传感器的一部分,不能用敏感元件之类称谓来称呼传感器。

国外尚无传感器定义的统一规定。例如美国仪器仪表协会(ISA)的定义是:“传感器是把被测量变换为有用信号的一种装置。它包括敏感元件、变换电路以及把这些元件和电路组合在一起的机构。”国外在传感器和敏感元件的概念上也不完全统一,一词多义、一义多词现象不时出现。在美国 Sensor 和 Transducer 两者通用,都指传感器,而英国则是严格区分的,前者叫敏感元件,后者叫变换器,用于检测目的时,则称 Measuring Transducer(即传感器)。IEC 标准称 Transducer 为换能器,把 Measuring Transducer 称为传感器,而把

Sensor 看成 Measuring 的组成部分, 即一次元件 (Primary Element)。

虽然国内外对传感器的定义有不同, 但都从不同侧面反映了传感器的实质。更广义地讲, 凡是利用一定的物性 (物理、化学、生物) 法则、定理、定律、效应等进行信息变换与能量转换, 并且输出与输入严格一一对应的器件或装置均可称为传感器。

二、传感器的组成

由传感器的作用和定义可知, 传感器的基本性能是信号检测和信号变换, 传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路组成 (有时还包括电源), 如图 1-1 所示。从结构和功能角度看, 传感器是包含敏感元件及其辅助电路在内的功能器件。敏感元件是传感器中感受被测量的元件 (Element)。转换元件是能将感受到的被测非电量转换为电量的器件, 如应变计、热电偶等。基本转换电路 (也称信号调理电路) 将传感器输出的微弱电信号转换成便于后续处理的有用信号。当传感器的输出为标准信号时则称作变送器 (Transmitter)。

应该指出, 并不是所有传感器都包括敏感元件与转换元件。有的传感器不需要起预变换作用的敏感元件, 如热敏电阻温度传感器等; 而另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, 如半导体固态压力传感器。目前大多数情况下, 传感器的输出采取电量形式, 但把被测物理量直接变换为电量有时不可行或不容易, 或者受客观条件限制, 因此需要将被测物理量先转换为某种中间变量, 然后再转换为电量。即有的传感器只需进行一级变换, 而有的需要进行二级变换, 甚至更多级变换。

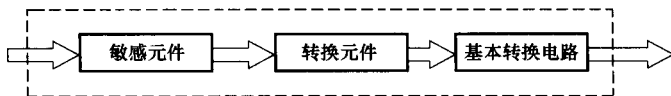


图 1-1 传感器的基本组成

1.1.3 传感器的分类、命名及性能要求

一、传感器的分类

传感器种类繁多, 不同的传感器可测量同一被测量, 同一原理的传感器又可测量多种被测量。因此对传感器的分类方法有多种, 目前国际上尚无统一的传感器分类方法。在实际中常常是按不同方法对传感器分类, 分类有助于人们从总体上认识和掌握传感器的原理、性能、应用特点。表 1-1 列出了目前一些流行的分类方法。本书主要是针对物理型传感器的论述。

二、传感器的命名

传感器的全称由“主题词+四级修饰语”组成, 即

主题词——传感器。

一级修饰语——被测量, 包括被测量的定语。

二级修饰语——转换原理, 一般可后续以“式”字。

三级修饰语——特征描述, 指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件以及其他必要的性能特征, 一般可后续以“型”字。

四级修饰语——主要技术指标 (如量程、准确度、灵敏度范围等)。

使用场合不同, 修饰语的排序也不同, 实际运用中可依据情况省略任何一级修饰语。统计报表、图书检索等场合传感器名称应采用正序排列: 传感器←一级修饰语←二级修饰



语←—三级修饰语←—四级修饰语。例如：“传感器、位移、应变计式、100mm”。

在技术文件、产品说明书、教材、书刊等的陈述句中，传感器的名称应采用反序：四级修饰语→三级修饰语→二级修饰语→一级修饰语→传感器。例如：“100mm 应变计式位移传感器”。

传感器产品代号表述格式为：a—b—c—d，其中：

a 为主称（传感器）；b 为被测量；c 为转换原理；d 为序号。在被测量、转换原理、序号三部分代号之间需有连字符“-”连接。

表 1-1 传感器的分类

分类方法		说明	举 例
按基本效应分	物理型 化学型 生物型	分别以转换中的物理效应、化学效应等命名	
按作用原理分 (变换原理)		传感器以对信号转换的作用原理命名，便于厂家专业生产	应变式、电容式、电感式、压电式、热电式等
按物理现象分 (信号变换特征)	结构型	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换	电容式传感器：利用电容极板间隙或面积的变化→ ΔC
	物性型	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换	压电式传感器：压电效应，力→电荷； 热电偶：热电效应
	混合型	结构型与物性型传感器组合而成的	应变式力传感器： 力→弹性变形（应变）→电阻变化
按能量关系分	能量转换型 (自源型)	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量	电容传感器： 需外部供电，使 $x(t) \rightarrow \Delta C \rightarrow$ 电流或电压
	能量控制型 (外源型)	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出的能量	温度计：吸收被测物的能量； 磁电式：线圈切割磁力线→感应电动势
按输入量分		传感器以被测物理量命名，也即按用途分类，便于用户选择	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等
按输出信号分	模拟式	输出量为模拟量	
	数字式	输出量为数字量	

三、传感器的性能

应用传感器的目的是获取被测量，无论何种传感器，作为测控和信息系统的首要环节，通常都必须具有快速、准确、可靠而经济的实现信息转换的基本要求，即：

- (1) 足够的容量。传感器的工作范围或量程足够大，具有一定过载能力。
- (2) 与测量或控制系统匹配性好、灵敏度高。对被测对象的状态影响小，输出信号与被测信号成确定关系（通常为线性），且比值要大。
- (3) 精度适当、稳定性好。传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求，且能长期保持。
- (4) 响应速度快、工作可靠性高。
- (5) 适用性和适应性强。体积小、质量轻、内部噪声小、不易受外界干扰影响；其输出力求采用通用或标准形式，以便与系统对接。
- (6) 使用经济。成本低、寿命长，便于使用、维修、校准。

实际上很难有完全满足上述性能要求的传感器,因此应根据目的、使用环境、被测对象、精度要求和信息处理等具体条件作全面综合考虑。

1.2 传感器的静态特性

1.2.1 线性传感器的静态特性

传感器的特性分为静态特性和动态特性。静态特性是指被测物理量不随时间变化或随时间变化极其缓慢(在所观察的时间间隔内,其随时间的变化可忽略不计)时,传感器输出与其输入之间的关系。在静态测试中,这种关系一般是一一对应的,通常可将其描述为

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^i = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中 x ——传感器的输入;

y ——传感器的输出;

a_i ——传感器的特性参数。

当式(1-1)可写成式(1-2)时,传感器的输出输入关系为一直线,该传感器称为线性传感器。

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1-2)$$

式中 a_0 ——传感器的零位输出;

a_1 ——传感器的静态增益(灵敏度)。

对于线性传感器,若通过零位补偿使 $a_0=0$,则传感器有理想的线性输出输入关系

$$y = a_1 x$$

1.2.1.1 静态特性指标

传感器的静态特性指标有多种,可通过静态校准确定。在静态校准过程中,通常应标注其适用的温度范围。

一、测量范围和量程

测量范围指在保证传感器性能的前提下,测量上限 $x_{\max}$ 和测量下限 $x_{\min}$ 所表示的区间。

量程(x_{FS})是测量上限 $x_{\max}$ 与测量下限 $x_{\min}$ 的代数差,即 $x_{\max} - x_{\min}$ 。

二、分辨力和阈值

在整个传感器输入量程内,都能产生可观测的输出量变化的最小输入变化量称为分辨力。分辨力与量程之比称为分辨率,用百分数表示。

传感器所能识别的最小输入量称为阈值或死区,其数值一般比分辨力大。

三、灵敏度

传感器的灵敏度是输出变化量与相应的输入变化量之比,或者说是单位输入下所得到的输出。此处,输入量的变化必须很慢且不致引起输出量的动态响应。如果有动态响应则必须采用达到稳态后的输出量。传感器在第 i 个测量点处的灵敏度可用下式计算

$$s_i = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right) = \frac{dy_i}{dx_i} \quad (1-3)$$

式中 Δx_i ——在第 i 个测量点上传感器的输入变化量;

Δy_i ——在第 i 个测量点上由 Δx_i 引起的传感器的输出变化量。

线性传感器的灵敏度为常数,非线性传感器的灵敏度是变量。灵敏度是重要的性能指标,可根据测量范围、抗干扰能力等进行选择。

四、线性度

线性度是指传感器正、反行程实际平均特性曲线与参比直线不吻合程度的最大值。

由线性度的定义可以得出:随参比直线的不同,所得到的线性度也不同。常用的参比直线有端基直线、平移端基直线、零基直线、最佳直线及最小二乘直线等,由此所得到的线性度分别为端基线性度、平移端基线性度、零基线性度、独立线性度及最小二乘线性度。

特性曲线:表征传感器输出/输入特性关系的曲线。

参比直线:用以评定传感器静态特性的某一理想直线。

线性:传感器输出/输入特性曲线接近或偏离参比直线的性质。

正(反)行程:传感器输入增加(减小)的过程。

正(反)行程特性曲线:正(反)行程各校准点上传感器输出/输入特性关系的曲线。

正、反行程实际平均特性曲线:正、反行程算术平均值描绘成的传感器输出/输入特性关系曲线,又称实际平均特性曲线。

传感器参比直线与特性曲线如图 1-2 所示。

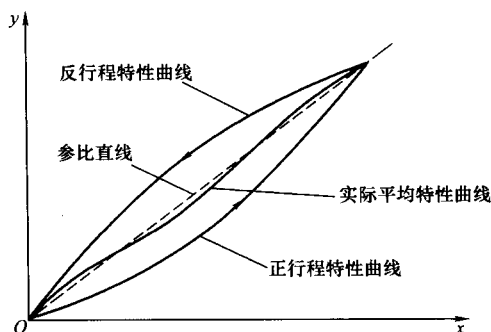


图 1-2 传感器参比直线与特性曲线

端基直线为实际平均特性曲线的首、末端点的连线,端基线性度的计算结果一般偏大。平移端基直线的斜率与端基直线相同,但应通过平移把实际平均特性曲线对它的最大偏差减至最小。当实际平均特性曲线呈单调增大或减小时,平移端基直线即最佳直线。零基直线为一经过传感器理论零点的直线,但须通过改变斜率把传感器实际特性对它的最大偏差减至最小。最佳直线为相互最靠近且能包容传感器实际平均特性曲线的两平行直线的中位线。独立线性度的数值最小,

需精确评定线性度时,应尽可能采用独立线性度。最小二乘直线保证传感器实际平均特性曲线对其偏差的平方和最小,一般情况下用最小二乘直线代替最佳直线。

计算传感器线性度的一般公式为

$$\Delta y_{L, \max} = \max(\bar{y}_i - y_i)$$

$$\epsilon_L = \pm \frac{\Delta y_{L, \max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $\Delta y_{L, \max}$ ——传感器的实际平均特性曲线与参比直线不吻合程度的最大值;

$\bar{y}_i$ ——传感器在第 i 个校准点处的平均特性值;

y_i ——传感器在第 i 个校准点处的参比特性值;

y_{FS} ——传感器的满量程输出。

为求出传感器在第 i 个校准点处的参比特性值,必须正确求出参比直线。

(1) 端基直线的方程计算公式如下

$$y_{te} = y_{\min} - \frac{\bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} x_{\min} + \frac{\bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} x \quad (1-5)$$

$$y_{te} = a + bx$$

$$b = \frac{\bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

$$a = \bar{y}_{\min} - bx_{\min}$$

式中 b ——端基直线斜率；

a ——端基直线截距；

$\bar{y}_{\max}$, $\bar{y}_{\min}$ ——传感器实际特性的最大值与最小值；

$x_{\max}$, $x_{\min}$ ——传感器的最大值与最小值。

(2) 零基直线方程为

$$y_{ze} = bx \quad (1-6)$$

式中 b ——零基直线斜率，即传感器理论零点 ($x=0$, $y=0$) 与最小的最大正、负偏差点的重心点连线的斜率。

如能用零基直线表示传感器的工作特性，则其方程形式简单，使用简便。

(3) 独立线性度一般根据定义采用作图法求得，具体算法可参考 GB/T 18459—2001《传感器主要静态性能指标计算方法》。

(4) 最小二乘直线方程为

$$y_{ls} = a + bx \quad (1-7)$$

式中 y_{ls} ——传感器的理论输出；

x ——传感器的实际输入；

a , b ——分别是最小二乘直线的截距和斜率。

式 (1-7) 中 a 、 b 的值通过对传感器实际特性的直线拟合求出

$$a = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum \bar{y}_i - \sum x_i \cdot \sum x_i \bar{y}_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{m \sum x_i \bar{y}_i - \sum x_i \cdot \sum \bar{y}_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-8)$$

式中 x_i ——传感器在第 i 校准点处的输入值；

$\bar{y}_i$ ——传感器在第 i 校准点处的实际输出值；

m ——校准点数。

五、迟滞 (回差)

当传感器输入量作满量程变化时，对于同一输入量，传感器的正、反行程输出量不一致，此现象称为迟滞。其产生原因是传感器机械部分有摩擦和间隙、敏感元件结构材料有缺陷以及传感器内存在弹性元件、电感、电容等储能元件。传感器迟滞的计算公式如下

$$\bar{y}_{u,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{u,ij}$$

$$\bar{y}_{d,i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{d,ij}$$

$$\Delta Y_{H, \max} = \max | \bar{y}_{d, i} - \bar{y}_{u, i} | \quad (1-9)$$

$$\epsilon_H = \pm \Delta Y_{H, \max} / (2Y_{FS}) \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 $\bar{y}_{u, i}$ ——正行程第 i 个校准点处的一组测量值的算术平均值;

$y_{u, ij}$ ——正行程第 i 个校准点处的第 j 个测量值 ($i=1 \sim m, j=1 \sim n$);

$\bar{y}_{d, i}$ ——反行程第 i 个校准点处的一组测量值的算术平均值;

$y_{d, ij}$ ——反行程第 i 个校准点处的第 j 个测量值 ($i=1 \sim m, j=1 \sim n$)。

六、重复性

相同的工作条件下, 对输入量按同一方向作满量程变化进行多次测量时, 传感器的输出值都不一样, 其变化是随机的。为反映这一现象, 引入重复性指标, 它是多次趋近并到达同一校准点时所测量的一组输出量之间的分散程度。

传感器的重复性是其偶然误差的极限值。传感器在某校准点处的重复性可计算为在该校准点处的一组测量值的样本标准偏差在一定置信度下的极限值, 以其满量程输出的百分比表示, 而传感器的重复性取各校准点处重复性的最大者, 计算公式如下

$$\epsilon_R = \pm c S_{\max} / Y_{FS} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 c ——包含因子, $c = t_{0.95}$;

$S_{\max}$ ——最大的样本标准偏差, 可从 m 个校准点的 $2m$ 个标准偏差估值 S 中选取最大者。

在传感器的校准实验中, 一般只进行 3~5 个循环, 其测量值属于小样本, 应按 t 分布进行处理。规定按 t 分布取包含因子 $c = t_{0.95}$ (保证 95% 的置信度)。若有需要、不取 $c = t_{0.95}$ 时, 则应事先声明。 $t_{0.95}$ 与校准循环数 n 和置信度有关, 其关系见表 1-2。

表 1-2

$t_{0.95}$ 与校准循环数 n 的关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{0.95}$	12.706	4.303	3.182	2.776	2.571	2.447	2.365	2.306	2.262

样本标准偏差的计算方法有以下几种。

(1) 贝塞尔 (Bessel) 公式法。正行程第 i 校准点处的样本标准偏差 $S_{u, i}$ 和反行程第 i 校准点处的样本标准偏差 $S_{d, i}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} S_{u, i} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_{u, ij} - \bar{y}_{u, i})^2}{n-1}} \\ S_{d, i} &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_{d, ij} - \bar{y}_{d, i})^2}{n-1}} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式中 n ——测量循环数。

其余各量含义与式 (1-10) 同。

(2) 极差法。正行程第 i 校准点处的样本标准偏差 $S_{u, i}$ 和反行程第 i 校准点处的样本标准偏差 $S_{d, i}$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} S_{u, i} &= W_{u, i} / d_R \\ S_{d, i} &= W_{d, i} / d_R \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式中 $W_{u, i}$ ——正行程第 i 个校准点处的极差, 即在第 i 个校准点处的一组 n 个测得值中最

大值与最小值之差的绝对值；

$W_{d,i}$ ——反行程第 i 个校准点处的极差，即在第 i 个校准点处的一组 n 个测得值中最大值与最小值之差的绝对值；

d_R ——极差系数，它取决于校准循环数 n ，即某校准点处的测量次数或样本容量 n 。

极差系数 d_R 与校准循环数 n 的关系见表 1-3。

表 1-3 极差系数 d_R 与校准循环数 n 的关系

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_R	1.128	1.693	2.059	2.326	2.534	2.704	2.847	2.970	3.078

极差法比贝塞尔公式法简便，但其估计得不如贝塞尔法准。计算 S 时，若不指明采用何种方法，即指贝塞尔公式法。若发生不一致，应以贝塞尔公式法为准。

七、漂移和温漂

(一) 漂移

当传感器的输入和环境温度不变时，输出量随时间变化的现象称为漂移，又称时漂。它反映了传感器的稳定性。通常以 1h、1 天、1 个月或 1 年等时间范围来考察时漂。

(二) 温漂

由环境温度变化所引起的输出量变化的现象称为温漂，分为零点漂移和灵敏度漂移。温漂通常用单位温度的满量程输出的百分比来表示。

八、静态误差

线性度、迟滞、重复性是传感器的分项性能指标，前两者反映了传感器的系统误差，后者反映随机误差。它们的不同组合构成综合反映传感器静态特性的各种静态误差，表示了传感器在满量程内其实际输出在一定置信度下对参考特性的偏离程度。目前的计算方法有：

综合考虑线性度、迟滞和重复性的传感器静态误差称为总不确定度，是指在参比工作条件下，实际特性相对于其工作特性的偏差在规定的置信度下皆不超过的一个极限范围。当用传感器满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示时，称为传感器的相对不确定度（或总不确定度），可用直接代数法或方和根法计算

$$\epsilon_a = \epsilon_L + \epsilon_H + \epsilon_R \quad (1-14)$$

$$\text{或} \quad \epsilon_a = \sqrt{\epsilon_L^2 + \epsilon_H^2 + \epsilon_R^2} \quad (1-15)$$

综合考虑迟滞和重复性的静态误差是指当采用计算机完成了传感器的非线性补偿时，静态误差可只考虑迟滞和重复性，因此有

$$\epsilon_a = \epsilon_H + \epsilon_R \quad (1-16)$$

$$\text{或} \quad \epsilon_a = \sqrt{\epsilon_H^2 + \epsilon_R^2} \quad (1-17)$$

1.2.2 非线性传感器静态性能指标与计算

对于传感器的应用，人们关心的是传感器反映被测输入量的测量误差，而不是传感器的直接输出量。即对传感器性能指标的评估、计算，都应针对由直接的输出测量值反推出的被测量值，然后由它们来评估、计算传感器的各项性能指标。

对于线性传感器，即传感器的静态灵敏度为常值时，由其输出测量值计算出的性能指标