

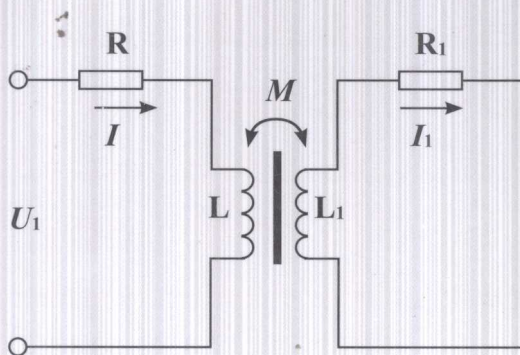
2010年山东省精品课程教材

传感器

原理与应用技术

刘爱华 满宝元 编著

(第2版)



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

传感器原理与应用技术 (第2版)

刘爱华 满宝元 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

传感器原理与应用技术 / 刘爱华, 满宝元编著. --
2版. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010.11
ISBN 978-7-115-23678-4

I. ①传… II. ①刘… ②满… III. ①传感器—高等
学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第153167号

内 容 提 要

本书系统地介绍了传感器的基本结构、工作原理、特性及相应的测量电路。全书共 10 章, 第 1 章介绍了传感器的基本概念及传感器的静、动态特性; 第 2 章至第 10 章分别介绍了电阻式、电容式、电感式、压电式、热电式、磁敏式、光电式、光纤式、气敏式、湿敏式传感器的结构、工作原理及应用。书中每章都提供了大量的应用实例, 章后对全章内容进行了梳理、归纳、总结, 以帮助读者理清知识体系, 每章后还附有课后习题。

本书可作为理工科院校应用电子、工业自动化、应用物理、计算机应用等专业的教材, 也可作为其他相关专业技术人员的技术参考书。

传感器原理与应用技术 (第 2 版)

-
- ◆ 编 著 刘爱华 满宝元
责任编辑 付方明
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15
字数: 363 千字
印数: 15 501-18 500 册
- 2010 年 11 月第 2 版
2010 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-23678-4

定价: 28.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

前 言

人类已经进入了科学技术空前发展的信息社会，而传感器技术是现代电子信息技术的关键。传感器处于自动检测与控制系统之首，是感知、获取与检测信息的窗口。传感器采集各种有用的信息并将其转换为容易传输和处理的信息，为电子计算机、智能机器人、自动化设备、自动控制装置充当着“感觉器官”。科学研究和生产过程都要通过传感器来获取信息，所以，传感器技术在现代科学技术领域中占有极其重要的地位，而且，科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖就越大。

四年前我们曾组织编写了《传感器原理与应用技术》一书，该书出版后受到全国各地广大师生和科研工作者的欢迎，取得了良好的社会效果。许多读者建议我们再出版相应的实验教材，以适应他们的教学需要。同时，《传感器原理与应用技术》一书在使用时也有学生提出需要增设各章的小结以方便他们的复习。鉴于此，我们结合多年的教学和科研工作的经验，重新修订了此书，并编写了《传感器实验与设计》一书，两书同步出版发行。

传感器的应用领域极其广泛，而且传感器种类繁多，涉及的学科也很多，本书仅限于基于物理学科的几类传感器。本着从基础性、实用性出发的原则，本书对这些传感器的基本原理、结构、性能、用途及基本测量电路进行了介绍，既给出了详细的物理概念、规律及必要的数学推导，又结合传感器的许多应用实例，引导读者学习传感器的应用技术。全书共分10章，除第1章介绍的传感器的基础知识外，其余各章均具有一定的独立性。

本书在编写过程中参阅了许多专著及文章，在此向其作者表示诚挚的谢意！

限于作者的水平和经验有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第1章 传感器基础知识 1	
1.1 学习传感器技术的重要性 1	
1.2 传感器的组成与分类 2	
1.2.1 传感器的定义 2	
1.2.2 传感器的组成 2	
1.2.3 传感器的分类 2	
1.3 传感器的数学模型概述 4	
1.3.1 静态模型 4	
1.3.2 动态模型 4	
1.4 传感器的基本特性 5	
1.4.1 静态特性 6	
1.4.2 动态特性 8	
1.5 传感器的标定与校准..... 16	
1.5.1 传感器的标定..... 16	
1.5.2 提高传感器性能的方法..... 16	
1.6 本章小结..... 16	
习题 17	
第2章 应变式电阻传感器 18	
2.1 电阻应变片..... 18	
2.1.1 应变效应 18	
2.1.2 电阻应变片的工作原理..... 19	
2.1.3 电阻应变片的分类..... 20	
2.2 电阻应变片的主要特性..... 24	
2.2.1 灵敏系数..... 24	
2.2.2 横向效应..... 24	
2.2.3 机械滞后、零漂及蠕变..... 25	
2.2.4 应变极限..... 26	
2.2.5 动态特性..... 26	
2.3 温度特性及其补偿..... 27	
2.3.1 温度误差..... 27	
2.3.2 温度补偿..... 28	
2.4 电阻应变片的测量电路..... 30	
2.4.1 直流电桥..... 30	
2.4.2 交流电桥..... 32	
2.4.3 恒流源电桥..... 34	
2.5 固态压阻式传感器..... 35	
2.5.1 压阻式传感器的结构与 工作原理..... 35	
2.5.2 压阻系数..... 36	
2.5.3 固态压阻器件..... 36	
2.5.4 压阻式传感器的测量 电路..... 36	
2.6 应变式传感器的应用..... 37	
2.6.1 应变式传感器测量力..... 37	
2.6.2 应变式传感器测量压力..... 40	
2.6.3 应变式传感器测量加速度 ... 41	
2.6.4 压阻式传感器的应用..... 41	
2.6.5 应变式传感器应用实例..... 42	
2.7 本章小结..... 43	
习题 44	
第3章 电容式传感器 45	
3.1 电容式传感器的工作原理及 特性..... 45	
3.1.1 基本工作原理..... 45	
3.1.2 电容式传感器的类型和 特性..... 46	
3.2 电容式传感器的等效电路和 测量电路..... 50	
3.2.1 电容式传感器的等效 电路..... 50	
3.2.2 电容式传感器的测量 电路..... 51	
3.3 电容式传感器的特点及设计与 应用中存在的问题..... 56	
3.3.1 电容式传感器的特点..... 56	
3.3.2 设计与应用中存在的 问题..... 57	
3.4 电容式传感器的应用..... 60	
3.5 本章小结..... 62	
习题 63	
第4章 电感式传感器 65	
4.1 自感式传感器..... 65	

4.1.1 自感式传感器的结构和 工作原理.....	65	5.4 压电式传感器的应用.....	99
4.1.2 变气隙式自感传感器的 输出特性.....	67	5.4.1 压电式传感器对压力、 加速度等的测量.....	99
4.1.3 差动式自感传感器.....	68	5.4.2 压电式传感器应用实例 ...	102
4.1.4 自感式传感器的等效电路 ...	69	5.5 本章小结	104
4.1.5 自感式传感器的测量电路 ...	69	习题.....	105
4.2 互感式传感器.....	71	第6章 热电式传感器	106
4.2.1 互感式传感器的结构和 工作原理.....	71	6.1 热电偶	106
4.2.2 差动变压器的输出特性.....	73	6.1.1 热电偶的工作原理	106
4.2.3 差动变压器的测量电路.....	74	6.1.2 常用热电偶的结构	112
4.3 电涡流式传感器.....	78	6.1.3 热电偶材料	114
4.3.1 电涡流式传感器的 基本原理.....	78	6.1.4 热电偶的种类	115
4.3.2 电涡流式传感器的 等效电路.....	78	6.1.5 热电偶的冷端补偿方法 ...	119
4.3.3 电涡流式传感器的种类.....	79	6.1.6 热电偶测温电路	123
4.3.4 电涡流式传感器的 转换电路.....	81	6.2 热电阻	125
4.4 电感式传感器的应用.....	82	6.2.1 热电阻的类型	125
4.4.1 差动变压器的应用.....	82	6.2.2 常用的几种热电阻	126
4.4.2 电涡流式传感器的应用.....	84	6.2.3 热电阻测量电路	128
4.5 本章小结.....	85	6.3 热敏电阻	129
习题	85	6.3.1 热敏电阻的结构	130
第5章 压电式传感器	87	6.3.2 热敏电阻的基本参数	130
5.1 压电效应.....	87	6.3.3 热敏电阻的主要特性	131
5.1.1 压电效应及其可逆性.....	87	6.3.4 热敏电阻输出特性的 线性化处理	133
5.1.2 石英晶体的压电效应及 产生原理.....	88	6.4 PN结温度传感器	134
5.1.3 压电陶瓷的压电效应.....	91	6.4.1 温敏二极管、三极管	134
5.2 压电材料.....	93	6.4.2 集成温度传感器	136
5.2.1 石英晶体.....	94	6.5 热电式传感器的应用	138
5.2.2 压电陶瓷.....	94	6.5.1 热电偶温度传感器的 典型应用	138
5.2.3 新型压电材料.....	94	6.5.2 热电阻温度传感器的 典型应用	139
5.3 压电式传感器的测量电路.....	95	6.5.3 热敏电阻温度传感器的 典型应用	140
5.3.1 压电晶片的连接方式.....	95	6.5.4 集成温度传感器的 典型应用	140
5.3.2 压电式传感器的等效电路 ...	95	6.6 本章小结	142
5.3.3 压电式传感器的测量 电路分析.....	96	习题.....	143
		第7章 半导体磁敏传感器	144
		7.1 霍尔传感器	144

7.1.1 霍尔效应	144	8.4.3 光敏晶体管	179
7.1.2 霍尔元件的构造及 测量电路	147	8.5 新型光电传感器	183
7.1.3 霍尔元件的技术参数	148	8.5.1 高速光敏二极管	183
7.1.4 霍尔元件的测量误差和 补偿	149	8.5.2 色敏光电传感器	184
7.2 集成霍尔传感器	152	8.5.3 光固态图像传感器	185
7.2.1 开关型集成霍尔传感器	152	8.6 光电传感器的应用举例	189
7.2.2 线性集成霍尔传感器	153	8.6.1 模拟式光电传感器的 应用	189
7.3 磁敏电阻器	153	8.6.2 开关式光电传感器的 应用	190
7.3.1 磁阻效应	154	8.6.3 光电池的应用	192
7.3.2 磁敏电阻的结构	154	8.6.4 CCD 图像传感器的 应用	193
7.3.3 磁阻元件的主要特性	155	8.7 本章小结	194
7.4 磁敏二极管和磁敏三极管	156	习题	195
7.4.1 磁敏二极管的工作原理和 主要特性	156	第9章 光纤传感器	197
7.4.2 磁敏三极管的工作原理和 主要特性	159	9.1 光纤的结构与传光原理	197
7.5 磁敏式传感器的应用	161	9.1.1 光纤的结构	197
7.5.1 霍尔式传感器的 典型应用	161	9.1.2 光纤的传光原理	198
7.5.2 磁敏电阻的应用	164	9.1.3 光纤的种类	199
7.5.3 磁敏二极管和三极管的 应用	164	9.2 光纤传感器的结构原理及 分类	200
7.6 本章小结	165	9.2.1 光纤传感器的结构原理	200
习题	166	9.2.2 光纤传感器的类型	200
第8章 光电式传感器	168	9.2.3 光纤传感器的发展方向	202
8.1 概述	168	9.3 光纤传感器的调制形式	202
8.1.1 光的特性	168	9.3.1 强度调制	202
8.1.2 光源(发光器件)	168	9.3.2 偏振调制	203
8.2 光电效应	169	9.3.3 频率调制	204
8.2.1 外光电效应	169	9.3.4 相位调制	205
8.2.2 内光电效应	170	9.3.5 波长调制	205
8.3 外光电效应器件	171	9.4 光纤传感器的应用	205
8.3.1 光电管及其基本特性	171	9.4.1 温度的检测	205
8.3.2 光电倍增管及其基本 特性	173	9.4.2 压力的检测	207
8.4 内光电效应器件	174	9.4.3 液位、流量、流速的 检测	210
8.4.1 光敏电阻	174	9.5 本章小结	212
8.4.2 光电池	177	习题	213
		第10章 气敏、湿敏传感器	215

10.1 半导体气敏传感器.....	215	10.1.6 半导体气敏传感器的 应用.....	223
10.1.1 电阻型半导体气敏材料的 导电机理.....	216	10.2 湿敏传感器.....	225
10.1.2 电阻型半导体气敏传感器的 结构.....	217	10.2.1 绝对湿度与相对湿度.....	225
10.1.3 非电阻型气敏器件.....	219	10.2.2 氯化锂湿敏电阻.....	225
10.1.4 半导体气敏传感器的主要 参数与特性.....	220	10.2.3 半导体湿敏电阻.....	226
10.1.5 半导体气敏传感器的基材 及其研究进展.....	222	10.2.4 湿敏传感器的应用.....	228
		10.3 本章小结.....	229
		习题.....	230
		参考文献	232

第 1 章 传感器基础知识

1.1 学习传感器技术的重要性

人类正处于信息时代，信息技术的三大支柱是测控技术、通信技术和计算机技术，而传感器技术是测控技术的基础。“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。传感器技术是材料学、力学、电学、磁学、微电子学、光学、声学、化学、生物学、精密机械、仿生学、测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术，乃至系统科学、人工智能、自动化技术等众多学科相互交叉的综合性高新技术密集型前沿技术，广泛应用于航空航天、兵器、信息产业、机械、电力、能源、交通、冶金、石油、建筑、邮电、生物、医学、环保、材料、灾害预测预防、农林渔业、食品、烟酒制造、建筑、汽车、舰船、机器人、家电、公共安全等领域，可以说是无所不在。传感器处于自动检测与控制系统之首，是感知、获取与检测信息的窗口。科学研究和生产过程要获取的信息，都要通过传感器才能转换成容易传输和处理的电信号或光信号等。科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖就越大。

传感器技术的发展，又促进了工业、农业、宇航、军事、环卫等技术的发展。21 世纪是人类全面进入信息电子化的时代，随着人类探知领域和空间的拓展，人们需要获得的自然信息的种类日益增加，信息传递的速度需要加快，信息处理能力需要增强，因此要求与此相对应的信息获取技术即传感器技术必须跟上信息化发展的需要。传感器是人类探知自然界信息的“触角”，为人们认识和控制相应的对象提供了条件和依据。

国外传感器的发展已有近 200 年的历史，而近 20 年来，由于世界各国的普遍重视和投入开发，传感器发展十分迅速，美国、法国、德国、荷兰、俄罗斯、日本等国已实现产业化，近十几年来世界传感器产量及市场需求年增长率均在 10% 以上。目前世界上传感器的种类约有 2 万种，从事传感器研制和生产的单位已有 5000 余家。我国传感器行业始于 20 世纪 50 年代初期，但直到 1986 年“七五”计划开始传感器技术才正式被列入国家重点攻关项目，投入了以机械敏、力敏、气敏、湿敏、生物敏为主的五大敏研究。目前国内可批量或小批量生产约 3000 种传感器，其中主要传感器产品 1000 多种，国产元器件 950 种，基本涵盖了信息采集的各个领域。国内产品开发涵盖光敏、热敏、力敏、电压敏、磁敏、气敏、湿敏、声敏、射线敏、离子敏、生物敏等各种传感器以及变送器、二次仪表等多种类型的产品，与国外研制领域相当。“八五”期间，我国把传感器技术列为国家重点攻关项目及中长期科技发展重点新技术之一。

计算机和通信技术的繁荣为传感器技术的广泛应用提供了巨大的平台。相关学科(如材料科学、微电子学、数学、计算机、信息处理技术)和相关产业(如电子装备制造业)的发展为传感器技术的发展提供了理论支持和物质基础,相信在不久的将来,传感器技术一定会取得长足发展。

1.2 传感器的组成与分类

1.2.1 传感器的定义

传感器(Transducer 或 Sensor)是能感受规定的被测量并按照一定规律将其转换成可用输出信号的器件或装置。在有些国家和有些学科领域,也将传感器称为变换器、检测器或探测器等。

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或机理,按照一定的工艺和结构研制出来的。因此,传感器的组成在细节上有较大差异。但总地来说,传感器主要由敏感元件、转换元件和其他辅助元件组成。敏感元件是指传感器中能直接感受(或响应)和检出被测对象的待测信息(非电量)的部分,转换元件是指传感器中能将敏感元件所感受(或响应)出的信息直接转换成有用信号(一般为电信号)的部分。例如,应变式压力传感器是由弹性膜片和电阻应变片组成的。其中弹性膜片就是敏感元件,它能将压力转换成弹性膜片的应变;弹性膜片的应变施加在电阻应变片上,电阻应变片再将其应变转换成电阻的变化量,电阻应变片就是转换元件。但并不是所有的传感器都能明显区分为敏感元件与转换元件两个部分,有的是二者合为一体。例如半导体气体、湿度传感器等,它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。

1.2.2 传感器的组成

一般来讲,传感器由敏感元件和转换元件组成。但是,由于传感器输出的信号一般都很微弱,需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的信号调节与转换电路可能安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。因此,信号调节与转换电路以及所需电源都应作为传感器组成的一部分。常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、变阻器等。图 1-1 所示为传感器组成框图。

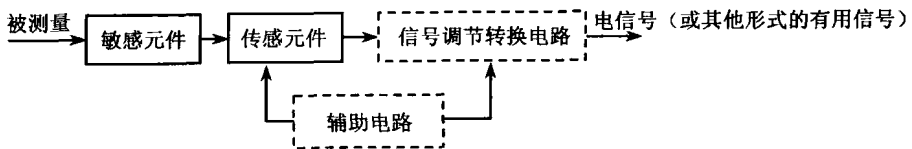


图 1-1 传感器组成框图

1.2.3 传感器的分类

传感器的品种很多,原理各异,检测对象门类繁多,分类方法也有很多,一般可按如下

几种方法分类。

1. 按工作机理分类

按工作机理分类的方法是以工作原理划分,将物理、化学和生物等学科的原理、规律、效应作为分类的依据,如应变式、热电式、压电式传感器等。这种分类法的优点是对传感器的工作原理分析得比较清楚,类别少,有利于传感器工作者从原理与设计上进行归纳性分析和研究。本书就是按工作原理对传感器进行分类的。

2. 按被测量分类

按被测量分类的方法是按被测量的性质不同对传感器进行划分。目前把不同被测量的传感器分为物理量传感器、化学量传感器和生物量传感器三大类。这种分类方法又把种类繁多的被测量分为基本物理量和派生物理量两大类。表 1-1 所示为基本物理量和派生物理量的关系。

表 1-1 基本物理量和派生物理量

基本物理量		派生物理量
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度等
	角位移	旋转角、偏转角、角振动等
速度	线速度	速度、振动、流量、动量等
	角速度	转速、角振动等
加速度	线加速度	振动、冲击、质量等
	角加速度	角振动、扭矩、转动惯量等
力	压力	重量、应力、力矩等
时间	频率	周期、计数、统计分布等
温度		热容量、气体速度、涡流等
光		光通量与密度、光谱分布等

由于这种分类方法是按被测量对传感器命名的,因此能明确地指出传感器的用途,便于使用者根据其用途选用。例如,若需要测量压力、重量、力矩等物理量,只要采用力传感器就可以了。但因为这种分类方法将原理互不相同的传感器归为一类,所以很难找出每种传感器在转换机理上有何共性和差异,因此对掌握传感器的一些基本原理及分析是不利的。

3. 按敏感材料分类

按敏感材料分类的方法是按制造传感器的材料分类,可分为半导体传感器、陶瓷传感器、光纤传感器、高分子材料传感器、金属传感器等。

4. 按能量的关系分类

根据能量关系分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。有源传感器一般是将非电能量转换为电能量,称之为能量转换型传感器,也称为换能器。通常它们配有电压测量和放大电路,如压电式、热电式、压阻式等。无源传感器又称为能量控制型传感器。它

本身不是一个换能装置,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用。所以,它们必须具有辅助能源(电源)。这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路进行测量。

5. 其他分类法

除以上几种常用的分类法外,还有按用途、学科、功能和输出信号的性质等分类的方法。

1.3 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,即可用某种方程式或函数表征传感器的输入-输出间的关系和特性,从而用这种关系来指导对传感器的设计、制造、使用和校正。

在理想情况下,传感器的输出量应随输入量无失真地变化。但是实际的传感器(或测试系统)总是存在着诸如弹性、惯性和阻尼等元件,使得输出量 y 不仅与输入量 x 有关,而且还与输入量的变化速度、加速度等其他因素有关,所以要准确地建立传感器的数学模型是很困难的。在工程上总是通过忽略一些影响不大的因素,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。通常从传感器的静态输入-输出关系和动态输入-输出关系两方面建立数学模型。

1.3.1 静态模型

静态模型是指在输入静态信号(输入信号不随时间变化)的情况下,描述传感器输出与输入量间关系的一种函数。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下面的多项式来表示:

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

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, \dots, a_n 为非线性项的待定系数。

1.3.2 动态模型

动态模型是指在准动态信号或动态信号(输入信号随时间而变化)作用下,描述传感器输出量和输入量间关系的一种函数,通常称为响应特性。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

大多数传感器都属于模拟系统。为了准确建立传感器的动态数学模型,需忽略一些影响不大的因素,如非线性和随机变量等复杂因素,将传感器作为线性定常系统来考虑,因而其

动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,即用线性常系数微分方程表示传感器输出量 y 和输入量 x 之间的关系。其通式如下:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中: a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 和 b_m, b_{m-1}, \dots, 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, \dots, b_m 为零。

所谓线性系统,就是在此方程式中不包含变量及其各阶微分的非一次幂项(包括交叉相乘项)。如果线性系统方程中各系数 a_n, b_m 在工作过程中不随时间和输入量的变化而变化,那么该系统就称为线性定常系统。用线性常系数微分方程来表示传感器的动态模型的优点是易于通过解微分方程分清暂态响应和稳态响应。

2. 传递函数

为了求解的方便,常采用拉普拉斯变换(简称拉氏变换)将(1-2)式变为算子 s 的代数式,或采用传递函数研究传感器的动态特性。如果在 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 则 $y(t)$ 的拉氏变换可定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-3)$$

式中: $s = \sigma + j\omega, \sigma > 0$ 。微分方程(1-2)两边取拉氏变换,则得

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

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

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-4)$$

对 $y(t)$ 进行拉氏变换的初始条件是 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$ 。对于传感器被激励之前所有的储能元件(如质量块、弹性元件、电气元件等)来说,均符合上述的初始条件。

显然, $H(s)$ 与输入量 $x(t)$ 无关,只与系统的结构参数有关。因而, $H(s)$ 可以简单而恰当地描述传感器输出与输入的关系。

对于多环节串、并联组成的传感器,若各环节阻抗匹配适当,则可忽略相互间的影响,传感器的等效传递函数可按代数方式求得。

若传感器由 r 个环节串联而成,其等效传递函数为

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) \times \cdots \times H_r(s) \quad (1-5)$$

若传感器由 p 个环节并联而成,其等效传递函数为

$$H(s) = H_1(s) + H_2(s) + \cdots + H_p(s) \quad (1-6)$$

这样就容易看清各个环节对系统的影响,因而便于对传感器或测量系统进行改进。

1.4 传感器的基本特性

传感器(或测量设备)的输入-输出关系特性是传感器的基本特性。从误差角度分析输

入-输出特性是测量技术所要研究的主要内容之一。输入-输出特性虽是传感器的外部特性,但与其内部参数有密切关系。因为传感器不同的内部结构参数决定它们具有不同的外部特性,所以测量误差也是与内部结构参数密切相关的。

传感器所测量的物理量一般有两种形式,一种是稳态的(静态或准静态),即信号不随时间变化或变化很缓慢;另一种是动态的,即信号随时间的变化而变化。由于输入物理量状态不同,传感器所表现出来的输入-输出特性也不同,因此存在所谓的静态特性和动态特性。由于不同传感器有不同的内部参数,它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点,对测量结果的影响也各不相同。一个高精度传感器必须有良好的静态特性和动态特性,这样它才能完成信号(或能量)的无失真转换。

1.4.1 静态特性

衡量传感器静态特性的主要技术指标有线性度、测量范围和量程、迟滞和重复性、灵敏度、分辨力等。

1. 线性度

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

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中: ΔL_{\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。

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。

传感器的静态模型(1-1)式有三种有用的特殊形式,它们所呈现的非线性程度可用图1-2表示。

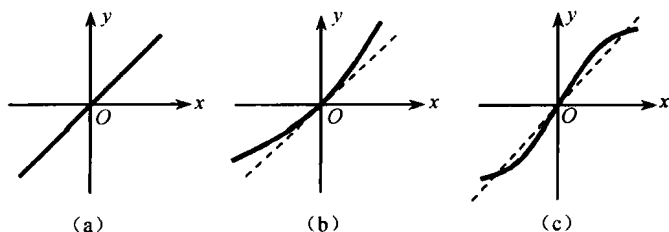


图 1-2 三种形式的特性曲线

(1) 理想的线性特性

理想的线性特性是如图1-2(a)所示的直线,在这种情况下,有 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$,因此得到

$$y = a_1 x \quad (1-8)$$

(2) 仅有偶次非线性项

图1-2(b)所示为仅有偶次非线性项的曲线。其输入-输出特性方程为

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (1-9)$$

因为它没有对称性，所以其线性范围较窄。一般传感器的设计很少采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项

图 1-2 (c) 所示为仅有奇次非线性项的曲线。其输入-输出特性方程为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (1-10)$$

具有这种特性的传感器，一般在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性。这是比较接近于理想直线的非线性特性，它相对坐标原点对称的，即 $y(+x) = -y(-x)$ ，所以它具有相当宽的近似线性范围。

2. 灵敏度

在稳态下传感器输出的变化量 Δy 与引起此变化量的输入变化量 Δx 的比值即为其静态灵敏度。其表达式为

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-11)$$

式中： Δy 为输出的变化量；

Δx 为输入的变化量。

由此可见，传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度。对线性传感器而言，其特性曲线的斜率处处相同，灵敏度 k 是一常数，其灵敏度就是它的静态特性曲线的斜率，即

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

非线性传感器的灵敏度是一个变量，只能表示传感器在某一工作点的灵敏度。

3. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全程多次测试时，所得特性曲线不一致的程度。图 1-3 所示为实际输出的校正曲线的重复性。正行程的最大重复性偏差为 ΔR_{max1} ，反行程的最大重复性偏差为 ΔR_{max2} 。重复性误差用这两个最大偏差之中较大者 ΔR_{max} 与满量程输出 y_{FS} 之比的百分数表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

重复性误差也常用绝对误差表示。

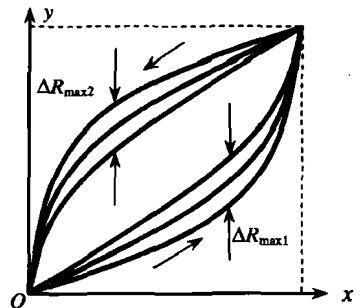


图 1-3 重复性

4. 迟滞 (回差滞环)

对于同一大小的输入信号 x ，传感器在正 (输入量增大) 反 (输入量减小) 行程中，输入-输出曲线不重合称为迟滞。

迟滞特性如图 1-4 所示，它一般是通过实验的方法测得的。迟滞误差一般以正反行程中输出的最大偏差量与满量程输出之比的百分数表示，即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中： ΔH_{max} 为正反行程输出量之间的最大差值；

y_{FS} 为输出满量程值。

迟滞的影响因素包括传感器机械结构中的摩擦、间隙、松动、积尘和结构材料受力变形的滞后现象等。

5. 分辨力与阈值

分辨力是指传感器在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化值。该值与满量程输入值之比的百分数称为分辨率。

阈值是使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值，即零点附近的分辨力。

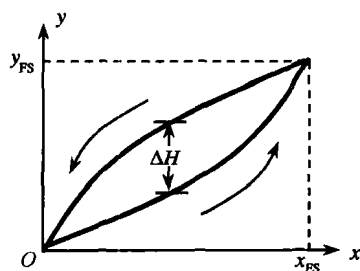


图 1-4 迟滞特性

6. 稳定性

稳定性又称长期稳定性，即传感器在长时间内保持其原性能的能力。稳定性一般以室温条件下经过规定时间间隔后，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示，有时也用标定的有效期来表示。

7. 漂移

漂移是指在一定时间间隔内，传感器的输出存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移常包括零点漂移和灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移，分别简称为时漂和温漂。时漂是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间有缓慢的变化；温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

8. 静态误差 (精度)

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。求静态误差是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 ，取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。

静态误差也可用相对误差表示，即

$$\gamma = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

静态误差是一项综合性指标，它基本上包含了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差等，所以也可以由这几个单项误差综合而得，即

$$\gamma = \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \dots} \quad (1-16)$$

1.4.2 动态特性

动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。

1. 动态误差

在测量静态信号时，线性传感器的输入-输出特性是一条直线，二者之间有一一对应的

关系，而且因为被测信号不随时间变化，测量和记录过程均不受时间的限制。而在实际测量工作中，大量的被测信号是动态信号，传感器对动态信号的测量不仅需要精确地测量信号幅值的大小，而且需要测量和记录动态信号变换过程的波形，这就要求传感器能迅速、准确地测出信号幅值的大小和无失真地再现被测信号随时间变化的波形。

动态特性好的传感器，其输出量随时间变化的曲线与被测量随时间变化的曲线一致或者相近，即具有相同的时间函数。但实际上，除了具有理想的比例特性的环节外，输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数，这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。例如，用一只热电偶测量热水温度 T 。若环境温度为 T_0 （设 $T > T_0$ ），测试曲线与温度从 T_0 到 T 的阶跃存在一个差值，这个差值就是动态误差，如图 1-5 所示。

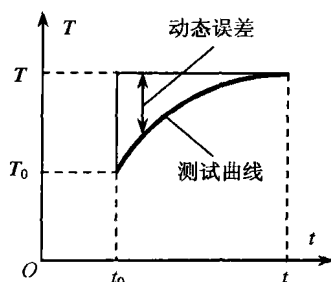


图 1-5 热电偶测温过程

在用热电偶测量热水温度时，水温的热量需通过热电偶的壳体传播到热接点上，热接点又具有一定热容量，它与水温的热平衡需要一个过程，所以热电偶不能在被测温度变化时立即产生相应的反应。这种由热容量所决定的性能称为热惯性，这种热惯性是热电偶固有的，热惯性决定了热电偶测量快速温度变化时会产生动态误差。

这种影响动态特性的“固有因素”任何传感器都有，只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。研究传感器的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因以及改善措施。

2. 研究传感器动态特性的方法及其指标

研究动态特性可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的，在时域内研究传感器的响应特性时，只能研究几种特定的输入时间函数（如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等）的响应特性。在频域内研究动态特性一般是采用正弦函数得到频率响应特性。为了便于比较、评价或动态定标，最常用的输入信号为阶跃信号和正弦信号。因此，对应的方法为阶跃响应法和频率响应法。

(1) 阶跃响应

当给静止的传感器输入一个单位阶跃函数信号

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-17)$$

时，其输出特性称为阶跃响应特性。为表征传感器的动态特性，常用以下几项指标来衡量阶跃响应特性，如图 1-6 所示。

① 最大超调量 σ_p ：响应曲线偏离阶跃曲线的最大值。

若稳态值为 1，则最大百分比超调量为

$$\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-18)$$

最大超调量能说明传感器的相对稳定性。

② 延滞时间 t_d ：阶跃响应达到稳态值 50% 所需要的时间。

③ 上升时间 t_r ：上升时间有几种定义。