

90

TP212
L15

□21 世纪高等学校电子信息类系列教材

传感器及其应用

栾桂冬 张金铎 金欢阳 编著



A0966078

西安电子科技大学出版社

2002

内 容 简 介

本书共分 11 章,介绍了应变式传感器、变磁阻式传感器、电阻式传感器、压电传感器、光电式传感器和半导体传感器等常用的传统传感器,也介绍了光纤传感器、声表面波传感器、微应变式传感器和 Z 半导体敏感元件传感器等新型的传感器。对常用的传感器电路也作了介绍。

本书内容的叙述由浅入深,循序渐进,侧重于基本概念和基础理论,以传感器的工作原理为纲进行讲解,便于读者理解和掌握。

本书可作为理工科高等院校的教学教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器及其应用/栾桂冬,张金铎,金欢阳编著. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.1

21 世纪高等学校电子信息类系列教材

ISBN 7-5606-1075-7

I. 传… II. ①栾… ②张… ③金… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 068240 号

责任编辑 马乐惠 龙 晖

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安文化彩印厂

版 次 2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.875

字 数 397 千字

印 数 1~4000 册

定 价 19.00 元

ISBN 7-5606-1075-7/TN·0190(课)

XDUP 1346001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

本书是在编者给高年级本科生和研究生讲授的有关传感器课程讲义的基础上修改补充而成的。内容叙述由浅入深,循序渐进,侧重于讲解基本概念和基础理论,便于初学者理解和掌握。传感器种类繁多,涉及面很广,要在有限的篇幅内作较全面的介绍有很大难度。本书主要介绍基于各种物理效应的物理类型的传感器,并以传感器的工作原理为纲进行讲解,以便读者举一反三,触类旁通。

全书共分 11 章。第一章引言,介绍传感器的发展和作用,传感器的定义、分类以及传感器的性能和评价。第二章应变式传感器,介绍电阻应变效应,应变计的主要特性,电桥原理及电阻应变计桥路,温度误差及其补偿,各种应变式传感器,以及几种新型的微应变式传感器。第三章光电式传感器,介绍光电效应,热释电效应,光传感器的特性以及各种光电传感器。第四章光纤传感器,介绍光纤传感器的基本原理和几种强度型(振幅型)和干涉型(相位型)光纤传感器。第五章变磁阻式传感器,介绍电感式传感器,差动式电感传感器和差动变压器式传感器。第六章压电传感器,介绍晶体的压电效应,压电加速度传感器,各种谐振式压电传感器和声表面波传感器。第七章压电声传感器,介绍常用的厚度振动换能器,圆柱形压电换能器,复合棒压电换能器,压电陶瓷双叠片弯曲振动换能器。第八章半导体传感器,介绍半导体温度传感器、半导体湿度传感器、半导体气体传感器和半导体磁敏传感器。第九章电阻式传感器,介绍线性电位器,非线性电位器和各种电位器式传感器。第十章 Z—半导体敏感元件,介绍 Z—半导体敏感元件的由来与特点,温敏 Z—元件的伏安特性,基本应用电路和几种新近应用开发的 Z—元件传感器。第十一章传感器电路,介绍传感器的匹配、信号处理电路、信号传输和抗干扰设计,并列举了实际传感器电路的实例。

本书第一章至第七章由栾桂冬教授编写,第八章至第十章由张金铎教授编写,第十一章由金欢阳老师编写。西北工业大学的张晓蓓老师审阅了本书,在此表示感谢。

传感器是真正的多学科技术,它涉及物理学、电子学、机械工程、化学、生物学、封装技术、材料科学等,传感器又是一种高度综合性的技术。由于作者知识面所限和时间仓促,错误和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者
2001 年 4 月 30 日
于北京大学

目 录

第一章 引言	1	2.8.1 压阻效应	46
1.1 传感器的发展和作用	1	2.8.2 敏感元件加工新技术	47
1.2 什么是传感器	2	2.8.3 微型硅应变式传感器	49
1.3 传感器的分类	3	2.8.4 X型硅压力传感器	50
1.4 传感器的性能和评价	4	2.8.5 薄膜应变式传感器	51
1.4.1 传感器的静态特性	5	参考文献	51
1.4.2 传感器的动态特性	6	第三章 光电式传感器	52
参考文献	15	3.1 光电效应	52
第二章 应变式传感器	16	3.1.1 外光电效应	52
2.1 电阻应变效应	16	3.1.2 内光电效应	53
2.1.1 电阻应变效应	16	3.2 热释电效应	55
2.1.2 应变计的分类	17	3.3 光的吸收系数	56
2.1.3 应变计型号命名规则	20	3.4 光传感器的特性表示法	57
2.2 应变计的主要特性	20	3.4.1 灵敏度	57
2.2.1 应变计的灵敏度系数	21	3.4.2 光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 与峰值波长	57
2.2.2 横向效应	21	3.4.3 相对光谱灵敏度 $S_r(\lambda)$	57
2.2.3 应变计的动态特性	23	3.4.4 积分灵敏度 S	58
2.2.4 其他特性参数	25	3.4.5 通量阈 Φ_H	58
2.3 应变计的粘贴	26	3.4.6 归一化探测率 D^*	59
2.4 电桥原理及电阻应变计桥路	27	3.4.7 转换特性 $S_c(t)$ 和响应时间	59
2.4.1 直流电桥的特性方程及平衡条件	27	3.4.8 光电器件的频率特性	59
2.4.2 直流电桥的电压灵敏度	27	3.4.9 光照特性	60
2.4.3 交流电桥的平衡条件和电压输出	29	3.4.10 温度特性	60
2.5 温度误差及其补偿	30	3.4.11 伏安特性	60
2.5.1 温度误差产生的原因	30	3.5 光电传感器	61
2.5.2 温度补偿方法	32	3.5.1 光电管	61
2.6 电阻应变仪	34	3.5.2 光电倍增管	62
2.7 应变式传感器	37	3.5.3 光敏电阻	65
2.7.1 弹性敏感元件	37	3.5.4 光电二极管和光电三极管	71
2.7.2 应变式测力与称重传感器	38	3.5.5 光电池	80
2.7.3 应变式压力传感器	43	3.5.6 PIN型硅光电二极管	86
2.7.4 应变式加速度传感器	45	3.5.7 雪崩式光电二极管(APD)	86
2.8 几种新型的微应变式传感器	46	3.5.8 半导体色敏传感器	87
		3.5.9 光电闸流晶体管	88
		3.5.10 热释电传感器	89

3.5.11 达林顿光电三极管	90	6.2.1 压电加速度传感器的工作原理 ...	138
3.5.12 光电耦合器件	91	6.2.2 压电加速度传感器的结构	139
3.5.13 光导摄像管	91	6.2.3 压电加速度传感器的等效电路 ...	141
3.5.14 CCD 图像传感器	92	6.3 压电谐振式传感器	143
参考文献	94	6.3.1 石英晶体谐振式温度传感器	143
第四章 光纤传感器	96	6.3.2 石英晶体谐振式压力传感器	144
4.1 光导纤维(光纤)	97	6.3.3 压电汞蒸气探测器	146
4.1.1 光纤的结构	97	6.3.4 测量液体密度的压电传感器	147
4.1.2 光在光纤中的传播	97	6.4 声表面波传感器	148
4.1.3 光纤的几个重要参数	98	6.4.1 SAW 传感器的基本原理	148
4.1.4 光纤的类型	99	6.4.2 SAW 压力传感器	150
4.2 强度型(振幅型) 光纤传感器	101	6.4.3 SAW 热敏传感器	151
4.2.1 反射式光纤位移传感器	101	6.4.4 SAW 气敏传感器	152
4.2.2 光纤测压传感器	103	6.4.5 SAW 电力传感器	153
4.2.3 移动光栅光纤传感器	103	6.4.6 SAW 加速度传感器	154
4.2.4 微弯光纤传感器	104	6.4.7 SAW 流量传感器	155
4.3 干涉型光纤传感器	107	参考文献	156
4.3.1 基本原理	107	第七章 压电声传感器	157
4.3.2 光纤(强度)干涉仪	110	7.1 厚度振动换能器	157
4.3.3 相位检测中的几个问题	111	7.2 圆柱形压电换能器	159
4.3.4 相位检测方法	116	7.2.1 薄壁圆管的共振频率方程	160
4.3.5 光纤声传感器	120	7.2.2 开路接收电压灵敏度	160
4.3.6 光纤磁传感器	121	7.3 复合棒压电换能器	161
4.3.7 光纤电流传感器	122	7.3.1 复合棒压电振子的机电等效图 ...	162
4.3.8 光纤线性加速度计	122	7.3.2 共振频率方程	163
4.3.9 涡流式光纤流量传感器	122	7.4 压电陶瓷双叠片弯曲振动换能器	165
参考文献	123	7.4.1 弯曲振动压电陶瓷换能器	
第五章 变磁阻式传感器	124	的原理	165
5.1 电感式传感器	124	7.4.2 弯曲振动压电陶瓷换能器	
5.2 差动式电感传感器	126	的实例	166
5.3 差动变压器式传感器	128	参考文献	167
5.3.1 Π 形差动变压器的输出特性	129	第八章 半导体传感器	168
5.3.2 螺管形差动变压器	131	8.1 半导体温度传感器	168
5.4 电动式传感器	133	8.1.1 接触型半导体传感器	168
参考文献	134	8.1.2 非接触型半导体温度传感器	181
第六章 压电传感器	135	8.2 半导体湿度传感器	184
6.1 晶体的压电效应	135	8.2.1 湿度的定义	184
6.1.1 晶体压电效应的说明	135	8.2.2 湿度传感器的主要参数	184
6.1.2 压电方程	135	8.2.3 湿度传感器器件	186
6.1.3 压电材料	137	8.2.4 半导体陶瓷湿度传感器的	
6.2 压电加速度传感器	137	检测精度	194

8.3 半导体气体传感器	195	10.1.1 由来	232
8.3.1 半导体电阻型气敏器件	195	10.1.2 特点	233
8.3.2 非电阻控制型半导体气敏器件	199	10.2 温敏 Z 元件的伏安特性	233
8.3.3 半导体气敏传感器的气敏 选择性	201	10.3 基本应用电路	234
8.3.4 纳米技术在半导体陶瓷气体 传感器中的应用	202	10.4 应用开发的基本原理	235
8.3.5 半导体气体传感器的应用	203	10.4.1 应用开发综述	235
8.4 半导体磁敏传感器	205	10.4.2 状态转换条件	235
8.4.1 磁敏器件的工作原理	205	10.4.3 基本应用举例	236
8.4.2 半导体磁敏器件	206	10.5 力敏 Z 元件简介	240
8.4.3 磁传感器应用举例	216	参考文献	240
参考文献	219	第十一章 传感器电路	242
第九章 电位器式传感器	220	11.1 传感器的匹配	242
9.1 线性电位器	220	11.1.1 变压器匹配	242
9.1.1 空载特性	220	11.1.2 高输入阻抗放大器	242
9.1.2 阶梯特性、阶梯误差和分辨率	222	11.1.3 电荷放大器	244
9.2 非线性电位器	223	11.2 信号处理电路	244
9.2.1 变骨架式非线性电位器	223	11.2.1 滤波电路	244
9.2.2 变节距式非线性线绕电位器	225	11.2.2 电平转换电路	248
9.2.3 分路(并联)电阻式非线性 电位器	226	11.2.3 采样—保持电路	248
9.3 负载特性与负载误差	227	11.2.4 A/D 转换电路	248
9.4 电位器式传感器	229	11.2.5 数字信号处理器	250
9.4.1 电位器式位移传感器	229	11.3 信号传输	250
9.4.2 电位器式压力传感器	230	11.4 抗干扰设计	251
9.4.3 电位器式加速度传感器	230	11.4.1 电阻器	252
参考文献	231	11.4.2 电容器	253
第十章 Z—半导体敏感元件	232	11.4.3 电感器	253
10.1 Z—半导体敏感元件的由来与特点	232	11.4.4 数字器件	254
		11.4.5 电路干扰的控制	254
		11.5 实际传感器电路举例	255
		参考文献	261

第一章

引言

信息革命的两大重要支柱是信息的采集和处理。信息采集的关键是传感器。传感器技术已成为现代信息技术的重要支柱之一，在当代科学技术中占有十分重要的地位。传感器的性能在很大程度上决定着整个信息技术的性能，其生产能力与应用水平直接影响到技术的发展与应用。传感器作为向自然界获取信息的工具，几乎渗透到科学技术和国民经济的每个角落。

1.1 传感器的发展和作用

人类为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官。人类依靠这些器官接受来自外界的刺激，再通过大脑分析判断，发出命令而动作。随着科学技术的发展和人类社会的进步，人类为了进一步认识自然和改造自然，只靠这些感觉器官就显得很不够了。于是，一系列代替、补充、延伸人的感觉器官功能的各种手段就应运而生，从而出现了各种用途的传感器。

传感器的历史可以追溯到远古时代，公元前 1000 年左右，中国的指南针、记里鼓车已开始使用。埃及王朝时代开始使用的天平，一直延用到现在。利用液体膨胀进行温度测量在 16 世纪前后就已出现。19 世纪建立了电磁学的基础，当时建立的物理法则直到现在作为各种传感器的工作原理仍在应用着。

以电量作为输出的传感器，其发展历史最短，但是随着真空管和半导体等有源元件的可靠性的提高，这种传感器得到飞速发展。目前只要提到传感器，一般是指具有电输出的装置。由于集成电路技术和半导体应用技术的发展，研究开发了性能更好的传感器。随着电子设备水平不断提高以及功能不断加强，传感器也越来越显得重要。世界各国都将传感器技术列为重点发展的高新技术，传感器技术已成为高新技术竞争的核心技术之一，并且发展十分迅速。

传感器技术的发展十分迅速的原因有如下几点：

- (1) 电子工业和信息技术促进了传感器产业的相应发展。
- (2) 政府对传感器产业发展提供资助并大力扶植。
- (3) 国防、空间技术和民用产品有广大的传感器市场。
- (4) 在许多高新技术领域可获得用于开发传感器的理论和工艺。

从市场来看，力、压力、加速度、物位、温度、湿度、水分等传感器将保持较大的需求量。传感器的市场结构如表 1.1 所示。

表 1.1 传感器市场结构

应用领域	所占比例/%	应用领域	所占比例/%
信息处理与通讯	8	环保气象安全	10
科学仪器仪表	11.7	资源与海洋开发	1.4
电力与能源	5.3	医疗卫生	11
机械制造设备	18.1	农业渔业	0.7
家用电器	13.9	土木建筑与工程	0.7
汽车	7.3	商业金融	0.2
运输	1.6	其他	7.3
空间开发	2.7		

近年来,由于微电子技术、微机械加工技术、纳米技术的迅速发展,传感器领域的主要技术也将在现有基础上予以延伸和提高:

(1) 微机械加工技术(MEMT)和纳米技术将得到高速发展。采用 MEMT 制作的传感器和微系统,具有体积小、低成本、高可靠性等独特的优点。

(2) 新型敏感材料将加速开发,微电子、光电子、生物化学、信息处理等各学科的互相交叉、渗透和综合利用,将会研制出一批新颖、先进的传感器。

(3) 敏感元件与传感器的应用领域将得到新的开拓,二次传感器和传感器系统的应用将大幅度增长。

展望未来,传感器将向着小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化的方向发展,由微传感器、微执行器及信号和数据处理器总装集成的系统越来越引起人们的广泛关注。传感器市场将会迅速发展,并会加速新一代传感器的开发和产业化。

1.2 什么是传感器

传感器是与人的感觉器官相对应的元件。国家标准 GB 7665—87 对传感器下的定义是:“能够感受规定的被测量并按照一定的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”。

敏感元件,是指传感器中能直接感受或响应被测量(输入量)的部分;转换元件,是指传感器中能将敏感元件感受的或响应的被探测量转换成适于传输和(或)测量的电信号的部分。

图 1.1 为传感器组成方块图,此图也说明了传感器的基本组成和工作原理。

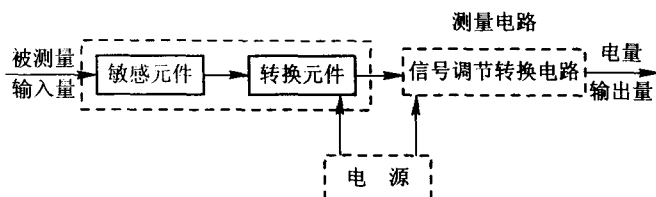


图 1.1 传感器组成方块图

实际上,有些传感器并不能明显区分敏感元件和转换元件两个部分,而是二者合为一体。例如,压电传感器、热电偶等,没有中间转换环节,直接将被测量转换成电信号。

1.3 传感器的分类

传感器种类繁多,功能各异。由于同一被测量可用不同转换原理实现探测,利用同一种物理法则、化学反应或生物效应可设计制作出检测不同被测量的传感器,而功能大同小异的同一类传感器可用于不同的技术领域,故传感器有不同的分类法。

(1) 根据传感器感知外界信息所依据的基本效应,可以将传感器分成三大类:基于物理效应如光、电、声、磁、热等效应进行工作的物理传感器;基于化学反应如化学吸附、选择性化学反应等进行工作的化学传感器;基于酶、抗体、激素等分子识别功能的生物传感器。

(2) 按工作原理分类,可分为应变式、电容式、电感式、电磁式、压电式、热电式等传感器。

(3) 根据传感器使用的敏感材料分类,可分为半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器等等。

(4) 按照被测量分类,可分为力学量传感器、热量传感器、磁传感器、光传感器、放射线传感器、气体成分传感器、液体成分传感器、离子传感器和真空传感器等等。

(5) 按能量关系分类,可分为能量控制型和能量转换型两大类。所谓能量控制型是指其变换的能量是由外部电源供给的,而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用。如用电桥测量电阻温度变化时,温度的变化改变了热敏电阻的阻值,热敏电阻阻值的变化使电桥的输出发生变化(注意电桥的输出是由电源供给的)。而能量转换型是由传感器输入量的变化直接引起能量的变化。如热电效应中的热电偶,当温度变化时,直接引起输出电势改变。再如,传声器直接将声信号转化成电信号输出。

(6) 按传感器是利用场的定律还是利用物质的定律,可分为结构型传感器和物性型传感器。二者组合兼有两者特征的传感器称为复合型传感器。场的定律是关于物质作用的定律,例如动力场的运动定律、电磁场的感应定律、光的干涉现象等。利用场的定律做成的传感器,如电动式传感器、电容式传感器、激光检测器等。物质的定律是指物质本身内在性质的规律。例如弹性体遵从的虎克定律、晶体的压电性、半导体材料的压阻、热阻、光阻、湿阻、霍尔效应等。利用物质的定律做成的传感器,如压电式传感器、热敏电阻、光敏电阻、光电管等。

(7) 按依靠还是不依靠外加能源工作,可分为有源传感器和无源传感器。有源传感器敏感元件工作需要外加电源,无源传感器工作不需外加电源。

(8) 按输出量是模拟量还是数字量,可分为模拟量传感器和数字量传感器。

表 1.2 列出了传感器的分类。尽管此处列出的传感器分类有较大的概括性,但由于传感器的分类不统一,因而这种分类很难完备,例如有的学者将传感器作了如下分类:(1)压力;(2)力/荷重;(3)位移(厚度);(4)力矩;(5)角度;(6)角速度(转速);(7)速度;(8)加速度;(9)角加速度;(10)倾斜角;(11)编码器;(12)振动;(13)气体/烟雾;(14)温度;(15)热能;(16)湿度;(17)水份;(18)露点;(19)液位;(20)料位;(21)流量;(22)流速;

(23)风速；(24)电流；(25)电压；(26)电功率；(27)电频率；(28)接近开关；(29)磁性开关；(30)光电开关；(31)pH 值；(32)电阻率；(33)电导率；(34)水溶氧；(35)生物；(36)红外线；(37)紫外线；(38)光纤；(39)离子；(40)激光；(41)超声波；(42)声音/噪声；(43)触觉；(44)图像/颜色；(45)密度/粘度；(46)混浊度。

表 1.2 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说明
按依据的效应分类	物理传感器 化学传感器 生物传感器	基于物理效应(光、电、声、磁、热) 基于化学效应(吸附、选择性化学反应) 基于生物效应(酶、抗体、激素等的分子识别和选择功能)
按输入量分类	位移、速度、温度、压力、 气体成分、浓度等传感器	传感器以被测量命名
按工作原理分类	应变式、电容式、电感式、 电磁式、压电式、热电式传感器等	传感器以工作原理命名
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器	输出为模拟量 输出为数字量
按能量关系分类	能量转换型传感器 能量控制型传感器	直接将测量转换为输出量的能量 由外部供给传感器能量，而由被测量控制输出量能量
按是利用场的定律还是利用物质的定律分类	结构型传感器 物性型传感器	通过敏感元件几何结构参数变化实现信息转换 通过敏感元件材料物理性质的变化实现信息转换
按是否依靠外加能源分类	有源传感器 无源传感器	传感器工作需外加电源 传感器工作无需外加电源
按使用的敏感材料分类	半导体传感器、光纤传感器、 陶瓷传感器、金属传感器、 高分子材料传感器、复合材料传感器等	传感器以使用的敏感材料命名

1.4 传感器的性能和评价

为了更好地掌握和使用传感器，必须事先充分了解传感器的特性。传感器的各种特性一般是根据输入和输出的对应关系来描述的。传感器在稳态(静态或准静态)信号作用下，输入和输出的对应关系称为静态特性；在动态(周期或暂态)信号作用下，输入和输出的对应关系称为动态特性。

1.4.1 传感器的静态特性

1. 灵敏度

灵敏度是描述传感器的输出量(一般为电学量)对输入量(一般为非电学量)敏感程度的特性参数。其定义为:传感器输出量的变化值与相应的被测量(输入量)的变化值之比,用公式表示为

$$k(x) = \frac{\text{输出量的变化值}}{\text{输入量的变化值}} = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

可见,传感器校准曲线的斜率即为灵敏度。对线性传感器来说,灵敏度是一个常数;非线性传感器的灵敏度则随输入量变化。

2. 线性度

理想的传感器输出与输入呈线性关系。然而,实际的传感器即使在量程范围内,输出与输入的线性关系严格来说也是不成立的,总存在一定的非线性。线性度是评价非线性程度的参数。其定义为:传感器的输出—输入校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏差与传感器满量程输出之比,称为该传感器的“非线性误差”或称“线性度”,也称“非线性度”。通常用相对误差表示其大小:

$$e_l = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中, e_l 为非线性误差(线性度), $\Delta_{\max}$ 为校准曲线与理想拟合直线间的最大偏差, Y_{FS} 为传感器满量程输出平均值,如图 1.2 所示。

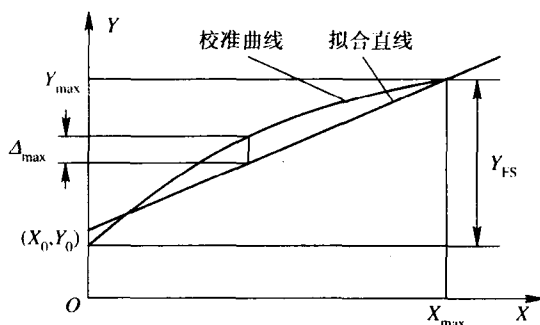


图 1.2 非线性误差说明

非线性误差大小是以一拟合直线或理想直线作为基准直线计算出来的,基准直线不同,所得出的线性度就不一样。因而不能笼统地提线性度或非线性误差,必须说明其所依据的基准直线。按照所依据的基准直线的不同,有理论线性度、端基线性度、独立线性度、最小二乘法线性度等。最常用的是最小二乘法线性度。

理论线性度:拟合直线为理论直线,通常以 0% 作为直线起始点,满量程输出 100% 作为终止点。

端基线性度:以校准曲线的零点输出和满量程输出值连成的直线为拟合直线。

独立线性度:作两条与端基直线平行的直线,使之恰好包围所有的标定点,以与二直线等距离的直线作为拟合直线。

最小二乘法线性度:以最小二乘法拟合的直线为拟合直线。

3. 灵敏度界限(阈值)

输入改变 Δx 时,输出变化 Δy , Δx 变小, Δy 也变小。但是一般来说, Δx 小到某种程度,输出就不再变化了,这时的 Δx 叫做灵敏度界限。

存在灵敏度界限的原因有两个。一个是输入的变化量通过传感器内部被吸收,因而反映不到输出端上去。典型的例子是螺丝或齿轮的松动。螺丝和螺帽,齿条和齿轮之间多少都有空隙,如果 Δx 相当于这个空隙的话,那么 Δx 是无法传递出去的。又例如,装有轴承

的旋转轴，如果不加上能克服轴与轴之间摩擦的力矩的话，轴是不会旋转的。第二个原因是传感器输出存在噪声。如果传感器的输出值比噪声电平小，就无法把有用信号和噪声分开。如果不加上最起码的输入值(这个输入值所产生的输出值与噪音的电平大小相当)是得不到有用的输出值的，该输入值即灵敏度界限。灵敏度界限也叫灵敏阈，门槛灵敏度，或阈值。

4. 迟滞差

输入逐渐增加到某一值，与输入逐渐减小到同一输入值时的输出值不相等，叫迟滞现象。迟滞差表示这种不相等的程度。其值以满量程的输出 Y_{FS} 的百分数表示。

$$e_t = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\%$$

或者

$$e_t = \pm \frac{\Delta_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\%$$

式中， $\Delta_{\max}$ 为输出值在正反行程的最大差值。如图 1.3 所示， $\Delta_{\max} = Y_2 - Y_1$ 。

图 1.3 是这种现象稍微夸张了的曲线。一般来说输入增加到某值时的输出要比输入下降到该值时的输出值小，正如图 1.3 所示。如存在迟滞差，则输入和输出的关系就不是一一对应了，因此必须尽量减少这个差值。

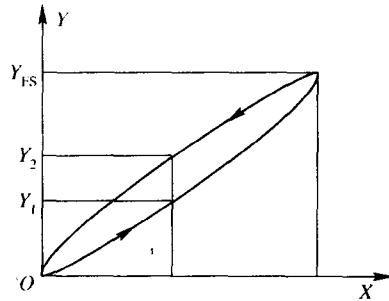


图 1.3 迟滞曲线

各种材料的物理性质是产生迟滞现象的原因。如把应力加于某弹性材料时，弹性材料产生变形，应力虽然取消了但材料不能完全恢复原状。又如，铁磁体、铁电体在外加磁场、电场作用下均有这种现象。迟滞也反映了传感器机械部分不可避免的缺陷，如轴承摩擦、间隙、螺丝松动等。各种各样的原因混合在一起导致了迟滞现象的发生。

5. 稳定性

稳定性表示传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。

理想的情况是，不管什么时候传感器的灵敏度等特性参数不随时间变化。但实际上，随着时间的推移，大多数传感器的特性会改变。这是因为传感元件或构成传感器的部件的特性随时间发生变化，产生一种经时变化的现象。即使长期放置不用的传感器也会产生经时变化的现象。变化与使用次数有关的传感器，受到这种经时变化的影响更大。因此，传感器必须定期进行校准，特别是作标准用的传感器更是这样。

1.4.2 传感器的动态特性

大多数情况下传感器的输入信号是随时间变化的，这时要求传感器时刻精确地跟踪输入信号，按照输入信号的变化规律输出信号。当传感器输入信号的变化缓慢时，是容易跟踪的，但随着输入信号的变化加快，传感器随动跟踪性能会逐渐下降。输入信号变化时，引起输出信号也随时间变化，这个过程叫做响应。动态特性就是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。响应特性即动态特性，是传感器的重要特性之一。

1. 传递函数

1) 定义

假设传感器在输入输出存在线性关系(即传感器是线性的,特性不随时间变化)的范围内使用,则它们之间的关系可用高阶常系数线性微分方程表示:

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

式中, y 为输出量, x 为输入量, a_i, b_i 为常数。对上式进行拉普拉斯变换, 由

$$L\left\{\frac{d^n y}{dt^n}\right\} = s^n Y(s) - s^{n-1}y(0) - s^{n-2} \frac{dy}{dt}(0) - \cdots - \frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}}(0)$$

并设 $t=0$ 时, $\frac{d^i y}{dt^i}, \frac{d^i x}{dt^i}, (i=0, 1, \cdots)$ 全部为 0, 得到

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.1)$$

式中, $X(s)$ 是输入的拉氏变换, $Y(s)$ 是输出的拉氏变换, $G(s)$ 称为拉氏形式的传递函数, 或简称传递函数。即输出的拉氏变换等于输入的拉氏变换乘以传递函数。

传递函数在数学上的定义是: 初始条件为零时, 输出量(响应函数)的拉氏变换与输入量(激励函数)的拉氏变换之比。

传递函数表示系统本身的传输、转换特性, 与激励及系统的初始状态无关。同一传递函数可能表征着两个完全不同的物理(或其他)系统, 但说明它们有相似的传递特性。

2) 系统的串联和并联

两个各有 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 传递函数的系统串联后, 如果它们的阻抗匹配合适, 相互之间不影响彼此的工作状态, 如图 1.4(a) 所示, 则其传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Z(s)}{X(s)} \cdot \frac{Y(s)}{Z(s)} = G_1(s) \cdot G_2(s)$$

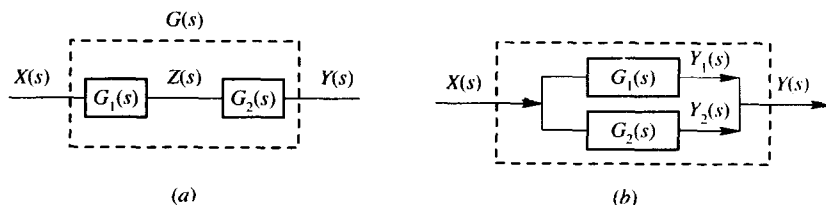


图 1.4 两个系统的串联和并联

(a) 串联; (b) 并联

对于由 n 个系统串联组成的新系统, 则其传递函数为

$$G(s) = \prod_{i=1}^n G_i(s)$$

如果两个系统并联时, 如图 1.4(b) 所示, 则其传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Y_1(s) + Y_2(s)}{X(s)} = \frac{Y_1(s)}{X(s)} + \frac{Y_2(s)}{X(s)} = G_1(s) + G_2(s)$$

对于由 n 个系统并联组成的新系统, 则其传递函数为

$$G(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s)$$

3) 零阶、一阶和二阶(传感器)系统

当传递函数中, 只有 a_0 与 b_0 不为零

$$a_0 y = b_0 x$$

即

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = kx$$

称为零阶系统(传感器)。这种传感器输出能精确地跟踪输入, 电位器式传感器就是一种零阶系统。

除系数 a_1, a_0, b_0 外, 其他系数均为零的系统称为一阶系统。由弹簧和阻尼组成的机械系统就是典型的一阶传感器。RC 回路、液体温度计等也属于一阶系统。

只有 a_2, a_1, a_0, b_0 不为零的系统称为二阶系统, 电动式振动传感器、RLC 谐振线路为二阶系统。

4) 传递函数的分解

传感器一般可以近似为集总参数的、线性的、特性不随时间变化的系统。其一般形式的传递函数如式(1.1)所示。为了说明问题方便并根据大多数传感器的情况, 可假设

$$b_m = b_{m-1} = \cdots = b_1 = 0$$

则(1.1)式可简化为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

其中分母是 s 的实系数多项式。方程式

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0 = 0$$

的根有 n 个。因为是实系数, 所以复根有偶数个(由共轭复根组成), 剩下的是实根。因而分母多项式总可以分解为一次和二次的实系数因子, 传递函数可写成

$$G(s) = A \prod_{i=1}^r \left(\frac{1}{s + p_i} \right) \cdot \prod_{j=1}^{(n-r)/2} \left(\frac{1}{s^2 + 2\xi_j \omega_{n_j} s + \omega_{n_j}^2} \right)$$

上式中, 每一个因子式可以看成是一个子系统的传递函数。其中 A 是零阶系统的传递函数;

$\frac{1}{s + p_i}$ 是一阶系统传递函数; 而 $\frac{1}{s^2 + 2\xi_j \omega_{n_j} s + \omega_{n_j}^2}$ 则是二阶系统的传递函数。由此可见, 一个

复杂的高阶系统总是可以看成是由若干个零阶、一阶和二阶系统串联而成的。

另一方面, 如果将上式的右边作部分分式展开, 则将得到另一种等价的形式:

$$G(s) = \sum_{i=1}^r \frac{q_i}{s + p_i} + \sum_{j=1}^{(n-r)/2} \frac{\alpha_j s + \beta_j}{s^2 + 2\xi_j \omega_{n_j} s + \omega_{n_j}^2}$$

上式表示一个高阶系统, 也可以看成是由若干个一阶和二阶系统并联而成的。

综上所述可知, 一个高阶系统的传感器总可以看成是由若干个零阶、一阶和二阶系统组合而成的。一阶系统和二阶系统的响应是最基本的响应, 所以下面着重讨论一阶和二阶系统的动态特性。

5) 传递函数的功用

(1) 传递函数的功用之一是, 在方块图中用作表示系统的图示符号, 如图 1.5 所示。

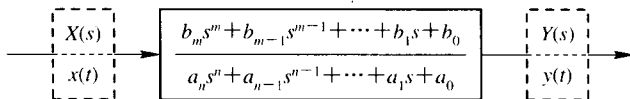


图 1.5 系统的图示符号

(2) 另一方面, 当组成系统的各个元件或环节的传递函数已知时, 可以用传递函数来确定该系统的总特性, 可用单个环节的传递函数的乘积表示系统的传递函数, 如图 1.6 所示。

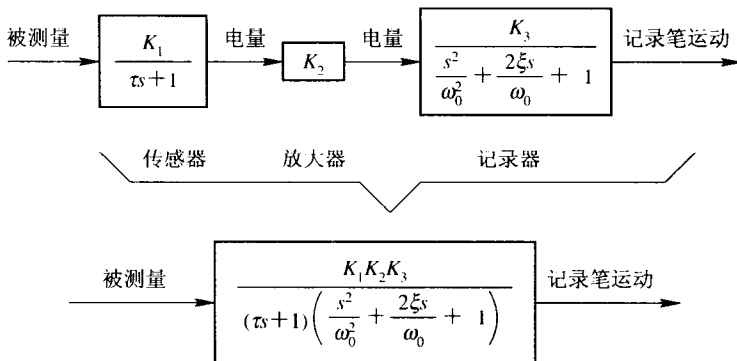


图 1.6 系统的传递函数

(3) 对于复杂系统的求解, 我们可以将其化成简单系统的组合, 其解则为简单系统解的组合。

2. 一阶(惯性)系统的动态响应

一阶系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} = \frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_1}{a_0} s + 1} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

式中, $k = b_0/a_0$ 是系统的静态灵敏度, $\tau = a_1/a_0$ 为时间常数(量纲为时间)。

进一步写为

$$G(s) = \frac{k/\tau}{s + 1/\tau}$$

1) 一阶系统的冲激响应

设输入信号为 δ 函数, 即

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

且

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (\text{为单位脉冲函数})$$

其输出称为冲激响应。因为

$$L\{\delta(t)\} = 1$$

所以

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s) = G(s) = \frac{k/\tau}{s + 1/\tau}$$

求反变换得

$$y(t) = \frac{k}{\tau} e^{-\frac{1}{\tau}t}$$

其相应的曲线如图 1.7 所示。

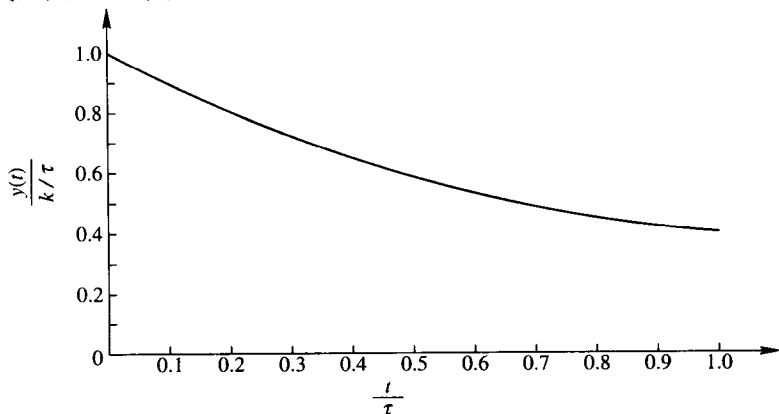


图 1.7 一阶系统的冲激响应曲线

由图可知：在冲激信号出现的瞬间(即 $t=0$)响应函数也突然跃升，其幅度与 k 成正比，而与时间常数 $\tau=a_1/a_0$ 成反比；在 $t>0$ 时，作指数衰减， t 越小衰减越快，响应的波形也越接近脉冲信号。

2) 一阶系统的阶跃响应

一个起始静止的传感器若输入一单位阶跃信号

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

其输出信号称为阶跃响应。因为

$$L\{u(t)\} = \frac{1}{s}$$

则

$$\begin{aligned} Y(s) &= G(s) \cdot X(s) \\ &= \frac{k}{\tau} \cdot \frac{1}{(s + 1/\tau)s} \end{aligned}$$

由拉氏变换得

$$y(t) = k(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t})$$

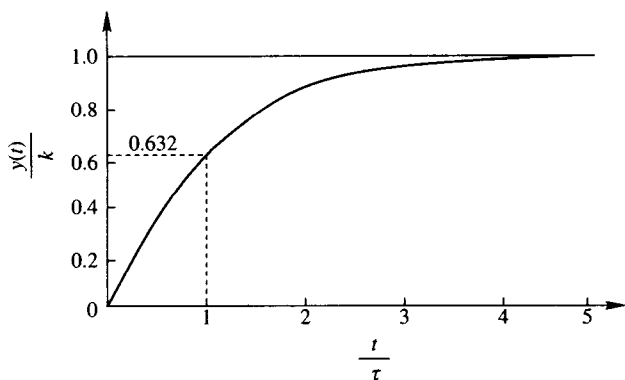


图 1.8 一阶系统的阶跃响应曲线

其响应曲线如图 1.8 所示。由上式和图 1.8 可知，稳态响应是输入阶跃值的 k 倍，暂态响应是指数函数， $t \rightarrow \infty$ 时才能达到最终的稳态值。当 $t=\tau$ 时， $y(t)=k(1-e^{-1})=0.632k$ ，即达到稳态值的 63.2%。由此可知 τ 越小，响应曲线越接近于阶跃曲线，所以时间常数 τ 是反映一阶系统动态响应优劣的关键参数。

3) 一阶系统的频率响应

一定振幅的周期信号输入传感器时，如果这个信号振幅是在传感器的线性范围之内，

那么传感器的输出可以通过传递函数求出。由于周期信号可用傅里叶级数表示,因此可以把输入信号看成是正弦或余弦函数。 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$ 的拉氏变换分别为 $\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$, $\frac{s}{s^2+\omega^2}$, 这两个变换乘以传递函数 $G(s)$, 然后求其逆变换, 就可以得到系统响应 $y(t)$ 。 $y(t)$ 包括瞬态响应成分和稳态响应成分。瞬态响应随时间的推移会逐渐消失直到稳定, 因此瞬态响应可忽略不计。

将各频率不同而幅度相等的正弦信号输入传感器, 其输出信号(也是正弦)的幅度及相位与频率之间的关系, 就称为频率响应特性。频率响应特性可由频率响应函数表示, 由幅一频和相一频特性组成。

设输入信号为

$$x(t) = \sin\omega t$$

$$L\{x(t)\} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$$

$$Y(s) = \frac{k\omega}{\tau} \cdot \frac{1}{(s + 1/\tau)(s^2 + \omega^2)}$$

求反变换得

$$y(t) = \frac{k\omega}{\tau} \cdot \frac{1}{(1/\tau)^2 + \omega^2} e^{-\frac{1}{\tau}t} + \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{(k\omega/\tau)^2}{(1/\tau)^2 + \omega^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

其中

$$\varphi = -\arctan\omega\tau$$

$y(t)$ 包括瞬态响应成分和稳态响应成分。上式中第一项瞬态响应随时间的推移会逐渐消失, 因此瞬态响应就可以忽略不计。所以稳态响应

$$y(t) = k \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \sin(\omega t + \varphi)$$

表示为

$$y(t) = H(\omega) \sin(\omega t + \varphi)$$

其中幅一频特性

$$H(\omega) = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}}$$

相一频特性

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau)$$

将 $H(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 绘成曲线, 如图 1.9 所示。图中纵坐标增益采用分贝值, 横坐标 ω 也是对数坐标, 但直接标注 ω 值。这种图又称为伯德(Bode)图。

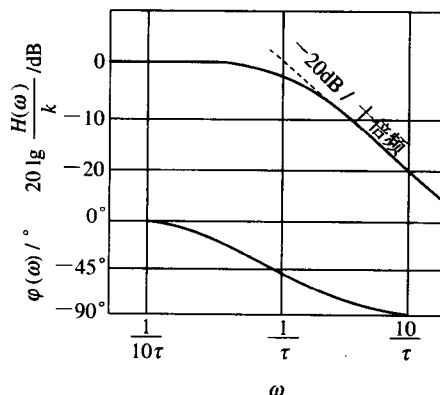


图 1.9 一阶系统的伯德(Bode)图

由图可知, 一阶系统只有在 τ 很小时才近似于零阶系统特性(即 $H(\omega)=k$, $\varphi(\omega)=0$)。当 $\tau=1$ 时, 传感器灵敏度下降了 3 dB(即 $H(\omega)=0.707k$)。如果取灵敏度下降到 3 dB 时的频率为工作频带的上限, 则一阶系统的上截止频率为 $\omega_H=1/\tau$, 所以时间常数 τ 越小, 则工作频带越宽。

综上所述, 用一阶系统描述的传感器, 其动态响应特性的优劣也主要取决于时间常数 τ 。 τ 越小越好, τ 小时, 则阶跃响应的上升过程快, 而频率响应的上截止频率高。