

传感器

原理及其应用

俞阿龙 李 正 孙红兵 孙华军 编著



南京大学出版社

传感器

原理及其应用

俞阿龙 李 正 孙红兵 孙华军 编著



南京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及其应用 / 俞阿龙等编著. —南京: 南京大学出版社, 2010. 2

ISBN 978-7-305-06750-1

I. ①传… II. ①俞… III. ①传感器
IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 030864 号

出版者 南京大学出版社
社 址 南京市汉口路 22 号
网 址 <http://www.NjupCo.com>
出版人 左 健

书 名 传感器原理及其应用
编 著 俞阿龙 李 正 孙红兵 孙华军
责任编辑 蔡文彬 编辑热线 025-83686531

照 排 南京玄武湖印刷照排中心
印 刷 南京紫藤制版印务中心
开 本 787×1092 1/16 印张 18 字数 449 千
版 次 2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷
ISBN 978-7-305-06750-1
定 价 34.00 元

发行热线 025-83594756
电子邮箱 Press@NjupCo.com
Sales@NjupCo.com(市场部)

* 版权所有, 侵权必究

* 凡购买南大版图书, 如有印装质量问题, 请与所购图书销售部门联系调换

前 言

在信息化高度发展的今天,作为拾取信息的“五官”——传感器,其作用越来越重要。传感器是将电子系统无法处理的各种物理、化学和生物等非电量转换为电信号的主要器件。对于测量与控制系统而言,传感器是构成对各种物理、化学和生物等非电量加以检测的前端器件;没有它,就没有信息的传输、处理和应用,也就没有信息化。因此在当今世界,传感器技术已是涉及国民经济及国防科研的最重要技术之一,各发达国家都将传感器技术作为重点技术加以发展。为了适应传感器的教学、研制、生产和应用的需要,我们编写了这本书。

我们的编写原则是注重实用性,同时考虑到先进性和应用性,还要尽可能地覆盖传感器的各个领域。为了使读者能更好地掌握传感器及其应用技术,进而开发应用传感器,我们从应用的角度介绍了各种传感器的基本工作原理及特性。

我们编写的方法是深入浅出,简明扼要。本书按原理分类,系统地阐述各种传感器的基本理论、工作原理、结构、特性及具体的应用实例;本书取材新颖、内容丰富、结构合理、深入浅出,同时重点突出、原理分析清楚、举例典型、易于接受、语言简练、逻辑性强、可读性好,将传感器领域新发展和新成果较好地反映出来。全书共有十四章,着重论述了电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式和超声波传感器、磁电式传感器、热电式传感器、光电式传感器、光纤传感器、磁敏传感器、气体传感器、湿度传感器、生物传感器、智能传感器以及各种传感器的应用。每章都配有一定数量的习题。

该书在编写过程中,参考了国内外有关方面的书刊,编者在这里向被选用书刊文章的原作者表示感谢。

本书适合于高等院校测控技术与仪器、电气工程、自动化、电子信息工程等专业和其他相关专业的本科生作为教材或参考书,也可供工程技术人员参考。

由于编者水平有限,编写时间又仓促,出现错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2009年11月

目 录

第 1 章 传感器的一般特性	1
1.1 传感器的组成和分类	1
1.1.1 传感器的定义和组成	1
1.1.2 传感器的分类	1
1.2 传感器的地位和作用	2
1.3 传感器的发展方向	2
1.4 传感器的静态与动态特性	4
1.4.1 静态特性	4
1.4.2 动态特性	5
1.5 传感器的标定与校准	10
1.5.1 传感器的标定	10
1.5.2 传感器的校准	11
第 2 章 电阻应变式传感器及其应用	12
2.1 应变式传感器	12
2.1.1 金属电阻应变片工作原理	12
2.1.2 应变计的主要特性	14
2.1.3 温度误差及其补偿	18
2.1.4 应变片式电阻传感器的测量电路	20
2.1.5 应变式传感器的应用	23
2.2 压阻式传感器	28
2.2.1 半导体应变计	28
2.2.2 工作原理	29
2.2.3 测量桥路及温度补偿	30
2.2.4 压阻传感器的应用	32
第 3 章 电感式传感器及其应用	35
3.1 自感式传感器	35
3.1.1 自感式传感器结构与工作原理	35
3.1.2 自感式传感器灵敏度及特性分析	36
3.1.3 差动式自感传感器	37
3.1.4 自感式传感器的测量电路	39
3.1.5 自感式传感器的应用	40

3.2 互感式传感器	41
3.2.1 差动变压器式传感器结构与工作原理	41
3.2.2 差动变压器式传感器输出特性	42
3.2.3 差动变压器式传感器的应用	46
3.3 电涡流式传感器	47
3.3.1 电涡流式传感器工作原理	48
3.3.2 电涡流式传感器的应用	49
第4章 电容式传感器及其应用	53
4.1 电容式传感器的工作原理及类型	53
4.1.1 电容式传感器的工作原理	53
4.1.2 电容式传感器的类型	53
4.2 电容传感器的等效电路和测量电路	55
4.2.1 电容式传感器等效电路	55
4.2.2 电容式传感器测量电路	55
4.3 电容传感器的主要性能、特点与设计要点	59
4.3.1 主要性能	59
4.3.2 特点	61
4.3.3 设计要点	62
4.4 电容式传感器的应用	65
4.4.1 电容式加速度传感器	66
4.4.2 电容式差压传感器	66
第5章 压电式和超声波传感器及其应用	69
5.1 压电式传感器	69
5.1.1 晶体的压电效应及压电材料	69
5.1.2 压电式传感器等效电路和测量电路	71
5.1.3 压电传感器的应用	74
5.2 超声波传感器	75
5.2.1 超声检测的物理基础	75
5.2.2 超声波传感器原理与种类	76
5.2.3 超声波传感器基本应用电路	79
5.2.4 超声检测技术的应用	81
第6章 磁电式传感器及其应用	84
6.1 磁电式传感器的工作原理	84
6.2 磁电式传感器的结构	86
6.2.1 动钢型磁电式传感器	86
6.2.2 动圈型磁电式传感器	86

6.2.3 磁电式传感器设计要点	87
6.2.4 磁电式传感器测量电路	89
第7章 热电式传感器及其应用	93
7.1 热电偶	93
7.1.1 热电偶的工作原理	93
7.1.2 热电偶的种类和结构	95
7.1.3 热电偶的冷端处理及补偿	98
7.1.4 热电偶的主要特性	101
7.1.5 热电偶安装注意事项	102
7.1.6 热电偶热电势测量及其误差分析	102
7.2 热电阻	103
7.2.1 金属热电阻	103
7.2.2 热敏电阻	107
第8章 光电式传感器及其应用	111
8.1 光电器件	111
8.1.1 光电管	111
8.1.2 光电倍增管	113
8.1.3 光敏电阻	115
8.1.4 光电二极管和光电三极管	118
8.1.5 光电池	121
8.2 光电数字式传感器	123
8.2.1 数字式传感器分类和特点	123
8.2.2 光电角度编码器	124
8.2.3 直线位移编码器	125
8.2.4 光电数字式传感器系统使用注意事项	127
8.2.5 光电数字式传感器测量技术	127
8.3 电荷耦合器件(CCD)图像传感器原理及其应用	130
8.3.1 CCD的工作原理	130
8.3.2 CCD的基本特性参数	133
8.3.3 CCD的应用	133
第9章 光纤传感器及其应用	136
9.1 光导纤维的基本知识	136
9.1.1 光导纤维结构和导光原理	136
9.1.2 光纤的几个重要参数	137
9.2 光纤传感器的工作原理	138
9.2.1 强度调制型光纤传感器	139

9.2.2	相位调制型光纤传感器	141
9.2.3	频率调制型光纤传感器	150
9.2.4	偏振调制型光纤传感器	151
9.2.5	光纤布拉格光栅传感器	153
第 10 章	磁敏传感器及其应用	157
10.1	霍尔传感器	157
10.1.1	霍尔传感器原理	157
10.1.2	霍尔组件的外形和构造	159
10.1.3	霍尔组件主要技术指标	160
10.1.4	基本误差和补偿	161
10.1.5	霍尔组件电路	163
10.1.6	霍尔集成传感器	165
10.1.7	霍尔传感器的应用	168
10.2	磁阻组件	170
10.2.1	磁阻效应	170
10.2.2	磁阻组件	171
10.2.3	磁阻组件的应用	173
10.3	结型磁敏管	175
10.3.1	磁敏二极管	175
10.3.2	磁敏三极管	177
10.3.3	磁敏管的应用	179
10.4	超导量子干涉器件	180
10.4.1	约瑟夫森效应	180
10.4.2	超导量子干涉器件检测装置	181
10.5	磁通门式磁敏传感器	183
10.5.1	磁通门式基本原理、结构和特点	183
10.5.2	磁通门式传感器测磁方法	184
10.5.3	磁通门式传感器应用	188
第 11 章	气体传感器及其应用	191
11.1	热导式气体传感器	191
11.1.1	热线式气体传感器	191
11.1.2	热敏电阻气体传感器	192
11.2	接触燃烧式气敏传感器	192
11.3	半导体气体传感器	193
11.3.1	半导体气体传感器及其分类	193
11.3.2	半导体电阻型气敏器件	194
11.3.3	非电阻控制型半导体气敏器件	196

11.3.4	半导体气敏传感器的气敏选择性	198
11.3.5	纳米技术及MEMS技术在半导体气体传感器中的应用	198
11.3.6	半导体气敏传感器测试电路	200
11.4	红外气敏传感器	201
11.4.1	Beer-Lambert 定律	201
11.4.2	热释电红外气体传感器	201
11.5	光纤气敏传感器	203
11.5.1	光谱吸收型气敏传感器	203
11.5.2	折射率变化型气敏传感器	204
11.5.3	消逝场光纤气体传感器	204
11.5.4	光纤荧光气体传感器	205
11.6	气敏传感器的应用实例	205
11.6.1	家用气体报警电路	206
11.6.2	煤气(CO)安全报警电路	207
11.6.3	火灾烟雾报警器	207
11.6.4	酒精探测器	208
第 12 章	湿敏传感器及其应用	210
12.1	湿敏传感器概述	210
12.1.1	湿度及其表示	210
12.1.2	湿敏传感器分类及其特性	210
12.2	电解质湿敏传感器	213
12.2.1	氯化锂电解质湿敏传感器	213
12.2.2	高分子电解质湿敏传感器	214
12.3	有机物及高分子聚合物湿敏传感器	216
12.3.1	胀缩性有机物湿敏元件	216
12.3.2	高分子聚合物薄膜湿敏元件	217
12.4	半导体湿敏传感器	218
12.4.1	元素半导体湿敏器件	218
12.4.2	金属氧化物半导体陶瓷湿敏器件	218
12.4.3	MOSFET 湿敏器件	221
12.4.4	结型湿敏器件	221
12.4.5	集成湿敏器件	222
12.5	湿敏传感器的应用	224
12.5.1	直读式湿度计	225
12.5.2	微波炉湿度检测控制系统	225
12.5.3	汽车玻璃挡板结露控制电路	226
12.5.4	粮仓湿度控制器	227
12.5.5	鸡、鸭雏室湿度控制器	228

第 13 章 生物传感器及其应用	230
13.1 生物传感器简介	230
13.1.1 生物传感器概念	230
13.1.2 生物传感器的基本结构和原理	230
13.1.3 生物传感器的分类	232
13.1.4 生物传感器的特点	232
13.2 生物传感器的敏感元件	233
13.2.1 酶及酶传感器	233
13.2.2 电化学免疫传感器	234
13.2.3 组织传感器	236
13.2.4 电化学 DNA 传感器	236
13.2.5 微生物传感器	237
13.3 生物传感器的信号转换器	237
13.3.1 电位型电极	237
13.3.2 电流型电极	238
13.3.3 氧电极	238
13.3.4 离子敏场效应晶体管	238
13.4 生物传感器的应用	239
13.4.1 在食品工业中的应用	239
13.4.2 在环境监测中的应用	242
13.4.3 在医疗领域的应用	244
13.4.4 在酒精测试上的应用	244
13.4.5 在军事上的应用	244
13.4.6 生物传感器未来发展趋势	244
第 14 章 智能传感器及其应用	246
14.1 智能传感器概述	246
14.1.1 智能传感器的概念	246
14.1.2 智能传感器的功能	246
14.1.3 智能传感器的特点	247
14.2 智能传感器的实现技术	248
14.2.1 非集成化智能传感器	248
14.2.2 集成化智能传感器	249
14.2.3 混合式智能传感器	250
14.3 传感信号的采集	250
14.3.1 敏感元件及其调理电路	251
14.3.2 数据采集电路的配置	252
14.3.3 采样周期的选择	253

14.3.4	A/D 转换器的选择	253
14.4	智能传感器的信号处理技术	254
14.4.1	非线性补偿技术	254
14.4.2	自校零与自动校准技术	257
14.4.3	数字滤波技术	258
14.4.4	时域分析法	260
14.4.5	频域分析法	261
14.5	典型的智能传感器及其应用	261
14.5.1	混合集成压力智能式传感器	261
14.5.2	集成智能式湿度传感器	262
14.5.3	智能电机转速测量系统	263
14.5.4	发动机多参数智能测试系统	264
14.5.5	无线智能传感器及其应用	266
参考文献		272

第1章 传感器的一般特性

传感器技术是现代信息技术的主要内容之一,信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术等,其中计算机相当于人的大脑,通信相当于人的神经,而传感器就相当于人的感官。传感器就是能感受外界信息并能按一定规律将这些信息转换成可用信号的装置,它能够把自然界的各种物理量和化学量等非电量精确地变换为电信号,再经电子电路或计算机进行处理,从而对这些量进行监测或控制。

1.1 传感器的组成和分类

1.1.1 传感器的定义和组成

传感器又称变换器、探测器或检测器,是获取信息的工具。在国家标准《传感器通用术语》中,传感器的定义为:能感受(或响应)规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用输出的转换元件以及相应的基本转换电路所组成,如图1-1所示。

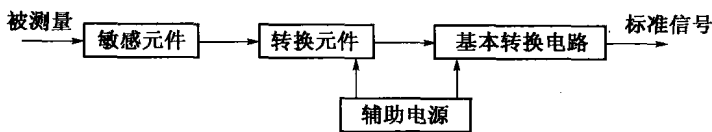


图 1-1 传感器组成框图

1. 敏感元件

直接感受被测量,并以确定关系输出某一物理量。如弹性敏感元件将力转换为位移或应变输出。

2. 转换元件

将敏感元件输出的非电物理量(如位移、应变、光强等)转换成电路参数(如电阻、电感等)或电量。

3. 基本转换电路

将电路参数转换成便于测量的电量,如电压、电流、频率等。

通常,传感器输出信号一般都很微弱,需要有信号调节与转换电路将其放大或变换为容易传输、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可以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的组成部分。

1.1.2 传感器的分类

传感器种类繁多,按照不同的划分标准,具有不同的分类方式。目前采用较多的传感器

分类方法主要有:

1. 按能量供给形式分类

按能量供给形式分无源传感器和有源传感器。无源传感器只是被动地接收来自被测物体的信息;有源传感器则可以有意识地向被测物体施加某种能量,并将来自被测物体的信息变换为便于检测的能量后再进行检测。

2. 从功能角度分类

可将传感器分为:电传感器、磁传感器、位移传感器、压力传感器、振动传感器、声传感器、速度传感器、加速度传感器、流量传感器、流速传感器、真空度传感器、温度传感器、湿度传感器、光传感器、射线传感器、分析传感器、仿生传感器、气体传感器和离子传感器等。

3. 从使用材料分类

可将传感器分为:陶瓷传感器、半导体传感器、复合材料传感器、金属材料传感器、高分子材料传感器。

4. 从技术特点分类

可将传感器分为:电传送、气传送或光传送、位式作用或连续作用、有触点或无触点、模拟式或数字式、常规式或灵巧式、接触式或非接触式、普通型、隔爆型或本安型(本质安全型)等传感器。

1.2 传感器的地位和作用

现代信息产业的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器是信息采集系统的首要部件,鉴于传感器的重要性,发达国家对传感器在信息社会中的作用又有了新的认识和评价。美国把 20 世纪 80 年代看做传感器时代,把传感器技术列为 90 年代 22 项关键技术之一;日本曾把传感器列为十大技术之首;我国的“863”计划、科技攻关等计划中也把传感器研究放在重要的位置。传感器还是测控系统获得信息的重要环节,在很大程度上影响和决定了系统的功能。

不仅工程技术领域中如此,就是在基础科学研究中,由于新机理和高灵敏度检测传感器的出现,也会导致该领域的突破,例如约瑟夫逊效应器件的出现,不仅解决了对于 10^{-13}T 超弱磁场的检测,同时还解决了对 10^{-12}A 及 10^{-23}J 等物理量的高精度检测,还发现和证实了磁单极子的存在,对于多种基础科学的研究和精密计量产生了巨大的影响。所以,20 世纪 80 年代以来,世界各国都将传感器技术列为重点发展的高新技术,备受关注。

1.3 传感器的发展方向

在人类文明史的历次产业革命中,感受、处理外部信息的传感技术一直扮演着一个重要角色。在 18 世纪产业革命以前,传感技术由人的感官实现:人观天象而仕农耕,察火色以冶铜铁。从 18 世纪产业革命以来,特别是在 20 世纪信息革命中,传感技术越来越多地由人造感官,即工程传感器来实现。

传感器技术所涉及的知识非常广泛,渗透到各个学科领域。但是它们的共性是利用物理定律和物质的物理、化学和生物特性,将非电量转换成电量。所以如何采用新技术、新工

艺、新材料以及探索新理论达到高质量的转换,是总的发展途径。

当今,传感器技术的主要发展动向:一是开展基础研究,重点研究传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的微型化、阵列化、集成化和智能化。

1. 发现和应用新现象

利用物理现象、化学反应和生物效应设计制作各种用途的传感器,这是传感器技术的重要基础工作。因此,发现和应用新现象,其意义极为深远。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础,随着物理学和材料科学的进步,人们也有可能通过自由地控制制造出来的材料成分,从而设计制造出用于各种传感器的材料。

3. 发展微机械加工技术

微机械加工技术除全面继承氧化、光刻、扩散、淀积等微电子技术外,还发展了平面电子工艺技术、各向异性腐蚀、固相键合工艺和机械分断技术。当今平面电子工艺技术中引人注目的是利用薄膜制作快速响应传感器,其中用于检测 NH_3 和 H_2S 的快速响应传感器已较成熟。

4. 发展多功能传感器

研制能同时检测多种信号的传感器,已成为传感器技术发展的一个重要方面。例如,日本丰田研究所开发实验室研制成功了同时检测 Na^+ 和 H^+ 的多离子传感器。

5. 仿生传感器

化学和生物战可能是这种传感器的主要应用领域,它在出现生物攻击时可瞬时识别可疑的病原体,食品工业也可利用它监视变质和污染的食品。例如,检验员只要将传感器在肉上擦一下,就可探测出是否存在大肠杆菌等危险的病原体。此外,还可在食品包装袋上附上这样的传感器条,顾客可以根据颜色的变化判断食品是否变质。

6. 智能化传感器

智能化传感器是一种具有判断能力、学习能力的传感器。实际上是一种带微处理器的传感器,它具有检测、判断和信息处理功能。

智能化传感器的代表是美国霍尼威尔公司的 ST-3000 型智能传感器,它是一种带有微处理器的兼有检测和信息处理功能的传感器。

同一般传感器相比,智能式传感器有以下几个显著特点:

① 精度高。由于智能式传感器具有信息处理的功能,因此通过软件不仅可以修正各种确定性系统误差(如传感器输入输出的非线性误差、温度误差、零点误差、正反行程误差等),而且还可以适当地补偿随机误差,降低噪声,从而使传感器的精度大大提高。

② 稳定、可靠性好。它具有自诊断、自校准和数据存储功能,对于智能结构系统还有自适应功能。

③ 检测与处理方便。它不仅具有一定的可编程自动化能力,可根据检测对象或条件的改变,方便地改变量程及输出数据的形式等,而且输出数据可通过串行或并行通讯线直接送入远程计算机进行处理。

④ 功能广。不仅可以实现多传感器多参数综合测量,扩大测量与使用范围,而且可以有多种形式输出(如 RS232 串行输出,PIO 并行输出,IEEE-488 总线输出以及经 D/A 转换后的模拟量输出等)。

⑤ 性能价格比高。在相同精度条件下,多功能智能式传感器与单一功能的普通传感器相比,其性能价格比高,尤其是在采用比较便宜的单片机后更为明显。

1.4 传感器的静态与动态特性

传感器是实现传感功能的基本部件,传感器的输入-输出关系特性是传感器的基本特性,也是传感器的内部参数作用关系的外部特性表现,不同的传感器内部结构参数决定了它具有不同的外部特性。

传感器所测量的物理量基本上有两种形式:稳态(静态或准静态)和动态(周期变化或瞬态)。前者的信号不随时间变化(或变化很缓慢);后者的信号是随时间变化而变化的。传感器就是要尽量准确地反映输入物理量的状态,因此传感器所表现出来的输入-输出特性也就不同,即存在静态特性和动态特性。

不同的传感器有不同的内部参数,因此它们的静态特性和动态特性就表现出不同的特点,对测量结果也产生不同的影响。一个高精度的传感器,必须要有良好的静态特性和动态特性,从而确保检测信号(或能量)的无失真转换,使检测结果尽量反映被测量的原始特征。

1.4.1 静态特性

传感器的静态特性是在稳态信号作用下的输入-输出特性。即输入量是静态量,输出量是输入量的确定函数。

1. 静态特性的表示方法

(1) 代数多项式

如果不考虑传感器特性中的迟滞及蠕变等性质,或者传感器虽然有迟滞及蠕变等但仅考虑其理想的平均特性时,其特性方程在多数情况下可以写成如下的代数多项式形式:

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

(2) 曲线表示

曲线能表示出传感器特性的变化趋势以及何处有最大或最小的输出,何处传感器灵敏度高,何处低。当然,也能通过其特性曲线,粗略地判别出是线性或非线性传感器。

(3) 列表表示

列表法就是把传感器的输入-输出数据按一定的方式顺序地排列在一个表格之中。列表的优点是:简单易行、形式紧凑、数据易于进行数量上的比较、便于进行其他处理,如绘制曲线、进行曲线拟合、进行插值计算,或求一组数据的差分或差商等。

2. 静态性能指标

(1) 灵敏度

传感器在静态工作条件下,其单位输入所产生的输出,称为灵敏度,或更严格地说为静态灵敏度(S),图 1-2 所示。

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right) = \frac{dY}{dX} \quad (1-2)$$

(2) 线性度

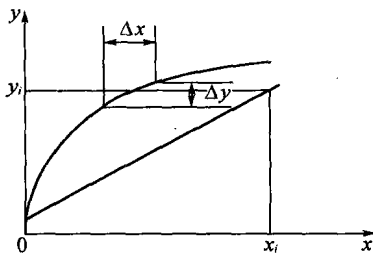


图 1-2 灵敏度定义

人们总是希望传感器的输出与输入关系具有线性特性,但实际上由于传感器存在着迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素,以及外界条件的影响,使其输入-输出特性总是具有不同程度的非线性。

传感器的输入-输出校准曲线与理论拟合直线之间的最大偏离与传感器满量程输出之比,称为该传感器的“非线性误差”或“线性度”,通常用相对误差 δ_L 表示其大小,即

$$\delta_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: $\Delta_{\max}$ 为校准曲线与理想拟合直线之间的最大偏差; Y_{FS} 为传感器满量程输出平均值。

线性度又可分为:

① 绝对线性度:有时又称理论线性度,为传感器的实际平均输出特性曲线对在其量程内事先规定好的理论直线的最大偏差,以传感器的满量程输出的百分比来表示。

② 端基线性度:传感器实际平均输出特性曲线对端基直线的最大偏差,以传感器的满量程输出的百分比来表示。端基直线则定义为由传感器量程所决定的实际平均输出特性首、末两端点的连线。

③ 零基线性度:传感器实际、平均输出特性曲线对零基直线的最大偏差,以传感器的满量程输出的百分比来表示。而零基直线则定义为这样一条直线,它位于传感器的量程内,但可通过或延伸通过传感器的理论零点,并可改变其斜率,以把最大偏差减至最小。

④ 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。

⑤ 最小二乘线性度:用最小二乘法求得校准数据的理论直线。

(3) 迟滞

对于某一输入量,传感器在正行程时的输出量不同于其在反行程时在同一输入量下的输出量,这一现象称为迟滞,如图 1-3 所示。

(4) 重复性

在相同的工作条件下,在一段短的时间间隔内,输入量从同一方向作满量程变化时,同一输入量值所对应的连续先后多次测量所得的一组输出量值,它们之间相互偏离的程度称为传感器的重复性。

(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部件的特性随时间发生变化,产生一种经时变化的现象。

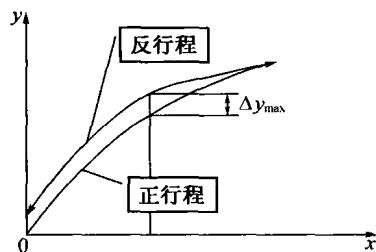


图 1-3 迟滞特性示意图

1.4.2 动态特性

传感器的动态特性就是指其输出对于随时间变化的输入量的响应特性。当被测量的变化是

时间的函数时,则传感器的输出量也是时间的函数,其时间关系要用动态特性来表示。

实际上大量的被测量信号是动态信号,这时传感器的输出能否良好地追随输入量的变化是一个很重要的问题。有的传感器尽管其静态特性非常好,但不能很好地追随输入量的快速变化而导致严重误差。一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除了具有理想的比例特性外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输入与输出间的差异就是所谓的动态误差。

我们以动态测温的问题来简要说明传感器的动态特性。在被测温度随时间变化或传感器突然插入被测介质中,以及传感器以扫描方式测量某温度场的温度分布等情况下,都存在动态测温问题。如把一支热电偶从温度为 $t_0^\circ\text{C}$ 环境中迅速插入一个温度为 $t^\circ\text{C}$ 的恒温水槽中(插入时间忽略不计),这时热电偶测量的介质温度从 $t_0^\circ\text{C}$ 突然上升到 $t^\circ\text{C}$,而热电偶反映出来的温度从 $t_0^\circ\text{C}$ 变化到 $t^\circ\text{C}$ 需要经历一段时间,即有一段过渡过程,如图 1-4 所示。热电偶反映出来的温度与介质温度的差值就称为动态误差。

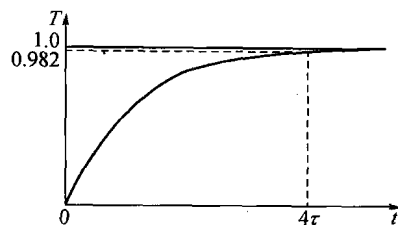


图 1-4 阶跃响应曲线

造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因,是因为温度传感器有热惯性和传热热阻,使得在动态测温时传感器输出总是滞后于被测介质的温度变化。如带有套管的热电偶的热惯性要比裸热电偶大得多。这种热惯性是热电偶固有的,这种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。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。

1. 传递函数

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:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-4)$$

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

$$L = \left\{ \frac{d^n y}{dt^n} \right\} = s^n Y(s) - s^{n-1} y(0) - s^{n-2} \frac{dy}{dt}(0) - \cdots - \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}}(0) \quad (1-5)$$

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

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-6)$$

式中: $X(s)$ 为输入的拉氏变换; $Y(s)$ 为输出的拉氏变换; $G(s)$ 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