


现代传感器

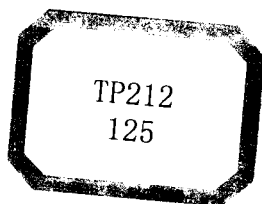
原理及应用

吕 泉 编著
张洪润 审校

- 
- 紧跟技术发展
 - 内容系统全面
 - 精选应用实例
 - 提升综合能力

清华大学出版社

新世纪电子信息工程系列教材



现代传感器 原理及应用

吕 泉 编著

张洪润 审校



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据 21 世纪高等院校课程教学大纲的要求, 结合现代电子技术、计算机技术发展的最新趋势, 总结多年的教学和科研经验, 从实用角度出发, 编写的一本独具特色的教材。

全书共 12 章, 分别介绍现代各种新型传感器的作用、原理、结构特征以及使用方法。内容包括红外传感器、图像传感器、光纤传感器、超导传感器、微波传感器、生物传感器、气体传感器、湿度传感器、非晶态合金传感器、机器人传感器、智能传感器、其他新型(电流、电压、三维过载、液晶)传感器等。为巩固所学知识, 各章末均有习题。

本书深入浅出, 通俗易懂, 是一本理论与实践并重的实用教程, 可作为高等院校电子信息、测试计量技术、仪器仪表、生物医学、机械制造、计算机应用、工业自动化、自动控制、机电一体化、精密仪器测定与控制、汽车与机械类等专业的大学本科高年级及研究生的教材, 也可供科研人员、工程技术人员及自学者阅读参考。

版权所有, 翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术, 用户可通过在图案表面涂抹清水, 图案消失, 水干后图案复现; 或将表面膜揭下, 放在白纸上用彩笔涂抹, 图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感器原理及应用/吕泉编著.

—北京: 清华大学出版社, 2006.6

ISBN 7-302-13267-4

I. 现… II. 吕… III. 传感器 IV. TP.212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 070714 号

出版者: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦

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

邮 编: 100084

社总机: 010-62770175

客户服务: 010-62776969

组稿编辑: 科海

文稿编辑: 洪英

封面设计: 林陶

印刷者: 北京市耀华印刷有限公司

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.375 字数: 520 千字

版 次: 2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-13267-4/TN·338

印 数: 1~4000

定 价: 32.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010) 82896445

前 言

当今时代是高新技术迅速发展的时代。传感器被称为“五官”，在这个时代里，信息的获取离不开“五官”。作为提供信息的传感器在 21 世纪的今天倍受重视，被列为“信息产业”的三大支柱之一，进入到一个飞速发展的新阶段。

由于传感器的空前发展，人们对这方面知识的渴求愈来愈迫切。虽然目前已有不少有关传感器方面的书籍，但仍不能满足当前人们的实际需求。为此，我们应高等院校师生和广大科研人员、工程技术人员的要求，组织有教学、科研经验的专家、教授，编写了能满足当前传感器教学的《现代传感器原理及应用》教材。

全书共 12 章，分别介绍现代传感器的作用、原理、结构特征以及使用方法。内容包括红外传感器、图像传感器、光纤传感器、超导传感器、微波传感器、生物传感器、气体传感器、湿度传感器、非晶态合金传感器、机器人传感器、智能传感器、其他新型（电流、电压、三维过载、液晶）传感器等。各章末均有习题。

本书可作为电子信息、测试计量技术、仪器仪表、生物医学、机械制造、计算机应用、工业自动化、自动控制、机电一体化、精密仪器测定与控制、汽车与机械类等专业的大学本科高年级及研究生教材。建议讲授 60~80 学时。

本书系统、全面、新颖、实用、图文并茂，讲述深入浅出，通俗易懂，除了可作为高等院校教材外，也可作为科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员的自学参考书。

本书在编写过程中，得到了四川大学、中国科技大学、南京大学、清华大学、重庆大学、北京大学、西南交通大学、复旦大学、浙江大学、南开大学、电子科技大学、成都理工大学、北京科技大学等众多老师的支持，他们客观地提出了许多宝贵意见，特别是张洪润老师在百忙中审定了全书，北京科海培中技术有限责任公司的夏非彼老师给予了大力支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限，时间仓促，书中难免存在不足和错误之处，敬请广大读者批评、指正。

编者

2006 年 6 月

目 录

第0章 绪论	1
0.1 传感器的定义	1
0.2 传感器的分类	1
0.3 传感器的基本特性及应用	3
0.3.1 传感器的基本特性	3
0.3.2 传感器的基本应用	7
0.4 传感器的发展方向	10
第1章 红外传感器	11
1.1 红外辐射的基本知识	12
1.1.1 红外光(辐射)的基本特点	12
1.1.2 红外光(辐射)检测的基本定律	13
1.1.3 红外光(辐射)源	15
1.2 红外传感器系统的构成	17
1.3 红外传感器(探测器)的光学系统	18
1.4 红外传感器(探测器)的辅助电路	20
1.5 红外传感器(探测器)的性能参数	23
1.6 常见的红外探测器	26
1.6.1 热敏红外探测器	27
1.6.2 光电红外探测器	28
1.7 红外传感器使用注意事项	33
1.8 红外传感器的典型应用	34
1.8.1 红外测温	34
1.8.2 红外成像	37
1.8.3 红外无损探测	40
1.8.4 红外气体分析	41
1.8.5 红外雷达	42
1.8.6 红外侦察	43
1.8.7 红外报警	44
习题	46
第2章 图像传感器	47
2.1 图像传感器的敏感器件	51

2.1.1	信号电荷耦合器件 (CCD)	51
2.1.2	信号电荷注入器件 (CID)	56
2.1.3	庠链式器件 (BBD)	57
2.1.4	MOS 式光电变换器件	57
2.2	线型图像传感器	57
2.3	面型图像传感器	60
2.4	图像传感器的主要特性参数	66
2.4.1	调制传递函数 MTF 特性	66
2.4.2	输出饱和特性	68
2.4.3	暗输出特性	69
2.4.4	灵敏度	69
2.4.5	光谱响应及背面照光	70
2.4.6	其他特性与有关术语	70
2.5	常用图像传感器	71
2.5.1	TCD 102C-1 型 CCD 线型图像传感器	71
2.5.2	TCD 201C 型 CCD 面积图像传感器	72
2.5.3	CCD 型图像传感器	72
2.5.4	1/3"CCD WV-CP410/412/414 型彩色摄像机	74
2.5.5	1/2"WV-CL350/352/354 型数字处理彩色摄像机	74
2.5.6	1/3"CCD WV-CP210/212/214 型彩色摄像机	76
2.5.7	1/3"CCD WV-CP100E 型彩色摄像机	77
2.5.8	1/3"CCD WV-CF20 型彩色摄像机	78
2.5.9	1/2"CCD WV-CL700/702/704 型彩色摄像机	79
2.5.10	1/3"CCD WV-BP310/312/314 型黑白摄像机	80
2.5.11	1/3"CCD WV-BP500/504 型黑白摄像机	80
2.5.12	1/3"CCD WV-BP100/102/104 型黑白摄像机	81
2.5.13	1/3"CCD WV-BP110/114 型黑白摄像机	82
2.5.14	1/2"CCD WV-BL600/602/604 型黑白摄像机	83
2.5.15	WV-CS500 型集成监视系统	84
2.5.16	低光 CCD 摄像机	86
2.5.17	工业彩色 CCD 微型摄像机	86
2.6	图像传感器的典型应用	89
2.6.1	尺寸测量	89
2.6.2	工件探伤	90
2.6.3	图像传真	91
2.6.4	文字识别	91
2.6.5	自动方向识别	92
2.6.6	集成电路 IC 硅片形状自动检测	93
2.6.7	月票自动发售	93

习题.....	94
第 3 章 光纤传感器.....	95
3.1 光纤传感器的组成与分类.....	102
3.2 光纤维及传光原理.....	103
3.2.1 斯乃尔定理.....	103
3.2.2 光纤维传光原理.....	104
3.3 光纤传感器的光纤、光源、光检测器的选用原则.....	107
3.3.1 光纤.....	107
3.3.2 光源.....	108
3.3.3 光检测器.....	109
3.4 光纤连接器和光纤固定接头.....	111
3.4.1 光纤活动连接器.....	111
3.4.2 光纤固定接头.....	112
3.4.3 光纤定向耦合器.....	113
3.5 光调制技术.....	115
3.5.1 相位调制与干涉测量.....	116
3.5.2 频率调制.....	117
3.6 光纤温度传感器.....	118
3.6.1 辐射(红外)型光纤温度传感器.....	120
3.6.2 半导体吸光型光纤温度传感器.....	123
3.7 光纤速度和流量传感器.....	124
3.7.1 激光多普勒测速传感器.....	125
3.7.2 光纤旋涡式流量计.....	126
3.8 光纤加速度传感器.....	127
3.8.1 相位变化型光纤加速度传感器.....	127
3.8.2 振幅型光纤加速度传感器.....	130
3.9 光纤压力和振动传感器.....	130
3.10 光纤位移传感器.....	133
3.11 光纤电压和电流传感器.....	137
3.11.1 光纤电压传感器.....	137
3.11.2 光纤电流传感器.....	138
3.12 光纤电磁场传感器.....	140
3.12.1 微波传感器.....	140
3.12.2 光电磁场传感器.....	141
3.13 光纤射线传感器.....	143
3.13.1 光纤射线传感器的结构原理.....	143
3.13.2 吸收型光纤射线传感器.....	143
3.14 光纤分光传感器.....	145

3.14.1 检测微量气体的光纤分光传感器.....	145
3.14.2 检测生物体内的光纤分光传感器.....	146
3.15 光纤图像传感器.....	146
3.16 光纤医用传感器.....	147
3.16.1 光纤氧饱和度传感器.....	147
3.16.2 光纤血流计.....	150
3.16.3 光纤 pH 值传感器.....	151
3.16.4 光纤体压计.....	152
3.16.5 光纤体温计.....	153
习题.....	153
第 4 章 超导传感器.....	154
4.1 超导效应.....	154
4.2 SCQID 超导传感器的工作原理.....	155
4.3 超导传感器的结构.....	156
4.4 超导传感器的测量系统.....	157
4.5 超导直流式传感器.....	158
4.6 超导射频式传感器.....	159
4.7 超导红外传感器.....	161
4.8 超导可见光传感器.....	161
4.9 超导微波传感器.....	162
4.10 超导磁场传感器.....	162
4.11 超导图像传感器.....	163
4.12 超导磁悬浮列车.....	163
4.13 超导核磁共振仪.....	165
习题.....	167
第 5 章 微波传感器.....	168
5.1 微波基本知识.....	168
5.2 微波传感器及其分类.....	169
5.3 微波传感器的优点与存在问题.....	169
5.4 微波湿度(水分)传感器.....	170
5.5 微波液位(仪)传感器.....	171
5.6 微波物位(仪)传感器.....	171
5.7 微波测厚(仪)传感器.....	172
5.8 微波温度传感器.....	172
5.9 微波定位传感器.....	173
5.10 微波多普勒传感器.....	174
习题.....	174

第 6 章 生物传感器	175
6.1 生物反应基本知识	175
6.1.1 酶反应	175
6.1.2 微生物反应	178
6.1.3 免疫学反应	180
6.2 生物活性材料固定化技术	181
6.3 生物传感器原理、特点与分类	182
6.3.1 生物传感器的基本原理	182
6.3.2 生物敏感膜	182
6.3.3 生物传感器的特点	183
6.3.4 生物传感器的分类	183
6.4 酶传感器	184
6.5 微生物传感器	187
6.5.1 呼吸机能型微生物传感器	187
6.5.2 代谢机能型微生物传感器	188
6.6 免疫传感器	189
6.7 生物组织传感器	190
6.8 半导体生物传感器	191
6.8.1 酶光敏二极管	192
6.8.2 酶 FET	192
6.9 生物基因芯片	193
6.9.1 基因芯片的制作原理	194
6.9.2 测试原理	195
6.9.3 检测和分析	197
6.9.4 基因芯片技术的主要应用	198
习题	198
第 7 章 气体传感器	199
7.1 电阻型半导体气敏材料的导电机理	213
7.2 电阻型半导体气敏传感器的结构	213
7.3 气敏器件的基本特性	215
7.4 非电阻型气敏器件	217
7.5 气敏传感器的主要参数与特性	219
7.6 光纤气体传感器	221
7.6.1 差动吸收法光纤远距离测量系统	221
7.6.2 光纤 NH ₃ 气体传感器	223
7.7 红外吸收式气敏传感器	224
7.8 热导率变化式气体传感器	224
7.9 石英振荡式气体传感器	225

7.10 气-磁传感器.....	226
7.11 湿式气敏传感器.....	226
7.12 气体传感器的典型应用.....	227
习题.....	230
第8章 湿度传感器.....	231
8.1 湿度及其表示方法.....	237
8.2 湿度传感器的分类.....	238
8.3 湿度传感器的特性参数.....	238
8.4 电解质湿度传感器.....	242
8.4.1 无机电解质湿度传感器.....	242
8.4.2 高分子电解质湿度传感器.....	244
8.4.3 有机季铵盐高分子电解质湿敏感元件.....	246
8.4.4 聚苯乙烯磺酸铵湿敏元件.....	246
8.5 半导体陶瓷湿度传感器.....	246
8.5.1 涂覆膜型.....	246
8.5.2 烧结体型.....	247
8.5.3 薄膜型.....	249
8.6 有机物及高分子聚合物湿度传感器.....	249
8.6.1 胀缩性有机物湿敏元件.....	250
8.6.2 高分子聚合物薄膜湿敏元件.....	251
8.7 湿度传感器的应用及发展动向.....	252
习题.....	253
第9章 非晶态合金传感器.....	254
9.1 非晶态合金及其基本特性.....	254
9.1.1 非晶态合金的力学性能.....	255
9.1.2 非晶态合金的磁学性能.....	257
9.1.3 非晶态合金的电学性能.....	259
9.1.4 非晶态合金的化学性能.....	260
9.2 非晶态合金传感器的物理基础.....	260
9.2.1 传感器与敏感材料.....	260
9.2.2 非晶态合金的敏感功能.....	263
9.2.3 非晶态合金的磁机变换功能.....	263
9.2.4 非晶态合金的磁电变换功能.....	267
9.2.5 非晶态合金的其他变换功能.....	270
9.3 非晶态合金脉冲感应型磁场传感器.....	272
9.4 非晶态合金位移传感器.....	276
9.5 非晶态合金压力传感器.....	277
9.5.1 膜片式压力传感器.....	277

9.5.2 差动式压力传感器	278
9.6 非晶态合金平均温度传感器	279
习题	281
第 10 章 机器人传感器	282
10.1 机器人传感器的分类	282
10.2 机器人视觉传感器	283
10.3 机器人听觉传感器	286
10.4 机器人触觉传感器	287
10.5 机器人压觉传感器	288
10.6 机器人接近觉传感器	290
10.7 机器人力觉传感器	291
10.8 机器人滑觉传感器	291
习题	292
第 11 章 智能传感器	293
11.1 智能传感器的结构、功能与特点	293
11.1.1 智能传感器的结构	293
11.1.2 智能传感器的功能	294
11.1.3 智能传感器的特点	295
11.2 传感器的智能化方法	296
11.2.1 实现数据处理功能	296
11.2.2 实现自动控制功能	304
11.3 智能传感器的常用集成芯片	307
11.3.1 数据输出接口电路	307
11.3.2 微处理器	307
11.3.3 智能传感器的接口芯片	307
11.4 智能压力传感器	309
11.5 智能差压传感器	310
11.6 智能温度压力传感器	310
11.7 人工神经网络智能传感器	312
习题	313
第 12 章 其他新型传感器	314
12.1 开环式电流传感器	314
12.2 闭环式电流传感器	317
12.3 磁调制电流传感器	321
12.4 电压传感器	323
12.5 三维过载传感器	325
12.6 液晶传感器	327

12.6.1 液晶及其性质	327
12.6.2 液晶电磁场传感器	327
12.6.3 液晶电压传感器	328
12.6.4 液晶超声波传感器	328
12.6.5 液晶温度传感器	328
习题	329

第 0 章 绪 论

当今时代是高新技术迅速发展的信息时代。在这个时代里，获取准确可靠的信息成为做好一切工作的前提。要获取信息，则离不开传感器。传感器在最近 20 多年获得了长足的发展。它在与国民经济相关的各个领域中的应用日益广泛，是信息的采集和信息的转换的重要部件，测量和控制系统的首要环节，测试计量和工业自动化、智能化的关键技术。在世界范围内，一个国家的一项工程设计中所用传感器的数量和水平直接标志着这个国家科学技术的先进程度，因此传感器技术成为信息时代的焦点。

0.1 传感器的定义

人用五官感受外界信息，将所得到的信息送入大脑并进行思维和判断，然后大脑命令四肢完成某种动作。表观上传感器能够代替人的五官完成感受外界信息的功能，成为传送感觉（应）的一种器件。

“五官”感受的外界信息范围很窄（只是对人体无害的信息），还有很多无法或难以感知的被测量，如紫外光、红外光、电磁场、无味无嗅之气体及特高温、剧毒物和各种微弱信号等，而这些传感器都可以感知。因为电信号具有高精度、高灵敏度，可测量控制的范围宽，便于传递、放大及反馈并连续可测、可遥测、可储存等很多优点，所以人们希望传感器还能将感知的信号放大、传输、存储及显示输出。于是，更广义地可以把传感器归纳为一种能感受外界信息（力、热、声、光、磁、气体、湿度等等），并按一定的规律将其转换成易处理的电信号的装置。

若被测量是电量，可直接与各种智能仪器（计算机和机器人）连接，并进行信号处理。若被测量是非电量，如物理量（力学量、湿度、流量、物位、光学量和温度），化学量（成份、酸碱度和反应速度），生物量（血压、人体反应）等，则必须通过相应的传感器将它们转换成电量，再送入计算机进行处理。也就是说，能把被测物理量或化学量转换为与之有确定对立关系的电量输出的装置称为传感器（传感器也称为变换器、换能器、变送器、发送器或探测器等）。

0.2 传感器的分类

由于被测信号的种类很多，而且一种被测量可以用不同种类的传感器来测量，一种传感器也许可以测量几种被测信号，所以目前传感器存在很多分类方式，这里介绍几种基本的分类形式。

按照工作机理可以分为物性传感器和结构型传感器两大类。物性传感器利用外界信息使材料本身的固有性质发生变化,通过检测性质的变化来检测外界信息。利用外界信息使材料的物理性质(力、热、声和光)发生变化的传感器称为物理传感器,如半导体的力、热、光和磁敏传感器等;利用外界信息使材料的化学性质发生变化的传感器称为化学传感器,如温度传感器、 Fe_2O_3 气体传感器等;利用外界信息使生物或微生物组织的生物效应发生变化的传感器称为生物传感器,如酶传感器、微生物传感器等。结构型传感器利用外界信息使一些元件的结构(如弹簧、气压)发生形变,通过测量结构的变化来检测被测对象,如用金属的伸缩来感知温度等等。

按照信息的传递方式可以分为直接型和间接型传感器。将被测的信息通过传感器直接转换成电信号的传感器称为直接型传感器,如光敏二极管将光信号直接转换成电流信号,热敏电阻将温度的变化直接转变为电阻值的变化。将被测信息通过多于一次的转换才变为电信号的传感器称为间接型传感器,如压力传感器先将压力施加于感压膜片上使其产生形变(即应变),形变会引起压阻效应才使电阻值发生了变化。

按照人类的感覺功能分为视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉五类传感器,如表 0-1 所示。机器人的感觉系统由视觉、触觉、痛觉、滑动觉、接近觉、热觉或温觉、力觉、嗅觉、听觉和味觉组成。另外为了将多个传感器得到的信息综合利用,发展多信息处理技术,使机器人更准确、全面和低成本地获取所处环境的信息,组成了机器人智能技术,如机器人的多感觉系统(Robot Sensory System)和多传感器信息的集成与融合(Multi-Sensor Integration and Fusion)。

表 0-1 按照感觉功能将传感器分类的状况

感官	感觉传感器	传感对象	主要的传感器
眼	视觉传感器 接近觉传感器	光强和颜色,大小和形状,距离感觉和三维图像	光电二极管、光电倍增管、光敏二极管、光敏三极管、电荷耦合器件、图像传感器、感应线圈接近觉和电容式接近觉传感器
耳	听觉传感器	声音信息	压电传感器、拾音器、压磁式传感器、声表面波传感器、超声波传感器和语音识别系统
鼻	嗅觉传感器	气体和湿度	电阻式、电容式和电感式气敏传感器和电阻式湿度传感器
皮	触觉、滑觉、压觉、热觉传感器	表面特征 物理性能(滑、热及压)	压阻式力传感器,压电式触觉、光电式触觉及电容式触觉传感器,位移传感器,振动传感器,热敏电阻、热电偶、集成温度传感器
舌	味觉传感器	成分和浓度	味敏传感器、生物传感器

另外,按照制备传感器所用的材料可以分为半导体传感器、金属传感器、陶瓷传感器、光纤传感器、高分子传感器和生物传感器等。按传感器的检测对象分为温度传感器、光敏传感器、压力传感器、磁传感器、气敏传感器、湿度传感器、离子传感器和生物传感器等。还有更为具体的分类形式,按照转换原理分类的,如电磁传感器和光电传感器,按照用途分类的,如工业、民用、医疗、军用及汽车传感器等等。总之,为了使用的方便,不同的

行业依据的分类方式不同,而且会随着传感器的发展而出现更新的种类。

0.3 传感器的基本特性及应用

0.3.1 传感器的基本特性

从传感器本身的作用知道,它是直接与被测对象发生联系的部分,是信息输入的窗口,可提供原始信息,检测的准确与否完全与一定范围内反应被测量的精确程度有关。于是,它必须具备一定的基本特性,而了解和掌握其基本特性是正确选择和使用传感器的基本条件。

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间关系的特性,一般分为静态特性和动态特性两大类。当被测量不随时间变化或随时间变化很缓慢(常称为静态信号)时,用一系列静态参数来描述其静态特性。当被测量随时间变化很快(常称动态信号)时,可用一系列动态参数来描述其动态特性。

1. 静态特性

传感器的静态特性是指对于静态的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。此时输入信号与时间无关,输出量也与时间无关,输出量与输入量之间的关系可用一个不含时间的方程来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (0-1)$$

式中 a_0 为零位输出; a_1 为线性常数; a_2 、 a_3 、 \dots 、 a_n 为非线性待定常数,它们都可由实际的测量数据进行标定。实际中也可以以 x 为横坐标, y 为纵坐标,用测量结果画出特性曲线来表征输出与输入的关系。由多次测量的结果分析可知,任何传感器的输出与输入的关系不会完全符合所要求的特征线性或非线性关系,衡量传感器的静态特性必须用一些重要指标来确定,如测量范围、线性度、迟滞、重复性及灵敏度等等。

(1) 测量范围 (Y_{FS})

每一个传感器都有一定的测量范围,如果超过了这个范围进行测量时,会带来很大的测量误差,甚至于损坏传感器。一般测量范围确定在一定的线性区域或者保证一定寿命的范围内。在实际应用时,所选择传感器的测量范围应大于实际的测量范围,以保证测量的准确性和延长传感器及其电路的寿命。

(2) 线性度 (δ)

通常为了标定和数据处理的方便,总希望得到线性关系,可采用各种方法如硬件或软件的补偿进行线性化处理,这样就使得输出不可能丝毫不差地反应被测量的变化,总存在一定的误差(线性或非线性),即使实际是线性关系特性,测量的线性关系也并不完全与其吻合,而常用一条拟合直线近似代表实际的特性曲线。线性度就是用来表示实际曲线与拟合直线接近程度的一个性能指标。实际曲线与拟合直线总存在一定的偏差(如图 0-1 所示),用实际曲线与拟合直线间的最大偏差 ΔY_{\max} 与满量程输出 Y_{FS} 的百分比来表示线性度,即

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (0-2)$$

拟合直线的方法（有理论拟合、过零旋转拟合、端点平移或连线拟合及最小二乘法拟合等）不同，以所参考的拟合直线计算出的线性度也不同，比较传感器线性度好坏时必须建立在相同的拟合方法上。

(3) 迟滞 (δ_H)

人们将在相同工作条件下进行全测量范围测量时正行程和反行程输出的不重合程度称为迟滞或滞后（如图 0-2 所示），用全量程范围校准时，同一输入量的正行程输出和反行程输出之间的最大偏差 ΔH_{\max} 与满量程输出值的百分比表示

$$\delta_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (0-3)$$

它反映了传感器的材料参数的恢复快慢、机械结构和制造工艺的缺陷等等。

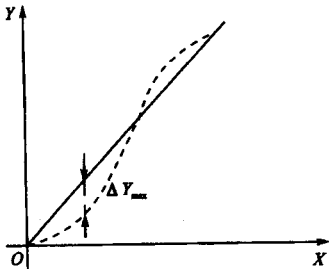


图 0-1 线性度

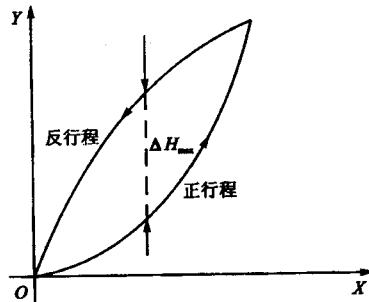


图 0-2 迟滞

(4) 重复性 (δ_k)

重复性用于描述在同一工作条件下输入量按同一方向在全测量范围内连续多次重复测量所得特性曲线的不一致性（波动性），如图 0-3 所示。若正行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 1}$ ，反行程的最大重复性偏差为 $\Delta R_{\max 2}$ ，取两个中最大的，再用满量程的百分比表示，即

$$\delta_k = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (0-4)$$

或用同一输入量 N 次测量的标准偏差 σ 与满量程的百分比表示。其标准偏差用下式表示

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}{N-1}} \quad (0-5)$$

式中 \bar{Y} 为测量值的算术平均值； N 为测量的次数。

(5) 灵敏度 (S)

灵敏度用传感器在稳定工作时的输出量变化 (ΔY) 对输入量变化 (ΔX) 的比值表示：

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (0-6)$$

可以看出，灵敏度的量纲是输出量与输入量的量纲之比。对于线性传感器来讲，其校准时输出/输入特性直线的斜率就是灵敏度。对于非线性传感器来讲，灵敏度随输入量的变化而变化。一般 S 较高时，测量容易，精度提高，但是 S 越高测量的范围就越窄，稳定性越差，应根据具体情况择优选择。

(6) 分辨率 (ΔX_{\max})

分辨率是描述传感器可以感受到的被测量最小变化的能力。若输入量缓慢变化且其变化值未超过某一范围时输出不变化，即此范围内分辨不出输入的变化（如图 0-4 所示），只有当输入量变化超过此范围时输出才发生变化。一般各个输入点对应的这个范围不同，人们将用满量程中使输出阶跃变化的输入量中最大的可分辨范围作为衡量指标，定义为传感器的分辨率 (ΔX_{\max})。也可以用分辨率表示，即

$$\Delta X_{\max} = \frac{\Delta X_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (0-7)$$

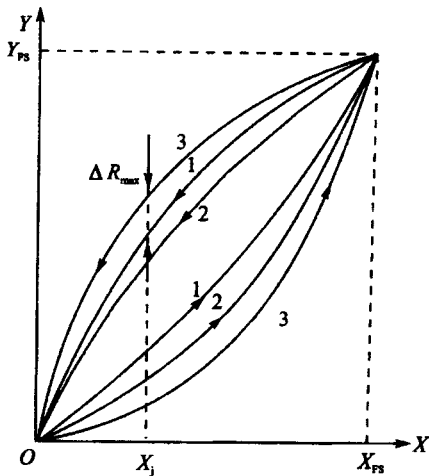


图 0-3 重复性偏差示意图

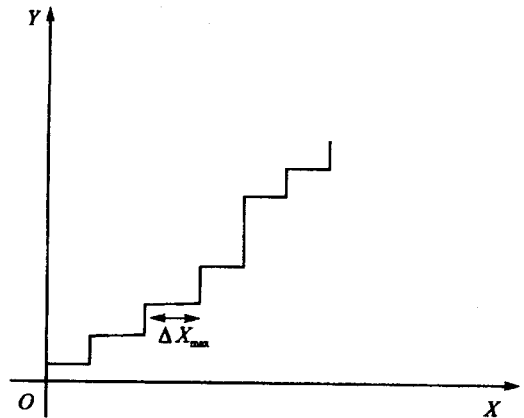


图 0-4 分辨力

(7) 温度稳定性 (a_T)

将传感器的输入量设定在某个值，测量出相应的输出值，使环境温度上升或下降一定间隔，输出值会发生变化，说明传感器具有温度不稳定性。一般用温度系数来描述温度引起的这个误差，表示为

$$a_T = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (0-8)$$

式中 Y_1 、 Y_2 分别为温度 T_1 、 T_2 时的输出值， $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

2. 动态特性

当传感器的输入量随时间变化时，其输出量的响应特性就是动态特性。一般应使输出