

全国高等职业教育规划教材

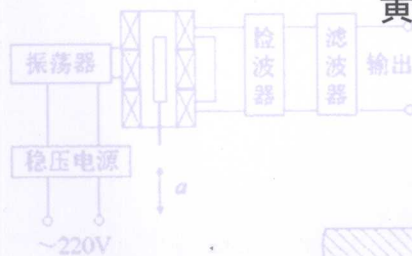
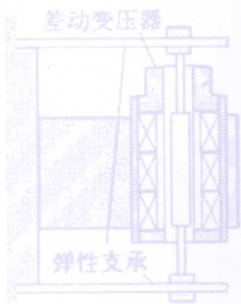
自动化类专业

省级精品课程配套教材

# 传感器 与检测技术

董春利 主编

黄安春 潘洪坤 参编



免费提供  
电子教案

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



全国高等职业教育规划教材

自动化类专业

省级精品课程配套教材

# 传感器与检测技术

董春利 主编

黄安春 潘洪坤 参编



机械工业出版社

本书根据高职高专教育的特点,以职业岗位核心能力为目标,精选教学内容,力求新颖、叙述简练、学用结合。

本书按照传感器的物理和化学效应,以传统的电阻式、电容式、电感式、压变式、磁电式、热电式,以及新兴的光电式、半导体式、声波式和数字式传感器为单元,以效应原理、电路处理、性能参数、应用实例为步骤讲解各种传感器在实际工作中的应用。同时结合工程实际,讲解了检测技术的基础知识、测量信号的基本处理技术和智能传感器的现状与检测技术的发展。

本书可以作为高职高专和成人高校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、楼宇智能化技术以及相关专业的教材,也可以供自动化技术相关领域的从业人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/董春利主编. —北京:机械工业出版社,2008.2

(全国高等职业教育规划教材)

ISBN 978-7-111-23503-3

I. 传… II. 董… III. 传感器-高等学校:技术学校-教材  
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第020239号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:祝伟 版式设计:霍永明 责任校对:申春香

责任印制:李妍

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2008年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

0001—5000册

标准书号:ISBN 978-7-111-23503-3

定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

# 出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位，促进学生技能的培养，以及教材内容要紧密结合生产实际，并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神，机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补，并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师，针对相关专业的课程设置，融合教学中的实践经验，同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的，具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价，并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中，除了保持原有特色外，针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中，核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题；实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- (1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- (2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- (3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- (4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- (5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

# 前 言

本教材是根据高职高专教学改革的思想——“淡化理论，够用为度，培养技能，重在运用，能力本位”编写而成的。本教材针对高等职业教育的特点，以岗位核心能力为目标，精选教学内容，力图使高职高专自动化类专业的学生在学完本课程后，能掌握生产一线技术人员和运行人员必须具备的传感器和检测技术的基本知识和基本应用技能。

在传感器技术的讲解中，着重提炼出各种传感器的规律性内容，按照传感器的物理或化学效应讲解其工作原理，并将它作为理解其他内容的基础；通过对信号电路和性能参数的讲解，使学生熟悉传感器的使用方式和方法；最后通过应用实例为学生打开运用传感器的思路。在检测技术的讲解中，主要介绍了检测技术的基本知识和检测装置的信号处理技术，以期学生在应用中遇到类似问题时能够找到解决方法。最后一章介绍了智能传感器和检测新技术，以开阔学生的视野和思路。

本教材的主要特点在于结合实际来提高高职高专学生的知识水平和解决实际问题的能力，压缩了大量的理论推导，突出了高职高专教材的实用性。在取材方面，既考虑了传感器和检测技术日新月异的发展趋势，又考虑了目前高职高专学生的学习基础和特点，使得本教材既有深度又有广度。

本教材各章具有一定的独立性，因此在教学中，教师可以根据专业方向和特点选用不同的章节，安排总学时从48~96学时的教学内容。其他有关专业（如数控、汽车等专业），可根据需要选用不同的章节，安排课时。

本教材由大连职业技术学院辽宁省精品课程“传感器与检测技术”课题组编写，董春利教授担任主编，黄安春编写第7章，潘洪坤编写第12章，其他章节由董春利编写。全书由上海电机学院梁森教授担任主审，在此对他致以诚挚的谢意！

本教材在编写过程中，得到大连职业技术学院和课题组其他老师的帮助；编写中还参考和应用了许多专家、学者的著作，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者的水平有限，本教材在内容选择和安排上，不免会存在遗漏和不妥之处，诚请读者批评指正。

编 者

2007年11月于大连

# 目 录

出版说明

前言

第1章 传感器与检测技术概论 .....	1	第3章 电容式传感器技术 .....	33
1.1 传感器的组成和分类 .....	1	3.1 电容式传感器的原理与结构 .....	33
1.1.1 传感器的组成 .....	1	3.1.1 变极距式电容传感器 .....	33
1.1.2 传感器的分类 .....	1	3.1.2 变面积式电容传感器 .....	35
1.2 传感器的基本特性 .....	1	3.1.3 变介质式电容传感器 .....	37
1.2.1 传感器的静态特性 .....	2	3.2 电容式传感器的测量电路 .....	38
1.2.2 传感器的动态特性 .....	4	3.2.1 交流电桥测量电路 .....	38
1.3 检测技术的基础知识 .....	6	3.2.2 调频测量电路 .....	39
1.3.1 测量技术与非电量测量 .....	6	3.2.3 运算放大器测量电路 .....	40
1.3.2 测量的一般方法 .....	7	3.2.4 二极管双T形交流电桥 .....	41
1.3.3 测量系统 .....	8	3.3 电容式传感器的特点与应用 .....	42
1.3.4 测量误差 .....	9	3.3.1 电容式传感器的特点 .....	42
习题与思考题 .....	11	3.3.2 电容式传感器的应用 .....	43
第2章 电阻式传感器技术 .....	12	习题与思考题 .....	45
2.1 电阻应变式传感器 .....	12	第4章 电感式传感器技术 .....	47
2.1.1 电阻应变效应 .....	12	4.1 自感式电感传感器 .....	47
2.1.2 电阻应变片的结构与特性 .....	13	4.1.1 气隙型自感传感器 .....	47
2.1.3 电阻应变片的测量电路 .....	15	4.1.2 螺管型自感传感器 .....	50
2.1.4 应变式传感器的应用 .....	19	4.1.3 自感式传感器的测量电路 .....	52
2.2 固态压阻式传感器 .....	20	4.1.4 自感式传感器的应用 .....	53
2.2.1 半导体的压阻效应 .....	20	4.2 差动变压器式传感器 .....	54
2.2.2 固态压阻式传感器的结构 .....	20	4.2.1 差动变压器式传感器的工作	
2.2.3 固态压阻式传感器的测量电路 .....	21	原理 .....	54
2.2.4 固态压阻式传感器的应用 .....	22	4.2.2 差动变压器式传感器的基本	
2.3 热电阻式传感器 .....	24	特性 .....	55
2.3.1 热阻效应及其温度特性 .....	24	4.2.3 差动变压器式传感器的测量	
2.3.2 热电阻的分类与结构 .....	25	电路 .....	56
2.3.3 热电阻的测量电路及应用 .....	26	4.2.4 差动变压器式传感器的应用 .....	57
2.4 热敏电阻传感器 .....	27	4.3 电涡流式传感器 .....	58
2.4.1 热敏电阻的特性 .....	27	4.3.1 电涡流式传感器的工作原理 .....	59
2.4.2 热敏电阻的测量电路 .....	29	4.3.2 电涡流式传感器的特性 .....	59
2.4.3 热敏电阻的主要参数 .....	30	4.3.3 电涡流式传感器的应用 .....	60
2.4.4 热敏电阻的应用 .....	31	习题与思考题 .....	62
习题与思考题 .....	31	第5章 压变式传感器技术 .....	63
		5.1 压电式传感器 .....	63
		5.1.1 压电式传感器的工作原理 .....	63

5.1.2 压电式传感器的测量电路	67	8.2.3 光纤传感器的应用	128
5.1.3 压电式传感器的应用	71	8.3 红外传感器	130
5.2 压磁式传感器	73	8.3.1 红外线的基本知识	130
5.2.1 压磁式传感器的基本原理	73	8.3.2 红外探测器	131
5.2.2 压磁式传感器的结构	75	8.3.3 红外传感器的应用	132
5.2.3 压磁式传感器的应用	76	8.4 激光传感器	135
习题与思考题	78	8.4.1 激光的形成原理	135
<b>第6章 磁电式传感器技术</b>	<b>80</b>	8.4.2 激光器的种类与结构	136
6.1 磁电感应式传感器	80	8.4.3 激光与激光传感器的应用	138
6.1.1 磁电感应式传感器的工作原理	80	8.5 图像传感器	139
6.1.2 磁电感应式传感器的结构	81	8.5.1 CCD 图像传感器	139
6.1.3 磁电感应式传感器的特性	82	8.5.2 CMOS 图像传感器	142
6.1.4 磁电感应式传感器的应用	83	8.5.3 图像传感器应用实例	143
6.2 霍尔式传感器	85	习题与思考题	145
6.2.1 霍尔效应及其参数	85	<b>第9章 半导体传感器技术</b>	<b>147</b>
6.2.2 霍尔元件及其传感器	87	9.1 气敏传感器	147
6.2.3 霍尔式传感器的应用	88	9.1.1 气敏电阻的工作原理	147
习题与思考题	90	9.1.2 气敏元件的结构	148
<b>第7章 热电式传感器技术</b>	<b>91</b>	9.1.3 气敏传感器的分类	148
7.1 热电偶传感器	91	9.1.4 气敏传感器的应用	149
7.1.1 热电效应与热电偶测温原理	91	9.2 湿敏传感器	151
7.1.2 热电偶及其分度表	94	9.2.1 湿敏电阻的工作原理	151
7.1.3 热电偶的结构	95	9.2.2 湿敏电阻的主要特性	153
7.1.4 热电偶的冷端补偿	96	9.2.3 湿敏传感器的结构	154
7.1.5 热电偶温度测量的应用	100	9.2.4 湿敏传感器的应用	155
7.2 热释电传感器	101	9.3 色敏传感器	156
7.2.1 热释电效应	102	9.3.1 色敏传感器的原理	156
7.2.2 热释电传感器的工作原理	102	9.3.2 色敏传感器的特性	157
7.2.3 热释电传感器的等效电路	103	9.3.3 色敏传感器的应用	158
7.2.4 热释电传感器的应用	103	习题与思考题	158
习题与思考题	105	<b>第10章 波式传感器技术</b>	<b>159</b>
<b>第8章 光电式传感器技术</b>	<b>106</b>	10.1 超声波传感器	159
8.1 光电效应与光电传感器	106	10.1.1 超声波的基本知识	159
8.1.1 光电效应	106	10.1.2 超声波传感器的组成	161
8.1.2 光电器件	107	10.1.3 超声波传感器的应用	163
8.1.3 光电传感器	117	10.2 微波传感器	167
8.1.4 光电传感器的应用	119	10.2.1 微波传感器的基本知识	167
8.1.5 光耦合器件	121	10.2.2 微波传感器的应用	168
8.2 光纤传感器	123	习题与思考题	170
8.2.1 光纤的结构和传输原理	123	<b>第11章 数字式传感器技术</b>	<b>171</b>
8.2.2 光纤传感器的工作原理与分类	126	11.1 光栅传感器	171

11.1.1	光栅的基本知识 .....	171	12.1.1	信号放大技术 .....	199
11.1.2	莫尔条纹及其测量原理 .....	173	12.1.2	线性化处理技术 .....	201
11.1.3	光栅测量系统 .....	176	12.2	噪声及其耦合方式 .....	203
11.1.4	光栅测量系统的应用 .....	180	12.2.1	噪声源分析 .....	204
11.2	磁栅传感器 .....	180	12.2.2	噪声耦合方式 .....	205
11.2.1	磁栅及其分类 .....	181	12.3	干扰抑制技术 .....	206
11.2.2	磁头及其结构 .....	182	12.3.1	共模与差模干扰 .....	206
11.2.3	信号处理方式 .....	184	12.3.2	常用的干扰抑制技术 .....	209
11.2.4	磁栅传感器的应用 .....	186	习题与思考题 .....	214	
11.3	数字编码器 .....	187	<b>第13章 智能传感器与检测新技术</b> .....	216	
11.3.1	接触式码盘编码器 .....	188	13.1	智能传感器 .....	216
11.3.2	光电式编码器 .....	190	13.1.1	智能传感器概述 .....	216
11.3.3	光电编码传感器的应用 .....	193	13.1.2	计算型智能传感器 .....	217
11.4	感应同步器 .....	194	13.1.3	生物传感器 .....	219
11.4.1	感应同步器的类型与结构 .....	194	13.1.4	其他类型的智能传感器 .....	221
11.4.2	直线式感应同步器 .....	195	13.1.5	智能传感器实例 .....	221
11.4.3	旋转式感应同步器 .....	196	13.2	检测新技术 .....	222
11.4.4	感应同步器的信号处理与 应用 .....	197	13.2.1	检测新技术简介 .....	222
习题与思考题 .....	197	13.2.2	传感器网络技术 .....	225	
<b>第12章 检测装置的信号处理技术</b> .....	199	13.2.3	基于检测新技术的智能系统 .....	228	
12.1	信号处理技术 .....	199	习题与思考题 .....	230	
			<b>参考文献</b> .....	231	



# 第 1 章 传感器与检测技术概论

传感器是能感受被测物理量，并按照一定的规律将其转换成可用输出信号的器件或装置。传感器的输出信号通常是电量，它便于传输、转换、处理、显示等。电信号有很多形式，如电压、电流、电容、电阻等，具体是哪种形式取决于传感器的原理。

## 1.1 传感器的组成和分类

### 1.1.1 传感器的组成

传感器的组成框图如图 1-1 所示。通常，传感器由敏感元件和转换元件组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分；转换元件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或测量的电信号部分。由于传感器的输出信号一般都很微弱，因此需要有信号调理与转换电路对其进行放大、运算调制等。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调理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。此外，信号调理转换电路以及传感器工作必须有辅助的电源，因此，信号调理转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。

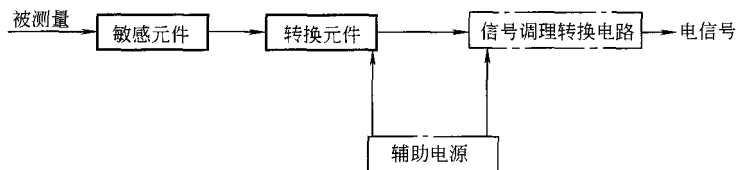


图 1-1 传感器组成框图

### 1.1.2 传感器的分类

传感器的种类繁多，分类方法也很多，但目前一般采用两种分类方法。一是按传感器的工作原理分类，如应变式、电容式、压变式、磁电式等。二是按被测参数分类，如温度、压力、位移、速度等被测量。

## 1.2 传感器的基本特性

在生产过程和科学实验中，要对各种参数进行检测和控制，就要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地变换成相应的电量，这取决于传感器的基本特性，即输出-输入特性。

如果把传感器看作二端口网络，即有两个输入端和两个输出端，那么传感器的输出-输入特性是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

### 1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出输入关系。只考虑传感器的静态特性时，输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。

衡量静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞性和重复性等。

#### 1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。

输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即具有理想的输出输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的，如果不考虑迟滞和蠕变等因素，传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示：

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1-1)$$

式中， $a_0$  为输入量  $x$  为零时的输出量； $a_1, a_2, \dots, a_n$  为非线性项系数。

可见，各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式各不相同。

静特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系，因此引入各种非线性补偿环节。例如，采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系为线性或接近线性。

如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围较小，则可用一条直线（切线或割线）近似地代表实际曲线的一段，如图 1-2 所示，使传感器输出-输入特性线性化。所采用的直线称为拟合直线。

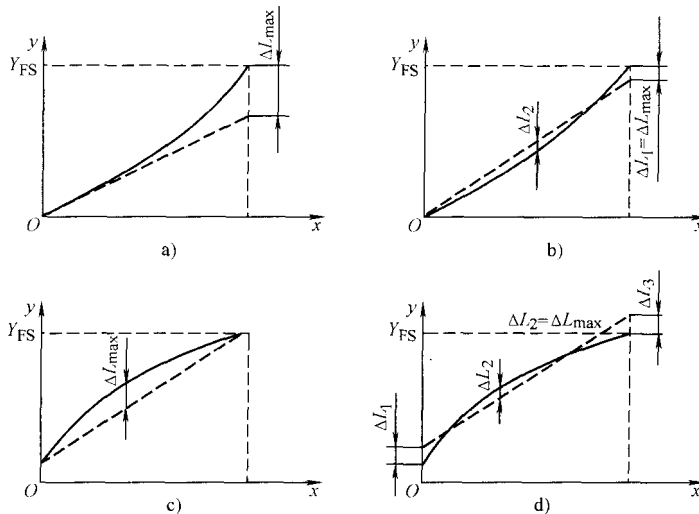


图 1-2 几种直线拟合方法

a) 理论拟合 b) 过零旋转拟合 c) 端点连线拟合 d) 端点平移拟合

实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差（或线性度），通常用相对误差  $\gamma_L$  表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中,  $\Delta L_{\max}$  为最大非线性绝对误差;  $Y_{FS}$  为满量程输出。

从图 1-2 可见, 即使是同类传感器, 拟合直线不同, 其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多, 用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

## 2. 灵敏度

灵敏度  $S$  是指传感器的输出量增量  $\Delta y$  与引起输出量增量的输入量增量  $\Delta x$  的比值, 即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

式中,  $S$  为灵敏度;  $\Delta y$  为传感器输出量增量;  $\Delta x$  为输入量增量。

对于线性传感器, 它的灵敏度就是它的静态特性的斜率, 即  $S$  为常数。对于非线性传感器, 它的灵敏度  $S$  为一变量, 用下式表示:

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (1-4)$$

传感器的灵敏度如图 1-3 所示。

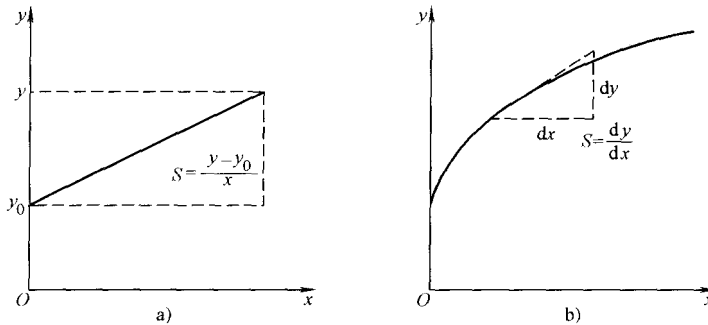


图 1-3 传感器的灵敏度  
a) 线性传感器 b) 非线性传感器

## 3. 迟滞现象

传感器在正行程 (输入量增大) 和反行程 (输入量减小) 期间其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞现象, 如图 1-4 所示。也就是说, 对于同一大小的输入信号, 传感器的正反行程输出信号大小不相等。

产生这种现象的主要原因是由于传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的, 例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差可由下式计算:

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中,  $\gamma_H$  为迟滞误差;  $\Delta H_{\max}$  为正反行程输出值间的最大差值;  $Y_{FS}$  为全量程的输出值。

## 4. 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时, 所得特性曲线不一致

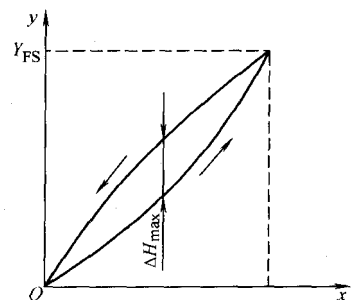


图 1-4 迟滞现象

的程度，如图 1-5 所示。

重复性误差  $\gamma_R$  属于随机误差，常用标准偏差表示，也可用正反行程中的最大偏差表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中， $\gamma_R$  为重复性误差； $\Delta R_{\max}$  为正反行程中的最大偏差； $Y_{FS}$  为全量程的输出值。

### 1.2.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指其输出对随时间变化的输入量的响应特性。当被测量是时间的函数时，则传感器的输出量也是时间的函数，其间的关系要用动态特性来表示。

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，输出信号不会与输入信号具有相同的时间函数，这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

为了说明传感器的动态特性，下面简要介绍动态测温的问题。

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。

如把一支温度计从温度为  $t_0$  °C 的环境中迅速插入一个温度为  $t_1$  °C 的恒温水槽中（插入时间忽略不计），这时环境温度从  $t_0$  °C 突然上升到  $t_1$  °C，而温度计反映出来的温度从  $t_0$  °C 变化到  $t_1$  °C 需要经历一段时间，即有一段过渡过程，如图 1-6 所示。

温度计反映出来的温度与介质的实际温度的差值就称为动态误差。造成温度计输出波形失真和产生动态误差的原因，是因为温度计有热惯性（由传感器的比热容和质量大小决定）和传热热阻，使得在动态测温时传感器的输出总是滞后于被测介质的温度变化。

这种热惯性是温度计固有的，这种热惯性决定了温度计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。

动态特性除了与传感器的固有因素有关之外，还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说，我们在研究传感器动态特性时，通常是根据不同输入变化规律来考查传感器的响应的。

虽然传感器的种类和形式很多，但它们一般可以简化为一阶或二阶系统（高阶可以分解成若干个低阶环节），因此一阶和二阶传感器是最基本的。

传感器的输入量随时间变化的规律是各种各样的，下面在对传感器动态特性进行分析时，采用最典型、最简单、易实现的正弦信号和阶跃信号作为标准输入信号。对于正弦输入信号，传感器的响应称为频率响应或稳态响应；对于阶跃输入信号，则称为传感器的阶跃响应或瞬态响应。

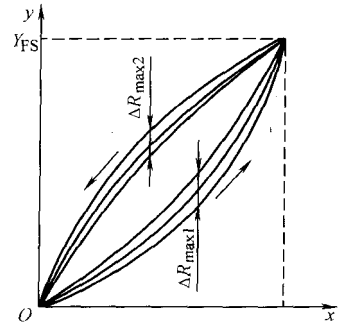


图 1-5 重复性特性图

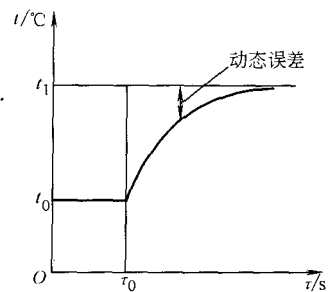


图 1-6 传感器的动态特性

### 1. 瞬态响应特性

传感器的瞬态响应是时间响应。在研究传感器的动态特性时，有时需要从时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析。这种分析方法是时域分析法，传感器对所加激励信号响应称瞬态响应。常用激励信号有阶跃函数、斜坡函数、脉冲函数等。

下面以传感器的单位阶跃响应来评价传感器的动态性能指标。

#### (1) 一阶传感器的单位阶跃响应

在工程上，一般将下面的公式视为一阶传感器单位阶跃响应的通式。

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \tag{1-7}$$

式中， $\tau$  为时间常数； $x(t)$ 、 $y(t)$  分别为传感器的输入量和输出量。它们都是时间的函数，表征传感器的时间常数，具有时间“秒”的量纲。

一阶传感器的单位阶跃响应信号为

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1-8}$$

相应的响应曲线如图 1-7 所示。

由图可见，传感器存在惯性，它的输出不能立即复现输入信号，而是从零开始，按指数规律上升，最终达到稳态值。

理论上传感器的响应只在  $t$  趋于无穷大时才达到稳态值，但实际上当  $t = 4\tau$  时其输出达到稳态值的 98.2%，可以认为已达到稳态。 $\tau$  越小，响应曲线越接近于输入阶跃曲线，因此， $\tau$  值是一阶传感器重要的性能参数。

#### (2) 二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的单位阶跃响应的通式为

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 x(t) \tag{1-9}$$

式中， $\omega_n$  为传感器的固有频率； $\xi$  为传感器的阻尼比。

二阶传感器对阶跃信号的响应在很大程度上取决于阻尼比  $\xi$  和固有频率  $\omega_n$ 。图 1-8 为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。

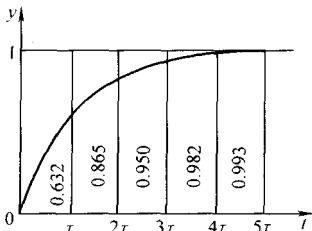


图 1-7 一阶传感器的单位阶跃响应

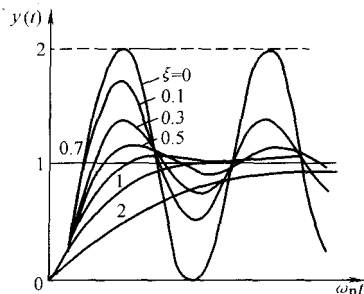


图 1-8 二阶传感器的单位阶跃响应曲线

固有频率  $\omega_n$  由传感器主要结构参数所决定， $\omega_n$  越高，传感器的响应越快。当  $\omega_n$  为常数时，传感器的响应取决于阻尼比  $\xi$ 。

阻尼比  $\xi$  直接影响超调量和振荡次数。 $\xi = 0$ ，为临界阻尼，超调量为 100%，产生等幅振荡，达不到稳态。 $\xi > 1$ ，为过阻尼，无超调也无振荡，但达到稳态所需时间较长。 $\xi < 1$ ，

为欠阻尼，衰减振荡，达到稳态值所需时间随  $\xi$  的减小而加长。 $\xi = 1$  时响应时间最短。但实际使用中常按稍欠阻尼调整， $\xi$  取 0.7 ~ 0.8 为最好。

### (3) 瞬态响应特性指标

- 1) 时间常数  $\tau$  一阶传感器时间常数  $\tau$  越小，响应速度越快。
- 2) 延时时间 传感器输出达到稳态值的 50% 所需时间。
- 3) 上升时间 传感器输出达到稳态值的 90% 所需时间。
- 4) 超调量 传感器输出超过稳态值的最大值。

## 2. 频率响应特性

传感器对正弦输入信号的响应特性，称为频率响应特性。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。频率响应特性指标包括：

- 1) 频带 传感器增益保持在一定值内的频率范围为传感器频带或通频带，对应上有上、下截止频率。
- 2) 时间常数 用时间常数  $\tau$  来表征一阶传感器的动态特性。 $\tau$  越小，频带越宽。
- 3) 固有频率 二阶传感器的固有频率  $\omega_n$  表征了其动态特性。

## 1.3 检测技术的基础知识

检测或者称为测量，就是采用传感器技术来获取被测对象信息的大小，即被测量的大小。这样，信息采集的主要含义就是检测，取得检测数据。

检测系统或称测量系统，这一概念是传感技术发展到现在一定阶段的产物。当工程中，需要传感器与多台设备组合在一起，才能完成信号的检测，这样便形成了检测系统。尤其是随着计算机技术及信息处理技术的发展，检测系统所涉及的内容也在不断充实。

为了更好地掌握传感器，需要对测量的基本概念、测量系统的特性、测量误差及数据处理等方面的理论及工程方法进行学习和研究。只有了解和掌握了这些基础知识，才能更有效地完成检测任务。

### 1.3.1 测量技术与非电量测量

测量是以确定量值为目的的一系列操作。所以测量也就是将被测量与同种性质的标准量进行比较，确定被测量对标准量的倍数。它可由下式表示：

$$x = nu \text{ 或 } n = \frac{x}{u} \quad (1-10)$$

式中， $x$  为被测量值； $u$  为标准量，即测量单位； $n$  为比值（纯数），含有测量误差。

#### 1. 测量技术

由测量所获得的被测的量值叫测量结果。测量结果可用一定的数值表示，也可以用一条曲线或某种图形表示。但无论其表现形式如何，测量结果应包括两部分：比值和测量单位。确切地讲，测量结果还应包括误差部分。

被测量值和比值等都是测量过程的信息，这些信息依托于物质才能在空间和时间上进行传递。

参数承载了信息而成为信号。选择其中适当的参数作为测量信号，例如热电偶温度传感

器的工作参数是热电偶的电动势，差压流量传感器中的孔板工作参数是差压  $\Delta P$ 。

测量过程就是传感器从被测对象获取被测量的信息，建立起测量信号，经过变换、传输、处理，从而获得被测量的量值。

## 2. 非电量测量

在工程上所要测量的参数大多数为非电量，这促使人们用电测的方法来研究非电量，即研究用电测的方法测量非电量的仪器仪表，研究如何能正确和快速地测得非电量的技术。

非电量电测量技术的优点是测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量、可以进行遥测、便于自动记录、可以与计算机连接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等。

### 1.3.2 测量的一般方法

实现被测量与标准量比较得出比值的方法，称为测量方法。针对不同测量任务进行具体分析以找出切实可行的测量方法，对测量工作是十分重要的。

对于测量方法，从不同角度，有不同的分类方法。

- 1) 根据获得测量值的方法可分为直接测量、间接测量和组合测量。
- 2) 根据测量的精度因素情况可分为等精度测量与非等精度测量。
- 3) 根据测量方式可分为偏差式测量、零位法测量与微差法测量。
- 4) 根据被测量变化快慢可分为静态测量与动态测量。
- 5) 根据测量敏感元件是否与被测介质接触可分为接触测量与非接触测量。
- 6) 根据测量系统是否向被测对象施加能量可分为主动式测量与被动式测量等。

#### 1. 直接测量、间接测量与组合测量

在使用仪表或传感器进行测量时，对仪表读数不需要经过任何运算就能直接表示测量所需要的结果的测量方法称为直接测量。例如，用磁电式电流表测量电路的某一支路电流，用弹簧管压力表测量压力等，都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程简单且迅速，缺点是测量精度不高。

在使用仪表或传感器进行测量时，首先对与测量有确定函数关系的几个量进行测量，将被测量代入函数关系式，经过计算得到所需要的结果，这种测量称为间接测量。间接测量的测量手续较多，花费时间较长，一般用在直接测量不方便或者缺乏直接测量手段的场合。

若被测量必须经过求解联立方程组，才能得到最后结果，则称这样的测量为组合测量。组合测量是一种特殊的精密测量方法，操作手续复杂，花费时间长，多用于科学实验或特殊场合。

#### 2. 等精度测量与不等精度测量

用相同仪表与测量方法对同一被测量进行多次重复测量，称为等精度测量。

用不同精度的仪表或不同的测量方法，或在环境条件相差很大时对同一被测量进行多次重复测量，称为非等精度测量。

#### 3. 偏差式测量、零位式测量与微差式测量

用仪表指针的位移（即偏差）确定被测量的量值的测量方法称为偏差式测量。应用这种方法测量时，仪表刻度事先用标准器具标定。在测量时，输入被测量，按照仪表指针在标尺上的示值，确定被测量的数值。这种方法测量过程比较简单、迅速，但测量结果精度较低。

用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态，在测量系统平衡时，用已知的标准量确定被测量的量值，这种测量方法称为零位式测量。在测量时，已知标准量直接与被测量相比较，已知量应连续可调，指零仪表指零时，被测量与已知标准量相等，例如天平、电位差计等，零位式测量的优点是可以获得比较高的测量精度，但测量过程比较复杂，费时较长，不适用于测量迅速变化的信号。

微差式测量是综合了偏差式测量与零位式测量的优点而提出的一种测量方法。它将被测量与已知的标准量相比较，取得差值后，再用偏差法测得此差值。应用这种方法测量时，不需要调整标准量，而只需测量两者的差值，即

$$x = N + \Delta \tag{1-11}$$

式中， $N$  为标准量； $x$  为被测量； $\Delta$  为二者之差。

由于  $N$  是标准量，其误差很小，且使用的是  $\Delta N$ ，因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量  $\Delta$ ，即使测量  $\Delta$  的精度较低，但因测量的是  $\Delta x$ ，故总的测量精度仍很高。

微差式测量的优点是反应快，且测量精度高，特别适用于在线控制参数的测量。

### 1.3.3 测量系统

#### 1. 测量系统的构成

测量系统是传感器与测量仪表、变换装置等的有机组合。图 1-9 为测量系统原理结构框图。

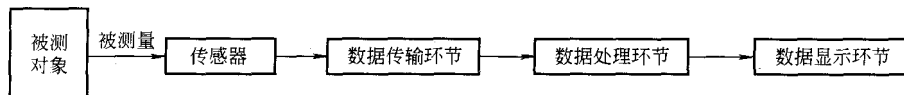


图 1-9 测量系统原理结构框图

- 1) 系统中的传感器是感受被测量的大小并输出相对应的可用输出信号的器件或装置。
- 2) 数据传输环节用来传输数据。当测量系统的几个功能环节独立地分隔开的时候，就必须由一个地方向另一个地方传输数据，数据传输环节就是完成这种传输功能。
- 3) 数据处理环节是将传感器输出信号进行处理和变换。如对信号进行放大、运算、线性化、数/模或模/数转换，变成另一种参数的信号或变成某种标准化的统一信号等，使其输出信号便于显示、记录，既可用于自动控制系统，也可与计算机系统连接，以便对测量信号进行信息处理。
- 4) 数据显示环节将被测量信息变成人感官能接受的形式，以完成监视、控制或分析的目的。测量结果可以采用模拟显示，也可采用数字显示，还可以由记录装置进行自动记录或由打印机将数据打印出来。

#### 2. 开环测量系统与闭环测量系统

##### (1) 开环测量系统

开环测量系统全部信息变换只沿着一个方向进行，如图 1-10 所示。

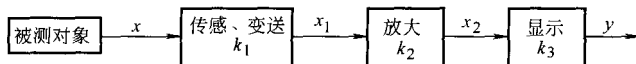


图 1-10 开环测量系统框图



输入、输出关系为

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-12)$$

式中,  $x$  为输入量;  $y$  为输出量;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为各个环节的传递系数。

采用开环方式构成的测量系统, 其结构较简单, 但各环节特性的变化都会造成测量误差。

## (2) 闭环测量系统

闭环测量系统有两个通道, 一个为正向通道, 另一个为反馈通道, 其结构如图 1-11 所示。

由图 1-11 可知

$$y = k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y = kk_1 x - k\beta y \quad (1-13)$$

当  $k \gg 1$  时, 有

$$y = \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-14)$$

式中,  $x$  为输入量;  $y$  为输出量;  $\Delta x$  为正向通道的输入量;  $\beta$  为反馈环节的传递系数;  $k$  为正向通道的总传递系数,  $k = k_2 k_3$ ,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为各个环节的传递系数。

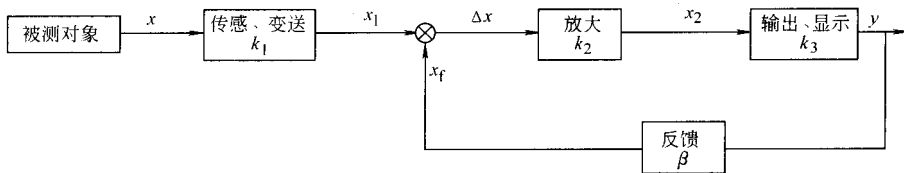


图 1-11 闭环测量系统框图

显然, 这时整个系统的输入输出关系由反馈环节的特性决定, 放大器等环节特性的变化不会造成测量误差, 或者说造成的误差很小。

根据以上分析可知, 在构成测量系统时, 应将开环系统与闭环系统巧妙地组合在一起加以应用, 才能达到所期望的目的。

### 1.3.4 测量误差

测量的目的是希望通过测量获取被测量的真实值。但由于种种原因, 例如传感器本身性能不十分优良, 测量方法不十分完善, 外界干扰的影响等, 都会造成被测参数的测量值与真实值不一致, 两者的不一致程度用测量误差表示。

测量的可靠性至关重要, 不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。例如, 在量值传递、经济核算、产品检验等场合应保证测量结果有足够的准确度; 当测量值用作控制信号时, 则要注意测量的稳定性和可靠性。因此, 测量结果的准确程度应与测量的目的与要求相联系、相适应。那种不惜工本、不顾场合, 一味追求越准越好的做法是不可取的, 要有技术与经济兼顾的意识。

#### 1. 测量误差的基本概念

测量误差的表示方法有多种, 含义各异。通常我们定义测量值为利用测量装置对被测物体的某个参数测得的值, 又叫示值。真值是被测物体这个参数的真实值。