

全国高等职业教育规划教材

传感器与检测技术

第2版

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、性能参数、电路处理、应用实例为步骤讲解各种传感器及其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。

本书配有授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 1239258369, 电话: 010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术 / 董春利主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2016.3
全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-53350-4

I. ①传… II. ①董… III. ①传感器—检测—高等职业教育—教材
IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第062677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:王颖 责任校对:张艳霞

责任印制:

印刷(装订)

2016年6月·第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·434千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53350-4

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:(010) 88379833

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

读者购书热线:(010) 88379649

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

本书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，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和运行人员必须具备的传感器技术、抗干扰技术和测量技术应用等方面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。

本书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，使得本书既有深度又有广度。

本书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。

本书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！

本书在编写过程中，得到大连职业技术学院和课题组其他老师的帮助，编写中参考许多专家、学者的著作，应用了许多传感器公司的产品及其应用案例，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者的水平有限，本书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

目 录

前言

第 1 章 传感器与检测技术概论	1
1.1 传感器的定义、组成和分类	1
1.1.1 传感器的定义与组成	1
1.1.2 传感器的分类	2
1.2 传感器的基本特性	3
1.2.1 传感器的静态特性	3
1.2.2 传感器的动态特性	6
1.3 检测技术的基础知识	8
1.3.1 测量技术与非电量测量	8
1.3.2 测量的一般方法	9
1.3.3 测量系统	10
1.3.4 测量误差	11
习题与思考题	14
第 2 章 电阻式传感器技术	15
2.1 电阻应变式传感器	15
2.1.1 电阻应变效应	15
2.1.2 电阻应变片的结构与特性	17
2.1.3 电阻应变片的测量电路	18
2.1.4 应变式传感器应用	22
2.2 固态压阻式传感器	24
2.2.1 半导体的压阻效应	24
2.2.2 固态压阻式传感器的结构	24
2.2.3 固态压阻式传感器的测量电路	25
2.2.4 固态压阻式传感器的应用	26
2.3 热电阻式传感器	28
2.3.1 热阻效应及其温度特性	28
2.3.2 热电阻的分类与分度表	29
2.3.3 热电阻的结构	30
2.3.4 热电阻的测量电路及应用	31
2.4 热敏电阻传感器	32
2.4.1 热敏电阻的特性	32

2.4.2	热敏电阻的测量电路	34
2.4.3	热敏电阻的主要参数	35
2.4.4	热敏电阻的应用	36
	习题与思考题	37
第3章	电容式传感器技术	38
3.1	电容式传感器的原理与结构	38
3.1.1	变极距式电容传感器	38
3.1.2	变面积式电容传感器	40
3.1.3	变介质式电容传感器	42
3.2	电容式传感器的测量电路	43
3.2.1	交流电桥测量电路	44
3.2.2	调频测量电路	45
3.2.3	运算放大器测量电路	46
3.2.4	二极管双T形交流电桥	47
3.3	电容式传感器的特点与应用	48
3.3.1	电容式传感器的特点	48
3.3.2	电容式传感器的应用	50
	习题与思考题	51
第4章	电感式传感器技术	53
4.1	自感式电感传感器	53
4.1.1	气隙型自感传感器	53
4.1.2	螺管型自感传感器	56
4.1.3	自感式传感器的测量电路	58
4.1.4	自感式传感器的应用	60
4.2	差动变压器式传感器	61
4.2.1	差动变压器式传感器的工作原理	61
4.2.2	差动变压器式传感器的基本特性	62
4.2.3	差动变压器式传感器的测量电路	64
4.2.4	差动变压器式传感器的应用	65
4.3	电涡流式传感器	66
4.3.1	电涡流式传感器的工作原理	66
4.3.2	电涡流式传感器的特性	67
4.3.3	电涡流式传感器的应用	69
	习题与思考题	70
第5章	压变式传感器技术	72
5.1	压电式传感器	72
5.1.1	压电式传感器的工作原理	72
5.1.2	压电式传感器的测量电路	76

5.1.3	压电式传感器的应用	80
5.2	压磁式传感器	82
5.2.1	压磁式传感器的基本原理	83
5.2.2	压磁式传感器的结构	85
5.2.3	压磁式传感器的应用	86
	习题与思考题	88
第 6 章	磁电式传感器技术	89
6.1	磁电感应式传感器	89
6.1.1	磁电感应式传感器的工作原理	89
6.1.2	磁电感应式传感器的结构	90
6.1.3	磁电感应式传感器的特性	92
6.1.4	磁电感应式传感器的应用	92
6.2	霍尔式传感器	95
6.2.1	霍尔效应及其参数	95
6.2.2	霍尔元件及其传感器	97
6.2.3	霍尔式传感器的应用	99
	习题与思考题	101
第 7 章	热电式传感器技术	102
7.1	热电偶传感器	102
7.1.1	热电效应与热电偶测温原理	102
7.1.2	热电偶及其分度表	105
7.1.3	热电偶的结构	107
7.1.4	热电偶传感器的应用	108
7.2	热释电传感器	114
7.2.1	热释电效应	114
7.2.2	热释电传感器的工作原理	115
7.2.3	热释电传感器的等效电路	116
7.2.4	热释电传感器的应用	116
	习题与思考题	118
第 8 章	光电式传感器技术	120
8.1	光电效应与光电传感器	120
8.1.1	光电效应	120
8.1.2	光电器件	121
8.1.3	光电传感器	132
8.1.4	光电传感器的应用	135
8.1.5	光耦合器件	137
8.2	光纤传感器	139
8.2.1	光纤的结构和传输原理	139

8.2.2	光纤传感器的组成与分类	142
8.2.3	光纤传感器的应用	144
8.3	红外传感器	146
8.3.1	红外线的基本知识	147
8.3.2	红外探测器	148
8.3.3	红外传感器的应用	149
8.4	激光传感器	152
8.4.1	激光的形成原理	152
8.4.2	激光器的种类与结构	155
8.4.3	激光与激光传感器的应用	158
8.5	图像传感器	159
8.5.1	CCD 图像传感器	159
8.5.2	CMOS 图像传感器	162
8.5.3	图像传感器应用实例	163
	习题与思考题	165
第 9 章	半导体传感器技术	167
9.1	气敏传感器	167
9.1.1	气敏电阻的工作原理	167
9.1.2	气敏元件的结构	168
9.1.3	气敏传感器的分类	168
9.1.4	气敏传感器的应用	170
9.2	湿敏传感器	171
9.2.1	湿敏电阻的工作原理	172
9.2.2	湿敏电阻的主要特性	173
9.2.3	湿敏传感器的结构	174
9.2.4	湿敏传感器的应用	176
9.3	色敏传感器	177
9.3.1	色敏传感器的原理	177
9.3.2	色敏传感器的特性	179
9.3.3	色敏传感器的应用	180
	习题与思考题	181
第 10 章	波式传感器技术	182
10.1	超声波传感器	182
10.1.1	超声波的基本知识	182
10.1.2	超声波传感器的组成	185
10.1.3	超声波传感器的应用	187
10.2	微波传感器	191
10.2.1	微波的基本知识	192

10.2.2	微波传感器的组成	192
10.2.3	微波传感器的应用	193
	习题与思考题	195
第 11 章	数字式传感器技术	196
11.1	光栅传感器	196
11.1.1	光栅的基本知识	196
11.1.2	莫尔条纹及其测量原理	198
11.1.3	光栅测量系统	201
11.1.4	光栅测量系统的应用	207
11.2	数字编码器	207
11.2.1	接触式码盘编码器	207
11.2.2	光电式编码器	209
11.2.3	光电编码传感器的应用	213
	习题与思考题	214
第 12 章	检测装置的信号处理技术	215
12.1	信号处理技术	215
12.1.1	信号放大技术	215
12.1.2	线性化处理技术	217
12.2	干扰抑制技术	219
12.2.1	共模与差模干扰	219
12.2.2	常用的干扰抑制技术	222
	习题与思考题	228
第 13 章	智能传感器与检测新技术	229
13.1	智能传感器	229
13.1.1	智能传感器概述	229
13.1.2	计算型智能传感器	230
13.1.3	生物传感器	232
13.1.4	其他类型的智能传感器	234
13.1.5	智能传感器实例	235
13.2	检测新技术	236
13.2.1	检测技术的发展趋势	236
13.2.2	检测新技术简介	238
13.2.3	传感器网络技术	241
13.2.4	基于检测新技术的智能系统	244
13.3	MEMS 传感器技术与应用	246
13.3.1	MEMS 传感器的基本知识	246
13.3.2	MEMS 传感器的研究内容	248
13.3.3	MEMS 传感器的应用	249

13.3.4 MEMS 传感器的典型产品简介·····	252
13.4 物联网关键技术及其进展·····	253
13.4.1 物联网技术基础知识·····	253
13.4.2 物联网关键技术·····	254
13.4.3 物联网与智慧城市·····	255
13.4.4 物联网与工业 4.0·····	258
习题与思考题·····	260
附录·····	262
参考文献·····	268

第 1 章 传感器与检测技术概论

随着物联网技术和工业 4.0 技术的发展,几乎没有任何一种生产活动和科学技术的发展能离开信息的采集与信号的探测技术的支持,即使人们的日常生活也与信息资源的开发、采集、传送和处理息息相关。原理不同、功能各异、形式多样的探测器和传感器作为信息感知、捕获和探测的窗口,在信号探测与信息处理系统中起着极为重要的作用。

1.1 传感器的定义、组成和分类

1.1.1 传感器的定义与组成

1. 传感器的定义

国际电工委员会(International Electrotechnical Committee, IEC)对传感器(transducer/sensor)的定义为:“传感器是测量系统中的一种前置部件,它将输入变量转换成可供测量的信号”。“传感器是包括承载体和电路连接的敏感元件”,而“传感器系统则是组合有某种信息处理(模拟或数字)能力的系统”。传感器是传感系统的一个组成部分,它是被测量信号输入的第一道关口。

中国国家标准 GB/T7665-2005《传感器通用术语》对传感器下的定义是:“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成”。

可见,传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息,按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

在有些学科领域,传感器又称为敏感元件、检测器及转换器等。这些不同提法,反映了在不同的技术领域中,根据器件用途对同一类型的器件使用着不同的技术术语的现象。

在电子技术领域,常把能感受信号的电子元件称为敏感元件,如热敏元件、磁敏元件、光敏元件及气敏元件等;在超声波技术中,则强调的是能量的转换,如压电式换能器;这些提法在含义上有些狭窄。而传感器一词是使用最为广泛而概括的用语。

传感器的输出信号通常是电量,它便于传输、转换、处理及显示等。电信号有很多形式,如电压、电流、电容及电阻等,输出信号的形式由传感器的原理确定。

2. 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。

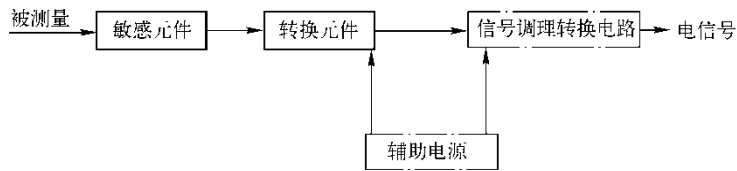


图 1-1 传感器组成框图

1.1.2 传感器的分类

传感器技术是一门知识交叉和密集型的技术，它与许多学科有关。传感器的分类目前尚无统一规定，传感器本身又种类繁多，原理各异，检测对象五花八门，给分类工作带来一定困难，通常传感器按下列原则进行分类。

1. 按工作原理分类

按工作原理分类是以传感器的工作原理作为分类依据，可分为压阻式、压电式、电感式、应变式、电容式、压变式及磁电式等类别。

这种分类适用于两类人员，一类是初次接触这门技术的人，可以从工作原理出发，了解各种各样传感器的结构、材料、电路和应用特点。另一类是那些从事传感器技术开发、研制和生产检测设备的技术人员。这种分类方法有利于传感器专业工作者从原理和设计上作归纳性的分析和研究。

2. 按被测参数分类

按被测参数分类是以被传感器测量的参数作为分类依据。大类划分如：热工量、机械量、几何量、成分量、状态量及电工量等被测类。细类划分如：温度、压力、位移、速度、厚度、角度、浓度、浊度及启停等被测量。按被测参数分类如表 1-1 所示。

表 1-1 按被测参数分类

被测量类型	被测量	被测量类型	被测量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力（压强）、压差、真空度、流量、流速、物位、液位及界面	物性和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、黏度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度及颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声及质量（重量）	状态量	工作机械的运动状态（启动、运行、停止等）、生产设备的异常状态（超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞及断裂等）
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度及材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度及材料的磁性能

这种分类方法适用于在工程实际中的使用者，便于他们以被测参数为准，合理选择和使用传感器以及由其组成的测量系统。

本书中的传感器主要讨论的是将非电量转换为电量的，因此，表 1-1 中电工量的测量，不在本书的讨论范围内。

3. 按工作机理分类

按工作机理分类是以传感器的工作机理为分类依据，可分为结构型和物性型两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律和运动定律等构成的。物理学中的定律一般是以方程式给出的。对于传感器来说，这些方程式也就是许多传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大关系。以差动变压器为例，无

论使用坡莫合金或铁氧体做铁心，还是使用铜线或其他导线做绕组，都是作为差动变压器而工作的。

物性型传感器是利用物质法则构成的。物质法则是表示物质某种客观性质的法则。这种法则大多数以物质本身的常数形式给出。这些常数的大小决定了传感器的主要性能。因此，物性型传感器的性能随材料的不同而异。如所有的半导体传感器，以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷以及合金等性能变化的传感器都是物性型传感器。

4. 按能量传递方式分类

按能量传递方式分类是以传感器中能量的传递方式为分类依据。按照这种方式传感器可分为有源传感器和无源传感器两大类。

有源传感器是不依靠外加能源工作的传感器。将非电能量转化为电能量，只转化能量本身，并不转化能量信号的传感器，称为有源传感器，也称为能量转换性传感器或换能器。常常配合有电压测量电路和放大器，如压电式、热电式及磁电式等传感器。

无源传感器是依靠外加能源工作的传感器。无源传感器本身并不是一个换能器，被测非电量仅对传感器中的能量传递起控制或调节作用，所以它必须具有辅助能源—电源。无源传感器的输出是输入信号的一个函数。

另外，根据传感器输出是模拟信号还是数字信号，可分为模拟传感器和数字传感器；根据转换过程可逆与否可分为双向传感器和单向传感器等。

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：

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

式中， a_0 为输入量 x 为零时的输出量； a_1, a_2, \cdots, 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。

静态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，几种直线拟合方法如图 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。

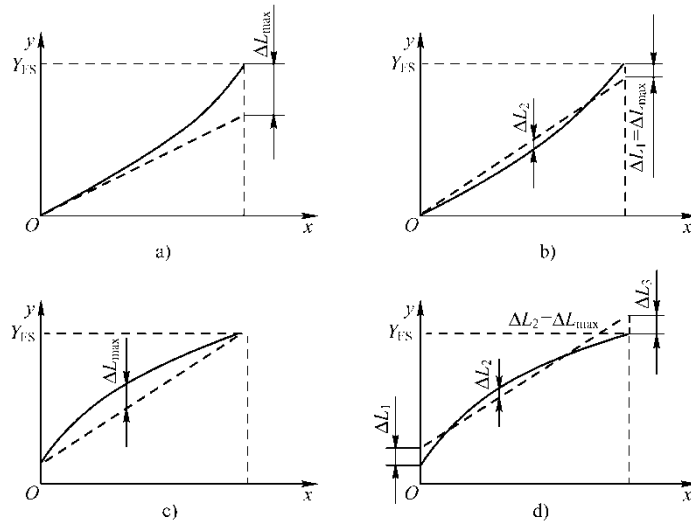


图 1-2 几种直线拟合方法

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 γ_L 表示，即：

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

式中， ΔL_{\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 Δy 与引起输出量增量的输入量增量 Δx 的比值，即：

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

式中， S 为灵敏度； Δy 为传感器输出量增量； Δx 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。

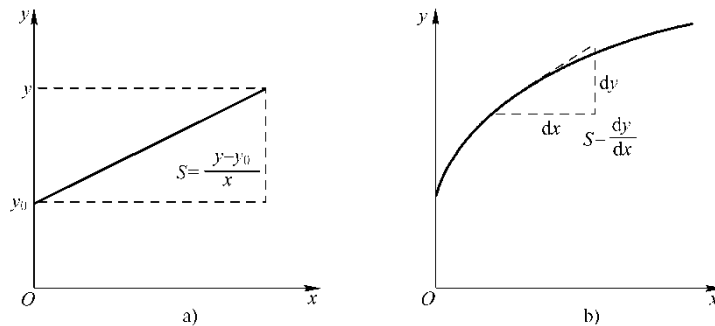


图 1-3 传感器的灵敏度

a) 线性传感器 b) 非线性传感器

3. 迟滞性

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性，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、传动机构的间隙以及紧固件松动等。

迟滞大小通常由实验确定。迟滞性误差可由下式计算：

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

式中， γ_H 为迟滞误差； ΔH_{\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的程度，重复性特性图如图 1-5 所示。

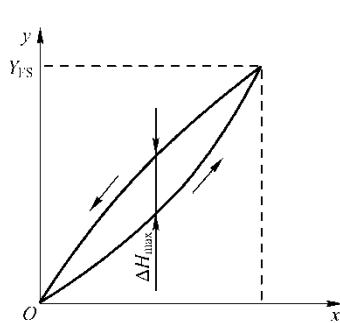


图 1-4 迟滞性

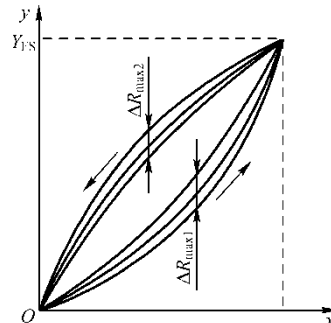


图 1-5 重复性特性图

重复性误差 γ_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 ΔR_{\max} 表示，即：

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

式中， γ_R 为重复性误差； ΔR_{\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，传感器的动态特性如图 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，

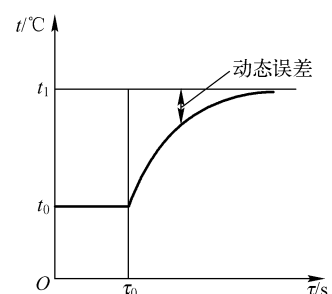


图 1-6 传感器的动态特性

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。

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察传感器的响应的。

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。

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、斜坡函数及脉冲函数等。

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，一般将式（1-7）视为一阶传感器单位阶跃响应的通式。

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

式中， τ 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：

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

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。 τ 越小，响应曲线越接近于输入阶跃曲线，因此， τ 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：□

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

式中， ω_n 为传感器的固有频率； ζ 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 ζ 和固有频率 ω_n 。图 1-8 为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。

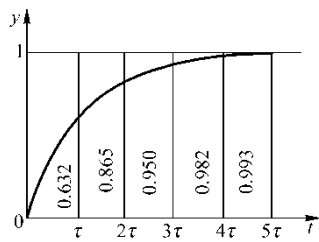


图 1-7 一阶传感器的单位阶跃响应曲线

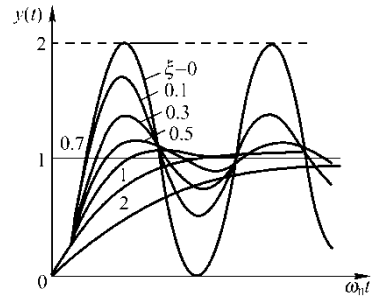


图 1-8 二阶传感器的单位阶跃响应曲线

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

阻尼比 ζ 直接影响超调量和振荡次数。 $\zeta=0$, 为临界阻尼, 超调量为 100%, 产生等幅振荡, 达不到稳态。 $\zeta>1$, 为过阻尼, 无超调也无振荡, 但达到稳态所需时间较长。 $\zeta<1$, 为欠阻尼, 衰减振荡, 达到稳态值所需时间随 ζ 的减小而加长。 $\zeta=1$ 时响应时间最短。但实际使用中常按稍欠阻尼调整, ζ 取 0.7~0.8 为最好。

(3) 瞬态响应特性指标

- 1) 时间常数 τ 一阶传感器时间常数 τ 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如下内容。

- 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 τ 来表征一阶传感器的动态特性。 τ 越小, 频带越宽。
- 3) 固有频率: 二阶传感器的固有频率 ω_n 表征了其动态特性。

1.3 检测技术的基础知识

信息时代, 人们从事的任何生产和科学实验等活动主要依靠对信息资源的开发、获取、传输和处理, 这一系列工作的根本都离不开信息的采集——感知、获取与检测。传感器就是处于研究对象与测控系统的中介位置, 一切科学实验和生产过程, 特别是自动控制系统要获取的信息, 都要通过传感器将其转换为容易传输与处理的电信号。

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理论, 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：

$$x = nu \quad (1-10)$$

$$n = \frac{x}{u} \quad (1-11)$$

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称为测量结果。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。

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、传输及处理，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、可以与计算机联接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等。

自动检测技术广泛应用于机械制造行业、石油与化工行业、冶炼行业、轻工与纺织行业、制药与食品行业、烟草行业、环境保护部门、文物保护领域、现代物流行业和科学研究和产品开发等关系国计民生的各行各业中，与我们的生产、生活密切相关。它是自动化领域的重要组成部分，尤其在自动控制中，如果对控制参数不能有效准确检测，控制就成为无源之水，无本之木。

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,决定被测量的数值。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

$$x = N + \Delta \quad (1-12)$$

式中, N 为标准量; x 为被测量; Δ 为二者之差。

由于 N 是标准量,其误差很小,且使用的是 ΔN ,因此可选用高灵敏度的偏差式仪表测量 Δ ,即使测量 Δ 的精度较低,但因测量的是 Δx ,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, 开环测量系统框图如图 1-10 所示。

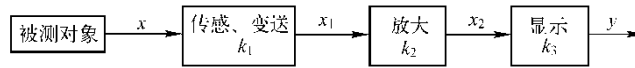


图 1-10 开环测量系统框图

输入、输出关系为:

$$y = k_1 k_2 k_3 x \quad (1-13)$$

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, 闭环测量系统框图如图 1-11 所示。

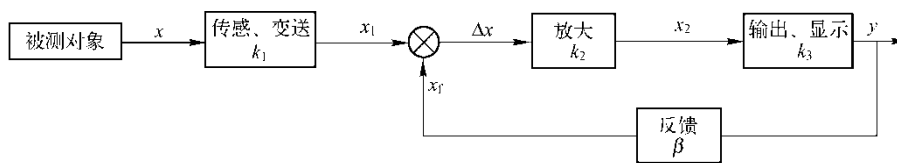


图 1-11 闭环测量系统框图

由图 1-11 可知:

$$y = k \Delta x = k(x_1 - x_f) = kx_1 - k\beta y \quad (1-14)$$

当 $k \gg 1$ 时, 有:

$$y = \frac{k_1}{\beta} x \quad (1-15)$$

式中, x 为输入量; y 为输出量; Δx 为正向通道的输入量; β 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。

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、经济核算及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作法是不可取的, 要有技术与经济

兼顾的意识。在使用仪表和传感器时，经常也会遇到基本误差和附加误差两个概念。

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，又称为示值。真值是被测物体这个参数的真实值。

(1) 绝对误差

绝对误差又称为示值误差，是指测量值与被测参数真值之间的差值，即测量值不能准确表示真值的程度，它反映了测量质量的好坏。

$$\Delta = x - L_0 \quad (1-16)$$

式中， Δ 为绝对误差； L_0 为真值； x 为测量值。

对测量值进行修正时，要用到绝对误差。修正值是与绝对误差大小相等、符号相反的值，实际值等于测量值加上修正值。

采用绝对误差表示测量误差，不能很好地说明测量质量的好坏。例如在温度测量时，绝对误差 $\Delta=1^\circ\text{C}$ ，对体温测量来说是不允许的，而对测量钢水温度来说却是一个极好的测量结果。

(2) 相对误差

相对误差的定义由下式给出：

$$\gamma = \frac{\Delta}{L_0} \times 100\% \quad (1-17)$$

$$\xi = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-18)$$

式中， γ 为相对误差； Δ 为绝对误差； L_0 为真值； ξ 为标称相对误差； x 为测量值。

由于被测量的真实值无法知道，实际测量时用测量值代替真实值进行计算，这个相对误差称为标称相对误差。

(3) 引用误差

引用误差是一种实用方便的相对误差，常常在多档和连续刻度的仪器仪表中使用。这类仪表的测量范围不是一个点，而是一个量程，这时按照式 (1-17) 和 (1-18) 计算，由于分母是随着被测量的变化而变化的变量，所以计算很麻烦。

为了计算和划分仪表精度等级的方便，通常采用引用误差，它是从相对误差演变过来的，其分母是常数，取自仪器仪表的量程值，因而它是相对于仪表满量程的一种误差。一般也用百分数表示，即：

$$\delta = \frac{\Delta}{R} \times 100\% \quad (1-19)$$

式中， δ 为引用误差； Δ 为满量程绝对误差； R 为仪表满量程。

2. 基本误差与附加误差

这些讨论基本针对仪表的静态误差。静态误差是指仪表静止状态时的误差，或被测量变化十分缓慢时所呈现的误差，此时不考虑仪表的惯性因素。仪表静态误差的应用更为普遍。仪表还存在动态误差，动态误差是指仪表因惯性迟延所引起的附加误差，或变化过程中的误差。

(1) 基本误差

任何测量都是与环境条件相关的，测量仪表应用时应严格按照规定来使用。

基本误差是指仪表在规定的标准条件下（即参比工作条件）进行测量所得到的误差，这些环境条件包括环境温度、相对湿度、电源电压和安装方式等。例如，仪表是在电源电压为 $(220 \pm 5)\text{V}$ 、电网频率为 $(50 \pm 2)\text{Hz}$ 、环境温度为 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $65\% \pm 5\%$ 的条件下标定的。如果这台仪表在这个条件下工作，则仪表所具有的误差为基本误差。测量仪表的精度

等级是由基本误差决定的。

(2) 附加误差

附加误差是指当仪表的使用条件偏离额定条件下出现的误差。例如温度附加误差、频率附加误差、电源电压波动附加误差等。因此，在非参比工作条件下进行测量所获得的误差为：

$$\Delta = \Delta_B + \Delta_A \quad (1-20)$$

式中， Δ —误差； Δ_B —基本误差； Δ_A —附加误差。

3. 误差的性质与分类

根据测量数据中的误差所呈现的规律，将误差分为三种，即系统误差、随机误差和粗大误差。这种分类方法便于测量数据处理。

(1) 系统误差

对同一被测量进行多次重复测量时，如果误差按照一定的规律出现，则把这种误差称为系统误差。例如，标准量值的不准确及仪表刻度的不准确而引起的误差。

引起系统误差的原因主要是仪表制造、安装、使用方法不正确，也可能是测量人员的一些不良的读数习惯引起的。

系统误差是一种有规律的误差，可以采用修正值或补偿校正的方法来减小或消除。□

(2) 随机误差

对同一被测量进行多次重复测量时，绝对值和符号不可预知地随机变化，但就误差的总体而言，具有一定的统计规律性的误差称为随机误差。

引起随机误差的原因是很多难以掌握或暂时未能掌握的微小因素，一般无法控制。例如电磁场的微变，零件的摩擦，空气的扰动，气压或湿度的变化等。

对于随机误差不能用简单的修正值来修正，只能用概率和数理统计的方法去计算它出现的可能性的概率大小。

(3) 粗大误差

明显偏离测量结果的误差称为粗大误差，又称疏忽误差。这类误差是由于测量者疏忽大意或环境条件的突然变化而引起的。对于粗大误差，首先应设法判断是否存在，然后将其剔除。

习题与思考题

1. 某线性位移测量仪，当被测位移由 4.5mm 变到 5.0mm 时，位移测量仪的输出电压由 3.5V 减至 2.5V，求该仪器的灵敏度。

2. 某测温系统由以下四个环节组成，各自的灵敏度如下：铂电阻温度传感器为 $0.35\Omega/^\circ\text{C}$ ；电桥为 $0.01\text{V}/\Omega$ ；放大器为 100（放大倍数）；笔式记录仪为 $0.1\text{cm}/\text{V}$ 。

求：测温系统的总灵敏度；记录仪笔尖位移 4cm 时所对应的温度变化值。

3. 有三台测温仪表，量程均为 $0\sim 600^\circ\text{C}$ ，引用误差分别为 2.5%、2.0% 和 1.5%，现要测量 500°C 的温度，要求相对误差不超过 2.5%，问选哪台仪表合理？

4. 检测及仪表在控制系统中起什么作用？两者的关系如何？

5. 典型的检测仪表控制系统的结构是怎样的？各单元主要起什么作用？

6. 传感器由哪几部分组成？请叙述各部分的作用。

7. 传感器的静态特性有哪些？表征的是传感器的哪些性质？

8. 某同学做了一个位移测量实验，使用同一台仪器，来回测量了 3 次，获得实验数据如下表，请画出曲线，绘制出拟合直线并列出其方程。并计算其灵敏度、线性度、迟滞性和重复性。问，当位移量程为 -1.0 至 $+1.0$ 区间时，精度等级是多少？

第一次测量	位移/mm	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	电压/mV	61	50	41	31	21	11	1	-10	-19	-29	-38	-49	-60
第二次测量	位移/mm	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.0	-0.5	-1.0	-1.5	-2.0	-2.5	-3.0
	电压/mV	-60	-51	-41	-32	-20	-10	0	10	19	30	39	50	61
第三次测量	位移/mm	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	电压/mV	61	51	40	31	20	9	-1	-11	-21	-30	-41	-51	-62

第 2 章 电阻式传感器技术

如果被测量的变化能引起某种物质的电阻值发生变化时,我们就可以利用这种物理现象开发出一种传感器,这种传感器从原理上通常被归类为电阻式传感器。

如果因为应力的变化使得金属应变片发生了电阻阻值变化,这种传感器叫作电阻应变式传感器。如果因为压力的变化使得半导体应变片发生了电阻阻值变化,这种传感器叫作压阻式传感器。如果因为温度的变化使得金属导体的电阻值发生了变化,这种传感器叫作热电阻式传感器。如果因为温度的变化使得半导体电阻的阻值发生了变化,这种传感器叫作热敏电阻式传感器。

2.1 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器,传感器由在弹性元件上粘贴电阻应变敏感元件构成。

当被测物理量作用在弹性元件上时,弹性元件的变形引起应变敏感元件的阻值变化,通过转换电路将其转变成电量输出,电量变化的大小反映了被测物理量的大小。

应变式电阻传感器目前广泛用于测量力、力矩、压力、加速度以及重量等参数。

2.1.1 电阻应变效应

电阻应变片的工作原理是基于应变效应,即在导体产生机械变形时,它的电阻值相应发生变化。

1. 应变效应的理论

一根金属电阻丝,在其未受力时,原始电阻值为:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2-1)$$

式中, ρ 为电阻丝的电阻率; L 为电阻丝的长度; S 为电阻丝的截面积。

金属电阻丝的应变效应如图 2-1 所示,当电阻丝受到拉力 F 作用时,将伸长 ΔL ,横截面积相应减小 ΔS ,电阻率将因晶格发生变形等因素而改变 $\Delta\rho$,故引起电阻值相对变化量为:

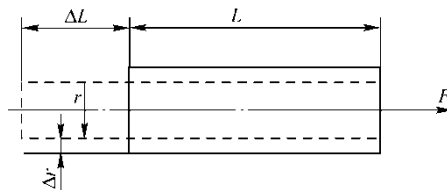


图 2-1 金属电阻丝的应变效应

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-2)$$

式中, $\Delta L/L$ 为长度相对变化量,用应变 ε 表示; $\Delta S/S$ 为圆形电阻丝的截面积相对变化量; $\Delta\rho/\rho$ 为圆形电阻丝的电阻率相对变化量,即:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2-3)$$

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta r}{r} \quad (2-4)$$

由材料力学可知，在弹性范围内，金属丝受拉力时，沿轴向伸长，沿径向缩短，那么轴向应变和径向应变的关系可表示为：

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta L}{L} = -\mu \varepsilon \quad (2-5)$$

式中： μ 为电阻丝材料的泊松比，负号表示为应变方向相反。

将式 (2-3)、式 (2-4)、式 (2-5) 代入式 (2-2)，可得：

$$\frac{\Delta R}{R} = (1+2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-6)$$

通常把单位应变能引起的电阻值变化称为电阻丝的灵敏度系数。其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化的量，其表达式为：

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1+2\mu) + \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (2-7)$$

2. 应变效应的结论

(1) 灵敏度系数

灵敏度系数受两个因素影响，一个是受力后材料几何尺寸的变化，即 $(1+2\mu)$ ；另一个是受力后材料的电阻率发生的变化，即 $(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$ 。

1) 对金属材料电阻丝来说，灵敏度系数表达式中 $(1+2\mu)$ 的值要比 $(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$ 大得多，而半导体材料的 $(\Delta\rho/\rho)/\varepsilon$ 项的值比 $(1+2\mu)$ 大得多。

2) 大量实验证明，在电阻丝拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即 K 为常数。

(2) 应变的测量

用应变片测量应变或应力时，根据上述特点，在外力作用下，被测对象产生微小机械变形，应变片随着发生相同的变化，同时应变片电阻值也发生相应变化。当测得应变片电阻值变化量 ΔR 时，便可得到被测对象的应变值。

根据应力与应变的关系，得到应力值：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-8)$$

式中， σ 为试件的应力； ε 为试件的应变； E 为试件材料的弹性模量。

由此可知，应力值 σ 正比于应变 ε ，而试件应变 ε 正比于电阻值的变化，所以应力 σ 正比于电阻值的变化，这就是利用应变片测量应变的基本原理。

2.1.2 电阻应变片的结构与特性

1. 电阻应变片的种类

电阻应变片品种繁多，形式多样。但常用的应变片可分为两类：金属电阻应变片和半导体电阻应变片。半导体电阻应变片是基于压阻效应，将在下一节中讨论。

金属电阻应变片由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成，如图 2-2 所示。

敏感栅是应变片的核心部分，它粘贴在绝缘的基片上，其上再粘贴起保护作用的覆盖层，两端焊接引出导线。

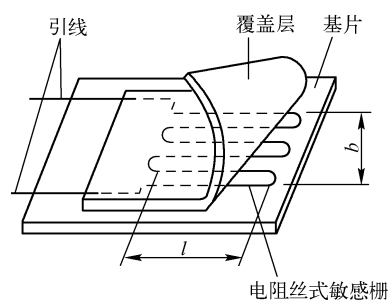


图 2-2 金属电阻应变片的结构

金属电阻应变片的种类如图 2-3 所示。金属电阻应变片的敏感栅有丝式、箔式（见图 2-3）和薄膜式 3 种。

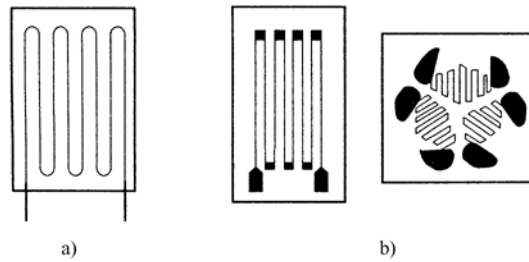


图 2-3 金属电阻应变片的种类

a) 丝式 b) 箔式

(1) 丝式应变片

丝式应变片是将金属丝按照图示形状弯曲后用粘合剂贴在衬底上而成，基底可分为纸基、胶基和纸浸胶基等。电阻丝两端焊有引出线，使用时只要将应变片贴于弹性体上就可以构成应变式传感器。

(2) 箔式应变片

箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅，其厚度一般在 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 。其优点是散热条件好，允许通过的电流较大，可制成各种所需的形状，便于批量生产。

(3) 薄膜应变片

薄膜应变片是采用真空蒸发或真空沉淀等方法在薄的绝缘基片上形成 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻薄膜的敏感栅，最后再加上保护层。它的优点是应变灵敏度系数大，允许电流密度大，工作范围广。

2. 横向效应

图 2-4 所示为应变片轴向受力及横向效应，当将应变片粘贴在被测试件上时，由于其敏感栅是由 n 条长度为 l_1 的直线段和 $(n-1)$ 个半径为 r 的半圆组成，若该应变片承受轴向应力而产生纵向拉应变 ϵ_x 时，则各直线段的电阻将增加，但在半圆弧段受到从 $+\mu\epsilon_x$ 到 $-\mu\epsilon_x$ 之间变化的应变，圆弧段电阻的变化将小于沿轴向安放同样长度电阻丝电阻的变化。

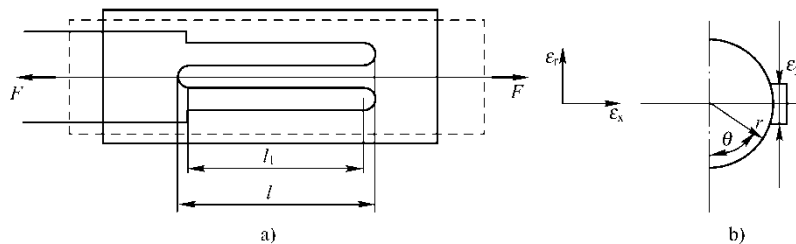


图 2-4 应变片轴向受力及横向效应

a) 应变片承受轴向应力图 b) 应变片横向效应图

综上所述，将直电阻丝绕成敏感栅后，虽然长度不变，应变状态相同，但由于应变片敏感栅的电阻变化较小，因而其灵敏系数 K 较电阻丝的灵敏系数 K_0 小，这种现象称为应变片的横向效应。

当实际使用应变片的条件与其灵敏系数 K 的标定条件不同时，如 $\mu \neq 0.285$ 或受非单向应力状态，由于横向效应的影响，实际 K 值要改变，如仍按标称灵敏系数来进行计算，可能造成较大误差。当不能满足测量精度要求时，应进行必要的修正，为了减小横向效应产生的

测量误差，现在一般多采用箔式应变片。

3. 应变片的温度误差

由于测量现场环境温度的改变而给测量带来的附加误差，称为应变片的温度误差。产生应变片温度误差的主要因素有：敏感栅的电阻丝阻值随温度变化的关系可用下式表示：

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 \Delta t) \quad (2-9)$$

式中， R_t 为温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值； R_0 为温度为 0°C 时的电阻值； α_0 为金属丝的电阻温度系数； Δt 为温度变化值 ($\Delta t = t - t_0$)。

当温度变化 Δt 时，电阻丝电阻的变化值为：

$$\Delta R_t = R_t - R_0 = R_0 \alpha_0 \Delta t \quad (2-10)$$

当试件与电阻丝材料的线膨胀系数相同时，不论环境温度如何变化，电阻丝的变形仍和自由状态一样，不会产生附加变形。

当试件和电阻丝线膨胀系数不同时，由于环境温度的变化，电阻丝会产生附加变形，从而产生附加电阻。

2.1.3 电阻应变片的测量电路

由于机械应变一般都很小，要把微小应变引起的微小电阻变化测量出来，同时要把电阻相对变化 $\Delta R/R$ 转换为电压或电流的变化。就需要有专用测量电路，通常采用直流电桥和交流电桥。

1. 直流电桥

(1) 直流电桥平衡条件

直流电桥如图 2-5 所示， E 为电源， R_1 、 R_2 、 R_3 及 R_4 为桥臂电阻， R_L 为负载电阻。

其输出电压 U_0 为：

$$U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-11)$$

当电桥平衡时， $U_0 = 0$ ，则有：

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (2-12)$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad (2-13)$$

式 (2-13) 称为电桥平衡条件。这说明欲使电桥平衡，其相邻两臂电阻的比值应相等，或相对两臂电阻的乘积相等。

(2) 电压灵敏度

R_1 为电阻应变片， R_2 、 R_3 、 R_4 为电桥固定电阻，这就构成了单臂电桥。

应变片工作时，其电阻值变化很小，电桥相应输出电压也很小，一般需要加入放大器放大。由于放大器的输入阻抗比桥路输出阻抗高很多，所以此时仍视电桥为开路情况。

当产生应变时，若应变片电阻变化为 ΔR ，其他桥臂固定不变，电桥输出电压 $U_0 \neq 0$ ，则电桥不平衡输出电压为：

$$U_0 = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} = E \frac{\frac{R_4}{R_3} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} \quad (2-14)$$

设桥臂比 $n = \frac{R_2}{R_1}$ ，由于 $\Delta R_1 \ll R_1$ ，分母中 $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ 可忽略，并考虑到平衡条件，将式 (2-13)

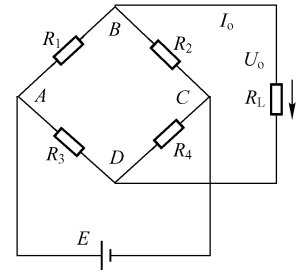


图 2-5 直流电桥

代入式(2-14)可得到:

$$U_O = E \left(\frac{n}{(1+n)^2} \right) \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-15)$$

电桥电压灵敏度是单位应变片电阻阻值相对变化引起的输出电桥电压的变化。即:

$$K_U = \frac{U_O}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = E \frac{n}{(1+n)^2} \quad (2-16)$$

从式(2-16)分析可知:

1) 电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压, 供电电压越高, 电桥电压灵敏度越高, 但供电电压的提高受到应变片允许功耗的限制, 所以要作适当选择。

2) 电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值 n 的函数, 恰当地选择桥臂比 n 的值, 保证电桥具有较高的电压灵敏度。在电桥电压确定后, 当 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 时, 电桥电压灵敏度最高。

3) 当电源电压 E 和电阻相对变化量 $\Delta R_1/R_1$ 一定时, 电桥的输出电压及其灵敏度也是定值, 且与各桥臂电阻阻值大小无关。

(3) 电阻应变片的温度补偿方法

电阻应变片的温度补偿方法通常有线路补偿法和应变片自补偿两大类。

电桥补偿是最常用的且效果较好的线路补偿法。图 2-6 是电桥补偿法的原理图。电桥输出电压 U_O 与桥臂参数的关系为:

$$U_O = A(R_1 R_4 - R_B R_3) \quad (2-17)$$

式中, A 为由桥臂电阻和电源电压决定的常数; R_1 为工作应变片; R_B 为补偿应变片。

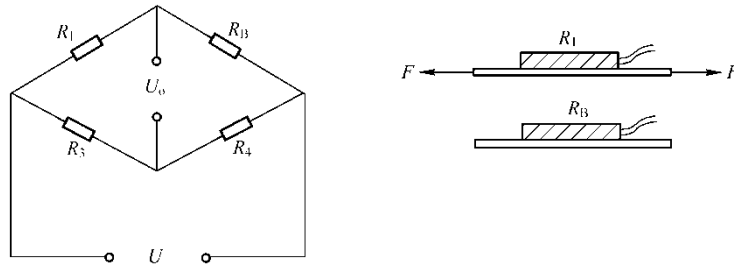


图 2-6 电桥补偿法

R_1 —工作应变片 R_B —补偿应变片

由上式可知, 当 R_3 和 R_4 为常数时, R_1 和 R_B 对电桥输出电压 U_O 的作用方向相反。利用这一基本关系可实现对温度的补偿。

测量应变时, 工作应变片 R_1 粘贴在被测试件表面上, 补偿应变片 R_B 粘贴在与被测试件材料完全相同的补偿块上, 且仅工作应变片承受应变。如图 2-6 所示。

当被测试件不承受应变时, R_1 和 R_B 又处于同一环境温度 $t^\circ\text{C}$ 的温度场中, 调整电桥参数, 使之达到平衡, 有:

$$U_O = A(R_1 R_4 - R_B R_3) = 0 \quad (2-18)$$

工程上, 一般按 $R_1=R_2=R_3=R_4$ 选取桥臂电阻。当温度升高或降低 $\Delta t = t - t_0$ 时, 两个应变片因温度而引起的电阻变化量相等, 电桥仍处于平衡状态, 即:

$$U_O = A[(R_1 + \Delta R_{1t})R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt})R_3] = 0 \quad (2-19)$$

若此时被测试件有应变 ε 的作用, 则工作应变片电阻 R_1 又有新的增量 $\Delta R_1 = R_1 K \varepsilon$, 而补偿片因不承受应变, 故不产生新的增量, 此时电桥输出电压为:

$$U_O = A(R_1 + \Delta R_1)R_4 = AR_4 R_1 (1 + \varepsilon) \quad (2-20)$$

由上式可知，电桥的输出电压 U_o 仅与被测试件的应变 ε 有关，而与环境温度无关。

应当指出，若实现完全补偿，上述分析过程必须满足四个条件：

1) 在应变片工作过程中，保证 $R_3=R_4$ 。

2) R_1 和 R_B 两个应变片应具有相同的电阻温度系数 α ，线膨胀系数 β ，应变灵敏度系数 K 和初始电阻值 R_0 。

3) 粘贴补偿片的补偿块材料和粘贴工作片的被测试件材料必须一样，两者线膨胀系数相同。

4) 两应变片应处于同一温度场。

(4) 电阻应变片的非线性补偿方法

1) 半桥差动电路。

为了减小和克服非线性误差，在试件上安装两个工作应变片，一个受拉应变，一个受压应变，接入电桥相邻桥臂，称为半桥差动电路，该电桥输出电压为：

$$U_o = E \left(\frac{\Delta R_1 + R_1}{\Delta R_1 + R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-21)$$

若 $\Delta R_1 = \Delta R_2$, $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ ，则得：

$$U_o = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-22)$$

由式 (2-22) 可知， U_o 与 $(\Delta R_1/R_1)$ 呈线性关系，差动电桥无非线性误差，而且电桥电压灵敏度 $K_U = E/2$ ，比单臂工作时提高一倍，同时还具有温度补偿作用。

2) 全桥差动电路。

若将电桥四臂接入四片应变片，即两个受拉应变，两个受压应变，将两个应变符号相同的接入相对桥臂上，构成全桥差动电路，若 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则：

$$U_o = E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-23)$$

$$K_U = E \quad (2-24)$$

此时全桥差动电路不仅没有非线性误差，而且电压灵敏度是单片的 4 倍，同时仍具有温度补偿作用。

2. 交流电桥

根据直流电桥分析可知，由于应变电桥输出电压很小，一般都要加放大器，而直流放大器易于产生零漂，因此应变电桥多采用交流电桥。

图 2-7 所示为交流电桥， \dot{U} 为交流电压源， \dot{U}_o 为开路输出电压。□

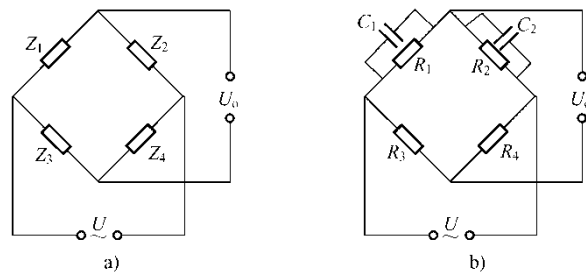


图 2-7 交流电桥

a) 基本电路 b) 交流电容电桥

由于供桥电源为交流电源，引线分布电容使得二桥臂应变片呈现复阻抗特性，即相当于两只应变片各并联了一个电容，则每一桥臂上复阻抗分别为：

$$Z_1 = \frac{R_1}{R_1 + j\omega R_1 C_1} \quad (2-25)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{R_2 + j\omega R_2 C_2} \quad (2-26)$$

$$Z_3 = R_3; \quad Z_4 = R_4 \quad (2-27)$$

式中, C_1 、 C_2 表示应变片引线分布电容, 由交流电路分析可得:

$$U = \frac{U(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3)}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \quad (2-28)$$

要满足电桥平衡条件, 即 $U_0 = 0$, 则有:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad (2-29)$$

取 $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$, 将式 (2-25)、式 (2-26)、式 (2-27) 代入式 (2-29), 可得:

$$\frac{R_3}{R_1} + j\omega R_3 C_1 = \frac{R_4}{R_2} + j\omega R_4 C_2 \quad (2-30)$$

由实部、虚部分别相等, 整理可得交流电桥的平衡条件为:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}, \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2-31)$$

对这种交流电容电桥, 除要满足电阻平衡条件外, 还必须满足电容平衡条件。为此在桥路上除设有电阻平衡调节外还设有电容平衡调节。交流电桥平衡调节电路如图 2-8 所示。

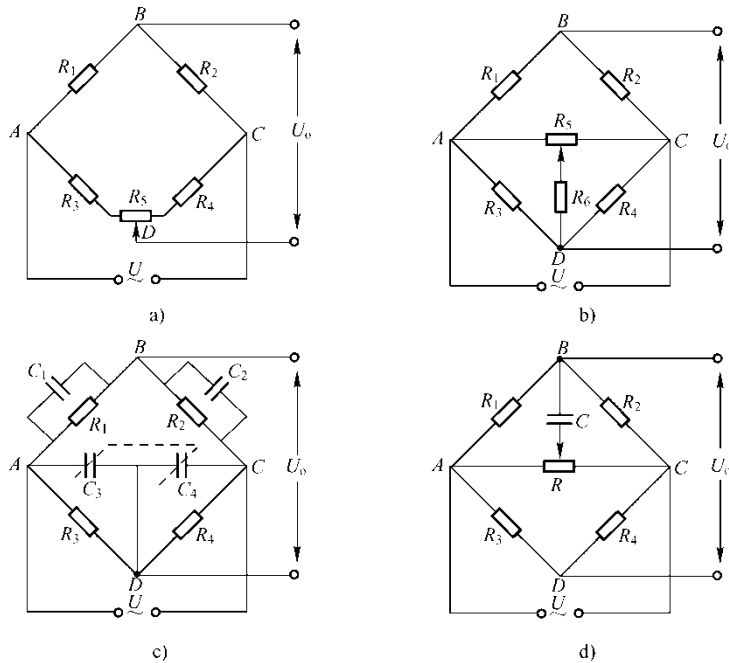


图 2-8 交流电桥平衡调节电路

当被测应力变化引起 $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$ 变化时, 则由式 (2-28) 可得, 电桥输出为:

$$U = \dot{U} \left(\frac{Z_0 + \Delta Z}{2Z_0} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \dot{U} \cdot \frac{\Delta Z}{Z_0} \quad (2-32)$$

2.1.4 应变式传感器应用

1. 应变式力传感器

被测物理量为荷重或力的应变式传感器, 统称为应变式力传感器。其主要用作各种电子

秤与材料试验机的测力元件、发动机的推力测试、水坝坝体承载状况监测等。

应变式力传感器要求有较高的灵敏度和稳定性,当传感器在受到侧向作用力或力的作用点发生轻微变化时,不应对输出有明显的影晌。

图 2-9 所示为柱式、筒式力传感器,应变片粘贴在弹性体外壁应力分布均匀的中间部分,对称地粘贴多片,电桥接线时应尽量减小载荷偏心和弯矩的影响,贴片在圆柱面上的位置及其在桥路中的连接如图 2-9c、d 所示, R_1 和 R_3 串联, R_2 和 R_4 串联,并置于桥路对臂上以减小弯矩影响,横向贴片作温度补偿用。

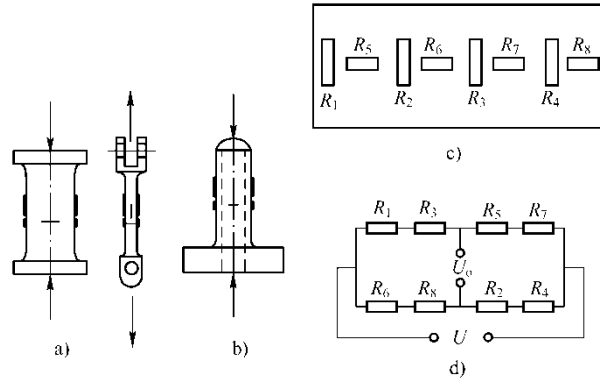


图 2-9 柱式、筒式力传感器

a) 柱式 b) 筒式 c) 圆柱面展开图 d) 桥路连接图

2. 应变式压力传感器

应变式压力传感器主要用来测量流动介质的动态或静态压力。如动力管道设备的进出口气体或液体的压力、发动机内部的压力变化,枪管及炮管内部的压力、内燃机管道压力等。

应变片压力传感器大多采用膜片式或筒式弹性元件。

图 2-10 所示为膜片式压力传感器,应变片贴在膜片内壁,在压力 p 作用下,膜片产生径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t , 表达式分别为:

$$\epsilon_r = \frac{3p(1-\mu^2)(R^2 - 3x^2)}{8h^2E}$$

$$\epsilon_t = \frac{3p(1-\mu^2)(R^2 - x^2)}{8h^2E}$$

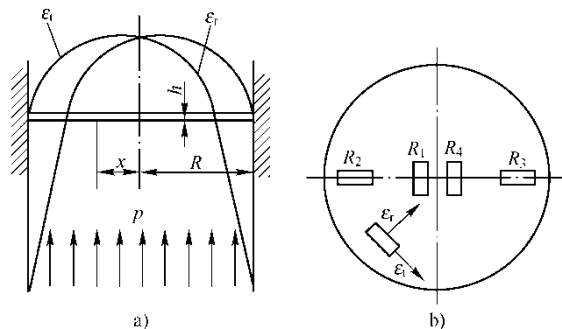


图 2-10 膜片式压力传感器

a) 应变变化图 b) 应变片粘贴

根据以上特点,一般在平膜片圆心处切向粘贴 R_1 、 R_4 两个应变片,在边缘处沿径向粘贴 R_2 、 R_3 两个应变片,然后接成全桥测量电路。

2.2 固态压阻式传感器

2.2.1 半导体的压阻效应

固体受到作用力后,电阻率就要发生变化,这种效应称为压阻效应。半导体材料的压阻效应特别强,即在半导体材料在某一轴向受外力作用时,其电阻率 ρ 发生的变化较大。

1. 半导体压阻效应原理

半导体应变片是用半导体材料制成的一种纯电阻性元件,其工作原理是基于半导体材料的压阻效应。

半导体应变片受轴向力作用时,其电阻相对变化为:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2-33)$$

式中, $\Delta\rho/\rho$ 为半导体应变片的电阻率相对变化量,其值与半导体敏感元件在轴向所受的应变力关系为:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = (1 + 2\mu + E\pi) \cdot \varepsilon \quad (2-34)$$

式中, π 为半导体材料的压阻系数,它与半导体材料种类及应力方向与晶轴方向之间的夹角有关; E 为半导体材料的弹性模量,与晶向有关。□

将式(2-34)代入式(2-33)中得:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + (1 + 2\mu + E\pi) \cdot \varepsilon \quad (2-35)$$

实验证明,对半导体材料, πE 比 $(1+2\mu)$ 大上百倍,所以 $(1+2\mu)$ 可以忽略,因此:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi \cdot E \cdot \varepsilon \quad (2-36)$$

2. 半导体应变片的灵敏系数

半导体材料的电阻值变化主要是由电阻率变化引起的,而电阻率 ρ 的变化是由应变引起的。所以,半导体应变片的灵敏系数为:

$$K_s = \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi \cdot E \cdot \varepsilon \quad (2-37)$$

半导体应变片突出优点是灵敏度高,比金属丝式高50~80倍,尺寸小,横向效应小,动态响应好。但它有温度系数大,应变时非线性比较严重等缺点。

2.2.2 固态压阻式传感器的结构

按照结构划分,压阻式传感器主要有三种不同类型。体型半导体、薄膜型半导体及扩散型半导体。

1. 体型半导体应变片

体型半导体应变片是一种将半导体材料硅或锗晶体按一定方向切割成的片状小条,经腐蚀压焊粘贴在基片上而成的应变片,体型半导体应变片结构如图2-11所示。

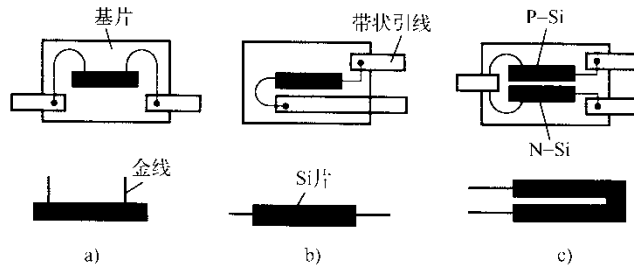


图 2-11 体型半导体应变片结构
a) π形结构 b) 一形结构 c) U形结构

2. 薄膜型半导体应变片

薄膜型半导体应变片是利用真空沉积技术,将半导体材料沉积在带有绝缘层的试件上而制成,薄膜型半导体应变片示意图见图 2-12。

3. 扩散型半导体应变片

将 P 型杂质扩散到 N 型硅单晶基底上,形成一层极薄的 P 型导电层,形成四个阻值相等的电阻条。再通过超声波和热压焊接上引出线就形成了扩散型半导体应变片。这是一种应用很广的半导体应变片。

图 2-13 为扩散型半导体应变片示意图。

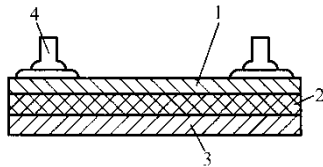


图 2-12 薄膜型半导体应变片

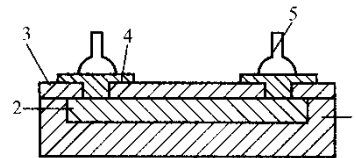


图 2-13 扩散型半导体应变片

1—锗膜 2—绝缘层 3—金属箔基底 4—引线
1—N 型硅 2—P 型硅扩散层 3—SiO₂绝缘层 4—铝电极 5—引线

2.2.3 固态压阻式传感器的测量电路

因为半导体材料对温度很敏感,温度稳定性和线性度比金属电阻应变片差得多。因此,压阻式传感器的温度误差较大,必须要有温度补偿。

压阻式传感器的测量电路仍然使用平衡电桥。

由于制造、温度影响等原因,电桥存在失调、零位温漂、灵敏度温度系数和非线性等问题,影响传感器的准确性。因此,必须采取减少与补偿误差措施。

1. 恒流源供电电桥

恒流源供电的全桥差动电路见图 2-14。

假设 ΔR_T 为温度引起的电阻变化,而:

$$I_{ABC} = I_{ADC} = \frac{1}{2} I \quad (2-38)$$

所以,电桥的输出为:

$$\begin{aligned} U_O &= U_{BD} \\ &= \frac{1}{2} I (R + \Delta R + \Delta R_T) - \frac{1}{2} I (R - \Delta R + \Delta R_T) \\ &= I \Delta R \end{aligned} \quad (2-39)$$

可见,电桥的输出电压与电阻变化成正比,与恒流源电流成正比,但与温度无关,因此测量不受温度的影响。

2. 零点与灵敏度温度补偿

由于温度变化，将引起零点漂移和灵敏度漂移。零点漂移产生的原因是扩散电阻的阻值随温度变化而变化。灵敏度漂移是因为压阻系数随温度的变化而变化。

采用图 2-15 所示的零点漂移和灵敏度漂移补偿电路，可以有效地解决零点漂移和灵敏度漂移问题。

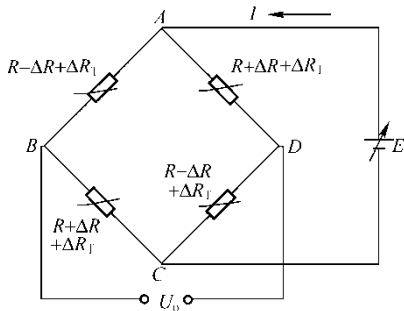


图 2-14 恒流源供电的全桥差动电路

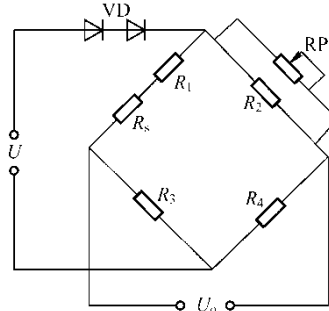


图 2-15 零点漂移和灵敏度漂移补偿电路

图中，串联电阻 R_s 、 R_1 用于抑制零位温漂， R_s 起调零作用，并联电阻 R_P 起补偿作用。串联二极管 VD ，用于灵敏度的温漂补偿。

2.2.4 固态压阻式传感器的应用

固态压阻式传感器的灵敏度和分辨率高，应变的横向效应和机械滞后极小。同时频率响应高，体积小。它主要用于测量压力、加速度和载荷等参数。

由于固态压阻式传感器具有频率响应高、体积小、精度高及灵敏度高优点，所以它在航空、航海、石油、化工、动力机械、兵器工业以及医学等方面得到了广泛的应用。

在机械工业中，压阻式传感器可用于测量冷冻机、空调机、空气压缩机的压力和气流流速，以监测机器的工作状态。在航空工业中，压阻式传感器用来测量飞机发动机的中心压力。在进行飞机风洞模型试验中，可以采用微型压阻式传感器安装在模型上，以取得准确的实验数据。在兵器工业中，可用压阻式传感器测量枪炮膛内的压力，也可对爆炸压力及冲击波进行测量。压阻式传感器还广泛用于医疗事业中，目前已有各种微型传感器用来测量心血管、颅内、尿道以及眼球内的压力。

随着微电子技术以及电子计算机的发展，固态压阻式传感器的应用将会越来越广泛。

1. 扩散型压阻式压力传感器

在弹性变形限度内，硅的压阻效应是可逆的，即在应力作用下硅的电阻发生变化，而当应力除去时，硅的电阻又恢复到原来的数值。硅的压阻效应因晶体的取向不同而不同。

(1) 结构

图 2-16 为扩散型压阻式压力传感器的结构简图。它采用 N 型单晶硅为传感器的弹性元件，在弹性元件上面直接蒸镀半导体电阻应变薄膜。传感器的硅膜片两边有两个压力腔；一个是和被测压力相连接的高压腔；另一个是低压腔，通常和大气相通。

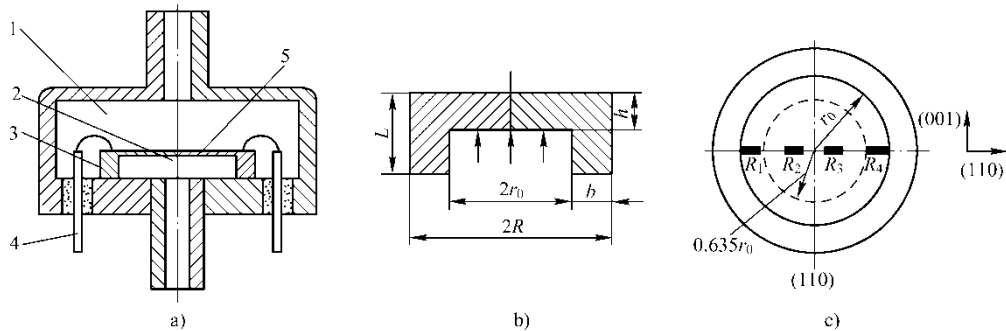


图 2-16 压阻式压力传感器结构简图

a) 剖面结构 b) 受压元件放大 c) 扩散型压阻位置分布
1—低压腔 2—高压腔 3—硅杯 4—引线 5—硅膜片

(2) 工作原理

在测量时，被测压力引入高压腔，压力膜片两边存在压力差，膜片会产生变形，膜片上各点产生应力。四个电阻在应力作用下，阻值发生变化，电桥失去平衡，输出相应的电压，电压与膜片两边的压力差成正比。

设计时，适当安排电阻的位置，可以组成差动电桥。

(3) 特点

优点：体积小，结构比较简单，动态响应也好，灵敏度高，能测出十几帕的微压，长期稳定性好，滞后和蠕变小，频率响应高，便于生产，成本低。

缺点：测量准确度受到非线性和温度的影响。

目前广泛使用的智能型扩散硅压阻式压力传感器（比如：Honeywell 公司的 ST-3000 系列），是利用微处理器对输出的非线性和温度漂移进行补偿。

2. 压阻式加速度传感器

(1) 结构

如图 2-17 所示，压阻式加速度传感器的悬臂梁直接用单晶硅制成，再硅悬梁的自由端装有敏感质量块，在梁的根部，四个扩散电阻扩散在其两面。压阻式加速度传感器如图 2-17 所示。

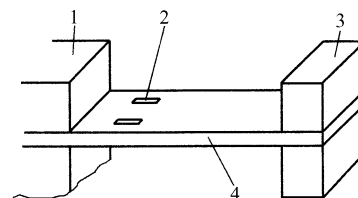


图 2-17 压阻式加速度传感器

1—基座 2—扩散电阻 3—质量块 4—硅悬梁

(2) 工作原理

当悬臂梁自由端的质量块受到外界加速度作用时，将感受到的加速度转变为惯性力，使悬臂梁受到弯矩作用，产生应力。这时硅梁上四个电阻条的阻值发生变化，使电桥产生不平衡，从而输出与外界加速度成正比的电压值。

(3) 特点

固态压阻式加速度传感器，具有频率动态响应好、结构比较简单、体积小、精度高、灵敏度高，长期稳定性好，滞后和蠕变小，便于生产，成本低等优点。

2.3 热电阻式传感器

热电阻利用导体或半导体的电阻随温度变化来测量温度，它同样是接触式温度测量中应用最普遍的测温元件，它的特点是测温范围宽，性能稳定，有足够的测量准确度，能够满足工业过程温度测量的需要；结构简单，动态响应好；输出信号大，便于远传，因而方便集中检测和自动控制。导体或半导体的电阻值是随温度变化的，由导体或半导体根据这一特性制

成的感温元件称为热电阻。导体材料的称为热电阻或金属热电阻，半导体材料的称为热敏电阻。

2.3.1 热阻效应及其温度特性

1. 热阻效应

导体的电阻率随温度变化而变化的物理现象称作是导体的热阻效应。金属热电阻就是利用这一效应来测量温度的。

几乎所有的物质都具有热阻特性，但作为测温用的热电阻还应该具有以下特性：

- 1) 电阻值与温度变化之间具有良好的线性关系。
- 2) 电阻温度系数大，便于精确测量。
- 3) 电阻率高，热容量小，反应速度快。
- 4) 在测温范围内具有稳定的物理性质和化学性质。
- 5) 材料质量要纯，容易加工复制，价格便宜。

最常用的热电阻材料是铂和铜，在低温测量中则使用铟、锰等材料制成的热电阻。热电阻广泛用来测量-220~850℃范围内的温度，少数情况下，低温可测量至-272℃，高温可测量至1000℃。

2. 热电阻的温度特性

热电阻的温度特性，是指热电阻的阻值随温度变化而变化的特性。

(1) 铂热电阻

铂易于提纯，物理、化学性质稳定，电阻率较大，能耐较高的温度。铂电阻的特点是测温精度高，稳定性好，所以在温度传感器中得到了广泛应用。铂电阻的应用范围为-200~850℃。

铂电阻的电阻—温度特性方程如下。

在-200~0℃的温度范围内为：

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)] \quad (2-40)$$

在0~850℃的温度范围内为：

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2-41)$$

式中， R_t 为温度为 t 时的电阻值； R_0 为温度为0℃时的电阻值； A 为常数， $A=3.96847 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ； B 为常数， $B=-5.847 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$ ； C 为常数， $C=-4.22 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}^4$ 。

(2) 铜热电阻

由于铂是贵金属，因此在一些测量精度要求不高，测温范围较小（-50~150℃）的情况下，普遍采用铜电阻。铜电阻具有较大的电阻温度系数，材料容易提纯，铜电阻的阻值与温度之间接近线性关系，铜的价格比较便宜，所以铜电阻在工业上得到广泛应用。

铜电阻的缺点是电阻率较小，机械强度差，稳定性也较差，容易氧化。

铜热电阻在-50~150℃的使用范围内其电阻值与温度的关系几乎是线性的，铜电阻的电阻—温度特性方程可用下式表示：

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t) \quad (2-42)$$

式中， R_t 为温度为 t 时的电阻值； R_0 为温度为0℃时的电阻值； α 为温度为0℃时的电阻温度系数 $\alpha=4.28 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 热电阻的分类与分度表

1. 热电阻的分类

按感温元件的材质分为金属和半导体两大类。金属导体有铂、铜、镍等。大量使用的是

铂和铜两种热电阻。半导体有锗、碳等，大量实验的是热敏电阻等。

表 2-1 为工业热电阻分类及特性。表中的 R_0 是热电阻在 0°C 时的电阻值。

表 2-1 工业热电阻分类及特性

项目	铂热电阻		铜热电阻	
	Pt100	Pt10	Cu100	Cu50
R_0/Ω	100	10	100	50
$\alpha/^\circ\text{C}$	0.00385		0.00428	
测温范围/ $^\circ\text{C}$	-200~850		-50~150	
允差/ $^\circ\text{C}$	A 级: $\pm(0.15+0.002 t)$ B 级: $\pm(0.30+0.005 t)$		$\pm(0.30+0.006 t)$	

2. 热电阻的分度表

热电阻温度与电阻值之间的关系可以列成一个表格，这个表格称为分度表。当然，该分度表可以用一系列公式来进行表示，公式又因热电阻分度号的不同而不同。分度号常常标识组成热电阻的材质不同和零度时的电阻值不同。

按 0°C 时的电阻值 R 的大小分为 10Ω （分度号为 Pt10）和 100Ω （分度号为 Pt100）等。铂热电阻测温范围较大，适合于 $-200\sim 850^\circ\text{C}$ 。

10Ω 铂热电阻 Pt10 的感温元件是用较粗的铂丝绕制而成，耐高温性能明显优于 100Ω 的 Pt100 铂热电阻，主要用于 650°C 以上的温区。

100Ω 铂热电阻 Pt100 主要用于 650°C 以下的温区，虽然也可用于 650°C 以上温区，但在 650°C 以上温区不允许有 A 级误差。 100Ω 铂热电阻的分辨率比 10Ω 铂热电阻 Pt10 的分辨率大 10 倍，对二次仪表的要求相应地差一个数量级，因此在 650°C 以下温区测温应尽量选用 100Ω 铂热电阻 Pt100。

表 2-2 就是 Pt100 型热电阻的分度表，显示的是整 10 度电阻值。书后的附录中有主要热电阻的详细分度表。

表 2-2 Pt100 型热电阻分度表 (Ω)

$^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	100.00	103.9	107.79	111.67	115.54	119.4	123.24	127.08	130.9	134.71
100	138.51	142.29	146.07	149.83	153.58	157.33	161.05	164.77	168.48	172.17
200	175.86	179.53	183.19	186.84	190.47	194.1	197.71	201.31	204.9	204.48
300	212.05	215.61	219.15	222.68	226.21	229.72	233.21	236.7	240.18	243.64
400	247.09	250.53	253.96	257.38	260.78	264.18	267.56	270.93	274.29	277.64
500	280.98	284.3	287.62	290.92	294.21	297.49	300.75	304.01	307.25	310.49
600	313.71	316.92	320.12	323.3	326.48	329.64	332.79	335.93	339.06	342.18
700	345.28	348.38	351.46	354.53	357.59	360.64	363.67	366.7	369.71	372.71
800	375.70	378.68	381.65	384.6	387.55	390.48				

2.3.3 热电阻的结构

按照应用场合的不同，工业用热电阻的结构通常分为装配式和铠装式两大类。

1. 装配式热电阻的结构

装配式热电阻温度计的结构如图 2-18 所示。该热电阻主要由电阻体、绝缘套管和接线盒等组成，为了使热电阻能得到较长的使用寿命，该热电阻加有保护套管。电阻体的主要组成部分为：电阻丝、引出线、骨架等部分组成。

铂电阻用铂丝绕在云母片制成的片形支架上，绕组的两面用云母片夹住绝缘，如图 2-18a 所示。铜电阻由绝缘铜丝绕在圆形骨架上，如图 2-18b 所示。在骨架上烧制好热电阻丝，并焊好引线之后，在其外面加上云母片进行保护，再装入外保护套管，并和接线盒或外部导线相连接，即得到热电阻传感器。

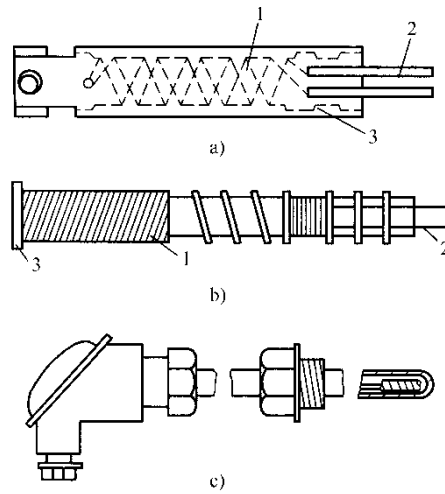


图 2-18 热电阻温度计结构

a) 铂电阻 b) 铜电阻 c) 热电阻的外形结构

1—电阻丝 2—引出线 3—骨架

(1) 电阻丝

由于铂的电阻率较大，而且相对机械强度较大，通常铂丝的直径在 $(0.03\sim 0.07)\text{mm}\pm 0.005\text{mm}$ 之间。可单层绕制，若铂丝太细，则强度低，但电阻体可做得小；若铂丝粗，则强度大，但电阻体大了，热惰性也大，成本高。

由于铜的机械强度较低，电阻丝的直径需较大。一般为 $(0.1\pm 0.005)\text{mm}$ 的漆包铜线或丝包线分层绕在骨架上，并涂上绝缘漆而成。由于铜电阻的温度低，故可以重叠多层绕制，一般多用双绕法，即两根丝平行绕制，在末端把两个头焊接起来，这样工作电流从一根热电阻丝进入，从另一根丝反向出来，形成两个电流方向相反的线圈，其磁场方向相反，产生的电感就互相抵消，故又称无感绕法。这种双绕法也有利于引线的引出。

(2) 骨架

热电阻线是绕制在骨架上的，骨架是用来支持和固定电阻丝的。骨架应使用电绝缘性能好，高温下机械强度高、体膨胀系数小，物理化学性能稳定，对热电阻丝无污染的材料制造，常用的是云母、石英、陶瓷、玻璃及塑料等。

(3) 引线

引线的直径应当比热电阻丝大几倍，尽量减小引线的电阻，增加引线的机械强度和连接的可靠性，对于工业用的铂热电阻，一般采用 1mm 的银丝作为引线，而标准铂热电阻则用 0.3mm 的铂丝作为引线。对于铜热电阻则常用 0.5mm 的铜线。

2. 铠装热电阻的结构

铠装热电阻是将陶瓷骨架或玻璃骨架的感温元件，装入细不锈钢管内，其周围用氧化镁牢固填充，它的三根引线同保护管之间，以及引线之间必须有良好的绝缘性，充分干燥后，将其端头密封，再经膜具拉制成坚实整体。由于它的外径较小，温度响应快；它结构坚固，可弯曲，所以抗震性好，可以安装在结构复杂的场合。

2.3.4 热电阻的测量电路及应用

1. 热电阻的测量电路

热电阻传感器的测量电路也常用电桥电路，热电阻的测量线路有二线制、三线制和四线制三种。由于工业用热电阻安装在生产现场，离控制室较远，因此热电阻的引线对测量结果有较大影响。为了减小或消除引线电阻的影响，目前，热电阻引线的连接方式经常采用三线制和四线制。热电阻传感器的测量电路如图 2-19 所示。

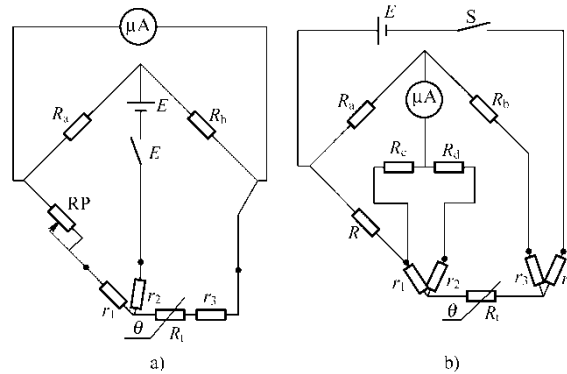


图 2-19 热电阻传感器的测量电路

a) 三组制 b) 四线制

(1) 三线制

三线制的方式是分别将两端引线接入两个桥臂，可以较好地消除引线电阻影响，提高测量精度。工业热电阻测温多用此方法。

在电阻体的一端连接两根引线，另一端连接一根引线，此种引线形式称为三线制。当热电阻和电桥配合使用时，这种引线方式可以较好地消除引线电阻的影响，提高测量精度。所以工业热电阻多半采样这种方法。

(2) 四线制

在电阻体的两端各连接两根引线称为四线制，它是在热电阻两端各连两根导线，其中两根引线为热电阻提供恒流源，在热电阻上产生的压降通过另外两根导线接入电势测量仪表。

这种引线方式不仅消除连接电阻的影响，而且可以消除测量电路中寄生电动势引起的误差。这种引线方式主要用于高精度的温度检测。目前一些高精度的温度变送器就采用这种方式。

2. 热电阻测量仪表

用于测量热电阻的仪表种类繁多，它们的准确度、测量速度、连接线路各不相同。可依据测量对象要求，选择适宜的仪器和测量线路。

对于精密测量，常选用电桥或电位差计；随着技术的发展，电位差计、动圈仪表及电子式自动平衡记录仪等传统仪表逐渐被数字式仪表所取代，数字式仪表的特点是体积小，数据显示清晰、易读，测量响应快，准确度高。由于是全电子式，维护量极低，并逐渐智能化，因此，得到迅速发展和被广泛应用到各个领域。

对于工业生产，目前大多采用数显表或无纸记录仪。

2.4 热敏电阻传感器

热敏电阻是利用半导体材料的电阻率随温度变化而变化的性质制成的感温元件。其常用的半导体材料有铁、镍、锰、钴、钼、钛、镁及铜等的氧化物或其他化合物，根据产品性能不同，进行不同的配比烧结而成。

热敏电阻按照其温度特性的不同可分为 3 种类型，即：正温度系数（PTC）热敏电阻；负温度系数（NTC）热敏电阻；临界温度热敏电阻（CTR）（在某一特定温度下电阻值会发生突变）。

2.4.1 热敏电阻的特性

热敏电阻的主要特性有温度特性和伏安特性。

1. 热敏电阻的温度特性

热敏电阻的温度特性是指半导体材料的电阻值随温度变化而变化的特性。半导体热敏电阻就是利用这种性质来测量温度的。

(1) 热敏电阻的温度特性分析

NTC 型、PTC 型、CTR 型三类热敏电阻的温度特性曲线如图 2-20 所示。分析这三类热敏电阻的特性图可以得出下列结论：

1) 热敏电阻的温度系数值远大于金属热电阻，所以灵敏度很高。

2) 热敏电阻 R_t-t 曲线非线性现象十分严重，所以其测量温度范围远小于金属热电阻。

现以负温度系数（NTC 型）热敏电阻为例说明其温度特性。

负温度系数热敏电阻是一种氧化物的复合烧结体，其电阻值随温度的增加而减小。用于测量的 NTC 型热敏电阻，在较小的温度范围内，其电阻—温度特性关系（热敏电阻温度方程）为：

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2-43)$$

式中， R_T 、 R_0 为温度为 T 、 T_0 时的电阻值； T 为热力学温度； B 为热敏电阻材料常数，一般取 2000~6000K；可由下式表示：

$$B = \frac{\ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right)}{\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2-44)$$

(2) 热敏电阻的温度灵敏系数

热敏的电阻值变化，主要是由温度变化引起的，所以，热敏电阻的灵敏系数为：

$$\alpha = \frac{dR_T}{R_T dT} \quad (2-45)$$

由于， $\frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} R_T$ ；所以，

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \quad (2-46)$$

由上式可知：

1) 热敏电阻的温度系数为负值。

2) 温度减小，电阻温度系数 α 增大。在低温时，负温度系数热敏电阻的温度系数比金属热电阻丝高得多，故热敏电阻常用于低温测量（-100~300℃）。

2. 热敏电阻的伏安特性

一般把静态情况下热敏电阻上的端电压与通过热敏电阻的电流之间的关系称为伏安特性。它是热敏电阻的重要特性，热敏电阻的伏安特性如图 2-21 所示。

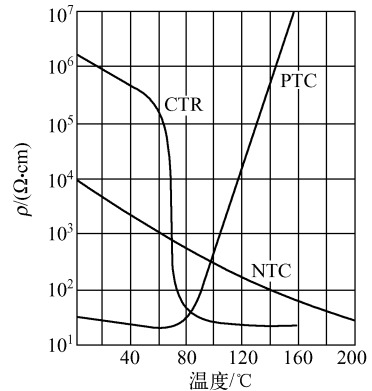


图 2-20 热敏电阻的温度特性曲线

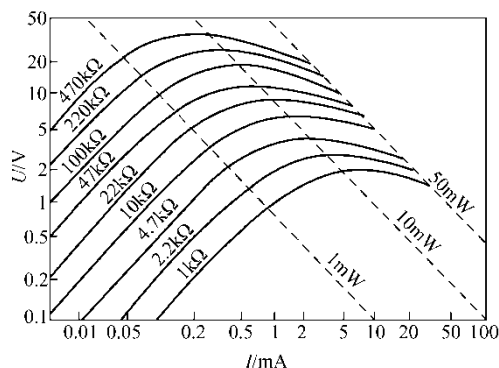


图 2-21 热敏电阻的伏安特性

由图可知,热敏电阻只有在小电流范围内端电压和电流成正比,因为电压低时电流也小,温度没有显著升高,它的电流和电压关系符合欧姆定律,但当电流增加到一定数值时,元件由于温度升高而阻值下降,故电压反而下降,因此,要根据热敏电阻的允许功耗线来确定电流,在测温中电流不能选得太高。

3. 热敏电阻的结构

热敏电阻的结构可以分为柱状、片状、珠状及薄膜状等形式,热敏电阻传感器的结构如图 2-22 所示。

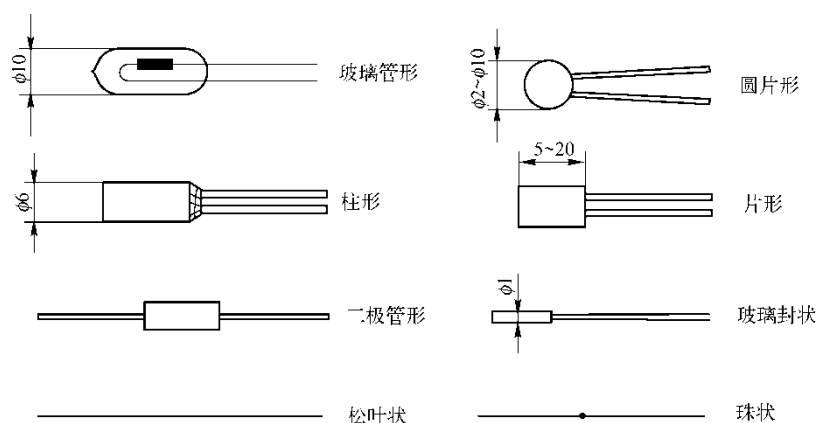


图 2-22 热敏电阻传感器的结构

4. 热敏电阻的特点

热敏电阻与其他温度传感器相比较具有明显的特点。

- 1) 灵敏度高: 电阻温度系数大, 约为金属热电阻的 10 倍。可大大降低对仪器、仪表的要求。
- 2) 结构简单: 可根据不同要求制成各种形状。
- 3) 电阻率高: 热敏电阻阻值远大于金属热电阻。导线电阻的影响小, 适用于远距离测量。
- 4) 体积小、热惯性小: 可测点温、适用于动态测量。
- 5) 化学稳定性好, 机械性能强, 价格低廉, 制造简单、易于维护、使用寿命长。
- 6) 缺点是复现性和互换性差, 非线性严重。测温范围较窄。使用时, 必须进行非线性校正。

2.4.2 热敏电阻的测量电路

由于热敏电阻温度特性曲线非线性严重, 为保证一定范围内温度测量的精度要求, 应进行非线性修正。

1. 线性化网络修正

利用包含有热敏电阻的电阻网络（常称为线性化网络）来代替单个的热敏电阻，使网络电阻 R_T 与温度成单值线性关系。其一般形式如图 2-23a 所示。

2. 其他部件特性修正

图 2-23b 是一个利用电阻测量装置中其他部件的特性进行综合修正的方法。这是一个温度—频率转换电路，虽然电容 C 的充电特性是非线性特性，但适当地选取线路中的电阻 r 和 R ，可以在一定的温度范围内，得到近于线性的温度—频率转换特性。

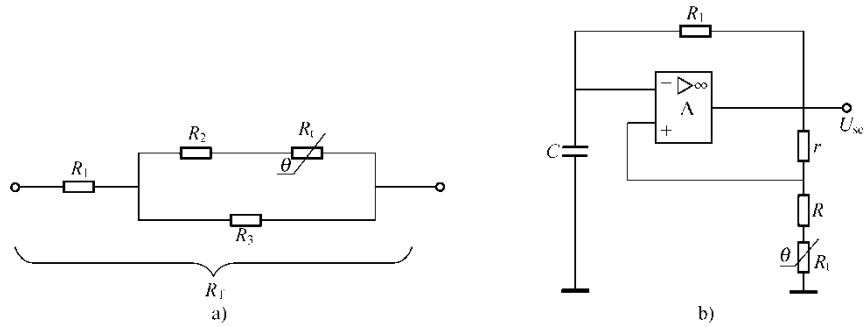


图 2-23 非线性修正原理图

a) 线性化网络 b) 温度-频率转换器

3. 计算修正法

在带有微处理机（或微型计算机）的测量系统中，当已知热敏电阻器的实际特性和要求的理想特性时，可采用线性插值法将特性分段，并把各分段点的值存放在计算机的存储器内。计算机将根据热敏电阻器的实际输出值进行校正计算后，给出要求的输出值。

4. 温度测量线路图

图 2-24 所示是热敏电阻测温原理图，测温范围为 $-50 \sim 300^\circ\text{C}$ ，误差小于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

图中， S_1 为工作选择开关、 S_2 为量程选择开关，“0”“1”“2”分别为电压断开、校正、工作三个状态。工作前，根据开关 S_2 选择量程，将开关 S_1 置于“1”处，调节电位计 RP 使检流计 G 指示满刻度，然后将 S_1 置于“2”，热敏电阻被接入测量电桥进行测量。

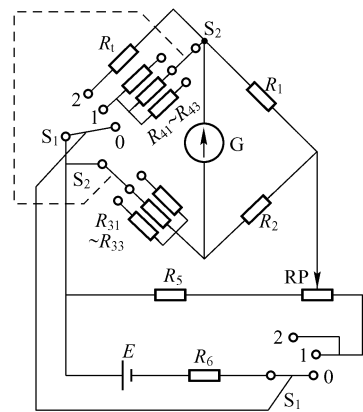


图 2-24 热敏电阻测温原理图

2.4.3 热敏电阻的主要参数

选用热敏电阻除要考虑其特性、结构形式和尺寸、工作温度以及一些特殊要求外，还要重点考虑热敏电阻的主要参数，它不仅是设计的主要依据，也是正确指导使用的技术参数。

1. 标称电阻值 R_H

厂家通常将零功率时、环境温度为 $25^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$ 时测得的热敏电阻（称为冷电阻）的电阻值作为 R_H ，称为额定电阻值或标称阻值，记作 R_{25} ， 85°C 时的电阻值 R_{85} 作为 R_{85} 。标称阻值常在热敏电阻上标出， R_{85} 也由厂家给出。

2. 热敏电阻材料常数 B 值

将热敏电阻 25°C 时的零功率电阻值 R_{25} 和 85°C 时的零功率电阻值 R_{85} ，以及 25°C 和 85°C 的绝对温度 $T_0 = 298\text{K}$ 和 $T_T = 358\text{K}$ 代入负温度系数热敏电阻温度方程，可得：

$$B = 1778 \ln \frac{R_{25}}{R_{85}} \quad (2-47)$$

3. 电阻温度系数 α

热敏电阻在其自身温度变化 1°C 时, 电阻值的相对变化量称为热敏电阻的电阻温度系数 α 。

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \quad (2-48)$$

可见 α 和 B 值是表征热敏电阻材料性能的重要参数, 是表征负温度系数热敏电阻热灵敏度的量。 B 值越大, 负温度系数热敏电阻的热灵敏度 α 越高。

4. 额定功率

额定功率是指负温度系数热敏电阻在环境温度为 25°C , 相对湿度为 $45\% \sim 80\%$ 。大气压为 $0.87 \sim 1.07\text{bar}$ 的条件下, 长期连续负荷所允许的耗散功率。在此功率下, 阻体自身温度不会超过其连续工作时所允许的最高温度, 单位为 W 。

5. 耗散系数 δ

耗散系数 δ 是指热敏电阻的温度变化与周围介质的温度相差 1°C 时, 热敏电阻所耗散的功率, 单位为 $\text{w} / ^{\circ}\text{C}$ 。

$$\delta = \frac{W}{T - T_0} \quad (2-49)$$

在工作范围内, 当环境温度变化时 δ 随之而变, 此外 δ 大小还和阻体结构、形状及所处环境 (如介质、密度、状态) 有关, 因为这些会影响阻体的热传导。

6. 热时间常数 τ

负温度系数热敏电阻在零功率条件下放入环境温度中, 不可能立即变为与环境温度同温度。热敏电阻本身的温度在放入环境温度之前的初始值和达到与环境温度同温度的最终值之间改变 63.2% 所需的时间叫作热时间常数, 用 τ 表示。

2.4.4 热敏电阻的应用

由于热敏电阻具有许多优点, 所以应用范围很广, 可用于温度测量、温度控制、温度补偿、稳压稳幅、自动增益调节、气体和液体分析、火灾报警以及过荷保护等方面。下面介绍几种主要用法。

(1) 温度补偿

仪表中通常用的一些零件, 多数是用金属丝制成的, 例如线圈、线绕电阻等, 金属一般具有正的温度系数, 采用负的温度系数热敏电阻进行补偿, 可以抵消由于温度变化所产生的误差。实际应用时, 将负温度系数的热敏电阻与锰铜丝电阻并联后再与被补偿元件串联, 热敏电阻温度补偿原理图如图 2-25 所示。

(2) 温度控制

用热敏电阻与一个电阻相串联, 并加上恒定的电压, 当周围介质温度升到某一数值时, 电路中的电流可以由十分之几毫安突变为几十毫安。因此可以用继电器的绕阻代替不随温度变化的电阻。当温度升高到一定值时, 继电器动作, 继电器的动作反应温度的大小, 所以热敏电阻可用作温度控制。

(3) 过热保护

过热保护分直接保护和间接保护。对小电流场合, 可把热敏电阻直接串入负载中, 防止过热损坏以保护器件。对大电流场合, 可通过继电器、晶体管电路等保护。

不论哪种情况, 热敏电阻都与被保护器件紧密结合在一起, 充分热交换, 一旦过热, 则起保护作用。图 2-26 为几种过热温度保护实例。

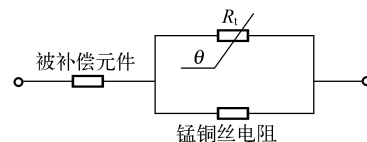


图 2-25 热敏电阻温度补偿原理图

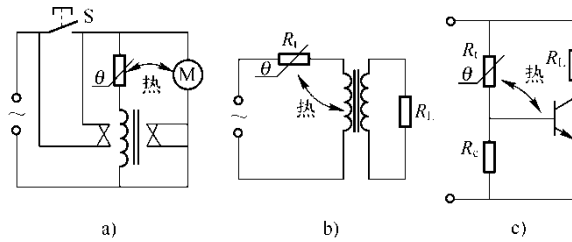


图 2-26 过热温度保护

a) 电动机保护 b) 变压器保护 c) 晶体管保护

习题与思考题

1. 试列举金属丝电阻应变片与半导体应变片的相同点和不同点。
2. 绘图说明如何利用电阻应变片测量未知的力。
3. 热电阻传感器有哪几种？各有何特点及用途？
4. 电阻应变片阻值为 100Ω ，灵敏系数 $K=2$ ，沿纵向粘贴于直径为 0.05m 的圆形钢柱表面，钢材的 $E=2 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ ， $\mu=0.3$ 。求钢柱受 10t 拉力作用时，应变片的相对变化量。又若应变片沿钢柱圆周方向粘贴、受同样拉力作用时，应变片电阻的相对变化量为多少？
5. 有一额定负荷为 2t 的圆筒荷重传感器，在不承载时，四片应变片阻值均为 120Ω ，传感器灵敏度为 0.82mV/V ，应变片的 $K=2$ ，圆筒材料的 $\mu=0.3$ ，电桥电源电压 $U_i=2\text{V}$ ，当承载为 0.5t 时（ R_1 、 R_3 轴向粘贴， R_2 、 R_4 圆周方向粘贴），求：1) R_1 、 R_3 的阻值；2) R_2 、 R_4 的阻值；3) 电桥输出电压 U_o ；4) 每片应变片功耗 P 。
6. 试列举金属热阻传感器与热敏电阻传感器的相同点和不同点。
7. 铜电阻的阻值 R_t 与温度 t 的关系：已知铜电阻的 R_0 为 50Ω ，温度系数为 $\alpha=4.28 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ，求当温度为 90°C 时的铜电阻阻值。
8. 直流测量电桥和交流测量电桥有什么区别？
9. 热电阻测温时采用何种测量电路？为什么要采用这种测量电路？说明这种电路的工作原理。
10. 采用阻值为 120Ω 、灵敏度系数 $K=2.0$ 的金属电阻应变片和阻值为 120Ω 的固定电阻组成电桥，供桥电压为 4V ，并假定负载电阻无穷大。当应变片上的应变分别为 $1\mu\varepsilon$ 和 $1000\mu\varepsilon$ 时，试求单臂工作电桥、双臂工作电桥以及全桥工作时的输出电压，并比较三种情况下的灵敏度。
11. 在网上查资料，Honeywell 公司的 ST-3000 系列压力变送器的核心元件是何种类型的传感器？能测量何种参数？

第3章 电容式传感器技术

利用电容器的原理,将非电量转换成电容量,进而实现非电量到电量的转化的器件或装置,称为电容式传感器,它实质上是一个具有可变参数的电容器。电容式传感器的优点是测量范围大、灵敏度高、结构简单、适应性强、动态响应时间短以及易实现非接触测量等。可以广泛地应用在力、压力、压差、振动、位移、厚度、加速度、液位、物位、湿度和成分含量等测量之中。

3.1 电容式传感器的原理与结构

一个由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器,电容式传感器的原理图如图3-1所示,如果不考虑边缘效应,其电容量为:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3-1)$$

式中, ϵ 为电容极板间介质的介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$,其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为极板间介质相对介电常数; A 为两平行板所覆盖的面积; d 为两平行板之间的距离。

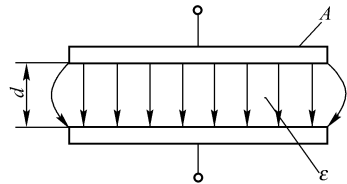


图 3-1 电容式传感器的原理图

当被测参数变化使得式(3-1)中的 A 、 d 或 ϵ 发生变化时,电容量 C 也随之变化。如果保持其中两个参数不变,而仅改变其中一个参数,就可将该参数的变化转换为电容量的变化,通过测量电路就可转换为电量输出。这就是电容传感器的基本工作原理。

电容式传感器可分为变极距式、变面积式和变介质式三种类型。

3.1.1 变极距式电容传感器

1. 变极距式电容式传感器的工作原理

保持面积和介质两个参数不变,而仅改变极距一个参数,就可把极距的变化转换为电容量的变化,通过测量电路就可转换为电量输出。这就是变极距式电容传感器的基本工作原理。图3-2a为变极距式电容式传感器的原理图。

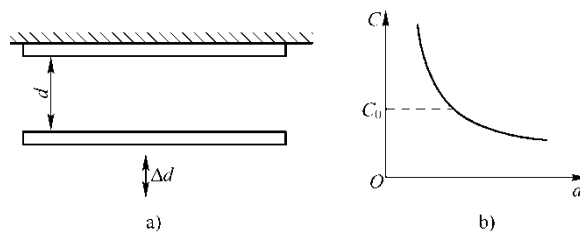


图 3-2 变极距式电容式传感器

a) 变极距型电容传感器 b) $C-d$ 特性曲线

当传感器的 ϵ_r 和 A 为常数,初始极距为 d_0 时,由式(3-1)可知其初始电容量 C_0 为:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_0} \quad (3-2)$$

若电容器极板间距离由初始值 d_0 缩小 Δd ,电容量增大 ΔC ,则有:

$$C = C_0 + \Delta C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0 - \Delta d} = \frac{C_0 \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0}\right)}{1 - \frac{(\Delta d)^2}{d_0^2}} \quad (3-3)$$

由式(3-3)可知,传感器的输出特性 $C=f(d)$ 不是线性关系,而是图 3-2b 所示双曲线关系。

此时 C 与 Δd 近似呈线性关系,所以变极距式电容式传感器只有在 $\Delta d/d_0$ 很小时,才有近似的线性输出。或者使用差动式改善其非线性。

当保证最大位移小于间距的 1/10 时,式(3-3)可以近似表示为:

$$C \approx C_0 + C_0 \frac{\Delta d}{d} \quad (3-4)$$

电容值相对变化量为:

$$\frac{\Delta C}{C_0} \approx \frac{\Delta d}{d_0} \quad (3-5)$$

可见, C 与 Δd 的关系呈近似线性关系。灵敏度为:

$$k_d = \frac{\Delta C}{\Delta d} \approx \frac{C_0}{d_0} \quad (3-6)$$

因此,对于一个变极距式电容传感器,其灵敏度是与其初始极距大小和初始电容量相关的近似常数。

2. 变极距式电容式传感器的结构

(1) 差动结构变极距式电容式传感器

为了提高传感器灵敏度,减小非线性误差,实际应用中大都采用差动式结构。

差动式结构变极距式电容传感器如图 3-3 所示(1 为动片、2 为定片),中间电极若受力向上位移 Δd ,则 C_1 容量增加, C_2 容量减小,两电容差值为:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0 - \frac{\Delta d}{2}} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d_0 + \frac{\Delta d}{2}} = 2C_0 \frac{\Delta d}{d_0} \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2}$$

$$\Delta C \approx 2 \frac{C_0 \Delta d}{d_0}$$

得到:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{2\Delta d}{d_0} \quad (3-7)$$

可见,电容传感器做成差动式后,灵敏度提高一倍。

(2) 保护环结构变极距式电容式传感器

为消除极板的边缘效应的影响,可采用图 3-4 所示为加保护环消除极板边沿电场的均匀性。保护环与极板具有同一电位,这就把电极板间的边缘效应移到了保护环与极板 2 的边缘,极板 1 与极板 2 之间的场强分布变得均匀了。

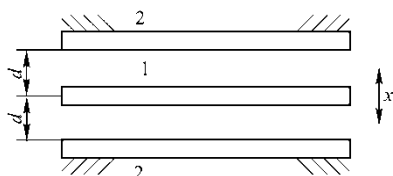


图 3-3 差动式结构变极距式电容式传感器

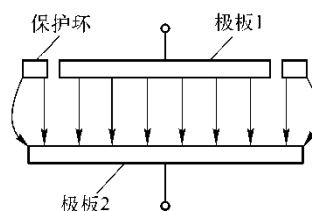


图 3-4 加保护环消除极板边沿电场的均匀

性

1—动片 2—定片

(3) 高介电常数的变极距式电容式传感器

由式(3-5)、(3-6)可以看出,在 d_0 较小时,对于同样的 Δd 变化所引起的 ΔC 可以增大,从而使传感器灵敏度提高。但 d_0 过小,容易引起电容器击穿或短路。为此,极板间可采用高介电常数的材料(云母、塑料膜等)作介质,此时电容 C 变为:

$$C = \frac{A}{\frac{d_g}{\epsilon_0 \epsilon_g} + \frac{d_0}{\epsilon_0}} \quad (3-8)$$

式中, ϵ_g 为云母的相对介电常数, $\epsilon_g=7$; ϵ_0 为空气的介电常数, $\epsilon_0=1$; d_0 为空气隙厚度; d_g 为云母片的厚度。

云母片的相对介电常数是空气的7倍,其击穿电压不小于1000kV/mm,而空气的击穿电压仅为3kV/mm。因此有了云母片,极板间起始距离可大大减小。

同时,式(3-8)中的 $d_g / \epsilon_0 \epsilon_g$ 项是恒定值,它能使传感器的输出特性的线性度得到改善。

一般地变极板间距离电容式传感器的起始电容在20~100pF之间,而将极板间距离设定在25~200 μ m的范围内,最大位移应小于间距的1/10,故在微位移测量中应用最广。

3.1.2 变面积式电容传感器

1. 变面积式电容传感器工作原理

保持极距和介质两个参数不变,仅改变面积一个参数,就可把面积的变化转换为电容量的变化,通过测量电路就可转换为电量输出。这就是变面积式电容传感器的基本工作原理。图3-5为变面积式电容传感器的结构示意图。

根据面积变化方式的不同通常划分为:平板形变面积式电容传感器、旋转形变面积式电容传感器、圆柱形变面积式电容传感器。

(1) 平板形变面积式电容传感器

平板形变面积式电容传感元件结构原理如图3-5a所示。图3-5a所示平板位移 x 后,电容量由初始值 C_0 变为 C_x :

$$C_x = C_0 - \Delta C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{b(a-x)}{d} = \left(1 - \frac{x}{a}\right) C_0 \quad (3-9)$$

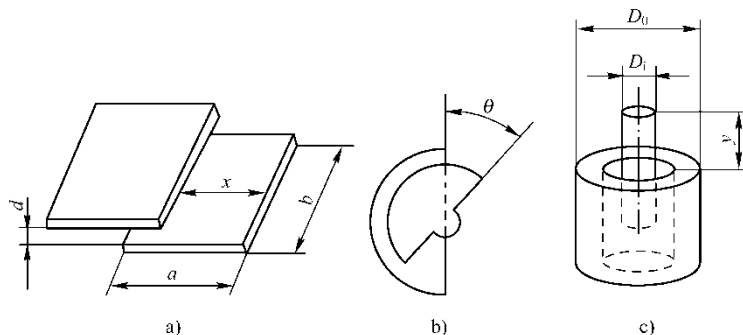


图3-5 变面积式电容传感器的结构示意图

a) 平板形变面积式 b) 旋转形变面积式 c) 圆柱形变面积式

电容量变化:

$$\Delta C = C_x - C_0 = -\frac{x}{a}C_0$$

可见，传感器电容量变化量 ΔC 与位移距离 x 间呈线性关系。
灵敏度为：

$$k_x = \frac{\Delta C}{x} = -\frac{C_0}{a} \quad (3-10)$$

因此，对于一个特定的平板形变面积式电容传感器，其灵敏度是与其几何结构和初始电容量相关的常数。

(2) 旋转形变面积式电容传感器

旋转形变面积式电容传感元件结构原理如图 3-5b 所示。设旋转形传感器两片极板全重合 ($\theta=0$) 时的电容量为 C_0 ，动片转动角度 θ 后，电容量 C_θ 变为：

$$C_\theta = C_0 - \Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{r(\pi - \theta)}{d} = \left(1 - \frac{\theta}{\pi}\right) C_0 \quad (3-11)$$

电容量变化为：

$$\Delta C = C_0 - C_\theta = -\frac{\theta}{\pi} C_0 \quad (3-12)$$

可见，传感器电容量变化量 ΔC 与角位移角度 θ 间呈线性关系。
灵敏度为：

$$k_\theta = \frac{\Delta C}{\theta} = -\frac{C_0}{\pi} \quad (3-13)$$

因此，对于一个特定的旋转形变面积式电容传感器，其灵敏度是与其几何结构和初始电容量相关的常数。

(3) 圆柱形变面积式电容传感器

圆柱形变面积式电容传感元件结构原理如图 3-5c 所示。设内外电极长度为 L ，起始电容量为 C_0 。则动极向上位移 y 后，电容量变为 C_y ：

$$C_y = C_0 - \Delta C \approx \left(1 - \frac{y}{L}\right) C_0 \quad (3-14)$$

电容量变化：

$$\Delta C = C_y - C_0 = -\frac{y}{L} C_0 \quad (3-15)$$

可见，传感器电容量变化量 ΔC 与位移长度 y 间呈线性关系。
灵敏度为：

$$k_y = \frac{\Delta C}{y} = -\frac{C_0}{L} \quad (3-16)$$

因此，对于一个特定的圆柱形变面积式电容传感器，其灵敏度是与其几何结构和初始电容量相关的常数。

2. 变面积式电容传感器的结构

图 3-6 所示是变面积式差动电容传感器结构原理图，传感器输出和灵敏度均提高一倍。

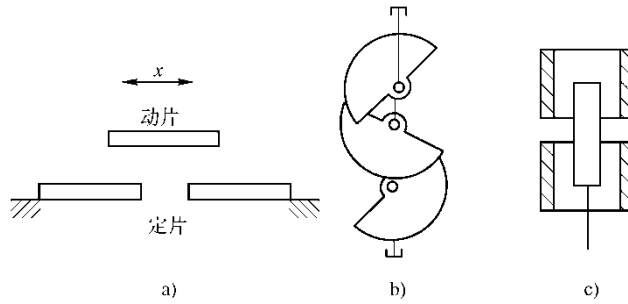


图 3-6 变面积式差动电容传感器结构原理图

a) 平板形差动 b) 旋转形差动电容 c) 圆柱形差动电容

3.1.3 变介质式电容传感器

保持面积和极距两个参数不变，而仅改变介质一个参数，就可把介质的变化转换为电容量的变化，通过测量电路就可转换为电量输出。这就是变介质式电容传感器的基本工作原理。

变介质式电容传感器有较多的结构型式，可以用来测量纸张，绝缘薄膜等的厚度，也可用来测量粮食、纺织品、木材或煤等非导电固体介质的湿度。

1. 平板形变介质式电容传感器

图 3-7 所示为平板形变介质式电容传感器。图中两个平行电极固定不动，极距为 d_0 ，宽度为 b_0 相对介电常数为 ϵ_{r1} ，原始电容量为 C_0 。

当一个介电常数为 ϵ_{r2} 的电介质以不同深度插入电容器中时，就改变两种介质的极板覆盖面积。此时，传感器总电容量 C_ϵ 为：

$$C_\epsilon = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1}(L_0 - L) + \epsilon_{r2}L}{d_0} \quad (3-17)$$

$$C_\epsilon = C_1 + C_2 = \epsilon_0 b_0 \frac{\epsilon_{r1}(L_0 - L)}{d_0} \quad (3-18)$$

式中， L_0 ， b_0 为极板长度和宽度； L 为第二种介质进入极板间的长度。

若电介质 $\epsilon_{r1}=1$ ，当 $L=0$ 时，传感器初始电容 C_0 为：

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} L_0 b_0}{d_0} = \frac{\epsilon_0 L_0 b_0}{d_0} \quad (3-19)$$

当介质 ϵ_{r2} 进入极间 L 后，引起电容的相对变化为：

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{(\epsilon_{r2} - 1)L}{L_0} \quad (3-20)$$

可见，电容的变化与电介质 ϵ_{r2} 的移动量 L 呈线性关系。

2. 圆柱形变介质式电容传感器

图 3-8 所示为圆柱形变介模式电容传感器用于测量液位高低的结构原理图。

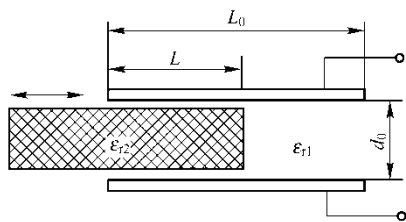


图 3-7 平板形变介质式电容传感器

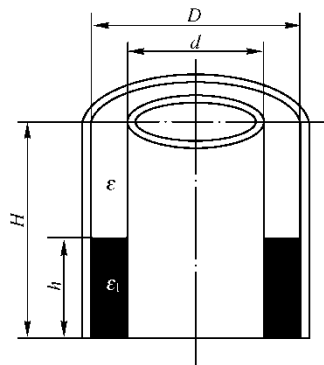


图 3-8 圆柱形变介质式电容传感器

设被测介质的介电常数为 ϵ_1 ，液面高度为 h ，变换器总高度为 H ，内筒外径为 d ，外筒内径为 D ，则此时变换器电容值为：

$$C = \frac{2\pi\epsilon_1 h}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi\epsilon(H-h)}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{2\pi h(\epsilon_1 - \epsilon)}{\ln \frac{D}{d}} = C_0 + \frac{2\pi(\epsilon_1 - \epsilon) \cdot h}{\ln \frac{D}{d}} \quad (3-21)$$

式中， ϵ 为空气介电常数； C_0 为由变换器的基本尺寸决定的初始电容值。

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{D}{d}} \quad (3-22)$$

由式 (3-22) 可知，此变换器的电容增量正比于被测液位高度 h 。

3.2 电容式传感器的测量电路

电容式传感器中电容量以及电容量变化值都十分微小，这样微小的电容量还不能直接为目前的显示仪表所显示，也很难为记录仪所接受，不便于传输。这就必须借助于测量电路检出这一微小电容增量，并转换成与其成单值函数关系的电压、电流或者频率。

电容转换电路有交流电桥电路、调频电路、运算放大器电路、二极管双 T 型交流电桥、脉冲宽度调制电路等。

3.2.1 交流电桥测量电路

将电容式传感器接入交流电桥的一个臂（另一个臂为固定电容）或两个相邻臂，另两个臂可以是电阻、电容或电感，也可以是变压器的两个二次线圈。其中另两个臂是紧耦合电感臂的电桥具有较高的灵敏度和稳定性，且寄生电容影响极小、大大简化了电桥的屏蔽和接地，适合于高频电源下工作。而变压器式电桥使用元件最少，桥路内阻最小，因此目前较多采用。

1. 普通交流电桥

图 3-9 所示为由电容 C 、 C_0 和阻抗 Z 、 Z' 组成的普通交流电桥测量电路，其中 C 为电容传感器的电容， Z' 为等效配接阻抗， C_0 和 Z 分别为固定电容和阻抗。

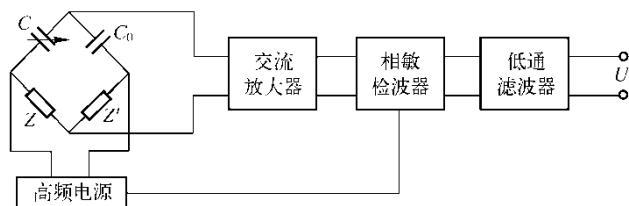


图 3-9 普通交流电桥测量电路

电桥初始状态调至平衡，当传感器电容 C 变化时，电桥失去平衡而输出电压，此交流电压的幅值随 C 而变化。电桥的输出电压为：

$$U_0 = \frac{\Delta Z}{Z} U \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z'}{Z} + \frac{Z}{Z'} \right) + \frac{Z + Z'}{Z_i}} \quad (3-23)$$

式中， Z 为电容臂阻抗； ΔZ 为传感器电容变化时对应的阻抗增量； Z_i 为电桥输出端放大器的输入阻抗。

这种交流电桥测量电路要求提供幅度和频率很稳定的交流电源，并要求电桥放大器的输入阻抗 Z_i 很高。为了改善电路的动态响应特性，一般要求交流电源的频率为被测信号最高频率的 3~10 倍。

2. 紧耦合电感臂电桥

图 3-10 为用于电容传感器测量的紧耦合电感臂电桥。该电路的特点是两个电感臂相互为紧耦合，它的优点是抗干扰能力强，稳定性高。

电桥的输出电压表达式为：

$$U_0 = \frac{\Delta Z}{Z} \frac{\frac{1+A}{1+B}}{1 + \frac{1}{2} \left(A + \frac{1}{B} \right) + \frac{Z}{Z_L} (1+A)} \quad (3-24)$$

式中， $Z = \frac{1}{j\omega C}$ ； $\Delta Z = \frac{\Delta C}{j\omega C^2}$ ； $A = \frac{Z_{12}(1-K)}{Z}$ ； $B = \frac{Z_{12}(1+K)}{Z}$ ；

$Z_{12} = j\omega L$ ； $K = 1 - \frac{j\omega(L+M)}{j\omega L}$ ； Z_L 为电桥负载阻抗。

3. 变压器电桥

电容式传感器所用的变压器电桥如图 3-11 所示。

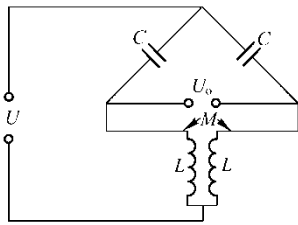


图 3-10 紧耦合电感臂电桥

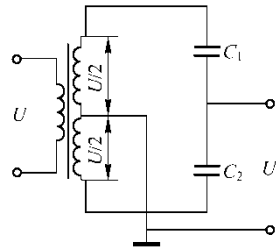


图 3-11 变压器电桥

当负载阻抗为无穷大时，电桥的输出电压为：

$$U_0 = \frac{U}{2} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3-25)$$

以 $Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$ ， $Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$ 带入上式 (3-25)，可得：

$$U_0 = \frac{U}{2} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (3-26)$$

式中， C_1 、 C_2 为差动电容式传感器的电容量。设 C_1 、 C_2 为变间隙式电容传感器，

则有： $C_1 = \frac{\varepsilon A}{d - \Delta d}$ ， $C_2 = \frac{\varepsilon A}{d + \Delta d}$ 带入式 (3-26)，可得：

$$U_0 = \frac{U}{2} \frac{\Delta d}{d} \quad (3-27)$$

可见，在放大器输入阻抗极大的情况下，输出电压与位移呈线性关系。

4. 交流电桥测量电路的特点

- 1) 高频交流正弦波供电。
- 2) 电桥输出调幅波, 要求其电源电压波动极小, 需采用稳幅、稳频等措施。
- 3) 通常处于不平衡工作状态, 所以传感器必须工作在平衡位置附近, 否则电桥非线性增大, 且在要求精度高的场合应采用自动平衡电桥。
- 4) 输出阻抗很高(几兆欧至几十兆欧), 输出电压低, 必须后接高输入阻抗、高放大倍数的处理电路。

3.2.2 调频测量电路

调频测量电路把电容式传感器作为振荡器谐振回路的一部分。当输入量导致电容量发生变化时, 振荡器的振荡频率就发生变化。

虽然可将频率作为测量系统的输出量, 用以判断被测非电量的大小, 但此时系统是非线性的, 不易校正, 因此加入鉴频器, 将频率的变化转换为振幅的变化, 经过放大就可以用仪器指示或记录仪记录下来。调频测量电路的原理框图如图 3-12 所示。

1. 工作原理

图 3-12 中调频振荡器的振荡频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中, L 为振荡回路的电感; C 为振荡回路的总电容, $C=C_1+C_2+C_0\pm\Delta C$ 。其中, C_1 为振荡回路固有电容; C_2 为传感器引线分布电容; $C_x=C_0\pm\Delta C$ 为传感器的电容。



图 3-12 调频测量电路的原理框图

当被测信号为 0 时, $\Delta C=0$, 则 $C=C_1+C_2+C_0$, 所以振荡器有一个固有频率 f_0 (一般选在 1MHz 以上):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1+C_2+C_0)L}}$$

当被测信号不为 0 时, $\Delta C \neq 0$, 振荡器频率有相应变化, 此时频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(C_1+C_2+C_x)L}} = f_0 \pm \Delta f \quad (3-28)$$

2. 使用结论

振荡器输出的高频电压是一个受被测信号调制的调制波, 其频率由式 (3-28) 决定。

调频电容传感器测量电路具有较高灵敏度, 可以测至 $0.01\mu\text{m}$ 级位移变化量。频率输出易于用数字仪器测量并可与计算机通信, 抗干扰能力强, 可以发送、接收以实现遥测遥控。

3.2.3 运算放大器测量电路

运算放大器的放大倍数 K 非常大, 而且输入阻抗 Z_i 很高。运算放大器的这一特点可以使其作为电容式传感器的比较理想的测量电路。

1. 工作原理

图 3-13 是运算放大器式电路原理图。 C_x 为电容式传感器, U_i 是交流电源电压, U_o 是输出信号电压, Σ 是虚地点。由运算放大器工作原理可得:

$$\dot{U}_0 = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i \quad (3-29)$$

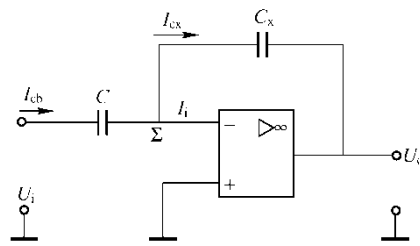


图 3-13 运算放大器式电路原理图

如果传感器是一只平板电容，则：

$$C_x = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (3-30)$$

将 (3-29) 代入式 (3-28)，有：

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_i \frac{C}{\varepsilon A} d \quad (3-31)$$

式中“-”号表示输出电压 U_0 的相位与电源电压反相。

2. 使用结论

式 (3-31) 说明运算放大器的输出电压与极板间距离 d 呈线性关系。运算放大器电路解决了单个变极板间距离式电容传感器的非线性问题。但要求 Z_1 及 K 足够大。为保证仪器精度，还要求电源电压的幅值和固定电容 C 值稳定。

3.2.4 二极管双 T 形交流电桥

二极管双 T 形交流电桥电路图如图 3-14 所示。 e 是高频电源，它提供幅值为 U_1 的对称方波， VD_1 、 VD_2 为特性完全相同的两个二极管， $R_1=R_2=R$ ， C_1 、 C_2 为传感器的两个差动电容。当传感器没有输入时， $C_1=C_2$ 。

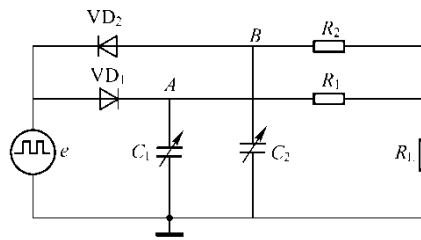


图 3-14 二极管双 T 形交流电桥电路图

1. 工作原理

二极管双 T 形交流电桥电路工作原理图如图 3-15 所示。

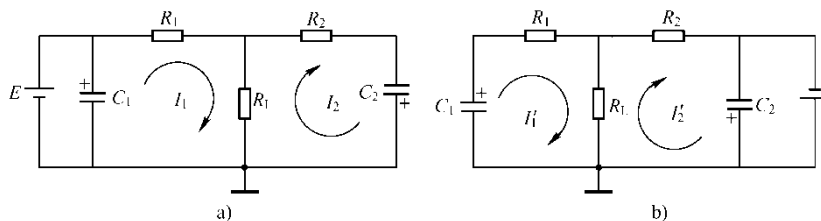


图 3-15 二极管双 T 形交流电桥电路工作原理图

当 e 为正半周时, 二极管 VD_1 导通、 VD_2 截止, 于是电容 C_1 充电。

在负半周出现时, 电容 C_1 上的电荷通过电阻 R_1 , 负载电阻 R_L 放电, 流过 R_L 的电流为 I_1 。在负半周内, VD_2 导通、 VD_1 截止, 则电容 C_2 充电; 在随后出现正半周时, C_2 通过电阻 R_2 , 负载电阻 R_L 放电, 流过 R_L 的电流为 I_2 。

根据上面所给的条件, 则电流 $I_1=I_2$, 且方向相反, 在一个周期内流过 R_L 的平均电流为零。

若传感器输入不为 0, 则 $C_1 \neq C_2$, 那么 $I_1 \neq I_2$, 此时 R_L 上必定有信号输出, 其输出在一个周期内的平均值为:

$$U_0 = I_L R_L = R_L \frac{1}{T} \int_0^T [I_1(t) - I_2(t)] dt \\ \approx \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L E f (C_1 - C_2)$$

式中, f 为电源频率。

当 R_L 已知时, 设:

$$M = \frac{R(R + 2R_L)}{(R + R_L)^2} R_L \quad (3-32)$$

则 M 为常数, 从而有:

$$U_0 = M E f (C_1 - C_2) \quad (3-33)$$

2. 使用结论

从式 (3-33) 可知, 输出电压 U_0 不仅与电源电压的幅值和频率有关, 而且与 T 形网络中的电容 C_1 和 C_2 的差值有关。

1) 当电源电压确定后, 输出电压 U_0 是电容 C_1 和 C_2 的函数。

2) 该电路输出电压较高, 当电源频率为 1.3MHz, 电源电压 $E_i=46V$ 时, 电容从 $-7 \sim +7pF$ 变化, 可以在 $1M\Omega$ 负载上得到 $-5 \sim +5V$ 的直流输出电压。

3) 电路的灵敏度与电源幅值和频率有关, 故输入电源要求稳定。当 U_i 幅值较高, 使二极管 VD_1 、 VD_2 工作在线性区域时, 测量的非线性误差很小。

4) 电路的输出阻抗与电容 C_1 、 C_2 无关, 而仅与 R_1 、 R_2 及 R_L 有关, 其值为 $1 \sim 100k\Omega$ 。输出信号的上升沿时间取决于负载电阻。对于 $1k\Omega$ 的负载电阻上升时间为 $20\mu s$ 左右, 故可用来测量高速的机械运动。

3. 线路特点

1) 线路简单, 可全部放在探头内, 大大缩短了电容引线、减小了分布电容的影响。

2) 电源周期、幅值直接影响灵敏度, 要求它们高度稳定。

3) 输出阻抗为 R , 而与电容无关, 克服了电容式传感器高内阻的缺点。

4) 适用于具有线性特性的单组式和差动式电容式传感器。

3.3 电容式传感器的特点与应用

3.3.1 电容式传感器的特点

1. 电容式传感器的优点

(1) 温度稳定性好

电容式传感器的电容值一般与电极材料无关, 仅取决于电极的几何尺寸, 且空气等介质损耗很小, 因此只要从强度、温度系数等机械特性考虑, 合理选择材料和几何尺寸即可, 其他因素 (因本身发热极小) 影响甚微。而电阻式传感器有电阻, 供电后会产生热量; 电感式传感器存在铜损、涡流损耗等, 引起本身发热产生零漂。

(2) 结构简单、适应性强

电容式传感器结构简单，易于制造。

同时，电容式传感器能在高低温、强辐射及强磁场等各种恶劣的环境条件下工作，适应能力强，尤其可以承受较大的温度变化，在高压、高冲击及过载等情况下都能正常工作，能测超高压和低压差，也能对带磁工件进行测量。

此外传感器可以做得体积很小，以便实现某些特殊要求的测量。

(3) 动态响应好

电容式传感器由于极板间的静电引力很小，需要的作用能量极小，又由于它的可动部分可以做得很小很薄，即质量很轻，因此其固有频率很高，动态响应时间短，能在几兆赫兹的频率下工作，特别适合动态测量。

又由于其介质损耗小可以用较高频率供电，因此系统工作频率高。可用于测量高速变化的参数，如测量振动、瞬时压力等。

(4) 可以实现非接触测量

当被测件不允许采用接触测量时，电容式传感器可以完成测量任务。当采用非接触测量时，电容式传感器具有平均效应，可以减小工件表面粗糙度等对测量的影响。

(5) 所需能量小，可测微小位移

电容式传感器除具有上述优点之外，还因带电极板间的静电引力极小，因此所需输入能量极小，特别适宜低能量输入的测量，例如测量极低的压力、力和很小的加速度、位移等，可以做得很灵敏，分辨力非常高，能感受 0.001m 甚至更小的位移。

2. 电容式传感器的缺点

(1) 输出阻抗高，负载能力差

电容式传感器的电容量受其电极几何尺寸等的限制，一般为几十到几百皮法，使传感器的输出阻抗很高，尤其是当采用音频范围内的交流电源时，输出阻抗高达 $10^6 \sim 10^8 \Omega$ 。因此传感器负载能力差，易受外界干扰影响而产生不稳定现象，严重时甚至无法工作，必须采取屏蔽措施，从而给设计和使用带来不便。

容抗大还要求传感器绝缘部分的电阻值极高（几十兆欧以上），否则绝缘部分将作为旁路电阻而影响传感器的性能（如灵敏度降低），为此还要特别注意周围环境如温湿度、清洁度等对绝缘性能的影响。

高频供电虽然可降低传感器输出阻抗，但放大、传输远比低频时复杂，且寄生电容影响加大，难以保证工作稳定。

(2) 寄生电容影响大

传感器的初始电容量很小，而其引线电缆电容（1~2m 导线可达 800pF）、测量电路的杂散电容以及传感器极板与其周围导体构成的电容等“寄生电容”却较大。

1) 降低了传感器的灵敏度。

2) 这些电容（如电缆电容）常常是随机变化的，将使传感器工作不稳定，影响测量精度，其变化量甚至超过被测量引起的电容变化量，致使传感器无法工作。

因此对电缆选择、安装、接法有要求。

(3) 输出特性非线性

变极距式电容传感器的输出特性是非线性的，虽可采用差动结构来改善，但不可能完全消除。其他类型的电容式传感器只有忽略了电场的边缘效应时，输出特性才呈线性。否则边缘效应所产生的附加电容量将与传感器电容量直接叠加，使输出特性非线性。

随着材料、工艺及电子技术，特别是集成电路的高速发展，使电容式传感器的优点得到发扬而缺点不断得到克服。电容传感器正逐渐成为一种高灵敏度、高精度，在动态、低压及一些特殊测量方面大有发展前途的传感器。

3.3.2 电容式传感器的应用

1. 电容式压力传感器

图 3-16 所示为差动电容式压力传感器的结构图。图中所示为一个膜片动电极和两个在凹形玻璃上电镀成的固定电极组成的差动电容器。

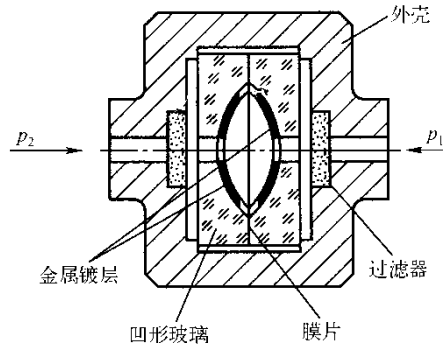


图 3-16 差动电容式压力传感器结构图

当被测压力或压力差作用于膜片并使之产生位移时，所形成的两个电容器的电容量，一个增大一个减小。该电容值的变化经测量电路转换成与压力或压力差相对应的电流或电压的变化。

2. 电容式加速度传感器

图 3-17 所示为差动式电容加速度传感器结构图。它有两个固定极板（与壳体绝缘），中间有一用弹簧片支撑的质量块，此质量块的两个端面经过磨平抛光后作为可动极板（与壳体电连接）。

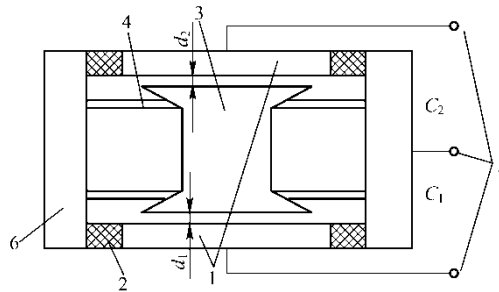


图 3-17 差动式电容加速度传感器结构图

1—固定电极 2—绝缘垫 3—质量块 4—弹簧片 5—输出端 6—壳体

当传感器壳体随被测对象在垂直方向上作直线加速运动时，质量块在惯性空间中相对静止，而两个固定电极将相对质量块在垂直方向上产生大小正比于被测加速度的位移。此位移使两电容的间隙发生变化，一个增加，一个减小，从而使 C_1 、 C_2 产生大小相等、符号相反的增量，此增量正比于被测加速度。

电容式加速度传感器的主要特点是频率响应快和量程范围大，大多采用空气或其他气体作阻尼物质。

3. 电容式料位传感器

图 3-18 是电容式料位传感器结构示意图。测定电极安装在罐的顶部，这样在罐壁和测定电极之间就形成了一个电容器。

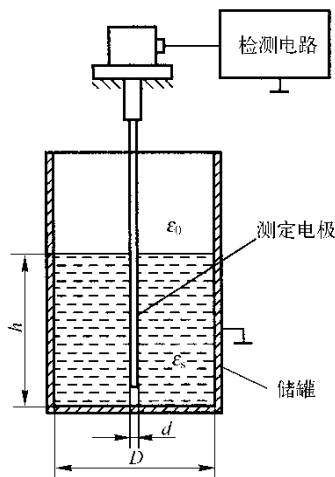


图 3-18 电容式料位传感器结构示意图

当罐内放入被测物料时，由于被测物料介电常数的影响，传感器的电容量将发生变化，电容量变化的大小与被测物料在罐内高度有关，且成比例变化。检测出这种电容量的变化就可测定物料在罐内的高度。

传感器的静电电容可由下式表示：

$$C = \frac{k(\varepsilon_s - \varepsilon_0)h}{\ln \frac{D}{d}} \quad (3-34)$$

式中， k 为比例常数； ε_s 为被测物料的相对介电常数； ε_0 为空气的相对介电常数； D 为储罐的内径； d 为测定电极的直径； h 为被测物料的高度。

假定罐内没有物料时的传感器静电电容为 C_0 ，放入物料后传感器静电电容为 C_1 ，则两者电容差为：

$$\Delta C = C_1 - C_0 \quad (3-35)$$

由式 (3-35) 可见，两种介质常数差别越大，极径 D 与 d 相差越小，传感器灵敏度就越高。

习题与思考题

1. 电容式传感器有什么特点？试举出所知道的电容传感器的实例。
2. 粮食部门在收购、存储粮食时，需测定粮食的干燥程度，以防霉变。请根据已学过的知识设计一个粮食水分含量测试仪（画出原理图、传感器简图，并简要说明它的工作原理及优缺点）。
3. 试分析变面积式电容传感器和变间隙式电容传感器的灵敏度。为了提高传感器的灵敏度可采取什么措施并应注意什么问题？
4. 正方形平板电容器，极板长度 $a=4\text{cm}$ ，极板间距离 $\delta=0.2\text{mm}$ 。若用此变面积型传感器测量位移 x ，试计算该传感器的灵敏度并画出传感器的特性曲线。极板间介质为空气， $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}\text{F/m}$ 。
5. 为什么说变间隙型电容传感器特性是非线性的？采取什么措施可改善其非线性特征？
6. 为什么变极距式电容传感器的灵敏度和非线性是矛盾的？实际应用中怎样解决这一问题？
7. 有一变极距型电容传感器，两极板的重合面积为 8cm^2 ，两极板间的距离为 1mm ，已知空气的相对介电常数为 1.0006 ，试计算该传感器的位移灵敏度。
8. 一电容测微仪，其传感器的圆形极板半径为 $r=4\text{mm}$ ，工作初始间隙为 $\delta=0.3\text{mm}$ ，问：
 - 1) 工作时，如果传感器与工作的间隙变化量为 $\Delta\delta=\pm 1\mu\text{m}$ 时，电容变化量是多少？

2) 如果测量电路的灵敏度为 $S_1=100\text{mV/pF}$, 读数仪表的灵敏度为 $S_2=5$ 格/ mV , 在 $\Delta\delta=\pm 1\mu\text{m}$ 时, 读数仪表的指示值变化多少格?

9. 在网上查资料, Fisher-Rosemount 公司的 1151 系列压力变送器的核心元件是何种类型的传感器, 它能应用到何种场合?