



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

P rinciple and Application of Sensor

传感器 原理与应用

王长涛 尚文利 夏兴华 韩忠华 侯静 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Principle and Application of Sensor

传感器 原理与应用

王长涛 尚文利 夏兴华 韩忠华 侯静 编著



NLIC2970801682

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

传感器原理与应用 / 王长涛等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2012. 7
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-27923-1

I. ①传… II. ①王… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆CIP数据核字 (2012) 第062374号

内 容 提 要

本书全面讲述了各类传感器工作原理, 通过原理与应用实例相结合的方式, 对各类传感器的典型电路设计举例进行了详细介绍。主要内容包括: 电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、光电传感器、常用其他新型传感器。并在此基础上对多传感器融合技术以及物联网技术的发展进行了探讨, 使读者对传感器技术与新技术应用情况有个全面了解。

本书内容丰富, 取材新颖, 技术实用, 既可作为高等学校控制、检测、电工、机电一体化、计算机应用及相关专业高年级本科生和研究生相关课程的教材, 同时也可以作为广大从事控制和检测的研发工程师、专业技术人员, 以及相关专业人员的工具书或培训教材。

21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材 传感器原理与应用

- ◆ 编 著 王长涛 尚文利 夏兴华 韩忠华 侯 静
责任编辑 刘 博
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.5
字数: 307 千字
- 2012 年 7 月第 1 版
2012 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-27923-1

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前言

传感器技术是一项当今世界令人瞩目的迅猛发展的高新技术,也是当代科学技术发展的一个重要标志,它与通信技术、计算机技术构成信息产业的三大支柱。传感器产品品种繁多,采用的科学原理多,技术密集,具有多样性、边缘性、综合性的特点。

近年来,传感器正处于传统型向新型传感器转型的发展阶段。新型传感器的特点是微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化。高速低成本的电子电路、新的信号处理方法、制造技术的创新进步,成为传感器技术飞速发展的源动力,这些领域的协同发展使得迅速提高产品技术成为可能。创新的传感器结构设计使得传感器具有了自检测、自调整的能力。传感器制造技术的飞速进步,可以生产出低成本、高性能的产品系统和组件。微制造技术方面,表面和微机械加工技术取得了突出进展。在数字信号处理领域,涌现出许多改善传感器性能的新方法。多传感器系统,可以大大提高信息的质量和可用性。基于数据融合技术的复杂信号处理方法可以准确计算测量值,效率远高于通常使用的基于阈值的计算方法。多传感器系统融合、制造技术和信号处理方法、物联网技术已经成为传感器技术发展的新趋势。

本书全面讲述了各类传感器的结构、工作原理,并以原理与应用实例结合的方式对各类传感器进行了典型电路设计举例,不仅讲解传感器的原理,而且增加了课堂授课与读者互动的内容。使读者不仅能够通过完整的实例快速、有效地掌握各传感器的原理,而且通过实践增强对各传感器进行运用的能力,可以很快地投入到实际的开发工作中去,真正对传感器的知识做到融会贯通,举一反三。为便于读者练习和自学,各章均配有适当的习题。另外本书将多传感器融合技术与物联网技术单独开辟章节进行论述,旨在使读者增进对传感器新技术的了解,为传感器技术的发展增添新的活力。

全书共 11 章,第 3 章、第 4 章、第 8 章由王长涛编写。第 1 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章由尚文利编写。第 2 章、第 5 章由夏兴华编写。第 6 章、第 7 章由韩忠华编写。侯静负责各章节统一编校与整理工作。此外,阚凤龙、高治军、刘春光、刘阳、张颖、赵恩良、张锐、片锦香、王鑫等同志也为本书的编著工作提供了无私的帮助,在此表示由衷感谢。

本书在编写过程中参考了大量的国内外书刊及文献资料。在此向国内外给予编者支持

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器与现代测量系统	1
1.2 传感器的定义与组成	1
1.3 传感器的分类	2
1.4 传感器的基本特性	4
1.4.1 传感器的静态特性	4
1.4.2 传感器的动态特性	6
1.5 传感器的应用领域	13
1.6 传感器的发展趋势	14
本章小结	14
课堂互动内容	15
习题	15
第 2 章 光敏传感器	16
2.1 光敏传感器的基本效应	16
2.1.1 外光电效应	16
2.1.2 内光电效应	17
2.2 光敏二极管	18
2.2.1 基本结构与工作原理	18
2.2.2 光敏二极管的基本特性	19
2.2.3 典型元件 (2DU 系列)	19
2.2.4 典型电路设计举例	20
2.3 光敏电阻	20
2.3.1 基本工作原理	20
2.3.2 典型元件	20
2.3.3 典型电路设计举例	21
2.4 色敏传感器	22
2.4.1 基本工作原理	22
2.4.2 典型元件	23
2.4.3 典型电路设计举例	23
2.5 红外热释电传感器	24
2.5.1 基本工作原理与结构	24
2.5.2 典型元件	25
2.5.3 典型电路设计举例	25
本章小结	26

课堂互动内容	26
习题	26
第 3 章 电阻式传感器	28
3.1 电阻应变式传感器	28
3.1.1 基本工作原理	28
3.1.2 典型元件	36
3.1.3 典型电路设计举例	37
3.2 热电阻与热电偶	39
3.2.1 基本工作原理	39
3.2.2 典型元件	45
3.2.3 典型电路设计举例	46
3.3 热敏电阻	48
3.3.1 基本工作原理	48
3.3.2 典型元件	49
3.3.3 典型电路设计举例	49
本章小结	51
课堂互动内容	51
习题	52
第 4 章 电容式传感器	54
4.1 电容式传感器的工作原理	54
4.1.1 变极距型电容传感器	54
4.1.2 变面积型电容传感器	56
4.1.3 变介质型电容传感器	57
4.1.4 电容传感器的灵敏度	59
4.2 电容式传感器的测量电路	61
4.2.1 桥式电路	61
4.2.2 调频电路	62
4.2.3 差动脉冲宽度调制电路	62
4.3 电容式传感器的特点及误差分析	64
4.3.1 电容式传感器的特点	64
4.3.2 电容式传感器的误差分析	65
4.4 电容式传感器的应用	67
4.4.1 差动式电容压力传感器	67
4.4.2 差动式电容加速度传感器	68

4.4.3 差动式电容测厚传感器	69	6.6 影响压电式传感器工作的 主要因素	112
4.4.4 电容式料位传感器	69	本章小结	114
4.4.5 电容式液位传感器	70	课堂互动内容	114
4.4.6 电容式物位传感器	72	习题	114
本章小结	73	第7章 传感器接口电路	115
课堂互动内容	73	7.1 传感器信号的处理方法	115
习题	73	7.1.1 传感器信号的特点	115
第5章 电感式传感器	75	7.1.2 传感器信号的处理方法	116
5.1 自感式传感器	75	7.2 传感器的典型接口电路	116
5.1.1 气隙型电感传感器	75	7.2.1 电桥电路	116
5.1.2 螺管型电感传感器	80	7.2.2 信号放大接口电路	122
5.2 差动变压器式传感器	85	7.2.3 A/D 转换接口电路	132
5.2.1 工作原理	86	7.3 噪声抑制电路	141
5.2.2 特性分析	88	7.3.1 噪声来源分析	141
5.2.3 测量电路	90	7.3.2 噪声抑制的方法	143
5.3 电涡流式传感器	93	本章小结	145
5.3.1 工作原理	94	课堂互动内容	145
5.3.2 等效电路	95	习题	146
5.3.3 结构特点	96	第8章 其他类型传感器	147
5.3.4 测量电路	97	8.1 磁电式传感器	147
本章小结	100	8.1.1 磁电式传感器的工作原理	147
课堂互动内容	100	8.1.2 磁电式传感器的作用	149
习题	100	8.2 光纤传感器	150
第6章 压电式传感器	103	8.2.1 光纤的结构及传光原理	150
6.1 压电式传感器概述	103	8.2.2 光纤传感器应用	151
6.1.1 压电式传感器的作用	103	8.3 超声波传感器	152
6.1.2 压电效应概念	103	8.3.1 超声波的基本知识	152
6.1.3 压电传感器的特点	104	8.3.2 超声波传感器工作原理	154
6.2 压电材料	104	8.3.3 超声波传感器的应用	154
6.2.1 石英晶体	104	8.4 CCD 传感器	156
6.2.2 压电陶瓷	106	8.4.1 CCD 的工作原理	157
6.3 压电材料及压电元件的结构	107	8.4.2 CCD 的应用	160
6.3.1 压电材料	107	8.5 生物传感器	163
6.3.2 压电元件的常用结构形式	108	本章小结	166
6.4 压电式传感器测量电路	109	课堂互动内容	166
6.4.1 压电式传感器的等效电路	109	习题	166
6.4.2 压电式传感器的测量电路	109	第9章 集成数字式传感器	167
6.5 压电式传感器基本结构和应用 特点	111	9.1 DS18B20 数字温度传感器	167

9.1.1 结构和工作原理	167	本章小结	195
9.1.2 典型电路设计举例	169	课堂互动内容	196
9.1.3 基于单片机的软件编程	170	习题	196
9.2 光强传感器 TSL256x	174	第 11 章 物联网技术	197
9.2.1 结构和工作原理	174	11.1 物联网概述	197
9.2.2 典型电路设计举例	176	11.1.1 物联网概念	197
9.2.3 基于单片机的软件编程	177	11.1.2 物联网形成过程	197
9.3 MEMS 数字集成加速度传感器	178	11.1.3 物联网功能特征	198
9.4 MPL115A 数字集成压力传感器	179	11.1.4 物联网与互联网	199
9.4.1 结构和工作原理	179	11.2 物联网技术体系框架	200
9.4.2 MPL115A 接口板电路	181	11.2.1 感知延伸层技术	201
本章小结	182	11.2.2 网络层技术	201
课堂互动内容	183	11.2.3 应用层技术	202
习题	183	11.2.4 共性支撑技术	202
第 10 章 多传感器信息融合技术	184	11.2.5 物联网架构 EPCglobal 和 UID	202
10.1 多传感器信息融合技术概述	184	11.3 物联网关键技术与相关技术	204
10.1.1 多传感器信息融合技术的 概念	184	11.3.1 物联网四大关键技术	204
10.1.2 多传感器信息融合技术的 发展	185	11.3.2 物联网相关技术	208
10.1.3 多传感器信息融合技术的 应用领域	186	11.4 物联网终端	211
10.2 类型、数据特征及基本原理	187	11.4.1 物联网终端原理与作用	212
10.2.1 传感器的类型及数据特征	187	11.4.2 物联网终端的分类	212
10.2.2 多传感器信息融合的基本 原理	187	11.4.3 物联网终端推广	212
10.3 结构层次与功能模型	188	11.5 物联网标准体系	213
10.3.1 多传感器信息融合的结构 模型	188	11.5.1 标准化对象划分	213
10.3.2 多传感器信息融合的层次 模型	189	11.5.2 标准化体系划分	213
10.3.3 多传感器信息融合的功能 模型	189	11.5.3 物联网标准化研究进展	214
10.4 多传感器信息融合的方法	190	11.6 物联网应用与现状	215
10.4.1 多传感器信息融合的方法 分类	190	11.6.1 物联网技术三大应用	215
10.4.2 随机类方法	190	11.6.2 全球物联网市场快速增长	216
10.4.3 计算智能方法	193	11.6.3 中国物联网市场与应用	217
10.5 多传感器信息融合的发展	194	11.7 物联网应用案例	219
		11.7.1 物联网解决方案的关键 要素	219
		11.7.2 具体物联网服务解决 方案	219
		11.8 未来展望——人类将进入 物联网时代	222
		11.8.1 具体物联网服务解决方案	222

11.8.2 “物联网”给物体赋予智能	222
11.8.3 实现“智能互联城市”	223
本章小结	223
课堂互动内容	224
习题	224
附录A 传感器应用案例	225
附录B 传感器应用案例	225
附录C 传感器应用案例	225
附录D 传感器应用案例	225
附录E 传感器应用案例	225
附录F 传感器应用案例	225
附录G 传感器应用案例	225
附录H 传感器应用案例	225
附录I 传感器应用案例	225
附录J 传感器应用案例	225
附录K 传感器应用案例	225
附录L 传感器应用案例	225
附录M 传感器应用案例	225
附录N 传感器应用案例	225
附录O 传感器应用案例	225
附录P 传感器应用案例	225
附录Q 传感器应用案例	225
附录R 传感器应用案例	225
附录S 传感器应用案例	225
附录T 传感器应用案例	225
附录U 传感器应用案例	225
附录V 传感器应用案例	225
附录W 传感器应用案例	225
附录X 传感器应用案例	225
附录Y 传感器应用案例	225
附录Z 传感器应用案例	225

本章小结	223
课堂互动内容	224
习题	224
附录A 传感器应用案例	225
附录B 传感器应用案例	225
附录C 传感器应用案例	225
附录D 传感器应用案例	225
附录E 传感器应用案例	225
附录F 传感器应用案例	225
附录G 传感器应用案例	225
附录H 传感器应用案例	225
附录I 传感器应用案例	225
附录J 传感器应用案例	225
附录K 传感器应用案例	225
附录L 传感器应用案例	225
附录M 传感器应用案例	225
附录N 传感器应用案例	225
附录O 传感器应用案例	225
附录P 传感器应用案例	225
附录Q 传感器应用案例	225
附录R 传感器应用案例	225
附录S 传感器应用案例	225
附录T 传感器应用案例	225
附录U 传感器应用案例	225
附录V 传感器应用案例	225
附录W 传感器应用案例	225
附录X 传感器应用案例	225
附录Y 传感器应用案例	225
附录Z 传感器应用案例	225



1.1 传感器与现代测量系统

测试是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一，是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的途径，是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。人类早期在从事生产活动时，就已经对长度（距离）、面积、时间和重量进行了测量。

工程技术中的研究对象往往十分复杂，有些问题至今还难以进行完善的理论分析和计算，必须依靠实验研究来解决实际问题。机械工业负有装备国民经济各部门的任务。现代机械工业的发展面临着新兴科学技术发展的挑战。另外，随着机械加工精度的提高和生产过程自动化的发展，现代机械加工过程已从单机自动化和自动生产线发展到柔性制造系统（FMS），并朝着无人化工厂方向发展。而且生产中除了加工后的自动测量外，还应包括在线测试，从备料到产品入库、包装等流程的全过程，以及设备管理、故障诊断和安全监控等。因此，先进的测试技术已成为生产系统不可缺少的一个组成部分。随着集成电路与计算机技术的发展，机械与电子相结合，形成机电一体化系统，使机械产品的结构与功能产生了质的飞跃，而这一切的关键问题，就在于信息的获取、传输、存储、分析、处理和利用。

图 1-1 所示是一测试系统最基本的组成结构方框图。

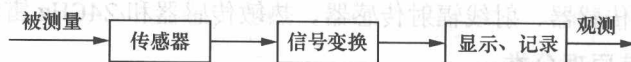


图 1-1 测试系统结构图

1.2 传感器的定义与组成

国家标准 GB7665-87 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。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。

“传感器”在新韦式大词典中定义为：从一个系统接受功率，通常以另一种形式将功率送到第二个系统中的器件。

根据这个定义，传感器的作用是将一种能量形式转换成另一种能量形式，所以不少学者也用“换能器——Transducer”来称谓“传感器——Sensor”。传感器的作用包括两个方面：一是代替人体器官；二是为工业生产提供数据。

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路 3 部分组成，组成框图如图 1-2 所示。

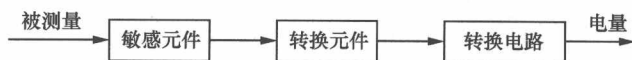


图 1-2 传感器组成框图

1.3 传感器的分类

可以用不同的观点对传感器进行分类：它们的转换原理（传感器工作的基本物理或化学效应）；它们的用途；它们的输出信号类型，以及制作它们的材料和工艺等。

根据传感器工作原理，可分为物理传感器和化学传感器两大类：物理传感器应用的是物理效应，诸如压电效应，磁致伸缩现象，离化、极化、热电、光电、磁电等效应，被测信号量的微小变化都将转换成电信号；化学传感器包括那些以化学吸附、电化学反应等现象为因果关系的传感器，被测信号量的微小变化也将转换成电信号。

大多数传感器是以物理原理为基础运作的。化学传感器技术问题较多，如可靠性问题，规模生产的可能性，价格问题等，解决了这类难题，化学传感器的应用将会有巨大增长。常见传感器的应用领域和工作原理如下。

1. 传感器按照其用途分类

按照其用途分类可分为压力敏和力敏传感器、位置传感器、液面传感器、能耗传感器、速度传感器、加速度传感器、射线辐射传感器、热敏传感器和 24GHz 雷达传感器等。

2. 传感器按照其原理分类

按照其原理分类可分为振动传感器、湿敏传感器、磁敏传感器、气敏传感器、真空度传感器和生物传感器等。

3. 传感器按照其输出信号分类

按照其输出信号为标准分类可分为模拟传感器、数字传感器、膺数字传感器和开关传感器。其中：

模拟传感器——将被测量的非电学量转换成模拟电信号；

数字传感器——将被测量的非电学量转换成数字输出信号（包括直接和间接转换）；

膺数字传感器——将被测量的信号量转换成频率信号或短周期信号的输出（包括直接或间接转换）；

开关传感器——当一个被测量的信号达到某个特定的阈值时，传感器相应地输出一个设定的低电平或高电平信号。

4. 传感器按照其材料分类

在外界因素的作用下，所有材料都会作出相应的、具有特征性的反应。它们中的那些对外界作用最敏感的材料，即那些具有功能特性的材料，被用来制作传感器的敏感元件。从所应用的材料观点出发可将传感器分成下列几类。

① 按照其所用材料的类别分为金属聚合物和陶瓷混合物。

② 按材料的物理性质分为导体、绝缘体、半导体和磁性材料。

③ 按材料的晶体结构分为单晶、多晶和非晶材料。

5. 传感器按照其制造工艺分类

按照其制造工艺分类可分为集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器和陶瓷传感器。

集成传感器是用标准的生产硅基半导体集成电路的工艺技术制造的。通常还将用于初步处理被测信号的部分电路也集成在同一芯片上。

薄膜传感器则是通过沉积在介质衬底（基板）上的相应敏感材料的薄膜形成的。使用混合工艺时，同样可将部分电路制造在此基板上。

厚膜传感器是利用相应材料的浆料，涂覆在陶瓷基片上制成的。基片通常是 Al_2O_3 制成的，然后进行热处理，使厚膜成形。

陶瓷传感器采用标准的陶瓷工艺或其某种变种工艺（溶胶——凝胶等）生产。

完成适当的预备性操作之后，已成形的元件在高温中进行烧结。厚膜和陶瓷传感器这两种工艺之间有许多共同特性，在某些方面，可以认为厚膜工艺是陶瓷工艺的一种变型。

每种工艺技术都有自己的优点和不足。由于研究、开发和生产所需的资本投入较低，以及传感器参数的高稳定性等原因，采用陶瓷和厚膜传感器比较合理。

6. 传感器按照其测量目的不同分类

根据测量目的不同分类可分为物理型传感器、化学型传感器和生物型传感器。

物理型传感器是利用被测量物质的某些物理性质发生明显变化的特性制成的。

化学型传感器是利用能把化学物质的成分、浓度等化学量转化成电学量的敏感元件制成的。

生物型传感器是利用各种生物或生物物质的特性做成的，用以检测与识别生物体内化学成分传感器。

1.4 传感器的基本特性

1.4.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指传感器在输入量的各个值处于稳定状态时的输出与输入关系，即当输入量是常量或变化极慢时，输出与输入的关系。

衡量传感器静态特性的主要技术指标有测量范围和量程、线性度、迟滞、重复性、灵敏度等。

1. 测量范围和量程

传感器所能测量的最大被测量（即输入量）的数值称为测量上限，最小的被测量则称为测量下限，而用测量下限和测量上限表示的测量区间，则称为测量范围，简称范围。测量上限和测量下限的代数差为量程，即量程=测量上限-测量下限。

2. 线性度

传感器的输出输入关系或多或少地存在非线性问题。在不考虑迟滞、蠕变等因素的情况下，其静态特性可用下列多项式代数方程来表示：

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \tag{1-1}$$

在采用直线拟合线性化时，输出输入的校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差，就称为非线性误差或线性度，通常用相对误差来表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-2}$$

由此可见，非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同。因此，选择拟合直线的主要出发点，应是获得最小的非线性误差。另外，还应考虑使用是否方便，计算是否简便。

3. 迟滞

传感器在正（输入量增大）反（输入量减小）行程中输出输入曲线不重合，称为迟滞。

迟滞特性如图 1-3 所示，它一般是由实验方法测得的。迟滞误差一般以正反行程中输出的最大偏差量与满量程输出之比的百分数表示，即

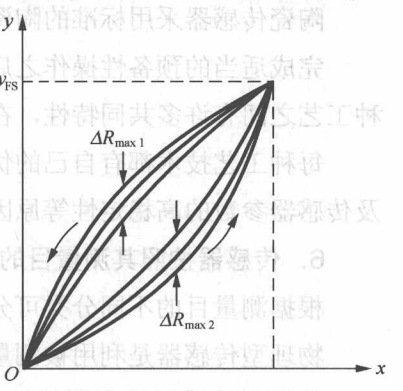


图 1-3 传感器的迟滞特性

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \tag{1-3}$$

迟滞的影响因素包括传感器机械结构中的摩擦、游隙和结构材料受力变形的滞后现象等。

4. 重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向作全量程连续多次变动时, 所得的特性曲线不一致的程度。图 1-3 所示为实际输出的校正曲线的重复特性, 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 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差取这两个最大偏差之中较大者为 $\Delta R_{\max}$, 与满量程输出 y_{FS} 之比的百分数表示, 即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

重复性误差也常用绝对误差表示。

5. 灵敏度与灵敏度误差

传感器输出的变化量 Δy 与引起此变化量的输入变化量 Δx 之比即其静态灵敏度, 其表达式为

$$k = \Delta y / \Delta x \quad (1-5)$$

由此可见, 传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度。线性传感器, 其特性的斜率处处相同, 灵敏度 k 是一常数。以拟合直线作为其特性的传感器, 也认为其灵敏度为一常数, 与输入量的大小无关。

由于某种原因, 会引起灵敏度变化, 产生灵敏度误差。灵敏度误差 γ_s 用相对误差表示, 即

$$\gamma_s = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \quad (1-6)$$

6. 分辨力与阈值

分辨力是指传感器在规定测量范围内, 所能检测出被测输入量的最小变化值。有时对该值用相对满量程输入值的百分数表示, 则称为分辨率。

阈值是使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值, 即零点附近的分辨力。

7. 稳定性

稳定性又称长期稳定性, 即传感器在长时间内保持其原性能的能力。稳定性一般以室温条件下, 经过规定时间间隔后, 传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示, 有时也用标定的有效期来表示。

8. 漂移

漂移是指在一定时间间隔内, 传感器的输出存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移常包括零点漂移和灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移, 又称时漂和温漂。时漂是指在规定的条件下, 零点或灵敏度随时间有缓慢的变化; 温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

9. 静态误差 (精度)

静态误差是指传感器在其全量程内任一点的输出值与其理论输出值的偏离程度。

静态误差的求取方法如下。

把全部校准数据与拟合直线上对应值的残差,看成是随机分布,求出其标准偏差 σ ,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2} \quad (1-7)$$

取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差。静态误差也可用相对误差表示,即

$$\gamma = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

静态误差是一项综合性指标,它基本上包含了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差等,因而也可以把这几个单项误差综合而得,即 $\gamma = \pm \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2}$ 。

误差表达:在测量过程中均有误差存在,这些误差的表达有如下几种形式。

① 绝对误差:测量结果与被测量真值之间所存在的差值的绝对值。

$$\delta = |X - Q| \quad (1-9)$$

测量的绝对误差反映了测量的精度。绝对误差越大,测量精度越低。绝对误差只能评估同一被测值的测量精度,对于不同量值的测量,它就难以判断其精度了。

② 相对误差:测量的绝对误差与被测量真值的比值,通常以百分数表示。

$$\varepsilon = \frac{\delta}{Q} \times 100\% \approx \frac{\delta}{X} \times 100\% \quad (1-10)$$

相对误差可用来评价不同被测值的精度。例如,测量100mm与测量10mm的尺寸,如果其绝对误差都是0.01mm,显然,测量100mm的精度比测量10mm的精度高得多。

③ 引用误差:测量的绝对误差与仪表的满量程之比,常以百分数表示。

$$v_n = \frac{\delta}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

这一指标通常用来表征仪器本身,而不是测量的精度,因此式(1-11)中的 δ 是用最大允许误差作为指标的。

1.4.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。由于传感器的惯性和滞后,当被测量随时间变化时,传感器的输出往往来不及达到平衡状态,处于动态过渡过程之中,所以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。实际的传感器,输出信号将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。当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时, 都存在动态测温问题。如把一支热电偶从温度为 t_0 环境中迅速插入一个温度为 t_1 的恒温水槽中(插入时间忽略不计), 这时热电偶测量的介质温度从 t_0 突然上升到 t_1 , 而热电偶反映出来的温度从 t_0 变化到 t_1 需要经历一段时间, 即有一段过渡过程, 如图 1-4 所示。热电偶反映出来的温度与其介质温度的差值就称为动态误差。

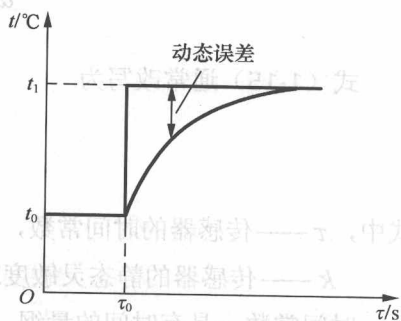


图 1-4 动态测温

造成热电偶输出波形失真和产生动态误差的原因是温度传感器有热惯性(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输出总是滞后于被测介质的温度变化, 如带有套管热电偶其热惯性要比裸热电偶大得多。这种热惯性是热电偶固有的, 它决定了热电偶测量快速变化的温度时, 会产生动态误差。影响动态特性的“固有因素”, 任何传感器都有, 只不过它们的表现形式和作用程度不同而已。

1. 传感器的基本动态特性方程

传感器的种类和形式很多, 但它们的动态特性一般都可以用下述的微分方程来描述:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-12)$$

式中, a_0 、 a_1 、..., a_n , b_0 、 b_1 、..., b_m 是与传感器的结构特性有关的常系数。

(1) 零阶系统

方程式(1-12)中的系数除了 a_0 、 b_0 之外, 其他的系数均为零, 则微分方程就变成简单的代数方程, 即

$$a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-13)$$

通常将该代数方程写成

$$y(t) = kx(t) \quad (1-14)$$

式(1-14)中, $k = b_0 / a_0$ 为传感器的静态灵敏度或放大系数。传感器的动态特性用上述方程式来描述的, 就称为零阶系统。

零阶系统具有理想的动态特性, 无论被测量 $x(t)$ 如何随时间变化, 零阶系统的输出都不会失真, 其输出在时间上无任何滞后, 所以零阶系统又称为比例系统。

在工程应用中, 电位器式的电阻传感器、变面积式的电容传感器及利用静态式压力传感器测量液位均可看作零阶系统。

(2) 一阶系统

若在方程式中的系数除了 a_0 、 a_1 与 b_0 之外, 其他的系数均为零, 则微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-15)$$

式(1-15)通常改写为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t) \quad (1-16)$$

式中, τ ——传感器的时间常数, $\tau = a_1 / a_0$;

k ——传感器的静态灵敏度或放大系数, $k = b_0 / a_0$ 。

时间常数 τ 具有时间的量纲, 它反映传感器的惯性的, 静态灵敏度则说明其静态特性。用上述方程式描述其动态特性的传感器就称为一阶系统, 一阶系统又称为惯性系统。

不带套管热电偶测温系统、电路中常用的阻容滤波器等均可看作为一阶系统。

(3) 二阶系统

二阶系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-17)$$

二阶系统的微分方程通常改写为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 \cdot kx(t) \quad (1-18)$$

式中, k ——传感器的静态灵敏度或放大系数, $k = b_0 / a_0$;

ξ ——传感器的阻尼系数, $\xi = a_1 / (2\sqrt{a_0 \cdot a_2})$

ω_n ——传感器的固有频率, $\omega_n = \sqrt{a_0 \cdot a_2}$

根据二阶微分方程特征方程根的性质不同, 二阶系统又可分为以下两种系统。

① 二阶惯性系统: 其特点是特征方程的根为两个负实根, 它相当于两个一阶系统串联。

② 二阶振荡系统: 其特点是特征方程的根为一对带负实部的共轭复根。

带有套管的热电偶、电磁式的动圈仪表及 RLC 振荡电路等均可看作为二阶系统。

2. 传感器的动态响应特性

传感器的动态响应特性不仅与传感器的固有因素有关, 还与传感器输入量的变化形式有关。也就是说, 同一个传感器在不同形式的输入信号作用下, 输出量的变化是不同的, 通常选用几种典型的输入信号作为标准输入信号, 研究传感器的响应特性。

(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, 这种分析方法称为时域分析法。传感器在进行时域分析时, 用得比较多的标准输入信号有阶跃信号和脉冲信号, 传感器的输出瞬态响应分别称为阶跃响应和脉冲响应。

① 一阶传感器的单位阶跃响应。一阶传感器的微分方程为