



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传感器

第4版

© 哈尔滨工业大学 唐文彦 主编



TP212

141

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传 感 器

第 4 版

哈尔滨工业大学 唐文彦 主编

机 械 工 业 出 版 社

本教材主要叙述几何量和机械量的检测中所使用的传感器,如电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器和谐振式传感器;同时也系统地介绍了测量其他物理量的传感器,包括热电式传感器、超声波及微波式传感器、射线式传感器、半导体式传感器等。本书是在第3版的基础上修订的,适当增加了一些工业和科研中常用的新型传感器内容,它们是:非晶态合金传感器、超导体传感器、液晶传感器、薄膜传感器、微机械传感器和智能传感器。

全书按工作原理分章,条理清晰,内容的选取反映了我国当前工业生产和科研的实际,同时加强了传感器的特性分析、精度分析及实际应用。

本书读者对象为高校本科测控技术与仪器专业师生,亦可供相关领域工程技术和研究人员及相近专业研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器/唐文彦主编.—4版.—北京:机械工业出版社,2006.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-18762-2

I. 传… II. 唐… III. 传感器-高等学校-教材
IV. TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第025371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:贡克勤 版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年1月第4版·第1次印刷

184mm×260mm·15印张·351千字

定价:25.00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) 88379711

封面无防伪标均为盗版

第4版前言

传感器被称为工业时代的测量工具——仪器仪表的“五官”，承担着信息感知和获取的关键任务，是当今信息时代的信息源头，在国民经济和国防各领域中发挥着不可替代的作用。

本教材是根据2003年于北京召开的“测控技术与仪器”教学指导委员会研讨会上拟订的“传感器”教学大纲要求编写的。在第3版的基础上进行了修订，其原则是减少过深的理论分析和计算，增加了新型传感器的内容，合理调整了全书的结构，使其适用范围更广。

本教材主要叙述几何量和机械量的检测中所使用的传感器，如电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器和谐振式传感器；同时也系统地介绍了测量其他物理量的传感器，包括热电式传感器、超声波及微波式传感器、射线式传感器、半导体式传感器等。书中还对近年发展起来的几种新型传感器作了介绍，它们是：非晶态合金传感器、超导体传感器、液晶传感器、薄膜传感器、微机械传感器和智能传感器。主要内容是各种传感器的工作原理、结构形式、一些工程设计方法以及分析研究和选用的基本知识，也对传感器的特性指标和标定进行了详细的叙述。

本教材具有如下特点：全部按工作原理分章，条理清晰，结构严谨，涵盖面广；每章末均附有思考题与习题；内容的选取反映了我国当前工业生产和科学研究的实际。

本书可作为测控技术与仪器大学本科教材，同时可供相关领域工程技术和研究人员及相近专业研究生参考。

第4版的修订工作由哈尔滨工业大学唐文彦任主编。参加编写的有哈尔滨工业大学唐文彦（绪论、第一章、第十一章、第十二章）、哈尔滨理工大学于晓洋（第四章、第十章、第十三章）、天津大学赵美蓉（第五章、第七章）、合肥工业大学王永红（第二章、第六章、第九章）、哈尔滨工业大学李慧鹏（第三章、第八章）。

天津大学张国雄任主审。

在此，诚挚地感谢前主编和编者强锡富教授、金篆芷教授和胡生清教授对修订工作的支持。



我们在修订本教材过程中,努力把传感器的新技术纳入到教材中,保持本书的先进性和适用性。但由于学识浅陋,必有许多不足之处,希同行指正。

编 者

第3版前言

本教材第1版是根据1984年4月在天津召开的全国16所高等院校精密仪器专业有关课程教学大纲会议所拟订的,并经精密仪器专业教材编审委员会批准的《传感器》课程教学大纲编写的。其后,随着情况的变化我们对教材进行了两次修订。修订的原则是去掉比较陈旧的内容,增加新内容新章节,同时合理调整了全书的结构。参加修订工作的人员也有部分调整。

本教材主要叙述几何量、机械量以及其他有关量的检测中所选用的传感器,主要内容为各种传感器的工作原理、一些工程设计方法以及分析研究和选用的基本知识。

本教材具有如下特点:全部按工作原理分章,条理清晰;内容的选取反映了我国当前工业生产和科学研究的实际;同时也加强了特性分析和精度分析。

本书可作为高等学校测控技术与仪器类专业学生的教材,亦可供其他有关专业学生和有关工程技术人员参考。

修订工作仍由哈尔滨工业大学强锡富任主编,参加编写的有哈尔滨工业大学强锡富(绪论、第一、三、六章)、合肥工业大学胡生清(第二、八章)、哈尔滨理工大学于晓洋(第四、九、十三章),天津大学金篆芷(第五章)、王春海(第七章)、哈尔滨工业大学唐文彦(第十、十一、十二章)。

天津大学张国雄担任主审。2000年4月在天津召开了本教材第3版的审稿会,与会代表提出了宝贵意见。在此谨向同志们表示衷心的感谢!

由于我们的业务水平有限,一定会有不当与错误之处,希望读者不吝赐教。

编 者

2001年3月

目 录

第 4 版前言

第 3 版前言

绪论 1

第一章 传感器的一般特性 7

第一节 传感器的静特性 7

第二节 传感器的动特性 11

第三节 传感器的标定 16

第四节 传感器的技术指标 19

思考题与习题 20

第二章 电阻式传感器 21

第一节 应变式传感器 21

第二节 压阻式传感器 39

思考题与习题 43

第三章 电感式传感器 44

第一节 工作原理 44

第二节 转换电路和传感器灵敏度 46

第三节 零点残余电压 49

第四节 应用举例 53

第五节 电涡流式传感器 54

第六节 压磁式传感器 60

第七节 感应同步器 61

思考题与习题 65

第四章 电容式传感器 67

第一节 工作原理与类型 67

第二节 转换电路 70

第三节 主要性能、特点与设计要点 74

第四节 电容式传感器举例 80

第五节 电容式传感器的应用 87

思考题与习题 89

第五章 磁电式传感器 90

第一节 磁电感应式传感器 90

第二节 霍尔式传感器 94

第三节 磁栅式传感器 101

思考题与习题 106

第六章 压电式传感器 107

第一节 压电效应与压电元件 107

第二节 等效电路与测量电路 112

第三节 压电式传感器的应用举例 116

思考题与习题 119

第七章 光电式传感器 120

第一节 光源 120

第二节 光电器件 124

第三节 电荷耦合器件和 位置敏感器件 133

第四节 光纤传感器 140

第五节 光栅式传感器 146

第六节 激光式传感器 154

思考题与习题 160

第八章 热电式传感器 162

第一节 热电偶传感器 162

第二节 热电阻传感器 166

第三节 热敏电阻传感器 168

第四节 集成温度传感器 169

思考题与习题 171

第九章 气电式传感器 172

第一节 气动测量的原理 172

第二节 气动测头 174

第三节 压力式气电传感器 177

第四节 流量式气电传感器 181

思考题与习题 182

第十章 谐振式传感器 183

第一节 原理与类型 183

第二节 特性 184

第三节 转换电路 187

第四节 应用举例 191

思考题与习题 194

第十一章 波式和射线式传感器 195

第一节 超声波式传感器 195



第二节 微波式传感器	197	第十三章 几种新型传感器	220
第三节 射线式传感器	199	第一节 非晶态合金传感器	220
思考题与习题	203	第二节 超导体传感器	221
第十二章 半导体式物性传感器	204	第三节 液晶传感器	223
第一节 气敏传感器	204	第四节 薄膜传感器	224
第二节 湿敏传感器	208	第五节 微机械传感器	227
第三节 磁敏传感器	212	第六节 智能传感器	228
第四节 色敏传感器	214	思考题与习题	231
第五节 离子敏传感器	217	参考文献	232
思考题与习题	219		

绪 论

一、传感器的作用

信息技术已成为当今全球性的战略技术，作为各种信息的感知、采集、转换、传输和处理的功能器件——传感器，已经成为各个应用领域，特别是自动检测、自动控制系统中不可缺少的核心部件。传感器技术正深刻影响着国民经济和国防建设的各个领域。

例如，在化工产品自动生产过程中，首先，进料时要自动对原料称重、分析原料成分或浓度，使它们按比例混合，混合后，在反应容器中自动反应时，又必须测定容器中的压力或体积，如果是液体，还需要自动控制容器液位高度；然后，半成品在生产线（管道）中传输，此时需要自动控制传输速度或流量，这里需要使用液动或气动设备产生推动力，因而要检测压力或压强……最后成品自动分装还要称重。所有这些环节均需要使用各种传感器对相应的非电量进行检测和控制，使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态，保证生产的高效率和高质量。

又如，在各种航天器上，利用多种传感器测定和控制航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态，将传感器获取的种种信号再输送到各种测量仪表和自动控制系统，进行自动调节，使航天器按人们预先设计的轨道正常飞行。

传感器是信息采集系统的首要部件，是实现现代化测量和自动控制（包括遥感、遥测、遥控）的主要环节，是信息的源头，又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。现在，传感技术与信息技术、计算机技术并列成为支撑整个现代信息产业的三大支柱。可以设想，如果没有高度保真和性能可靠的传感器，没有先进的传感器技术，那么信息的准确获取就成为一句空话。信息技术和计算机技术就成了无源之水。目前，从宇宙探索、海洋开发、环境保护、灾情预报到包括生命科学在内的每一项现代科学技术的研究以及人们的日常生活等，几乎无一不与传感器和传感器技术紧密联系着。可见，应用、研究和开发传感器和传感器技术是信息时代的必然要求。因此，可以毫不夸张地说：没有传感器及其技术将没有现代科学技术的迅速发展。

二、传感器的定义与组成

传感器（Transducer/Sensor）在我国国家标准（GB7665—1987）中的定义是：“能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置”。

此定义具有以下几方面的含义：①传感器是某种测量装置或测量装置的一部分，能完成部分检测任务；②它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；③它的输出量是某种物理量，这种量要便于转换、处理等等，这种量可以是气、光、电物理量，但主要是电物理量；④输出输入有对应关系，且应有一定的精确程度。

关于传感器，我国曾出现过多种名称，如发送器、传送器、变送器、换能器等，它们



的内涵相同或相似，所以近来已逐渐趋向统一，大都使用传感器这一名称了。从字面上可以作如下解释：传感器的功用是一感二传，即感受被测信息，并传送出去。

传感器一般由敏感元件、转换元件、基本转换电路三部分组成，组成框图如图 0-1 所示。

敏感元件：它是直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。图 0-2 是一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体 1

固接，上半部通过连杆与磁心 4 相连，

磁心 4 置于两个电感线圈 3 中，后者接入转换电路 5。这里的膜盒就是敏感元件，其外部与大气压力 p_a 相通，内部感受被测压力 p 。当 p 变化时，引起膜盒上半部移动，即输出相应的位移量。

转换元件：敏感元件的输出就是它的输入，它把输入转换成电路参量。在图 0-2 中，转换元件是可变电感线圈 3，它把输入的位移量转换成电感的变化。

基本转换电路：上述电感变化量接入基本转换电路（简称转换电路），便可转换成电量输出。传感器只完成被测参数至电量的基本转换，然后输入到测控电路，进行放大、运算、处理等进一步转换，以获得被测值或进行过程控制。

实际上，有些传感器很简单，有些则较复杂，大多数是开环系统，也有些是带反馈的闭环系统。

最简单的传感器由一个敏感元件（兼转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶就是这样。如图 0-3 所示，两种不同的金属材料 A 和 B，一端联接在一起，放在被测温度 T 中，另一端为参考，温度为 T_0 ，则在回路中将产生一个与温度 T 、 T_0 有关的电动势，从而进行温度测量。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成。如图 0-4 所示的压电式加速度传感器，其中质量块 m 是敏感元件，压电片（块）是转换元件。因转换元件的输出已是电量，故无需转换电路。

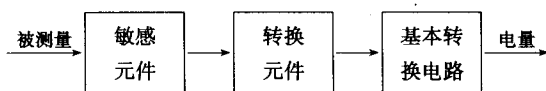


图 0-1 传感器组成框图

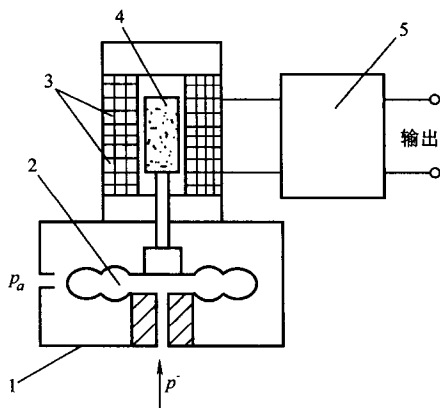


图 0-2 气体压力传感器

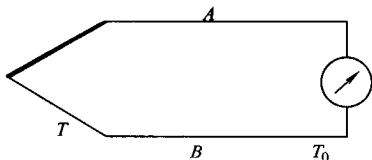


图 0-3 热电偶

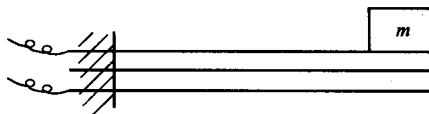


图 0-4 压电式加速度传感器



有些传感器,转换元件不只一个,要经过若干次转换。

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起的,而基本转换电路为了减小外界的影响也希望和它们装在一起,不过由于空间的限制或者其他原因,基本转换电路常装入电箱中。尽管如此,因为不少传感器要在通过转换电路后才能输出电信号,从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。

三、传感器的分类及对它的一般要求

传感器是知识密集、技术密集的器件,它与许多学科有关,其种类繁多。为了很好地掌握和应用它,需要有一个科学的分类方法。

下面将目前广泛采用的分类方法作一简单介绍。

第一,按传感器的工作机理,可分为物理型、化学型、生物型等。

本课程主要讲授物理型传感器。在物理型传感器中,作为传感器工作物理基础的基本定律有场的定律、物质定律、守恒定律和统计定律等。

第二,按构成原理,传感器可分为结构型与物性型两大类。

结构型传感器是基于物理学中场的定律构成的,包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。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工作原理是以传感器中元件相对位置变化引起场的变化为基础,而不是以材料特性变化为基础。

物性型传感器是基于物质定律构成的,如虎克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则,大多数是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。例如,光电管就是物性型传感器,它利用了物质法则中的外光电效应。显然,其特性与涂覆在电极上的材料有着密切的关系。又如,所有半导体传感器,以及所有利用各种环境变化而引起的金属、半导体、陶瓷、合金等性能变化的传感器,都属于物性型传感器。

此外,也有基于守恒定律和统计定律的传感器,但为数较少。

第三,根据传感器的能量转换情况,可分为能量控制型和能量转换型两大类。

能量控制型传感器,在信息变化过程中,其能量需要外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。

能量转换型传感器,主要由能量变换元件构成,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属于此类传感器。

第四,按照物理原理分类,传感器可分为

- 1) 电参量式传感器。包括电阻式、电感式、电容式三个基本型式。
- 2) 磁电式传感器。包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等。
- 3) 压电式传感器。
- 4) 光电式传感器。包括一般光电式、光栅式、激光式、光电码盘式、光导纤维式、红外式、摄像式等。
- 5) 气电式传感器。

- 6) 热电式传感器。
- 7) 波式传感器。包括超声波式、微波式等。
- 8) 射线式传感器。
- 9) 半导体式传感器。
- 10) 其他原理的传感器等。

有些传感器的工作原理具有两种以上原理的复合形式,如不少半导体式传感器,也可看成电参量式传感器。

第五,可以按照传感器的用途来分类,例如位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等等。

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,可分为可逆传感器和单向传感器等。

各种传感器,由于原理、结构不同,使用环境、条件、目的不同,其技术指标也不可能相同。但是有些一般要求却基本上是共同的,包括:①可靠性;②静态精度;③动态性能;④灵敏度;⑤分辨力;⑥量程;⑦抗干扰能力;⑧能耗;⑨成本;⑩对被测对象的影响等。

可靠性、静态精度、动态性能、量程的要求是不言而喻的。传感器是通过检测功能来达到各种技术指标的目的,很多传感器要在动态条件下工作,精度不够、动态性能不好或出现故障,整个工作就无法进行。在某些系统中或设备上往往装上许多传感器,若有一个传感器失灵,会影响全局。所以传感器的工作可靠性、静态精度和动态性能是最基本的要求。

抗干扰能力也是十分重要的,因为使用现场总会存在这样或那样的干扰,总会出现各种意想不到的情况,因此要求传感器应有这方面的适应能力,同时还应包括在恶劣环境下使用的安全性,通用性主要是指传感器应可用于各种不同的场合,以免一种应用要搞一种设计,达到事半功倍的目的。其他几项要求不言自明,不再赘述。

四、传感器发展展望

传感器在科学技术领域、工农业生产以及日常生活中发挥着越来越重要的作用。人类社会对传感器提出的越来越高的要求是传感器技术发展的强大动力。而现代科学技术突飞猛进则提供了坚强的后盾。

纵观几十年来的传感技术领域的发展,有以下五个方面:

1. 扩展检测范围

目前检测技术正在向宏观世界和微观世界的纵深发展着。空间技术、海洋开发、环境保护以及地震预测等都要求检测技术满足观测研究宏观世界的要求;细胞生物学、遗传工程、光合作用、医学及微加工技术等又希望检测技术跟上研究微观世界的步伐。所有这些都对传感器的研究开发提出许多新的要求。其中重要的一点就是扩展检测范围,不断突破检测参数的极限,包括检测参数的种类以及检测范围。例如,连续测量液态金属的温度;长时间测量高温介质;极低温度测量(超导);混相流量测量;脉动流量测量;超高压测量;微差压测量;大吨位测量;分子量测量等等,都要求研究解决极端参数检测用的传感



器。近代物理学中的许多新成就应用于传感器的研究与开发,极大地扩展了传感器的检测范围。用激光、红外、超声、各种谱线及射线等原理可以制成测温、测流、测距等各类新颖传感器。用半导体砷化镓二极管可测 $0.3 \sim 400\text{K}$ 的超低温,分辨力达 0.07K ;利用发光二极管或激光为光源加上光纤可以传送图像及测温;利用激光的单色性及其光程差引起的干涉现象可以测量 2MPa 数量级的差压。发展地看,传感器的极限检测范围大多将取决于量子力学效应,例如,利用约瑟夫逊效应的磁传感器可以测 10^{-11}T 的极弱磁场强度;用约瑟夫逊效应的热噪声温度计可测 10^{-6}K 的超低温。具有检测这种极其微弱信号的传感器技术,不仅展示了传感器开发的方向及能力,也可以促进其他技术的发展,甚至会使一些新学科诞生。

2. 提高检测性能

检测技术的发展,必然要求传感器的性能不断提高。例如,对于火箭发动机燃烧室的压力测量,希望测试准确度能高于 0.1% ;对超精密机械加工的在线检测,要求准确度达 $0.1\mu\text{m}$,且工作可靠,由此需要研制性能优异的传感器。

对传感器而言,检测准确度是其最重要的综合指标。在 20 世纪 30~40 年代,检测准确度一般为百分之几到千分之几。近年来提高很快,有些量的检测准确度可达万分之几,甚至百万分之几。例如,采用光电倍增管作为传感器的自动光学高温计,测温范围可达数千度,而准确度为 10^{-2}K ;用直线光栅测线位移,测量范围在几米时,准确度可达几微米;用激光脉冲测量月球到地球近 40 万千米的距离,其准确度可达几厘米。依据微观世界量子力学效应研制的传感器,不仅扩展了检测范围,也极大地提高了检测准确度。

3. 传感器的集成化、功能化

传感器的集成化,是由于引入了半导体集成电路等技术及开发思想的结果。传感器的集成化一般具有两方面含义:其一是将传感器与其后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等制成一个组件,实现一体化。这样与一般传感器相比,它具有体积小、反应快、抗干扰能力强、稳定性好的优点。其二主要是将同一类传感器集成于同一芯片或器件上构成二维或三维式传感器,例如面型固态图像传感器,可用于测量物体的表面状况,由于从一开始就用一体化构造的形式来完成,不是在个别传感器制造后用组合或结合的方法构成,因而这类传感器具有坚固性、高准确度和高可靠性的特点。

传感器的功能化是与“集成化”相对应的一个概念。这里所讨论的功能化,不是指传感器信号变换的那种单纯或单一的功能,而是比较复杂的或复合的功能。过去由几个元件连接成电路才能完成的功能,经功能化后,只要由一个半导体器件就能实现了。并且,传感器与别的功能结合,可产生出新的功能。例如,由温度传感器与开关元件集成化可构成某种热敏传感器。只要将这种元件的集电结反向饱和电流设计成随温度而变化,就能起控温作用。可见,这种热敏传感器同时具备温度传感器与开关两种功能。再如,用于成像器件的 CCD(电荷耦合器件)就是一种将阵列化的光电探测器与扫描功能一体化的器件。它是具有把一维或二维光学图像转换成时序电信号的功能传感器。

传感器的集成化、功能化充分利用了传感器特性的均匀性,降低了制造成本,实现了系统的小型化和整体性能的提高。

4. 新领域、新原理的传感器

传感器的研究与开发可以分为两大方面：一个是传感器本身的研究开发，另一个是与计算机相连接的传感器系统（或称智能传感器）的研究开发。而就传感器本身的研究开发来说，又可以分为两个方面：一个是面对生产和生活的需要，研制大批新颖传感器，开辟和扩大传感器市场，另一个则是开发新领域、应用新原理新技术的基础研究。近年来，许多新原理新技术，如激光、半导体技术、光导纤维、遥感技术、自动化技术以及近代物理、信息论等等都已大规模地应用于传感器的开发。从开发的领域看，虽然研究与发展的大多为物理传感器，但是化学传感器和生物传感器的研究也取得了较大的成绩。同时，也应看到传感技术未开发的领域还很多，由于科学技术的发展，需要检测极端参数（超高、超低）值和特殊参量（如气敏、味觉、嗅觉、识别颜色、判断明暗等）等，因此需要不断地探求新的检测原理，研究开发新原理的传感器。除研究利用新的物理效应外，还要不断研究新的化学效应、研究仿生学、仿照生物的感觉功能，来开发未来的新型传感器。

五、本课程的特点和任务

“传感器”课程主要讲授把各种几何量、机械量、热工量以及其他有关量转换成电量的各种传感器（包括基本转换电路）。

传感器是与现代科学技术紧密相连的正在发展的一门新兴学科，其种类很多，涉及的工作原理十分丰富。传感器与生产实际和科学研究的关系十分密切。所有这些就决定了“传感器”课程是一门综合性、理论性和实践性都很强的课程。

本课程的主要任务是：①使学生掌握各类传感器的基本理论；②掌握几何量、机械量、热工量等有关量测量中常用的各种传感器的工作原理、主要性能及其特点；③使学生掌握各种传感器的典型应用，能合理地选择和使用传感器；④了解当代传感技术的最新研究成果。

学习“传感器”课程，涉及到机、电、光、计算机等多方面知识，学习之前应有所准备。学习中要把握各章重点，弄懂基本概念，配合必要的实验，理论联系实际。

第一章 传感器的一般特性

传感器的特性主要是指输出与输入之间的关系。当输入量为常量,或变化极慢时,这一关系就称为静特性;当输入量随时间较快地变化时,这一关系就称为动特性。

一般说来,传感器输出与输入关系可用对时间的微分方程来描述。理论上,将微分方程中的一阶及以上的微分项取为零时,便可得到静特性。因此,传感器的静特性只是动特性的一个特例。实际上传感器的静特性要包括非线性和随机性等因素,如果把这些因素都引入微分方程,将使问题复杂化。为避免这种情况,总是把静特性和动特性分开考虑。

传感器除了描述输出输入关系的特性之外,还有与使用条件、使用环境、使用要求等有关的特性。

第一节 传感器的静特性

静特性表示传感器在被测量处于稳定状态时的输出输入关系。

人们总是希望传感器的输出与输入具有确定的对应关系,而且最好呈线性关系。但一般情况下,输出输入不会符合所要求的线性关系,同时由于存在着迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等各种因素的影响,以及外界条件的影响,使输出输入对应关系的惟一确定性也不能实现。考虑了这些情况之后,传感器的输出输入作用图大致如图 1-1 所示。图中的外界影响不可忽视,影响程度取决于传感器本身,可通过传感器本身的改善来加以抑制,有时也可以对外界条件加以限制。图中的误差因素就是衡量传感器特性的主要技术指标。

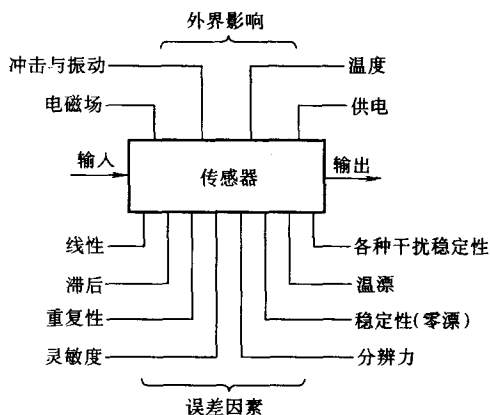


图 1-1 传感器的输出输入作用

一、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、不稳定性等因素的情况下,其静特性可用下列多项式代数方程表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots + a_n x^n \quad (1-1)$$

式中 y ——输出量;
 x ——输入量;
 a_0 ——零点输出;



a_1 ——零点处灵敏度;

a_2 、 a_3 、 a_n ——非线性项系数。

各项系数不同, 决定了特性曲线的具体形式。

静特性曲线可实际测试获得。在获得特性曲线之后, 可以说问题已经得到解决。但是为了标定和数据处理方便, 希望得到线性关系。这时可采用各种方法, 其中也包括硬件或软件补偿, 进行线性化处理。一般来说, 这些办法都比较复杂。所以在非线性误差不太大的情况下, 总是采用直线拟合的办法来线性化。

在采用直线拟合线性化时, 输出输入的实际测量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 γ_L 来表示, 即

$$\gamma_L = \pm (\Delta_{L\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 $\Delta_{L\max}$ ——最大非线性误差;

y_{FS} ——满量程输出。

由此可见, 非线性偏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。所以, 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。

目前常用的拟合方法有: ①理论拟合; ②过零旋转拟合; ③端点连线拟合; ④端点连线平移拟合; ⑤最小二乘拟合; ⑥最小包容拟合等。前四种方法如图 1-2 所示。图中实线为实际输出曲线, 虚线为拟合直线。

图 1-2a 中, 拟合直线为传感器的理论特性, 与实际测试值无关。该方法十分简单, 但一般说 $\Delta_{L\max}$ 较大。图 1-2b 为过零旋转拟合, 常用于曲线过零的传感器。拟合时, 使 $\Delta_{L1} = |\Delta_{L2}| =$

$\Delta_{L\max}$ 。这种方法也比较简单, 非线性误差比前一种小很多。图 1-2c 中, 把输出曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便, 但 $\Delta_{L\max}$ 也较大。图 1-2d 中在图 1-2c 基础上使直线平移, 移动距离为原先 $\Delta_{L\max}$ 的一半, 这样输出曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta_{L2} = |\Delta_{L1}| = |\Delta_{L3}| = \Delta_{L\max}$, 与图 1-2c 相比, 非线性误差减小一半, 提高了精度。

采用最小二乘法拟合时, 如图 1-3 所示。设拟合直线方程为

$$y = kx + b \quad (1-3)$$

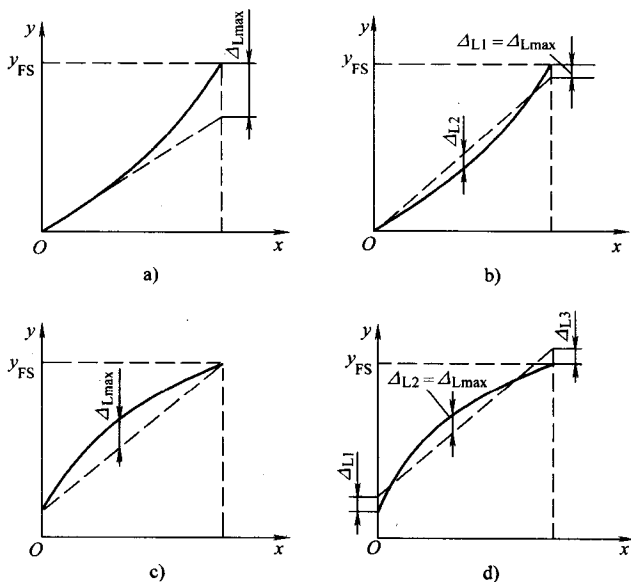


图 1-2 各种直线拟合方法

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



若实际校准测试点有 n 个, 则第 i 个校准数据与拟合直线上响应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (kx_i + b) \quad (1-4)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使 $\sum \Delta_i^2$ 为最小值, 即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min \quad (1-5)$$

也就是使 $\sum \Delta_i^2$ 对 k 和 b 一阶偏导数等于零, 即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-6)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-7)$$

从而求出 k 和 b 的表达式为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-8)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-9)$$

在获得 k 和 b 之值后代入式 (1-3) 即可得到拟合直线, 然后按式 (1-4) 求出残差的最大值 Δ_{Lmax} 即为非线性误差。

顺便指出, 大多数传感器的输出曲线是通过零点的, 或者使用“零点调节”使它通过零点。某些量程下限不为零的传感器, 也可以将量程下限作为零点处理。

二、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的现象称为迟滞。迟滞特性如图 1-4 所示, 它一般是由实验方法测得。迟滞误差一般以满量程输出的百分数表示, 即

$$\gamma_H = \pm (1/2)(\Delta_{Hmax}/y_{FS}) \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 Δ_{Hmax} ——正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差的另一名称叫回程误差。回程误差常用绝对误差表示。检测回程误差时, 可选择几个测试点。对应于每一个输入信号, 传感器正行程及反行程中输出信号差值的最大者即为回程误差。

三、重复性

重复性是指传感器在输入按同一方向连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。

图 1-5 所示为输出曲线的重复特性, 正行程的最大重复性误差为 Δ_{Rmax1} , 反行程的最大重复性误差为 Δ_{Rmax2} 。重复性误差取这两个误差之中较大者为 Δ_{Rmax} , 再以满量程 y_{FS} 输出的百分数表示, 即

$$\gamma_R = \pm (\Delta_{Rmax}/y_{FS}) \times 100\% \quad (1-11)$$

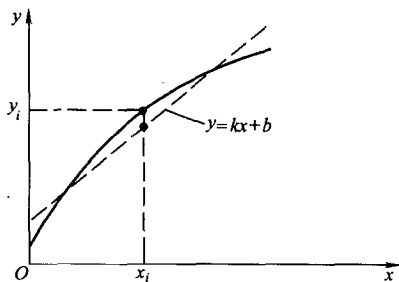


图 1-3 最小二乘拟合方法