

国家示范院校重点建设专业

机电一体化技术专业课程改革系列教材

信号检测与控制

◎ 主 编 王礼鹏 单启兵
◎ 副主编 唐 振 何 睿 张春来
◎ 主 审 赵 泽



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

国家示范院校重点建设专业

机电一体化技术专业课程改革系列教材

信号检测与控制

- ◎ 主 编 王礼鹏 单启兵
- ◎ 副主编 唐 振 何 睿 张春来
- ◎ 主 审 赵 泽



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材根据高职高专机电工程及相关职业培养目标的要求,以工作过程为导向,按照国家示范院校重点建设专业——机电一体化技术专业课程改革的要求进行编写。全书分为6个学习情境,每个情境都包括基本理论和任务实施两大主要部分。其内容上侧重于讲解传统传感器的工作原理和特性,并通过系统的实践训练,提高学生的基本素质。

本教材可作为高职高专院校、中等职业学校机电类和电类相关专业及成人高校的教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书,以及作为岗前培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

信号检测与控制 / 王礼鹏, 单启兵主编. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2010.3

(国家示范院校重点建设专业、机电一体化技术专业课程改革系列教材)

ISBN 978-7-5084-7313-0

I. ①信… II. ①王… ②单… III. ①信号检测—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TN911.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第039959号

书 名	国家示范院校重点建设专业 机电一体化技术专业课程改革系列教材 信号检测与控制
作 者	主 编 王礼鹏 单启兵 副主编 唐 振 何 睿 张春来 主 审 赵 泽
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 7.5印张 182千字
版 次	2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	16.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本教材是国家示范院校重点建设专业——机电一体化技术专业课程改革成果之一。其内容的深度和难度按照高等职业教育的特点，突出实用性、突出理论知识的应用，着重讲授理论知识在工程实践中的应用。书中涉及机电一体化、电气自动化、机电设备、数控技术及应用等专业知识。

教学内容的选取以培养实用型人才为导向，理论与实践并重，以实际应用要求设计完善实训内容。实行以就业为导向的人才培养模式，不同的学习情境应用为目标，进行实际操作训练，设计单向、多向、综合性训练内容，并用多媒体课件配合多方面讲解传感器原理，然后再通过亲自安装，使用传感器和校验传感器，从而进一步加深印象的观察、理论、实践的三位一体的综合性的教学模式。在编写中注重学生的专业能力、方法能力和社会能力的培养，力求培养出具有理论与实际相结合的综合性高技能人才。

本课程根据课程目标，以识别安装传感器、检测需要的信号、传感器的维护与校验等技术领域的技能需求为依据，参照工业控制的检测标准，设置实践教学项目，更新实践内容。

本教材由安徽水利水电职业技术学院王礼鹏、单启兵任主编，马钢合肥公司设备部赵泽高工任主审。安徽水利水电职业技术学院唐振、何睿、张春来任副主编。全书共由6个学习情境组成，学习情境1和学习情境6由王礼鹏编写，学习情境2由单启兵编写，学习情境3由唐振编写，学习情境4由何睿编写，学习情境5由张春来编写。全书由王礼鹏统稿并定稿。

在教材编写过程中，安徽水利水电职业技术学院机电工程系专业建设团队老师提出了许多宝贵意见，学院领导及兄弟部门领导也给予了大力支持，同时还得到了马钢合肥公司、合肥锻压集团等企业的积极参与和大力帮助，在此表示最诚挚的感谢。

本教材引用了大量的规范、专业文献和资料，恕未在本书中一一标明，在此对有关作者表示诚挚的谢意。

由于时间紧，作者水平有限，本书难免有一些疏漏，不足之处在所难免，恳请广大师生和读者提出意见和建议。

编者

2010年1月

前言

学习情境 1 认识传感器	1
1.1 学习目标	1
1.2 学习任务	1
1.3 基本理论	1
1.3.1 认识机电及电气设备中的传感器	1
1.3.2 了解常用传感器的作用和基本构成	2
1.3.3 了解传感器分类、发展和主要性能指标	3
1.3.4 改善传感器性能的技术途径	12
1.3.5 传感器的标定	13
学习情境 2 温度与环境量的检测	16
2.1 学习目标	16
2.2 学习任务	16
2.3 基本理论和学习内容	16
2.3.1 金属热电阻测量温度	16
2.3.2 半导体热敏电阻测量温度	19
2.3.3 热电偶及其应用	22
2.3.4 气敏和湿敏传感器	28
2.4 任务实施	32
2.4.1 了解热敏电阻的温度特性	32
2.4.2 热敏电阻应用训练	33
2.4.3 了解热电偶的基本特性	33
2.4.4 检测气敏元件 MQ—3	33
2.4.5 制作简易湿度报警器	34
2.4.6 制作简单热控电路	34
学习情境 3 力与压力的检测	36
3.1 学习目标	36
3.2 学习任务	36
3.3 基本理论和学习内容	36
3.3.1 电阻应变片测力	36
3.3.2 压电传感器测力应用训练	43

3.4 任务实施	52
3.4.1 了解应变片的应用	52
3.4.2 用打火机演示压电效应	54
学习情境4 液位和流量的检测	56
4.1 学习目标	56
4.2 学习任务	56
4.3 基本理论和学习内容	56
4.3.1 电容式传感器测量液位	56
4.3.2 超声波传感器	64
4.3.3 流量的检测方法	67
4.4 任务实施	70
4.4.1 电容式传感器检测液位实用训练的内容和方法	70
4.4.2 超声波传感器检测距离实用训练的内容和方法	71
学习情境5 位置检测	73
5.1 学习目标	73
5.2 学习任务	73
5.3 基本理论和学习内容	73
5.3.1 金属物位置检测	73
5.3.2 磁性物质的位置检测	78
5.3.3 光电开关	84
5.3.4 其他位置检测方法	94
5.4 任务实施	95
5.4.1 直流激励时霍尔式位移传感器特性实验	95
5.4.2 交流激励时霍尔式位移传感器特性实验	97
5.4.3 霍尔式位移传感器的应用——电子秤实验	98
5.4.4 霍尔转速传感器测速实验	98
学习情境6 位移的检测	100
6.1 学习目标	100
6.2 学习任务	100
6.3 基本理论和学习内容	100
6.3.1 机械位移传感器检测位移	100
6.3.2 光栅位移传感器检测位移	102
6.3.3 磁栅传感器检测位移	107
6.4 任务实施	109
6.4.1 差动变压器测量钢板厚度模拟实验	109
6.4.2 光栅传感器莫尔条纹与栅距关系实验	110
6.4.3 光栅传感器莫尔条纹的细分、计数实验	111

学习情境 1 认识传感器

1.1 学习目标

(1) 了解传感器的定义、传感器的组成（敏感元件、传感元件和检测线路）以及传感器的分类方法。

(2) 掌握传感器的静态特性——线性度、灵敏度、回程误差、测量范围与量程和精度等级等的基本概念。

(3) 了解传感器的动态特性的分析方法。

1.2 学习任务

(1) 认识机电及电气设备中的传感器。

(2) 了解常用传感器的作用和基本构成。

(3) 了解传感器分类、发展和主要性能指标。

(4) 改善传感器性能的技术途径。

(5) 传感器的标定。

1.3 基本理论

1.3.1 认识机电及电气设备中的传感器

1.3.1.1 对传感器的基本认知

传感器技术遍布各行各业、各个领域，如工业生产、科学研究、现代医学领域；现代农业生产、国防科技、家用电器，甚至儿童玩具也少不了传感器。

传感器技术运用在自动检测和控制系统中，对系统运行的各项功能起重要作用。系统的自动化程度越高，对传感器的依赖性就越强。

传感器是获取信息的主要途径与手段。没有传感器，现代化生产就失去了基础。传感器是边缘学科开发的先驱。传感器已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程，甚至文物保护等极其广泛的领域。从茫茫的太空到浩瀚的海洋，以至各种复杂的工程系统，几乎每一个现代化项目，都离不开各种各样的传感器。可见，传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用。

1.3.1.2 传感器的概念

传感器是一种物理装置或生物器官，能够探测、感受外界的信号、物理条件（如光、热、湿度）或化学组成（如烟雾），并将探知的信息传递给其他装置或器官，如图 1.1 所示。

国家标准 GB 7665—87《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”。

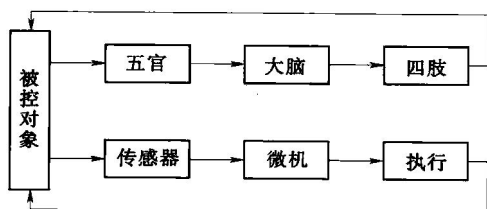


图 1.1 传感器的工作原理

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）能力的传感器。传感器是传感器系统的一个组成部分，它是被测量信号输入的第一道关口。

传感器系统的性能主要取决于传感器，传感器把某种形式的能量转换成另一种形式的能量。传感器可分为有源的和无源的两类。有源传感器能将一种能量形式直接转变成另一种，不需要外接的能源或激励源。无源传感器不能直接转换能量形式，但它能控制从另一端输入的能量或激励使传感器能承担将某个对象或过程的特定特性转换成数量的工作。

1.3.1.3 各种常见的传感器

几种常见的传感器如图 1.2 所示。



图 1.2 几种常见的传感器

1.3.2 了解常用传感器的作用和基本构成

1.3.2.1 常用传感器的作用

传感器实际上是一种功能块，其作用是将来自外界的各种信号转换成电信号。传感器所检测的信号近来显著地增加，因而其品种也极其繁多。

为了对各种各样的信号进行检测、控制，就必须获得尽量简单易于处理的信号，这样的要求只有电信号能够满足。电信号能较容易地进行放大、反馈、滤波、微分、存储、远距离操作等。因此作为一种功能块的传感器可狭义的定义为：将外界的输入信号变换为电信号的一类元件，如图 1.3 所示。



传感器是一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定对应关系的、便于应用的某种物理量的测量装置，其包含以下几个方面意思：

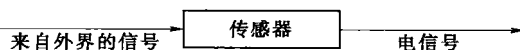


图 1.3 传感器的作用示意图

- (1) 传感器是测量装置，能完成检测任务。
- (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) 输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量。
- (4) 输入输出有对应关系，且应有一定的精确度。

在基础学科研究中，传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展，进入了许多新领域，例如在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙，微观上要观察小到厘米的粒子世界，纵向上要观察长达数十万年的天体演化，短到秒的瞬间反应。此外，还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然，要获取大量人类感官无法直接获取的信息，没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍，首先就在于对象信息的获取存在困难，而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现，往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展，往往是一些边缘学科开发的先驱。

1.3.2.2 传感器的结构

传感器由敏感元件、转换元件、转换电路（处理电路）组成，如图 1.4 所示。

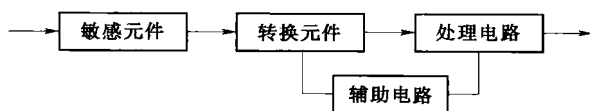


图 1.4 传感器的组成

(1) 敏感元件：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。

(2) 转换元件：以敏感元件的输出为输入，把输入转换成电路参数。

(3) 转换电路：上述电路参数接入转换电路，便可转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，仅由一个敏感元件（兼作转换元件）组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有转换电路。

有些传感器，转换元件不止一个，要经过若干次转换。

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。

1.3.3 了解传感器分类、发展和主要性能指标

1.3.3.1 传感器的分类

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

(1) 按照其工作原理，传感器可分为：

1) 物理传感器：应用物理效应，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，将被测信号量的微小变化转换成电信号。大多数传感器是以物理原理为基础运作的。



2) 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, 将被测信号量的微小变化转换成电信号。化学传感器技术问题较多, 例如可靠性问题、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。

3) 有些传感器既不能划分到物理类, 也不能划分为化学类。

(2) 按照其用途, 传感器可分为: 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、热敏传感器等。

(3) 按照其原理, 传感器可分为: 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、生物传感器等。

(4) 按照其制造工艺, 传感器可分为: 集成传感器、薄膜传感器、厚膜传感器、陶瓷传感器等。

(5) 按照其输出信号, 传感器可分为:

1) 模拟传感器: 将被测量的非电学量转换成模拟电信号。

2) 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)。

3) 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。

1.3.3.2 传感器需求的新动向

社会需求是传感器技术发展的强大动力。随着现代科学技术, 特别是微电子技术和信息产业的飞速发展, 以及“电脑”的普及, 传感器在新的技术革命中的地位和作用将更为突出, 一股竞相开发和应用传感器的热潮已在世界范围内掀起。这是因为:

(1) “电五官”落后于“电脑”的现状, 已成为微型计算机进一步开发和应用的一大障碍。

(2) 许多有竞争力的新产品开发和卓有成效的技术改造, 都离不开传感器。

(3) 传感器的应用直接带来了明显的经济效益和社会效益。

(4) 传感器普及于社会各个领域, 将造成良好的销售前景。

图 1.5 展示了一些国家对传感器的应用领域及需要量, 可作为我们对传感器产业和产品开发的参考。

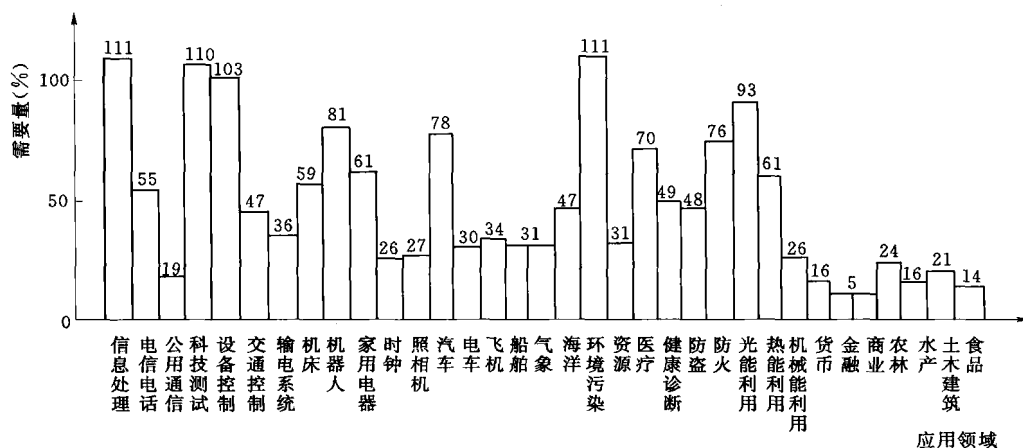


图 1.5 一些国家对传感器应用领域及需要量

当前, 传感器技术的主要发展动向, 一是开展基础研究, 发现新现象, 开发传感器的



新材料和新工艺；二是实现传感器的集成化与智能化。

(1) 发现新现象，开发新材料。新现象、新原理、新材料是发展传感器技术，研究新型传感器的重要基础，每一种新原理、新材料的发现都会伴随着新的传感器种类诞生。

(2) 集成化，多功能化——向敏感功能装置发展。传感器的集成化，最近积极地应用了半导体集成电路技术及其开发思想用于传感器制造。如采用微细加工技术 MEMS (Microelectro-Mechanical System) 制作微型传感器；采用厚膜和薄膜技术制作传感器等。

(3) 向未开发的领域挑战——生物传感器。到目前为止，正大力研究。开发的传感器大多为物理传感器，今后应积极开发研究化学传感器和生物传感器。特别是智能机器人技术的发展，需要研制各种模拟人的感觉器官的传感器，如已有的机器人视觉、触觉、味觉传感器等。

(4) 智能传感器 (Smart sensor) ——具有判断能力、学习能力的传感器。事实上是一种带微处理器的传感器，它具有检测、判断和信息处理功能。

如美国霍尼韦尔公司制作的 ST-3000 型智能传感器，采用半导体工艺，在同一芯片上制作 CPU、EPROM 和静态压力、压差、温度三种敏感元件。

从构成上看，智能传感器是一个典型的以微处理器为核心的计算机检测系统。它一般由图 1.6 所示的几个部分构成。

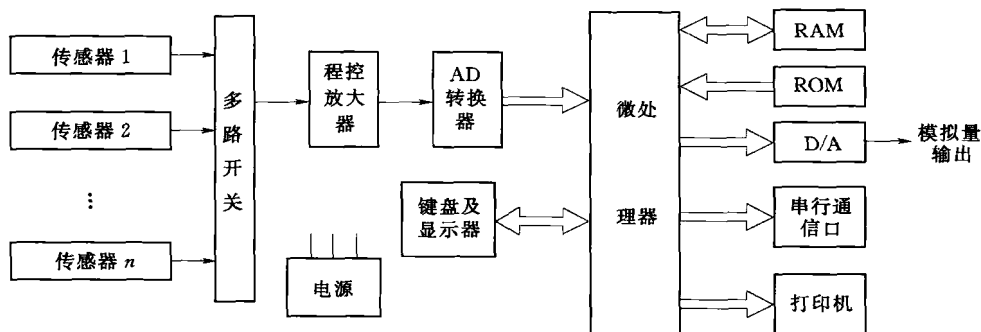


图 1.6 智能传感器的构成

同一般传感器相比，智能传感器有以下几个显著特点：

1) 精度高。由于智能传感器具有信息处理的功能，因此通过软件不仅可以修正各种确定性系统误差（如传感器输入输出的非线性误差、温度误差、零点误差、正反行程误差等），而且还可以适当地补偿随机误差，降低噪声，从而使传感器的精度大大提高。

2) 稳定、可靠性好。它具有自诊断、自校准和数据存储功能，对于智能结构系统还有自适应功能。

3) 检测与处理方便。它不仅具有一定的可编程自动化能力，可根据检测对象或条件的改变，方便地改变量程及输出数据的形式等，而且输出数据可通过串行或并行通信线直接送入远地计算机进行处理。

4) 功能广。不仅可以实现多传感器多参数综合测量，扩大测量与使用范围，而且可以有多种形式输出（如 RS232 串行输出，PIO 并行输出，IEEE-488 总线输出以及经 D/



A 转换后的模拟量输出等)。

5) 性能价格比高。在相同精度条件下, 多功能智能传感器与单一功能的普通传感器相比, 其性能价格比高, 尤其是在采用比较便宜的单片机后更为明显。

(5) 传感器市场发展前景。咨询公司 INTECHNOCONSULTING 的传感器市场报告显示, 2008 年全球传感器市场容量为 506 亿美元, 预计 2010 年全球传感器市场可达 600 亿美元以上。调查显示, 东欧、亚太区和加拿大成为传感器市场增长最快的地区, 而美国、德国、日本依旧是传感器市场分布最大的地区。就世界范围而言, 传感器市场上增长最快的依旧是汽车市场, 占第二位的是过程控制市场, 看好通信市场前景。

一些传感器市场比如压力传感器、温度传感器、流量传感器、水平传感器已表现出成熟市场的特征。流量传感器、压力传感器、温度传感器的市场规模最大, 分别占到整个传感器市场的 21%、19% 和 14%。传感器市场的主要增长来自于无线传感器、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems, 微机电系统) 传感器、生物传感器等新兴传感器。其中, 无线传感器在 2007~2010 年复合年增长率预计会超过 25%。

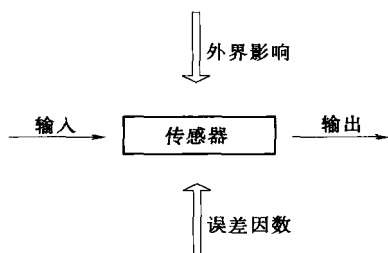
目前, 全球的传感器市场在不断变化的创新之中呈现出快速增长的趋势。有关专家指出, 传感器领域的主要技术将在现有基础上予以延伸和提高, 各国将竞相加速新一代传感器的开发和产业化, 竞争也将日益激烈。新技术的发展将重新定义未来的传感器市场, 比如无线传感器、光纤传感器、智能传感器和金属氧化传感器等新型传感器的出现与市场份额的扩大。

1.3.3.3 传感器的主要性能指标

传感器的特性主要是指输入与输出的关系。

1.3.3.3.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指对静态的输入信号, 传感器的输出量与输入量之间所具有相互关系。因为这时输入量和输出量都和时间无关, 所以它们之间的关系, 即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程, 或以输入量作横坐标, 把与其对应的输出量作纵坐标而画出的特性曲线来描述。表征传感器静态特性的主要参数有: 线性度、灵敏度、分辨率和迟滞等。



我们总是希望传感器的输出与输入成唯一的对应关系, 最好是线性关系, 但是一般情况下, 输出与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、摩擦等因数的影响, 使输出输入对应关系的唯一性也不能实现。因此外界的影响不可忽视。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。传感器输入输出作用

图 1.7 传感器输入输出作用图 如图 1.7 所示。

误差因数就是衡量传感器静态特性的主要技术指标。

1. 线性度

通常情况下, 传感器的实际静态特性输出是条曲线而非直线。在实际工作中, 为使仪表具有均匀刻度的读数, 常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线。线性度 (非线性误差) 就是这个近似程度的一个性能指标。



拟合直线的选取有多种方法。如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线；或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线，此拟合直线称为最小二乘法拟合直线。

传感器的输入与输出关系或多或少地都存在着非线性问题。在不考虑迟滞、蠕变等因数的情况下，其特性可用多项式代数方程来表示，即

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

式中： x 为输入量； y 为输出量； a_0 为零位输出； a_1 为传感器的灵敏度，常用 K 或 S 表示； $a_2, a_3, \cdots, a_n$ 为非线性项的待定常数。

这就是传感器的静态特性数学模型。

各项系数不同决定了特性曲线的具体形式。

静态特性曲线可用实际测试获得。实际中为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系，采用各种方法如计算机硬件或软件补偿法等进行线性化处理。一般来说，这些办法都比较复杂。但在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，输出输入的校正曲线与拟合曲线之间的最大偏差，就称为非线性误差或线性度。通常用相对误差来表示：

$$e_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： $\Delta L_{\max}$ 为输出平均值与拟合直线间的最大偏差； $y_{F.S}$ 为理论满量程输出值。

目前常用的拟合方法有：理论拟合、过零旋转拟合、端点连线拟合、端点连线平移拟合、最小二乘拟合等。几种不同的拟合方法如图 1.8 所示。

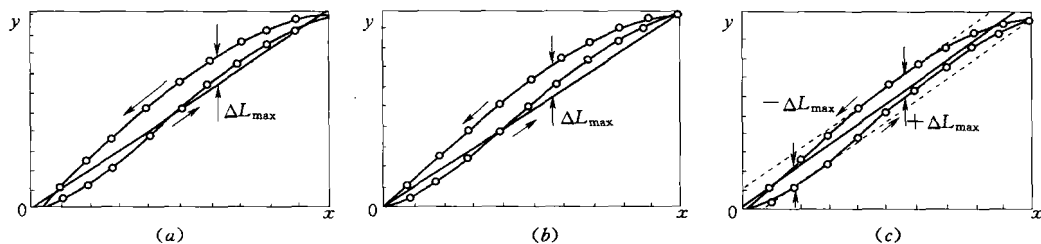


图 1.8 几种不同的拟合方法

(a) 理论法；(b) 端点连线法；(c) 端点连线平移法

采用最小二乘法拟合时，按最小二乘原理求取拟合直线，该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。如用式 (1-3) 表示最小二乘法拟合直线。

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

式中： b 和 k 为截距和斜率。

式 (1-3) 中的系数 b 和 k 可根据下述分析求得。

设实际校准测试点有 n 个，则第 i 个标准数据 y_i 与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i)$$

按最小二乘法原理，应使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 最小；故由 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 分别对 k 和 b 求一阶偏导数并令其等于零，即可求得 k 和 b



$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-4)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-5)$$

其中

$$\sum x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n$$

$$\sum y_i = y_1 + y_2 + \cdots + y_n$$

$$\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n$$

$$\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2$$

在获得 k 和 b 的值后代入式 (1-3) 即可得到拟合直线, 然后按 (1-4) 式求出残差的最大值 $\Delta L_{\max}$ 即为非线性误差。最小二乘法的拟合精度很高, 但校准曲线相对拟合直线的最大偏差绝对值并不一定最小, 最大正、负偏差的绝对值也不一定相等。

2. 迟滞

迟滞特性表征传感器在正向 (输入量增大) 和反向 (输入量减小) 行程间输出—输入特性曲线不一致的程度, 通常用这两条曲线之间的最大差值 $\Delta H_{\max}$ 与满量程输出 $F \cdot S$ 的百分比表示 (如图 1.9 所示)。也就是说对应于同一大小的输入信号, 传感器的输出信号大小不相等。

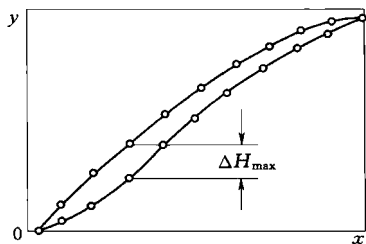


图 1.9 迟滞特性

一般由试验室方法测得迟滞误差, 并以满量程输出的百分数表示, 即

$$e_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中: $\Delta H_{\max}$ 为正反行程间输出的最大差值。

迟滞误差也称回程误差, 常用绝对误差表示。迟滞可由传感器内部元件存在能量的吸收造成, 它反映了传感器的机械部分和结构材料方面不可避免的弱点, 如轴承摩擦、间隙等。

3. 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曲线不一致的程度。

图 1.10 所示为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 $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性偏差取这两个最大偏差中之较大者为 $\Delta R_{\max}$, 再以满量程输出 $y_{F.S}$ 的百分数表示, 即

$$e_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-7)$$

4. 灵敏度

传感器输出的变化量 Δy 与引起该变化量的输入量变化 Δx 之比即为其静态灵敏度。表达为

$$K = \Delta y / \Delta x \quad (1-8)$$

即传感器校准曲线的斜率就是其灵敏度。

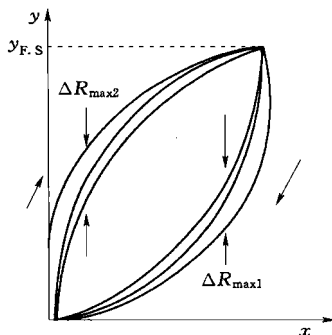


图 1.10 重复特性



灵敏度是输出—输入特性曲线的斜率。如果传感器的输出和输入之间显线性关系,则灵敏度 K 是一个常数。否则,它将随输入量的变化而变化。

灵敏度的量纲是输出、输入量的量纲之比。例如,某位移传感器,在位移变化 1mm 时,输出电压变化为 200mV,则其灵敏度应表示为 200mV/mm。当传感器的输出、输入量的量纲相同时,灵敏度可理解为放大倍数。

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,也可认为其灵敏度为一常数,与输入量的大小无关。非线性传感器的灵敏度不是常数,应以 dy/dx 表示。

由于某些原因,会引起灵敏度变化,产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差表示

$$e_s = (\Delta K / K) \times 100\% \quad (1-9)$$

提高灵敏度,可得到较高的测量精度。但灵敏度愈高,测量范围愈窄,稳定性也往往愈差。

5. 分辨力和阈值

分辨力是指传感器能感受到的被测量的最小变化的能力。也就是说,如果输入量从某一非零值缓慢地变化,当输入变化值未超过某一数值时,传感器的输出不会发生变化,即传感器对此输入量的变化是分辨不出来的。只有当输入量的变化超过分辨力时,其输出才会发生变化。

通常传感器在满量程范围内各点的分辨力并不相同,因此常用满量程中能使输出量产生阶跃变化的输入量中的最大变化值作为衡量分辨力的指标。上述指标若用满量程的百分比表示,则称为分辨率。

阈值是指当一个传感器的输入从零开始极缓慢地增加,只有在达到了某一最小值后,才测得出输出变化,这个最小值就称为传感器的阈值。事实上阈值是传感器在零点附近的分辨力。

分辨力说明了传感器的最小的可测出的输入变量,而阈值则说明了传感器的最小可测出的输入量。

阈值大的传感器其迟滞误差一定大,而分辨力未必差。

6. 稳定性和温度稳定性

稳定性是指传感器在长时间工作的情况下输出量发生的变化,有时称为长时间工作稳定性或零点漂移。

测试时先将传感器输出调至零点或某一特定点,相隔 4h、8h 或一定的工作次数后,再读出输出值,前后两次输出值之差即为稳定性误差。

温度稳定性也称为温度漂移,是指传感器在外界温度变化下输出量发生的变化。

测试时先将传感器置于一定的温度下(如室温),将其输出调至零点或某一特定点,使温度上升或下降一定值(如 5℃ 或 10℃)再读出输出值,前后两次输出值之差即为温度稳定性误差。

7. 漂移

漂移指在一定时间间隔内,传感器输出量存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移(时漂)和温度漂移(温漂)。时漂是指



规定条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温漂为周围温度变化引起的零点或灵敏度漂移。

传感器在使用过程中均会有漂移现象,此现象是不可能绝对避免的。漂移产生的根本原因在于所有的压力传感器均基于一种材料的弹性形变,不论其材质弹性如何良好,每次弹性回复后,总会产生一定弹性疲劳。在传感器使用过程中,由于弹性材料引起的漂移根据材质不同各不相同,但是只要是合格的产品,都在很小的范围。

8. 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,是评价传感器静态性能的综合性指标。

求取方法:

(1) 将全部校准数据相对拟合直线的残差看成随机分布,求出标准偏差 σ ,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (\Delta y_i)^2}{p-1}} \quad (1-10)$$

式中: Δy_i 为各测试点的残差; p 为所有测试循环中总的测试点数,例如正反行程共有 m 个测试点,每个测试点重复测量 n 次,则 $p=mn$ 。

然后取 2σ 或 3σ 值即为传感器的静态误差,也可用相对误差来表示,即

$$e_s = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F.S}} \times 100\% \quad (1-11)$$

(2) 静态误差是一项综合性指标,它基本上包括了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差、灵敏度误差等,所以也可以把这几个单项误差综合而得,即

$$e_s = \pm \sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_R^2 + e_S^2} \quad (1-12)$$

1.3.3.3.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。即指传感器在输入变化时,它的输出的特性。

在实际工作中,传感器的动态特性常用它对某些标准输入信号的响应来表示。这是因为传感器对标准输入信号的响应容易用实验方法求得,并且它对标准输入信号的响应与它对任意输入信号的响应之间存在一定的关系,往往知道了前者就能推定后者。最常用的标准输入信号有阶跃信号和正弦信号两种,所以传感器的动态特性也常用阶跃响应和频率响应来表示。

设计传感器时要根据其动态性能要求与使用条件选择合理的方案和确定合适的参数。同时对给定条件下的传感器动态误差作出估计。总之,动态特性是传感器性能的一个重要指标。在测量随时间变化的参数时,只考虑静态性能指标是不够的,还要注意其动态性能指标。如当传感器在测量动态压力、振动、上升温度时,都离不开动态指标。

总的来说,传感器的动态特性取决于传感器本身,另一方面也与被测量的变化形式有关。如图1.11所示为传感器的幅频特性曲线。当被测信号的频率小于 ω_1 时,该传感器能准确地反映被测信号;在 ω_2 附近时,传感器的输出信号远大于真实信号;在 ω_3 附近时,输出远小于真实信号,无法完成准确测量。可见若不考虑传感器的动态性能,其动态测量的输出误差就可能很大。因此使用传感器时,必须注意其动态性能指标是否符合测量



要求。

研究动态特性时,通常只能根据“规律性”的输入来考察传感器的响应。复杂周期输入信号可以分解为各种谐波,所以可用正弦周期输入信号来代替。其他瞬变输入不及阶跃输入来得严峻,可用阶跃输入代表。

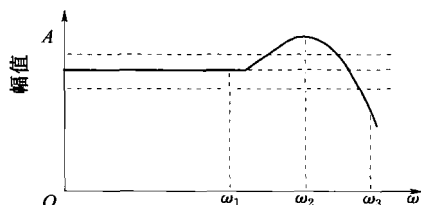


图 1.11 传感器的幅频特性曲线

1. 数学模型和传递函数

一般情况下,传感器输出 y 与被测量 x 之间的关系可写成

$$f_1\left(\frac{d^n y}{dx^n}, \dots, \frac{dy}{dx}, y\right) = f_2\left(\frac{d^m x}{dt^m}, \dots, \frac{dx}{dt}, x\right) \quad (1-13)$$

不过,大部分传感器在其工作点附近一定范围内,其动态数学模型可用线性微分方程表示,即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-14)$$

设 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的初始条件为零,对上式两边逐项进行拉氏变换,可得

$$a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \dots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \dots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \quad (1-15)$$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-16)$$

传递函数是拉氏变换算子 S 的有理分式,所有系数 a_0 、 a_1 、 $\dots$ 、 a_n , b_0 、 b_1 、 $\dots$ 、 b_m 都是实数,这是由传感器的结构参数决定的。分子的阶次 m 不能大于分母的阶次 n ,这是由物理条件决定的。分母的阶次用来代表传感器的特征。

$n=0$ 时,称为零阶传感器; $n=1$ 时,称一阶传感器; $n=2$ 时,为二阶传感器; n 更大时,为高阶传感器。

稳定的传感器系统所有极点都位于复平面的左半平面,零点极点可能是实数,也可能是共轭复数。

2. 正弦输入时的频率特性

将 $S=j\omega$ 代入传递函数得

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 j\omega + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 j\omega + a_0} \quad (1-17)$$

$W(j\omega)$ 为一复数,它可用代数形式及指数形式表示,即

$$W(j\omega) = k_1 + jk_2 = k(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-18)$$

幅值 $k(\omega) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$, 相角 $\tan\varphi = k_2/k_1$ 。

k 值表示输出量幅值与输入量幅值之比,是 ω 的函数,称为幅频特性。 φ 值表示输出量的相位较输入量超前的角度,也是 ω 的函数,称为相频特性。 φ 通常是负值,即输出一般滞后于输入。

3. 阶跃输入时的阶跃响应

过渡函数就是输入为阶跃信号的响应。

传感器的输入由零突变到 A ,且保持为 A ,输出随时间的变化如图 1.12 所示。