

普通高等教育机电类规划教材

传 感 器

(第2版)

哈尔滨工业大学 强锡富 主编

机械工业出版社

部优教材

普通高等教育机电类规划教材

传 感 器

(第 2 版)

哈尔滨工业大学 强锡富 主编



机械工业出版社

本书是全国精密仪器专业《传感器》课程的统编教材,主要内容是用于几何量、机械量以及有关量检测的各类传感器的基本工作原理、结构和转换电路、特性分析、工程设计方法、应用举例以及分析研究和选用方面的基本知识。

本书具有内容比较全面、分类清晰、结合我国实际、例题丰富等特点,对国内外传感技术领域的新成果新进展有所反映,对特性分析、精度分析等方面亦有所加强。每章并附有一定数量的思考题和习题。

本书除可用作大学精密仪器专业、仪器仪表和计量测试技术类专业的教材外,亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器/强锡富主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2000.5

普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-03993-9

I. 传... I. 强... II. 传感器-高等教育-教材
N. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 08026 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:王 颖 责任校对:肖新民

封面设计:郭景云 责任印制:路 琳

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 2 版第 8 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·20.25 印张·499 千字

32 901—36 900 册

定价:25.50 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

ISBN 7-111-03993-9



9 787111 039938 >

前 言

本教材初版是根据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。

自那时以来,情况有了一些变化,为此我们对初版进行了修订。修订的原则是去掉了比较陈旧的内容,增加了新内容新章节,同时合理调整了全书的结构。每章还增加了必要的思考题和习题。

本教材主要叙述几何量、机械量以及其它有关量的检测中所使用的传感器,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精密仪器专业、仪器仪表和计量测试技术专业学生的教材,亦可供其它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、第一章、第三章、第五章第三节、第七章第八节、第十六章)、于汶(第二章、第七章第六节、第八章、第十四章)、唐文彦(第九章~第十二章)、天津大学金篆芷(第四章、第五章第一节和第二节、第七章第七节)、东南大学王其生(第六章、第七章第一节~第五节和第九节、第十三章、第十五章)。

成都科技大学张凝仍负责主审工作。1993年4月在杭州召开了本教材修订稿的审稿会,与会代表提出了宝贵意见。在此谨向上述单位和同志们表示衷心的感谢!

由于我们的业务水平有限,一定会有不当和错误之处,希望读者提出批评。

编 者

1993.5

目 录

前言	
绪论	1
第一章 传感器的一般特性	6
第一节 传感器的静特性	6
第二节 传感器的动特性	10
第三节 传感器的技术指标	24
思考题与习题	25
第二章 电阻式传感器	26
第一节 应变式传感器	26
第二节 压阻式传感器	42
第三节 电位器式传感器	47
思考题与习题	50
第三章 电感式传感器	52
第一节 自感式传感器	52
第二节 差动变压器式传感器	70
第三节 电涡流式传感器	79
第四节 压磁式传感器	88
第五节 感应同步器	91
思考题与习题	101
第四章 电容式传感器	102
第一节 工作原理和类型	102
第二节 电容式传感器的主要性能	104
第三节 电容式传感器的特点和设计要点	106
第四节 转换电路	110
第五节 电容式传感器的应用	114
第六节 容栅式传感器	117
思考题与习题	122
第五章 磁电式传感器	123
第一节 磁电感应式传感器	123
第二节 霍尔式传感器	133
第三节 磁栅式传感器	139
思考题与习题	145
第六章 压电式传感器	146
第一节 压电转换元件的工作原理	146
第二节 压电材料	150
第三节 压电元件常用结构形式	153
第四节 等效电路	155
第五节 测量电路	156
第六节 压电式传感器的应用举例	159
第七节 压电式传感器的误差	161
第八节 压电声表面波传感器	163
第九节 聚偏二氟乙烯PVDF及其应用	165
思考题与习题	171
第七章 光电式传感器	172
第一节 光电效应及光电器件	172
第二节 光电式传感器的测量电路	179
第三节 一般形式的光电传感器	182
第四节 光纤传感器	184
第五节 电荷耦合摄像器件	190
第六节 光栅式传感器	193
第七节 激光式传感器	216
第八节 码盘式传感器	225
第九节 红外传感器	229
思考题与习题	236
第八章 气电式传感器	238
第一节 气动测量原理	238
第二节 气动测头	239
第三节 压力式气电传感器	242
第四节 流量式气电传感器	245
思考题与习题	246
第九章 热电式传感器	247
第一节 热电偶传感器	247
第二节 热电阻传感器	250
第三节 热敏电阻传感器	252
思考题与习题	253
第十章 超声波及微波式传感器	254
第一节 超声波式传感器	254
第二节 微波式传感器	256
思考题与习题	258
第十一章 射线式传感器	259
思考题与习题	262

第十二章 半导体式传感器.....263	第一节 工作原理和特点291
第一节 气敏传感器263	第二节 力平衡式加速度传感器292
第二节 湿敏传感器267	第三节 应用296
第三节 磁敏传感器270	思考题与习题296
第四节 色敏传感器272	第十五章 传感器的标定.....297
第五节 离子敏传感器274	第一节 传感器的静态标定297
思考题与习题276	第二节 传感器的动态标定302
第十三章 谐振式传感器.....277	思考题与习题309
第一节 振弦式传感器277	第十六章 传感器发展展望.....310
第二节 振筒、振膜和振梁式传感器283	第一节 改善传感器性能的技术途径310
第三节 压电式谐振传感器286	第二节 传感器的发展动向312
思考题与习题290	习题答案.....318
第十四章 力平衡式传感器.....291	参考文献.....318

绪 论

一、传感器的地位与作用

人们为了从外界获取信息，必须借助于感觉器官，而单靠人们自身的感觉器官，在研究自然现象和规律以及生产活动中它们的功能就远远不够了。为适应这种情况，传感器就应运而生了。因此可以说，传感器是人类五官的延长，又称之为电五官。

新技术革命的到来，世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中，首先要解决的就是要获取准确可靠的信息，而传感器是获取自然领域中信息的主要途径与手段。

以现代飞行器为例，它装备着各种各样的显示和控制系统，以保证各种飞行任务的完成。反映飞行器飞行参数和姿态，发动机工作状态的各种物理参数，都要利用传感器予以检测，一方面显示出来提供给驾驶人员去控制与操纵，另一方面传输给各种自动控制系统，进行飞行器的自动驾驶和自动调节。例如“阿波罗10”的运载火箭部分，检测加速度、声学、温度、压力、振动、流量、应变等等参数的传感器共有2077个，宇宙飞船部分共有各种传感器1218个。它们的数量很大，要求也很高。在飞行器研制过程中，也要用各种传感器对样机进行大量的地面测试和空中测试，才能确定是否符合各项技术性能指标。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在最佳状态或正常状态，并使产品达到最好的质量。因此可以说，没有众多的优良的传感器，现代化生产也就失去了基础。

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 10^{-13}cm 的粒子世界，纵向上要观察长达数十万年的天体演化，短到 10^{-24}s 的瞬间反应。以外，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的研究，如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等等。显然，要获取大量人类感官无法获取的信息，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。

现代计算机的生产和发展，给人类文明带来了巨大的影响。特别是大规模和超大规模集成电路出现之后，计算机的核心部件有了惊人的发展，同时也要求外部设备与之相配合。计算机输入的外部硬件主要就是传感器。传感器的发展将使计算机的功能得到充分的利用，同时也将促进计算机的进一步发展，传感器的不足会极大地限制计算机功能的发挥，就如同一个人具有发达的大脑而欠灵的五官一样。有人说，计算机与传感器的协调发展，才能决定技术的将来。这句话是有一定道理的。

目前，传感器早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、健康管理、生物工程、甚至文物保护等等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说，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。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用,是十分明显的。世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平。

二、传感器的定义

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。

这一定义包含了以下几方面的意思: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它的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等等,这种量可以是气、光、电量,但主要是电量;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,如发讯器、传送器等,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。

另外,还有一些行业称之为换能器。后面将要提到,传感器可分为能量控制型和能量转换型两大类。能量转换型传感器在进行不同物理量的信息转换时,总是要伴随着能量转换过程。从这一点看,称为换能器还是可行的。不过,传感器的内涵,从广义考虑是进行信息转换而不是能量转换。况且,能量控制型传感器,并不明显地存在以能量转换为主的过程。因此,作为一个广泛适用的名称而言,还是通称传感器为宜。

三、传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路三部分组成,组成框图见图0-1。

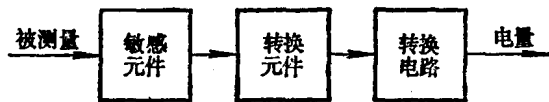


图0-1 传感器组成框图

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数量。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。

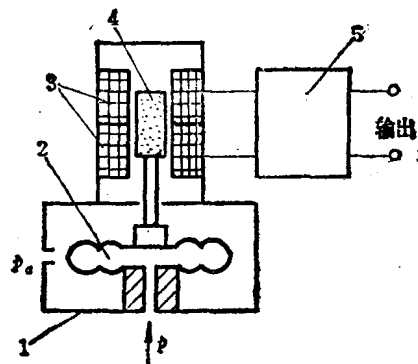


图0-2 气体压力传感器

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,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，两种不同材料 A 和 B ，一端联接在一起，放在被测温度 T 中，另一端与电位差计相接，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，没有转换电路，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。

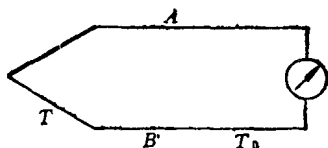


图0-3 热电偶

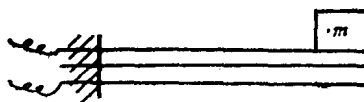


图0-4 压电式加速度传感器

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它原因，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之后才能输出电量信号，从而决定了转换电路是传感器的组成环节之一。这里顺便说明一下，一般情况下，转换电路后面的后续电路，如信号放大、处理、显示等电路就不再包括在传感器范围之内了。

四、传感器的分类

传感器行业是知识密集、技术密集的行业，它与许多学科有关，它的种类十分繁多。为了很好地掌握它、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。

首先，按照传感器的工作机理，可分为物理型、化学型、生物型等。

其次，按构成原理，可分为结构型与物性型两大类。

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。

结构型传感器是利用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，无论是使用坡莫合金或铁淦氧做铁心，还是使用铜线或其它导线做绕组，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, 可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

能量控制型传感器, 在信息变换过程中, 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, 可分为

① 电参量式传感器, 包括电阻式、电感式、电容式等三个基本型式, 以及由此而派生出来的电触式、差动变压器式、涡流式、压磁式、感应同步器式、容栅式等。

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 其它原理的传感器等。

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。有些传感器不属于前列 9 类, 则可列入第 10 类, 如振弦式和振筒式传感器、力平衡式传感器等。

第五, 可以按照传感器的使用来分类, 例如位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等等。表 0-1 列举了各种被测参数的分类。

表 0-1 被测参数的分类

长	度	长度、角度、位移、厚度、几何位置、几何形状、表面波度和表面粗糙度
力	学	力、力矩、振动、转速、加速度、质量、流量、硬度、真空度
温	度	温度、热量、比容、热分布
湿	度	湿度、水分
频	率	频率、时间
电	量	电流、电压、电阻、电容、电感、电磁波
磁	性	磁通、磁场
光	学	照度、光度、颜色、图象、透明度
声	学	声压、噪声
射	线	射线剂量、剂量率
化	学	浓度、成分、pH值、浊度
生	理	心音、血压、脉搏、血氧饱和度、体温、心电图、脑电

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。

五、对传感器的一般要求

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, 这就是: ①可靠性; ②静态精度; ③动态性能; ④抗干扰能力; ⑤通用性; ⑥小的轮廓尺寸; ⑦低成本; ⑧低能耗等。

可靠性、静态精度与动态性能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目的的, 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, 后果将不堪设想。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。其它几项要求不言自明, 不再赘述。

六、本课程的特点和任务

《传感器》课程主要讲授把各种几何量、机械量以及其它有关量转换成电量的各种传感器(包括转换电路)。

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, 掌握几何量、机械量及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; ②使学生能合理地选择和使用传感器; ③使学生掌握常用传感器的工程设计方法和实验研究方法; ④了解传感器的发展动向等。

学习《传感器》课程, 涉及到机、电、光等多方面知识, 学习之前应有所准备。学习中要把握全书重点和各章重点, 看懂基本概念, 理论联系实际。

实验仪器介绍

实验是传感器课程不可缺少的重要组成部分。由于本课程在国内精密仪器专业新开设不久, 许多学校还未配备合适的实验仪器。为此我们介绍杭州新亚仪表器材厂生产的“ZCY-I型综合传感器实验仪”, 以满足实验需要。

该仪器设置了箔式应变片、半导体应变片、电涡流式、霍尔式、差动线圈螺管式、电容式、磁电式、压电式、热电偶式等传感器。相应的变换处理单元, 如移相器、相敏检波器、电容变换器、涡流变换器、低通滤波器等。以及激励信号源, 振动台、三位半数字表(可测量电压和频率)等。组合后可做各种静、动态实验几十个, 以使学生了解和掌握各种传感器的特性、工作原理、标定方法。

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各个值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成唯一的对应关系,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唯一性也不能实现。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静特性的主要技术指标。

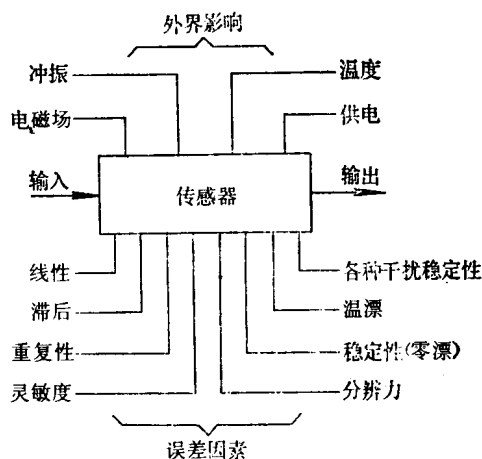


图1-1 传感器的输出输入作用图

一、线性度

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

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中 y —— 输出量;

x —— 输入量;

a_0 —— 零点输出;

a_1 —— 理论灵敏度;

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。

静特性曲线可用实际测试获得。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,其中也包括计算机硬件或软件补偿,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,输出输入的校正曲线与其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 γ_L 来表示,即

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

式中 $\Delta_{L\max}$ ——非线性最大偏差;

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最小二乘拟合等。前四种方法如图1-2所示。图中实线为实际输出的校正曲线,虚线为拟合直线。

在图a中,拟合直线为传感器的理论特性,与实际测试值无关。这种方法十分简便,但一般来说 $\Delta_{L\max}$ 很大。

图b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c中,把校正曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便,但 $\Delta_{L\max}$ 较大。图d在图c基础上使直线平移,移动距离为原先 $\Delta_{L\max}$ 的一半,这样校正曲线分布于拟合直线的两侧, $\Delta_{L2} = |\Delta_{L1}| = |\Delta_{L3}| = \Delta_{L\max}$,与图c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

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

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

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

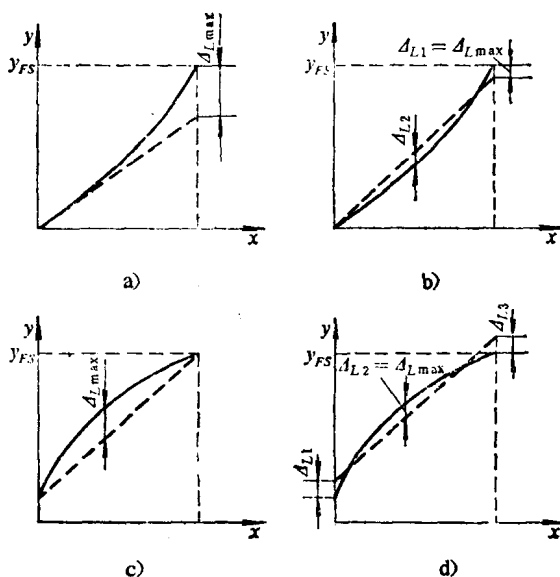


图1-2 各种直线拟合方法

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

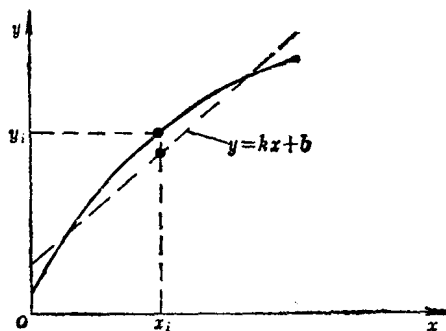


图1-3 最小二乘拟合方法

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 的一阶偏导数等于零, 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, 大多数传感器的校正曲线是通过零点的, 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, 也应将量程下限作为零点来处理。

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。对应于每一点的输入信号, 传感器正反行程趋近, 输出信号出现差值。差值中最大者即为回程误差。

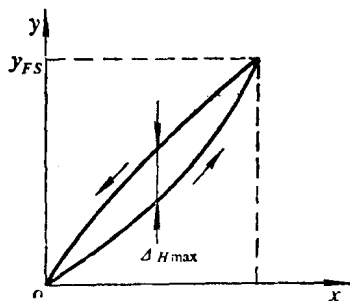


图1-4 迟滞特性

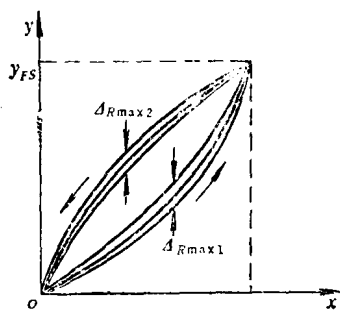


图1-5 重复特性

三、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特性曲线不一致的程度。

图1-5所示为校正曲线的重复特性, 正行程的最大重复性偏差为 Δ_{Rmax1} , 反行程的最大重复性偏差为 Δ_{Rmax2} 。重复性偏差取这两个最大偏差中之较大者为 Δ_{Rmax} , 再以满量程输出

y_{FS} 的百分数表示, 即

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

重复性误差也常用绝对误差表示。检测时也可选取几个测试点, 对应每一点多次从同一方向趋近, 获得输出值系列 $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, \dots, y_{in}$, 算出最大值与最小值之差或 3σ 作为重复性偏差 Δ_{Ri} , 在几个 Δ_{Ri} 中取出最大值 Δ_{Rmax} 作为重复性误差。

四、灵敏度与灵敏度误差

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

$$k = \Delta y / \Delta x \quad (1-12)$$

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, 其特性曲线的斜率处处相同, 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。

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

$$\gamma_s = (\Delta k / k) \times 100\% \quad (1-13)$$

五、分辨力与阈值

分辨力是指传感器能检测到的最小的输入增量。有些传感器, 如电位器式传感器, 当输入量连续变化时, 输出量只作阶梯变化, 则分辨力就是输出量的每个“阶梯”所代表的输入量的大小。分辨力可用绝对值表示, 也可用与满量程的百分数表示。

在传感器输入零点附近的分辨力称为阈值。

六、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 4 h、8 h 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。稳定性误差可用相对误差表示, 也可用绝对误差表示。

七、温度稳定性

温度稳定性又称为温度漂移, 它是指传感器在外界温度变化下输出量发出的变化。测试时先将传感器置于一定温度 (例如 20°C) 下, 将其输出调至零点或某一特定点, 使温度上升或下降一定的度数 (例如 5°C 或 10°C), 再读出输出值, 前后两次输出值之差即为温度稳定性误差。温度稳定性误差用每若干 $^\circ\text{C}$ 的绝对误差或相对误差表示。每 $^\circ\text{C}$ 的误差又称为温度误差系数。

八、各种抗干扰稳定性

这是指传感器对外界干扰的抵抗能力, 例如抗冲击和振动的能力、抗潮湿的能力、抗电磁场干扰的能力等。评价这些能力比较复杂, 一般也不易给出数量概念, 需要具体问题具体分析。

九、静态误差

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2} \quad (1-14)$$

式中 Δy_i ——各测试点的残差；

n ——测试点数。

取 2σ 和 3σ 值即为传感器的静态误差。静态误差也可用相对误差来表示，即

$$\gamma = \pm (3\sigma/y_{FS}) \times 100\% \quad (1-15)$$

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

$$\gamma = \pm \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \gamma_S^2} \quad (1-16)$$

第二节 传感器的动特性

动特性是指传感器对随时间变化的输入量的响应特性。

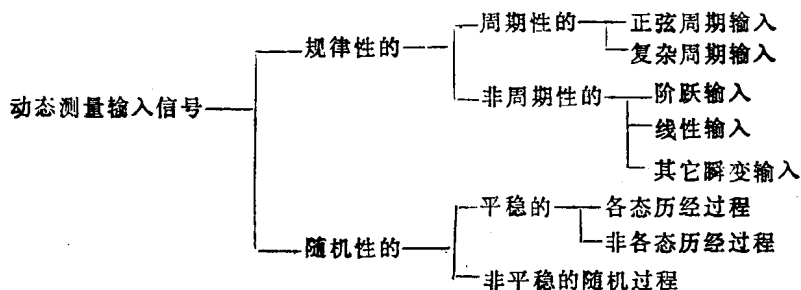
很多传感器要在动态条件下检测，被测量可能以各种形式随时间变化。只要输入量是时间的函数，则其输出量也将是时间的函数，其间的关系要用动特性来说明。设计传感器时要根据其动态性能要求与使用条件选择合理的方案和确定合适的参数；使用传感器时要根据其动特性与使用条件确定合适的使用方法，同时对给定条件下的传感器动态误差作出估计。总之，动特性是传感器性能的一个重要方面，对它进行充分了解是十分必要的。

总的说来，传感器动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。

传感器一般由若干环节组成。这些环节，可能是模拟环节，也可能是数字环节。模拟环节又可分为接触式环节和非接触式环节。前者是指以刚性接触的形式来传递信息的，后者则不是。由于它们的动特性及其研究方法不同，有必要把接触式环节从模拟环节中分离出来，单独列为一类。这样，把传感器的组成环节分为下列三类：①接触式环节；②模拟环节；③数字环节。

以某一类环节组成的传感器，其动特性就取决于这类环节的动特性。有些传感器兼有几种环节，这时就要分别研究这些环节的动特性，其中最薄弱者就决定了整个传感器的动特性。

动特性还与被测量的变化形式有关。动态测量输入信号可分类如下：



在研究动特性时，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。其它瞬变输入不及阶跃输入

来得严峻,可用阶跃输入代表。因此,“标准”输入只有三种:正弦周期输入、阶跃输入和线性输入,而经常使用的是前两种。

一、接触式传感器的动特性

接触式传感器是指进行接触测量的传感器,一般用于几何量测量中。接触式传感器除含有接触式环节外可能还含有其它环节,不过这里只讨论接触式环节的动特性。

当用接触式传感器对旋转着的工件进行测量时,如果工件安装偏心,或者具有椭圆等情况,则相当于有周期信号输入。当把被测工件突然送到传感器测杆之下进行测量时,则相当于阶跃输入。为使传感器能正确地反映被测工件实际尺寸情况,要求测杆与工件、传感器内的接触传动副不应发生脱离现象。正是从这一要求出发,导出接触式传感器的动特性。

(一) 临界频率

1. 无杠杆传动的接触式传感器的临界频率

图 1-6 是在磨加工中使用无杠杆传动的电接触式传感器进行主动检测的示意图。测杆 3 悬在两个平行片簧 1 上,螺旋弹簧 2 将测杆拉向下方,使之与被测工件 4 接触。工作过程如下:开始时进行粗磨;当工件直径减小到使上触点副 S_2 脱开时,发出粗磨转精磨的信号,进行精磨;当下触点副 S_1 闭合时,停止加工(或转光磨)。

这里列举的是电触式传感器,若用电感式传感器或其它原理的接触测量传感器,情况也一样。这里列举的是主动检测,但下面讨论的情况也适用于验收检测。

被测工件旋转时,一般情况下,测杆将随之上下移动。问题是,当工件转速增大时,测杆会不会与工件保持良好的接触而进行正确的测量?

为研究这个问题,就要列出其运动方程。设测杆位移为 y ,这时作用在测杆上的力有:测力弹簧作用力 F_1 、支撑片簧作用力 F_2 、测杆所受重力 mg 、惯性力 $m\ddot{y}$ 、工件反作用力 $F(t)$ 。根据达伦培尔原理,外力与惯性力平衡,即可得到下式:

$$m\ddot{y} + F_1 + F_2 + mg = F(t) \quad (1-17)$$

取 $F_1 = c_1(y + a_1)$ 、 $F_2 = c_2(y + a_2)$, 设 $c = c_1 + c_2$ 、 $F_0 = mg + c_1 a_1 + c_2 a_2$, 则上式可写成

$$m\ddot{y} + cy + F_0 = F(t) \quad (1-18)$$

式中 c_1 、 a_1 ——螺旋弹簧的刚度与预紧长度;

c_2 、 a_2 ——片簧的刚度与预紧长度;

c ——弹簧总刚度;

F_0 —— $y = 0$ 时的初始测力。

十分明显,若要测杆不脱离工件,必须满足 $F(t) \geq 0$ 。设被测工件偏心为 e , 其旋转角频率为 ω , 这时测杆的运动规律为 $y = e \sin \omega t$ 。将此代入式(1-18)可得

$$F(t) = -me\omega^2 \sin \omega t + ce \sin \omega t + F_0 \geq 0$$

即

$$F_0 \geq (me\omega^2 - ce) \sin \omega t \quad (1-19)$$

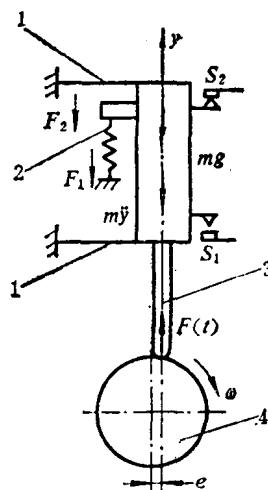


图1-6 无杠杆传动的电接触式传感器检测圆工件示意图