

高等学校试用教材

传感器及其应用

长沙铁道学院 陈德池 主编

中国铁道出版社

PDF
PDG

TP212

40

高等学校试用教材

传 感 器 及 其 应 用

长沙铁道学院 陈德池 主编

兰州铁道学院 班冀超 主审



中 国 铁 道 出 版 社

1993年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要讲述在铁路上应用广泛而又有前途的几类传感器。对各类传感器的工作原理、技术性能、基本结构、外特性及其在实际中的应用作了较详细的阐述。

全书共分七章,内容包括传感器的一般理论及传感器的技术展望;电阻、电感、电容传感器;半导体传感器,如光敏、磁敏、热敏、气敏、力敏传感器;其它传感器,如压磁、压电、磁电、超声波、光纤等传感器;最后一章为传感器技术中的抗干扰问题。

JS461/30
08

高等学校试用教材

传感器及其应用

长沙铁道学院 陈德池 主编

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 倪嘉寒 封面设计 陈东山

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:13.25 字数:328 千

1993 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—5000 册

ISBN7-113-01551-4/TD·1 定价:6.55 元

前 言

本书根据铁道部高等学校计算机、自动控制、工业电气自动化专业教学指导委员会第四次会议纪要精神而撰写,定名为“传感器及其应用”。

传感器(Sensor)来自“感觉”一词,是各种机械和电子设备的感觉器官——“机电五官”,它能感觉到诸如光、色、温度、压力、声音、湿度、气味、辐射等。它在某些检测、感知能力和耐恶劣环境能力等方面将大大超过人类五官。现在已有不少传感器应用于人类无法经受的高温、剧毒和放射性等恶劣环境;有些传感器已能检测到人类五官所不能感知的信息,如微弱的磁、电、离子和射线等。

传感器是新技术革命和信息社会的重要技术基础,是现代化科学技术的开路先锋。没有精确可靠的传感器,就没有精确的自动计量和控制系统,即使有运算速度快、存贮容量大的高级计算机,也将不能充分发挥其应有的效能;传感器是世界上高技术包含的主要内容,它能为生物工程、新材料、新能源、空间和海洋科学等的开发和研究提供强有力手段。

传感器在铁道部门的工程、运输、通信信号、机车检测系统,在高速铁路、重载列车、列车的安全运营等诸学科的研究中需求量越来越大,应用越来越普遍,例如铁路上使用的多功能微机计轴系统就利用了硅力敏和电阻应变片传感器;红外线热轴探测器,就利用了光敏传感器;内燃机务段贮油罐自动记录与报警系统就利用了半导体温度传感器;……。总之,铁路现代化与自动化离不开传感器。根据铁道部门的需要,编写一本结合铁路实际应用的传感器教材就显得格外迫切。这就是本书编写的出发点。

本书为铁路工程技术类各专业本科教材,适用于 68 学时的教学。

本书第二、第四、第六章由黄应川撰写,一、三、五、七各章及全书定稿由陈德池完成。本书由兰州铁道学院班冀超教授主审,北方交通大学范希鲁、国防科技大学胡惠道、西南交通大学魏余芳、长沙铁道学院王也平参加了审稿会,对初稿进行了细致的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此,一并致以衷心地感谢。

在编写本书时,注意收集了有关专家的科研成果和有关著作,力求将本书的内容写得系统、完整,重点突出,适用面广。但是,笔者自知难以如愿,不妥之处敬请读者及专家指正。

作者谨识

1992年6月

目 录

第一章 概 述

第一节 传感器的地位与作用	1
第二节 传感器的定义、构成与分类	2
第三节 传感器的特性与指标	4
第四节 传感器在新技术领域中的应用与传感器技术展望	19

第二章 电阻传感器

第一节 电位器传感器	27
第二节 电阻应变传感器	30
第三节 热电阻传感器	51

第三章 电感传感器

第一节 自感传感器	55
第二节 互感传感器	63
第三节 电涡流传感器	70

第四章 电容传感器

第一节 电容传感器概述	80
第二节 电容传感器的测量电路	87
第三节 电容传感器特点及应用	91

第五章 半导体传感器

第一节 光敏传感器	95
第二节 磁敏传感器	107
第三节 热敏传感器	117
第四节 气敏传感器	124
第五节 力敏传感器	127

第六章 其它传感器

第一节 压磁传感器	135
第二节 压电传感器	141
第三节 磁电传感器	150
第四节 热电偶	155

第五节	谐振式频率传感器.....	160
第六节	超声波传感器.....	166
第七节	光纤传感器.....	169
第八节	新型传感器.....	174

第七章 传感技术中的抗干扰问题

第一节	概 述.....	182
第二节	电源回路抗干扰的措施.....	191
第三节	信息检测中的抗干扰措施.....	193
第四节	信息传输中的抗干扰措施.....	194
第五节	印刷电路板及电路的抗干扰措施.....	199

第一章 概 述

第一节 传感器的地位与作用

一、传感器的地位

人的体力劳动是外界刺激通过人体五官(视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉),接收来自外界的信息,并将这些信息传递给大脑,在大脑中将这些信息进行运算、处理,然后传给肌体如手足等执行某些动作。假如希望用机器代替人完成这一过程,则发现脑子可与当今的电子计算机相当,机体相当于机器的执行器,五种感觉器官就相当于一个新的名称“传感器”。执行器是人类四肢的外延,电子计算机是人类大脑或智力的外延,传感器是人类五官的外延。这三者结合,发挥了人类改造自然的积极作用。

如果要更进一层突出传感器的地位,可以说传感器是处于连接外界刺激和测控系统的接口位置,构成了系统信息输入的“窗口”,提供了系统赖以进行处理和决策所必须的原始信息,如果没有传感器对原始参数进行精确可靠的测量,就没有精确可靠的自动检测和控制系统。从另一个角度看,近代电子技术和电子计算机为信息处理提供了极其完善手段,如果没有各种各样类型传感器去准确地捕获并转换信息,即使现代化的电子计算机也将无法充分发挥其应有的作用。所以,也有将传感器说成是现代科学和技术的起点。

二、传感器的作用

随着新技术和自动化的发展,传感器的使用数量越来越大,一切现代化仪器、设备几乎都离不开传感器。

在各种航天器上,装备着多种检测和控制系统,传感器测量出航天器的飞行参数,姿态和发动机工作状态的各个物理量,输送给各种自动控制系统,并进行自动调节,使航天器按人们预先设计的轨道运行。

在工业生产中,尤其是自动化生产过程中,用各种传感器来监测和控制生产过程中的各个参数,如温度、压力、流量、pH值等,以便使设备工作在最佳状态,产品达到最好的质量。

在机器制造业中,以前只是测量一些静态下的性能参数,而现在要进行动态特性测量,如在切削状态下的动态稳定性、自激现象、加工精度等,因此要利用有关的传感器测量刀架、床身等有关部位的振动、机械阻抗等参数来检验其动态特性。在超精加工中,要求对零件尺寸精度进行“在线”检测与控制,只有具有“耳目”作用的传感器才能提供有关信息。

农业是国民经济的基础,为了解决 11 亿人口的吃饭穿衣问题,必须尽快加速发展农、林、渔业。发展农、林、渔业,必须掌握农田土地实际状态、作物分布,预防判断灾情;掌握森林资源;观察海洋环境;探测渔群;农、林、渔产品的储藏、流通;农、林、渔业病虫害诊断等。所有这些工作都离不开传感器。

在科学和基础学科研究中,传感器同样具有独特的地位。现代科学技术的发展进入了许多

新的境地,以主要支柱物理学为例:宏观上可观察上千光年的茫茫宇宙,微观上可小到深入 10^{-13}cm 的粒子世界,长到数十亿年的天体演化,短到 10^{-24}s 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的研究,如:超高温($50000\sim 100000000^\circ\text{C}$,有助于物质第四态——等离子体研究)、超低温(接近绝对零度 0.01K ,对核物理发展起着重要作用,著名的宇称守恒理论即在超低温条件下得到证实)、超高压($3\times 10^9\text{Pa}$ 以上,有利于掌握地壳、地幔结构及核聚变规律)、超高真空(10^{-15}Pa ,记录到迄今能量最高的粒子)、超强磁场(25T 以上)、超弱磁场(10^{-19}T ,与生命活动有关)及强放电、强辐射、强电子束等等。显然,要获取大量人类感官或单纯电子设备所无法直接加以检测的信息,没有相适应的传感器技术,就无法解决科研问题,传感器的水平在相当程度上影响着科学技术的发展速度和深度。其次,许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度检测传感器的出现就会导致该领域的突破。换句话说,若干传感器的发展,是一些边缘研究开发的先驱。例如,约瑟夫逊效应(超导隧道效应)器件的出现,不仅解决了对于超弱磁场(10^{-13}T)的检测,同时还解决了对 10^{-13}W 、 10^{-17}V 、 10^{-23}J 等物理量的高精度检测,对于多种基础科学的研究和精密计量产生了巨大的影响,有人评价说:“如果没有传感器检测各种信息,那么支撑现代文明的科学技术,就不可能发展”,“没有传感器也就没有科学的说法,也丝毫不算言过其实”。

传感器对交通运输、生物工程、医学、民用机电产品、环境公害、军事遥感技术、机器人等领域的发展,都起着极其重要的作用。

第二节 传感器的定义、构成与分类

一、传感器的定义

什么叫“传感器”?至今国际、国内尚无统一规定。查阅了国内外资料后综合各种叙述和定义,暂且给出如下定义:“传感器是一个完整的测量装置(或系统),它能在规定的条件下感受外界信息,并按一定规律转换成与之有确定对应关系的电信号”。

这个定义包括了三层含义:

(1)传感器首先是一个测量装置,即是以测量为目的的。发电机为人类提供电能时,它不是传感器;但为了测定调速系统转速时,它就是传感器了,因此,我们特地给它取名为测速发电机,亦可叫发电机测速传感器;

(2)在规定条件下感受外界信息。外界信息一般是指非电量,它不仅限于物理量而且包含化学量(特别是生物的感觉信息);

(3)转换成与之有确定关系的电信号。传感器所测参量最终要转换成便于传输、处理、记录、显示的信息,目前的最佳信息就是电信号。

二、传感器的构成

传感器一般由敏感元件、传感元件和其它辅助件组成,有时也将信号调节与转换电路、辅助电源作为传感器的组成部分。如图1-1所示。

(1)敏感元件 泛指能直接感受、获取被测量并能输出与被测量有确定函数关系的非电量

元件。如应变式压力传感器的弹性载体就是敏感元件,它的作用是将压力转换成弹性载体的形变。

(2)传感元件 一般情况它不直接感受被测量,而是将敏感元件输出的非电量(亦可直接将非电量)

转换成电量输出的元件。如应变式压力传感器中的应变片就是传感元件,它的作用是将弹性载体的变形转换成电阻值的变化。

(3)信号调节与转换电路 把传感元件输出的电信号转换成便于显示、记录、处理和控制的有用电信号的电路。常用的电路有电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器、脉冲调宽电路以及与微型机相接的接口电路。

由于待测量是多种多样的,且传感器对信息的感受、获取和转换的方式又不尽相同,因此传感器的构成也就差别较大。

传感元件不论直接感受还是间接感受被测量,它都是传感器不可缺少的重要组成部分。当传感器中的传感元件直接感受被测量时这种传感器就是一次转换型传感器;当传感器中的传感元件不直接感受被测量而只起变换作用时这种传感器就是二次转换型传感器。

三、传感器的分类

传感器的种类很多,分类的方法各不相同,一般有如下几种分类法:按传感器的输入量分类;按传感器的工作原理分类;按能量传递方式分类;按输出信号的性质分类等等。对传感器进行分类的目的是为了便于研究、掌握和使用。

(一)按输入量分类

它是根据传感器的输入量的性质不同来进行分类的。例如,传感器的输入量分别为温度、湿度、流量、压力、位移、速度、加速度等,则相应称为温度传感器、湿度传感器、流量传感器、压力传感器、位移传感器、速度传感器、加速度传感器等。按这种方法分类看起来很繁多,但从本质上讲,输入量可分成基本量和派生量两大类,例如,长度、宽度、厚度、位置、磨损、应变及振幅等物理量,均可认为是从基本物理量位移中派生出来的。当需要测量上述各物理量时,只要采用测量位移的传感器就可以。又如,测量简谐振动时,加速度是速度的微分,振幅(即位移)是速度的积分,因此,测速用的传感器不仅可以直接测量出速度,而且,只要在测量电路中加入适当的微分或积分环节,就能测出加速度或振幅来。了解基本量和派生量的关系,将有助于发挥传感器的效能。表 1—1 列出了一些常用的基本量和派生量之间的关系。

这种分类方法对使用者比较方便,容易根据测量对象来选择所需用的传感器。

(二)按工作原理分类

这种分类方法的优点是能把传感器按工作原理分门别类地归纳起来,避免名目过多,且较为系统(见表 1—2),对于研究和设计新型的传感器比较有利。按工作原理传感器基本上可分为以电磁理论为基础的传感器和以半导体理论为基础的传感器。此外,还有以力学、声学、光学理论为基础的传感器。

在大多数情况下,总是把用途和原理结合起来称呼某一传感器。例如电感式位移传感器、电位器式压力传感器等。

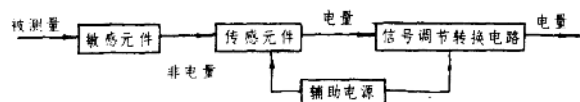


图 1—1 传感器组成框图

传感器输入基本物理量与派生量

表 1—1

基 本 物 理 量		派 生 物 理 量
位 移	线 位 移 角 位 移	长度、厚度、磨损、应变、振动等 旋转角、偏转角、角振动等
速 度	线 速 度 角 速 度	振动、动量、流量等 角动量、转速、角振动等
加 速 度	线 加 速 度 角 加 速 度	振动、冲击、质量、应力、力等 角振动、角冲击、力矩、转动惯量等
力	压 力	重量、密度、推力、力矩、应力等

传感器按工作原理分类法

表 1—2

工 作 原 理	传 感 器 举 例
电 阻 式	电阻应变片式、电位器式、半导体应变片式等
磁 阻 式	电感式、差动变压器式、涡流式等
热 电 式	热电偶、热电阻、热敏电阻等
谐 振 频 率 式	振动膜(筒、弦、梁)式等

(三)按能量传递方式分类

按能量传递方式分类的传感器

表 1—3

按这种方式分类,一般分为能量变换和能量控制两种。按能量变换原理构成的传感器也叫做有源传感器,这种传感器本身就是一个换能器,它能将非电功率转换成电功率,其所配合的测量电路通常为电压测量电路或放大器,这种传感器有电磁式、压电式、热电式等,这类传感器的能量传递一般是可逆的。另外一类是按能量控制原理构成的传感器,也叫着无源传感器,这种传感器本身不能起换能作用,被测量仅对传感器能量起控制作用或调制作用,所以它必须具有辅助电源(能源),这类传感器较典型的有电阻式、电感式和电容式等,无源传感器的测量电路常用测电参数的测量电路如电桥电路或谐振电路等。表 1—3 列出了按能量传递方式的分类。

能量变换原理 (有源传感器)	能量控制原理 (无源传感器)
电 动 式	电 阻 式
电 磁 式	电 容 式
静 电 式	电 感 式
热 电 式	热敏电阻式
压 电 式	光敏电阻式
光 电 式	磁敏电阻式

(四)按输出信号的性质分类

按这种方式可分为模拟式和数字式传感器两大类。模拟式传感器输出与非电量成一定关系的模拟信号,如果需要与计算机配合或用数字显示,还必须经过模/数转换电路。数字式传感器输出的是数字量,可直接与计算机联接或作数字显示,读取方便,抗干扰能力强。

第三节 传感器的特性与指标

一、传感器的特性

传感器的输出—输入关系特性是传感器的基本特性。

从误差角度去分析输入—输出特性是测量技术所要研究的主要内容之一。本课程不从这个角度去讨论。

从传感器所测信息的角度去分析输入—输出特性,是我们所要研究的主要内容。

传感器所检测的信息基本上有两种形式,一种是稳态(静态或准静态)的形式,这种信号不随时间变化(或变化很缓慢),另一种是动态(周期变化或瞬态)的形式,这种信号是随时间变化而变化的。由于输入信息状态不同,传感器所表现出来的输入—输出特性也不相同,因此存在所谓静态特性与动态特性。由于不同传感器有不同的内部参数,它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点,对测量结果的影响也各不相同。一个高精度传感器,必须有良好的静态特性和动态特性,这样才能完成信号(或能量)无失真的转换。

(一)传感器的静态特性

传感器在稳态信号作用下,其输出—输入关系称为静态特性。衡量传感器静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性。

1. 线性度

传感器理想的输出—输入特性应该是线性的,因为线性的输出—输入特性具有以下特点:

- (1)可大大简化传感器的理论分析和设计计算;
- (2)为标定和数据处理带来很大方便,只要知道线性输出—输入特性上的两点(一般为零点和满度值)就可以确定其余各点;
- (3)可使仪表刻度盘均匀刻度,因而制做、安装、调试容易,提高测量精度;
- (4)避免了非线性补偿环节。

实际上许多传感器的输出—输入特性是非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变效应,一般可用下列多项式表示输出—输入特性。

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

式中 Y ——输出量;
 X ——输入量;
 a_0 ——零位输出;
 a_1 ——传感器线性灵敏度;
 $a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——待定常数。

在研究线性特性时,可不考虑零位输出。多项式(1-1)可能有图 1-2 所示的三种特殊情况。

- ① 理想的线性特性。如图 1-2(a)所示的线性方程 $Y = a_1 X$ 的直线。在这种情况下,

$$a_0 = a_2 = a_3 = \cdots = a_n = 0$$

因而得到

$$Y = a_1 X$$

因为直线上任何点的斜率都相等,所以传感器的灵敏度为

$$s_s = a_1 = \frac{Y}{X} = \text{常数}$$

- ② 除 $a_1 X$ 外仅有偶次非线性项、如图 1-2(b)所示,其输出—输入特性方程为:

$$Y = a_1 X + a_2 X^2 + a_4 X^4 + \cdots \quad (1-2)$$

因为它没有对称性,所以其线性范围较窄。一般传感器设计很少采用这种特性。

- ③ 仅有奇次非线性项,如图 1-2(c)所示,其输出—输入特性方程式为:

$$Y = a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots \quad (1-3)$$

具有这种特性的传感器,一般在输入量 X 相当大的范围内具有较宽的准线性。这是比较接近于理想直线的非线性特性,它相对坐标原点对称的,即 $Y(X) = -Y(-X)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。

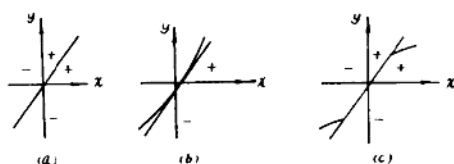


图 1-2 传感器的静态特性

传感器的输出—输入特性的线性度除受机械输入(弹性元件)特性影响外,也受电气元件

的输入特性的影响。使电气元件对称排列,差动工作方式可以消除电气元件中的偶次分量,显著地改善线性范围。例如差动传感器的一边输入为:

$$Y_1 = a_1 X + a_2 X^2 + \dots + a_n X^n$$

另一边反向输出为:

$$Y_2 = -a_1 X + a_2 X^2 - a_3 X^3 + \dots + (-)^n a_n X^n$$

总输出为二者之差:

$$Y = Y_1 - Y_2 = 2(a_1 X + a_3 X^3 + a_5 X^5 + \dots) \quad (1-4)$$

从式(1-4)可见,差动式传感器消除了偶次项,使线性得到改善,同时使灵敏度提高一倍。

在使用非线性特性的传感器时,如果非线性项的方次不高,在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线等直线来近似地代表实际曲线的一段。这种方法称为传感器非线性特性的“线性化”。所采用的直线称为拟合直线。表 1-4 列出了常用的几种拟合方法。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差

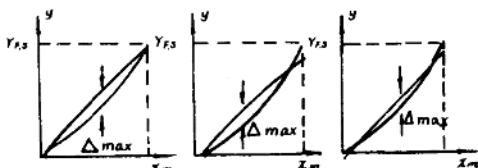


图 1-3 输出—输入特性的非线性

称为传感器的非线性误差,如图 1-3 中所示的 Δ 值,取其中最大值与输出满度值之比作为评价非线性误差(线性度)的指标,即

$$e_l = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S.}} \cdot 100\% \quad (1-5)$$

式中 e_l ——非线性误差(线性度);

$\Delta_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

$Y_{F.S.}$ ——满量程输出值。

传感器的输出—输入特性曲线(静态特性)是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量),环境温度为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,相

常用五种拟合方法

表 1-4

名 称	方 法	公 式	备 注
端点法	连接零点和满量程值的直线	$Y = mX$ $m = \frac{Y_{FS}}{X_n}$	使用简便,但较粗糙

续上表

名 称	方 法	公 式	备 注
平均斜率法	每校准级输出(包括正反行程)平均值除相应输入,然后对 K 个校准级斜率加以平均	$Y = mX$ $m = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{Y_i}{X_i}$	兼顾了各校准曲线对特性的影响,精确度比端点法高
平移端点法	将端点法所确定的曲线向上或向下平移,其数值为校准拟合直线的一半	$Y = b + mX$ $b = \pm \frac{1}{2} \Delta_{\max}$ $m = \frac{Y_{FS} - b}{X_m}$	校准曲线分布于拟合曲线两侧,精度也较高
平均选点法	将全部数据分成 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 两个点系中心的两组, (L, N) , 求出点系中心坐标,连成直线	$Y = b + mX$ $b = \bar{Y}_1 - m \bar{X}_1 = \bar{Y}_2 - m \bar{X}_2$ $m = \frac{\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1}{\bar{X}_2 - \bar{X}_1}$ $\bar{X}_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_i, \quad \bar{Y}_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Y_i$ $\bar{X}_2 = \frac{1}{N-L} \sum_{i=L+1}^N X_i, \quad \bar{Y}_2 = \frac{1}{N-L} \sum_{i=L+1}^N Y_i$	拟合精度较高,计算也比较简便
最小二乘法	使拟合直线方程有 N 个校准数据,数据中 i 个数据与拟合直线上相应值的残差为最小	$Y = b + mX$ $m = \frac{N \sum_{i=1}^N X_i Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - (\sum_{i=1}^N X_i)^2}$ $b = \frac{\sum_{i=1}^N X_i^2 \sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N X_i \cdot \sum_{i=1}^N X_i Y_i}{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - (\sum_{i=1}^N X_i)^2}$	拟合精度最高,但人工计算繁琐

对湿度为 <85%, 气压为 1013mPa 的情况。在这种标准工作状态下, 利用一定等级的校准设备, 对传感器进行往复循环测试, 得到的输出—输入数据一般用表列出或画成曲线, 然后再拟合成直线。

2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下输出变化对输入变化的比值, 用 S_s 来表示, 即

$$S_s = \frac{\text{输出量的变化}}{\text{输入量的变化}} = \frac{dY}{dX} \quad (1-6)$$

对于线性传感器, 它的灵敏度就是它的静态特性的斜率, 亦即 $S_s = Y/X$, 非线性传感器的灵敏度为一变量, 如图 1-4 所示。一般希望传感器的灵敏度高, 在满量程范围内是恒定的, 即传感器的输出—输入特性为直线。

3. 迟滞(迟环)

迟滞(或称迟环)特性表明传感器在正(输

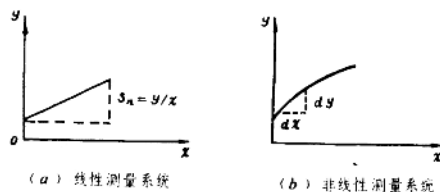


图 1-4 灵敏度定义

入量增大)反(输入量减小)行程期间输出—输入特性曲线不重合的程度,如图1—5所示。也就是说,对应于同一大小的输入信号,传感器正反行程的输出信号大小不相等,这就是迟滞现象。产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。

迟滞大小一般要由实验方法确定,用最大输出差值 $\Delta_{\max}$ 对满量程输出 $Y_{F.S}$ 的百分比表示

$$e_l = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S}} \cdot 100\% \quad (1-7)$$

或

$$e_l = \pm \frac{\Delta_{\max}}{2Y_{F.S}} \cdot 100\% \quad (1-8)$$

式中 $\Delta_{\max}$ ——正反行程输出值间的最大差值。

4. 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得特性曲线不一致性程度(见图1—6)。多次重复测试的曲线越重合,说明重复性好,误差也小。重复特性的好坏是与许多因素有关的,与产生迟滞现象具有相同的原因。

重复性指标一般采用输出最大不重复误差 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出 $Y_{F.S}$ 的百分比来表示:

$$e_z = \pm \frac{\Delta_{\max}}{Y_{F.S}} \cdot 100\% \quad (1-9)$$

重复性误差是属于随机误差性质的,按上述方法计算就不太合理了。校准数据的离散程度是与随机误差的精密度相关的,因此应该根据标准偏差来计算重复性指标。因此,重复性误差 e_z 可按下式计算:

$$e_z = \pm \frac{(2-3)\sigma}{Y_{F.S}} \cdot 100\% \quad (1-10)$$

式中 σ ——标准偏差。

误差服从正态分布,标准偏差 σ 可以根据贝塞尔公式来计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (1-11)$$

式中 Y_i ——测量值;

$\bar{Y}$ ——测量值的算术平均值;

n ——测量次数。

(二)传感器的动态特性

1. 动态参数测试的特殊问题

在测量静态信号时,线性传感器的输出——输入特性是一条直线,二者之间有一一对应的关系,而且因为被测信号不随时间变化,测量和记录不受时间限制。而在实际测试工作中,大量的被测信号是动态信号,传感器对动态信号的测量任务不仅需要精确地测量信号幅值的大小,而且需要测量和记录动态信号变化过程的波形,这就要求传感器能迅速准确地测出信号幅值

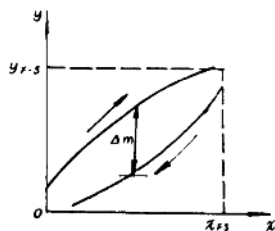


图1—5 迟滞特性示意图

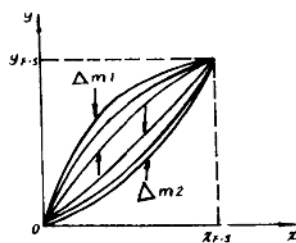


图1—6 重复性示意图

的大小和无失真的再现被测信号随时间变化的波形。

传感器的动态特性是指传感器对激励(输入)响应(输出)的特性,一个动态特性好的传感器,其输出随时间变化的规律(变化曲线),将能同时再现输入随时间变化的规律(变化曲线),即具有相同的时间函数。这就是动态测量中对传感器提出的新要求。但实际上除了具有理想的比例特性的环节外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。

研究传感器的动态特性主要是分析产生动态误差的原因以及改善措施。

2. 研究传感器动态特性的方法及其指标

研究动态特性可以从时域或频域两个方面采用瞬态响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的,在时域内研究传感器的响应特性时,只能研究几种特定的输入时间函数,如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等的响应特性。在频域内研究动态特性一般是采用正弦函数得到频率响应特性。动态特性好的传感器暂态响应时间应很短,或者频率响应范围应很宽。这两种分析方法内部存在必然的联系,在不同场合,根据实际需要解决的问题不同而选择不同的方法。

在对传感器进行动态特性的分析和动态标定时,为了便于比较和评价,常常采用正弦变化和阶跃变化的输入信号。

用阶跃输入研究传感器时域动态特性时,为表征传感器的动态特性,常用上升时间 t_r 、响应时间 t_d 、过调量 C 等参数来综合描述,如图 1—7 所示。上升时间 t_r 是指输出指示值从最终稳定值的 5% 或 10% 变到最终稳定值的 95% 或 90% 所需要的时间。响应时间 t_d 是指从输入量开始起作用到输出指示值进入稳定值所规定的范围内所需要的时间。最终稳定值的允许范围常取所允许的测量误差值 $\pm r$, 在写出响应时间应同时注明误差值的范围,例如 $t_d = 5s(\pm 2\%)$ 。过调量 C 是指输出第一次达到稳定值后又超出稳定值而出现的最大偏差,常用相对于最终稳定值的百分比来表示。

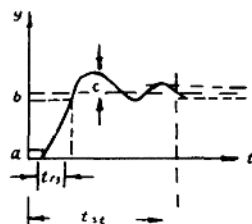


图 1—7 阶跃响应特性

用正弦输入研究传感器频域动态特性时,常使用幅频特性和相频特性。描述传感器的动态特性,其重要指标是频带宽度,简称带宽。带宽是指增益变化不超过某一规定分贝值的频率范围。

3. 传感器的数学模型

传感器实质上是一个信息(能量)转换和传递的通道,在静态测量情况下,其输出量(响应)与输入量(激励)的关系符合式(1—1),即输出量为输入量的函数。在动态测量情况下,如果输入量随时间变化时,输出量能立即随之无失真地变化的话,那么这样的传感器可以看作是理想的,但是实际的传感器总是存在着诸如弹性、惯性和阻尼等元件。此时,输出 Y 不仅与输入 X 有关,而且还与输入量的变化速度 $\frac{dX}{dt}$, 加速度 $\frac{d^2X}{dt^2}$ 等有关。

要精确地建立传感器的数学模型是很困难的。在工程上总是采用一些近似的方法,忽略一些影响不大的因素,给数学模型的确立和求解都带来很多方便。

通常认为可以用线性时不变系统理论来描述传感器的动态特性,从数学上可以用常系数线性微分方程式表示传感器输出量 Y 与输入量 X 的关系,这种方程式的通式如下:

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_m \frac{d^m X}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X}{dt^{m-1}} + \cdots + b_0 X$$

$$+\cdots+b_1\frac{dX}{dt}+b_0X \quad (1-12)$$

式中 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 和 $b_n, b_{n-1}, \dots, b_0$ 均为与系统结构参数有关的常数。

线性时不变系统有两个十分重要的性质,即叠加性和频率保持性。根据叠加性质,当一个系统有 n 个激励同时作用时,那么它的响应就等于这 n 个激励单独作用的响应之和,即

$$\sum_{i=1}^n X_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n Y_i(t)$$

也就是说,各个输入所引起的输出是互不影响的。这样,在分析常系数线性系统时,总可以将一个复杂的激励信号分解成若干个简单的激励,如利用傅里叶变换,将复杂信号分解成一系列谐波或分解成若干个小的脉冲激励,然后求出这些分量激励的响应之和。这也是为什么傅里叶变换和后面要提到的卷积成为分析常系数线性系统的主要工具。频率保持性表明,当线性系统的输入为某一频率信号时,则系统的稳态响应也为同一频率的信号。

理论上讲,由式(1-12)可以计算出传感器的输出和输入的关系,但是对于一个复杂的系统和复杂的输入信号,若仍然采用式(1-12)求解,肯定不是一件容易的事。因此,在信息论和工程控制中,通常采用一些足以反映系统动态特性的函数,将系统的输出和输入联系起来。这些函数有传递函数,频率响应函数和脉冲响应函数等等。

4. 传递函数

在工程上,为了计算方便,通常采用拉普拉斯变换(简称拉氏变换)来研究线性方程。

如果 $Y(t)$ 是时间变量 t 的函数,并且当 $t \leq 0$ 时, $Y(t) = 0$, 则它的拉氏变换 $Y(s)$ 的定义为

$$Y(s) = \int_0^{\infty} Y(t)e^{-st} dt \quad (1-13)$$

式中, s 是复变量, $s = \beta + j\omega$, $\beta > 0$ 。

对式(1-12)取拉氏变换,并认为输入 $X(t)$ 及它们的各阶时间导数的初始值($t=0$ 时)为零,则得

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) = X(s)(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_1 s + b_0)$$

$$\text{或} \quad \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-14)$$

式(1-14)等号右边是一个与输入 $X(t)$ 无关的表达式,而只与系统结构参数有关,因而等号右边是传感器特性的一种表达式,它联系输入与输出的关系,是一个描述传感器的传递信息特性的一个函数。定义在初始值均为零时(传感器被激励之前所有储能元件如质量块、弹性元件、电气元件均没有积存的能量,完全符合实际情况),输出 $Y(t)$ 的拉氏变换 $Y(s)$ 和输入 $X(t)$ 的拉氏变换 $X(s)$ 之比称为传递函数,并记为 $H(s)$ 。

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-15)$$

5. 频率响应函数

对于稳定的常系数线性系统,可用傅里叶变换代替拉氏变换,此时式(1-13)变为

$$Y(j\omega) = \int_0^{\infty} Y(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1-16)$$

这实际上是单边傅里叶变换。相应地有

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt$$

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1-17)$$

或

$$H(j\omega) = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0}$$

$H(j\omega)$ 称为传感器的频率响应函数,简称频率响应或频率特性。

不难看出,传感器的频率响应 $H(j\omega)$ 就是在初始条件为零条件下,输出的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比,它是“频域”对系统传递信息特性的描述。

通常,频率响应函数 $H(j\omega)$ 是一个复数函数,它可以用指数形式表示,即

$$H(j\omega) = Ae^{j\varphi} \quad (1-18)$$

式中

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1-19)$$

称为传感器幅频特性。

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (1-20)$$

称为传感器相频特性。

由两个频率响应分别为 $H_1(j\omega)$ 和 $H_2(j\omega)$ 的常系数线性系统串接而成的总系统,如果后一系统对前一系统没有影响,那么,描述整个系统的频率响应 $H(j\omega)$ 的幅频特性 $A(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$ 为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= H_1(j\omega) \cdot H_2(j\omega) \\ A(\omega) &= A_1(\omega) \cdot A_2(\omega) \\ \varphi(\omega) &= \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) \end{aligned} \quad (1-21)$$

常系数线性测量系统的频率函数,与时间、输入量无关。如果系统为非线性系统,则 $H(j\omega)$ 将与输入有关,若系统是非常系数时,则 $H(j\omega)$ 还与时间有关。

6. 冲击响应函数

由式(1-15)知,传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

若选择一种励激 $X(t)$,使 $L[X(t)] = X(s) = 1$,就很理想了。这时自然会引入单位冲激函数,即 δ 函数,根据单位冲激函数的定义和 δ 函数的抽样性质,可以求出单位冲激函数的拉氏变换。

$$\Delta(s) = L[\delta(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-st}dt = e^{-st}|_{t=0} = 1 \quad (1-22)$$

由于 $L[\delta(t)] = \Delta(s) = 1$,将其代入式(1-15)得

$$H(s) = \frac{Y(s)}{\Delta(s)} = Y(s) \quad (1-23)$$

将式(1-23)两边取拉氏反变换,且令 $L^{-1}[H(s)] = h(t)$,则有

$$h(t) = L^{-1}[\Delta(s)] = L^{-1}[Y(s)] = y\delta(t) \quad (1-24)$$

式(1-24)表明单位冲激函数的响应同样可以描述传感器的动态特性,它同传递函数是等价的。不同的是一个在复频域($\beta + j\omega$),一个在时间域。通常 $h(t)$ 称为冲激响应函数。

对于任意输入 $X(t)$ 所引起的响应 $Y(t)$,可以利用两个函数的卷积关系,即系统的响应 $Y(t)$ 等于冲激响应函数 $h(t)$ 同激励 $X(t)$ 的卷积,即

$$Y(t) = h(t) * X(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)d\tau = \int_0^t x(\tau)h(t-\tau)d\tau \quad (1-25)$$

(三)传感器动态特性分析