

高等学校试用教材

传感器原理及其设计基础

华中理工大学 徐恕宏 主编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

TP212
21

高等学校试用教材

传感器原理及其设计基础

华中理工大学 徐恕宏 主编



机械工业出版社

前 言

本书是根据原工业自动化仪表及装置专业教材编审小组1984年天津会议上所制订的教学大纲编写的，目的是为高等学校有关专业提供符合教学特点的教材或教学参考书。

近年来，全球性的传感器热潮正方兴未艾，大量的新型传感器相继涌现，有关传感器的文献和书刊令人目不暇接，这反映了人类对自然信息资源的需求日益增加。面对新的形势，加强传感器的技术教育，是时代的要求。

本书在内容的深度与广度、理论性与实践性的结合等方面，作了统筹安排，并适当地拓宽知识面。本书注意引导读者在总结共性的同时，重视传感器的特性，引导读者注重分析方法，不断总结前人的成果、探索理论、方法和特性方面的规律。

全书共分十章，以迄今为止应用最广泛、理论最成熟的典型传感器为基础，对于有广泛发展前景的、目前尚未成熟或趋于成熟的传感技术及元件也作了简要介绍。而某些实用性很强的传感器，如热电偶及金属热电阻等，则考虑放在自动检测技术中更为恰当，这并不影响本书的全面性和完整性。

本书由华中理工大学徐恕宏主编，哈尔滨工业大学陈守仁主审。参加编写的人有徐恕宏（第一、三、四、五、十章及第六章的1~4节）、黄日怀（第二、七、九及第六章的第5节）、黄南民（第八章）。在编写过程中，哈尔滨工业大学、天津大学、清华大学、浙江大学、重庆大学及其它许多兄弟院校曾对本书进行了讨论并提出宝贵意见，在此一并致谢。编写中也得到李昌喜、沈惠珍、李奇菲和蒋宗文等同志的大力支持。本书最后完稿，是校内外多位同志共同劳动的结果。

本书的内容，参照了国内、外大量著作、文献，附录所列书目，不尽完全，如有遗漏，敬请批评指正。作者水平有限，不妥之处，敬请指正。

作 者

1988.6于华中理工大学

目 录

第一章 总论	1	第三章 电容式传感器	40
§ 1-1 传感器的定义及其在自动化技术中的作用	1	§ 3-1 概述	40
§ 1-2 传感器的分类	2	一、基本原理	40
一、按传感器输入量 (用途) 分类	2	二、典型的电容式传感器结构形式及分类	41
二、按传感器的工作机理分类	2	三、激励源性质与传感器特性之间的关系	41
三、按信息能量变换方式分类	3	§ 3-2 电容式传感器的静特性分析	44
§ 1-3 静特性的描述	4	一、变极距型电容传感器	44
§ 1-4 传感器在动态下的工作特性	6	二、变面积型电容传感器	46
一、概述	6	三、变介电常数型电容传感器	46
二、频率特性及其与动态品质之间的关系	7	四、几点归纳和讨论	49
三、时域响应特性和动态品质指标	9	§ 3-3 具有膜片的电容传感器的静特性分析	49
§ 1-5 传感器性能与结构的关系	10	§ 3-4 测量线路原理与特性	51
一、直接变换型	11	一、桥路测量电路	51
二、差动型	12	二、二极管检波电路	52
三、平衡型	12	三、差动脉冲调宽线路	54
§ 1-6 用预处理方法提高传感器的使用性能	13	§ 3-5 电容式传感器结构设计综述	55
§ 1-7 利用微处理机技术提高传感器的使用性能	14	一、结构设计的任务	55
一、非线性特性的线性化	15	二、典型结构组成部分及其作用	56
二、数据处理与数据综合	15	三、传感器基本结构的设计要求	56
三、自动设定量程范围及标度变换	15	§ 3-6 电容式传感器在动态测量中的应用	59
四、自诊断功能	16	第四章 电感式传感器	62
五、趋势分析及预测	16	§ 4-1 基本原理	62
第二章 电阻式应变传感器	17	一、电感与基本电磁参量的关系	62
§ 2-1 金属电阻应变传感器	17	二、电感式传感器分类	63
一、应变效应	17	§ 4-2 具有小气隙的电感式传感器	63
二、应变片的结构	18	一、简单的变气隙电感传感器	63
三、应变片的参数	21	二、变隙型差动电感传感器	65
四、应变片的粘贴	23	三、变隙型差动变压器	65
五、测量线路	24	四、变截面型差动电感传感器和差动变压器	67
§ 2-2 扩散型压阻传感器	32	五、小气隙电感传感器与小气隙电容传感器的比较	67
一、半导体压阻效应	33	§ 4-3 一些实际因素对传感器特性的影响	68
二、扩散硅压阻器件的结构	34		
三、压阻器件的特性	35		
四、应用	36		

一、概述.....68	四、压电加速度计的系统响应106
二、磁路损耗对传感器性能的影响.....68	§ 5-5 压电式传感器的误差.....107
三、铁芯磁路中非线性因素的影响.....71	一、频率响应误差107
四、铁芯磁阻及边缘效应的影响.....71	二、温度影响107
五、电磁力及其与最小气隙的关系.....72	三、老化误差107
六、温度影响.....73	四、横向干扰107
七、电感式传感器在动态下的工作特性.....73	五、电缆及器件噪声108
§ 4-4 螺管式电感传感器75	第六章 数字式传感器109
一、概述.....75	§ 6-1 概述.....109
二、简单的螺管电感传感器.....77	一、直接编码式传感器109
三、差动螺管传感器.....78	二、计数(增量)式编码.....109
四、螺管式差动变压器.....79	三、频率式传感器109
§ 4-5 测量线路82	四、扫描式传感器110
一、交流电桥的调零(预平衡)问题.....82	§ 6-2 直接编码式传感器.....110
二、交流差动工作电桥的灵敏度分析.....83	§ 6-3 光栅传感器.....113
三、交流电桥中的相敏检波问题.....86	一、光栅莫尔条纹的形成113
§ 4-6 电涡流传感器87	二、简单的辨向和细分原理114
一、概述.....87	三、提高细分数的电路方法116
二、涡流的形成及等效电路.....87	§ 6-4 感应同步器.....118
三、激励线圈.....89	一、基本原理118
四、测量电路.....90	二、结构119
五、电涡流传感器的应用.....91	三、辨向与细分119
第五章 压电式传感器94	§ 6-5 谐振式频率传感器.....122
§ 5-1 压电现象94	一、振弦式传感器工作原理123
一、压电效应.....94	二、振弦式传感器的基本结构125
二、压电性能参数的一般描述.....94	三、振弦式变换元件特性分析125
三、对压电材料的要求.....95	四、振弦式传感器的设计127
§ 5-2 压电材料96	五、应用举例128
一、压电单晶.....96	第七章 光电式传感器131
二、压电陶瓷材料.....97	§ 7-1 光电式传感器中的敏感器件.....131
§ 5-3 压电式传感器的特性与特点98	一、光电效应及其器件131
一、压电式传感器的特点.....98	二、光敏器件基本特性135
二、压电元件在机电耦合条件下的等效参数.....98	三、光电式传感器的类型141
三、压电元件的等效电路100	四、光电式传感器的计算143
四、压电元件的串并联100	§ 7-2 红外探测器.....145
五、压电式传感器结构类型101	一、红外探测器的主要特性145
§ 5-4 压电式传感器系统的频率响应分析.....102	二、红外探测器类型146
一、概述102	第八章 固态传感器151
二、力学系统的频率响应103	§ 8-1 概述.....151
三、测量线路的频率响应104	§ 8-2 磁敏传感器.....152
	一、霍尔式传感器152
	二、磁阻式传感器158

三、磁敏二极管和三极管	160	四、光波长调制(颜色调制)光纤 传感器	189
§ 8-3 热敏传感器	162	五、光偏振调制光纤传感器	191
一、半导体热敏电阻传感器	162	第十章 传感器的设计基础	195
二、利用晶体管特性的热敏传感器	167	§ 10-1 设计过程与试验	195
三、石英振子热敏传感器	167	§ 10-2 对设计者技术素质的要求	196
§ 8-4 气敏和湿敏传感器	169	§ 10-3 传感器的工作条件与环境	197
一、氧化锆氧量传感器	169	§ 10-4 设计准则	198
二、半导体气敏电阻传感器	173	§ 10-5 电感传感器的初步设计	199
三、湿敏传感器	175	一、任务分析和原始数据的整理	200
第九章 光纤传感器	178	二、磁路结构的合理选择	201
§ 9-1 光纤传光原理及其特性	178	三、铁磁材料	202
一、传光原理	179	四、螺管式电感传感器的结构设计 和计算	202
二、光纤的特性	182	五、小气隙电感传感器的结构设计 和计算	204
§ 9-2 光纤传感器类型及其原理	185	参考书目	213
一、光通量调制光纤传感器	185		
二、光相位调制光纤传感器	187		
三、光频率调制光纤传感器	188		

第一章 总 论

§ 1-1 传感器的定义及其在自动化技术中的作用

传感器在现代自动化技术中的作用,可用图1-1来说明。图1-1 a表示一般信息测量系统的结构图,位于系统首部的传感器,直接感受被测对象的作用(被测量),并将其转换为某种有用信号,例如电压、电流、电脉冲或其它可以利用的信号(气动的或光学的等等)。系统后续部件的作用则是对传感器输出信号中所提供的原始信息进一步加工和处理(例如提取有效信息、滤波及线性化等等),以特定的方式将被测量的大小和变化进行显示和记录;或者将经过处理的信号通过控制器反过来控制被测对象,构成所谓闭环的控制系统(图1-1 b)。

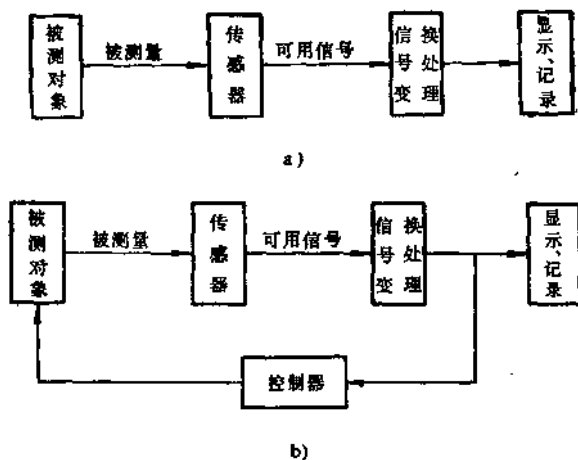


图1-1 传感器与系统之间的关系

a) 自动检测系统 b) 自动控制系统

由此可见,传感器是各类自动化系统的重要组成部分,其作用是从被测对象中获取原始信息,将其变为系统可以利用的信号。据此,可将传感器定义为:能感受(或响应)规定的被测量并按一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件以及相应的电子线路所组成。

上述定义,并不是传感器定义的各种提法中的最概括和最精炼的提法,但是它表述了传感器的主要内涵和主要特征。

1. 从传感器输入端来看,一个指定的传感器只能感受或响应规定的被测量,例如温度传感器只能用于测温,对温度应具有最大的灵敏度。这意味着传感器对规定的被测量应当有最大的选择性。因此,输入端的被测量是传感器的重要特征之一,成为传感器的分类和命名的重要依据。

2. 从输出端来看,传感器的输出定义为可用信号,这意味着信号中不但包含有原始信息,而且是后续部件最便于接收和进一步处理的信号形式(包括输出是标准的信号,例如变送器)。最常见的信号是电信号,例如电流、电压、电荷或电脉冲等等。但从广义的角度来看,也可以是其它类型的信号,例如气动系统中就采用气动信号。因此,传感器的输出信号的体系和形式,也可以作为分类和命名的特征。

3. 从输出与输入关系来看,定义中提出了规律性问题,这就是说传感器的输出与输入之间的关系(用解析的方法或用实验方法确定的数学模型),应具有可以复现的某种规律。但

是,对不同类型的传感器,其内在转换规律也不相同,例如电容式传感器基于电场的能量转换,而电感式传感器则基于磁场的能量转换等等。在讨论到某种具体传感器的原理和特性时,不可能不涉及到其内在规律性的分析。因此,机理的分析也自然成为分类和命名的重要依据。

此外,从能量的观点来看,传感器感受输入作用(被测量)并将其转换为输出信号的过程,也是含有信息的能量转换和传递的过程,因此输出信号与输入被测量之间的对应关系,也反映了能量变换的关系。通过能量变换方式,在两个系统之间(例如非电的被测系统和电的信息处理系统)传递信息,这也是传感器的一个重要特征。

4. 上面的定义,对传感器的结构也作了明确的说明,一般说来,传感器是由多个敏感元件及变换元件构成的物理实体、在结构上是不依附于系统而相对独立的专用技术装置。对于将非电量转换为电信号的传感器,测量电路及部分信号预处理电路也包括在传感器内。其中和被测对象相联系的敏感元件决定了被测量的性质,此后的各种变换则是用于形成可用的信号。

复杂的传感器本身可能就是一个系统,例如平衡式传感器、光栅、感应同步器等,其结构就非常复杂。有些传感器,例如热电偶、光敏电池等等,敏感元件本身(或包括简单的测量电路)就可以称作传感器。

上述传感器的定义,概括了相当部分的实用传感器,本书的讨论仅限于将非电量转换为电信号的几种常见的传感器。

§ 1-2 传感器的分类

属于广义定义范围内的传感器,可以按某种原则划分为若干组,使属于同组的传感器具有某种共同特征,而组与组之间则有明确地可区分的特征,故定义中的许多特征,都可以作为分类(分组)的依据。显然,按照本书的传感器定义,可以依据几种原则分类,即按输入端被测量分类、按输出信号特征分类、按工作机理或按信息能量的转换方式分类等等。此外还有许多其它分类方法,例如将传感器分为结构型和物性型等等,此时需要对分类依据(原则)作出确切的定义。

一、按传感器输入量(用途)分类

生产传感器的厂家往往按输入量为其产品命名,以便向用户提供最基本的使用信息。由于输入被测量是多种多样的,按输入方式分类就显得太繁,习惯上是将输入量分为若干组(大类),而在组中又分若干小类。在表 1-1 中列出了按输入量分类的若干类型。

表中所列的,只不过是常见参量的一些典型例子,实际上的分类要比表中类别多得多。如果考虑到同一类别中有时需加修饰用语(例如蒸汽流量、气固两相流等等),在同一类别中还可能再加划分。由此可见,从研究传感器方面来看,这种分类方法并不具有独特的优点。

二、按传感器的工作机理分类

传感器信息的获取和变换的功能,是建立在各种物理的、化学的以及生物的现象或效应的基础上的。通过对这些效应的分析,可以了解在信息传递和转换过程中,各种参数的相互关系,从而确定输入变量和输出变量之间的关系(基本模型),有利于深入了解同类型传感

表1-1 按输入量分类简表

机 械 参 数	力参量：质量、力、扭矩、应力等 几何量：几何尺寸、几何形状、表面粗糙度等 运动参量：线（角）位移、线（角）速度、振幅、加速度等
热 工 参 数	温度、热量、热流等 压力、压差、真空等 流速、流量等 液位、物位等
物 性 参 数	湿度、浓度、粘度、酸碱度等
光 学 参 数	光强、光通量、辐射能量等
化 学 参 数	气体的组分、液体的组分等
生 物 医 学 参 数	心血管参数、呼吸道参数、血液参数、神经系统参数等

器的特性。在本书目录中所列出的各章内容，就是以工作机理为主要线索加以安排的，由于迄今为止已发现了不下数百种可以用于构成传感器的物理、化学现象和效应，特别是近年功能材料的迅猛发展，本书不可能讨论所有的问题。只能介绍一些典型的传感器，适当地介绍一些新型传感器。

三、按信息能量变换方式分类

众所周知，测量信息是以能量为载体的。传感器与被测对象之间的信息交流，也必然涉及到含有信息的能量交流。在传感器的内部，信息的传递与变换同样伴随着能量的传递与变换，因此，信息流与信息能量流的一致性，是所有自动检测系统的重要特征之一，也可以作为传感器分类的一个重要依据。按照信息能量的变换方式，传感器可分为两大类型：

1. 能量变换型 传感器将从被测对象获取的能量（信息能量），直接变换为输出信号，例如由热电偶、光电池等构成的传感器。按照传统的说法，这类传感器又称作发生器式传感器。从结构上来看，这类传感器可以用两个能量口的框图表示，一个是输入口，另一个是输出口。

2. 能量控制型 此类传感器有三个能量口，一个输入口、一个输出口以及一个称作激励源的辅助能量口。传感器从被测对象获取的信息能量，不是直接变换为输出能量，而是用于调制或控制激励源，使激励源的部分能量载有信息而形成输出信号。例如被测量通过电阻的变化形成输出电压、通过光闸的移动改变光通量以及通过吸收声波来改变声束强度等等，都需要提供确定的激励源（电源、光源、声源等）。由此可见，能量控制型传感器不仅包括了所有的参数型传感器（ R 、 L 、 C 等），也包括了主动式测量传感器。

此种分类方式有如下优点：

（1）概括了所有传感器的共同特征，有利于利用系统的理论和方法对具有复杂变换的传感器进行分析。

（2）将信息与能量联系起来，可以建立传感器的通用评价标准，例如能量变换效率、信噪比等等。

（3）考虑了激励源特性对传感器的影响。例如单极式电容传感器用恒流源激励或恒压源激励，所得到的特性不同。在光闸型光纤传感器中，光通量（激励源）的分布影响特性线性。在半导体热敏电阻中，用恒功率激励源可以消除由于热变化所产生的影响等等。

§ 1-3 静特性的描述

传感器的输出-输入关系, 对不同的输入信号是不同的。首先, 由于传感器内部贮能元件(电容、电感、质量、弹簧等)的影响, 传感器对快变信号的反应与对慢变信号的反应就大不相同。前者要考虑动态响应问题, 而后者则可看作静态问题。故在传感器的研究中, 常将静态下的特性和动态特性分开来讨论。此外, 传感器的特性还可能与输入信号的幅值有关(例如非线性特性)或和输入作用的方向有关(例如死区或滞环特性)。这些就要求我们对各种特性给出统一的确切的表述方法。本节所讨论的是静特性的描述方法。

传感器的静特性是指在稳态条件下(传感器中无暂态分量)用分析或实验方法所确定的输出-输入关系。这种关系可依据不同情况, 用函数或曲线族表示, 有时也用数据表格表示。

1. 变换函数 变换函数是用数学方程描述静特性的一种方式, 对于输出-输入为单值关系时, 这种表述方式十分简便。一般可写作

$$y = f(x) \quad (1-1)$$

式中, y 表示输出量; x 表示输入量。

在表 1-2 中, 给出了几种变换函数的实例。

表1-2 几种典型变换函数

传 感 器 名 称	输 入 量 x	输 出 量 y	变 换 函 数
差动变压器	线 位 移	电 压	$y = Ax$
变极距电容传感器	极 间 距 离	电 容	$y = \frac{A}{x}$
湿敏电阻	相 对 湿 度	电 阻	$y = y_0 e^{-Ax}$
热敏电阻	温 度	电 阻	$y = y_0 e^{A/x}$
氧传感器	氧 分 压	电 势	$y = y_0 \ln \frac{A}{x}$
振弦传感器	弦 张 力	频 率	$y = y_0 \sqrt{\frac{x}{A}}$

由表可见, x 与 y 的关系虽是单值, 但不一定是线性关系, 在通常情况下, 以多项式来近似表示较为方便。

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

式中, 二次项以上为非线性因素, 据此可确定函数偏离线性的程度。

用变换函数概念的优点在于:

(1) 通过变换函数概括了传感器的规律性特征, 比用数列表或曲线表示要简单清晰。

(2) 变换函数集中表现了结构参数、材料性能参数以及环境影响等多种因素的相互作用, 从而有可能找到解决问题的合理方案。

(3) 变换函数为建立系统或采用合理的信号变换与处理方案提供了依据。

多数变换函数是在分析的基础上建立的, 而在实际标定中予以确定和精确化。有些变换

函数是建立在大量实验数据的基础上,用统计分析或曲线拟合方式建立的。

2. 灵敏度和线性度 灵敏度和线性度也是用来描述静特性的一种方式。虽然它们可以由变换函数直接求得,但用曲线表示的静特性中,它们的意义最为明确。

灵敏度定义为输出量的微小增量与相应的输入量微小增量的比值。在极限情况下,可表为变换函数的一阶导数或静特性曲线的斜率,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

用灵敏度这个特定参数,可以说明静特性的某些特征:

(1) 灵敏度具有可比性。灵敏度的高低是选择和设计传感器的重要依据之一,通常较高的灵敏度,意味着后续电路的信噪比有可能改善,系统的结构也可能简化。

(2) 灵敏度概略地描述了静特性曲线的变化趋势。对非线性的静特性,不同点有不同的灵敏度,对线性的静特性,灵敏度在测量范围内保持恒定。

(3) 当传感器输出是几种因素(包括被测量 x 和干扰量 u, v, w)作用的结果时,可以分别对各个因素确定其灵敏度。设

$$y = f(x, u, v, w)$$

则对各因素的灵敏度可表示为

$$S_x = \frac{dy}{dx}, S_u = \frac{dy}{du}, S_v = \frac{dy}{dv}, S_w = \frac{dy}{dw}$$

通过对被测量的灵敏度 S_x 和次要作用(干扰作用)灵敏度 S_u, S_v 或 S_w 的比较,可以说明传感器的选择性或抗干扰能力。例如应变片的纵向灵敏度和横向灵敏度的比较,反映应变片对力的方向的选择性。

(4) 由于传感器的输出和输入经常是两个不同的变量,因此灵敏度可能是有量纲参量(例如 mV/mm , mA/k 等)。但在构成系统时,灵敏度与电路的放大倍数类同,即环节串联时灵敏度相乘,并联时灵敏度相加。

灵敏度虽然可以表示静特性的线性与非线性,但具体估计非线性影响程度还是要用线性度。对一般的非线性静特性,线性度用来说明静特性曲线偏离某种拟合直线的程度(图1-2a),通常以其最大偏差 Δy_m 与满量程值(测量范围) y_{FS} 的比值来表示

$$\varepsilon_L = \frac{|\Delta y_m|}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

由于非线性误差是以某种拟合直线为基准线而确定的,故不同的拟合方法所得到的线性度就不同。因此线性度的定义是和拟合方法相联系的。常用的拟合方法有基端线性拟合、独立线性拟合以及最小二乘法拟合等。

3. 死区、滞环和回差 有些传感器的静特性,表现为输出与输入的非单值关系,即对于同一输入值有两个输出值与之对应。此时,用解析的表示方式是不方便的。常见的非单值静特性有死区及滞环两种,它们的误差用满量程(测量范围)的百分数来表示。

图1-2b表示了典型死区特性,死区定义为输入量的一个最大的有限区间 Δx_m ,在此区间,输入量的变化不引起输出的变化,并常用输入量程的百分数来表示。

图1-2c表示了典型的滞环特性曲线,它由输入量增大的上升分支和输入量减小时的下降分支所组成,对应于同一输入量,两个分支所对应的输出不同。其差值 Δy 与满量程值

y_{FS} 之比,表示滞环误差。由图可见,滞环误差在不同输入处是不同的,而且与输入变化大小有关。最大的滞环误差发生在输入信号作满量程变化时量程中的某一点(Δy_m), Δy_m 与 y_{FS} 之比值表示最大滞环误差。

当传感器同时具有死区和滞环两种非线性因素时,其综合影响是复杂的,通常称为回差。图1-2 d 表示了回差形成的示意图。与图 1-2 c 比较就可看出,死区的存在拓宽了滞环误差。同样,当输入量作作全量程变化时,在量程中某处出现最大回差值 Δy_m ,并以 $\Delta y_m/y_{FS}$ 的百分数表示。

4. 传感器的其它静态性能参数 除了上面的静特性(输出与输入的量值关系)外,还有一些其它参数也常常用来表示传感器的性能。这些特性参数主要有:

噪声电平——用于衡量传感器内部固有的噪声大小,常用折算到输出端的噪声电压表示。它表明系统可以探测的最小信号。

分辨能力——将被测量离散为若干微小间隔,传感器能可靠地分辨的最小间隔称为分辨能力。

负载效应——传感器对被测对象所施加的反影响,统称为负载效应。这种效应可能是各种形式的反作用力,也可能是吸收或放出的能量使被测对象的状态发生改变。

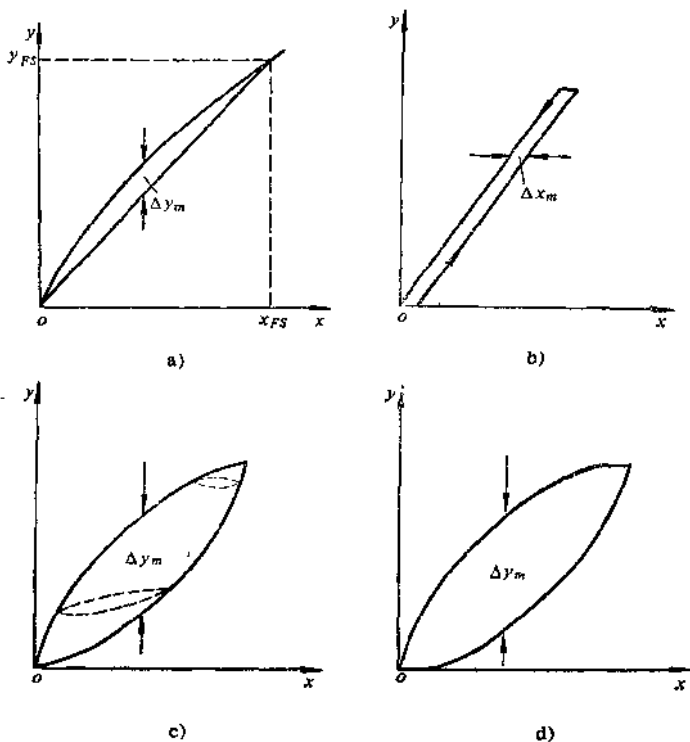


图1-2 静特性曲线

a) 一般非线性 b) 死区特性 c) 滞环特性
d) 死区加滞环特性

§ 1-4 传感器在动态下的工作特性

一、概述

在实际工作中,传感器的输入可能是变化较快的连续信号,也可能是冲击型输入或周期性输入。此时传感器中的各种类型的储能元件引起的暂态过程所表现的特性,与静特性有很大差别。输出与输入之间的关系将是一个随时间变化的函数。为此,需要研究传感器的动态性能和指标。

传感器动态特性的描述和分析方法与一般控制系统中常用的方法相同,但侧重点有所差异。在一般情况下,传感器可以看作一个动态复现系统,对这类系统的要求是在动态工作条件下(输入作用为随时间变化的函数)以最小的误差复现输入作用。

二、频率特性及其与动态品质之间的关系

线性系统在正弦输入作用下的输出幅值与输入幅值的比值称为系统的幅频特性, 以 $|H(j\omega)|$ 表示, 而输出与输入之间随频率而变的相位特性称为相频特性, 以 $\varphi(\omega)$ 表示。图 1-3 所示为一典型的幅频和相频特性, 统称频率特性。

频率特性是传感器的一个十分有用的评估特性, 用于评价传感器在波形复杂的周期输入作用下的复现误差。

理论证明: 在图 1-3 中幅频特性呈平坦形而相频特性呈线性形区间 ($0 < \omega < \omega_1$)。由于幅频特性平坦, 对所有落在此区间内的谐波输入都有相同的灵敏度, 因而不产生幅值误差, 而线性变化的相频特性, 可以保证不出现相位误差, 因此处在此区间的各种谐波所组成的任意复杂波形都能被精确地复现。由此可以得出结论: 频率特性的形状对评估动态误差有重要意义。

同样可以证明: 固有频率愈宽, 则在指定精度下的平坦区间也将拓宽。因此, 通过改变传感器的固有频率可以改变动态范围。

此外, 对频率特性的峰值数目和幅值大小的分析, 可以发现传感器在结构上的缺陷或参数配置的合理与否, 为改进性能提供了依据。

最后, 频率特性与时间响应之间有着确定的联系, 通过频率特性可以计算暂态响应。

从典型环节的频率特性, 可以了解结构参数对它的影响及暂态响应之间的关系。

(一) 一阶传感器

具有简单能量变换的传感器, 例如多数物性型传感器, 其动态性能可以用一阶微分方程来描述。直接利用微分方程或传递函数, 可以得到典型的一阶传感器的频率特性。

$$H(j\omega) = A / (1 + j\omega\tau)$$

相应的幅频和相频特性为

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{A}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \\ \varphi(\omega) &= \operatorname{tg}^{-1}(-\omega\tau) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

其图形以对数坐标示于图 1-4 中, 由图可见, 一阶频率特性具有最简单形式, 其特征参数可用 3 dB 频率 ω_c 表示

$$\omega_c = 1 / \tau \quad (1-6)$$

此处 τ 称为传感器的时间常数。由图可见, 时间常数 τ 愈小, 则 3 dB 频率 ω_c 愈高, 具有较宽的工作频域, 因此, 较高的 ω_c 具有较好的动态响应。或者说, 较小的时间常数响应较快。

(二) 二阶传感器

众所周知, 在电气系统中具有 R, L, C 电路呈现二阶频率响应。同样, 对于具有阻尼、质量、和弹簧的机械系统(图1-5), 例如测力和测量振动的传感器, 也有类似的特性。根据

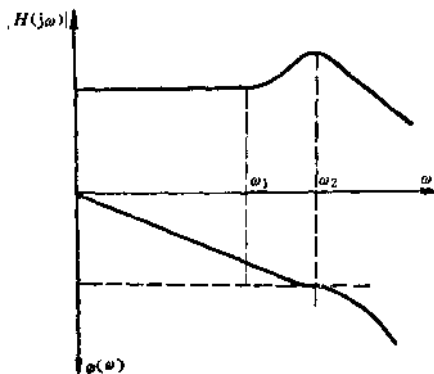


图1-3 幅频和相频特性

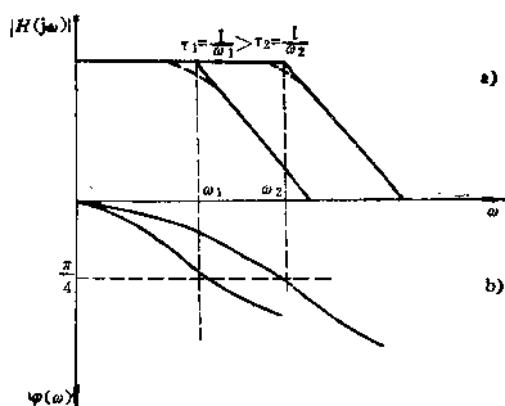


图1-4 一阶频率特性

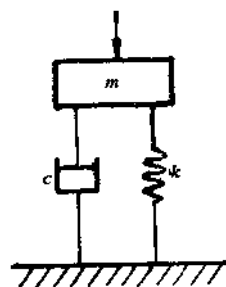


图1-5 单自由度的二阶系统

力平衡原理，可列出微分方程

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F(t) \quad (1-7)$$

由此可得出频率特性

$$H(j\omega) = \frac{1/k}{1 - x^2 + 2\xi x} \quad (1-8)$$

式中 x —— 频率比, $x = \omega/\omega_0$

ω_0 —— 系统无阻尼时的固有频率, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

ξ —— 比阻尼系数, $\xi = c/2\sqrt{km}$

由式 (1-8) 可分别求得幅频及相频特性, 其相应图形示于图1-6。

$$\left. \begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1/k}{\sqrt{(1-x^2)^2 + (2\xi x)^2}} \\ \varphi(\omega) &= -\operatorname{tg}^{-1} \frac{2\xi x}{1-x^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

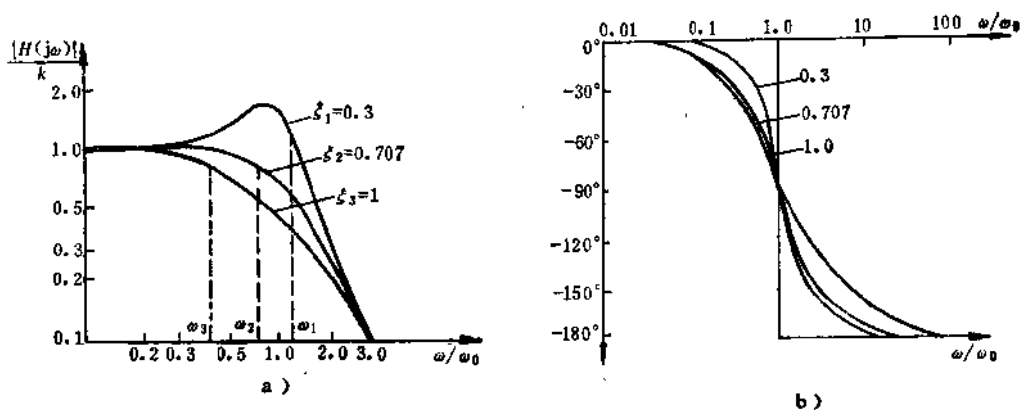


图1-6 二阶系统的频率特性

a) 幅频特性 b) 相频特性

由图可见, 频率特性与二个参数有关, 即无阻尼的固有频率 ω_0 (在 $x=1$ 处) 和比阻尼系数 ξ 。同时可以看出谐振峰值大小和共振频率 ω_r 随 ξ 变化, 对式(1-9)微分, 并使之等于零, 可得

$$\left. \begin{aligned} x &= \sqrt{1-2\xi^2} \\ \text{或 } \omega_r &= \omega_0 \sqrt{1-2\xi^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

由此可见, 在 $\xi < 0.707$ 时, 在某一 ω_r 下出现谐振。而在 $\xi = 0.707$ 时, $\omega_r = 0$, 就不再出现谐振峰, 此种状态称为临界阻尼状态。

由图形和计算都可表明: ①二阶系统的频率特性可以用两个特征参数 ω_0 和 ξ 来评估; ②在相同的 ξ 下, ω_0 愈大则特性的平坦区愈宽, 动态特性愈好; ③在确定的固有频率下, 当 $\xi = 0.707$ 时具有最宽的幅频特性平坦区。

三、时域响应特性和动态品质指标

在时域中分析动态响应特性是一种直观的方法, 可给出评估动态误差的清晰的概念。在快变的输入作用下, 传感器的输出与输入之间的关系是一个随时间变化的关系。产生这种现象的原因是由于输入作用引起的系统的暂态分量的影响。因此, 系统在动态下的输出, 可以看作是由两个分量构成: 第一个分量是像静特性一样与输入保持确定的关系; 第二个分量是由输入作用引起的暂态分量, 也叫动态误差。

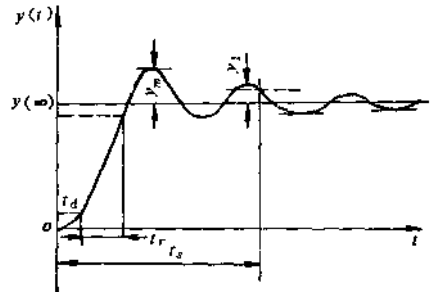


图1-7 阶跃响应

显然, 暂态分量反映了传感器中能量的存贮 (电场、磁场、位能、动能及热积累等) 过程和消耗 (电阻、摩擦等) 过程之间的动态平衡关系。用典型的输入作用, 就可以观察到它们之间的关系, 最常用的典型输入作用是阶跃函数。图1-7表示了在零初始条件下有代表性的阶跃响应曲线。图中 $y(\infty)$ 表示暂态结束后的稳态值, 它与输入 $x(t)$ 的关系由静特性确定。由图可见, 暂态分量的影响只是在前沿部分显示出来, 故传感器的动态品质参数, 可用阶跃响应的前沿部分的某些特征来表示, 常用的有如下几种 (图1-7):

时滞 从阶跃输入开始, 到输出响应开始变化为止的时间间隔, 以 t_d 表示。

上升时间 为了排除时滞的影响, 上升时间的始点定为输出响应达到某一百分值 (稳态值的百分值, 例如5%或10%) 处, 而终点是输出第一次达到稳态值的某一百分值 (例如90%) 处。显然此段时间间隔与规定的两个百分比有关, 以 t_r 表示, 并给出相应百分比。

阶跃响应时间 从阶跃输入开始, 输出值第一次达到稳态值的规定误差范围所需的时间, 常以 t_s 表示, 并与规定误差一同给出, 例如 $t_s(5\%)$ 。显然, t_s 包括时滞。

瞬时过冲 对于阶跃响应, 输出值超出稳态值的最大瞬时偏差 y_m , 并将此偏差用稳态值的百分数表示, 例如 $\sigma_p = \frac{y_m}{y(\infty)}$ 为20%。

衰减度 用来描述振荡的阶跃响应衰减的速度, 以 ψ 表示。其值用相邻两次过冲幅值差 $(y_{m1} - y_{m2})$ 与 y_{m1} 的百分比来表示, ψ 愈大, 表示衰减愈快。

稳定时间 稳定时间描述了暂态过程从开始到结束的整个时间, 以 t_t 表示。为了规定暂

态的结束（理论上可能要无穷大时间），需规定一个稳态误差 ϵ 。稳定时间就是从阶跃输入开始，到输出响应最终进入规定误差范围内所需要的时间。

由上述可见，传感器的动态性能，可用一个或几个参数来描述。其描述方法与传感器的暂态过程的特点有关。例如对单调的过程和衰减振荡的过程描述，可能就大不相同，下面就暂态过程的特点，讨论两种典型过程。

（一）单调变化的阶跃响应

由多个惯性环节组成的开环系统，其阶跃响应呈单调变化，可用上升时间、阶跃响应时间或稳定时间三者之一来描述其性能。对简单的只有一个惯性环节的系统，只需给出时间常数 τ ，阶跃响应即可完全确定（图 1-8）。

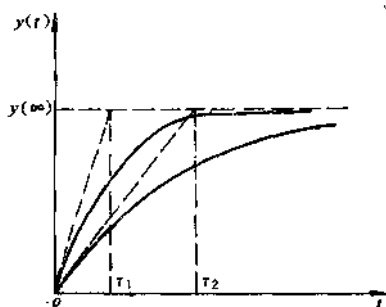


图1-8 一阶系统的阶跃响应

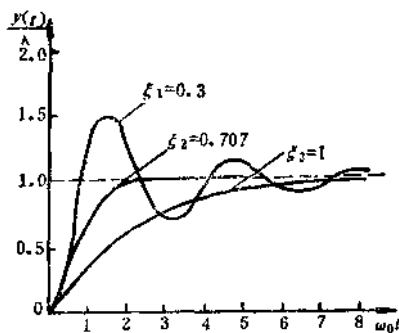


图1-9 二阶系统的阶跃响应

$$y(t) = y(\infty)[1 - \exp(-t/\tau)] \quad (1-11)$$

由图可见， τ 愈小，则响应时间和稳定时间愈小，动态性能愈好。和式（1-5）比较，可以看出， τ 小意味着频带宽。

（二）典型二阶系统

二阶系统的传递函数可由式（1-7）求得。

$$H(s) = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1-12)$$

图 1-9 表示二阶系统的阶跃响应曲线，图中 $\xi = 0.707$ 的曲线表示临界阻尼状态。比较三条曲线可以看出，临界阻尼具有最小的稳定时间， ξ 愈小则上升时间愈短。从响应时间角度来看，临界阻尼并不是最佳状态。分析证明， D 愈小则瞬时过冲量愈大。因此实际中一般选择 $\xi = 0.5 \sim 0.7$ ，以便能在允许过冲量条件下得到最小的响应时间。比较图 1-6 和图 1-9 可以看出，较小的 ξ 值具有较宽的频带（3 dB 带宽），故上升时间与带宽有关。

§ 1-5 传感器性能与结构的关系

在图 1-1 中，我们已采用框图方式来表示自动检测和自动控制系统的方法。在这些框图中，信号的类型（电信号或非电信号等）和各个环节的功能函数（变换函数、传递函数或频率响应等）都是抽象化了的，与具体的物理系统无关。例如框图中的一个一阶惯性环节，可能代表一个热电阻的热惯性，也可能是代表一个机械运动惯性或一个电路的充放电过程。这种表示方法可以简单而清晰地表示系统所包含的功能部件以及各功能部件之间的信息联系。

而更为重要的是,通过对框图的分析,可以了解不同结构的系统的性能(如动态性能、抗干扰性能等)。这种通过框图来研究系统整体性能和各部分性能的关系的方法,是结构分析法的基本出发点。为简单起见,本书只讨论结构框图和系统抗干扰能力的关系。为此,设环境对系统的影响表现为灵敏度变化 ΔS 和一个等效的噪声 N ,由此得出如图 1-10 所示方框图。

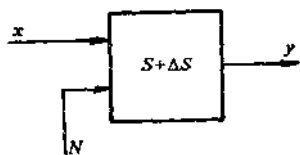


图1-10 基本方框图

传感器有三种基本结构形式,即直接变换型、差动型和平衡型,现分别讨论如下。

一、直接变换型

直接变换型是典型的开环系统(图 1-11),它最终可以化成如图 1-10 那样的等效方框图。设在理想条件下(标准环境和无干扰)系统的变换函数为

$$y_0 = S_{10}S_{20}\cdots S_{n0}x_0 \quad (1-13)$$

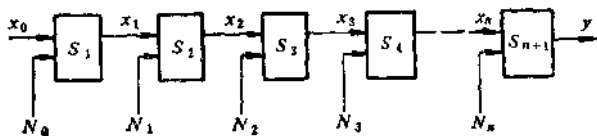
1. 假设在环境作用下,某一变换元件灵敏度发生变化,例如 $S_1 = S_{10} + \Delta S_1$, 此时输出

$$y = y_0 + \Delta y = (S_{10} \pm \Delta S_1)S_{20}\cdots S_{n0}x_0$$

$\therefore$

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \pm \frac{\Delta S_1}{S_{10}}$$

图1-11 直接变换系统



当多个变换元件灵敏度发生变化时,在忽略二阶以上无穷小情况下,同样可得系统灵敏度变化所引起的总误差

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \pm \frac{\Delta S_1}{S_{10}} \pm \frac{\Delta S_2}{S_{20}} \pm \cdots \pm \frac{\Delta S_n}{S_{n0}} \quad (1-14)$$

由此可得出结论:①灵敏度变化所引起的相对误差等于各个环节灵敏度相对变化值的代数和;②可以利用变换元件灵敏度变化的符号不同而相互补偿。

2. 在有噪声情况下,例如第二个变换元件的噪声所引起的误差为

$$y = y_0 + \Delta y = S_{10}S_{20}\cdots S_{n0}x_0 + S_{20}S_{30}\cdots S_{n0}N_1$$

$\therefore$

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{N_1}{S_{10}x_0} = \frac{N_1}{x_{10}}$$

同理,在忽略二阶以上无穷小时,可得全部变换元件噪声所引起的总误差

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{N_0}{x_0} + \frac{N_1}{x_1} + \frac{N_2}{x_2} + \cdots + \frac{N_{n-1}}{x_{n-1}} \quad (1-15a)$$

或

$$\frac{\Delta y}{y_0} = \frac{1}{x_0} \left[N_0 + \frac{N_1}{(S_{10})} + \frac{N_2}{(S_{10}S_{20})} + \cdots + \frac{N_{n-1}}{(S_{10}S_{20}\cdots S_{n-1})} \right] \quad (1-15b)$$

由式(1-15a)及(1-15b)可得出结论:①由噪声所引起的总误差,等于各变换元件输入端的噪信比的总和;②在系统总灵敏度一定的情况下,提高系统前面各元件的灵敏度,有利于减小后面元件中噪声的影响;③系统的第一个变换元件输入端噪声的影响,只取决于入口的噪信比,与系统的灵敏度无关,故第一个变换是很重要的。