

动态测试技术基础

李世义 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍动态信号测试基本原理。全书共六章，分别讲述测试系统的组成，测试系统的静态、动态特性，常用传感器，中间转换装置，记录仪器与测试系统设计。对动态信号测试的基本理论问题，作了比较详细的讲述；对常用传感器和测试仪器从应用角度出发，着重介绍其特点与应用范围；对试验和测试中普遍存在的规律性问题，作了较为详细的分析，指出了在建立测试系统时，应全面考虑的各环节之间的相互关系和减少动态误差的措施。

本书可作为机电专业本科生测试技术课的教材，也可作为机械电子行业工程技术人员解决实际测试问题时的参考书。

动态测试技术基础

李世义 编

李禄荫 审

·

国防工业出版社

(北京市车公庄西路老庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

·

787×1092 1/16 印张17¹/₂ 406千字

1989年11月第一版 1989年11月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00568-1/TH36 定价：3.50元

前 言

本书是为工科大学机电专业高年级本科生编写的测试技术课程的教材。为了适应教学改革对加强学生工程应用能力培养的需要,在本书编写中力求通过课堂教学与实验奠定动态信号测试的基础;使学生掌握动态信号测试的基本原理;在建立测试系统时,能按动态信号的特点提出对系统的要求,全面考虑各环节的相互关系与抗干扰、减少动态误差等问题;从测试目的出发选用传感器及测试仪器,并就不太复杂的测试电路进行设计。

本书共六章,第一、二章讲述动态信号测试的特点及系统的动态特性,第三章讲述常用传感器基本原理及特点,第四章讲述测试仪器的原理及使用中的具体问题,第五章介绍了几种主要的记录仪器及微机测试系统,第六章讲述测试系统设计的共性和抗干扰问题。

在前五章内容选择上,考虑到传感器技术的飞速发展及其越来越广泛的应用,其材料十分丰富,但本书不可能涉及太全太深,因而采用了讲两头的作法,即把基本的原理和动态特性讲清楚;把特点和应用作为重点编写内容。讲解的面尽可能宽一些,实一些,同时列举了一些实例。在第六章中,对试验和测试中普遍存在的规律性问题,有较系统的论述,能加深理解测试中经常出现的问题,以利于设计出有效的、误差在允许范围内的测试系统。

本书在编写中总结了作者在科学研究和教学实践中的经验与体会,同时又参考了大量国内外公开出版的书籍和有关文献,出处未一一列举,在此一并向原作者鸣谢。

本书由李禄荫教授审阅。在编写过程中得到北京理工大学马宝华教授、于庆魁教授、机电工业部兵器教材编审室杨实诚、孙业斌副教授的指导和大力支持。国营江北机械厂关丽荣同志描绘了本书的绝大部分插图。在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平有限,谬误之处在所难免,请同行专家及读者批评指正。

编者 1986年10月于北京

目 录

第一章 测试系统与被测参数 1

- § 1.1 绪论 1
- § 1.2 一般测试系统 2
- § 1.3 被测量概述 3

第二章 测试系统的基本特性 6

- § 2.1 概述 6
- § 2.2 测试系统的静态特性 6
 - 2.2.1 线性度 7
 - 2.2.2 灵敏度 8
 - 2.2.3 迟滞 9
 - 2.2.4 重复性 9
 - 2.2.5 测试系统的静态误差 10
- § 2.3 测试系统的动态特性 13
 - 2.3.1 动态特性的研究方法 13
 - 2.3.2 带系数线性系统 13
 - 2.3.3 线性系统的传递函数 14
 - 2.3.4 动态特性的分析方法 16
- § 2.4 测试系统在典型输入下的动态响应 17
 - 2.4.1 一阶系统的动态特性 17
 - 2.4.2 二阶系统的动态特性 20
- § 2.5 测试装置动态特性的测试 26
 - 2.5.1 用频率响应法测试动态特性 26
 - 2.5.2 用阶跃响应法测试动态特性 26
- § 2.6 实现不失真测试的条件 28

第三章 常用传感器 30

- § 3.1 概述 30
- § 3.2 机械式传感器 32
- § 3.3 电阻式传感器 34
 - 3.3.1 电位器式传感器 34
 - 3.3.2 电阻应变式传感器 36
 - 3.3.3 固态压阻式传感器 43
- § 3.4 电感传感器 48
 - 3.4.1 电感式传感器 48
 - 3.4.2 差动变压器式电感传感器 49
 - 3.4.3 电涡流式传感器 51
- § 3.5 电容式传感器 54

- 3.5.1 电容式传感器的结构类型 54
- 3.5.2 电容式传感器的测量电路 58
- 3.5.3 电容式传感器的特点及应用 58
- § 3.6 压电式传感器 62
 - 3.6.1 压电效应和压电材料 63
 - 3.6.2 压电式传感器的主要特性 69
 - 3.6.3 压电式传感器的应用 73
 - 3.6.4 压电式加速度传感器的重力标定法 78
- § 3.7 光传感器 77
 - 3.7.1 半导体光电器件及其应用 77
 - 3.7.2 光纤传感器 85
 - 3.7.3 光栅传感器 91
- § 3.8 半导体敏感元件与传感器 95
 - 3.8.1 半导体气体敏感元件及应用 95
 - 3.8.2 热敏电阻 100
- § 3.9 霍尔传感器 104

第四章 中间转换装置 109

- § 4.1 概述 109
- § 4.2 电阻式传感器的测量电路 109
 - 4.2.1 电流测量法 109
 - 4.2.2 分压电路 110
 - 4.2.3 补偿电路——电位器法 112
- § 4.3 集成运算放大器及其应用 117
 - 4.3.1 运算放大器的基本概念 117
 - 4.3.2 运算放大器的基本性质 114
 - 4.3.3 运算放大器的闭环特性 118
 - 4.3.4 积分运算放大器 119
 - 4.3.5 微分运算放大器 120
- § 4.4 滤波器 122
 - 4.4.1 理想滤波器 122
 - 4.4.2 实际滤波器 126
 - 4.4.3 无源 RC 滤波器 126
 - 4.4.4 有源滤波器 128
 - 4.4.5 用于频谱分析的滤波器 134
- § 4.5 电桥 138
 - 4.5.1 直流电桥 138
 - 4.5.2 交流电桥 146
 - 4.5.3 直流电桥放大器 155
- § 4.6 载波放大器 158
 - 4.6.1 调幅载波放大器 159
 - 4.6.2 调频放大器 162
- § 4.7 电荷放大器 166

4.7.1	电荷放大器的基本原理	167
4.7.2	电荷放大器的频率特性	168
4.7.3	电荷放大器的归一化原理	172
4.7.4	电荷放大器的传输系数——输出灵敏度	173
4.7.5	电荷放大器的校准	174
§ 4.8	模数(A/D)与数模(D/A)转换	175
4.8.1	A/D转换与D/A转换的一般问题	176
4.8.2	A/D转换(或ADC)	178
4.8.3	D/A转换(或DAC)	182
第五章	记录仪器	184
§ 5.1	X-Y函数记录仪	185
§ 5.2	光线示波器	186
5.2.1	工作原理	188
5.2.2	光学系统	188
5.2.3	记录纸传动系统	188
5.2.4	时标基准系统及控制系统	189
5.2.5	磁系统	189
5.2.6	振子	189
§ 5.3	磁带记录仪	194
5.3.1	磁带记录仪的基本组成及作用	195
5.3.2	模拟信号的直接记录(DR式)	193
5.3.3	模拟信号的调制记录(FMR)	199
5.3.4	模拟信号的数字记录	200
5.3.5	磁带记录仪的主要性能术语	202
§ 5.4	瞬态波形记录仪	203
5.4.1	基本工作原理	204
5.4.2	BC-型瞬态波形存储仪	204
5.4.3	BC-型瞬态波形存储仪使用方法	205
5.5	动态数据的微机采集与记录	209
5.5.1	概述	209
5.5.2	TP-801单板机数据采集与记录系统	210
5.5.3	单板机与微机的双向通讯	216

第六章 测试系统的设计 224

§ 6.1	一般考虑	224
§ 6.2	传感器的选用原则	226
§ 6.3	测试系统的组成	228
6.3.1	测量信号的特性	228
6.3.2	测试系统的结构	230
6.3.3	测试系统的电路形式	232
6.3.4	测试系统各单元之间的匹配条件	234
§ 6.4	接地噪声和消除方式	237
6.4.1	接地问题	237
6.4.2	接地干扰分析	238
6.4.3	正确接地方式	240
§ 6.5	系统中的干扰电压及抑制	243
6.5.1	概述	243
6.5.2	一般干扰问题	244
6.5.3	外来电干扰	244
6.5.4	内部长期电干扰	246
6.5.5	内部瞬时电干扰	248
6.5.6	电子测量装置的两干扰电压	250
§ 6.6	屏蔽技术	251
6.6.1	噪声传播的方式	251
6.6.2	电场屏蔽	255
6.6.3	磁场屏蔽	256
§ 6.7	测量信号的电平偏置与电流传送	260
6.7.1	偏置	260
6.7.2	以电流的形式传递信息	262
§ 6.8	测试系统的误差与总合	263
6.8.1	误差的来源及分类	263
6.8.2	误差的总合	266
§ 6.9	测量系统设计举例	267
6.9.1	测量系统设计的主要问题	267
6.9.2	温度计的设计	268
6.9.3	高分辨率生理代谢秤的设计	271

第一章 测试系统与被测参数

§ 1.1 绪 论

人类已经进入信息时代,信息已经成为人类生活和科学技术发展的日益重要的资源。在人类生活和科学技术发展的各个领域,用于信息的收集、传递、存储和处理的信息系统起着越来越重要的作用。人造通讯卫星的使用,使人类进入了全球卫星通信的时代;在经济生活中,信息已变成新的经济成分;在工业中,以计算机为中心的控制设备的应用,促使生产力产生了新的飞跃;社会的信息化,给人们的工作方式和生活方式带来了新的变化;在科学研究领域,以获取各种信息的传感器和信息传递、处理技术的新系统的出现,使科学技术得到了突飞猛进的发展。

动态测试技术就是以捕捉和处理各种动态信息为目的的一门综合技术,它在当代科学技术中占有相当重要的地位。它涉及传感器原理、电子技术、信号与系统、控制工程、微机应用和误差理论等学科的内容。它的应用领域十分广阔,在航天、航空、军事、交通运输、环境、机械、仪器仪表、医疗、日用机电产品和机器人研究中都得到广泛地应用。尤其是在许多工业发达国家把传感器的研究列在科技发展前列的今天,动态信息的测试技术已经成为每一个工程技术人员必须具备的基本技能。

动态信息测试的一般系统图如图 1-1-1 所示。被测信息由传感器获取,经过中间变换装置后,由记录或显示仪器将输出信号记录下来,以供分析和应用。

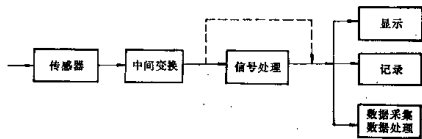


图 1-1-1 测试系统图

本教材的目的是向读者讲解这个系统,介绍动态信息测试的基本原理和方法,期望读者能通过学习和实验,掌握动态信息测试的基本原理和方法,学得一些进行科学试验的基本技能。试验测试技术是一个工程技术人员必须具有的基本技能,也只有具备了这种能力,才能在科学技术高速发展,面向实际和生产应用的今天,更好地适应形势的要求和有更作为。

§ 1.2 一般测试系统

典型的测试系统如图 1-1-1 所示。由传感器、匹配电路或中间转换装置、信号处理和记录或显示仪器组成。

传感器的主要功能是探测或转换被测信号，即将被测的非电量转换为电量。此时，理想的情况是，传感器只对需要测量的信号敏感，对别的信号不灵敏。

匹配电路或中间转换装置的主要任务是放大或转换被测量的信号，使其可以在第三级的指示仪器上指示或在记录仪器、数据处理仪器中记录、处理。在需要时，这一级还应有阻抗匹配、滤波、积分、微分等作用。

第三级的指示、显示仪器，提供明确的数据和资料，这种信息是人的感官或控制仪器所能接受的。数据转换或处理装置，是进行 A/D 转换和数据预处理的装置，为计算机计算提供原始数据。

测试系统在测试对象和目的不同时，有很大的差别，简单的测量装置整个系统没有几台仪器，例如测温系统。较复杂的系统，可能一个框图就代表一套复杂的装置，例如机动刚度测试系统。

将传感器与计算机结合起来的测试系统，如图 1-2-1 所示，即所谓传感器信息处理系统。先用传感器将某种物理量转换成电量，再通过 A/D 变换器（模-数变换器）将其变换为数字量，其后通过微型计算机或大型电子计算机将大量数据进行高速处理，从而获得必要的输出形式。通过这样的传感器和计算机相结合，检测数据就不用人工处理，而由计算机完全自动地、高速地进行处理。对传感器的信息可以进行非线性补偿、温度补偿、提取特征量和作各种统计处理，这种传感器和信息处理相结合的“传感器信息处理技术”，已形成一个新的领域。

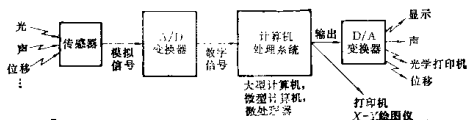


图 1-2-1 传感器信息处理系统

在自动控制和自动加工过程中，还要用到反馈系统，它是一种实时检测的闭环系统，如图 1-2-2 所示。用反馈系统可以大大地提高控制的准确度，并能显著地提高系统对于控制信号的反应速度。图 1-2-2 所示的是一自动加工系统。事先按要求，将加工过程及尺寸要求 sp 按规定的格式装入计算机，调整好刀具。加工过程中，按一定时间间隔用传感器对加工部位的尺寸进行测量，或者用计算机不断地对传感器测量的信号进行采样，得到 pv 值。然后在加法器或比较器中进行比较，得到

$$E = pv - sp$$

再用 E 控制调节器产生一个使执行机构动作的调节信号，作用于加工过程。重复此过程。直到 $E = 0$ 为止。

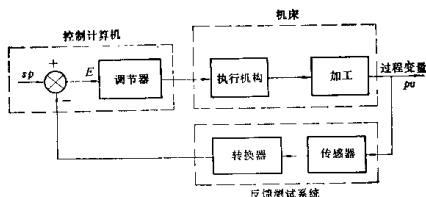


图1-2-2 反馈系统

这里给出的是一维控制系统，即单个独立变量的控制，依靠传感器来检测系统的输出，并将其反馈到输入端。当过程有几个变量时，就成了多变量控制过程，比较复杂。

理想的测试系统应该有单值的、确定的输入输出关系。其中以输入输出成线性关系为最佳。在静态测试中，测试装置的这种线性关系虽然总是希望具备的，但不是必须的。因为用曲线校核或输出补偿技术对非线性进行校核尚不困难。而在动态测试中测试装置本身应力求是线性系统，目前在动态测试中对非线性进行校核还相当困难。实际测试中，有些测试装置的线性范围是有限的。只能在某一段保持线性，给测试结果带来的误差是允许的。

§ 1.3 被测量概述

用电测非电量的方法测量的非电物理量，其范围是很广泛的。根据不同的应用场合，其量值也不同，表 1-1 汇集了一部分物理量的极值及比值。表中最大值是指可测的最大值，最小值是指被测量的最小可探测部分即量化单位，被测量的变化范围 $x_{\max}/x_{\min}$ 为

表 1-1 被测量物理量范围

	最小值 $x_{\min}$	最大值 $x_{\max}$	$\frac{x_{\max}}{x_{\min}}$
应变 ε	$10^{-2}\mu\epsilon$	$10^5\mu\epsilon$	10^7
位移 s	$1\mu\text{m}$	10m	10^7
旋转角 α	$10^{-6} \times 360^\circ$	$10^4 \times 360^\circ$	10^6
转速 n	$4 \times 10^{-2}\text{min}^{-1}$	$4 \times 10^6\text{min}^{-1}$	10^7
加速度 a	10^{-8}g	10^6g	10^{14}
拉力和压力 F	$2 \times 10^{-5}\text{N}$	$2 \times 10^7\text{N}$	10^{12}
压力 p	1Pa	10^9Pa	10^9
时间 t	10^{-10}s	10^9s	10^{19}
温度 θ	10^{-6}K	10^{12}K	10^{18}

$10^6 \sim 10^{10}$, 散布很大, 无论对哪种物理量想用一套设备来完成整个范围的测量都不可能, 必须根据被测对象可能的变化范围和要求的测量精度, 来选用合适的测试设备和测试方法。

根据被测物理量的性质, 将表示被测量的信号可分为确定性信号和非确定性信号两大类。确定性信号是指可以用数学关系描述的信号, 例如一个用螺旋弹簧挂起来的重物, 如图1-3-1所示, 离开平衡位置的位移 x 可以用下式精确确定:

$$x(t) = X \cos \sqrt{\frac{K}{m}} t \quad (t \geq 0)$$

非确定性信号是不能用明确的数学关系式来表示的信号, 无法预测未来时刻的精确值。这些数据是随机的, 只能用概率术语和统计平均来描述。例如汽车行驶时, 车架上某点的振动就是随机振动, 见图1-3-2所示。

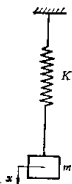


图1-3-1 弹簧质量系统

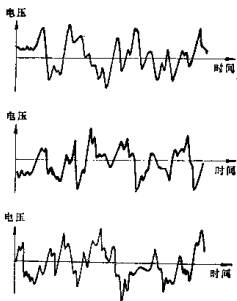


图1-3-2 随机振动信号

确定性信号可以分为周期和非周期的两类, 周期信号又可进一步分为正弦周期信号和复杂周期信号, 非周期信号可以分为准周期信号和瞬态信号, 见图1-3-3所示。

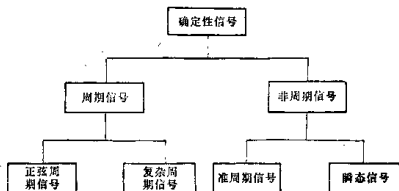


图1-3-3 确定性信号的分类

随机信号反映的物理现象是随时间而变化的物理过程，也称为随机过程。随机过程有平稳过程和非平稳过程之分，平稳过程又分为各态历经和非各态历经过程，见图 1-3-4 所示。

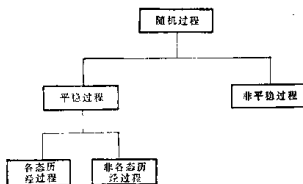


图 1-3-4 随机信号的分类

按描述方式可以将信号分为时域信号和频域信号。我们直接获取的信号一般都是其幅值随时间变化的时域信号。把时域信号变换为频域信号，即对信号作频域描述，可以了解信号的频率结构，即频谱。例如，一个周期方波可以看成一系列谐波的叠加，图 1-3-5 表示它的时域和频域的关系。

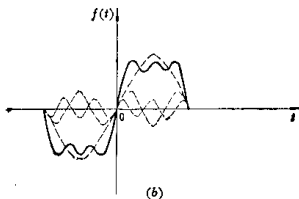
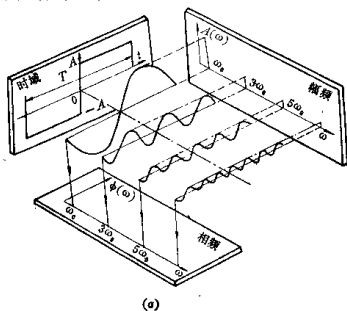


图 1-3-5 方波的频域描述

第二章 测试系统的基本特性

§ 2.1 概 述

在工程测试中,我们最关心的是输入量 $x(t)$ 、系统的传输特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系,本章主要讨论这个问题。

一般的测试系统可以简化为一个二端网络,见图 2-1-1 所示。

对于线性系统,其输出和输入有如下关系:

$$h(t) = \frac{y(t)}{x(t)} \quad (2-1-1)$$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2-1-2)$$

已知上两式中的任意两个量,就可以决定第三个量。

但经常是已知输入要用系统特性 $H(s)$ 、 $(h(t))$

去决定输出,输入信号可能是一个不随时间变化的静态量,也可能是个随时间变化的动态信号,甚至是一个变化很快的瞬态信号。对于一个测试系统,由于输入信号的这种不同性质,就有所谓静态特性和动态特性之分。我们的目的,就是要研究系统的这种特性,以便在测试前,根据信号的性质,判定测试方法的可行性及误差。

如果系统的特性是线性的,对于静态信号,问题就变得比较简单,用几个特定的量就可以确定系统的静态特性(见§ 2.2),而且对误差有成套的分析方法。如果信号是动态的,问题就变得比较复杂,系统对于不同信号的转换和传递特性是不一样的。

用什么方法研究测试系统的动态特性呢?用不同形式的典型信号输入,以对应的输出信号来研究动态特性。当输入为阶跃信号,其对应的输出称阶跃响应。当已知系统的阶跃响应后,完全可以算出随时间任意变化的输入信号所对应的输出是怎样的,所以阶跃响应在时域中,完全表达了测量系统的动态特性;当输入信号可以认为是由若干谐波组成时,系统的频率响应则完全表达了测试系统在频域的动态特性。因此,通常用阶跃响应和频率响应来表示测量系统的动态特性。

研究测试系统的静态特性时,不仅要关心测量结果的幅值大小,还要指出测量结果的误差范围和可信程度。研究测试系统的动态特性也存在同样的情况,我们不仅要利用动态特性指出可测信号的频率范围,还要从频域范围去分析和研究动态误差的大小,减少误差的方法。

§ 2.2 测试系统的静态特性

一个系统的静态特性是指被测物理量是基本不随时间变化的稳态信号时,输出与输入的关系。衡量测试系统静态特性的主要指标是线性度、灵敏度,迟滞和重复性。这些

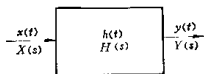


图 2-1-1 用二端网络表示测试系统
 $x(t)$ 、 $X(s)$ ——输入的时间函数和拉氏变换; $y(t)$ 、 $Y(s)$ ——输出的时间函数和拉氏变换; $h(t)$ 、 $H(s)$ ——系统的脉冲响应和传递函数。

指标的分析方法和结论对传感器来说也是适用的。

2.2.1 线性度

对于没有迟滞、蠕变效应的理想测量系统(例如理想仪器),其静态特性可以由下列方程式来表示:

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

式中 x ——输入物理量;

y ——输出量;

$a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ ——常数。

从上式可看出,一般的静态特性是由线性项所决定。当 $a_0 \neq 0$ 时,表示即使在没有输入的情况下,仍有输出,通常称之为零点偏移(零偏)。这种多项式代数方程可能有四种情形(见图 2-2-1)。

(1) 在理想情况下,式(2-2-1)中的零偏 a_0 被校准($a_0 = 0$), x 的高次项为零($a_2, a_3, \cdots, a_n = 0$),线性方程 $y = a_1x$, 见图 2-2-1(a) 所示。此时 $a_1 = \frac{y}{x} = K$ 称为测量系统的灵敏度。

(2) 如图 2-2-1(b) 所示,当式(2-2-1)中只有 x 的奇次项,即

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$$

在原点附近的相当范围内输出-输入特性基本成线性。对应的曲线有如下特性,

$$y(x) = -y(-x)$$

(3) 当式(2-2-1)中只有偶次项时,所得曲线不对称,如图 2-2-1(c) 所示。

(4) 一般情况,对应特性曲线如图 2-2-1(d) 所示。

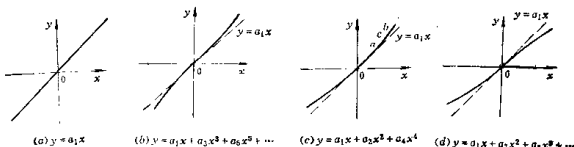


图 2-2-1 测量系统的静态特性

(a) 理想线性; (b) 只有奇次项的非线性;

(c) 只有偶次项的非线性; (d) 普遍情况下的非线性。

在实际使用时,如果非线性方程式 x 的幂次不高,则在输入量变化范围不大的条件下,可以把实际曲线的某一段用其切线或割线来代替,这种做法称为静态特性的线性化。人们在设计仪器时,常把测量范围选择在最接近直线的那一小段,于是可使仪器的静态特性近似于线性。例如,图 2-2-1(c) 所示为一非线性静态特性,若测量范围不大,可取 a 、 b 一段为测量范围,这样就接近于线性了。但此时原点不在 O 点,而在 c 点。这种线性化的方法局限性很大,当测量系统(例如仪器)非线性程度很大时,就不能应用此方法。

按上述的方法,把一段曲线视为直线作线性化处理时,直线与实际特性曲线之间不

能很好地拟合, 而有偏差, 通常把这个误差称为“非线性误差”, 也称为线性度。

仪器或传感器的非线性误差是指实际特性曲线与其拟合直线之间的最大偏差 (ΔL) 与仪器或传感器满量程 (F_r) 输出之比, 即

$$\delta L = \pm \frac{|\Delta L_{\max}|}{Y_{Fr}} \times 100\%$$

式中 $\Delta L_{\max}$ ——标准曲线与拟合直线间的最大偏差;

Y_{Fr} ——满量程输出值。

非线性误差是以拟合直线为基准线计算出来的, 基准线不同, 所得线性度就不同, 图 2-2-2 示出了同一特性曲线在不同基准线情况下的误差值。

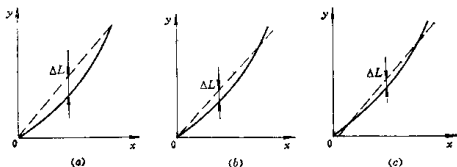


图 2-2-2 不同拟合方法的基准线
(a) 增基线性度的拟合直线; (b) 平均点法的拟合直线; (c) 最小二乘法的拟合直线。

拟合直线的方法很多, 最常用的是元线性回归方法, 即最小二乘法, 这种方法比较简单。所谓的理论直线方程即是(2-2-1)式静态特性方程式的第一种情况, 即 $y = a_0 + a_1 x$ 。由此求得的线性度为理论线性度, 这种拟合方法的计算程序在一般的科学计算器中都有, 只要将数据输入, 按三个键就可以得到系数 a_0 、 a_1 和相关系数 R 。这种方法还可以进行曲线的回归计算, 即一元非线性回归, 只需先将 x 值作一变换, 如先取对数、指数等, 再按线性方法输入, 即可得 a_0 、 a_1 和 R 。当 R 小于 0.95 时, 拟合程度不好, 须重新计算。

仪器或传感器的实际静态特性是在标准条件下校准的, 其标准条件是指没有加速度、振动、冲击(即这些参数不是被测物理量); 环境温度一般在室温(20 ± 5)°C 之下; 相对湿度不大于 85%; 大气压力为 101.3 ± 8 kPa。

2.2.2 灵敏度

灵敏度是指传感器或测试系统在稳态情况下输出变化量对输入变化量的比值, 用 K 表示

$$K = \frac{\text{输出变化量}}{\text{输入变化量}} = \frac{dy}{dx} \quad (2-2-2)$$

特性曲线是直线的传感器或测试系统, 其灵敏度为一常数。特性曲线不是直线的传感器或测试系统, 可以在测量电路中设计制作校正电路, 使其输出和输入呈线性关系。

2.2.3 迟 滞

当传感器或测量系统的正向（输入量增大）和反向（输入量减少）特性不一致，并形成回线时，称其具有迟滞，如图 2-2-3 所示。对应于同一输入信号，正反行程实际特

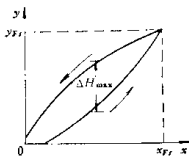


图 2-2-3 迟滞特性

性之间的偏差称为迟滞偏差。在实际工程问题中，通常用正反实际特性的平均值的连线作为实际特性曲线。

迟滞大小一般由实验确定，迟滞误差计算公式为

$$\delta H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{Fr}} \quad (2-2-3)$$

式中 $\Delta H_{\max}$ ——正、反行程输出之间的最大差值。

2.2.4 重 复 性

当传感器或测量系统在全量程范围内多次重复测量时，同是正行程或是反行程上对应于同一个输入量，其输出量之间的差值称为重复性偏差，见图 2-2-4。最大重复性

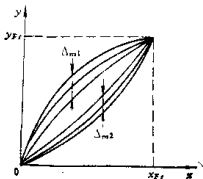


图 2-2-4 重复性

偏差与理论满量程输出量之比称为重复性误差

$$\delta R = \pm \frac{(2 \sim 3) \sigma}{Y_{Fr}} \times 100\% \quad (2-2-4)$$

式中 σ ——相应行程的标准偏差。

σ 是重复性误差的标准差，因为重复性误差是随机误差。上式中 $(2 \sim 3) \sigma$ ，当置信系数取 2 时，对应的置信度为 95%，当置信系数取为 3 时，置信度为 99.73%。

2.2.5 测试系统的静态误差

一个测试系统一般由若干个环节组成, 有开环系统, 也有闭环系统。系统在工作过程中因温度、环境或各种条件改变的影响, 会造成一定的噪声干扰, 引起测试误差, 把这种误差叫做静态误差。系统静态误差的分析方法如下:

要分析整个系统的误差, 先要分析每一个环节的误差, 然后予以总合。下面分开环系统和闭环系统来研究。

1 开环系统的静态误差

由几个环节组成的串联开环系统, 见图 2-2-5 所示。该系统的输入量为 x_i , 输出量为 y_o 。由第一环节加到第二环节的信号为 y_1 , 第二与第三环节之间的信号为 y_2 , 依次

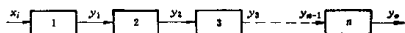


图2-2-5 串联开环系统框图

类推, 第 $n-1$ 到 n 环节之间的信号为 y_n , 系统的静态特性为

$$y_o = f(x_i)$$

系统灵敏度为

$$K_e = \frac{dy_o}{dx_i} = \frac{dy_1}{dx_i} \cdot \frac{dy_2}{dy_1} \cdots \frac{dy_o}{dy_{n-1}} \quad (2-2-5)$$

或

$$K_e = K_1 K_2 K_3 \cdots K_n \quad (2-2-6)$$

如果用传递系数来表示, 也可写成

$$K_e = \frac{y_o}{x_i} = \frac{y_1}{x_i} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdots \frac{y_o}{y_{n-1}} = K_1 K_2 \cdots K_n \quad (2-2-7)$$

由上两式可以看出, 若某一环节出现误差就将影响系统总的误差。假设各环节的误差为 $\Delta y_1, \Delta y_2, \cdots, \Delta y_n$, 相对误差为 $\delta y_1, \delta y_2, \cdots, \delta y_n$, 系统总的误差为 Δy_o , 总的相对误差为 δy_o 。

根据 (2-2-7) 式, 有

$$y_o = K_e \cdot x_i = \frac{y_1}{x_i} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \frac{y_3}{y_2} \cdots \frac{y_o}{y_{n-1}} \cdot x_i$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \delta y_o &= \frac{\Delta y_o}{y_o} \approx \frac{dy_o}{y_o} = \frac{1}{y_o} \left(\frac{\partial y_o}{\partial x_i} + \frac{\partial y_o}{\partial y_1} + \frac{\partial y_o}{\partial y_2} + \cdots + \frac{\partial y_o}{\partial y_{n-1}} \right) \\ &= \frac{1}{y_o} \left(-\frac{y_1}{x_i^2} \cdot dx_i + \frac{y_2}{y_1} \cdot \frac{y_3}{y_2} \cdots \frac{y_o}{y_{n-1}} \cdot x_i - \frac{y_1}{x_i} \cdot \frac{y_2}{y_1^2} \cdot dy_1 \right. \\ &\quad \left. + \frac{y_3}{y_2} \cdots \frac{y_o}{y_{n-1}} \cdot x_i - \cdots - \frac{y_1}{x_i} \cdot \frac{y_2}{y_1} \cdot \frac{y_3}{y_2} \cdots \frac{y_o}{y_{n-1}^2} \cdot dy_{n-1} \cdot x_i \right) \end{aligned}$$

$$\text{将 } K_i = \frac{y_i}{y_{i-1}}, \delta y_i = \frac{\Delta y_i}{y_i} \approx \frac{dy_i}{y_i} \text{ 代入上式}$$

$$\begin{aligned} \delta y_o &= -\frac{1}{y_o} (K_1 \delta x_i K_2 K_3 \cdots K_n x_i + K_1 K_2 \delta y_1 K_3 \cdots K_n x_i + \cdots \\ &\quad + K_1 K_2 K_3 \cdots K_n \delta y_{n-1} x_i) \end{aligned}$$

又因 $y_o = K_1 K_2 K_3 \cdots K_n x_i$, 代入上式

得

$$\delta y_o = -(\delta x_i + \delta y_i + \delta y_2 + \cdots + \delta y_{n-1})$$

实际上 $\delta x_i, \delta y_i, \cdots, \delta y_{n-1}$ 分别为环节 1, 2, $\cdots, n$ 的相对误差, 所以上式可以改写为

$$\delta_o = \left| \sum_{i=1}^n \delta_i \right| \quad (2-2-8)$$

上式表明, 系统输出端的相对误差等于各个环节相对误差之和。

2 闭环系统的静态误差

闭环系统又称为反馈系统, 如图 2-2-6 所示。图中 x_i 、 y_o 和 x_f 分别为该系统的输入量、输出量和反馈量。前向通道的传递系数为 K_o 、反馈通道的反馈系数为 F , 其值为

$$K_o = \frac{y_o}{x_i} \quad (2-2-9)$$

$$F = \frac{x_f}{y_o} \quad (2-2-10)$$

从图 2-2-6 可得

$$(x_i - y_o F) K_o = y_o$$

从而可求得此闭环系统的传递系数 K_t ,

$$K_t = \frac{y_o}{x_i} = \frac{K_o}{1 + K_o F} \quad (2-2-11)$$

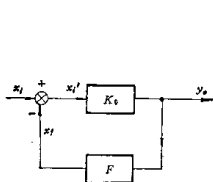


图 2-2-6 反馈系统框图

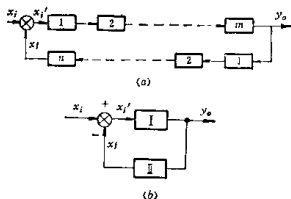


图 2-2-7 闭环系统

(a) 有负反馈的并联环节系统; (b) 等效图。

下面分析一个复杂一点的闭环系统的静态误差。图 2-2-7 是一个力平衡式闭环系统, 假设前向通道有 m 个环节, 反馈通道有 n 个环节, 简化后见图 2-2-7 (b) 所示。设 I 相当于前向通道的等效环节, II 相当于反馈通道的等效环节, 比较环节不变, 利用式 (2-2-11) 可得闭环传递系数

$$K_t = \frac{K_I}{1 + K_I K_{II}} \quad (2-2-12)$$

而输入输出增量的关系为

$$dy_o = \frac{K_1}{1 + K_1 K_I} dx_i$$

设 Δy_1 ——前向环节输出端引起的误差；

Δy_1 ——反馈通道各环节的误差在它的输出端积累的误差；

K_{i+1} ——第 $i+1$ 个反馈环节的传递系数。

假设在输入端没有引入输入信号，当在反馈通道的输入端加入信号 Δy_o 时，在反馈通道输出端产生的信号为 $\Delta y_o K_1$ ，如果反馈通道引入的误差为 Δx_1 ，则此通道的输出 Δx_1

$$\Delta x_1 = \Delta y_o K_1 + \Delta x_1$$

这个信号加到比较环节上，在前向通道的输入端产生的信号

$$\Delta x_o = -(\Delta y_o K_1 + \Delta x_1)$$

此时，在系统的输出端，前向通道产生的误差

$$\Delta y_o = \Delta x_o K_1 + \Delta y_1 = -\Delta y_o K_1 K_1 - \Delta x_1 K_1 + \Delta y_1$$

式中 Δy_1 ——前向通道产生的误差。

则

$$\Delta y_o = \frac{\Delta y_1 - \Delta x_1 K_1}{1 + K_1 K_1} \quad (2-2-13)$$

如果反馈环节是线性的，则

$$x_1 = K_1 \cdot y_o$$

给 (2-2-13) 式的两端各除以 y_o ，就得到系统的相对误差

$$\begin{aligned} \frac{\Delta y_o}{y_o} &= \frac{\Delta y_1}{y_o} \cdot \frac{1}{1 + K_1 K_1} - \frac{K_1 \Delta x_1}{y_o (1 + K_1 K_1)} \\ &= \frac{\Delta y_1}{y_o} \cdot \frac{1}{1 + K_1 K_1} - \frac{\Delta x_1}{x_1} \cdot \frac{K_1 K_1}{(1 + K_1 K_1)} \end{aligned}$$

所以

$$\delta_o = \delta_1 \cdot \frac{1}{1 + K_1 K_1} - \delta_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K_1 K_1}} \quad (2-2-14)$$

式中 δ_o ——系统的相对误差 $\delta_o = \Delta y_o / y_o$ ；

δ_1 ——前向通道的总相对误差 $\delta_1 = \Delta y_1 / y_o$ ；

δ_1 ——反馈环节的总相对误差 $\delta_1 = \Delta x_1 / x_1$ 。

根据式 (2-2-14) 可以看出，引入反馈环节，就可以减少以至消除前向通道误差的影响。具体作法就是用增大 K_1 或 K_I 的办法，由于增大 K_1 会减小闭环传递系数 K_o [见式 (2-2-12)]，通常不采用这种方法。常用增大 K_1 的办法来减小 δ_1 的影响。当 $K_1 K_I \gg 1$ 时， $\delta_o \approx -\delta_1$ ，即在这种情况下，系统输出端的误差由反馈通道的基本误差 δ_1 所决定，具有较小误差的反馈技术是比较容易实现的。此外，在系统中引入负反馈，开辟了补偿前向通道各环节误差的可能性。