

高等学校教材

检测技术

于永芳 郑仲民 主编

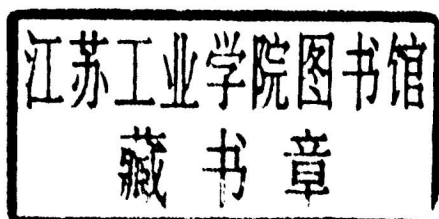
机械工业出版社



高等学校教材

检测技术

于永芳 郑仲民 主编



机械工业出版社

本书共分九章,前五章为基础理论,主要包括测试系统特性的描述、常用传感器、信号的中间转换、信号的显示与记录、测试信号的处理分析。后四章为检测技术的应用,有振动测试、位移测试、应变和力的测试、噪声测试等内容。

本书在编写时力求使基础理论注重物理概念,加强工程参数测试的应用内容,并从生产和科研实际出发,以检测信号为主线贯穿全书。

本书为各类高等学校机械类和机械电子工程专业教材,也可作为从事机械和机械电子工程检测技术人员自学、进修和进行技术工作的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术/于永芳,郑仲民主编. - 北京:机械工业出版社,1993. 5
(2000. 5 重印)

高等学校教材

ISBN 7-111-04896-2

I. 检… II. ①于… ②郑… III. 检测-高等学校-教材 IV. TH7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 07903 号

责任编辑:于宁 林松 版式设计:冉晓华 责任校对:刘志文

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京大地印刷厂印刷

2006 年 1 月第 1 版第 12 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 12.25 印张 · 300 千字

37001 - 41000 册

定价:17.00 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)68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是机械工业出版社规划出版的统编教材。

近年来,随着科学技术和工业生产的发展,国内外对各种物理参数和系统性能的动态测试提出越来越迫切和广泛的要求。机械和机电一体化产品的功能和制造过程发生了日新月异的变化:产品性能的智能化;制造过程的柔性化、集成化,已成为科学技术发展的标志。而这些方面的关键问题之一就在于信息的获取、传输、存贮、处理和应用。在这种背景下,检测技术得到了理工科院校的重视,将其作为机械类和机械电子工程类大学生和研究生进行学习、科学研究和实验研究所必须的基础理论和技术训练的必修课程。本书是为适应这种客观需要而编写的。

本书以动态测试中构成信号流程的基本理论、基本手段和基本技能为总的思路。在基础理论部分注重物理概念,在工程参数检测部分加强了实际应用内容,特别突出了在自动化和数控工程中检测技术的实际应用。全书包括测试系统特性的描述、信号的获取(常用传感器)、信号的中间转换、信号的显示与记录、测试信号的处理分析及振动、位移、应变、力和噪声等工程参数检测等部分,并以动态信号为主线贯穿其中。

本书为各类高等学校机械类和机械电子工程类专业教学用书,也可作为从事机械工程和机械电子工程测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书。书中带“*”号的部分可视作参考内容。

本书由长春大学江苏理工大学机电学院等五所学校的有关教师共同编写。参加编写工作的有于永芳(绪论、第一章、第二章、附录)、刘迎春(第三章)、过大江(第四章、第七章)、郑仲民(第五章、第六章)、刘自然(第八章、第九章)。由于永芳和郑仲民担任主编,由于永芳负责统稿。

本书特请哈尔滨工业大学竺培国教授担任主审。

在本教材编写过程中,参考了一些兄弟院校编写的教材、资料,得到了许多同志的帮助和支持。在此,谨向关心、支持和帮助本教材编写工作的同志们表示谢意。

由于我们的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请专家与读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第一章 测试系统特性的描述	5
第一节 测试系统的组成	5
第二节 描述测试系统特性的主要参数	6
第三节 理想测试系统的条件	17
第二章 常用传感器	21
第一节 传感器的构成和分类	21
第二节 电阻式传感器	24
第三节 电感式传感器	28
第四节 电容式传感器	31
第五节 压电式传感器	34
第六节 磁电式传感器	38
第七节 感应同步器	41
第八节 旋转变压器	47
第九节 光栅	51
第十节 光电盘和编码盘	58
第十一节 磁尺	60
*第十二节 激光	65
第三章 信号的中间转换	69
第一节 电桥电路	69
第二节 调制与调解	76
第三节 滤波电路	83
第四节 电荷放大器	88
第四章 信号的显示与记录	92
第一节 光线示波器	92
第二节 X-Y 函数记录仪	98
第三节 磁带记录器	101
第四节 显示与记录装置的选择	107
第五章 测试信号的处理分析	109
第一节 测试信号的分类与特征	109
第二节 测试信号的时域分析	111
第三节 测试信号的幅值域分析	117
第四节 测试信号的频率域分析	118
第五节 倒频谱分析	121
*第六节 采样、窗函数	123
第七节 信号处理分析仪器简介	126
第六章 振动测试	132
第一节 振动测试仪器选用	132
第二节 机械振动状态测试	133
第三节 机械动态特性测试	137
第四节 测试系统(装置)的定度	143
第七章 位移测量	146
第一节 位移传感器的选用	146
*第二节 回转轴误差运动的测量	150
第三节 部件移动距离的测量	154
第八章 应变和力的测试	159
第一节 应变的测试	159
第二节 力的测试	163
第九章 噪声测试	168
第一节 噪声的度量	168
第二节 噪声测试仪器——声级计	172
第三节 噪声测试方法	174
*第四节 噪声测试中的几个问题及其计算	176
附录 A 习 题	179
附录 B 常用资料	185
参考文献	192

绪 论

一、测试技术的作用和任务

人类对客观世界的认识和改造离不开测试技术。特别是科学技术迅速发展的今天，在日常生活、商品流通、机械工程、交通运输、电子通信、军事技术以及宇宙科学等领域中都离不开测试技术。

当今的时代是以电子计算机、自动控制、激光、生物技术、海洋开发，新材料、新能源和信息工程等为主要标志的时代。由于近代多种学科的新技术成就已经渗透到机械产品中来，致使机械产品成为多学科的技术集成，而且向着精密、高速、大型、重载的方向发展。机械产品的动态特性、可靠性、精度保持性和噪声等性能，以及测试技术和数据处理等已日益为人们所重视。

在机械工程中，通过对有关物理量(如位移、速度、加速度、力、力矩、功率、机械振动、噪声、温度等)的测量，不仅能够对产品的质量提供客观的评价，而且还能够为生产、科研提供可靠的数据和反馈信息，成为探索、开发、创造和实现生产自动化的一种重要手段。

测试技术的主要任务有以下四个方面：

(1) 对产品的质量进行检定，确保机械产品质量达到预定的规格。其中包括对原材料的质量进行测试，检查其物理性能和力学性能，如对金属材料的金相组织分析。对各类机械、仪器产品的性能进行测试，检查其产品性能是否达到了产品标准规定的指标，如对机床、汽轮机主轴回转误差的测定，内燃机的转速、功率、耗油量的测定，各种机械量测量仪器的准确性的鉴定等等。

(2) 对生产过程进行监视或控制，保证生产过程正常运行。例如，随时测定与运行条件有关的机械量，经过适当的转换，由记录指示装置进行监视。一般地说，运行中的被测量大多是动态参数，因此又往往涉及动态测量。

图 0-1 为铣床加工工艺过程框图，图 0-1a 为普通铣床的加工工艺过程。在给定的切削深度、切削速度和进给条件下完成加工操作。采用测试控制反馈技术可以改进这一工艺过程，例如首先根据加工精度，按《切削用量手册》选定额定进给量，而机床实际进给量的大小则按照加工过程中切削力的变化(通过变位进行测量)作可控变动，以保持切削力接近恒定，这样做可以提高加工精度并延长刀具的使用寿命，如图 0-1b 所示。

(3) 在机械工程设计中，利用测试技术可以提供大量试验数据。许多复杂的机械结构仅凭已有的理论公式或经验公式进行计算是不够的。有时甚至没有理论公式或经验公式可以作依据，往往要以模拟模型经过试验来寻找或判断最佳条件，在这个过程中都涉及机械量的测试工作。

(4) 在许多科学研究项目中，测试工作也都占有很重要的地位，如气象学、地震学、海洋学的研究都是和测试分不开的。至于人造地球卫星的发射与回收、宇宙空间的探测、航天工程等尖端技术的科学研究则更是与测试技术紧密相关的。

因此，测试技术是机械工业发展乃至一切科学技术发展的一项重要基础技术。

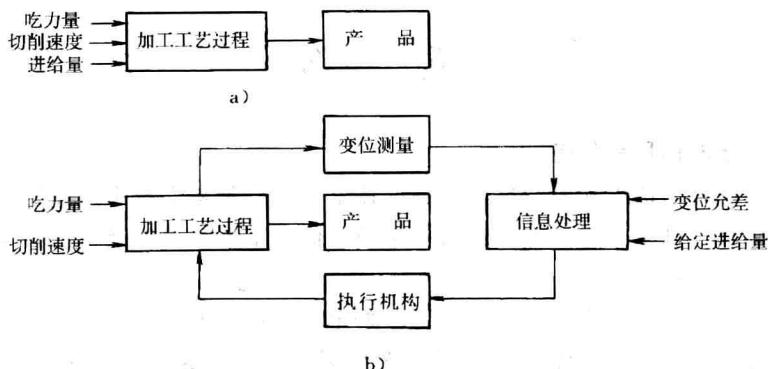


图 0-1 铣床的加工工艺过程

a) 普通铣床的加工工艺过程 b) 采用测试控制的铣床加工工艺过程

二、测试技术的内容和特点

测试是人们认识客观事物中的重要方法，是从客观事物中取得有关信息的认识过程。在这过程中，借助于专门的设备，通过合适的试验和必要的数学处理，求得所研究对象的有关信息。

获取所研究对象的有关信息，有些是可以直接检测的。例如，弹簧在外力作用下产生变形，其变形量就是可以直接检测的。此外根据已知外力的大小和检测的变形量可以比较容易计算出弹簧的刚度。可是，对于有些系统动态特性的测试就不容易直接检测，对于这样的系统，首先要设计测试系统，并且要根据信息量的性质选择相应的传感器，对传感器获取的信号进行加工、处理才能获得有关信息的量值。有些机械系统的动态特性则只有通过对它的激励和系统响应的测试才能求得。

从广义的角度来讲，测试工作涉及试验设计、模型理论、传感器、信号加工与处理、误差理论、控制工程和参数估计等内容。从狭义的角度来讲，测试工作则是指在一定的激励方式下，信号的检测、变换、处理乃至显示、记录或直接以电量输出数据等内容。与之相对应的各具体环节构成测试系统。本书是在狭义的范围内来论述测试技术中的一些基础知识，包括基本理论、基本知识和基本测试技能等三个方面。

1) 基本理论主要是指有关测试系统特性、有关信号变换和分析。

2) 基本知识主要是指测试仪器的基本性能和使用方法；测试技术学科及测试手段的国内外发展情况；测试技术在机械工程领域内的广泛应用。

3) 基本技能主要包括，一方面根据测试对象正确构思测试系统，选择使用测试装置；另一方面对测试结果进行正确处理分析。

为了比较清楚地讲述这些基础知识，本教材以信号流程为主线，贯穿全课程。信号流程的主体硬件是传感器、中间转换器、显示记录器和信号处理器，用以解决信号的获得，信号的转换和把信号处理成可观测、分析研究的量。

信号是信息的载体，信息总是通过某些物理量的形式表现出来的，这些物理量就是信号。从信号的获取、变换、传输、显示和控制等方面来看，以电量形式表示最为方便。

如果所测试的信号不随时间变化，或相对观察时间而言，其变化非常缓慢且可以忽略其变化者，则称这种测试是静态的。如果所测试的信号变化较快，这种测试则属于动态测试。在

动态测试过程中,由于测试系统(如传感器、放大器和中间转换器等)本身也具有特定的动态特性,所以我们所研究的信号总是测试系统的动态特性和研究对象动态特性的综合反映。本课程主要研究动态测试方面的有关内容。

三、测试技术的发展概况

测试技术是随着现代科学技术的发展而迅速发展起来的一门新兴学科。现代科学技术的发展离不开测试技术,而且不断对测试技术提出新的要求。另一方面,现代测试方法和测试系统的出现和不断完善、提高又是科学技术发展的结果。两者是互相促进的。可以说,采用先进的测试技术是科学技术现代化的重要标志之一,也是科学技术现代化必不可少的条件。反过来,测试技术的水平又在一定程度上反映了科学技术的发展水平。由于科学技术的发展,使测试技术达到了一个新的水平,其主要标志有以下四个方面:

(1) 由于物理学和化学、材料学,特别是半导体材料学、微电子学等方面的新成就,使传感器向着精确度高、灵敏度高、测量范围大而体积小的方向发展。并且已经研制成功很多可以检测力、热、光和磁等物理量和气体化学成分的传感器。光导纤维不仅可以用来作信号的传输,而且可作为传感器。微电子技术的发展使得有可能把某些电路乃至微处理器和传感、测量部分做成一个整体,使传感器本身具有检测、放大、判断和一定的信号处理功能。可以说传感器的小型化与智能化已经成为当代科学技术发展的标志,也是测试技术发展的明显趋势。

(2) 电子计算机技术的发展使测试技术发生了根本变化。利用电子计算机技术可以使信号的分析理论和方法不断发展,日臻完善。在很多情况下还可以利用电子计算机做后续处理工作,直接显示出所需要的结果。电子计算机技术在测试技术中的应用还突出地表现在整个测试工作可在计算机控制下,自动按照给定的测试实验程序进行,直接给出测试结果,构成了自动测试系统。其它诸如波形存储、数据采集、非线性校正和系统误差的消除、数字滤波、参数估计等方面也都是电子计算机技术在测试领域中应用的重要成果。

(3) 测试技术已经成为自动控制系统中一个重要组成部分。众所周知,宇宙空间站的建立,航天飞机的发射和返回,人造地球卫星的发射和回收,都是自动控制技术的重要成果。生产过程自动化已经成为当今工业生产实现高精度,高效率的重要手段。而一切自动控制过程都离不开自动检测技术,利用测试得到的信息,自动调整整个运行状态,使生产、控制过程在预定的理想状态下进行。实现“以信息流控制物质和能量流”的自动控制过程。

(4) 随着科学技术的发展,测试技术应用的领域不断扩大。可以说,它涉及所有几何量和物理量,诸如力、位移、速度、硬度、流量、流速、时间、频率、温度、热量、电声、噪声、超声、光度、光谱、色度、激光、电学、磁学等等。不仅广泛应用于机械工程中机械量的测试,而且应用于生物工程之中,如目前已经研制出用于将检测分析物的生物分子或细胞的结果转换成电信号的换能器,可以用来探测生物的奥秘。

四、课程的性质和学习要求

对于机械工程和机械电子工程的有关专业来说,本课程是一门技术基础课。通过本课程的学习,使学生能较正确地选用测试装置和初步掌握进行动态测试所需要的基本理论、基本知识和基本技能。

学生在学完本课程后具体应掌握以下几个方面的知识。

1) 基本掌握测试系统静态、动态特性的描述方法和理想测试系统的条件。

2) 基本掌握常用传感器、信号的中间转换和显示记录的原理,并能够较正确地选用测试系统进行测试工作。

3) 能够对测试信号进行分析和处理,包括对测试信号进行时域分析、频域分析、幅值域分析等。

本课程的特点是广博的理论性和丰富的实践性。为了达到教学目的,在进行必要的理论教学的同时还要安排一定学时(一般应不少于8学时)的实验课。学生在学习过程中必须密切联系实际,参加必要的实验,使之得到测试能力的训练。

第一章 测试系统特性的描述

通常的工程测试是指借助于一些通用或者专门的测试系统,采用相应的方法从客观事物中取得有关信息的过程。测试系统的输入信号可以是基本上不随时间变化的,也可以是随时间变化的。随时间变化的信号经过处理之后还可以转换为随频率变化的。如果输入信号用 $x(t)$ 表示,系统的传输或转换特性用 $h(t)$ 来表示,输出信号用 $y(t)$ 来表示,则工程测试问题就是处理 $x(t)$ 、 $h(t)$ 和 $y(t)$ 三者之间的关系(如图 1-1)。

如果输入 $x(t)$ 、输出 $y(t)$ 是已知量,则通过输入、输出就可以推断出测试系统的传输特性 $h(t)$;

如果系统的传输特性 $h(t)$ 已知,输出 $y(t)$ 可测,则通过 $h(t)$ 和 $y(t)$ 就可以推断出输入信号 $x(t)$;

如果输入信号 $x(t)$ 和系统的传输特性 $h(t)$ 已知,则可以推断出输出信号 $y(t)$ 。

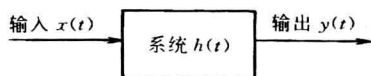


图 1-1 系统、输入和输出

须知,测试系统应当满足一定的特性要求,才能使输出信号 $y(t)$ 在一定程度上精确地反映被测的输入信号 $x(t)$ 。本章主要研究测试系统特性的描述方法。

第一节 测试系统的组成

所谓“系统”,通常是指相关事物按一定关系组成的整体。在机械工程的测试工作中,由于测试目的和要求不同,测试系统的差别是很大的。这里所说的系统,是广义的指从检测输入信号的那个环节(输入环节)到检测输出信号的那个环节(输出环节)之间的整个系统,包括研究对象和所有测试环节。

典型的测试系统,常由以下三个部分组成,如图 1-2 所示。

一、试验环节

它是将被测对象处于人为的预期状态的专门环节,其目的在于充分暴露被测对象的内在联系和特性,以便进行有效的测量。例如,用激振器激励某一结构,使之处于运动状态以便测量该结构的动力参数。此时激振器就是一个试验环节。

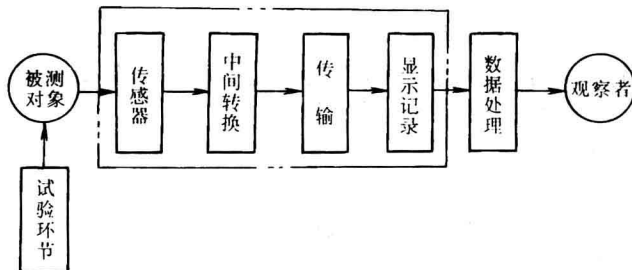


图 1-2 测试系统框图

二、测量环节

它是用以将被测的量转换成便于观察者能够直接感觉的测试信号的各种测量仪器和辅助环节的总称(见图 1-2 双点划线框),其任务就是检测被测变量、指示和记录被测变量的数值和变化过程。

测量环节中感受被测量的输出信号,往往需要再次经过转换、放大、传输,并经过数据处理系统进行运算、分析等过程之后,才送到测量环节的输出环节——指示器、记录仪中

去。因此,测量环节除了包括传感器、信号中间转换和显示记录等部分外,还往往包括放大、传输以及电源、信号源等。

传感器是将被测对象的量检测出来并转换成电信号的功能器件。它的特性对整个测试系统特性有着直接影响因此传感器在整个测试系统中占有重要位置。

中间转换器用来把传感器输出的信号,经过调制、放大、解调、滤波……转换成一定功率的电信号,使之便于显示、记录和分析,常常根据具体测试对象以及选用的传感器形式及特性、而采用相应的电路。诸如电桥电路、调制电路、解调电路、放大电路和运算电路等等。中间转换器是整个测试环节的核心,也是比较复杂的部分。

显示、记录器用来把中间转换器输出的信号显示或记录下来供观测人员进行数据处理或者以此判断其测试结果。显示、记录器主要有电平记录仪,电子示波器,笔式记录仪,光线示波器和磁带记录器等等,对它们的要求主要是不失真地记录或显示其测试结果。

三、数据处理环节

数据处理环节将通过测试装置测得的结果进行数据分析和处理,以便得到测试人员所需要的明确的数据和资料。例如,一些振动测试结果经过谱分析才能在机械工程中得到应用。因此可以说,数据处理环节是测试环节的一个延续部分,也可以说是为了将测试结果应用于工程实际而不可缺少的。

本课程所研究的“测试系统”在具体安排上,中间环节前后顺序不是固定不变的。每个中间环节的作用也不一定是单一的,有时一个中间环节起着多个环节的作用。

第二节 描述测试系统特性的主要参数

前面已经提及,测试系统若要在一定程度上精确地反映出输入信号 $x(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 之间的关系,则测试系统必须具有良好的特性。描述测试系统特性的主要参数有灵敏度、线性度、滞后度、幅频特性、相频特性等。

一、灵敏度

灵敏度 S 是测试系统静态特性的一个基本参数。当测量装置的输入有一个变化量 Δx ,引起输出发生相应的变化,在输出达到稳态后其变化量为 Δy ,则定义

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

式中 S ——测试系统灵敏度;

Δy ——输出的变化量;

Δx ——输入的变化量。

如图 1-3 所示,对于系统特性呈线性关系的系统,其灵敏度为常数,即有

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{常数}$$

对于特性为非线性关系的系统,这时该系统的灵

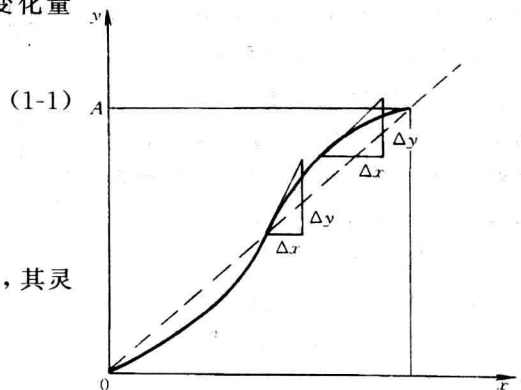


图 1-3 灵敏度

敏度为系统特性曲线的斜率，则有

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

灵敏度的量纲是不确定的，当测试系统的输入和输出的量纲相同时，则该测试系统的灵敏度为系统的放大倍数，它没有量纲；当测试系统的输入和输出有不同的量纲时，则测试系统灵敏度是有量纲的，其量纲可用输出的量纲与输入的量纲之比来表示。

例 1-1 一差动变压器式位移传感器，在位移变化 1mm 时，输出电压变化 1200mV，问位移传感器的灵敏度是多少？

解：根据已知条件， $\Delta y = 1200\text{mV}$, $\Delta x = 1\text{mm}$ ，则位移传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{1200\text{mV}}{1\text{mm}} = 1200\text{mV/mm}$$

例 1-2 机械指针式位移传感器，当输入信号有 0.01mm 的位移变化量时，输出信号是指针位移 10mm，求位移传感器的灵敏度。

解：根据已知条件， $\Delta y = 10\text{mm}$, $\Delta x = 0.01\text{mm}$ ，则位移传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{10\text{mm}}{0.01\text{mm}} = 1000$$

它没有量纲，因此它常常称为放大倍数。

选择测试系统时，应综合考虑选择各参数，既要满足使用要求，又能做到经济合理。一般来说，系统的灵敏度越高，测量范围越窄，系统的稳定性也往往越差。

二、线性度

线性度是度量测试系统输出、输入间线性程度的一种指标。测量系统输入和输出之间的关系曲线称为定度曲线。定度曲线通常是用实验的方法求取的。典型的定度曲线如图 1-4 所示。

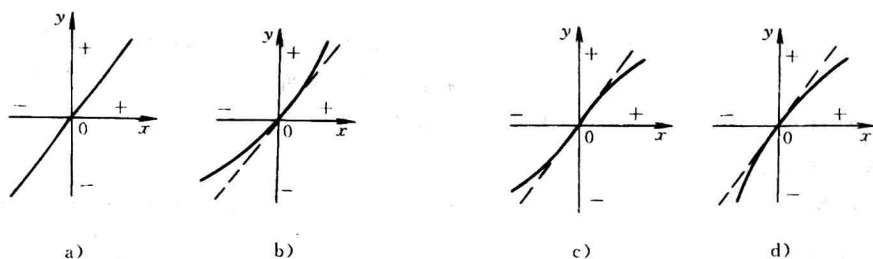


图 1-4 典型的定度曲线

图 1-4a 所表示的是输出与输入成线性关系，而图 1-4b、c、d 表示输出与输入成非线性关系。

并且可以认为图 1-4b、c、d 的曲线是在图 1-4a 的线性关系上叠加了非线性的高次分量 $y = S_1x + S_2x^2 + S_3x^3 + S_4x^4 + \dots$ ，或者分别是其中的奇次、偶次分量的结果。

定度曲线和理想直线的偏离程度称为测试系统的线性度。作为技术指标则是采用定度曲线对于理想直线的最大偏差 B 与测试系统标称全量程输出范围 A 之比的百分数来表示，即

$$\text{线性度} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (1-3)$$

可见,测试系统的线性度是把定度曲线和理想直线相比较求取的,因而这条理想的参考直线的不同位置在很大程度上影响线性度这一参数的评定。目前确定这条参考直线有多种方法,尚不统一,常用的有:

(1) 最小二乘直线法 它是指参考直线通过坐标原点,即 $y = 0, x = 0$, 直线与定度曲线间的输出量偏差 B_i 的平方和 $\sum_{i=1}^n B_i^2$ 为最小,用这种方法得到的参考直线称作最小二乘直线。

(2) 两点连线法 它是指在测得的定度曲线上,通过零点和全量程输出点的连线,如图 1-5 所示。

(3) 最大偏差比较法 使获得的参考直线和定度曲线的最大偏差 $B_{\max}$ 比起其他所有直线所形成的最大偏差 $B_{\max}$ 都小,如图 1-6 所示。

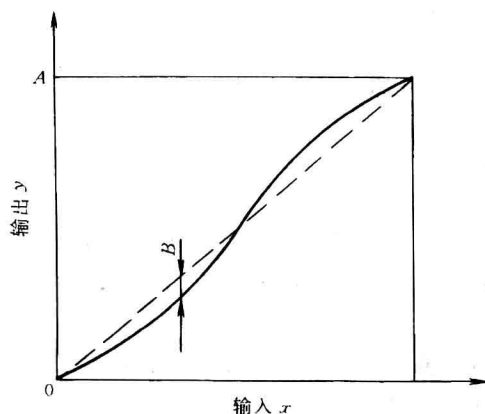


图 1-5 两点连线法

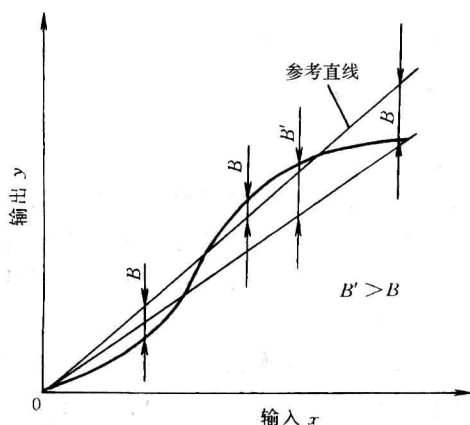


图 1-6 最大偏差比较法

从上述的三种方法中可以看出,比较精确的方法是最小二乘直线法。最简单但最不精确的方法是两点连线法。最大偏差比较法介于两者之间,因而是较常用的一种方法。

线性度是度量系统输出、输入线性关系的重要参数,其数值越小说明测试系统特性越好。

三、滞后度

滞后也称做回程误差或变差,它也是用来评价实际测试系统的特性与理想测试系统特性差别的一项指标。理想线性测试系统的输出、输入是完全单调的一一对应的关系。而实际测试系统,当输入由小增大和由大减小时,对于同一个输入将得到大小不同的输出量。在等精度测量条件下,定义在全量程范围内,当输入量由小增大和由大减小时,对于同一个输入量所得到的两个数值不同的输出量之差的最大值,即 $\Delta y_{\max} = y_{20} - y_{10}$ 为滞后量,见图 1-7。它与全量程 A 的比值称为滞后度,其表达式为

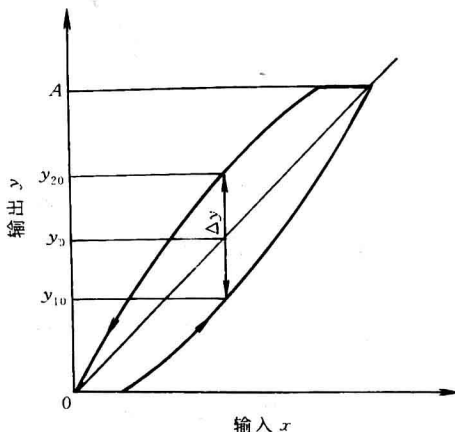


图 1-7 滞后

$$\text{滞后度} = \frac{\Delta y_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $\Delta y_{\max}$ ——输出量之差的最大值；

A ——全量程的输出量。

产生这种现象的原因主要有两个方面，一是在测试系统中有吸收能量的元件。例如，弹性元件和磁化元件。另一个原因是由于机械结构中有间隙。由前一原因引起的输出量不符现象称为盲区。滞后一般与输入量量程大小有关，而盲区引起的误差在整个测量范围内几乎不变。

理想的测试系统滞后与盲区为零，实际测试系统的滞后误差愈小愈好。

四、幅频特性

对满足一定要求的测试系统，输入一正弦信号

$$x(t) = A \sin \omega t \quad (1-5)$$

式中 A ——输入正弦信号的最大幅值；

ω ——输入正弦信号的频率。

假定测试系统是稳定的，那么在瞬态结束，达到稳态时，将得到相应的正弦形式的输出

$$y(t) = B \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-6)$$

B 是输出正弦函数的最大幅值， ω 是频率，与输入信号的频率相同， φ 是输出、输入初始相位差。图 1-8a 表示系统输入一正弦信号，经测试系统后有一相应的正弦输出的框图。图 1-8b 表示输入经测试系统输出的波形变化的情况。

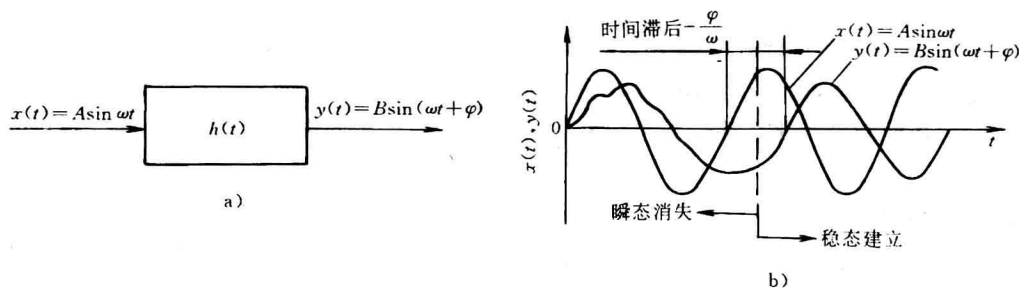


图 1-8 正弦输入的稳态响应

a) 稳态响应框图 b) 稳态响应波形

对这样的测试系统，若在一定的范围内改变输入频率 ($0 < \omega < \text{某定值}$)，就可得到该系统的输出、输入幅值比及其相位差与输入频率的函数关系。我们把这一函数关系称作测试系统的频率响应特性，或频率特性。

上述过程经过傅里叶变换后，可以将系统的输出改写为

$$y(t) = A |H(j\omega)| \sin[\omega t + \angle H(j\omega)] \quad (1-7)$$

则输出、输入的幅值比

$$\frac{A |H(j\omega)|}{A} = |H(j\omega)| \quad (1-8)$$

$H(j\omega)$ 是一个复变量。所以可把 $H(j\omega)$ 写成复数形式

$$H(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) \quad (1-9)$$

$$\text{则 } |H(j\omega)| = A(\omega) = \sqrt{[\operatorname{Re}(\omega)]^2 + [\operatorname{Im}(\omega)]^2} \quad (1-10)$$

$A(\omega)$ ($|H(j\omega)|$) 是频率的函数,称为系统的幅频特性。

如果用纵坐标表示 $A(\omega)$,横坐标表示频率 ω ,则 $A(\omega) - \omega$ 曲线称为幅频特性曲线。

如果对自变量取常用对数,幅值坐标取分贝数,即画出 $20\lg A(\omega) - \lg\omega$ 曲线,称为对数幅频曲线,也称幅频波德图(在图上横坐标按 $\lg\omega$ 分划,纵坐标代表幅值比 $A(\omega)$,但按 $20\lg A(\omega)$ 分划,单位是 dB。),如图 1-9a 所示。

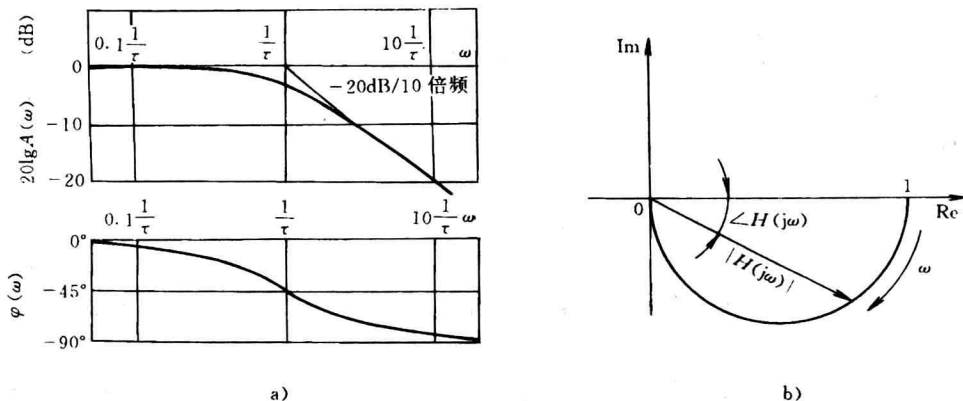


图 1-9 波德图与奈魁斯特图

a) 波德图 b) 奈魁斯特图

如果将 $H(j\omega)$ 的虚部和实部分别作纵横坐标,画出 $\operatorname{Im}(\omega) - \operatorname{Re}(\omega)$ 曲线,并分别在曲线上注明相应的频率 ω ,则所得的图像称为奈魁斯特图,如图 1-9 b 所示。

工程中用幅频特性来说明测试系统对输入信号幅值产生的影响,表征系统对幅值的传输特性。

五、相频特性

式(1-7)中 $\angle H(j\omega)$ 表示输入信号经测试系统后输出信号相位的变化情况。根据式(1-9) $\angle H(j\omega)$ 等于

$$\varphi(\omega) = \angle H(j\omega) = \arctan \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} \quad (1-11)$$

称 $\varphi(\omega)$ 为系统的相频特性。

如果用纵坐标表示 $\varphi(\omega)$,横坐标表示 ω ,则 $\varphi(\omega) - \omega$ 曲线称为相频特性曲线。

如果用纵坐标表示输入、输出信号间的相位差,作线性分划,横坐标代表频率 ω 且按 $\lg\omega$ 分划则画出的 $\varphi(\omega) - \lg\omega$ 曲线图称为相频波德图。

而在图 1-9b 表示的奈魁斯特图上给出了整个频率域的幅频特性和相频特性,对了解系统的特性是比较直观的。在奈魁斯特图的轨迹上,每一点都表示一个特定频率值所对应的幅频特性和相频特性。

需要说明的是,在我们研究测试系统特性时,根据输入信号是否随时间变化的特点,而把通过输入信号和输出信号之间存在着的一定量的关系得出的测试系统特性一般分为静态特性和动态特性。灵敏度、线性度和滞后度为静态特性,幅频特性和相频特性为动态特性。

六、常见测试系统的频率响应特性

许多物理本质完全不同的系统都可用形式完全相同的微分方程式来描述。而完全相同的常系数线性微分方程式经过有关的数学变换后必然会得到完全相同的频率响应特性函数。因此,在研究测试系统的动态特性时,我们完全不必考虑它们之间的物理本质差异。现就常见的一阶和二阶系统的频率响应特性进行讨论。

(一) 一阶系统

在工程上,一般如下式

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-12)$$

所示其最高幂次为一的微分方程所表征的系统称为一阶系统。此式可改写为

$$\frac{a_1 dy(t)}{a_0 dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t)$$

式中 $\frac{a_1}{a_0}$ —— 系统的时间常数,具有时间的量纲,并记为 τ ;

b_0/a_0 —— 系统的灵敏度。

对于任何阶的测试系统来说,根据灵敏度的定义, b_0/a_0 总是表示灵敏度的。考虑到在线性系统中灵敏度 S 为常数,由此可知, S 只起着使输出量增加 S 倍的作用。因此为了方便起见,在讨论任何阶测试系统时,都采用 $S = \frac{b_0}{a_0} = 1$ 。

这样,灵敏度归一化之后,式(1-12)可写成

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = a_0 x(t) \quad (1-13)$$

这类系统的频率响应特性 $H(j\omega)$ 、幅频特性 $A(\omega)$ 、相频特性 $\varphi(\omega)$ 分别为^①

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\tau\omega + 1} \quad (1-14)$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}} \quad (1-15)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\tau\omega) \quad (1-16)$$

下面我们通过实例来进一步说明一阶测试系统的频率响应特性。

图 1-10 是液柱式温度计,若以 $x(t)$ 表示输入信号,即被测温度。
 $y(t)$ 表示输出信号,即示值温度,或对 $x(t)$ 的响应。

根据热传导的定律有

$$q(t) = \frac{x(t) - y(t)}{R} \quad (1-17)$$

$$q(t) = C \frac{dy(t)}{dt} \quad (1-18)$$

式中 $q(t)$ —— 单位时间内输入液柱介质的热量;

C —— 液柱介质的热容,即使介质上升单位温度所需的热量;

R —— 介质的热阻,它与介质本身温度与输入温度之间的差值和散热能力有关。

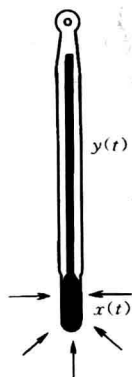


图 1-10 液柱式温度计

① 对式(1-13)作拉普拉斯变换。

上二式中消去 $q(t)$, 并令 $\tau = RC$, 则有

$$\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = x(t)$$

显然它是一阶系统, 根据式(1-14)、(1-15)、(1-16)其频率特性、幅频特性和相频特性分别为

$$H(j\omega) = \frac{1}{j\tau\omega + 1}$$

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \tau\omega$$

一阶测试系统的幅频及相频特性曲线与波德图表示如图 1-11。

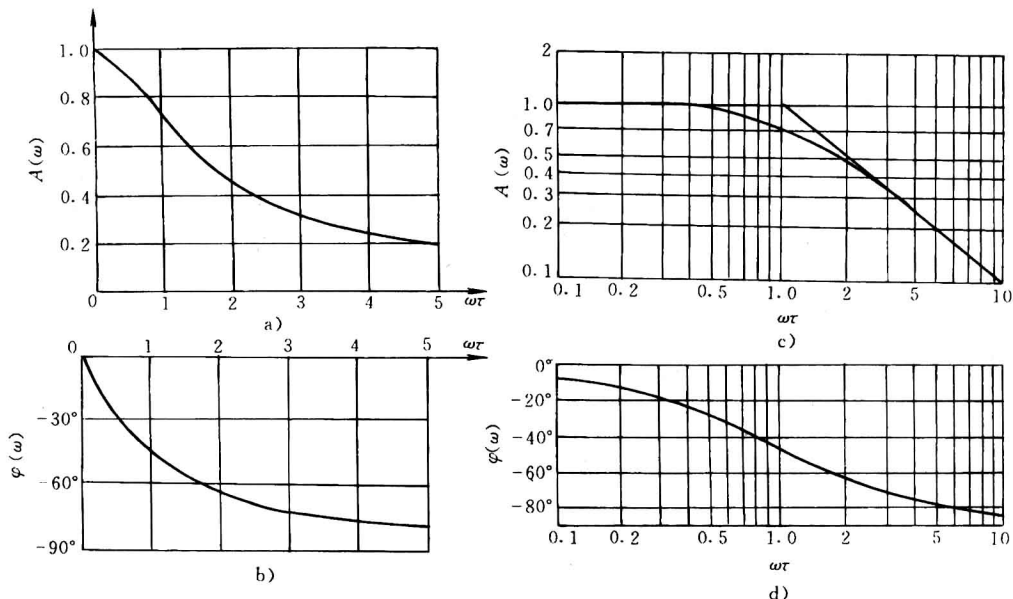


图 1-11 一阶系统的频率特性曲线与波德图

a) 幅频曲线 b) 相频曲线 c) 对数幅频特性 d) 对数相频特性

例 1-3 求一阶系统输入一时域谐函数 $x(t) = A\sin\omega t$, 达到稳态的输出 $y(t)$ 。

解: 因为是一阶系统, 则幅频特性有

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

相频特性有

$$\varphi(\omega) = \angle H(j\omega) = -\arctan \tau\omega$$

所以

$$y(t) = \frac{A}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \sin(\omega t - \arctan \tau\omega)$$

可见, 当 ω 甚小, 即 $\omega^2\tau^2 \ll 1$ 时, 幅值比接近等于 1, 相位滞后度也很小。如 ω 较大, 输出的幅值将变小, 相位滞后接近 90° 。

(二) 二阶系统

在工程上, 一般如下式