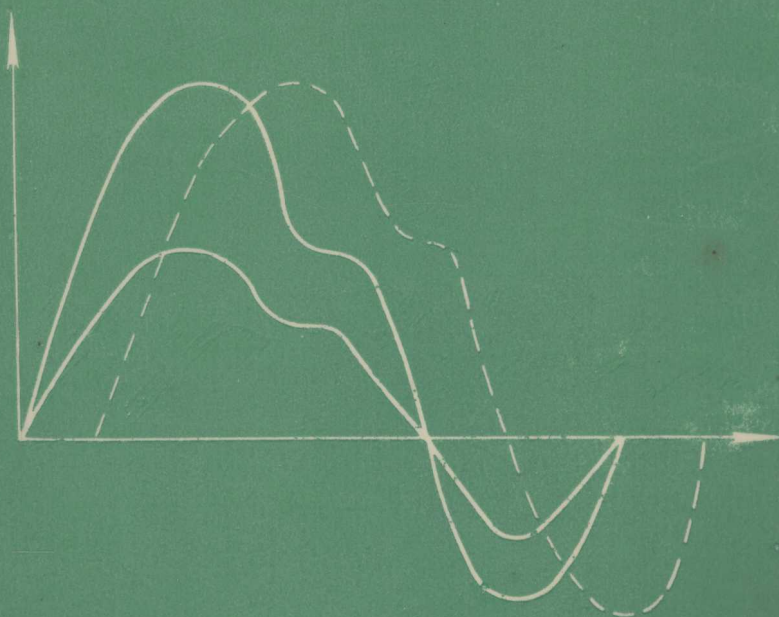


高等工科院校适用

动态测试技术

郑仲民 于永芳 主编



机械工业出版社

高等工科院校适用

动态测试技术

郑仲民 于永芳 主编



机械工业出版社

本书为全国高等专科学校推荐教材。全书共分九章。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。后四章为动态测试技术的应用,有振动测试、位移测量、应变和力的测试、噪声测试等内容。

根据专科教学特点,编写时力求使基础理论充实,注重物理概念,加强了工程参数测试的应用内容,并从生产和科研实际出发,以动态信号的测试内容为主线贯穿全书。本书适用于各类高等专科学校机械类专业,也可作为从事机械工程测试技术人员自学、进修的参考书。

动态测试技术

郑仲民 于永芳 主编

*

责任编辑:林松

版式设计:胡金琰

封面设计:郭景云

责任校对:高文龙

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

河海大学印刷厂印刷

机械工业出版社发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张10.25

·字数245千字

1991年2月北京第一版·1991年2月南京第一次印刷

印数 00,001—05,000

·定价:5.40元

*

ISBN7-111-02781-7/TH·286(x)

前 言

本书系根据1989年8月全国高等专科学校机制专业教材编审委员会制订的教材编写出版计划,以及全国高等专科学校机制专业协会测试技术课程组修订的教学大纲编写的。全国高等专科学校机制专业教材编审委员会对本书进行了评审,决定作为全国高等专科学校推荐教材。

本书在内容上,充分注意了工程专科教学的特点,在基础理论部分注重了物理概念,在工程参数测试部分加强了实际应用。全书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及振动、位移、应变、力、噪声等工程参数测试等部分,并以动态信号为主线贯穿其中。适用于各类高等专科学校机械类专业,也可作为从事机械测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书,书中带“*”号部分可视为参考内容。

本书由南京机械专科学校等五所学校的有关教师协力编写,并得到这些学校领导的关心和支持。参加编写工作的有长春大学于永芳(绪论、第一章、第二章),湘潭机电专科学校刘迎春(第三章),江南大学过大江(第四章、第七章),南京机械专科学校郑仲民(第五章、第六章),沈阳冶金机械专科学校刘克明(第八章、第九章)。由郑仲民和于永芳担任主编。

本书由上海纺织工业专科学校徐文泉副教授担任主审。参加审稿的还有全国高等专科学校机制专业教材编审委员会委员、常州工业技术学院蔡华麟副教授和洛阳工学院常右武副教授、马淑贤工程师等。

本书在正式出版前曾印刷了“试用教材”。在这次编写过程中,使用过“试用教材”的同志提出了一些宝贵意见;参考了一些兄弟院校编写的教材和有关资料;得到江南大学沈鹏飞副教授和长春大学李立解同志的帮助和支持,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。

由于我们的水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请老师、同学和读者批评指正。

编者 1990. 10.

目 录

绪论

- 一、测试技术的作用和任务……………(1)
- 二、测试技术的内容和特点……………(2)
- 三、测试技术的发展概况……………(3)
- 四、课程的性质和学习要求……………(3)

第一章 测试系统特性的描述……………(5)

§ 1—1 测试系统的组成……………(5)

- 一、试验环节……………(5)
- 二、测量环节……………(6)
- 三、数据处理环节……………(6)

§ 1—2 描述测试系统特性的主要参数……………(6)

- 一、灵敏度……………(6)
- 二、线性度……………(7)
- 三、滞后度……………(8)
- 四、幅频特性……………(9)
- 五、相频特性……………(10)
- 六、常见测试系统的频率响应特性……………(11)

§ 1—3 理想测试系统的条件……………(17)

- 一、线性系统及其主要性质……………(17)
- 二、理想测试系统的含义……………(18)
- 三、理想测试系统的条件……………(18)

第二章 常用传感器……………(21)

§ 2—1 传感器的构成和分类……………(21)

- 一、传感器的构成……………(21)
- 二、传感器的分类……………(22)

§ 2—2 电阻式传感器……………(23)

- 一、构成与工作原理……………(23)
- 二、电阻应变片的主要特性及其质量等级指标……………(26)
- 三、应变式传感器的用途……………(27)

§ 2—3 电感式传感器……………(27)

- 一、构成与工作原理……………(27)
- 二、特点与用途……………(31)

§ 2—4 电容式传感器……………(31)

- 一、构成与工作原理……………(31)
- 二、特点与用途……………(33)

§ 2—5 压电式传感器……………(34)

- 一、构成与工作原理……………(34)
- 二、特点与用途……………(36)

§ 2—9 磁电式传感器……………(38)

- 一、构成与工作原理……………(38)
- 二、特点与用途……………(41)

§ 2—7 感应同步器……………(41)

- 一、感应同步器的工作原理……………(41)
- 二、感应同步器的构成……………(43)
- 三、感应同步器输出的处理……………(44)
- 四、几种常见感应同步器的特性参数……………(44)

第三章 信号的中间转换……………(46)

§ 3—1 电桥电路……………(46)

- 一、直流电桥……………(47)
- 二、交流电桥……………(50)
- 三、带感应耦合臂的电桥……………(52)

§ 3—2 调制与解调……………(53)

- 一、电桥调幅与相敏检波……………(53)
- 二、调频及其解调……………(57)

§ 3—3 滤波电路……………(60)

- 一、滤波电路分类……………(60)
- 二、RC 滤波电路原理及特性……………(62)

§ 3—4 电荷放大器……………(65)

- 一、电荷放大器的工作原理……………(65)
- 二、电路组成……………(66)

第四章 信号的显示与记录……………(68)

§ 4—1 光线示波器……………(68)

- 一、基本结构与工作原理……………(68)
- 二、振子特性与匹配网络……………(70)
- 三、振子的选用……………(72)

§ 4—2 X-Y 函数记录仪……………(73)

- 一、工作原理……………(73)
- 二、频率响应特性……………(76)

§ 4—3 磁带记录器……………(78)

- 一、组成和特点……………(78)
- 二、工作原理……………(79)

三、记录方式·····	(81)	二、测量结果的表达方式·····	(130)
四、技术性能参数·····	(83)	三、圆图象的处理和分析·····	(131)
§4-4 显示与记录装置的选择·····	(84)	四、直角坐标图象的处理和分析·····	(132)
第五章 测试信号的处理分析·····	(86)	§7-3 部件移动距离的测量·····	(132)
§5-1 测试信号的分类与特征·····	(86)	一、感应同步器——数显表闭环位移测量系统·····	(132)
§5-2 测试信号的时域分析·····	(87)	* 二、感应同步器——旋转变压器组合位移测量系统·····	(135)
一、均值、方差、均方值·····	(88)	第八章 应变和力的测试·····	(138)
二、相关分析·····	(90)	§8-1 应变的测试·····	(138)
§5-3 测试信号的幅值域分析·····	(94)	一、应变片的选择与粘贴·····	(138)
一、概率密度函数 $p(x)$ ·····	(94)	二、试件上的布片与接桥·····	(139)
二、概率分布函数 $P(x)$ ·····	(94)	三、提高应变测试精度的措施·····	(140)
§5-4 测试信号的频率域分析·····	(96)	四、应变测试信号的处理分析·····	(142)
一、自功率谱密度函数 $G_x(f)$ ·····	(96)	§8-2 力的测试·····	(142)
二、互功率谱密度函数 $G_{xy}(f)$ ·····	(97)	一、力的测试方法与测力传感器选用·····	(142)
三、相干函数 $\gamma_{xy}^2(f)$ ·····	(98)	二、拉、压力测试及所用传感器·····	(142)
§5-5 倒频谱分析·····	(99)	三、切削力的测试·····	(143)
* §5-6 采样、窗函数·····	(100)	第九章 噪声测试·····	(147)
一、采样·····	(100)	§9-1 噪声的量度·····	(147)
二、窗函数与泄漏·····	(101)	一、噪声的物理度量参数·····	(147)
§5-7 信号处理分析仪器简介·····	(103)	二、按人耳的主观感受度量噪声的参数·····	(148)
一、频谱分析仪·····	(103)	三、声级与频率计权网络·····	(149)
二、相关测量仪·····	(103)	§9-2 噪声测试仪器——声级计·····	(150)
三、信号处理机·····	(104)	一、声电传感器·····	(150)
第六章 振动测试·····	(109)	二、放大器与衰减器·····	(151)
§6-1 振动测试仪器选用·····	(109)	三、频率计权网络·····	(151)
§6-2 机械振动状态测试·····	(110)	四、均方根检波器·····	(151)
一、空运转试验·····	(111)	§9-3 噪声测试方法·····	(151)
二、切削试验·····	(113)	一、测试环境·····	(151)
三、机械运行状况监视与故障诊断·····	(113)	二、声压级(声级)测试·····	(152)
§6-3 机械动态特性测试·····	(114)	三、声功率级的测试·····	(152)
一、激振方式与激振器·····	(114)	* §9-4 噪声测试中的几个问题及其计算·····	(154)
二、机械动态特性主要参数测定·····	(117)	一、声压相加和声压级相加·····	(154)
§6-4 测试系统(装置)的定度·····	(121)	二、平均声压级的计算·····	(155)
第七章 位移测量·····	(124)	三、等效连续A声级及其计算·····	(155)
§7-1 位移传感器的选用·····	(124)	四、声级计的校准·····	(156)
一、测量范围·····	(124)	主要参考文献·····	(157)
二、线性度·····	(125)		
三、精确度·····	(127)		
* §7-2 回转轴误差运动的测量·····	(128)		
一、常用的测量方法·····	(128)		

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、电子通讯、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，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，以及这些方面的基础理论，测试技术和数据处理等方面已日益为人们所重视。

在机械工程中，通过对有关物理量的测量（如位移、速度、加速度、力、力矩、功率、机械振动、噪声、温度等），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，检查其物理性能和机械性能，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所表示的铣床加工工艺过程框图中图0-1a为普通铣床的加工工艺过程。在给定的

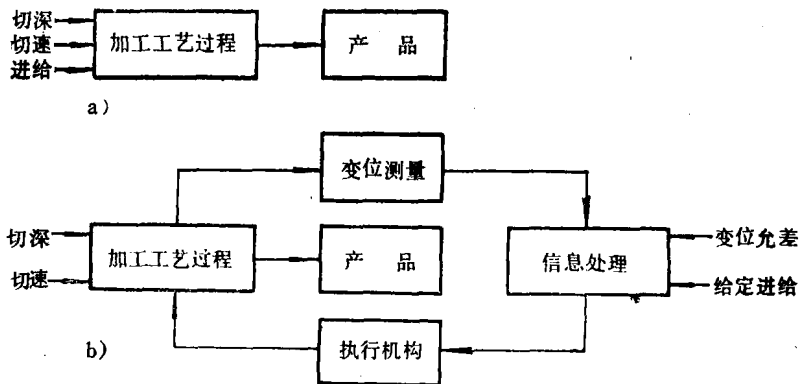


图0-1 铣床的加工工艺过程

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

切深、切速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。

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。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。

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其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。

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。

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。

基本技能主要包括，一方面针对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。其它诸如波形储存、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)。

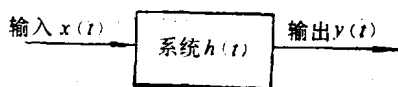


图1-1 系统、输入和输出

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 $h(t)$;

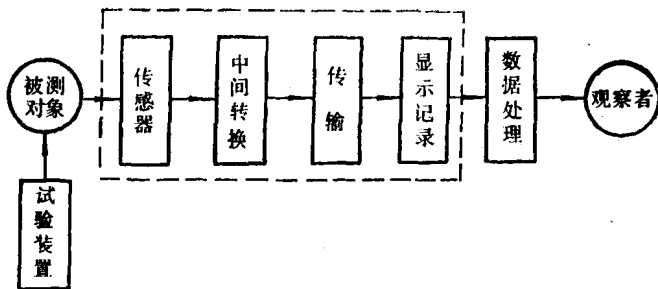
如果系统的传输特性 $h(t)$ 已知,输出 $y(t)$ 可测,则通过 $h(t)$ 和 $y(t)$ 就可以推断出输入信号 $x(t)$;

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 $y(t)$ 。

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。

§ 1-1 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。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。

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虚线框），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、记录仪器中去。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 是用来把传感器输出的信号，经过放大、滤波调制、解调、……转换成一定功率的电信号，使之便于显示、记录和分析。这部分常常根据具体测试对象以及选用的传感器形式及特性而有相应的电路。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。它是整个测试环节的核心，也是比较复杂的部分。

显示、记录器 是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，应要求它们不失真地记录或显示其测试结果。

三、数据处理环节

它是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。

§ 1-2 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

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

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，对于系统特性呈直线关系的系统则有

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

$$= \text{常数}$$

对于特性为非直线关系的系统, 这时该系统的灵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。

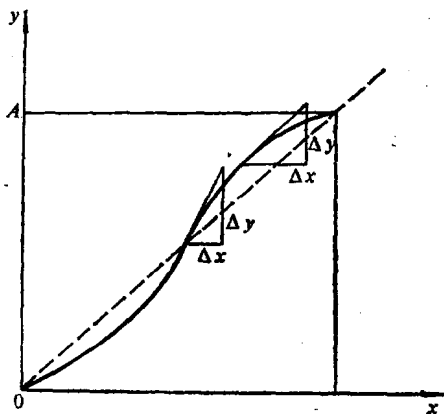


图1-3 灵敏度

例1 一差动变压器式位移传感器, 在位移变化1mm时, 输出电压变化达1200 mV, 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较差。

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。

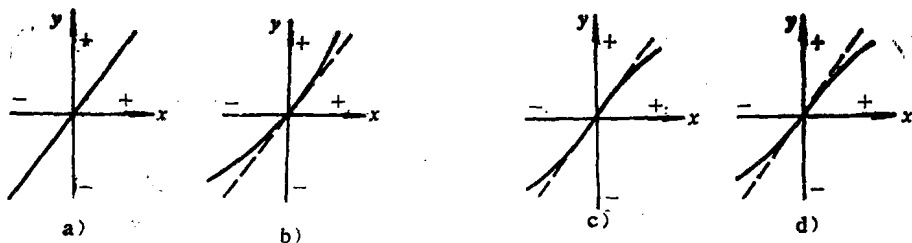


图1-4 典型的定度曲线

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

并且可以认为图b、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标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标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。

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。最大偏差比较法介之两者之间，因而是较常用的一种方法。

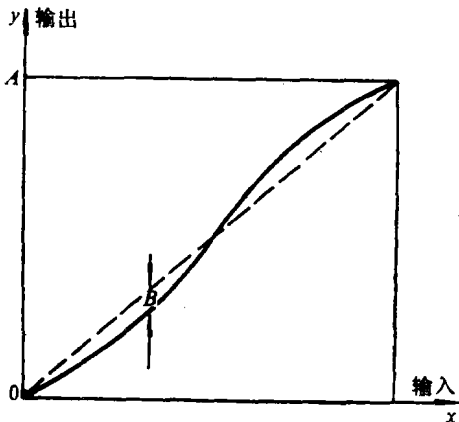


图1-5 两点连线法

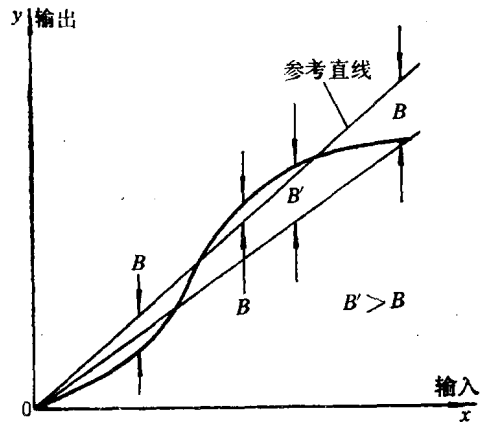


图1-6 最大偏差比较法

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

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

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。由后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。

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。

上述过程经过傅氏变换后,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

$$H(j\omega) = R_e(\omega) + j I_m(\omega) \quad (1-9)$$

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

$A(\omega)$ ($|H(j\omega)|$)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,也称幅频伯德图(在图上横坐标按 $\lg \omega$ 分划,纵坐标代表幅值比 $A(\omega)$),

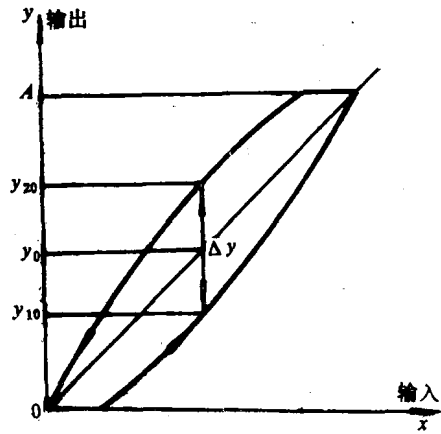


图1-7 滞后

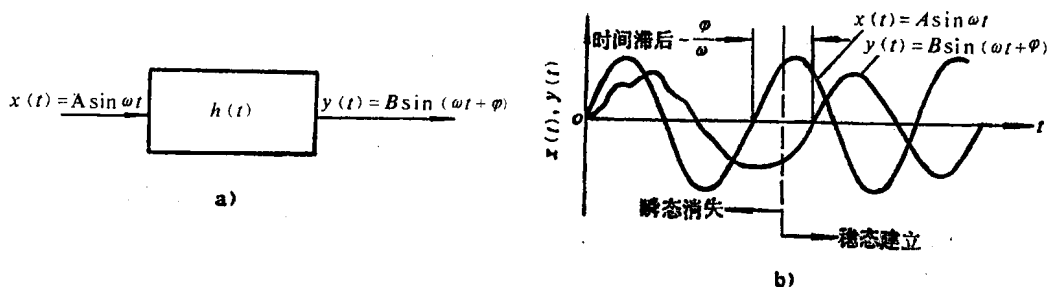


图1-8 正弦输入的稳态响应

a) 稳态响应框图

b) 稳态响应波形

但按 $20 \lg A(\omega)$ 分划, 单位是分贝。), 如图1-9a所示。

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

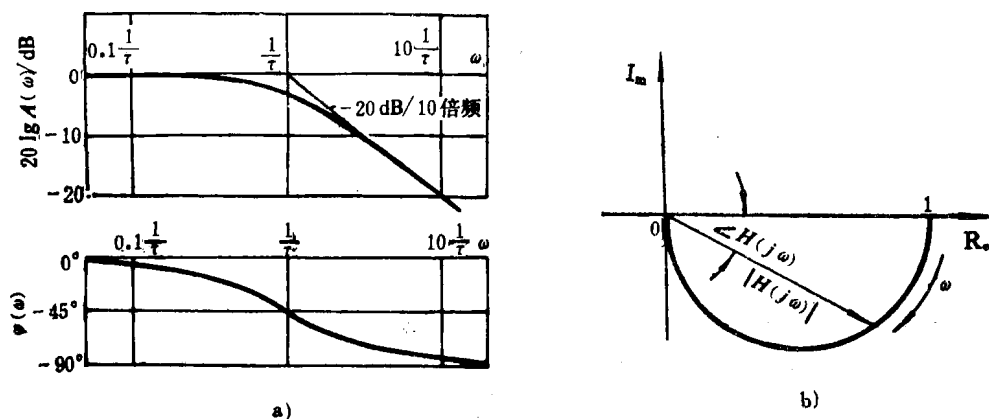


图1-9 伯德图与奈魁斯特图

a) 伯德图

b) 奈魁斯特图

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

$$\varphi(\omega) = \angle H(j\omega) = \arctg \frac{I_m(\omega)}{R_e(\omega)} \quad (1-11)$$

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 $\varphi(\omega) - \lg \omega$ 曲线图称为相频伯德图。

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:

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

式中 $\frac{a_1}{a_0}$ 具有时间的量纲,称为系统的时间常数,并记为 τ ; b_0/a_0 是系统的灵敏度。

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 只起着一个使输出量增加 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[⊖]

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

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

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

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;

⊖对式(1-13)作拉普拉斯变换。