

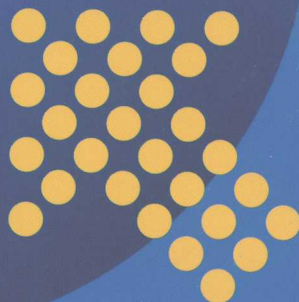
21世纪高等学校规划教材



JIXIE CESHI JISHU

机械测试技术

赵汗青 孙步功 主 编
臧建所 王振禄 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

21 世纪高等院校教材

机械测试技术

第三版



机械工业出版社
China Machine Press

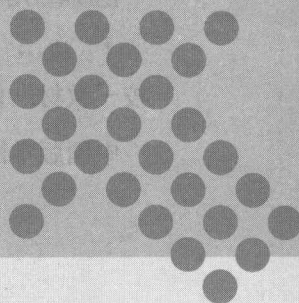
21世纪高等学校规划教材



JIXIE CESHI JISHU

机械测试技术

主 编	赵汗青	孙步功
副主编	臧建所	王振禄
编 写	杨 静	李妙琪
主 审	韩建海	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书主要包括：绪论测试系统基本特性、传感器原理、机械相关量的测试方法、测试信号处理、测试干扰及测试结果处理、机械测试技术的典型应用、机械测试实验。每个章节中均设有教学提示、教学要求、本章小结、思考与练习。本书注重对学生获取知识、分析问题与解决测试技术问题能力的培养，侧重学生工程素质与创新思维能力的提高。

本书可作为高等院校机械类、近机类相关专业的教材，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械测试技术/赵汗青，孙步功主编. —北京：中国电力出版社，
2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8176 - 3

I. 机… II. ①赵…②孙… III. 机械工程—测试技术—高等学校—教材 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 005230 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 4 月第一版 2009 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 324 千字

定价 22.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

本书是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作,富有经验的教师以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写的,能够满足不同类型和层次的教学需要。

“机械测试技术”是机械类、近机类各专业的一门专业基础课程,着重阐述测试装置的基本特性和传感器的基本原理,全面讲述机械相关量的测试方法和测试信号的处理方法,兼有基础性、实用性、知识性、实践性与创新性等特点,是培养现代复合型人才的重要基础课程之一。本书的编写既体现了现代测试技术、材料科学、信息技术的交叉与融合,又体现了测试技术的历史传承和发展趋势。在内容的选择和编写上有如下特点:

- (1) 内容系统丰富、重点突出,每章节既相互联系,又相对独立;
- (2) 考虑到机械类、近机类各专业的需要,内容的选择和安排具有一定的通用性;
- (3) 为加深理解、巩固知识,每章后附有思考与练习,供学生及时复习;
- (4) 将实验指导编写为教材的一部分,体现了理论与实践的统一性。

本书由黑龙江科技学院赵汗青和甘肃农业大学孙步功主编,黑龙江科技学院臧建所、兰州城市学院王振禄副主编。其中,孙步功编写前言、第3、4、6和7章;甘肃农业大学李妙琪和天水师范学院杨静共同编写第1章;臧建所编写第2章;赵汗青编写第5章;王振禄编写第8章。

本书由河南科技大学韩建海教授主审,对书稿的编写提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

在全书的编写过程中,许多老师给予了大力支持,谨在此表示感谢。

由于编者水平所限,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2008年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测试技术的地位和作用	1
1.2 测试系统的组成及特点	2
1.3 机械测试技术的发展趋势	3
1.4 课程的研究内容和性质	4
本章小结	4
思考与练习	4
第 2 章 测试系统基本特性	5
2.1 测试系统概论	5
2.2 测试系统静态响应特性	10
2.3 测试系统动态特性数学描述	13
2.4 测试系统动态特性测量方法	23
本章小结	26
思考与练习	26
第 3 章 传感器原理	27
3.1 传感器的组成及分类	27
3.2 常用传感器	28
3.3 传感器应用及开发趋势	43
3.4 传感器选用原则	54
本章小结	55
思考与练习	55
第 4 章 机械相关量的测试方法	56
4.1 力的测量	56
4.2 扭矩和转速测量	67
4.3 位移、速度和加速度测量	72
4.4 振动测量	87
4.5 噪声测量	95
4.6 温度测量	105
本章小结	112
思考与练习	113
第 5 章 测试信号处理	114
5.1 变换电路	114
5.2 信号调制与解调	118

5.3 模拟信号滤波	124
5.4 模拟和数字转换	129
本章小结	132
思考与练习	132
第6章 测试干扰及测试结果处理	134
6.1 测试中干扰的控制	134
6.2 误差理论	139
6.3 数据处理	163
本章小结	164
思考与练习	164
第7章 机械测试技术的典型应用	166
7.1 机械中大位移测试	166
7.2 机械中的微位移测试	168
7.3 机械振动的实时测试	173
7.4 机械阻抗试验	179
本章小结	187
思考与练习	187
第8章 机械测试实验	188
8.1 位移测量仪静态特性参数的测试	188
8.2 压电式加速度计灵敏度的校准	191
8.3 稳态正弦激振的悬臂梁动态特性参数的测试	194
8.4 随机激振的悬臂梁动态特性参数的测试	196
8.5 瞬态激振的悬臂梁动态特性参数的测试	197
8.6 傅里叶分析仪法测试回转轴运动误差	198
8.7 数据处理装置法测试回转轴运动误差	203
8.8 实验报告的要求及书写	204
本章小结	206
思考与练习	206
参考文献	207

第1章 绪 论

教学提示:

本章介绍测试技术的地位和作用、测试系统的组成及特点、机械测试技术的发展趋势以及本课程的研究内容和性质。

教学要求:

- (1) 了解测试技术的地位和作用。
- (2) 了解测试系统的组成及特点。
- (3) 了解机械测试技术的发展趋势。
- (4) 了解本课程的研究内容和性质。

1.1 测试技术的地位和作用

在科学研究中,任何科学理论的建立和科学研究成果的提出都必须通过大量的试验与测量,并对所获得的数据进行分析和计算,以验证科学理论及研究成果的正确性和可靠性。在工农业生产过程中,为了保证生产的正常进行,必须对生产过程中的各种参数进行测量,并在分析测量结果的基础上,对生产过程进行监视和控制,以保证产品的质量。在这些测量过程中所应用的测量手段就是测量仪器或仪表,而应用测量仪器或仪表来实现测量目的的技术工艺则称为测试技术。现代化的测试仪器是科学研究和生产实践的必要手段,是科学技术发展的重要标志,同时也是科学研究和生产技术发展的一个重要技术基础。

因为测试技术随着科学技术和生产实践的向前发展,就要求提供新的测试手段以满足需要,这样又促进了测试仪器以及测试技术的发展,而科学技术的发展又为研制新型的测试仪器提供了条件。近30年来,随着电子技术和计算机应用技术的飞速发展,传统的测试技术得到了较大的改进和提高,如测试准确度和灵敏度得到了提高,测试速度变得更快,测试结果能连续实时自动记录,并可用计算机对测试结果进行分析计算,实时完成生产过程的自动控制等。

在科学研究和工程技术上所要测量的参数大多为非电量,如机械量的位移、速度和加速度,热工量的温度、压力和流量,成分量的化学成分和浓度及状态量的颜色、磨损量和裂纹等。这些参数的物理特性或化学特性千差万别,在测量过程中,测量结果的传输和保存及显示非常不方便,因而促使人们研究用电量测试的手段来进行这些非电量的测试。这是由于电测技术具有测量精度高、反应速度快、数据传输方便,并且能够连续自动记录等优点。如此便形成了非电量的电测技术。

在工程技术领域,测试技术的作用有如下几个方面。

- (1) 通过测量生产过程中的有关工艺参数,对生产过程的运行情况进行监视,或者对生产设备在运转过程中的有关技术参数进行测量,并对测试结果进行分析,判断设备的工作状态。
- (2) 将生产过程中各种工艺参数的测量结果与要求的数值相比较,并且根据偏差的大小

范围要求进行控制,以对工艺参数进行调整和控制,保证生产过程的要求。

(3) 根据对工艺过程参数和设备性能参数测试结果的分析评价,找出存在的问题,并提出改进工艺过程和设备性能的措施。在改进措施实施以后,是否达到了改进的效果,仍需进行测试来分析和评定。这些测试结果是工艺过程参数及设备性能参数进一步改进设计的基础。

(4) 通过测试技术手段研究机械系统的响应特性、系统参数并进行载荷识别,为机械系统的动态设计提供依据。

在机械制造工业、电力工业、石油工业、化学工业、轻工食品和国防工业中,都需要采用非电量的电测手段来对有关参数进行测量,并且这种测量随着科技和生产的发展越来越多地从静态物理量测量向动态物理量测量方向发展。这就对测试仪器和测试手段提出了更高的要求。

1.2 测试系统的组成及特点

一个测试系统要完成对被测量的测试,首先必须要获得被测量的信息,并且根据被测量信息的物理学特性,将其转换成容易处理和传输的电量信号,然后将电量信号进行变换或放大,再用指示仪或记录仪将信息显示或记录下来。有的测试系统还需要对信号进行处理,以获得反映实际被测量数值大小的测试结果。一般的测试系统包括传感器(信息的获得)、测量电路、放大器(信号的变换和调理)、数据处理装置(信号的处理)、显示与记录装置(信号的显示)。这些组成部分之间的关系如图1-1所示。

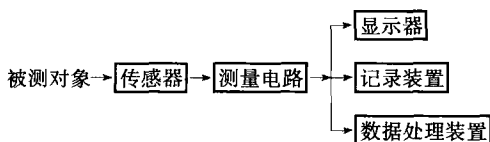


图 1-1 测试系统组成

传感器处于被测对象与测试系统的接口位置,它是将被测量的非电信息转换成电信号的装置,因此是测试系统获得信号输入的重要元件。传感器直接从被测对象中提取被测量的信息,感受其变化并将其变换成便于测量的其他电量信号。例如,将速度变换成电压,将应变变换成电

阻,将流量变换成电流等。因此,传感器获得信息的正确与否直接影响着整个测试系统的精度。

测量电路又称中间转换器,它的作用是将传感器输出的电信号进行传输、放大、转换等。测量电路的种类根据传感器的类型而定,如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值的变化变换成电流或电压的变化输出,所以它属于测试信号的转换电路。由于测量电路的输出信号一般都比较小,不能直接驱动显示或记录装置工作,故常常需将信号加以放大,因此在测量电路中通常具有放大器。为了使被测量信号易于传播和处理,测量电路中有时还具有调制与解调器、模数转换器等。

测试结果的显示目前通常有三种方式,即模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示是利用指针相对标尺的位置来指示;数字显示是用数字形式来显示测试结果的数值大小;图像显示是用屏幕显示读数或者被测参数的变化曲线。在实际调试过程中,有时不仅要读出被测量的具体数值,而且还要了解它的变化过程,尤其是在动态测试过程中,测试结果随时变化,无法用显示仪器指示,在这种情况下,就必须将测量信号送入记录装置中自动记录下来。

以计算机为基础,配备部分外设装置组成测试信号的记录和处理系统,是近年来测试系

统的发展趋势。测试系统中的计算机既可以完成测试结果的记录或显示,又能对测试结果进行计算处理,并且对测试结果分析处理方式可根据测试者的要求编写不同的程序,使得测试系统的功能大大加强。

1.3 机械测试技术的发展趋势

科学技术的快速发展和生产实践领域的不断扩大,对测试技术提出了越来越高的要求,因此也促进了测试技术的迅速发展。机械测试技术除了进一步提高测试的精度和可靠性外,总的发展趋势是测试系统的小型化、智能化、多功能化及无接触化,其特点主要表现在下述几个方面。

1. 测试仪器应用范围的扩大

随着科学技术的不断发展,对测试仪器的性能要求也在不断提高,特别是对生产实际和科学研究过程中极端参数的测量,要求原有测试仪器的技术指标不断提高,以扩大其应用范围。例如,连续测量液态金属的温度、连续长时间测量超高温介质的温度(2500~3000℃),超低温温度的连续测量,超高压的测量,超精度质量测量等。这些极端参数的测试要求测试仪器具有较大的测量范围,并且具有足够高的精度和可靠性。

2. 新型传感器的研究

测试技术应用的领域随着生产和科学研究的发展在不断扩大,需要测量的参数种类也在不断增加,如颜色、味觉、化学成分、超高温、超低温等。因此,促使人们不断地探讨新型的测量机理,研制新型的传感器及测量系统。这方面研究除了采用新的物理效应、化学反应及生物功能外,还不断地研究具有仿生功能的新型传感器。在新型传感器的开发研究过程中,新型传感器敏感元件材料的开发与应用具有十分重要的意义。目前,半导体材料、陶瓷材料及高分子聚合材料作为传感器敏感元件材料的研究正在不断深入,开发出了仿生化、智能化、生物化的传感器。

3. 多功能测试仪器的开发

传统的传感器大多是进行一个点的单参数测试,这已不能满足生产实际和科学研究发展的需要。在有些场合,希望在某一测量点测得多个参数,因此需要具有多种参数同时变换的传感器,并且测量电路能够将不同参数的电信号同时处理和记录,也就是要求测试系统的多参数测量和多功能化。例如,要同时测量一点的温度和湿度,就必须寻求一种能同时感受温度和湿度的敏感元件材料,并将其制造成同时将温度和湿度变换成不同电量的传感器,并且互不影响。由钛酸钡和钛酸锶组成的多孔陶瓷的电容量与温度有关,而其电阻值与湿度呈函数关系,这样就可以通过测量电容和电阻值间接获得温度和湿度的数值。

多功能化测试系统的另一层含义是指除传感器之外的其他测试部分具有普遍的通用性,即测量电路对电信号的转换和放大及测试系统的显示和记录可应用于多种场合下不同种类参数的测量。对于不同参数的测量,只是对测试系统连接相应的传感器。这样,就使得测试系统的功能和应用范围得到了扩大。

4. 测试系统的智能化

随着微电子技术和计算机技术在测试领域的应用,微处理器与传感器的相互结合和与测试信号处理过程的结合使得测试系统具有一定的智能化功能。微电子处理器的信号调

节与微机接口电路和信号处理电路可与传感器封装成一体,使得传感器不仅仅具有信号的检测能力,同时还可以对信号进行判断和处理,并且根据测试信号的变化自动调节信号处理电路的信号放大和传递方式。这样,可以使测量精度得到较大的提高,并且可以消除测试过程中随机因素的干扰,以得到精确的测试结果。

1.4 课程的研究内容和性质

机械测试技术课程所研究的对象是科学研究和工程技术领域测试过程中常用的传感器、中间变换电路及显示和记录装置的结构和工作原理,测试系统的静态和动态特性及评价方法,测试信号的分析及测量误差和数据处理方法,常见物理量的测试过程及测试方法。

机械测试技术是一门技术基础课,与本课程直接相关的基础知识包括数学、物理学、工程力学、电工学、电子学、计算机技术等。通过本课程的学习,使学生掌握测试系统的组成特点和组成方法,具备静态和动态测试所需要的基本知识和技能,为进行工程实际测试打下坚实的基础。学生在学完本课程之后应具备以下五方面的知识和能力。

(1) 掌握常用传感器的种类、结构特点和工作原理,并具备根据实际测试要求选择合适传感器的能力。

(2) 熟悉传感器输出信号的常用处理方法及中间变换电路的结构、工作原理、适用特点,具备根据不同种类传感器选用适宜的中间变换电路,进而设计中间变换电路的能力。

(3) 了解和掌握各种信号显示与记录装置的结构、工作原理及适用特点,并能根据实际需要选用合理的显示与记录装置。

(4) 在掌握测试系统特性的基础上,具备根据实际被测量的特点,将传感器、中间变换电路和显示记录装置正确地组成测试系统的能力。

(5) 掌握测试信号的时域、频域描述及分析方法,具备根据测试结果正确解决实际问题的工作能力。

本课程具有较强的实践性,因此要求在学习过程中,加强理论与实践的结合,注重实验课对理论知识理解和掌握的功用,使学生通过课程的学习具备实际的测试工作能力。

本章小结

本章重点介绍了测试技术的地位和作用、测试系统的组成及特点、机械测试技术的发展趋势及本课程的研究内容和性质。

思考与练习

- 1-1 一般的测试系统由哪些部分组成?
- 1-2 简述测试技术在工程技术领域的作用。
- 1-3 传感器在测试系统中的作用是什么?
- 1-4 测试结果的显示通常有哪几种方式?
- 1-5 测试技术总的发展趋势有哪几个方面?

第2章 测试系统基本特性

教学提示:

本章介绍线性系统的基本性质,描述线性系统的静态特性和动态特性,说明主要的静态、动态特性参数测量方法。

教学要求:

- (1) 掌握线性系统及其主要特性。
- (2) 了解测试系统与输入、输出的关系及其在典型输入下的响应。
- (3) 掌握描述测试系统的静态特性各指标的含义。
- (4) 掌握一、二阶测试系统的频率响应特性。
- (5) 掌握描述测试系统的动态特性方法。

2.1 测试系统概论

测试技术是实验科学的一部分,主要研究各种物理量的测量原理和测量信号的分析处理方法,是进行各种科学实验研究和生产过程参数测量必不可少的手段,起着与人的感官相同的作用。在进行物理量测试时,被测的物理量需要经过检测传感、信号调理、信号处理、显示记录及存储后提供给观测者。在整个测试过程中要用到各种各样的系统和仪器,由此组成了所谓的测试系统。一般地说,测试系统除了被测对象和测试人员之外,往往还有测量系统、标定系统和激励系统三部分。

随着测试技术应用领域的日益广泛,测试的目的和要求存在很大的不同,测试系统的组成、复杂程度也有很大差别。有的测试系统比较简单,由测试设备直接读取数据,显示结果,完成测试过程,而相当多的测试系统是比较复杂的。如图2-1所示的温度测试系统,包括传感器、温度信号调理器、数据采集器等测试硬件和测试分析软件。每部分都是由大量的电子元件所组成。因此,“测试系统”有时是指由众多环节组成的复杂的测试系统,有时则是指测试系统中的各组成环节,例如,传感器、放大器、各种中间变换器、记录器,甚至一个简单的RC滤波单元等。

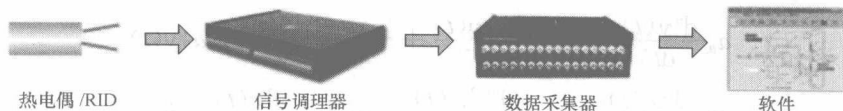


图 2-1 温度的测试系统

2.1.1 对测试系统的基本要求

通常,测试系统是为完成某种物理量的测量而由具有某一种或多种变换特性的物理系统构成的总体。把被测的量称为输入量 $x(t)$, 而把经测试系统传输或变换后的量称为输出量 $y(t)$, 构成测试系统的物理系统的物理性质不同, 会使同样功能的系统具有不同的使用特

性。例如,弹簧秤在进行对静态物体重量的测量时,就是一种比例系统,它将重量转换成与之成比例的线性位移,即输入(重量)、输出(弹簧位移)和弹簧特性 k (k 为弹簧刚度系数)三者之间有如下关系:

$$y(t) = kx(t)$$

但弹簧秤不能称量快速变化的重量值,而具有实时测量功能的电子皮带秤可以检测快速变化的重量值。这是由于构成两种测量系统的物理系统的物理结构的性质不同而造成的。弹簧秤是一种机械系统,电子皮带秤是一种电子系统,这种由测试系统自身的物理结构所决定的测试系统对信号传递变换的影响特性称为测试系统的传递特性,简称系统特性。

通常的工程测试问题总是处理输入量 $x(t)$ 、系统的传输特性 $h(t)$ 和输出量 $y(t)$ 三者之间的关系,如图2-2所示。三者应满足如下关系:

- 1) 已知输入量和系统的传递特性,则可求出系统的输出量;
- 2) 已知系统的输入量和输出量,则可知道系统的传递特性;
- 3) 已知系统的传递特性和输出量,来推知系统的输入量。

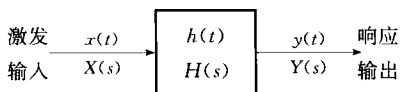


图2-2 系统输入和输出

在测试工作中,往往应该把研究对象和测试系统作为一个系统来考察。这是因为测试装置(如激振器和某些传感器)会对被测对象产生反作用、从而对输出量产生影响。例如,在机床激振试验中,如果把输入到激振器的电流作为“输入”,那么激振器本身的传输特性就必须和机床的传输特性结合在一起考虑。如果把测振传感器的输出电量当作系统的输出,那么该系统也必然包括了测振传感器这一环节,从而应考虑其传输特性。只有首先确定测试系统的特性,才能从测试结果中正确评价所研究对象的特性。

2.1.2 线性系统及其主要性质

理想的测试系统应该是输入、输出关系确定,输出与输入呈线性关系和时不变性。即对应于每一个输入量,都应只有单一的输出量与之对应,其中以输出和输入呈线性关系为最佳。

线性系统的状态变量(或输出变量)与输入变量间的因果关系可用线性微分方程描述,即当系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间的关系可用常系数线性微分方程式(2-1)来描述时,则称该系统为时不变线性系统,也称定常线性系统。其中, t 为时间自变量。从数学来看这种系统的系数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 均为常数,既不随时间而变化,也不是自变量 x 、因变量 y 及它们各阶导数的函数。

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (2-1)$$

大量的物理系统往往都不是线性系统。但是,通过近似处理和合理简化,可以近似地用线性系统来处理。例如,在处理输出轴上的摩擦力矩时,常将静摩擦当作与速度成比例的黏性摩擦来处理,以便得出一些可用来指导设计的结论。而实际上大多数物理系统都很难理想化,与理想系统相比,具有如下几点差异。

- (1) 相当多的实际测试系统,都不可能在较大的工作范围内完全保持线性,而只能限制

在一定的工作范围内和一定的误差允许范围内近似地作为线性处理。

(2) 系统常系数线性微分方程中的系数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$, 严格地说, 对许多实际测试系统都是随时间而缓慢变化的微变量。例如, 弹性材料的弹性模量, 电子元件的电阻、电容等都会受温度的影响而随时间产生微量变化。但在工程上, 常可以以足够的精度认为多数常见的物理系统中的系数 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 是时不变的常数, 即把时微变系统处理为线性时不变系统。

(3) 常见的实际物理系统, 在描述其输入/输出关系的微分方程中, 各项系数中的 m 和 n 的关系, 一般情况下都是 $m < n$, 并且通常其输入只有一项 $b_0 x(t)$ 。

若以 $x(t) \rightarrow y(t)$ 表示上述系统的输入、输出的对应关系, 则时不变线性系统具有以下一些主要性质。

1. 符合叠加原理

当几个输入同时作用于线性系统时, 则其响应等于各个输入单独作用于该系统的响应之和。即

若

$$x_1(t) \rightarrow y_1(t)$$

$$x_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则

$$[x_1(t) \pm x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) \pm y_2(t)] \quad (2-2)$$

符合叠加原理, 意味着作用于线性系统的各个输入所产生的输出互不影响, 一个输入的存在绝不影响另一输入所引起的输出。而在分析众多输入同时加在系统上所产生的总效果时, 可以先分别分析单个输入(假定其他输入不存在)的效果, 然后将这些效果叠加起来以表示总的效果。

作为叠加性质的直接结果, 线性系统的一个重要性质是系统的响应可以分解为两个部分: 零输入响应和零状态响应。前者指由非零初始状态所引起的响应; 后者则指由输入引起的响应, 两者可分别计算。这一性质为线性系统的分析和研究带来了很大的方便。

2. 比例特性

若线性系统的输入扩大 k 倍, 则其响应也将扩大 k 倍, 即对于任意常数 k , 必有

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$kx(t) \rightarrow ky(t) \quad (2-3)$$

比例特性又称均匀性或齐次性。

3. 微分特性

系统对输入导数的响应等于对原输入响应的导数, 即

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt} \quad (2-4)$$

4. 积分特性

如系统的初始状态均为零, 则系统对输入积分的响应等同于对原输入响应的积分, 即

若

$$x(t) \rightarrow y(t)$$

则

$$\int_0^{t_0} x(t) dt \rightarrow \int_0^{t_0} y(t) dt \quad (2-5)$$

5. 频率保持特性

若输入为某一频率的简谐（正弦或余弦）信号，则系统的稳态输出必是同频率的简谐信号。

由于 $x(t) \rightarrow y(t)$ ，按线性系统的比例特性，对于某一已知频率 ω ，有

$$\omega^2 x(t) \rightarrow \omega^2 y(t)$$

又根据线性系统的微分特性，有

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} \rightarrow \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

应用叠加原理，有

$$\left[\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) \right] \rightarrow \left[\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega^2 y(t) \right]$$

现令输入为某一单一频率的简谐信号，记作 $x(t) = X_0 e^{j\omega t}$ ，那么其二阶导数应为

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \frac{d^2 (X_0 e^{j\omega t})}{dt^2} = (j\omega)^2 X_0 e^{j\omega t} = -\omega^2 x(t)$$

由此，得

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) = 0$$

相应的输出也应为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega^2 y(t) = 0$$

于是输出 $y(t)$ 唯一的可能解是

$$y(t) = Y_0 e^{j(\omega t + \varphi_0)} \quad (2-6)$$

线性系统的这些主要特性，特别是叠加原理和频率保持特性，在测试工作中具有重要的作用。假如已知系统是线性的，并已知其输入的频率，那么依据频率保持特性，可以认定测得信号中只有与输入频率相同的成分才真正是由该输入引起的输出，而其他频率成分都是噪声（干扰）。进而可以依据这一特性，采用相应的滤波技术，在很强的噪声干扰下，把有用的信息提取出来。信号的频域函数，实际上是用信号的各频率成分的叠加来描述的。根据叠加原理和频率保持特性，研究复杂输入信号所引起的输出时，就可以转换到频域中去研究，研究输入频域函数所产生的输出的频域函数。实际上在频域处理问题，往往比较方便和简捷。

2.1.3 有关测试和测试系统的若干术语

为了便于今后讨论，在本节中将介绍若干有关测试和测试系统的术语，其中大部分在先修课程已有过介绍，此处仅作必要的回顾。

1. 测量、计量和测试

测量、计量和测试三者关系密切。一般认为，测量是指以确定被测对象量值为目的的全部操作，计量是指实现单位统一和量值准确可靠的测量，而测试是具有试验性质的测量，也可理解为测量和试验的综合。

根据被测量是否随时间变化,可将测量分为静态测量和动态测量。静态测量是指测量期间被测量值可认为是恒定的测量。动态测量是为确定量的瞬时值所进行的测量。

2. 测量系统的误差和准确度

系统的示值总是有误差的。测量系统的示值和被测量的真值之间的差值称为系统的示值误差。在不引起混淆的前提下,可简称为测量系统的误差。

一般情况下,真值是未知的,只能用所谓的约定真值来代替真值。按规定在特定条件下保存在国际计量局的基准,可以被认为是某量的真值。例如,国际千克基准,可认为是真值 1kg。在实际测量中,通常利用被测量的实际值、已修正过的算术平均值、计量标准器所复现的量值作为约定真值。其中,实际值是指满足规定准确度的可用来代替真值使用的量值。例如,在计量检定中通常把高一等级计量标准所复现的量值称为实际值。

测量系统的准确度是表示测量系统给出接近于被测量真值的示值的能力,它反映测量系统的总误差。测量系统的总误差包括系统误差和随机误差两部分。测量系统的随机误差分量可用对同一被测量在同一行程方向连续进行多次测量,其示值的分散性来表述。通常用测量系统的重复性误差来描述。

在实际工作中,往往使用到测量系统的引用误差。引用误差是指测量系统的示值绝对误差与引用值之比,并以百分数表示。引用值往往是指测量系统的量程或示值范围的最高值。例如,示值范围为 0~150V 的电压表,当其示值为 100.0V 时,测得电压实际值为 99.4V,则该电压表的引用误差为

$$\frac{100.0 - 99.4}{150} \times 100\% = 0.4\%$$

测量系统的准确度等级是用来表达该系统在符合一定的计量要求情况下,能保持其误差在规定的极限范围内。多数的电工、热工仪表和部分无线电测量仪器采用引用误差的形式来表示其准确度等级,以允许引用误差值来作为准确度级别的代号。例如,0.2 级电压表表示该电压表允许的示值误差不超过电压表引用值的 0.2%。

3. 量程和测量范围

测量系统的示值范围的上、下限之差的模,称为量程。系统测量范围则是指使该系统的误差处于允许极限内它所能测量的被测量值的范围。对于用于动态测量的系统还标明在允许误差极限内所能测量的频率范围。

4. 信噪比

信号功率与干扰(噪声)功率之比,称为信噪比,记为 SNR,并用分贝(dB)来表示

$$SNR = 10 \lg \frac{N_s}{N_n} \quad (2-7)$$

式中: N_s 和 N_n 分别是信号和噪声的功率。

有时也用信号电压和噪声电压来表示信噪比,这时信噪比 SNR (以 dB 为单位) 为

$$SNR = 20 \lg \frac{U_s}{U_n} \quad (2-8)$$

式中: U_s 和 U_n 分别为信号和噪声的电压。

例如,用某仪器测量某信号时的信噪比为 65dB。此时表示信号电压与干扰电压之比 (U_s/U_n) 为 $10^{3.25}$, 噪声电压还不到信号电压的千分之一。

5. 动态范围

动态范围是指系统不受噪声影响而能获得不失真输出的测量上限值 $y_{\max}$ 和下限值 $y_{\min}$ 之比。这样动态范围 DR (以 dB 为单位) 为

$$DR = 20 \lg \frac{y_{\max}}{y_{\min}} \quad (2-9)$$

2.1.4 测试系统的特性

为了获得准确的测试结果, 对测试系统提出多方面的性能要求。这些性能大致上可分为两种: 静态特性和动态特性。对用于静态测量的测量系统, 一般只需利用静态特性指标来考察其性能。在动态测量中, 不仅需要用静态特性指标而且需要用动态特性指标来描述测试仪器的质量, 因为两方面的特性都将影响测量结果, 并且两者彼此也有某些联系, 但是它们的分析和测试方法都有明显的差异。

2.2 测试系统静态响应特性

在式 (2-1) 描述的线性系统中, 当系统的输入 $x(t) = x_0$ (常数), 即输入信号的幅值不随时间变化或其随时间变化的周期远远大于测试时间时, 式 (2-1) 变为

$$y = \frac{b_0}{a_0} x = Sx_0 \quad (2-10)$$

也就是说, 理想线性系统其输出与输入之间呈单调、线性比例关系, 即输入—输出关系是一条理想的直线, 斜率 $S = \frac{b_0}{a_0}$ 为常数。

测试系统的静态特性就是在静态测量情况下描述实际测试系统与理想定常线性系统的接近程度, 是检测系统在被测量处于稳定状态时的输入—输出关系。

下面用定量指标来研究实际测试系统的静态特性。

2.2.1 线性度

线性度是指检测系统输入输出曲线与理想直线的偏离程度, 亦称非线性误差。

在静态测量的情况下, 用实验来确定被测量的实际值和测量系统示值之间的函数关系的过程为静态校准, 所得到的关系曲线称为校准曲线。理想中的测试系统曲线, 如图 2-3 所示, 希望呈 $y = a + bx$ 线性关系, 其中 a 是零点输出, b 是理论灵敏度。

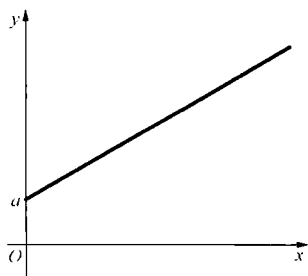


图 2-3 理想测试系统曲线图

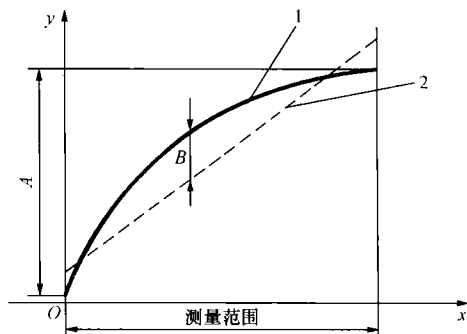


图 2-4 校准曲线与拟合直线关系图

1—校准曲线; 2—拟合曲线