



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量 原理与应用 下册

古天祥 詹惠琴 习友宝 古军 何羚 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

电子测量原理与应用

下 册

古天祥 詹惠琴 习友宝 古 军 何 羚 编著



机械工业出版社

本书采用了一种全新的体系结构,根据电子信息技术研究的基本对象——信号和系统,把电子测量的基本内容划分为“信号的测量”和“系统的测量”两大部分。本书分为上、下两册。上册包含了电子测量总论、测量误差理论和信号的测量,讲述电子测量的基本原理和测量误差理论;讨论了信号的时间与频率、信号的幅度(电压、电流和功率)、信号的波形(时域特性)、信号的频谱(频域特性)和数字信号等的测量。下册包含了系统的测量,主要讨论了测量系统的基本特性,系统测量用的信号源,元器件特性参数、集成电路、线性系统特性及网络分析等的测量。

本书根据科学性、先进性和实用性的原则精选内容,全面阐述了电子测量的基本原理,阐述中力求思路清晰、概念准确、语句流畅、可读性好,以便于教学和自学。

电子测量技术是广泛应用于各个学科专业的一门通用技术。本书适用范围广,可作为高等院校电子信息等专业的教材,以及各工程技术专业学生自学的读本,也可作为广大科研和工程技术人员的参考书。

(编辑邮箱:jinaemp@163.com)

图书在版编目(CIP)数据

电子测量原理与应用. 下册/古天祥等编著. —北京:机械工业出版社, 2014.5

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-46024-4

I. ①电… II. ①古… III. ①电子测量技术—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第037827号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 张利萍 卢若薇

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:张静 责任印制:李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2014年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·326千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46024-4

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

人类赖以生存和发展的三种基本资源是物质、能量和信息。物质是基础，信息来源于物质运动，但不等同于物质，也不具备能量。信息进行传输、存储和处理必须有载体，信息可用物质来载负，也可用能量来载负。以前，人们利用信息基本上是基于物质资源，信息的载体是物质的（竹扁、纸质的书信）、信息的传输靠人力（信使、邮政、投递）、信息处理用质料工具（算盘、计算尺）并由人工操作，手段落后，速度慢、效率低。

18 世纪中，人类开始了利用能量资源来驱动动力工具的研究，大大扩展了人的体力。19 世纪末和 20 世纪初，人类又开始了利用能量资源来传输信息的研究。一切电磁波（包括激光、X 射线等）都具有能量，在空间传播不需要介质。信息以具有能量的电磁波信号为载体，可实现信息的远距离快速传输。

20 世纪中以来，无线通信、广播、电视、雷达等的蓬勃发展和广泛应用，大量的、各种各样的无线电技术参数需要测量，促进了电子测量技术的发展。成都电讯工程学院（电子科技大学的前身）于 1959 年首次开出了“无线电测量”课程（“电子测量”课程的前身）。课程内容是按无线电参量测量的门类划分章节，并以此构成全书的主线，以后出版的《电子测量》教材大多沿用了这样的体系结构。

在电子科学技术的发展过程中，人们对信息的获取、传输、处理和显示等各个环节进行了大量深入的研究，形成了测量、通信、控制、计算机、信号处理、信息显示电子元器件及微电子技术等专业学科。虽然电子信息科学技术的各专业学科的研究方向各不相同，但就其基本研究对象而言，都可归结为对信号和系统的研究，作为电子信息科学技术的一个分支，电子测量技术及仪器学科也不例外。

本书把各种门类的被测量按信号和系统分类，事实也是按被测对象的属性划分的：信号特性参量为带有能量的有源量；系统的特性参量本身为无源量。被测对象的有源与无源特性，决定了测量系统的组成原理和功能结构的不同。对测量信号（有源量）的测量系统，不需要主动向被测对象提供激励，而是接受被测对象激励（能量）的被动式测量系统。对系统参数（无源量）的测量，测量系统必须主动向被测对象提供激励（能量）才能进行测量，它是一个主动式的测量系统。

本书讨论的“信号的测量”部分，以最常见、最广泛应用的电信号为重点，讲述了信号的频率、幅度、波形、频谱等基本参数的测量。讨论每种信号参数的测量时，根据被测信号的属性和特点（如静态、稳态与动态，周期性与非周期性等），讲述测量原理（如直接比较与间接比较）、观测方法（如时域与频域），以及测量技术（模拟式和数字式）。

本书讨论“系统的测量”，不是以某专业领域的专门系统为基本对象，而是以构造这些系统所需的最通用、最基本的元件、器件、电路和网络等部件的测量为基本对象。此外，也讨论测量系统基本特性的测量。在研究系统测量时，根据系统所处的状态，讲

述系统在静态、稳态和动态下的性能及所采用的时域测量和频域测量方法。

本书内容分为三篇 12 章：第 1 篇（共 2 章）电子测量总论及测量误差理论，电子测量总论在介绍了电子测量基本概念的基础上，讲述了电子测量的原理和分类，介绍了本书的体系结构。此外，本篇另一个重要内容是讨论了测量误差、测量数据处理和测量不确定度等；第 2 篇（共 5 章）信号的测量，讲述了信号的时间与频率、信号的幅度（电压、电流和功率）、信号的波形（时域特性）、信号的频谱（频域特性）和数字信号的测量等内容；第 3 篇（共 5 章）“系统的测量”，讲述了测量系统基本特性，系统测量用的信号源、元器件特性参数、集成电路、线性系统特性及网络分析等测量的内容。此外，本书加强了练习与思考的内容。考虑到不少学校和专业设置有“智能仪器”、“虚拟仪器”和“自动测试系统”等课程，以及本书的篇幅所限，有关这部分的内容未列入本书编写范围。笔者认为，本书对体系结构和各章内容做这样的安排，有利于读者对电子测量的对象有一个更深刻的认识，对电子测量的基本内容有一条更清晰的主线，对电子测量原理和方法有一个更完整的概念，对电子测量与电子信息科学技术之间的关系有一个更全面的了解。

本书根据先进性和适用性的原则精选内容，讲述中注重交待整体思路和基本概念，行文力求做到逻辑性强和可读性好。由于电子测量内容十分丰富，加之为了便于读者自学，本书的文字表述比较详实，需用较多篇幅，因此把全书分为上、下两册出版。上册包含第 1、2 篇内容，下册包含第 3 篇内容。本书建议教学学时数 64 学时，各校可根据自己的情况增减学时。在教学内容处理上，上册包含了电子测量最基本的内容，可重点讲述，学时较少时，下册内容可少讲或者不讲。

本书由古天祥编写第 1 章，詹惠琴编写第 2、8、10、11 章，习友宝编写第 4、5 章，古军编写第 3、7、9 章，何羚编写第 6、12 章。全书由古天祥、詹惠琴统稿。

本书编写中认真学习和参考了国内外同行专家学者的有关教材、专著和论文，并在书中有所引用。此外，本书编写过程中，得到机械工业出版社王保家和吉玲的支持，在此，一并谨致以诚挚的感谢！尽管编者对本书内容和文字做了仔细的推敲和校订，但在编写过程中，由于编者水平有限，书中难免存在一些疏漏之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第 3 篇 系统的测量

第 8 章 测量系统的基本特性	6	原理	50
8.1 概述	6	9.3.2 锁相环的基本形式及锁相频率合成的原理	51
8.1.1 测量系统的定义	6	9.3.3 提高频率分辨力的锁相合成技术	55
8.1.2 测量系统的响应特性	6	9.3.4 扩展输出频率上限的锁相技术	58
8.2 测量系统的静态特性	7	9.3.5 锁相合成信号源的实例分析	61
8.2.1 静态特性的表征和获取	7	9.4 直接数字合成 (DDS) 信号源	62
8.2.2 静态特性的基本参数	8	9.4.1 DDS 信号源的基本组成原理	62
8.2.3 静态特性的质量指标	9	9.4.2 DDS 的单片集成电路	66
8.3 电子测量仪器的技术规范及误差的表示方法	15	9.4.3 DDS 的技术指标及特点	67
8.3.1 技术规范	15	9.4.4 DDS + PLL 频率合成信号源	68
8.3.2 工作特性及仪器误差	16	9.4.5 任意波形信号源	69
8.4 测试系统的动态特性	18	9.4.6 合成扫频信号源	71
8.4.1 动态特性概述	18	本章小结	72
8.4.2 描述测量系统动态特性的数学模型	18	思考与练习	73
8.4.3 测量系统的动态特性参数	22	第 10 章 电子元器件的测量	77
8.4.4 测量系统动态特性的评价指标及其测量	27	10.1 概述	77
本章小结	30	10.1.1 电子元器件的分类	77
思考与练习	30	10.1.2 电子元器件测量的特点	78
第 9 章 信号源	32	10.2 无源元件的阻抗测量	78
9.1 概述	32	10.2.1 无源元件 R 、 L 、 C 的阻抗概述	78
9.1.1 信号源在系统测量中的作用	32	10.2.2 电桥法	83
9.1.2 信号源的分类	32	10.2.3 谐振法	85
9.1.3 主要技术指标	34	10.2.4 电压电流法	89
9.2 传统的信号源	36	10.2.5 自动平衡电桥	91
9.2.1 低频信号源	36	10.3 分立器件参数的测试内容	92
9.2.2 高频信号源	38	10.4 分立器件参数的测量方法	94
9.2.3 脉冲信号源	40	10.4.1 电压参数的测量	94
9.2.4 函数信号源	42	10.4.2 电流参数的测量	96
9.2.5 扫频信号源	45	10.4.3 放大倍数的测量	98
9.3 锁相频率合成信号源	50	10.4.4 阻抗参数的测量	99
9.3.1 合成信号源概述及直接合成		10.5 分立器件测试仪器	100

10.5.1 晶体管特性图示仪	100	第12章 线性系统特性测量和	
10.5.2 分立器件综合测试仪	103	网络分析	159
本章小结	105	12.1 线性系统的频率特性测量	159
思考与练习	106	12.1.1 线性系统的频率特性测量	
第11章 集成电路测试	108	概述	159
11.1 概述	108	12.1.2 幅频特性测量	159
11.1.1 集成电路测试的意义	108	12.1.3 相频特性测量	161
11.1.2 集成电路测试的基本原理	108	12.1.4 矢量电压测量	162
11.1.3 集成电路测试的分类	109	12.1.5 扫频仪	164
11.1.4 测试的主要环节	110	12.2 网络分析概述	167
11.1.5 集成电路测试系统	112	12.2.1 网络分析的基本概念	167
11.2 数字集成电路测试技术	115	12.2.2 微波的S参数	169
11.2.1 概述	115	12.3 网络测量原理	172
11.2.2 数字集成电路的参数测试	118	12.3.1 网络分析仪的基本原理	172
11.2.3 功能测试	123	12.3.2 矢量网络分析仪	174
11.3 模拟集成电路测试技术	133	12.3.3 网络分析仪的误差来源	176
11.3.1 概述	133	12.3.4 网络分析仪的误差校准	
11.3.2 模拟集成电路的测试系统	134	和修正	180
11.3.3 线性集成运算放大器的测试	136	12.4 网络测量新技术简介	182
11.4 精密测量单元 PMU	142	12.4.1 调制矢量网络分析技术	182
11.4.1 PMU 的特点	142	12.4.2 非线性矢量网络分析技术	184
11.4.2 PMU 的组成原理	144	12.4.3 多端口矢量网络分析技术	186
11.4.3 PMU 的技术指标	146	12.5 线性系统的时域特性测量	191
11.4.4 PMU 的应用实例	147	12.5.1 线性系统时域特性概述	191
11.5 混合集成电路测试	148	12.5.2 时域特性测量的实现	193
11.5.1 对混合信号集成电路的测试		本章小结	199
要求和系统结构	148	思考与练习	200
11.5.2 ADC、DAC 测试技术简介	149	部分习题参考答案	201
11.5.3 DAC 测试技术	150	参考文献	203
本章小结	156		
思考与练习	157		

第3篇 系统的测量

引言

1. 系统的基本概念

(1) 系统的定义

信号的采集、产生、传输、处理、存储和再现都需要一定的硬件或软件装置,这种装置的集成通常就称为系统。系统是一个非常广泛的概念,从一般意义讲,系统是由若干相互依赖、相互作用的事物组合而成的具有特定功能的整体。系统可以是物理系统,例如测试系统、通信系统、自控系统、计算机系统等电子信息系统;也可以是非物理系统,例如生产管理、经济调控、文化教育、司法执法等社会经济和社会管理方面的系统。电子测量的对象主要是物理系统中的电系统。

通常,各种电子信息系统的主要部件中包括大量的、各种类型的元器件、电路或电网络。系统比电路更复杂、规模更大的组合体。电路与电网络都属于电系统。在一定意义上,电系统与电路、网络是同义词。随着大规模集成电路技术的发展,各种极为复杂的电路或网络可以集成在很小的芯片上,已经很难从复杂程度或规模大小来确切区分器件、电路、网络和系统。

(2) 系统与信号的关系

1) 信号离不开系统。

① 系统是信号存在的物质基础,信号不能束之高阁,信号必须以系统做载体,离开了系统,信号将失去依托,人们也无法利用信号。

② 信号的获取、产生、变换、传输、存储及处理都必须由系统来完成。没有先进的电子系统作为信号处理的工具,也就没有现代信息科学技术的发展。

2) 系统离不开信号。

① 信号是系统传输和处理的对象。没有信号,系统没有对象,系统的设计、制造就没有依据,换句话说,系统也就没有存在的意义。

② 当需要认识系统,对系统特性参数进行测量时,系统的激励和响应都是信号,激励信号是系统的原动力,响应信号是要获取系统的有关信息的载体。

电路(网络)、系统与信号之间有着十分密切的联系。信号作为信息的载体,其属性取决于运载的信息;而系统作为传输、处理信号的工具,其特性又取决于信号的属性。信号的产生、传输、存储和处理的质量高低,取决于系统的性能好坏。

(3) 系统的特性测量

系统的特性是由其内部结构和参数也即系统本身的固有属性决定的。要描述和分析任何一个物理系统,都必须了解其内部结构,根据物理作用机理建立该系统的模型。所谓系统模型是指系统物理特性的数学抽象,即以数学表达式或具有理想特性的符号组合图形来表征系统的输入-输出特性。

在测量技术中,一般都是用系统的观点去观察和分析问题的。所谓系统的观点即从全局

的观点,把被研究的系统视为一个封闭系统,着重于系统的外部特性,即系统的输入与输出之间的关系或系统的功能。

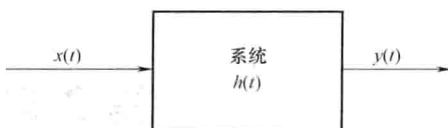


图 III-1 系统的框图

系统的功能可以用图 III-1 表示,图中的方框代表具有某种功能的系统。 $x(t)$ 是输入信号,也称为激励; $y(t)$ 是输出信号,也称为响应; $h(t)$

是表征系统固有属性的数学模型或特征参数。从测量的意义来看,系统可以被看成是一个信号的变换或传输的功能模块,它的功能是将输入信号变换(或传输)成输出响应, $y(t) = h(t)x(t)$ 。由激励和响应的关系(数学模型)表征的系统外特性,根据输入信号 $x(t)$ 是否随时间变化,系统对外呈现出的基本特性,可分别用静态特性和动态特性来描述,并且定义了许多具体描述的指标,这将在本篇中讨论。

客观事物的属性总是通过它自身与周围事物的联系来表现的。在这里,我们把被研究的事物视为一个封闭系统,不去研究系统的内部结构,而着重考察外部特性。如果这个系统的属性(事物内部自身运动的表现),能通过外部世界观测到,就称这个系统是可观测的。如果这个系统(事物内部运动)能接收外部施加的影响而变更系统的运动状态,就称这个系统是可控的。

响应 y 对系统特性的表现能力反映了被研究系统(事物)的可观测性。个别系统(如信号发生器)的特性可通过 y 主动地表现出来,而大多数系统的特性不会主动地表现出来。当人们要测量表征系统内部的某些特性参数 h ,而 h 又不会主动地通过 y 表现出来时,可用一组激励 x_i 对系统作用、作用后的影响可通过 y 表现出来时,即系统具有可测性。系统的可观测性取决于系统的构造特性,它反映了系统与外界相互作用中的依赖关系。如果说一系统是可以认识的,首先该系统应是可观测的。但是,事物的可观测性又直接与观测方法、观测手段有关。例如,复杂的大规模集成电路,只有进行了可测性设计,才具有较好的可观测性;肉眼看不见的电过程,可借助于示波器观测到;过去无法观测的很多动态系统特征,借助于高速数据采集系统就能观测到。由此可见,研究系统新的测试方法和测试手段非常重要。

2. 被测系统的分类

按照系统的特性,可以将系统划分成线性系统与非线性系统;按系统属性又可分为即时系统与动态系统;按被处理对象又可分为模拟系统和数字系统等;按功能可分为通用系统和专用系统,如图 III-2 所示。

(1) 线性系统与非线性系统

测量中的系统,包括被测系统和测量系统,可分为线性系统及非线性系统。

线性系统的含义,是在所要求的精度和所需的幅值范围内,满足下述两个基本条件,则此电路或系统可认为是线性时不变系统。

1) 线性系统服从叠加原理。当两个输入信号分别作用时,输入为 $x_1(t)$ 或 x_2

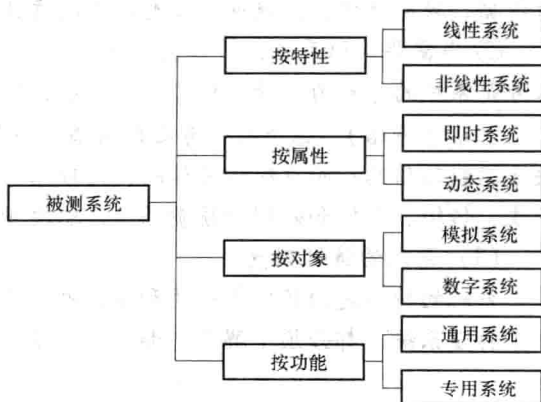


图 III-2 被测系统的分类

(t), 输出信号为 $y_1(t)$ 或 $y_2(t)$ 。若两个信号共同作用输入为 $ax_1(t) + bx_2(t)$, 其输出信号必为 $ay_1(t) + by_2(t)$ 。其中 a 、 b 均为常数。

2) 时不变系统的响应与输入信号的时延无关。设输入信号为 $x(t)$ 时, 输出信号为 $y(t)$, 那么, 当输入信号变为 $x(t-\tau)$ 时, 输出信号将成为 $y(t-\tau)$ 。

满足上述两个条件的线性时不变系统, 对任意输入的响应都可用傅里叶变换表示。输出信号 $y(t)$ 的频谱函数 $Y(\omega)$ 为

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$$

式中, $H(\omega)$ 为被测系统的传递函数; $X(\omega)$ 为输入信号 $x(t)$ 的傅里叶变换, 即频谱函数。

可见线性时不变系统在正弦信号作用下, 输出也是一个正弦信号。如果输入信号 $x(t)$ 为任意周期性波形, 则按傅里叶级数把它展开成一系列不同频率及相位关系的正弦波的线性组合, 其中包括一个基波以及不同幅度和相位的各次谐波。对其中每一个正弦分量, 系统都有自己的 $H(\omega)$ 倍的正弦响应, 总的输出则是频率成分与输入完全相同的各输出正弦分量的线性组合, 即线性系统具有频率保持性。测量、分析或比较线性系统在正弦信号激励下的响应, 就可以对系统的各种电气特性作出全面的评价, 这就是正弦测量技术得到广泛应用的原因。本书仅讨论线性被测系统。

(2) 即时系统与动态系统

一个系统, 如果它在任何时刻 t 的输出都只与该时刻的输入有关, 它就是即时系统; 如果它在时刻 t 的输出不仅与该时刻的输入有关, 而且还与该时刻以前或以后的输入有关, 它就是动态系统。

1) 即时系统。即时系统又叫瞬时系统或无记忆系统。例如纯电阻网络就是一个即时系统, 它的输出只取决于当时的输入。即时系统的输入-输出关系, 对连续或离散时间线性系统可分别表示为

$$y(t) = h(t)x(t) \quad \text{或} \quad y(n) = h(n)x(n)$$

2) 动态系统。动态系统又叫惯性系统或有记忆系统。包含有电容、电感等储能元件的网络就是一种动态系统, 这种系统即使它的输入端去掉输入, 它仍有可能产生输出, 因为它所含的储能元件记忆着系统以前的状态, 记忆着输入曾经有过的影响。例如, 电容值为 C 的电容器是动态系统的一个简单例子。因为若把流过它的电流作为输入 $x(t)$, 把其上的电压作为输出 $y(t)$, 则其输入-输出关系可表示为 $y(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau$, 即系统在 t 时刻的输出是该时刻以前输入的积分。记忆系统的输入-输出关系一般是微分或差分方程。

$y_n = \sum_{k=-\infty}^n x(k)$ 是一个离散时间动态系统。因为系统在 n 处的响应是 n 以前所有输入的累加, 系统同样具有记忆以前输入的能力。

动态系统的特性可用时间特性和频率特性来描述。

(3) 模拟系统与数字系统

模拟系统是分析和处理模拟信号的系统, 而数字系统是分析和处理脉冲与数字信号的系统。数字系统具有与模拟系统显著不同的特点:

1) 脉冲与数字信号在时间和数值上是不连续的, 它们的变化是以跃变的形式出现在一系列离散的瞬间, 信号的前沿陡峭, 持续时间有长有短, 频谱分量十分丰富, 因此数字系统

是一个宽带系统,具有处理快速跃变信号的能力,以保证整个系统的严格时序关系。

2) 在数字系统内,任何一点的电平稳定值只可能是两个截然不同的值,通常用电平的“高”与“低”(或逻辑的“真”与“假”,或状态的“1”与“0”)来表示。一位二进制数表示的信息量太少,多位二进制数才有充分的表现力,数字系统处理的信号往往是多位的二进制码或长长的数据序列(数据流),所以数字系统往往是一个多输入和多输出的时间序列系统。

3) 数字系统的基本要求以功能为主,要么是工作正常,要么是出现故障。模拟系统的故障往往表现在电路中某些节点的电位或波形的不正常,数字系统的故障往往表现在整个系统内多位数字信号间的逻辑关系或时序关系上,而不在于单独考查某点信号的波形及电位的变化。

4) 数字信号的突发性、非周期性给数字系统的测量和分析带来特殊性。在数字系统工作过程中(例如执行一个程序),数字信号变化规律十分复杂,有的信号可能周期性发生,但许多数字信号只是单次发生(只出现一次),而有些信号虽然重复发生,但却是非周期性的。对于这些信号,用传统的方法(例如用电压表或示波器)去观测它,一般难于观测,即使观测到也仅是一些无意义的杂乱数据或波形,难于获得有用信息。而且表征系统故障的错误数据往往混合在正确的数据流之中,甚至有时发现故障时产生故障的原因早已过去。要求对数字系统的测试能从长长的数据流中,检测出也许是很少的错误数据,才能从蛛丝马迹中发现问题。随着大规模集成电路技术和计算机技术的发展,数字系统的集成度高,元件密度大,故障模式特别多,数字系统的分析与测试工作的复杂性是可想而知的。

(4) 通用系统与专用系统

在各类电子系统中,有通用和专用之区分,测量系统中属于通用的系统有电压表、频率计、示波器、频谱仪及自动测试系统等。也有不少的专用系统,如油井探测系统、瓦斯监测系统、地震预警系统等。计算机系统中,微型计算机、便携式计算机等是通用系统;机床控制计算机系统、火灾消防计算机监控系统等是专用系统;在通信系统中,无线移动通信系统以及有线通信电话系统是通用的;铁路运输的通信系统、民航指挥的无线电通信系统是专用的。

3. 系统测量的内容

系统测量的任务是,系统性能的测量和系统故障的诊断,以及测量系统的校准和检定。

在本书的“系统的测量”篇中,主要安排了测量系统基本特性、测量用信号源、元器件的特性测量、模拟与数字集成电路的测量、线性系统的特性测量及网络分析等内容。

(1) 系统测量用信号源

系统的特性参量 h 是无源量,对它进行测量的方法是激励响应法,即给系统施加一定的激励信号 x ,测量系统的响应信号 y ,根据 x 和 y 求得系统特性 $h = y/x$ 。 x 是人造的、已知的标准激励信号, y 是通过测量得知的响应信号,由此可见,系统的测量是要借助于信号的激励来进行,并同时响应信号的测量来完成的,信号的产生和测量是系统测量的基础。

测量用的信号源是系统测量不可缺少的仪器。为了观测系统的静态、稳态和动态特性,最典型的信号源有不变或缓变信号源、周期性变化的正弦点频或扫频信号源和阶跃式或冲击式的脉冲信号源等,获得系统的时域特性或频域特性。此外,为观测通信、雷达、广播等系统,要用调制信号源;为观测数字集成电路、计算机等数字系统,要用数字信号源。

(2) 测量系统的基本特性

各种系统的基本特性可由其输入、输出的关系,即系统所呈现出的外部特性来表征。在系统性能测试中待求 h 通常有阻抗特性、传输特性、变换特性等,以及这些特性参数的时间特性、频率特性和调制特性等。系统的特性与它传输、处理的信号的关系十分密切,取决于信号的变化特点。系统的特性可分为静态特性、稳态特性和动态特性。由于信号特性的测量可以在时域或频域进行,系统的测量也相应地有时域测量和频域测量两种方法。本篇首先介绍系统的基本特性。电子系统类型不同,其功能和特性指标也不相同,典型的电子信息系统有许多类型,如通信系统、雷达系统、广播系统、网络系统、控制系统、测试系统、计算机系统等。在各种类型的电子系统中,我们以最通用的测试系统为代表,来讨论系统的基本特性。

(3) 电子元器件的测量

一般说来,一个大的电子系统由若干个功能部件组成,每个部件内又包含了许多不同功能的单元电路,每个单元电路内又由若干元件和器件构成。所以本书讨论系统的测量,不仅包含了对系统整体功能和性能的测量,而且包含了组成系统的各种最基本单元的测量。本篇讨论组成系统的最基本的元器件的测量,包括电阻、电感和电容等无源元件的阻抗特性参数的测量,半导体二极管、晶体管等有源分立器件的性能参数的测量,它们是电子系统的最基础的测量。

(4) 集成电路的测试

以器件形式出现的集成电路,就其功能和规模来说,小到一个单元电路(差分放大电路、逻辑门电路),大到一个完整的、复杂的单片系统;就其电路类型来说,有模拟电路、数字电路以及两者的混合电路和系统。对这些电路和系统的测量,有直流参数、交流参数的测量,也有功能的测量和逻辑诊断。在数字系统的故障诊断中,其目的是判断系统是否能有效履行预定功能。通过对故障模型的分析,寻求以最短测量时间获得最大故障覆盖率的有效的诊断方法。特别是系统的动态性能测量需在时域、频域和时频域内进行,需要使用各种各样的信号测量技术与仪器。

(5) 线性系统特性测量和网络分析

任何一个系统对信号进行传输和处理的质量取决于它的特性。了解和掌握线性系统的各种特性,如传输特性、反射特性和阻抗特性等,在实际中至关重要。

线性系统特性,包括静态特性和动态特性。静态特性测量能以精确定量的特性指标反映系统的基本性能,动态特性测量可反映系统对快速变化信号的响应能力。动态特性测试既可在时域内进行,通过时间特性来表征,也可在频域内进行,通过频率特性来表征。

本篇讨论的系统的测量,是对基础的、常用的电路与系统及其元件特性的通用测量,而不讨论专门系统的测量,如一个通信系统、雷达系统、自控系统的特性测量,因为这些系统的测量还需要涉及许多专业知识。但是这些系统的测量,也是基于本篇中所讨论的最基础的、通用的技术方法。

第 8 章 测量系统的基本特性

8.1 概述

8.1.1 测量系统的定义

在本章的讨论中,为了叙述方便,把“测量系统”看成是一个广义的概念,既可指单台的测量仪器,又可指由众多部件或单元组成的完整系统,如含有传感器、调理电路、数据采集、微计算机的数据采集系统,或者由多台测试仪器、计算机及外围设备组成的一个自动测量系统;也可指组成测量系统中的某一部件或单元,如传感器、调理电路、数据采集卡、测试功能模块;甚至可以是测量仪器中更简单的单元电路或元器件,如放大器、电阻分压器、 RC 滤波器和 R 、 L 、 C 阻抗元件、分立的与集成的半导体器件等。

8.1.2 测量系统的响应特性

测量系统的特性可由其输入、输出的关系来表征,它是测量系统所呈现出的外部特性,并由其内部结构和参数即系统本身的固有属性所决定。

在选用测量仪器或系统时,要综合考虑多种因素,其中一个重要因素就是测量系统对被测信号变化的响应特性。根据被测信号随时间变化的特点,对测量系统的基本特性可分为三类:①被测信号是静止不变或变化极缓慢的情况,此时测量系统工作在静止状态下,其输入信号与输出信号之间的函数关系,称为测量系统的静态特性;②被测信号是周期性交替变化的情况,此时,测量系统在稳定(交流)状态下工作,在规定的频率范围内,其输入信号的幅值与输出信号的幅值之间的函数关系称为测量系统的稳态(交流)特性;③被测信号呈非周期性的瞬时变化的情况,此时,测量系统工作在动态下,其输入与输出信号之间的函数关系称为测量系统的动态特性。

为了描述静态和动态两种方式下的测量质量,将测量误差分为静态误差和动态误差。

若被测量是不随时间改变的恒定量,测量所产生的误差一般仅取决于测量值的大小及测量系统的静态性能,与时间和频率无关,不是时间和频率的函数,这种误差称为静态误差。当被测信号随时间周期变化时,系统处于稳态测量的状态下,输出信号幅值与输入信号幅值只能在一定信号频率范围内保持一致,超出此频率范围则会产生误差,称为交流误差或稳态误差,也称为频率响应误差。当被测信号随时间非周期性瞬时变化时,系统处于动态测量的状态下,被测信号的测得值与实际值(真值)之差,称为动态误差。

在动态测量的情况下,当测量系统输入量变化时,人们所观察到的输出量不仅受测量装置本身的静态特性的影响,也受到动态特性的影响。一个理想的测量系统,其输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 随时间变化的规律相同,应具有相同的时间函数。但实际的系统,输出量 $y(t)$ 与输入量 $x(t)$ 只能在一定的信号变化速率范围内保持所谓的一致。如果测量的动态特性不能满足输入信号快速变化的要求,则输出量会出现波形失真,即出现动态误差。测量系

统的动态特性反映其测量动态信号瞬时值的能力。为此,必须对测量系统的动态特性有所了解,才能掌握不失真测量的条件。

表示测量系统动态特性的指标通常有频域指标和时域指标。在研究动态特性时,为了获得系统的输入与输出的关系,常常采用正弦频率信号和阶跃信号作为输入信号进行测量。频率响应特性不仅包含幅频特性,而且必须考虑相频特性,由频率响应特性得到的频域指标,主要有固有角频率、工作频带、相位角等。由系统的阶跃响应特性得到的时域指标,主要有时间常数、上升时间、响应时间和超调量等。

8.2 测量系统的静态特性

8.2.1 静态特性的表征和获取

1. 数学模型

当被测对象处于静态时,也就是测量系统的输入为不随时间变化的恒定信号,在这种情况下测量系统输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 之间呈现的关系就是静态特性。

对于实际的测量系统,其静态特性由多项式表示为

$$y=f(x)=\sum_{i=0}^n S_i x^i=S_0+S_1 x+S_2 x^2+\cdots+S_n x^n \quad (8-1)$$

式中, $S_0, S_1, S_2, \dots, S_n$ 为常量。它是测量系统的标定系数,反映了系统静态特性曲线的形状。

当式 (8-1) 写成 $y=f(x)=S_0+S_1 x$ (8-2)

时,系统的静态特性为一条直线,称 S_0 为零位输出, S_1 为静态传递系数 (或静态增益)。通常可以对测量系统的零位进行补偿,使 $S_0=0$,则系统的静态特性变为

$$y=f(x)=S_1 x \quad (8-3)$$

这时测量系统的静态特性为理想的线性系统。

2. 静态标定

测试系统的静态特性是通过静态标定或静态校准的过程获得的。

静态标定就是在一定的标准条件下,利用一定等级的标定设备对测试系统进行多次往复测试的过程,如图 8-1 所示。

(1) 静态标定条件

静态标定的标准条件主要是指标定的环境和所用的标定设备。

1) 对环境的要求是:无加速度、无振动、无冲击;温度在 $15 \sim 25^\circ\text{C}$;湿度不大于 85% RH;大气压力为 0.1 MPa。

2) 对所用的标定设备的要求是:

① 当标定设备和被标定的测试系统的确定性系统误差较小或可以补偿,而只考虑它们的随机误差时,标定设备的随机误差 σ_s 和被标定的测试系统的随机误差 σ_m 应满足条件

$$\sigma_s \leq \frac{1}{3} \sigma_m \quad (8-4)$$

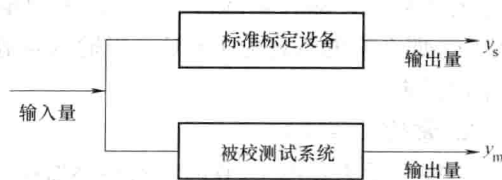


图 8-1 测试系统的静态标定

② 如果标定设备和被标定的测试系统的随机误差比较小,只考虑它们的系统误差,标定设备的系统误差 ε_s 和被标定的测试系统的系统误差 ε_m 应满足如下条件

$$\varepsilon_s \leq \frac{1}{10} \varepsilon_m \quad (8-5)$$

(2) 获取静态特性的方法

满足了上述条件,在标定的范围内(被测量的输入范围),选择 n 个测试点 $x_i, i=1, 2, \dots, n$; 共进行 m 次循环, $j=1, 2, \dots, m$, 为循环数。于是,共得到 $2mn$ 个测试数据。

正行程的第 j 次循环,第 i 个测点表示为 (x_i, y_{uij}) ; 反行程的第 j 次循环,第 i 个测点表示为 (x_i, y_{dij}) ; 对正反行程的数据 $(x_i, y_{uij}), (x_i, y_{dij})$ 进行平均处理便可以得到测试系统的静态特性。

对于第 i 个测点,基于上述标定值,所对应的平均输出为

$$\bar{y}_i = \frac{1}{2m} \sum_{j=1}^m (y_{uij} + y_{dij}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8-6)$$

应当指出: n 个测试点 x_i 通常是等分的,根据实际需要也可以是不等分的。同时第一个测点 x_1 就是被测量的最小值 $x_{\min}$, 第 n 个测点 x_n 就是被测量的最大值 $x_{\max}$ 。

通过式 (8-6) 得到了测试系统 n 个测点对应的输入-输出关系 $(x_i, \bar{y}_i) (i=1, 2, \dots, n)$, 这就是测试系统的静态特性。在具体表述形式上,可以将 n 个 $(x_i, \bar{y}_i)$ 用相关拟合曲线来表述,如图 8-2 所示,也可以用表格、图形来表述。对于计算机测试系统,一般直接利用上述 n 个离散的点进行分段(线性)插值来表述测试系统的静态特性。

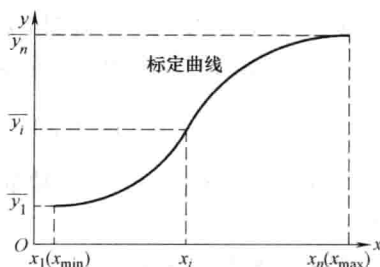


图 8-2 测试系统的标定曲线

8.2.2 静态特性的基本参数

1. 量程

测量系统测量范围的上限值(最大被测输入量) $x_{\max}$ 与下限值(最小被测输入量) $x_{\min}$ 之差的绝对值,即 $R = |x_{\max} - x_{\min}|$, 称为量程。例如一温度测量系统的测量范围是 $-60 \sim 120^\circ\text{C}$, 那么它的量程为 180°C 。当输入量在量程范围以内时,测量系统正常工作,并保证预定的性能。

2. 零位(零点)

当输入量为零即 $x=0$ 时,测量系统的输出量不为零,由式 (8-1) 可得零位值为

$$y = S_0 \quad (8-7)$$

零位值应设法从测量结果中消除。例如可以通过测量系统的调零机构或者由软件扣除。

3. 灵敏度

灵敏度描述测量系统对输入量变化反应的能力。通常由测量系统的输出变化量 Δy 与引起该输出量变化的输入变化量 Δx 之比 S 来表征,即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} = f'(x) \quad (8-8)$$

如图 8-3 所示,某一测点处的静态灵敏度是其静态特性曲线的斜率。灵敏度是刻度特性

的导数,它是一个有量纲的量。例如示波器的垂直偏转灵敏度 S_y 的量纲是 mm/V ,即每伏输入引起多少毫米的射线偏转;如果输入量与输出量的量纲相同,则灵敏度无量纲。

当静态特性为一直线时,直线的斜率即为灵敏度,且为一常数。当静态特性是非线性特性时,灵敏度不是常数。

4. 分辨力与分辨率

分辨力又称灵敏度阈,它表征测量系统有效辨别输入量最小变化量的能力。输入量变化太小时,输出量不会发生变化,而当输入量变化到一定程度时,输出量才发生变化。因此,从微观来看,实际测试系统的输入-输出特性在整个测量范围内不可能做到处处连续,有许多微小的起伏,如图8-4所示。造成测试系统具有有限分辨力的因素很多,例如机械运动部件的干摩擦和卡塞等,电路中的噪声、A-D转换器的量化特性等。

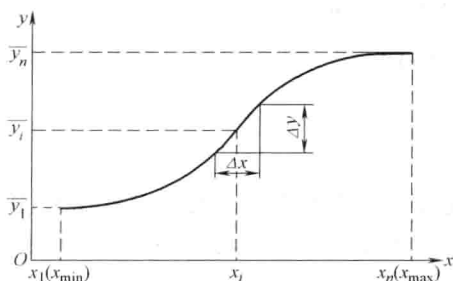


图 8-3 测试系统的静态灵敏度

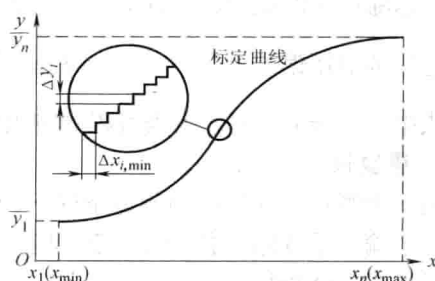


图 8-4 分辨力

对于实际标定过程的第 i 个测点 x_i ,当有 $\Delta x_{i,\min}$ 变化时,输出才有可观测到的变化,那么 $\Delta x_{i,\min}$ 就是该测点处的分辨力。显然各测点处的分辨力是不一样的。在全部工作范围内,都能够产生可观测输出变化的各个最小输入量中的最大值 $\max |\Delta x_{i,\min}|$ ($i=1, 2, \dots, n$),就是该测试系统的分辨力,而测试系统的分辨率为

$$r = \frac{\max |\Delta x_{i,\min}|}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8-9)$$

从物理含义上看,灵敏度是广义的增益,而分辨力则是不灵敏度或死区。此外,测试系统在最小(起始)测点处的分辨力称为阈值或死区。

对模拟式测量系统,其分辨力一般为最小分度值的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{2}$ 。对具有数字显示器的测量系统,其分辨力是当最小有效数字改变一个字时相应输入量的改变量。当被测量的变化小于分辨力时,数字式仪表的最后一位数将不改变,仍指示原值。例如,某数字电压表分辨力为 $1\mu\text{V}$,表示该电压表显示器上最末位跳变1个字时,对应的输入电压变化量为 $1\mu\text{V}$ 。可见,灵敏度阈或分辨力都是有量纲的量,它与被测量的量纲相同。

对于一般测量仪器的要求是:灵敏度应该大而分辨力应该小。但也不是分辨力越小越好,选择分辨力只要小于允许测量绝对误差的 $1/3$ 即可。

8.2.3 静态特性的质量指标

1. 迟滞

由于测试系统的机械部分的摩擦和间隙、敏感结构材料等的缺陷、磁性材料的磁滞等,致使测试系统同一个输入量的正、反行程的输出不一致,这一现象就是“迟滞”,亦称“滞

环”或“回差”，如图 8-5 所示。

对于第 i 个测点，其正、反行程输出的平均校准点分别为 $(x_i, \bar{y}_{ui})$ 和 $(x_i, \bar{y}_{di})$ ，有

$$\bar{y}_{ui} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{uij} \quad (8-10)$$

$$\bar{y}_{di} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{dij} \quad (8-11)$$

第 i 个测点其正、反行程的偏差为（如图 8-5 所示）

$$\Delta y_{i,H} = |\bar{y}_{ui} - \bar{y}_{di}| \quad (8-12)$$

$$\text{则迟滞产生的最大绝对误差为 } (\Delta y_H)_{\max} = \max (\Delta y_{i,H}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8-13)$$

$$\text{迟滞的引用误差为 } \delta_H = \frac{(\Delta y_H)_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (8-14)$$

式中， $y_{FS} = y_n - y_1$ ，为满量程的输出值。

2. 重复性

同一个测点，在相同的测量条件下，测试系统按同一方向作全量程的多次重复测量时，对同一个输入量其输出值的不一致程度，如图 8-6 所示，其大小是随机的。为反映这一现象，引入重复性指标。

重复性反映了测试系统的随机误差，其定量评定可在重复性条件下进行多次测量，对其测量值做统计处理。

考虑正行程的第 i 个测点，做了 m 次重复测量，其平均校准值为

$$\bar{y}_{ui} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{uij} \quad (8-15)$$

基于统计学的观点，将 y_{uij} 看成第 i 个测点正行程的子样， $\bar{y}_{ui}$ 则是第 i 个测点正行程输出值的数学期望的估计值，可以利用贝塞尔公式来计算第 i 个测点的标准偏差 s_{ui} 。

$$s_{ui} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\Delta y_{uij})^2} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (y_{uij} - \bar{y}_{ui})^2} \quad (8-16)$$

s_{ui} 的物理意义是：当随机变量 y_{uij} 可以看成是正态分布时， y_{uij} 偏离期望值 $\bar{y}_{ui}$ 的范围在 $(-s_{ui}, s_{ui})$ 之间的概率为 68.37%；在 $(-2s_{ui}, 2s_{ui})$ 之间的概率为 95.40%；在 $(-3s_{ui}, 3s_{ui})$ 之间的概率为 99.73%，如图 8-7 所示。

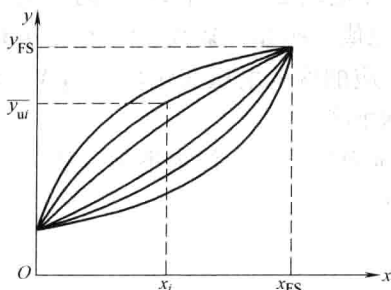


图 8-6 重复性

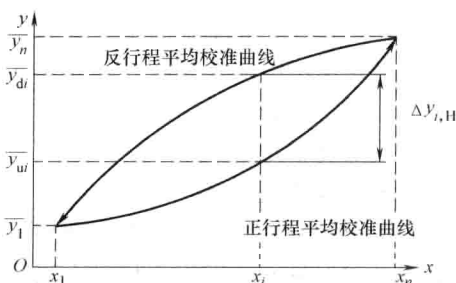


图 8-5 迟滞

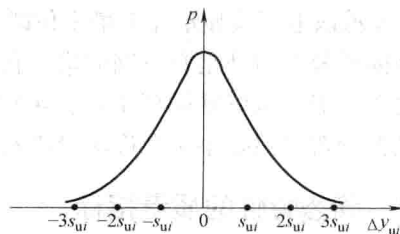


图 8-7 正态分布概率曲线

类似地，可以给出第 i 个测点反行程的子样标准偏差 S_{di} 。