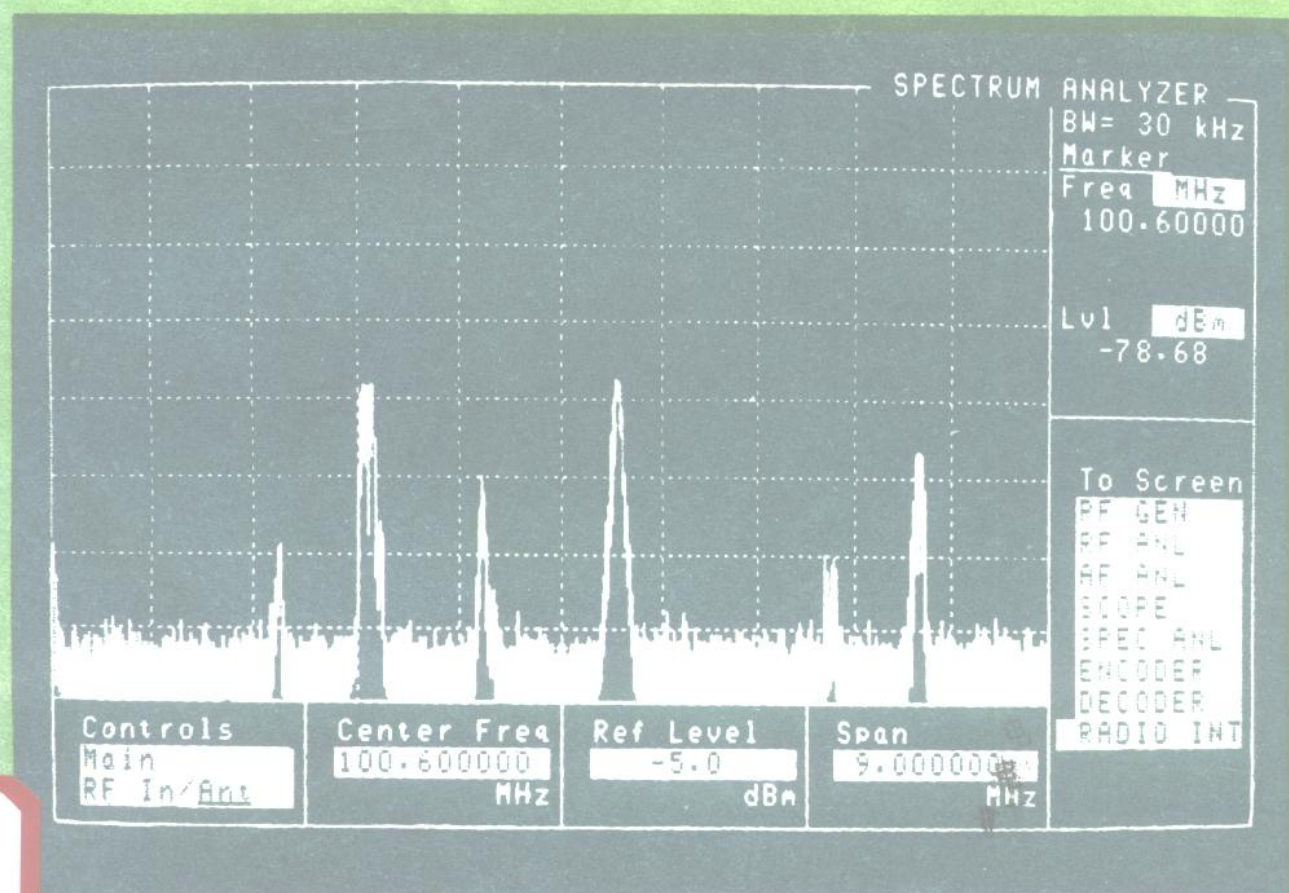


高等学校教材

电子测量学

王永生 编著



西北工业大学出版社

TM1930.11
W46

384790

高等学校教材

电子测量学

王永生 编著



西北工业大学出版社

1995年3月 西安

(陕) 新登字 009 号

【内容简介】 本书系统地论述了电子测量学的基本知识。它包括两大部分（共八章）：其一，误差理论与测量数据处理（第一章），内容有 测量误差的基本概念，随机误差，系统误差，误差的合成与分配，测量数据处理；其二，电子测量的基本原理、测量仪器与测量技术（第二至八章），内容有 信号发生器，时间、频率和相位测量，电压测量，示波测量技术，扫频测量技术，数据域测试，自动测试系统和智能仪器。这部分不仅讲述目前广泛使用的传统测量仪器和测量技术，而且讲述现代的测量仪器和测量技术，如合成信号发生器、数字化测量技术、取样技术、数字存储示波器、扫频测量技术、逻辑分析仪、自动测试系统和智能仪器等。

本书可作为高等学校电子工程和通信工程类各专业的专业基础课教材，也可供自动控制和仪器仪表类有关专业选用，对从事电子测量领域的科技工作者也有一定的参考价值。



©1995 西北工业大学出版社出版

(710072 西安市友谊西路 127 号 电话：4253407)

陕西新华书店发行

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-0732-8/TN · 30 (课)

*

787×1092 毫米 1/16 印张：15.375 字数：370 千字

1995 年 3 月第 1 版

1995 年 3 月第 1 次印刷

印数：1—5 000 册 定价：11.00 元

购买本社的图书，如有缺页、错页的，本社发行部负责调换。

前 言

本书由航空高等学校教学指导委员会评选审定, 推荐出版。西安电子科技大学信息工程系杜武林教授担任主审。

本书系统地论述了电子测量学的基本知识。它包括误差理论与测量数据处理, 电子测量的基本原理、测量仪器与测量技术两大部分。第一部分阐述测量误差的基本概念、随机误差、系统误差、误差的合成与分配以及测量数据处理; 第二部分讲解电子信号和电子系统的测试仪器及测试系统的工作原理、技术性能和测量技术。

20 世纪 60 年代以来科学技术迅速发展, 出现了许多新理论、新技术、新材料、新器件, 这大大促进了电子测量学的发展。70 年代以来, 电子科学技术, 特别是数字技术、微电子技术、计算机和微处理器的突飞猛进, 为电子设备的高指标、多功能、高速度、小型化、系统化、数字化、自动化和智能化的发展创造了新的条件。因此本书不仅讲述目前广泛使用的传统测量仪器和测量技术, 而且还讲述现代的测量仪器和测量技术, 如合成信号发生器、函数信号发生器、数字化测量技术、频率的精密测量、A/D 变换、双热偶交直流变换、取样技术、数字存储示波器、扫频测量技术、逻辑分析仪、自动测量系统和智能仪器以及目前广泛使用的通用接口总线 GPIB 和迅速发展的 VXIbus 等。

“电子测量学”是一门理论性和实践性都比较强的课程。学生不仅要学好理论知识, 还要搞好实验操作。学完本课程后, 学生应能掌握电子测量的基本原理和基本技术, 能根据测量任务合理地拟定测量方案, 正确地选择和使用测量仪器, 充分地发挥仪器功能; 具有一定的误差分析和数据处理能力; 对电子测量领域的新仪器、新技术有一定了解, 为今后从事科学研究和工程设计准备必要的电子测量理论知识和实验技能。

本书是在电子测量课讲义的基础上修改、补充而成。该讲义十多年来被西北工业大学无线电技术、通信工程、自动控制、检测技术与仪器、应用电子技术、工业自动化等专业采用, 许多任课教师提出了宝贵意见和建议。这次出版, 得到航空高等学校教学指导委员会各位专家、北京航空航天大学、南京航空航天大学、南昌航空工业学院、西安电子科技大学和西北工业大学许多教授的热情指导和帮助, 在此对各位同仁、专家和教授表示衷心的感谢。

由于作者水平有限, 书中难免有不妥之处, 殷切地希望读者批评指正。

编著者

1994 年 6 月于西北工业大学

目 录

绪论	1
第一章 误差理论与测量数据处理	6
§ 1.1 测量误差的基本概念	6
§ 1.1.1 测量误差的定义	6
§ 1.1.2 测量误差的分类	8
§ 1.2 随机误差	11
§ 1.2.1 测量值的数学期望和方差	11
§ 1.2.2 测量值的分布	13
§ 1.2.3 测量值参数的估计	16
§ 1.2.4 粗大误差的判别	26
§ 1.3 系统误差	27
§ 1.3.1 系统误差的判别	27
§ 1.3.2 系统误差的来源	29
§ 1.3.3 系统误差的处理	30
§ 1.4 误差的合成与分配	32
§ 1.4.1 误差传递公式	33
§ 1.4.2 误差的合成	33
§ 1.4.3 误差的分配	38
§ 1.5 测量数据处理	41
§ 1.5.1 测量数据的表示和运算	41
§ 1.5.2 非等精度测量的数据处理	43
§ 1.5.3 实验结果的图解处理	45
§ 1.5.4 最小二乘法曲线拟合	46
§ 1.5.5 回归分析	52
习题与思考题	55
第二章 信号发生器	59
§ 2.1 概述	59
§ 2.2 正弦信号发生器	60
§ 2.3 脉冲信号发生器	67
§ 2.4 函数信号发生器	69
§ 2.5 噪声信号发生器	70
习题与思考题	73

第三章 时间、频率和相位的测量	74
§ 3.1 概述	74
§ 3.2 比较法测量频率	77
§ 3.3 计数法测量频率	81
§ 3.4 频率的精密测量	91
§ 3.5 相位差的测量	98
习题与思考题	102
第四章 电压测量	103
§ 4.1 概述	103
§ 4.2 直流电压的测量	107
§ 4.3 交流电压的测量	112
§ 4.4 脉冲电压的测量	126
§ 4.5 噪声电压的测量	128
习题与思考题	130
第五章 示波测量技术	131
§ 5.1 概述	131
§ 5.2 通用示波器	132
§ 5.3 取样示波器	144
§ 5.4 数字存储示波器	149
§ 5.5 基本的示波测量技术	154
§ 5.6 示波测量技术的应用	159
习题与思考题	164
第六章 扫频测量技术	167
§ 6.1 概述	167
§ 6.2 扫频信号发生器	168
§ 6.3 频谱分析仪	173
§ 6.4 频率特性测试仪	181
习题与思考题	185
第七章 数据域测试	186
§ 7.1 概述	186
§ 7.2 逻辑分析仪的基本概念	189
§ 7.3 逻辑分析仪的数据捕获	192
§ 7.4 逻辑分析仪的数据显示	200
§ 7.5 逻辑分析仪的应用	202
习题与思考题	208

第八章 自动测试系统和智能仪器	210
§ 8.1 概述	210
§ 8.2 自动测试系统	211
§ 8.3 通用接口总线 GPIB	221
§ 8.4 智能仪器	227
习题与思考题	230
附录	232
附表 1 标准正态分布积分表	232
附表 2 t 分布积分表	233
附表 3 均方差置信因数表(χ^2 分布)	234
附表 4 格拉布斯系数 k_g	235
参考文献	236

绪 论

电子测量学是测量学的一个主要分支,也是电子学的一个重要组成部分。

测量是人们使用专门设备,通过实验方法取得客观事物数量信息的认识过程。

测量取得的客观事物的数量信息——测量结果可以用数字、表格、图形或数学关系式表示。无论哪一种表示形式,测量结果都必须包含一定的数值(符号和大小)以及相应的单位。也就是说,测量结果是一个有名数,例如长度为 32.09 m,温度是 -20°C ,功率为 7.5 kW。没有注明单位的测量结果是毫无价值的。少数测量结果表面上是无名数,实际上是两个有名数的比值。例如,放大器的电压增益是输出电压与输入电压之比,信号的非线性失真系数是谐波总功率与基波功率比值的算术根。

测量运用的实验方法包含比较过程——把要测量的未知量与作为测量单位的已知量进行比较,以确定被测量是该测量单位的多少倍。直接体现测量单位的器具称为量具,例如尺子、砝码、标准电池等。在比较过程中往往要借助于专门的比较设备——称之为比较仪,例如用标准电阻测量电阻时要借助于电桥,用标准电池测量电动势时要借助于电位差计,其中电桥、电位差计都是比较仪。

由于大多数量具都要配以相应的比较仪才能进行测量,手续比较繁琐;其次,大多数量具的测量范围较窄,不便于工程测量;此外,有不少参量,例如功率、通频带、失真系数等根本无法做成实物量具,因此在工程测量中很少使用量具和比较仪,而广泛地使用直接显示测量结果的各种直读式测量仪器,例如功率计、频率特性测试仪、失真度测量仪等。

在测量过程中除需要进行比较外,还常常需要进行各种变换。例如磁电式电流表把直流电流变换成指针的偏转,数字式电压表把电压数值变换成数码显示,热电偶温度计把温度转换为热电势,压电式压力传感器把压力转换为电压等。变换的目的在于把不便观测的物理量转换为容易观测的物理量。

人们进行测量时所使用的专门设备统称为测量仪器,它不仅包括各种量具、比较仪和直读式仪器等测量设备,而且还包括信号源、稳压电源等各种辅助设备,以及由它们组成的测量系统。近代电子科学技术的发展,发明了各种以电子元件、器件、部件为核心的测量仪器,用来测量各种电量和非电量,这些仪器统称为电子测量仪器。

测量是人类认识自然和改造自然的重要手段之一。通过测量,人们可以获得客观事物的数量信息,从对客观事物大量观测的结果,总结出普遍规律,建立起各种定理和定律。可以说,测量是打开自然科学未知宝库的一把钥匙。在科学技术高度发达的今天,尖端技术更离不开精确测量,例如人造卫星需要高度精确的自动控制系统,而精确自动控制必须建立在精确自动测量的前提之下。工农业生产的发展也需要足够精确的测量来保证。在现代化的工业生产中测量的精度是保证产品质量的关键。

科学技术和社会交往的不断发展,对同一物理量单位的准确性和一致性的要求不断提高,因此形成了一种专门的测量——计量。所谓计量就是把被测量与经过准确测定,并经国家计量部门认可的基准或标准进行比对的过程。

当今世界,科学技术高度发达,这就要求物理量的单位必须以严格的科学理论加以定义,得到社会公认,并用法律作出规定。测量同一物理量的所有测量器具(仪器和量具)表示的单位都必须与所定义的单位一致,为此每一物理量的单位都需要有计量基准。所谓基准就是采用当代最先进的科学技术,以最高的准确度和稳定度建立起来的专门用来规定、保持和复现某种物理量单位的特殊器具。基准包括主基准,副基准和工作基准。主基准又称国家基准,它具有最高准确度,经国家鉴定并批准,作为统一全国计量单位量值最高权威的计量器具。为了保证主基准的精度不致因经常使用而降低,制作了各种专门用途的副基准,其量值通过直接或间接与主基准比对来确定,它代替主基准作量值传递。为了保证国家基准的完善性,当国家基准一旦失效时有所代替,在副基准中专门设置了一种作证基准。通过定期比对,判断国家基准和作证基准量值的精度。为防止国家基准和副基准的频繁使用而影响其精度,国家还设立了用于检定计量标准的工作基准。

所有基准的结构和工艺都很精致,对使用环境要求十分严格,且操作过程比较复杂,不便经常动用。因此国家计量部门根据基准制作了不同等级计量标准的量具和仪器,用作量值传递。标准共分为一级标准、二级标准和三级标准,其精度依此降低。

计量和测量既有密切的联系,又有不同的分工。一方面,测量的准确度和量值的一致性依靠计量工作来保证,计量学把测量理论和测量技术加以完善和发展;另一方面,随着测量技术和测量仪器的发展又不断产生新的计量仪器,使得计量水平进一步提高。

1. 电子测量的内容

电子测量的含义有两种:狭义的电子测量和广义的电子测量。

狭义的电子测量是指电子技术中对各种电量的测量。它主要包括以下三个方面:

1) 电信号能量的测量,例如电流、电压、电功率和电场强度的测量。

2) 电信号特性的测量,它包括信号的时域特性、频域特性和数域特性测量。例如信号的频率、相位、噪声、波形、频谱、逻辑关系等的测量。

3) 电子元件(电阻、电容、电感等)、电子器件(电子管、晶体管、集成电路等)、电子部件(放大器、滤波器、调制器等)和电子系统(接收机、发射机、通信系统等)各项参数的测量。

广义的电子测量指凡是应用电子科学技术对一切电量或非电量的测量。随着电子科学技术的发展,把许多物理量先通过相应的传感器变成电信号,然后利用电子技术进行测量。

2. 电子测量的特点

与其他测量相比,电子测量具有五个特点:

1) 频率范围宽 仅就狭义的电子测量而言,其频率低端至 10^{-5} Hz,高端达100 GHz。极宽的工作频率范围使电子仪器得到更加广泛的应用,也促使电子仪器向宽频段方向发展。近年来出现了不少频程很宽的仪器,如10 kHz到40 GHz的频谱分析仪。

2) 量程广 由于待测电量大小相差极远,因此要求电子仪器的量程极广。例如来自宇宙飞行器的信号功率小至 10^{-14} W,而远程雷达发射机的脉冲功率可达 10^8 W。一般说来,很难用一台仪器覆盖某种电量的整个范围。宽量程是仪器发展的一个方向。目前测量频率的仪器量程最宽,一台完善的电子计数器可测量 10^{-5} ~ 10^{11} Hz的频率。

3) 精度高 通常电子学领域的测量精度比力学、热学等领域要高得多。目前时间的测量精度最高,已达到 10^{-14} 。

关于测量精度有两点需要说明：其一，采用电子测量技术可以大大提高电量和非电量的测量精度，但绝不可能优于基本单位本身所能达到的精度；其二，并非所有的参量测量都能达到很高的精度，有些参量，例如失真度和 Q 值等的测量精度都不高。

4) 速度快 由于电子测量是通过电子运动和电磁波传播进行的，因而测量速度非常快。在现代科学技术领域里，许多被测量都是瞬息万变，因而要求很高的测量速度，如导弹发射过程中需要连续不断地测量导弹的运行参数，通过计算机进行数据处理，产生控制信号去调整导弹的飞行速度和方向。如果测量速度太慢，就不能及时调整飞行参数，也就无法实现快速自动控制。

5) 易于实现自动化、智能化 人们可以把电子测量仪器或与它相连接的传感器放置在人类不便进入或无法进入的地方进行遥测，而且可以在被测对象正常工作的情况下进行测量。此外，电子测量设备便于和自控、遥控设备联接，成为自控系统或遥控系统的一个组成部分，因此电子测量在自动化技术中起着十分重要的作用。

70 年代以来数字技术和大规模集成电路的迅速发展，产生了体积小、重量轻、功能强、价格低的微型计算机，引起了科技、生产领域的重大飞跃。微处理器和单片机用于电子仪器，在仪器体积、重量和成本不明显增加的情况下，其功能大大增加，性能大大提高；有的仪器可以实现程控、遥控、自动记录测量结果、自动完成数据处理、自动调零、自动校准、自动诊断故障，甚至自动修复，使电子仪器成为智能仪器。

3. 电子测量技术与仪器

在电子学领域，测量对象是从直流到光频范围内的信号特性和系统特性。信号和系统都包括模拟和数字两大类。信号特性主要是信号的电压、电流、功率、频率、周期、波长、时间、相位、时延、波形、频谱、数据、时序等。系统特性包括集中参数系统和分布参数系统的特性，例如电阻、电感、电容、阻抗、导纳、品质因数、介电常数、磁导率、增益、衰减、驻波比、反射系数、散射系数、单位阶跃响应、单位冲激响应、传递函数、逻辑关系、数据处理能力等。信号特性测量是系统特性测量的基础。

3.1. 模拟信号和系统的测量

同一模拟信号特性或系统特性可以在时间和频率两个范畴内描述，因此对模拟信号和系统特性的理论分析和实际测量可采用时域和频域两种方法。下面对两者作一比较。

1) 研究内容 时域测量以被测对象（信号和系统）在时间范畴（时域）的特性为依据，研究被测对象的幅度-时间特性，即信号的波形和系统的单位阶跃响应或单位冲激响应。它以连续时间为自变量表示信号和系统的特性。

频域测量是以被测对象在频率范畴（频域）的特性为依据，研究被测对象的复数频率特性，即信号的频谱和系统的幅频特性、相频特性、传递函数。它以频率为自变量表示信号和系统的特性。

同一被测对象的时域特性和频域特性存在着傅里叶变换和反变换关系。

2) 测试信号 时域测量所用的测试信号是单位阶跃、冲激函数等脉冲信号，因此时域测量又称为脉冲测量。使用高速隧道二极管脉冲发生器产生的 15 ps 的阶跃脉冲可测 0~30 GHz 全部频带；使用微波信号源，频率上限可达 50 GHz。

频域测量所用的测试信号是正弦信号，因此频域测量又称为正弦测量。频域网络分析仪测试信号不能从零频（直流）开始，一般从 0.1 GHz 开始，目前最高达 40 GHz。

3) 测试状态 时域测量中待测信号和系统的特性是瞬变过程, 因此时域测量又称为瞬态测量。频域测量中待测信号和系统的特性是稳定状态, 因此频域测量又称为稳态测量。

4) 测试仪器 时域测量仪器主要是脉冲信号发生器、示波器、时域反射计、时域网络分析仪。

频域测量器主要是正弦信号发生器、扫频信号发生器、频谱分析仪、频率特性测试仪、频域网络分析仪等。

现代电子测量技术融时域测量和频域测量于一体, 在计算机的控制下, 既能进行时域测量, 又能进行频域测量, 两者的测量结果采用数字信号处理技术可以相互转换。

5) 测试结果 时域测量可给出被测信号的波形, 给出测试信号通过系统后的波形或起始脉冲后延迟脉冲或反射脉冲组成的信号序列。改变测量窗口的位置, 可分析任何一个延迟脉冲或反射脉冲。这样在反射测量中不仅可测出某个反射的大小和性质, 而且能确定产生反射不连续点的位置。时域测量只能在有限的时间窗口内采集数据, 通过傅氏变换后, 只能获得离散频率点的数据, 而且分辨力较低。它不能观测频率响应的细微结构, 不能进行窄带测量。

频域测量可给出被测信号的频谱, 给出测量信号通过系统后的频谱或形成的驻波或反射波。测量结果只能是被测系统所有反射源的反射到达测试端面时相互叠加的总效果。它们叠加的相位关系又随信号频率不同有显著区别。频域测量能给出驻波比和反射系数, 而不能给出各个反射点的位置。频域测量可按照被测系统的特性, 选择测试信号频率范围, 作宽带或窄带扫频测量, 可以观测频率特性细节。

3.2. 数字信号和系统的测试

随着电子科学技术的迅速发展, 特别是数字化技术、计算机技术、集成电路、微处理器等突飞猛进, 传统的电子测量理论、技术和仪器无法适应数字信号和数字系统的需要, 电子测量学出现了一个新领域——数据域测试。它与时域测量和频域测量鼎足而立。

在模拟系统中, 某一点发生的事件, 一般会立即在电路的输出端反映出来。在数字系统中, 某一点发生的事件, 往往经过若干个或很多个内部工作周期之后, 才会在另一点或输出端有所反映, 甚至可能毫无反映。在数字系统中, 不同的内部事件可能产生同样外部或终端结果。数字集成电路, 特别是大规模和超大规模集成电路的内部电路规模庞大, 而外部引脚很少, 常常需要从引脚上所得的测试结果判断内部电路的工作过程。在数字系统中, 除了因硬件故障引起的外部信息错乱外, 还可能因软件故障导致异常输出。鉴于上述各点, 对于数字系统和数字器件的研制、生产和使用维护, 都需要一种新的测试技术和测试仪器。数字系统处理的是数字信号, 大多是一串二进制脉冲序列, 通常叫做数据。因此这类测试称为数据测试, 简称数域测试。

数据域测量研究被测对象(信号和系统)的数据域(数域)特性, 其函数的自变量为离散时间或事件出现的顺序, 因变量常用状态值, 即计算机科学中的“字”表示。

数据测试仪器是在数字系统中产生、采集、存储、处理和显示数据的仪器。它包括节点测试器、逻辑分析仪和开发系统三大类。逻辑分析仪是目前功能很强、使用最广的通用数据域测试仪器。

3.3. 已调信号和调制系统的分析

现代电子设备, 从常用的蜂窝式电话到先进的通信、导航、雷达和武器系统, 都越来越多地采用复杂的调制技术, 以提高系统的技术性能, 如通信系统要更快、更准地传递更多的

信息, 导航系统要更快、更准地得到更多用户的位置、速度信息, 雷达和武器系统要具有更快、更准地对更多目标的反应能力。80 年中期美国惠普 (HP) 公司研制出第一台调制域分析仪, 从而开创了调制分析技术。

调制域分析是电子测量技术中的一个新概念。迄今为止, 还只有少量高精尖产品研制者用调制域分析技术解决有关技术难题。目前还不能充分估计调制域分析的应用范围, 但至少在压控振荡器、锁相环、集成电路、数据存储装置、机电系统、数字通信、扩频通信、雷达、电子战和监视系统等领域的应用可取得良好效果。例如跳频通信系统的压控振荡器需要从一个频率迅速跃变到另一频率, 使作 HP53310A 调制域分析仪可以迅速地捕获压控振荡器的单次阶跃响应, 观测频率的跃变过程。

4. 电子测量的应用和发展方向

电子技术的高速发展和电子测量的优越性能, 使得电子测量技术广泛地应用在科学、技术和生产的各个方面。现在几乎任何一个科技领域和生产部门都要应用电子测量技术, 大到天文观测、航天探索, 小到物质结构、基本粒子的研究; 从现代的工业生产, 到普通的日常生活; 从奥密的遗传研究, 到一般的诊病治疗, 总之时时处处都应用电子测量。

电子测量的发展与自然科学技术特别是电子科学技术的发展密切相关。一方面, 电子测量的发展为自然科学特别是电子学的理论研究、实践检验提供了不断改善的条件; 另一方面, 自然科学特别是电子学的发展又不断地向电子测量提出了新的课题, 促使它不断进步, 而且近代电子学、计算科学、物理学、材料科学的发展又为电子测量提供了新理论、新技术、新工艺、新器件。可见, 电子测量与其他科学技术的发展相辅相成。

电子测量的广泛应用以及与其他科学技术之间的密切关系, 使得电子测量的最新水平往往是科学技术最新成果的反映, 因此电子测量这门科学技术充满着生命力。电子测量正朝着高指标、多功能、高速度、小型化、系统化、数字化、自动化、智能化的方向发展。

一个国家电子测量水平的高低, 往往是反映这个国家科学技术水平的一个重要方面。提高我国电子测量的水平是我们电子科技工作者的光荣职责。

5. “电子测量学”课程的内容与要求

电子测量的内容十分广泛, 测量仪器和测量技术又在不断发展, 对于从事不同领域的工作者, 他们所需的电子测量知识也各有侧重。这门“电子测量学”课程是为电子类专业设置的, 它仅仅包含电子测量的部分内容——各种电量的测量。本课程不包含电工测量和微波测量, 其有关内容在电工原理和微波技术课程中讲授。非电量测量涉及面广, 传感器技术、非电量的电测技术、自动检测技术等教材对有关领域的非电量测量各有详尽论述。

本课程系统地讲述电子测量的基本知识, 它包括两大部分: 第一部分是误差理论与测量数据处理, 内容有误差的基本概念, 随机误差, 系统误差, 误差的合成与分配, 测量数据处理; 第二部分是电子测量的基本原理、测量仪器和测量技术, 内容有信号发生器, 时间、频率和相位测量, 电压测量, 时域测量, 频域测量, 数域测试, 自动测试系统和智能仪器。

“电子测量学”是一门理论性和实践性都比较强的课程。学生不仅要学好理论知识, 还要搞好实验操作。学完本课程以后, 学生应掌握电子测量的基本原理和基本技术; 能根据测量任务合理地拟定测量方案, 正确地选择、使用测量仪器, 充分地发挥仪器功能; 具有一定的误差分析和数据处理能力; 对电子测量领域的新仪器、新技术有一定了解, 为今后从事科学研究和工程设计准备必要的电子测量理论知识和实验技能。

第一章 误差理论与测量数据处理

§1.1 测量误差的基本概念

测量是人们使用专门设备,通过实验方法取得客观事物数量信息的认识过程。

人们把被测量(测量对象)具有的真实量值称为它的真值。真值是客观存在的,在不同的条件下(时间和空间),同一被测量的真值往往是不同的。

在测量过程中由于种种原因,例如对客观事物认识的局限性,测量仪器不准确或测量手段不完善等,因而得到的被测量的测量值不可能完全准确地等于被测量的真值。也就是说,测量中不可避免地存在着误差。显然,真值很难从实验中得到。真值通常由理论给出或由计量学作出规定。

不同测量任务对测量误差的大小,即对测量精度的要求是不同的。随着科学技术的发展,很多领域对测量精度提出了越来越高的要求。当今世界,对测量误差的控制能力成为衡量测量水平的重要标志之一。因此人们需要不断地研究测量理论,改进测量仪器,提高测量技术。

§1.1.1 测量误差的定义

测量误差就是测量结果与被测量真值的差别。测量误差通常有两种表示方式:绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差和修正值

设被测量的测量值为 x , 被测量的真值为 x_0 , 则测量值的绝对误差

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

由于被测量的真值很难用实验方法得到,因此在实际测量中通常把上一级标准的测量结果——称之为实际值——用来代替真值。显然上一级标准的测量结果也有误差,实际值并不等于真值,但无论怎样,实际值总比测量值更接近于真值。

人们把与绝对误差 Δx 的绝对值相等但符号相反的数值称为修正值 C , 即

$$C = -\Delta x = x_0 - x \quad (1-2)$$

通过检定,可由上一级标准(或基准)给出受检仪器或量具的修正值。利用修正值可求得对应于该仪器或量具指示值或标称值的实际值

$$x_0 = x + C \quad (1-3)$$

例如,用修正值为 $+0.03 \text{ mA}$ 的电流表测量电流时,若电流表的指示值为 4.60 mA , 则被测电流的实际值为

$$x_0 = x + C = 4.60 + 0.03 = 4.63 \text{ mA}$$

根据不同仪器的特点,修正值可用公式、曲线或表格等形式给出。在一些自动化测量仪器中,可以预先把修正值储存起来,在测量过程中自动进行修正。

2. 相对误差

用绝对误差表示测量误差有其不足之处,就是它往往不能确切地反映测量的精确程度。例如测量两个频率:

频率 $f_1 = 1\,000\text{ Hz}$, 绝对误差 $\Delta f_1 = \pm 1\text{ Hz}$,

频率 $f_2 = 1\,000.00\text{ kHz}$, 绝对误差 $\Delta f_2 = \pm 10\text{ Hz}$,

尽管绝对误差 Δf_2 远大于 Δf_1 ,但我们决不能因此得出 f_1 比 f_2 测量得精确的结论。恰恰相反, f_2 的绝对误差 Δf_2 仅占 f_2 的 0.001% ,而 f_1 的绝对误差 Δf_1 却占 f_1 的 0.1% 。从这个方面看, f_2 的测量比 f_1 精确得多。由此可见,仅用绝对误差描述测量的精确程度是不够的。还要引入相对误差的概念。

相对误差的表示形式常用下面几种:

2.1. 实际相对误差和示值相对误差

绝对误差 Δx 与被测量实际值(或真值) x_0 的比值,叫做实际相对误差 γ_0 ,通常用百分数表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

绝对误差 Δx 与被测量的测量值(指示值或标称值) x 的比值叫做示值相对误差 γ_x ,通常也用百分数表示,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1-5)$$

在一般情况下, Δx 都不大,即 x 与 x_0 相差甚小,故 γ_x 与 γ_0 十分相近。因而实际相对误差和示值相对误差常常都称为相对误差,用 γ 表示。

在工程测量中通常采用示值相对误差。这是由于仪器出厂检验时,通常把受检仪器调到某整刻度上,然后从标准仪器上读出实际值或直接读出误差 Δx ,而相对误差则是 Δx 与受检仪器的示值之比。其次,有的修正值用受检仪器在某些示值点上的相对误差形式给出,即给出的修正值不是 C 而是 C/x ,使用者可以从 x 与 C 方便地求得这些示值点上的实际值

$$x_0 = x + C = x(1 + C/x) \quad (1-6)$$

当进行严格的误差分析时,通常采用实际相对误差。

2.2. 满度相对误差

相对误差(实际相对误差或示值相对误差)可以较好地反映测量的准确程度,但是在模拟式仪表中用它来表示仪表的精确程度往往感到不便。这是因为通常使用的磁电式电表(准确度劣于 0.2 级的电表),当指针偏转到不同位置时,由于环形磁场、机械摩擦及游丝扭矩等因素的不均匀性对测量精度的影响都可以忽略,因而可以认为在不同的偏转角度,这些因素引起的误差都相同,即在同一量程内的绝对误差 Δx 为常数。这样在同一量程内随着被测量大小不同,其相对误差也就不同。为了方便地划分电表的等级,人们定义了满度相对误差 γ_m ,它是仪表在某量程内绝对误差 Δx 与该量程满刻度值 x_m 之比,也用百分数表示,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

满度相对误差 γ_m 的分母是量程的满度值,因此 γ_m 总是不大于示值相对误差 γ_x 。对某一量程来说 x_m 是常数,因此 γ_m 实际表征的是绝对误差。

根据国家标准 GB776-65《电工测量仪表通用技术条件》规定,电工仪表共分七级: 0.1 ,

0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 级。例如 0.5 级的电表表示其满度相对误差为 0.5%。

为了减小相对误差, 使用这类电表时最好选择量程 x_m 稍大于被测量 x , 即尽可能使指针接近于满度偏转, 而不要让指针处于仪表刻度 1/3 的起始段内。

上述结论并非在任何情况下都是适用的。例如模拟式万用表的电阻值刻度是非线性, 为了减小误差, 应合理选择量程, 尽量使指针处于仪表刻度的中间段位置较好。

2.3. 分贝误差

在电子学和声学中常用分贝表示信号和系统的参量, 对这类参量的测量误差用分贝误差 γ_{dB} 表示比较方便。

若某网络电压传输系数的真值为 K_0 倍, 用分贝表示为

$$K_{dB} = 20 \lg K_0$$

电压传输系数的测量值为 K 倍, 绝对误差为 ΔK 倍, 则

$$K = K_0 + \Delta K$$

用分贝表示为

$$\begin{aligned} K_{dB} &= 20 \lg(K_0 + \Delta K) \\ &= 20 \lg K_0 (1 + \Delta K/K_0) \\ &= 20 \lg K_0 + 20 \lg K_0 (1 + \Delta K/K_0) \\ &= K_{dB} + 20 \lg(1 + \gamma) \\ \gamma_{dB} &= K_{dB} - K_{dB} \\ &= 20 \lg(1 + \gamma) \end{aligned}$$

由此可定义电压、电流类参数的分贝误差为

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma) \quad (1-8)$$

功率类参数的分贝误差为

$$\gamma_{dB} = 10 \lg(1 + \gamma) \quad (1-9)$$

§ 1.1.2 测量误差的分类

测量误差按其性质和特点可分为系统误差、随机误差和粗大误差。粗大误差可能是系统误差, 也可能是随机误差, 或者是二者的合成。若仅从性质划分, 测量误差只有系统误差和随机误差两大类, 含有粗大误差的测量值明显地偏离真值, 故常常另作一类。

1. 系统误差

在一定的条件下, 即测量条件不变或某些条件按一定规律变化, 多次重复测量同一量时, 误差的绝对值和符号都保持恒定, 或在某一条件改变时, 误差按某种规律变化, 这种误差称为系统误差, 简称系差, 通常用字母 ϵ 表示。它可从两个方面分类。

1.1. 系统误差按其值的恒定性分类

1.1.1. 恒值系差

在一定的测量条件下, 保持恒定不变的误差称为恒值系差。例如某电阻的实际值 $R_0 = 10.0 \Omega$, 万用表多次测量结果 $R = 10.4 \Omega$, 其误差 $\Delta R = 0.4 \Omega$, 这种误差属恒值系差, 它产生的原因可能是万用表不准或是没有准确调零的缘故。

1.1.2. 变值系差

在测量过程中,按某一确定的规律变化的误差称为变值系差。变值系差按其变化规律可分为累进性系差,周期性系差和按复杂规律变化的系差。

累进性系差是指在整个测量过程中,误差的数值逐渐增加或逐渐减小。例如标准电池在使用过程中,因放电而使其电动势逐渐下降,故标准电池的电压误差逐渐增加。

周期性系差是指在整个测量过程中,误差的数值周期性变化。例如对某 LC 振荡器做环境温度试验,当温度在一定范围内周期性变化时,其振荡频率随之周期性的变化,振荡频率误差属周期性系差。

所谓按复杂规律变化的系差是在整个测量过程中,误差的变化规律相当复杂,然而其规律在多次测量时具有重复性,并且这些规律可以通过曲线、表格或经验公式来表示。例如,标准电池的电动势随环境温度变化的规律十分复杂,通过多次实验观察,温度引起的电动势误差的经验公式为^[1]

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_{20} - E_t \\ &= [39.94(t - 20) + 0.929(t - 20)^2 \\ &\quad - 0.0092(t - 20)^3 + 0.00006(t - 20)^4] \times 10^{-6} \text{ V}\end{aligned}$$

式中 t 为摄氏温标的度数;

E_{20} 为 20°C 时标准电池的电动势;

E_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时标准电池的电动势。

1.2. 系统误差按其值的确定性分类

1.2.1. 确定性系统误差

所谓确定性系统误差就是符号和大小都确切知道的误差。例如有一电压的实际值为 2.95 V ,用某电压表测量时,其示值总是 3.00 V ,那么该电压表在示值为 3 V 时的绝对误差为 $+0.05 \text{ V}$ 就是确定性系统误差。

1.2.2. 不确定系统误差

所谓不确定系统误差就是只知道误差数值范围而不知道其符号和确切数值的系统误差。例如,有一批标志为 $10 \text{ k}\Omega \pm 10\%$ 的电阻。这种表示的含意有三点:其一,这批电阻的实际值基本上在 $9 \sim 11 \text{ k}\Omega$ 范围内,超过此范围的可能性很小;其二,每一只电阻的阻值虽带有偶然性,但这批电阻的阻值服从一定的统计规律;其三,对具体选定的一只电阻来说,当不考虑温度等因素的影响时该电阻的阻值是确定不变的。上述三点反映了不确定系统误差的双重性质,即本质上属于系统误差,在表现形式上具有随机误差的一些特点。

理论上系统误差具有一定的规律性,可以根据其产生原因,采取相应的技术措施消除或减小它,但实际上处理系统误差并不是件容易的事情。

2. 随机误差

在相同的条件下,多次重复测量同一个物理量,若误差的绝对值和符号都在变化,即绝对值时大时小,符号时正时负,不能事先确定下一次误差的确切数值,而各次误差都服从某种统计规律,这种误差称之为随机误差,通常用字母 θ 表示。

例如在一定条件下,用五位数字电压表对某电压进行 10 次测量,其结果如表 1-1 所示,从测量数据看不出什么明显的规律。如果在完全相同的条件下,再测量 10 次,将会发现测量数据的起伏又不一样。这种测量结果就包含有随机误差。

随机误差表征测量数据的离散程度。在一般工程测量中不一定能发现它。例如用一个普

通的万用表测量输出电压为 12 V 的稳压电源,即使测量几十次,也看不出变化。这是由于随机误差一般都很小,不容易被发现。只有当仪器的分辨力足够高时,随机误差才会显露出来。

随机误差是由多种互不相关的因素对测量结果的影响而产生。所谓相同的测量条件是从宏观上看,测量仪器、测量环境、测量方法和测量人员等条件都保持不变。然而从微观上看,空气扰动、大地微震、内部噪声、外界干扰等各种因素都无时无刻不在变化。虽然每一种因素的影响都相当微小,然而诸因素的影响叠加起来就产生了相当明显的随机误差。

一次测量的随机误差不能事先确定,也不能用实验方法加以消除,而足够多次测量的随机误差服从统计规律。随机误差概率分布的形式有正态分布、均匀分布等。无论是那一种分布的随机误差都具有两个性质:其一,多次测量的随机误差绝对值实际上不会超过一定的界限,这就是随机误差的有界性;其二,多次测量,绝对值相等符号相反的随机误差出现的概率相同,这就是随机误差的对称性。既然正负随机误差的分布是对称的,那末随着测量次数无限增加,随机误差的算术平均值必然趋近于零。因此也可以说,随机误差具有抵偿性。抵偿性是随机误差的重要特性,我们可以通过多次测量取算术平均值的办法来减小随机误差对测量结果的影响。

3. 粗大误差

测量某物理量时,若测量值显著的偏离真值,那末该测量值所含的误差称为粗大误差。由于含有粗大误差的测量值是不可信的,因而粗大误差又叫差错。

产生粗大误差的原因往往是由于测量者粗心大意,如读数、记录和计算错误等。当然,仪器故障、供电电源瞬时跳动、偶然的强电磁干扰、测量方法不合理等原因也会引起差错。

例如如图 1-1 所示的晶体管的低频放大电路中,若用一台内阻为 $10\text{ k}\Omega/\text{V}$ 的万用表在 2.5 V 量程分别测得 $U_b = -0.58\text{ V}$, $U_c = -0.62\text{ V}$, 于是 $U_{bc} = U_b - U_c = +0.04\text{ V}$ 。根据这个测量结果,放大器应处于截止状态,但实际上放大器工作完全正常。显然测量结果必然有差错。仔细分析就发现,差错是万用表的输入电阻太小造成的。

含有粗大误差的测量值称为坏值。测量数据中的坏值应剔除不用。对于特别大的系统误差,或者因它难以修正,或者因它严重歪曲了被测对象的工作状态,因而把它当作差错而剔除不用。对于离散性特别大,出现次数又非常少的随机误差,可应用数理统计的方法,把它判定为差错而剔除之。

4. 各类误差的关系及其对测量结果的影响

系统误差反映了测量结果偏离真值(或实际值)的程度。在误差理论中,一般用正确度来表征系统误差的大小。系统误差越小,正确度越高。

表 1-1 某电压测量结果 单位 V

i	u	i	u
1	10.004	6	9.997
2	10.012	7	10.000
3	10.003	8	10.002
4	9.998	9	9.999
5	10.001	10	10.005

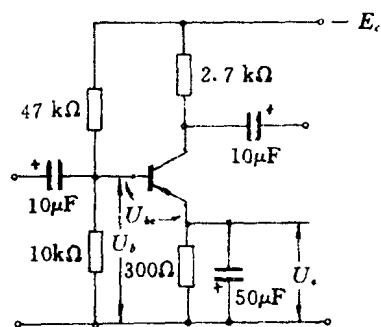


图 1-1 晶体管低频放大器