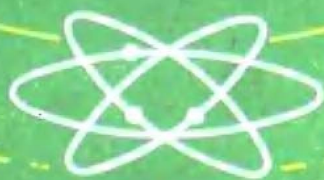


— 高等学校教材 —

电子测量

成都电讯工程学院 陆玉新 傅崇伦 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书详细地讨论了误差特性、实验数据处理,以及现代电子测量的基本原理和方法。基本原理部分包括传统的模拟测量,以及近年来发展起来的数据域测试、测量自动化等内容。涉及范围广、具有一定的理论深度、很强的实践性。

本书是全国高校工科电子类专业无线电技术与信息系统的专业基础课教材,原则上也适合于电子测量专业。同时,对于从事电子测量的科技工作者也有一定的参考价值。

电 子 测 量

成都电讯工程学院 陆玉新 傅崇伦 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张19³/₄ 455千字

1985年12月第一版 1985年12月第一次印刷 印数: 0,001—5,800册

统一书号: 15034·3020 定价: 4.05元



出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议，共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由高校工科电子类专业无线电技术与信息系统教材编委会仪表与测量编审小组评选审定,并推荐出版。

该教材由成都电讯工程学院一系陆玉新同志担任主编,北方交通大学电信系蒋焕文副教授担任主审。编审都是依据仪表与测量编审小组审定的编写大纲进行的。

本课程的参考教学时数为60~80学时。本书可作为无线电技术专业的专业基础课教材,经过适当的增删和补充,原则上也适合于电子测量专业。本书主要内容可分为如下两大部分:

(1) 测量误差理论及数据处理,这部分主要讨论误差特性、实验数据处理,以及利用计算机处理实验数据的基本方法。

(2) 电子测量的基本原理与方法。这部分除讨论传统的模拟电子测量原理与方法之外,还介绍数据域测试,即数字系统故障检测的基本概念、数据流测试原理,以及电子测量自动化的若干问题。

本书内容广泛,有一定的理论深度、很强的实践性。开设本课程的目的,在于使无线电技术专业的学生掌握现代电子技术实践活动中所遇到的基本参数的测量原理与方法,对现代电子测量理论和发展动态有适当的了解。除课堂讲授之外,本课程应开出适当的实验,有条件的学校,可由学生自拟实验方案,开出若干实验选题或开发性实验,以进一步提高学生解决生产和科研实践中电子测量问题的能力。

本书按上限学时编写,各校可根据具体情况,对有关章节作适当增删。为了适应教学和自学的需要,各章均附有习题,书末列有主要参考资料。

本教材由傅崇伦同志编写第一、五、六、七章。陆玉新同志编写第二、三、四、八、九、十章,并统编全稿。张世箕教授为本书撰写了绪论,且在编写过程中提出了很多宝贵的指导性意见。

成都电讯工程学院各级领导,对本书的编写工作给予极大的鼓励和支持,兄弟院校的有关老师和成电一〇三教研室的老师们,对本书原稿提出了许多宝贵的意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者 1984.6
于成都电讯工程学院

目 录

绪论	1
第一章 测量误差理论及数据处理	7
§ 1.1 概述	7
§ 1.2 随机误差	10
一、随机误差的性质和特点	10
二、有限次测量时测量值数学期望的估计	11
三、有限次测量时测量值标准差的估计	11
四、测量灵敏阈对标准差估值的影响	15
五、测量结果的置信问题	15
六、判断异常数据的统计学方法	18
§ 1.3 系统误差	20
一、对产生系统误差根源的消除	20
二、消除和削弱系统误差的典型测量技术	21
三、系统误差的判别	23
四、系统误差的修正和残余系差的估计	24
§ 1.4 误差的传播	24
一、测量误差的合成	24
二、测量误差的分配	29
三、最佳测量方案的选择	31
§ 1.5 测量结果不确定度的表征	32
§ 1.6 测量值的数值计算	33
一、有效数字	34
二、数字的舍入规则	34
三、有效数字的运算法则	35
四、近似公式	36
五、测量结果的表示	37
§ 1.7 最小二乘法与回归分析	40
一、最大似然估计	40
二、最小二乘法	41
三、回归分析	43
§ 1.8 非等精度测量与加权平均	46
一、测量值的权与加权平均	47
二、标准差的估计	49
三、加权平均值的标准差	50
§ 1.9 测量数据的图表表示法	51
一、列表法	51
二、图解法	51
§ 1.10 电子计算机在测量误差与 数据处理中的应用	54
习题	58

第二章 测量信号源	60
§ 2.1 概述	60
§ 2.2 正弦信号源	60
一、低频信号源	61
二、高频信号源	62
§ 2.3 合成信号源	69
一、频率合成方案	70
二、合成信号源	75
三、合成信号源的特点	78
四、合成信号源的应用	79
§ 2.4 扫频信号源	80
一、扫频信号的特性及其应用	80
二、扫频信号的产生	81
§ 2.5 脉冲信号源	83
一、脉冲波形及其参数	83
二、脉冲信号的产生	85
§ 2.6 数字信号的产生	86
习题	87
第三章 电子示波测量方法	88
§ 3.1 概述	88
§ 3.2 电子示波器的基本组成	88
§ 3.3 利用电子示波器进行测量的基础	90
一、电子在电场中的运动	90
二、静电式CRT中的电子枪	91
三、射线的静电偏转	92
四、CRT的工作状态	94
五、偏转系统的高频特性	96
§ 3.4 电子示波器的水平系统	97
一、水平系统的组成	97
二、扫描方式	101
三、同步	103
§ 3.5 扫描功能的扩展	106
一、延迟扫描和双时基系统	107
二、单次扫描	110
§ 3.6 电子示波器的垂直系统	111
一、垂直系统的输入电路	112
二、电子示波器的多踪显示	113
三、频带宽度和上升时间	114
§ 3.7 基本的示波测量方法	115
一、测量前的准备	115
二、波形的显示与测量	116

三、逻辑波形的观测	119	§ 5.4 电压的数字式测量	182
四、利用李沙育图形进行的测量	120	一、概述	182
§ 3.8 取样技术在波形显示中的应用	122	二、各类A/D变换器构成的数字电压表	182
一、取样示波器的工作原理	122	§ 5.5 数字电压表的主要工作特性	189
二、取样示波器的组成	124	一、测量范围	189
三、垂直系统	124	二、分辨力	190
四、水平系统	127	三、测量误差	190
习题	131	四、测量速率	192
第四章 时间和频率测量	133	五、响应时间	192
§ 4.1 概述	133	六、抗干扰能力	192
§ 4.2 电子计数器测频原理	136	§ 5.6 高频电压的计量	194
§ 4.3 电子计数器功能的扩展	137	一、测热电阻电桥式高频电压标准	195
一、利用电子计数器测量周期	137	二、高频电压计量中的一些问题	196
二、利用电子计数器测量时间间隔	137	习题	197
三、累加计数	138	第六章 噪声测量	199
四、电子计数器自校	139	§ 6.1 概述	199
§ 4.4 电子计数器测频误差	139	§ 6.2 噪声参量的测量	199
一、量化误差	140	一、等效噪声电阻	202
二、闸门开启时间的相对误差	141	二、等效噪声带宽	203
§ 4.5 电子计数器测周期误差	142	三、信/噪比	204
§ 4.6 中界频率的确定	145	四、等效噪声电压	206
§ 4.7 提高电子计数器测量精度的		五、噪声系数	208
若干方案	146	六、等效噪声温度	211
一、游标法	146	§ 6.3 利用噪声进行的测量	212
二、内插法	147	一、用互相关性估价系统性能的原理	212
三、平均测量技术	148	二、背景干扰的效应	214
§ 4.8 扩频方案	149	三、利用随机测试信号测量脉冲响应时	
一、 2×5 高速计数方案	149	的统计误差	215
二、预定标方案	150	§ 6.4 存在噪声时进行的测量	216
三、变频方案	151	习题	219
§ 4.9 时间频率的工作基准	151	第七章 波形参数的测量	220
§ 4.10 时间频率基准	152	§ 7.1 概述	220
一、原子能级跃迁的基本概念	152	§ 7.2 非线性失真的测量	220
二、铯原子频标	153	一、基波抑制法	220
§ 4.11 频率稳定度的测量原理	156	二、交互调制法	225
一、频稳的时域定义	157	三、白噪声法(动态法)	227
二、阿仑方差的测量	159	四、信号的概率统计分析法	228
§ 4.12 频率比对	160	§ 7.3 频谱分析	230
习题	160	一、模拟式频谱分析仪	230
第五章 电压测量	163	二、数字式频谱分析仪	233
§ 5.1 概述	163	三、频谱仪的主要工作特性	233
一、对电压测量的基本要求	163	§ 7.4 已调波参数的测量	236
二、电压测量仪器的分类	164	一、调幅波的调幅系数	236
§ 5.2 电压测量的基本方案	164	二、调频波的调频指数与频偏	239
§ 5.3 交直流变换器及其波形响应	166	习题	244
一、交流电压的表征	166	第八章 阻抗测量	245
二、各类交直流变换器及其波形响应	167	§ 8.1 概述	245

§ 8.2 谐振法测量阻抗原理	246	一、数据的存储	275
§ 8.3 Q表	248	二、过渡存储法	277
§ 8.4 Q值的数字测量方法	252	三、选择性存储	278
一、衰减振荡法测Q	252	四、数据的建立和保持时间	279
二、并联谐振电路Q值的数字测量	253	§ 9.7 数据流的分块——触发	279
§ 8.5 虚、实部份分离法测量阻抗	254	一、触发信号的产生	280
一、基本原理	255	二、触发功能的扩展	280
二、利用电阻-电压变换器测量电阻	255	§ 9.8 数据捕获部分框图	283
三、利用阻抗-电压变换器测量阻抗	256	§ 9.9 数据的显示	284
四、虚部和实部的分离	257	一、数据域显示	284
五、参考信号 E_r 相位移的产生	258	二、数据的时域显示	285
六、阻抗-电压变换器实例	259	三、数据的点图显示	286
习题	261	四、数据比较	287
第九章 数据域测试	262	§ 9.10 逻辑分析仪的应用	287
§ 9.1 概述	262	一、定时分析	288
§ 9.2 逻辑错误的基本分析	263	二、状态分析	288
一、有关逻辑故障的几个名词术语	265	习题	290
二、通路敏化法	265	第十章 电子测量自动化	292
三、故障定位	267	§ 10.1 概述	292
四、逻辑电路的简易测试	270	§ 10.2 测量仪器的程控	294
§ 9.3 逻辑信号分析方案	272	§ 10.3 通用接口母线系统	296
一、逻辑分析仪的分类	273	一、GP-IB的基本结构	296
二、逻辑信号分析方案	274	二、GP-IB系统中器件的寻址	299
§ 9.4 多通道信号的输入	274	三、GP-IB系统中器件的远控	301
§ 9.5 数据的捕获方式	275	四、GP-IB系统的三线挂钩过程	302
一、取样模式	275	§ 10.4 用GP-IB组建测试系统	304
二、锁定模式	275	习题	306
§ 9.6 多通道信号的存储	276	参考文献	306

绪 论

测量是人类认识和改造客观世界的一种重要手段。通过测量,人们对客观事物获得了数量上的观念。通过大量观察与测量,人们对各种事物形成了定性和定量的认识,总结出客观规律,建立起各种定理和定律;又通过测量来检验这些认识是否符合客观实际;然后利用这些认识去改造客观世界,又通过测量来检验改造的效果。

测量的水平已被公认为一个国家的科学技术水平和现代化水平的重要标志之一。测量为商品交换、产业分工、产品质量管理、产品的可靠性和相容性、科技信息的可信赖性和一致性,乃至医疗保健、人身安全、工程成败、国家安危等,都提供了定量方面的基本保证。

从广义上说,通过实验方法对客观事物取得定量的信息的过程称为测量。更严密地说,把待测的量直接或间接地与一个习惯公认其值为1的同类量相比较,把后者作为单位,求得它们的比值的过程就是测量。用这个比值与单位的乘积来表示被测量的大小,称为被测之量的量值。

进行测量的技术装备称为测量器具。将被测量转换为示值或其等效信息的测量器具称为测量仪器。以固定形式复现某个量的一个或多个已知值的测量器具称为量具。体现着单位(或单位与某一常数的乘积)的测量器具称为计量标准。用标准来定义、保存、复现一个量的单位(及其倍数或分数),使之实物化,以便通过比较而把该单位传递到其他的测量器具去。国家设立一系列各级实物标准,构成一个各种单位的传递网,通过逐级比较而把国家标准所体现的单位传递到全国一切日常工作测量器具去,以资统一。在每一级的比较中,都以上一级标准所体现的量值当作是准确无误的,并称之为实际值。事实上,测量不可避免都有误差。上、下级标准所体现的单位之值并不完全一致。愈是在下级的标准,尤其是最下级的日常工作测量器具,其数目就愈多,也愈不能像高级标准那样耗费巨资精心制作和保持,因而误差也愈大。为了保证举国上下一切量值的统一和一致,就得联系到带有强制性的技术上和法学上的要求来处理单位、标准、测量方法和测量器具的问题。

关于测量的科学称为计量学。计量学的一个重要内容就是关于单位的建立和统一、保证量值协调一致的科学。联系到带有强制性的技术上和法学上的要求来保证单位和量值的统一和一致,这一部分计量学称为法制计量学。我国习惯上把法制计量学方面的实践活动简略地称为计量。计量是测量的特殊形式,又是测量的基础和依据。

电子测量的目的和范围

电子测量是测量学的一个重要分支,它是在低于光频的电磁频谱中(直到零赫,即直流)利用电子学手段对常用的电磁量(如电压、功率、频率、阻抗等)的测量。正如电子学与电磁学的关系一样,电子测量起源于电磁测量,并一直与之紧密相关,且互有交叉。虽然电子测量的频谱范围覆盖了电磁测量的频谱范围,但电磁测量至今仍保持着

与电子测量并列的一个测量分支的地位。国际单位制的七个基本单位中唯一的一个电学单位(安培),仍属于电磁计量。许多电子测量的单位都由电学和磁学单位导出,许多高频电子测量,都基于把被测的高频电磁量变换成为直流或低频电磁量来加以测量。随着数字式电子仪器的发展,一些传统的电磁测量项目,如直流和工频电压、电流、功率、频率、阻抗,相位等,也成了电子测量的日常测量项目。

自从时间单位秒改由原子频率来定义之后,频率的计量逐渐与时间计量合并形成了时间与频率计量分支。但频率和时间间隔的测量,则仍是电子测量的重要保留项目。

由于电子测量技术和仪器的种种优点,其他测量(包括电磁测量)日益广泛利用和依靠电子测量手段。利用电子测量手段来测量非电磁量,常简称为非电测量,它已形成为另一个庞大的测量分支。怎样将非电磁量按某一定规律变换为电磁量,这是非电测量的关键。一旦变换成功,余下就是电子测量的问题。

电子测量中,对某些特殊对象的一系列具体测量,也逐渐形成了一些专门的测量分支,如天线测量、雷达测量,电视测量,大规模集成电路测量等。

电子测量的内容和对象

电子测量的对象全都属于导出单位。原则上,一切导出单位都可以从基本单位导出。但是,为了实用起见,实际上还建立了一系列导出单位,以便于作直接测量;这样也有利于使各种常见量值的测量能达到更高的精确度,也更便于使各种量值的统一一致。电子测量甚至还包括一些无量纲的量的测量,例如衰减量、反射系数、电压驻波比、信/噪比等;它们是两个同类量的比值,一般用分贝(dB)作单位。

从不同观点出发,电子测量和计量的内容和对象有不同的分类。

一、按频率来分类

一般以30kHz左右为分界,分为低频和高频测量;还可以按频率再分为音频、视频、射频和微波测量。应该指出,其间的分界不甚明确,而且常有交叉重叠。其中音频段内又可再细分为亚音频、音频和超音频测量;微波测量又可细分为米波、分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波测量等。由于电子测量方法和器具日益向宽频段发展,不少已能覆盖从直流到微波频段,因此电子测量按频段的划分,已日渐失去意义。

二、按具体对象来分类

电子测量待测对象一般包括下列四大类参量:

1. 有关电磁能的量。如电流、电压、功率、电场强度,还有电磁干扰和噪声等。
2. 有关电信号特征的量。如频率、相位、波形参数、脉冲参数、调制参数,频谱、相关系数、信/噪比等。
3. 有关电路元件和材料的参数的测量。如阻抗或导纳、电阻或电导、电抗或电纳、电感、电容、品质因数、介质损耗角正切、介电常数、导磁率等。
4. 有关无源和有源网络性能特性的量。如反射参数(反射系数、电压驻波比等)、传输参数(衰减或增益、相位移、群延时等)、灵敏度、分辨力、频带宽度、噪声系数,以及天线的方向性、耦合器的定向度、电子管的跨导、晶体管的 h 参数等。

上列参量的分类并不严格。有时,从不同观点看,一个量往往可以归入其中的某一类,也可以归入另一类。例如,频率既是交变电磁能的一个属性,又是信号的一个重要

特征,也可能是电路元件,材料或网络的一个重要性能特性。此外,上列几类参量之间也有其不可分割的联系。例如,信号特征参量的测量,往往离不开电能量的测量;而元件参量或材料参量,则常常通过网络参量和信号参量的测量来实现。

在按参量分类时,也常常还按频段或所用的技术再行细分。例如,分为微波阻抗测量、射频阻抗测量、低频阻抗测量等。

应该指出,一个电子测量方案往往受到可资采用的测量技术与手段等因素的限制和影响。例如,在较低频率下用四臂电桥测量阻抗是方便的;但在射频高段,由于四臂电桥在接地方面的困难,而改用双T电桥来测量导纳。到了微波频段,则又由于阻抗或导纳唯一性定义上的困难,则主要用开槽测量线来测量电压驻波比值;随着反射计技术的发展,又使得反射系数的测量日益变得重要。在微波网络分析仪出现之后,使得散射参数的测量日渐取代了驻波或反射的测量。随着网络分析仪技术向射频乃至音频段的扩展,在较低频段也开始出现测量散射参数(以代替直接测量导纳或阻抗)的趋势。

三、按电路、信号与系统的理论分析方法来分类

从电路、信号与系统的理论分析方法着眼,可以把电子测量分成时域测量和频域测量,还有新兴的数据域测量。

频域测量研究被测参量和频率的关系。它又可细分为经典的单频正弦波点测或静态测量、后起的正弦波扫频测量或动态测量,以及新兴的白噪声广谱测量。

时域测量研究被测参量和时间的关系。它又可细分为经典的单频正弦波稳态测量、后起的方波或阶跃波瞬态测量,以及新兴的冲击波随机振动动态测量。

数据域测量研究过程与“字”和事件的关系。在电子测量范围内,它包括数字系统的故障侦查、故障定位、故障诊断,以及数据流的检测和显示等。

通常,技术测量和理论分析相比较,受到的具体限制较多,例如精确度、可靠性、经济性、时间因素、设备和环境条件等,对技术测量都有不同程度的影响,所以现存的或者将要设计的测量方案、方法和仪器并不,也不应该简单地仅仅局限在时域、频域或数据域之一的畴域内进行。这三者各有优点,它们之间有联系,又有区别,是相辅相成互为补充的。如所周知,模拟信号的时域分析和频域分析可以用付氏变换与反变换联系起来,而数域和模拟域(包括时域与频域)技术上的联系,则可以借助于A/D、D/A变换器来实现。

四、按测量方法来分类

根据测量方法,可以将电子测量划分为谐振测量、电桥测量、电流电压法测量、比较(替代)测量、计数法测量、示波器法测量等。还可能有其他分类方法。总之,从不同观点出发,可以作出不同的分类,以适应不同的需要。本书为教学方便,主要按测量对象(被测参量)来分章。重点讨论基本电子测量的原理、方法和测量方案的拟订,以及测量数据的处理、测量误差等问题。

电子测量的特点

电子测量除了上面提到过的类别纷纭、对象繁杂、范围广泛等特点之外,同其他测量相比较,电子测量在下述一些方面也表现得十分突出。

一、量程和频程极宽广

例如, 电子测量中待测的功率可能小到 10^{-14}W (来自深空宇宙飞行器的信号), 大到 10^8W 以上 (远程雷达发射机), 量程总的达到 $1:10^{22}$ 。不可能用单一的一程测量方法和单一的测量仪器来覆盖这样宽的范围。不过, 电子测量中也存在用单一方法和仪器能覆盖很宽量程的情况。例如, 同一台数字式多用表能测量 $3 \times 10^{-5}\Omega$ 至 $3 \times 10^8\Omega$ 的电阻, 即量程达到 $1:10^{13}$ 。一台完善的频率计数器则可能测量 10^{-6} 至 10^{11}Hz 的频率, 量程为 $1:10^{17}$ 。类似的情况, 在其他测量中是罕见的。

另一方面, 电子测量包括光频以下 (约 3×10^{14} 至 0Hz) 的整个电磁频谱。一般来说, 同类的量在不同频段的测量所用的方法和器具往往不同, 但也存在不少频程很宽的测量器具。例如, 从音频直到 40GHz 的频谱分析仪、从 0 至 18GHz 的衰减器等, 也并不罕见。

二、精确度参差悬殊

测量技术的水平、测量结果的可信赖性、测量工作的意义和价值, 全在于测量的精确度或测量的不确定度。长度测量的精确度达 $\pm 1 \times 10^{-8}$; 质量测量最好的情况比长度测量约差 1 至 2 个量级; 温度测量最好的情况, 不确定度约在 10^{-5} 量级。电学测量中, 直流电压或电流测量, 最好可达 10^{-6} 量级。然而, 电子测量中、频率测量可达 10^{-13} 量级; 日常工作的频率计数器, 亦可达 10^{-7} 至 10^{-9} 量级。

电磁量易于用电子学方法进行变换。例如, 常见的数字式电压表就是利用 V/T 或 V/F 变换技术, 把电压变换为时间间隔或频率来测量的。按此推论, 电子测量中的电压测量, 是否亦可达到近于频率测量那样高得惊人的精确度呢? 至少, 日常工作用的数字式电压表, 不确定度达到 10^{-5} 的量级并不罕见; 而在电磁测量中, 0.1 级 (不确定度为 $\pm 0.1\%$, 即 $\pm 1 \times 10^{-3}$) 电压表则是珍贵的标准仪器。利用参量变换技术来获得十分方便而且高度精确的测量手段, 是电子测量的一个重大特色; 而这也正是电子测量技术迅速应用于一切测量领域的主要原因。然而, 不应忘记, 电子计量单位全都属于导出单位, 它们是质量、长度、时间、温度、直流电流等基本单位导出来的。导出单位的不确定度不可能优于它所赖以导出的原始基准单位, 因此, 数字式电压表的不确定度目前不可能优于直流电压或电流的 10^{-6} 级不确定度。电子测量本身要求尽可能高的精确度, 通过变换技术有可能实现高精确度的要求; 然而, 另一方面又受到其他测量精确度的限制, 这里存在着深刻的矛盾。如何解决这个矛盾, 把一切计量单位全都统一到频率单位上, 这是计量学最大的课题。

还应注意, 电子测量视具体测量对象以及测量的频程和量程而异, 其所能达到的精确度也可能十分悬殊。许多测量项目固然可以达到相当高的精确度, 然而有些测量项目的不确定度却可能劣到 10^{-2} 的量级或更差, 例如失真度和 Q 值的常规测量就是如此。

三、影响量众多、影响特性复杂

通常来自测量系统外部, 并可能影响仪器性能的量, 称为影响量, 如电源电压的起伏、环境温度的变化、外部噪声和干扰等。此外, 测量系统本身的某个工作特性的变化也可能对另一工作特性发生影响, 从而影响到测量结果, 例如, 电压表的频率响应特性及检波特性, 都直接影响其电压测量结果的量值; 功率计输入端连接器的特性会严重影响功率的量值。电子测量多半要求相当高的精确度, 因而任何影响量或影响特性对测

量的微小影响,都往往不可忽视。另一方面,电子测量器具以及被测对象内部所包含的元、器件数目往往很多,而这些元、器件对外界影响也常常相当敏感。错综复杂的内部和外部影响对测量过程所产生的不良效应,往往会成为严重问题。此外,由于电子测量的频程宽、量程广、这些不良效应有时可以达到十分巨大的程度。

因此,在许多电子测量中,对环境的控制常是必要的,而且有时要求十分严格。为此,对主要影响量规定了严格的基准条件,以及不同组别的工作条件范围。为了削弱环境的影响,常要求有良好的电磁屏蔽和接地;有时也要采取防震措施(包括声屏蔽)。为了削弱测量系统内部产生的不良影响,必须尽量避免寄生(杂散)电感、电容的存在。此外,在集总参数电路系统中,一般要求测量器具有尽可能高的输入阻抗和低的输出阻抗,以避免由于加载效应而改变了系统的正常工作状态。在分布参数电路系统中,则要求良好的阻抗匹配,以避免反射效应。

四、误差问题较难处理

由于电子测量中影响量和影响特性为数众多,而且错综复杂,以致对各种测量误差因素难以充分掌握,因此常会发现不少系统误差带有一定的随机性质,而且大部分还是属于非正态分布的,以致不能完全用经典的概率统计方法进行处理。此外,实际测量又往往无法获得很大的采样,因而难以了解这些误差分项的确切概率分布规律,从而使问题的处理复杂化。最后怎样把分别估计出来的确定性系统误差、正态和非正态的随机性系统误差和纯正态的随机误差分项总合起来,以估计出测量的总的不确定度,这至今仍是意见纷纭,未有定论。

五、对科学技术新成就十分敏感

为了获得高精确度,宽频程、广量程,电子测量对科学技术新成就十分敏感,往往率先予以采用。如采样、锁相、频率综合、相关检波、数字化、自动化等技术,在电子测量中很快就得到了应用,并且日渐习以为常而成为常规技术了。微处理器问世才一年,就在电子测量仪器中被应用;现在在新的一代电子测量仪器中应用已相当普及了。

除了对电子学本身的新成就十分敏感之外,电子测量对于其他学科的成就也很敏感。远者,如吸收了原子波谱学的成就而创造了原子频率标准;从光学中获得启发而发展了毫米波和亚毫米波测量中的许多准光学技术。近者,如低温超导技术在超短脉冲测量中的应用,以及量子干涉器件在电子测量中多方面的应用等。

六、自动化和智能化程度高

在新技术引用方面,最突出的是电子测量与电子计算机科学的结合,这大大提高了电子测量的自动化和智能化程度。迅速的自动测量不仅提高劳动生产率,能完成人工难以胜任的测量任务,而且也避免漂移、温升等不良影响;同时亦易于进行大量数据采集和重复测量,通过统计分析来削弱随机误差。测量仪器智能化,可利用误差模型对测量结果逐个进行误差修正,从而排除了许多系统误差。还可以使测量系统自动进行自我检查、自我校准、乃至自我检定。此外,也极便于利用间接测量的原理,由为数不多的直接测量结果通过换算而求得许多其他有关参量的量值,从而实现多功能的测量。它导致了许多传统测量方法的改观,乃至引起电子测量中带有根本性的变革。低射频以下各种电路参数的测量,由经典的电桥法和谐振法改为近来广泛采用的电流电压法,可作为一个典型例子。

本课程的任务

电子测量面向电子技术,它为电子技术服务,同时,它也是电子技术的一个重要组成部分。因此,电子测量必须适应电子技术所有畴域——模拟域(时域和频域)和数据域的工作。就模拟域来说,电子测量应该而且必须工作在电子技术的全频程和全量程上。电子数据域测试是电子测量和数字计算技术结合的产物,它应该适应整个数域设备软、硬件测试和故障诊断的要求。

电子测量泛指以电子技术为手段进行的一切测量,其内容十分广泛。本书面向无线电技术专业,为了突出重点,拟根据电子测量的特点,着重讨论电子技术中各主要参数的测量原理、测量方法、各种测量方案在具体情况中的适应性,测量结果、测量数据处理和测量误差的分析等问题。同时,为了适应数字自动化设备测试的需要,也介绍数据域软、硬件测试和故障诊断等问题。

《电子测量》课应该是理论联系实际的。因此,除了课堂讲授之外,应安排一定的实验和实验性习题。根据不同的要求,本课程可在60至80学时内作适当调整。通过本课程的学习,要求学生掌握基本的电子测量理论,能根据具体测量任务正确制定测量方案,并能对测量结果进行加工整理。

第一章 测量误差理论及数据处理

§ 1.1 概 述

被测量所具有的真实大小称为真值。由于人们对客观事物认识的局限性、测量工具的不准确,测量手段的不完善、周围环境的影响及测量工作中的疏忽等原因,将使测量结果与真值存在一定的差异。这种差异就叫做测量误差。

测量过程中始终存在着误差。随着科学技术的日益发展和人们认识水平的不断提高,虽可将测量误差控制得愈来愈小,但始终不能完全消除它。研究误差理论及数据处理的目的是:

1. 分析误差产生的原因,正确认识误差的性质,以消除或减小误差。
2. 正确处理数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下得到更接近于真值的数据。
3. 正确组织实验,合理设计仪器、选用仪器和测量方法,以便在最经济的条件下,得到理想的结果。

测量误差通常可分为绝对误差和相对误差。

绝对误差可以表示为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1-1)$$

式中 Δx ——绝对误差;

x ——被测量的给出值;

A_0 ——被测量的真值。

给出值通常就是被测量的测得值,它可以是仪器的示值、量具的标称值(或名义值)、近似计算的近似值等。

在某一时间及空间条件下,被测量的真值虽然是客观存在的,但一般无法确切求得,常只能尽量逼近它。因此,通常是把由更高一级以上的标准仪器或计量标准比对所测得的值 A 来代替真值 A_0 , A 称为实际值。

由上可见,绝对误差的实际计算式常变为

$$\Delta x = x - A \quad (1-2)$$

误差可能是正值或负值。

我们定义与绝对误差 Δx 大小相等、符号相反的量值为修正值 C , 即

$$C = -\Delta x = A - x \quad (1-3)$$

在较准确的仪器中,常常用表格、曲线或公式的形式给出修正值。在某些自动测量仪器中,修正值可以先编成程序储存在仪器中,在测量时仪器可以对测量结果自动进行修正。

修正值通常是在校准仪器时给出。当测量时得到给出值 x 及修正值 C 以后,由式(1-3)即可求出被测量的实际值。

绝对误差及修正值是与给出值具有相同量纲的量。绝对误差的大小和符号分别表明了给出值偏离真值（或者实际值）的程度和方向。

由于绝对误差值的大小往往不能确切地反映测量的准确程度，因此引出相对误差的概念。相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差、引用（或满度）相对误差及分贝误差等。

实际相对误差，是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的比值的百分数来表示的相对误差，记为

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

示值相对误差，是用绝对误差 Δx 与给出值 x 的比值的百分数来表示的相对误差，记为

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

当误差之值不大时， A 与 x 很接近， γ_A 与 γ_x 相差不大。

引用相对误差，是用绝对误差 Δx 与仪器的满刻度值 x_m 之比值的百分数来表示的相对误差，记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1-6)$$

常用电工仪表分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 七级。这类仪表是按 γ_m 之值来进行分级的，例如，0.5 级的电表，就表明其 $\gamma_m \leq \pm 0.5\%$ 。若某仪表的等级是 S 级的，它的满刻度值为 x_m ，则测量的绝对误差为

$$\Delta x \leq x_m \cdot S\% \quad (1-7)$$

其示值相对误差为

$$\gamma_x \leq \frac{x_m \cdot S\%}{x} \quad (1-8)$$

在式 (1-8) 中，总是满足 $x \leq x_m$ 的，可见当仪表等级 S 选定后， x 愈接近 x_m 时， γ_x 的上限值愈小，测量愈准确。因此，当我们使用这类仪表进行测量时，一般应使被测之量的值尽可能在仪表满刻度值的三分之二以上。

在电子学和声学中常用分贝来表示相对误差，叫分贝误差，记为 γ_{dB} 。

对于电流、电压类电参量，有

$$\gamma_{dB} = 20 \lg(1 + \gamma_A) \quad (\text{dB}) \quad (1-9)$$

当误差本身不大时，有

$$\gamma_{dB} \approx 8.69 \gamma_A \quad (\text{dB}) \approx 8.69 \gamma_x \quad (\text{dB}) \quad (1-10)$$

对于功率类参量，有

$$\gamma_{dB} = 10 \lg(1 + \gamma_A) \quad (\text{dB}) \quad (1-11)$$

当误差本身不大时，有

$$\gamma_{dB} \approx 4.34 \gamma_A \text{ dB} \approx 4.34 \gamma_x \quad (\text{dB}) \quad (1-12)$$

由式 (1-9) 至式 (1-12) 可见， γ_{dB} 是一个与相对误差有关的量。由于 γ_A （或 γ_x ）带有正负符号，因而 γ_{dB} 也是有符号的。

根据测量误差的性质和特点，可将其分为系统误差、随机误差及粗大误差。

系统误差是指在相同条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定，或在条件改变时按某种确定规律变化的误差。

随机误差是指在相同条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号均发生变化，时大时小，时正时负，没有确定的规律，也不可预定，但具有抵偿性的误差。

粗大误差（或粗差）是指在一定的测量条件下，明显歪曲测量结果的误差。

粗大误差是由于读数错误、记录错误、仪器故障、测量方法不合理、操作方法不正确、计算错误及不能允许的干扰等原因所造成的。含有粗大误差的测量值称坏值（或异常值）。测量数据中的坏值应当剔除不用。所以，在作误差分析时，要估计的误差只有系统误差和随机误差两类。

按测量误差的来源可分为仪器误差（或装置误差）、使用误差（或操作误差）、影响误差（或环境误差）、人员误差（或人身误差）及方法误差（或理论误差）等。

系统误差是衡量测量是否正确的尺度。事实上系统误差是反映测量的不正确度，即系统误差愈大，测量愈不正确。但在习惯上说系统误差的大小表示正确度，意为系统误差愈小，正确度就愈高。

随机误差的大小是衡量测量是否精密的尺度。习惯上说随机误差的大小表示精密程度，意为随机误差愈小，精密度就愈高。

一个正确度高的测量未必精密，一个精密度高的测量也未必正确。若测量的正确度和精密度都高，即系统误差和随机误差均小，则称为准确度高。一切测量都应该力求既精密又正确，即准确度要高。

必须指出，在实际测量中，系统误差和随机误差并不是一成不变的，它们在一定条件下可以相互转化。例如，某电流表的刻度误差在制造时是随机的，而如用该表来校准其它电流表，则这一电流表的刻度误差将会造成被校准的这一批表有一系统误差。

有时由于人们对事物认识的深度及处理手段的不同，而不得不将某些尚未完全掌握或分析过于复杂的系统误差当作随机误差来处理。例如，对同批生产中的每一只分压器而言，其分压比的误差是完全确定的，属于系统误差。但由于往往不单独给出每只分压器的误差数值，而只给出该批分压器的容许误差（即根据技术条件的要求所规定的某类仪器或量具误差不应超过的最大范围）。因此，如从该批分压器中任抽一只来用，则只能按容许误差来估计，而这一估计具有随机误差的特点，因而又称为随机性系统误差。

同样，对某些随机误差（如环境温度、电源电压波动等因素引起的），当设法掌握了其确切规律后，便可作为系统误差来处理。

虽然对系统误差与随机误差的划分具有一定的相对性，但是这种划分还是有必要的。因为，我们可以根据误差的不同性质与特点而采取不同的处理方法：对于随机误差的影响采用统计平均的方法来处理；对于系统误差则主要靠采用一定的技术措施或对测量值进行必要的修正来处理。

还要指出，仪器的示值和读数在一般情况下是有区别的。读数通常是指从仪器的刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字，而示值则是指由该读数所代表的被测量的数值。有时，读数和示值在数字上相同，但一般说来是不同的。通常需要把读数经过简单的计算、查曲线或数表才能得到示值。例如，一只线性刻度为 $0 \sim 100$ ，量程为 500V 的电压表，当指针指到 80 分度位置时，读数就是 80，而示值 x 则为

$$x = \frac{80}{100} \times 500 = 400 \text{ V}$$

在记录测量结果时, 为便于查对及避免差错, 应同时记下读数及其相应的示值。

§ 1.2 随 机 误 差

对某物理量重复进行多次测量, 只要测量仪器的灵敏度足够高, 就会从测量结果中查觉出随机误差的影响。可以利用概率论和统计学来研究随机误差的统计规律, 减弱它对测量结果的影响, 并估计出其最终对测量结果影响的大小。对于随机误差所作的概率统计处理, 是在排除了可变系统误差和粗大误差的前提下进行的。

一、随机误差的性质和特点

中心极限定理说明: 如被研究的随机变量可以表示为大量独立的随机变量的和, 其中每一个随机变量对于总和只起微小的作用, 则可认为这个随机变量服从正态分布 (或高斯分布)。在很多情况下, 测量中的随机误差正是由对测量值影响微小的、相互独立的多种因素的综合影响造成的。也就是说, 测量中的随机误差通常是多种因素造成的许多微小误差的总和。因而随机误差的概率分布大多接近于正态分布。

设在一定条件下对某一个真值为 A_0 的量进行多次重复测量, 即进行一系列 n 次等精度测量, 其结果分别为 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, 则各测量值出现的概率分布密度函数为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma(X)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - A_0)^2}{2\sigma^2(X)}\right] \quad (1-13)$$

式中 X ——测量值;

$\sigma(X)$ ——测量值分布的标准差 (均方差)。

如果令绝对真误差为

$$\delta = x - A_0 \quad (1-14)$$

则由式 (1-13) 可得随机真误差的概率分布密度函数为

$$p(\delta) = \frac{1}{\sigma(\delta)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\delta^2}{2\sigma^2(\delta)}\right] \quad (1-15)$$

式中 $\sigma(\delta)$ ——随机误差分布的标准差 (均方差)。

由式 (1-13) 和式 (1-15) 所描述的两种概率分布密度曲线如图 1-1 所示。其中,

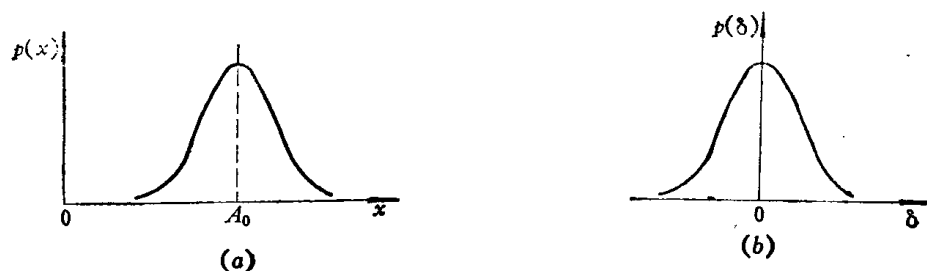


图1-1 测量值与随机误差的正态分布密度曲线

(a) 在随机误差影响下测量值 x 的密度曲线;

(b) 随机误差 δ 的密度曲线。