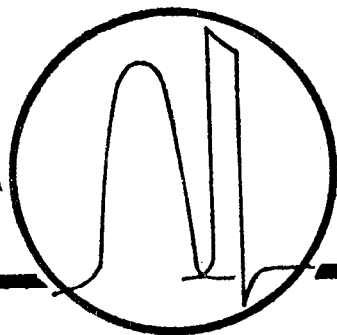


中等专业学校教材

无线电测量

南京无线电工业学校 申业刚 编

江苏科学技术出版社



中等专业学校教材

无线电测量

南京无线电工业学校 申业刚 编

江苏科学技术出版社

内 容 简 介

本书系统阐述了无线电测量的基本原理及测量方法,扼要介绍了计量学的基本知识及数据处理。全书共十章,重点介绍电压、频率、阻抗等基本参量的测量技术及其误差的分析,对常用仪器的重要电路部件也进行了较为详细的讨论。此外,还概略地介绍了无线电测量的新技术、新电路以及自动测试系统等。

本书为中等专业学校无线电技术专业的统编教材,也可供从事无线电技术工作的工程技术人员参考。

中等专业学校教材

无 线 电 测 量

南京无线电工业学校

申 业 刚 编

出版:江苏科学技术出版社

发行:江苏省新华书店

印刷:淮阴新华印刷厂

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17 字数 415,000

1983 年 11 月第 1 版 1983 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—22,500 册

书号: 7196·013 定价: 1.75 元

责任编辑 许顺生

前 言

1979年8月第四机械工业部下达了编写这本中等专业学校统编教材的任务。1980年1月,在南京召开的编写提纲讨论会上,通过了编写提纲。此书初稿在这个提纲的基础上编写而成。书稿由广东电子技术学校主审。1981年4月在南昌召开了审稿会,参加会议的单位有广东电子技术学校、武汉无线电工业学校、西安无线电工业学校、天津仪表无线电工业学校、南京无线电工业学校等。本书就是根据审稿会议的主要意见,经过修改补充而写成的。

本课程的教学时数分配为:

第一章	绪论	2学时
第二章	电流、电压的测量	14学时
第三章	信号发生器	10学时
第四章	电子示波器	20学时
第五章	其它示波设备	8学时
第六章	波形的分析	8学时
第七章	时间与频率的测量	12学时
第八章	相位的测量	4学时
第九章	集中参数阻抗的测量	12学时
第十章	场强和干扰的测量	2学时

以上共计92学时。

本书供中等专业学校无线电技术专业使用。考虑到这个专业的面比较宽,各校学制不统一,侧重点又不相同,为了基本上能满足这些需要,因此在内容上编得多一些,各校可以自行取舍。

本书由谢宝霄,刘芝旺二同志主审,他们详细审阅了本书初稿,并提出了许多宝贵的意见,编者在此向他们表示衷心的感谢。

编 者

目 录

第一章 绪论1	二、 数字电压表的主要技术指标.....42
§ 1-1 无线电测量仪器与无线电测量方法的分类.....2	三、 反馈比较型电压-数字变换器.....44
一、 无线电测量仪器的分类.....2	四、 V-T型电压-数字变换器.....45
二、 无线电测量方法的分类.....3	五、 V-F型电压-数字变换器.....50
§ 1-2 无线电测量的特点.....3	六、 电压-数字变换器的抗干扰特性.....53
§ 1-3 测量结果的处理.....5	§ 2-8 电压测量技术.....57
一、 有效数字的处理.....5	一、 电压表的选择.....57
二、 测量结果的数据处理.....7	二、 电压表同被测电压源的连接.....58
三、 测量结果的图解分析.....11	第三章 信号发生器60
§ 1-4 计量的基本概念.....13	§ 3-1 概述.....60
一、 基本单位与导出单位.....13	§ 3-2 音频信号发生器.....61
二、 基准和标准.....13	一、 概述.....61
三、 量值的传递及检定.....14	二、 对音频信号发生器的要求.....62
四、 比对.....14	三、 差拍式音频信号发生器.....63
五、 计量机构及其职能.....15	四、 文氏电桥音频信号发生器.....63
第二章 电流、电压的测量16	§ 3-3 高频信号发生器.....68
§ 2-1 概述.....16	一、 概述.....68
§ 2-2 高频电流的测量.....16	二、 对高频信号发生器的要求.....70
一、 高频电流测量的特点.....16	三、 高频信号发生器的主要部件.....73
二、 热电式电流表.....17	四、 XFG-7高频信号发生器.....77
§ 2-3 高频电压测量的特点及方法.....19	§ 3-4 合成信号发生器.....80
一、 引言.....19	一、 概述.....80
二、 电子电压表的一般特性及分类.....19	二、 频率合成的基本原理.....80
§ 2-4 指针式电子电压表.....20	§ 3-5 脉冲信号发生器.....82
一、 指针式电子电压表的方框图及作用原理.....20	一、 概述.....82
二、 指针式电子电压表的主要部件.....21	二、 对脉冲信号发生器的要求.....82
三、 典型电压表介绍.....32	三、 脉冲信号发生器的主要部件.....85
§ 2-5 脉冲电压的测量.....38	四、 XC-15型脉冲信号发生器.....86
§ 2-6 取样电压表.....40	第四章 电子示波器92
§ 2-7 数字电压表.....42	§ 4-1 概述.....92
一、 数字电压表简介.....42	§ 4-2 示波管及其供电.....93
	一、 示波管.....93
	二、 示波管的供电.....100

§ 4-3	电子示波器的工作原理及其组成部分	101
§ 4-4	短时脉冲和非周期过程的观察	102
一、	驱动(等待)扫描	102
二、	触发特性	104
§ 4-5	通用示波器的组成部分	104
一、	主机部分	105
二、	Y信道	107
三、	X信道	117
§ 4-6	双波显示法	135
一、	双线示波器	135
二、	电子开关	136
§ 4-7	毫微秒脉冲与特高频振荡的示波	137
一、	限制一般示波器使用的主要因素	137
二、	取样示波法	139
§ 4-8	连续电压与脉冲电压的示波技术	140
一、	概述	140
二、	示波器的主要技术特性	140
三、	示波器的选择	141
四、	示波器同被研究信号源之间的连接	143
五、	周期性信号的观察	143
六、	脉冲过程的观察	144
§ 4-9	示波器的应用	144
一、	电压的测量	144
二、	频率的测量	145
三、	相位的测量	147
四、	调制度的测量	148
第五章	其它示波设备	152
§ 5-1	BT-3型频率特性测试仪	152
一、	概述	152
二、	磁性扫频发生器	152
三、	工作原理	154
§ 5-2	JT-1晶体管特性图示仪	155
一、	概述	155
二、	阶梯波电压的产生	156
三、	同步	156
四、	测试转换	157
五、	测试实例	157

第六章 波形的分析 169

§ 6-1	概述	169
§ 6-2	波形的频率分析	169
一、	图解分析法	169
二、	分离法	170
三、	外差法	171
四、	对频谱分析器提出的技术要求	172
五、	频谱分析器主要元件的选择	173
§ 6-3	非线性失真系数的测量	174
§ 6-4	已调波参数的测量	176
一、	调幅波参数的测量	176
二、	调频波参数的测量	178

第七章 时间与频率的测量 182

§ 7-1	概述	182
§ 7-2	音频的测量	183
一、	比较法	184
二、	电桥法	185
§ 7-3	高频的测量	187
一、	谐振法	187
二、	比较法	191
三、	计数器法	195
§ 7-4	数字式频率计	197
一、	输入通道部分	198
二、	标准时间产生部分(时基部分)	202
三、	计数与显示部分	204
四、	控制部分	214
§ 7-5	时间与频率标准	218
一、	原频率标准(石英频率标准)	218
二、	原子频率标准	219

第八章 相位的测量 222

§ 8-1	概述	222
§ 8-2	和差法测量相位	222
§ 8-3	补偿法测量相位	225
§ 8-4	直读式的双路相位计	226
§ 8-5	时间间隔变换法测量相位	226
一、	概述	226
二、	具有触发器测量器的相位计	227
三、	具有同步多谐振荡器的相位计	228

四、 电子计数相位计.....	229	二、 测量电感.....	243
§ 8-6 频率变换法测量相位.....	229	三、 测量电阻.....	244
第九章 集中参数阻抗的测量	231	§ 9-5 品质因数的测量和Q表的应用.....	248
§ 9-1 标准电容、电阻和电感.....	231	§ 9-6 阻抗测量的数字化与自动化.....	250
一、 标准电容.....	231	一、 L, R, C 数字式测量仪.....	250
二、 标准电阻.....	231	二、 数字式Q表.....	255
三、 标准电感.....	232	第十章 场强及干扰的测量	259
§ 9-2 电压表-电流表法.....	332	§ 10-1 场强测量的概念.....	259
§ 9-3 电桥法.....	234	§ 10-2 强电场的测量——直接测量法.....	259
一、 四臂电桥.....	234	§ 10-3 弱电场的测量——比较测量法.....	260
二、 不平衡电桥.....	236	§ 10-4 场强测量器某些部件的选择.....	262
三、 T型电桥.....	237	一、 天线系统.....	262
四、 WQJ-1 型精密万用电桥.....	238	二、 校准振荡器.....	263
§ 9-4 谐振法.....	240	§ 10-5 干扰的测量.....	264
一、 电容的测量.....	240		

第一章 绪 论

在日常生活中，我们随时随地都会遇到测量问题：到布店买布做衣服，要量一量长短；到粮店买粮，要称一称重量；上班要看一看时间，……等，这些都是测量。而测量重量的秤，测量长度的尺子，测量时间的钟表……，它们都是测量仪器或量具。非常明显。如果没有测量和测量仪器，即使在日常生活中，也是难以想象的。

在科学技术领域里，更是离不开测量，例如人造地球卫星或宇宙飞船发射出去以后，飞到哪里去了？如何进行控制？也要通过测量。而在发射时，还要依靠成千上万的仪器对发射的全过程进行全面的测量、观察，才能保证成功。

在科学发展史上，从大量测量数据总结出一般规律，从而建立了各种定理和定律，这是屡见不鲜的。万有引力定律是在牛顿以前多少年来大量天文观测所得结果的一个基本总结。十七世纪初，根据精密的天文测量，发现火星的运动与当时奉为经典的圆周运动学说预期值有 8 弧分之差，而当时的测量技术，误差不超过 2 弧分。这多出的 6 弧分之差意味着什么？从这一点出发，终于推翻了沿袭数百年之久的天体圆周运动学说，建立了新的椭圆轨道理论。由此可知，精密测量的结果，往往导致极其重大的、带有根本性的科学革新。

在现代大工业生产中，同样离不开测量与仪器。就以生产汽车来说，每一辆汽车都是由成千上万个零件组成的。而这些零件都是成批生产出来的，如果尺寸测量不准确，有时只要有一根头发丝之差，就会装合不起来。即使勉强装合，也会使汽车的性能、质量、寿命等大受影响。因此，测量不准确会引起产品大量报废。在工业中，离开测量和测量仪器是不可能进行工业大生产的。

没有测量及其所用的仪器，人类认识世界和改造世界的能力就会受到极其严重的限制。没有高度发展的测量技术和精密仪器，现代科学技术和现代工业生产就成为不可能。因此，对于测量和测量仪器，世界各工业先进国家都十分重视。在科学研究和生产中，用在测量工作上的劳动力和资金一般都占科研生产总劳动力和资金的 10% 以上；而在电子设备和宇宙技术中，测量和仪器的比重甚至达到 50% 以上。

解放以前，我国在无线电电子测量方面完全是空白。解放以后，在党的正确领导下，我国的工农业生产不断前进，测量事业也随之有了飞跃的发展。随着电子工业的发展，我国的电子仪器在 1958 年已开始成批生产。三十多年来，从无到有，从小到大，从低级到高级，发展很快。特别是近几年，工厂如雨后天春笋般地建立起来，产品的品种、数量和质量都在逐年增加和提高。

近年来，电子计算技术发展十分迅速，自七十年代初期开始，出现了电子计算技术与无线电测量仪器相结合的一代崭新的测试系统。它们能对若干电参量进行自动测量，并能自动选择量程，记录数据，计算结果，修正某些误差，甚至检查故障等。随着大规模和超大规模集成电路的发展，可以由一片或几片大规模集成电路作成中央处理单元 (CPU)，便可构成微处理器 (μP)。把它和无线电测量仪器相结合，就能组成有自动测试及运算功能的自动化

测量仪器，或称“智能”仪器。它们把计算技术和无线电测量技术融为一体。目前，“智能”仪器及由计算机与若干可编程无线电测量仪器组成的自动测试系统，已成为80年代无线电测量技术及仪器的发展方向。

§ 1-1 无线电测量仪器与无线电测量方法的分类

一、无线电测量仪器的分类

无线电测量仪器的种类繁多，一般可分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器是为某一个或某几个专门的目的而设计的，一般不能移作它用。如电视彩条信号发生器只能用来测试彩色电视接收机，不能用来测试雷达或通信接收机，甚至黑白电视接收机也不能用它测试。通用仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的，它能用于各种无线电电子设备的测量。例如，电子示波器既可用于雷达和电视设备的测量，也可用于通信机和电子计算机的测量。通用仪器也常用来作为较大测量仪器系统中的一个组成单元，也可以作为某些专用设备中的一个构件。

本课程主要研究通用仪器。通用仪器也有各种不同的分类方法，可以按频段或功能来划分。目前，由于许多电子设备的工作频率范围极宽，因此按前者划分意义已不大了。最基本、最常用的方法是按功能划分。现在仅介绍按功能分类的情况：

- (1) 电平测量仪器；
- (2) 元件参数测量仪器；
- (3) 频率、时间测量仪器；
- (4) 信号波形测量仪器；
- (5) 信号频谱分析仪器；
- (6) 相位测量仪器；
- (7) 场强测量仪器；
- (8) 材料电磁特性测试仪器；
- (9) 模拟电路特性测试仪器；
- (10) 数字电路特性测试仪器；
- (11) 信号发生器；
- (12) 电信测试仪；
- (13) 测试系统；
- (14) 附属仪器。

应该指出，以上的分类是粗略的，也未必十分合理，随着新型的多功能电子仪器的发展，在很大程度上已打破了这种分类的框框。例如，现代的频率计数器，一般都能测量频率，也能测量时间间隔；换一个插件还能测量电压，也能变成一个Q表等等。这种粗略的划分，其目的仅在于使我们面对电子仪器繁多的品种有一个粗略的概念。

二、无线电测量方法的分类

从广义上说,凡是利用无线电电子学技术来进行测量,都可以说是无线电测量或者电子测量。无线电测量有以下三种主要的测量方法:

1. 直读法

被测量(例如,高频电压或电流)直接从仪器的度盘上读出。它常常是利用不同物理量之间的关系进行刻度的,例如,根据电桥的理论,可变电阻可以刻度成被测电容或电感的值;利用谐振的现象,电压表可以刻度成品质因数,可变电容器可以刻度成频率或者电感量等等。

2. 间接法

被测量是根据测量与其有关的其它量,通过计算来确定的。例如,测量电流和电压以后,利用欧姆定律就可以确定电阻。

3. 比较法

其方法是将作用于任何系统的被测量,同作用于同一系统的其它已知量比较。如拍频法、用示波器根据李沙育图测量频率等就属于这种方法。

§ 1-2 无线电测量的特点

无线电测量同其它测量技术相比,具有一系列突出的优点。

1. 精度高

无线电测量与其它测量相比,具有极高的精确度。例如,时间是最基本的一个物理量,测量时间最普通的仪器是钟表,一只普通的钟表一昼夜的误差大约30秒左右;而一昼夜24小时是86400秒,它的误差大约是 $30/86400 \approx 3.5 \times 10^{-4}$ 。最好的天文摆钟,误差也只能达到每昼夜0.1秒,即约为 1×10^{-6} 。但是,目前实用的铯原子钟,它的误差最小的只有 4×10^{-13} ,这相当于大约一百万年只差1秒钟。一般的铯原子钟的误差,大约也在 10^{-12} 的数量级。

2. 量程宽

尺子是测量长度的量具,它可以量出几尺、几寸、几分;更小的长度,它就无能为力了。用它去测量成百上千尺的长度,虽不能说不可能,至少也就不方便了。不难看出,其量程是相当有限的。如果要测得准确一些,其量程大约为 $1:10^3$ 左右,即三个数量级;最多也不过四个数量级,即 $1:10^4$ 。

但是,一只普通的欧姆表,可以测量低到几欧,高到几兆欧的电阻,量程达到 $1:10^6$ 。新型的数字电压表能测量从 $1\mu\text{V}$ 至 1000V 的电压值,即量程为 $1:10^9$ 。一只频率计数器可以测量低至 10^{-4} 甚至 10^{-8}Hz 和高达 10^8 或 10^9Hz 的频率,即量程为 $1:10^{12}$ 至 $1:10^{18}$ 。

3. 速度快

由于无线电测量主要是利用电磁波和电子运动来进行工作的。因此，无线电测量具有极高的速度，可以测量出瞬息万变的各种现象。如原子核的裂变，枪弹的速度，高速电子计算机各部分工作详情等。

在许多测量工作中，往往需要测出很多的原始数据，再绘成各种曲线。而在无线电测量中，常常可以在电子示波器的荧光屏上一下子就把整个曲线图显示出来。例如，在晶体管图示仪中，同时测量出晶体管的集电极电压和电流；在频谱分析仪中，一下子就测量出一个信号内的全部（例如多到 100 个以上）的频率分量等等。

4. 灵活性

由于各种无线电参量之间互换的容易性，使得无线电测量具有灵活多变的特色。例如，许多数字式电压表中，就是把电压变换成时间或频率，然后，用测量时间或频率的技术和装置来得到被测电压的值。与此相反，在直读式音频频率计中，却把频率变换成电压或电流，再用一个电压表或电流表来读出被测频率之值，类似的例子非常多。无线电测量的这种灵活性，使得我们可以根据测量的不同对象，不同要求，不同条件以及手头现成的不同装备和技术条件与经济条件，还有个人的业务专长等等，因地制宜地作出不同的抉择，以不同的方式和方法尽可能好地完成测量任务。

5. 远距作用

无线电测量使我们能够测量难以触及的对象。例如，我们可以把传感器或探头安放在汽缸内，安放在几百公里外的水力发电站内，或者通过宇航器送到其它星球上等……，然后，通过传输线或无线电波发射，把数据传送回来，在本地进行测量，求得结果。我们也可以从本地发出一个信号到被测对象，被测对象反射回来的信号由本地接收，从中取得测量结果。我们还可以利用被测对象本身所辐射出的电磁波来进行测量。

6. 自动化

无线电测量和电子仪器系统本身就易于实现一定程度的自动化，特别是近年来无线电测量技术同电子计算技术的结合，使自动化的程度达到了非常高的地步。

在四十年代末期，有些无线电测量和仪器已自动化了，扫频技术和扫频仪就是其中的一个典型例子。例如，我们要测绘放大器的频率响应曲线，若用经典的逐点手控测量法，至少要花半天的时间才能取得一系列数据，然后，再用人工绘制成曲线图。而用扫频仪，则全部测量和结果显示都在一瞬间内自动完成了。

到了六十年代后期，无线电测量和仪器与电子计算技术和计算机结合起来，使测量和仪器系统的自动化有了飞速的提高，达到相当完美的境地。现代化的自动测试系统是把事先编制好的（可能是相当复杂的）测量步骤储存在仪器的储存装置中。测量时，操作者向仪器发出指令（通常用一个打字键盘）告诉仪器要测量什么东西，要获得怎样的结果。然后，仪器自己在档案内查到测量这个东西的步骤，根据它再反转来向操作者逐步发出指令，告诉他要扳动某一个旋钮或调节一个什么量（例如，电压）。完成这一步操作后，仪器向操作者发出下

一个指令。如操作不符合要求或有错误。仪器自动向操作者指出错误。经过不多几步这样的指令,简单操作后,仪器自己就按要求根据事先编制的程序自动进行一系列测量。测量结果的原始数据都储存起来,然后,仪器自己对这些原始数据按要求进行整理、换算和计算。最后把最终结果在示波器上显示曲线或写出数码和文字来,或者用自记仪绘出曲线来,或者用打字机打印出数据表格来。

§ 1-3 测量结果的处理

一个测量结果,通常表示为数字和图形两种方式。对数字表示的测量结果,在进行数据处理时,除了应注意有效数字的正确取舍外,还应制订出合理的数据处理方法,以减小测量过程中随机误差的影响。对以图形表示的测量结果,应考虑的问题很多,包括坐标的选择、正确的作图方法等,我们简单介绍有效数字的若干处理原则和作图的一般知识。

一、有效数字的处理

测量结果表示为一定的数值,例如, 125.4V 是由四位数字组成的数,这个四位数字的数,前面三位数是准确知道的,第四位数通常是估计出来的,称为欠准数字。但这四位数字都是测量结果不可少的,所以,称它们为有效数字。

有效数字的位数不仅表达了被测量的大小,也表达了测量的精度,有效数字位数越多,测量的精度就越高。例如,一个电阻测定为 106Ω ,它有三位有效数字,如果,测定为 106.0Ω ,则有四位有效数字,后者比前者的精度高。

一个数的总的位数往往不能代表测量的精度。例如,报导一个城市的人口大约为三十八万人,它有六位数,但只报导了两位有效数字。如果把它表示为 380000 ,就是六位有效数字了。正确的表示是 38×10^4 或 3.8×10^5 。

1. 欠准数字的含义

测量的实际值可能在最后一位有效数字上变化 $\pm$ 一个单位。例如,测量电压实际值的变化范围为 $117.0 \sim 117.2\text{V}$ 。测量结果可以表示为 $117.1 \pm 1\text{V}$ 。

另一种表示方法是,最后一位有效数字上变化 ± 0.5 个单位。例如,实际值的变化范围为 $117.05 \sim 117.15\text{V}$ 。测量结果可以表示为 $117.1 \pm 0.05\text{V}$ 。

2. 多余有效数字的处理

测量结果中的多余有效数字,按四舍五入原则进行处理。

(1) 加减法运算

不同准确度的两次测量结果或多次测量结果相加时,其和的准确度同它们中最低准确度的测量结果相同。举例说明如下。

例 两个电阻 R_1 和 R_2 串联连接。用惠斯登电桥测量它们的阻值, $R_1 = 18.7\Omega$, $R_2 = 3.624\Omega$, 计算总电阻的值。

解 $R_1 = 18.7\Omega$ (三位有效数字)

$R_2 = 3.624\Omega$ (四位有效数字)

$R_T = R_1 + R_2 = 22.324\Omega$ (五位有效数字) $= 22.3\Omega$

不能确定的数字用斜体字写出,用以表示和的最后三位数字是不能确定的数字。

因为,一个电阻的阻值只准确到三位有效数字,两个电阻的和也应减到三位有效数字,即 22.3Ω 。

对具有不定范围数字的相加或相减时,是把它们前一部分相加或相减,不能确定部分相加,也就是说,在结果中不能确定范围取最坏的可能组合。保留不定部分前的 $\pm$ 号。 $\pm$ 符号的意思是:一个数可能是大的;另一个数可能是小的。在加法运算中,和的不能确定部分的百分数,同加数与被加数中不能确定部分的百分数是差不多的。在减法运算中,差的不能确定部分的百分数将比被减数和减数中不能确定部分的百分数大得多。特别是两数相差比较小时,不能确定部分的百分数增加得更多。因此,在测量时,不要使用结果相减的测量技术;否则,误差同最后结果之比,将会大大地增大。举例说明如下:

例 826 ± 5 与 628 ± 3 相加。

解 $N_1 = 826 \pm 5$ (不确定范围为 $\pm 0.605\%$)

$N_2 = 628 \pm 3$ (不确定范围为 $\pm 0.477\%$)

$N_1 + N_2 = 1,454 \pm 8$ (不确定范围为 $\pm 0.55\%$)

例 826 ± 5 减 628 ± 3 (在答案中把不确定部分的范围表成百分数)。

解 $N_1 = 826 \pm 5$ (不确定范围为 $\pm 0.605\%$)

$N_2 = 628 \pm 3$ (不确定范围为 $\pm 0.477\%$)

$N_1 - N_2 = 198 \pm 8$ (不确定范围为 $\pm 4.04\%$)

例 462 ± 4 减 437 ± 4 , 并把答案中的不确定范围表成百分数

解 $N_1 = 462 \pm 4$ (不确定范围为 $\pm 0.87\%$)

$N_2 = 437 \pm 4$ (不确定范围为 $\pm 0.92\%$)

$N_1 - N_2 = 25 \pm 8$ (不确定范围为 $\pm 32\%$)

(2) 乘除法运算

在乘除法运算中,结果的数字位数可能增加很多,但只应保留适当的位数。有效数字的删节取决于其中有效数字位数最少的一项。

例 计算电压降时,在 35.68Ω 的电阻中通过 $3.18A$ 的电流,把电阻上的电压降计算到有效数字的适当位数。

解 $U = IR = (35.68) \times (3.18) = 113.4624 = 113V$

在上例中,电流 I 有三位有效数字,电阻 R 有四位有效数字,积只能有三位有效数字,答案不可能比最低的乘数更准确。

例 用电压表—电流表法测量电阻的值,电阻两端的电压为 $12.65V$,流过电阻的电流为 $3.43mA$,求电阻值到有效数字的适当位数。

解 $R = \frac{U}{I} = \frac{12.65}{3.43} \approx 3.688 \approx 3.69k\Omega$

二、测量结果的数据处理

测量可以在不同的精度下进行。绝对精确地测量任何一个量是不可能的。因为，即使用最准确的仪器，最仔细地测量，也不可能得到真值。

无线电测量的精度也和电气测量一样，是利用测量误差来决定的。

绝对误差 Δx ：仪器的示值 x 同被测量真值 A 之间的差。而真值 A 是以标准仪器的示值来决定。因此

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

取反号的绝对误差称为修正值 C

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

为了除去测量误差，必须对仪器的示值 x 加入一个修正值，即

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

在实际测量中，使用绝对误差并不一定都方便。因为，在有几种刻度的仪器中，误差将随测量的量程变化而变化。

测量的精度用相对误差来决定就方便得多了。

相对误差有以下几种：

实际相对误差 γ_A ：绝对误差 Δx 与被测量实际值 A 的比值，一般用百分数来表示，即

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

示值相对误差 γ_x ：绝对误差与测得的被测值，即仪器的示值 x 的比值，也是用百分数表示，

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

满度（引用）相对误差 γ_m ：绝对误差与仪器满度值的比值，即

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

对于指针式的电工测量仪表，它们的准确度等级由最大引用相对误差决定。

例如，如果校准量程为200V的电子电压表的刻度时，它100伏特的示值对应于标准仪表97伏特的示值，则

绝对误差

$$\Delta x = 100 - 97 = 3 \text{ V}$$

实际相对误差

$$\gamma_A = \frac{3}{97} 100\% = 3.1\%$$

示值相对误差

$$\gamma_x = \frac{3}{100} 100\% = 3\%$$

满度相对误差

$$\gamma_m = \frac{3}{200} 100\% = 1.5\%$$

仪表的准确等级为1.5。

我国电工仪表根据国家标准 GB776-65《电气测量指示仪表通用技术条件》(1967)的规定,共分0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0等七级。

仪表除了在正常条件下工作的基本误差以外,还有同各种因素(如,温度等)有关的附加误差。

实际相对误差与示值相对误差不仅同绝对误差有关,而且也同被测量有关,因此,即使仪器在整个量程内绝对误差都一样,实际相对误差和示值相对误差随着被测量的减小而增大。

例如,校准电压表100V的刻度时,其读数 $U_1=6V$ 与 $U_2=80V$,对应的标准表的示值 $U_{A1}=5V$ 与 $U_{A2}=79V$,则在这两点上的绝对误差相同,即

$$\Delta x_1 = 6 - 5 = 1V$$

$$\Delta x_2 = 80 - 79 = 1V$$

而实际相对误差分别为

$$\gamma_{A1} = \frac{1}{5}100\% = 20\% \quad \gamma_{A2} = \frac{1}{79}100\% = 1.3\%$$

示值相对误差分别为

$$\gamma_{x1} = \frac{1}{6}100\% = 16.7\% \quad \gamma_{x2} = \frac{1}{80}100\% = 1.25\%$$

满度相对误差

$$\gamma_m = \frac{1}{100}100\% = 1\%$$

因此,为了减小测量的实际相对误差和示值相对误差,对指针式的仪表建议使用靠近满度三分之一的部分。

大多数无线电测量仪器不采用划分准确等级的办法,因为,很多仪器根本就没有指针式的指示器,即使具有,也仅仅是仪器电路的一部分。

影响测量精确度的不仅仅是所用指针式仪表的准确等级,被测量的特性、测量的方法以及测量的频率对它都有影响。

有些无线电测量仪器在说明书中除了指出同结构和刻度有关的基本误差之外,还指出同温度、频率和其它因素变化有关的附加误差。

根据误差来源的性质,它还可以再分为系统误差和随机误差。

系统误差是由于仪器的缺点(刻度不正确,温度的影响等)产生的。它们可以根据刻度表,曲线或公式所确定的修正值,从结果中除去。

随机误差没有规律它是有多多种偶然因素产生的,例如,电源电压不规则的波动、外界条件的偶然变化、实验者的疏忽大意等等。随机误差的数值和符号可能是不同的,但是,随着测量次数的增多,它们的和将趋于0。

有时,实验者测量时的疏忽,即差错,就会造成明显不正确的测量结果。在整理测量结果时,差错要除去,不予考虑。

虽然,仔细地进行测量,并且考虑了系统误差,每次测量还是不准确的。只要仪器的灵敏度够高,每次测量的结果,总是时大时小,表现为无规则的变化。其误差由下式来决定

$$\Delta_n = x_n - A \quad (1-7)$$

这里, A ——被测量的真值;

x_n ——第 n 次的测量结果。

随机误差表面上是无规律的, 产生误差的原因又十分复杂, 要逐一分析其产生的原因, 并对误差进行修正, 是极为困难的。只能设法估计出随机误差对测量结果的影响程度。为此, 需要借助概率论知识来研究随机误差的统计规律。

误差理论把这种统计规律总结为四条著名的公理:

① 在一系列等精度(测量过程中保持各影响量以及仪器、人员、方法不变)的测量中, 绝对值小的误差出现的机会多, 绝对值大的误差出现的机会少, 即随机误差的分布具有“两头小, 中间大”的单峰值。

② 测量次数足够多时, 绝对值相等, 符号相反的误差, 出现的机会大体上相等, 即随机误差的分布具有对称性。

③ 绝对值很大的误差出现的机会极少。因此, 在有限次数测量中, 误差的绝对值不会超过一定的范围, 即随机误差的分布存在有界性。

④ 当测量次数趋于无穷多时, 随机误差平均值的极限趋于零。亦即随机误差具有抵偿性。

为了减小随机误差, 必须进行大量的测量 ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), 并且计算其算术平均值

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1-8)$$

如果用算术平均值 $\bar{x}$ 代替被测量的真值 A , 则每次测量的剩余误差为

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= x_1 - \bar{x} \\ v_2 &= x_2 - \bar{x} \\ v_3 &= x_3 - \bar{x} \\ &\dots\dots\dots \\ v_n &= x_n - \bar{x} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

在多次测量的情况下, 用均方根误差, 算术平均误差和极限误差来表示它们的精确度是适宜的。

均方根误差是表示随机误差离散的程度, 均方根误差越小, 表明随机误差离散性越小, 也就是说, 小误差出现的机会越多, 而大误差出现的机会越少, 测量精密度越高。

均方根误差

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{(\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + \dots + (\Delta_n)^2}{n}} \quad (1-10)$$

标准仪表的准确度足够高时, 可以使用这个式子。

误差理论和实践证明 (1-10) 式可以用式

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n-1}} \quad (1-11)$$

来代替。在分母中, 1 考虑了定义 $\bar{x}$ 的误差。

在多次测量 ($n > 10$) 的情况下, 公式 (1-11) 具有以下的形式:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2}{n}} \quad (1-12)$$

误差理论证明：测量总次数的 $2/3$ ，随机误差小于 σ ；而测量总次数的 $1/3$ ，随机误差才大于 σ 。

最大误差或极限误差用下式来计算

$$\Delta_{\max} = 3\sigma \quad (1-13)$$

概率论证明：超过 $\Delta_{\max}$ 的误差在 370 次测量中，才只有一次。

超过 $\Delta_{\max}$ 的测量误差属于差错，不予考虑。

n 次测量的算术平均误差为

$$\alpha = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2| + \cdots + |\Delta_n|}{n} \quad (1-14)$$

实际上， σ 与 α 误差有以下的关系

$$\sigma \approx \frac{4}{5} \alpha$$

我们来研究一个处理频率测量结果的例子，这些结果在表 1-1 第二列中列出。

表 1-1

测量序号	测量频率 f 的结果 (kHz)	剩 余 误 差 $v = (f_n - \bar{f})$ (kHz)	$v^2 = (f_n - \bar{f})^2$ (kHz) ²
1	449.5	-0.7	0.49
2	450.0	-0.2	0.04
3	450.6	+0.4	0.16
4	449.9	-0.3	0.09
5	449.8	-0.4	0.16
6	449.7	-0.5	0.25
7	450.8	+0.6	0.36
8	451.0	+0.8	0.64
9	450.2	0	0
10	450.5	+0.3	0.09
	4502.0	+2.1	2.28
		-2.1	

根据式 (1-8)，我们确定算术平均值，

$$\bar{f} = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_{10}}{10} = \frac{4502.0}{10} = 450.2 \text{ (kHz)}$$

计算出每次测量的均方根误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{2.28}{9}} \approx 0.5 \text{ kHz}$$

决定最大误差

$$\Delta_{\max} = 3\sigma = 3 \times 0.5 \text{ kHz} = 1.5 \text{ kHz}$$

把剩余误差同最大误差 $\Delta_{\max}$ 比较，我们确信 $\Delta_{\max}$ 大于任何一个 v 的值。因此被测频率可表示为

$$f = \bar{f} \pm \Delta_{\max} = 450.2 \pm 1.5 \text{ kHz}$$

如果误差是由于某些彼此无关的原因引起，例如①温度的变化、②气压的变化、③电源电压的变化等，就必须计算测量的总误差。