

无线电高级技术工人培训教材

电子测量技术

航空航天工业部教育司组织编写

宇航出版社

(京) 新登字181号

本书系航空航天工业部无线电高级技术工人培训教材之一, 根据原航天工业部颁发的《工人技术等级标准》及《航天无线电类高级技工培训教学大纲(试行)》的要求编写而成。内容包括: 绪论、测量误差和数据处理、电压测量技术、频率测量技术、示波测量技术、信号发生器、扫频测量技术、信号频谱测量技术、元器件测量技术、微波测量技术。全书着重介绍各种电子测量技术的物理概念及其实际应用方法。本书除作教材外, 也可供有关专业的工程技术人员参考。

本书由倪莹良、金麟孙、陈廷良、何文仙编写, 倪莹良主编, 赵增文、柴人奇主审。

电子测量技术

航空航天工业部教育司组织编写

责任编辑: 尚采民

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.125 字数: 321千字

1992年10月第1版第1次印刷 印数: 1—2500册

ISBN 7-80034-491-6/TN·046 定价: 9.60元

目 录

第一章 结论	(1)
第二章 测量误差和数据处理	(6)
第一节 概述	(6)
第二节 测量误差的定义及计算	(7)
第三节 系统误差和随机误差	(15)
第四节 测量数据的处理	(22)
第五节 误差分析方法	(33)
习题	(47)
第三章 电压测量技术	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 直流电压的测量	(51)
第三节 低频电压的测量	(60)
第四节 高频电压的测量	(72)
第五节 特殊电压的测量	(82)
第六节 电压测量中常见的问题	(92)
习题	(105)
第四章 频率测量技术	(107)
第一节 概述	(107)
第二节 电子计数法测量频率	(109)
第三节 频率稳定度及其测量	(129)
习题	(147)
第五章 示波测量技术	(148)
第一节 概述	(148)
第二节 宽带双扫描示波器	(149)
第三节 模拟存储示波器	(157)

第四节	数字存储示波器	(168)
第五节	示波测量方法	(174)
习题		(192)
第六章	信号发生器	(194)
第一节	概述	(194)
第二节	合成信号发生器	(195)
第三节	微波信号发生器	(205)
第四节	扫频信号发生器	(214)
习题		(220)
第七章	扫频测量技术	(221)
第一节	概述	(221)
第二节	扫频测量基本原理和动态特性	(222)
第三节	扫频测量的图示方法	(224)
第四节	扫频测量中应注意的问题	(233)
习题		(236)
第八章	信号频谱测量技术	(237)
第一节	概述	(237)
第二节	频谱仪的工作原理及其参数	(239)
第三节	频谱仪的应用	(247)
第四节	频谱测量中应注意的问题	(264)
习题		(272)
第九章	元器件测量技术	(273)
第一节	概述	(273)
第二节	数字式阻抗测量	(274)
第三节	集成电路的测量	(283)
习题		(303)
第十章	微波测量技术	(304)
第一节	概述	(304)
第二节	微波驻波比测量	(305)
第三节	微波衰减测量	(323)
第四节	微波相位测量	(343)
第五节	微波功率测量	(352)

习题	(370)
参考文献	(372)

第 一 章

绪 论

一、电子测量的意义及其内容

新技术的开发与应用促进了工业生产和科学研究的迅猛发展，而对测量技术的需要也更加迫切。特别是航天技术、遥测、遥控、精密制导等技术的发展更离不开精密测量。人造卫星的发射，要求有高度精确的自动控制系统，而这种自动控制系统是由精确的测量来保证的。例如，一个射程为8000km的洲际导弹，如果航向误差有0.03度，将会造成导弹偏离目标5~8km。著名科学家门捷列夫曾说过：“没有测量，就没有科学”，这句话充分概括了测量的重要性。

电子测量在电子工业中的地位尤为显著。电子工业的研究对象和产品无一不与电子测量技术有着紧密的联系。从元器件的生产到大型电子设备的组装、调试都离不开电子测量。如果没有统一和精确的电子测量，就无法对产品的技术指标进行鉴定，也就无法保证产品的质量。

电子测量是指在低于光频的电磁频谱中（直到零赫，即直流）利用电子学手段对电压、功率、频率、阻抗等的测量。现在人们不但把电子技术中对电参量的测量叫做电子测量，而且把许多非电量通过传感器或变换器转换成电信号，然后利用电子技术进行的测量也归属电子测量。可见，电子测量所涉及的领域极为宽广。

电子测量的基本内容包括：利用电子技术来完成基本电量和

电参数测量的基本理论与方法；完成一个测量课题所需建立的电子测量系统及仪器；根据测量误差理论进行测量数据的处理等。

二、电子测量的特点

（一）测量频率范围宽

电子测量的频率范围包括了从直流到太[拉]赫（太[拉]赫用THz表示， $1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$ ）极宽的频率范围。此特点一方面使电子测量具有很广的应用范围，另一方面，由于电子测量仪器在不同频段往往要采用不同的元器件、测量原理和方法，故电子测量仪器的类别也就极其繁多。近年来，随着元器件制造技术的发展，研制了很多宽频带的测量仪器，使一台仪器能在很宽频率范围内工作。

（二）量程宽

电子测量所测电量的大小相差极大，要求测量仪器的量程也极宽。例如功率测量，其量程就特别宽，从射电天体或宇宙飞船发到地面的噪声或信号功率通常都低于 10^{-13}W ，而远程雷达向空中发射的功率却高达 10^8W 以上，量程覆盖了21个数量级。

（三）测量精确度高

电子测量仪器的精确度一般比其它测量仪器高很多。特别是对频率和时间的测量，由于采用了原子频标和原子秒作为基准，测量的精确度可优于 10^{-13} 数量级。

（四）测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波传播的原理来进行工作的，因此它具有其它测量方法通常无法类比的高速度。这也是它在现代科学技术领域内得到广泛应用的一个重要原因。

（五）影响量众多，影响特性复杂

通常把来自测量系统外部，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。因此，常采取电磁屏

蔽、接地、防震等措施来削弱外界的影响。

(六) 率先采用科学技术新成就

为了获得高精度、宽频程、宽量程，人们对科学技术新成就十分关注，往往率先在电子测量中予以采用。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。当微处理器问世仅一年，就在有些电子测量仪器中被应用。目前，微处理器已普遍应用于现代电子测量仪器之中。

(七) 自动化和智能化程度高

随着大规模集成电路和微处理器的发展，使测量仪器具有高性能、多功能、能程控、自动校准、自动故障诊断等特点，成为“智能”测量仪器。尤其是测量仪器通用接口（即IEEE-488接口母线）的研制成功，更便于电子测量仪器与计算机及其它设备组成各种自动化测量系统。自动化测量系统不仅提高了劳动生产率，能完成人工难以胜任的测量任务，而且也能避免漂移、温升等不良因素对测量结果的影响；同时亦易于进行大量数据采集和重复测量，通过统计分析来减小测量中的随机误差。

三、电子测量的发展

电子技术不断取得新成就的过程，也是电子测量和仪器的发展过程。它们相辅相成，互相促进，走在科学技术发展的前列。取样技术、扫频技术、锁相与频率合成技术、低噪声放大技术以及数字电路技术等，曾经是促进电子测量和仪器发展的重要技术基础，在电子测量技术的发展史上起过重要作用，而且至今仍是现代电子测量技术和仪器的支柱。微计算机技术和上述电子技术以及它们所基于的理论相结合，才得以使电子测量以惊人的速度不断向前发展。

在电子测量中对大规模、超大规模集成电路和微计算机的应用是最富有创造性的成果，它导致了测量仪器微机化和测量系统自动化。电子测量仪器与微计算机的结合，形成了两大类仪器，

即智能仪器与个人仪器。

智能仪器是新一代电子测量仪器。在智能仪器中，一般都含有一个到多个微处理器或微计算机。以微计算机的软件和硬件为核心，对传统仪器进行了重新设计，使仪器的测量部分和微计算机互相融合，把传统仪器中原来用硬件较难解决的测量问题，可充分利用计算机软件来解决，并具有数据处理与运算能力。这类仪器的特点是：（1）大多以键盘输入代替各种控制和调节旋钮，并与CRT屏幕显示配合以菜单方式工作；（2）多半具有自动量程转换、自校准、自调零、自适应、自动检测，甚至具有自动切换备件，进行自维修等能力；（3）一般都装有仪器通用接口母线，可组建自动测试系统。

个人仪器（Personal Instrument）的名称是由个人计算机引伸出来的。它以个人计算机的软件和硬件资源为基础，并配以附加的仪器组件或插件，实现多种测试功能。目前，个人仪器的发展趋势是从单CPU的集中处理，向多CPU分布式处理系统发展。

测量系统自动化方面的发展极为迅速，70年代初美国HP公司推出了一套十分成功的通用仪器接口系统HP-IB（也称为GP-IB或IEEE-488）。它的出现和普及，标志着自动测试系统从采用专用仪器接口的第一代进入了采用通用仪器接口的第二代。

70年代后期提出了第三代自动测试设备（系统）的概念。其特点是把计算机和测试系统更紧密地结合起来，利用强有力的计算机软件代替仪器的硬件功能，计算机本身成为测试功能的主要组成部分，与传统的测试系统相比，发生了根本变化。在第三代自动测试系统中，作为核心的微计算机，直接参与激励信号的产生和测量特性的解析，计算机的应用软件成为第三代自动测试系统或设备的灵魂。

在自动测试和微机化仪器方面，近年来出现了一种插件（模

块、插卡)式仪器。这种插件式仪器的每个插件之间是通过一种被称为VXI的总线相连,故一般称为VXI插件式仪器。它能灵活地适应多种测试任务,并在降低成本、减小体积、提高测试速度和方便更换模块等方面有明显的优越性。

总之,电子测量所涉及的领域极为宽广。现代传感技术的发展,使电子测量技术几乎渗透到国民经济的所有部分和科学领域。微电子技术的飞速发展,推动了电子测量与仪器的发展,传统的电子测量技术获得新的活力;新的测试领域不断得到开拓,新一代电子仪器不断涌现。

四、本课程的内容和任务

本课程的主要任务是使学员掌握电子测量中的基本概念、基本测量原理和测量方法;具备一定的测量误差分析和数据处理能力;对现代新技术在电子测量中的应用有一定的了解。本课程的内容考虑了学员已掌握一些最基本的测量原理和测量方法,故本课程的教学内容增加了适应近年来电子测量技术飞跃发展方面的内容,并且结合航天工业实际工作的需要,增加了微波测量的有关内容。为学员今后在工作中将遇到的大量近代测量问题准备必要的理论基础和实际知识。

课程的重点放在基本测量原理、基本测量方法、一些典型测量仪器的基本工作原理、测量中应注意的问题上。另外,使学员具有一定的误差分析和数据处理能力也是本课程的重点。对于测量仪器的具体电路,在其它课程中已作了一定讲解,故本课程中不作为重点。

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程。根据学员的来源,教学内容有意舍弃了许多系统的理论分析,着重于物理概念的叙述。为了获得较好的教学效果,希望在教学过程中,除了采用课堂讲授外,应特别加强实验课的内容,以便增加学员的感性知识和提高学员解决实际工作中所遇到的各种测量问题的能力。

第 三 章

测量误差和数据处理

第一节 概 述

一、误差产生的原因

进行测量时，产生误差的原因有下列 5 个方面：

- (1) 仪器产生的误差；
- (2) 仪器安装调试不准确产生的误差；
- (3) 环境引起的误差；
- (4) 测量方法引入的误差（又称理论误差）；
- (5) 人为误差。

二、误差分类

为了便于研究，将误差从不同角度进行如下分类：

- (1) 按误差的性质分类：随机误差（偶然误差）、系统误差；
- (2) 按误差产生的原因分类：仪器误差、安装调试误差、环境误差、方法误差、人为误差；

(3) 按误差定义与仪器误差表示方式分类：绝对误差、相对误差、额定相对误差、引用相对误差等。

(4) 仪器工作时的外部环境条件不同，电子测量仪器的误差可用固有误差、变动量、工作误差表征（1976年以前用基本误差、附加误差表征）。

综上所述，进行误差计算和误差分析时，按误差性质进行分类较合适。在使用仪器时，按仪器误差表示方式以及按仪器工作条件

进行分类较合适。

第二节 测量误差的定义及计算

一、测量误差的定义

(一) 绝对误差的定义

1. 绝对误差的定义

测量结果和被测量真值之间的差，即

$$\Delta = A - A_0 \quad (2-1)$$

式中 Δ ——仪器测量时的绝对误差；

A ——仪器示值；

A_0 ——被测量的真值。

一个量在被测时，该量本身所具有的真实大小称为该量的真值，量的真值是一个理想的概念，真值数值并不知道，在实际测量时常用高一级的计量标准所测得的量值（称为实际值）代替真值使用。

2. 修正值 C

$$A_0 = A - \Delta = A + C$$

$$C = -\Delta \quad \text{称为修正值} \quad (2-2)$$

(二) 相对误差的定义

(1) 相对误差（又称实际相对误差）定义

绝对误差与被测量的真值之比，即相对误差 δ

$$\delta = \frac{\Delta}{A_0} = \frac{A - A_0}{A_0} \quad (2-3)$$

(2) 额定相对误差（又称标称相对误差）定义

绝对误差与测量仪器示值之比，即

$$\delta_N = \frac{\Delta}{A} = \frac{A - A_0}{A} \quad (2-4)$$

额定相对误差 δ_N 与相对误差 δ 的定义不同，而数值上相差为

$$\delta - \delta_N = \frac{A - A_0}{A_0} - \frac{A - A_0}{A} = \frac{(A - A_0)^2}{A_0 A} = \delta \delta_N \quad (2-5)$$

当相对误差不大时，两者相差极小。

[例2-1] 设 $A_0 = 99, A = 100, \Delta = A - A_0 = 1, \delta_N = \frac{1}{100}$,

$$\delta = \frac{1}{99}. \text{ 则 } \delta - \delta_N = \frac{\Delta^2}{A A_0} = \frac{1}{100 \times 99} \approx 1 \times 10^{-4}.$$

例(2-1)说明当相对误差不大时 δ 与 δ_N 在工程上可看作相等。但相对误差较大时，则 δ 与 δ_N 相差就较大，两者不能互相替代。

二、仪器误差表示方式

仪器的测量误差除采用上述绝对误差和相对误差表示外，还常用下面几种方式表示。

(一) 用引用相对误差 δ_m 表示

引用相对误差简称引用误差，其定义为绝对误差与仪器测量范围上限之比，即

$$\delta_r = \frac{\Delta}{A_m} \quad (2-6)$$

式中 A_m ——仪器测量范围上限。

(二) 用相对误差与绝对误差混合表示

误差的一部分正比于被测量值的大小，一部分为常数。如某音频信号源频率刻度误差为

$$\pm (1\% F + 1\text{Hz}) \text{ 或写成 } \pm \left(1\% + \frac{1}{F} \text{Hz} \right)$$

式中 F ——频率刻度值。

(三) 用分贝数表示

衰减器的衰减量常用分贝数表示，则衰减器的误差也常用分贝数表示。

相对误差与分贝误差之间的换算关系如下

$$\Delta_{dB} = 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta}{A} \right) \quad (\text{电压}) \quad (2-7)$$

$$\Delta_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\Delta}{A} \right) \quad (\text{功率}) \quad (2-8)$$

若 Δ_{dB} 不大,则可按下式近似计算

$$\Delta_{dB} = 8.69 \frac{\Delta}{A} \quad (\text{电压}) \quad (2-9)$$

$$\Delta_{dB} = 4.34 \frac{\Delta}{A} \quad (\text{功率}) \quad (2-10)$$

(四) 用刻度尺长度的百分数表示

某些兆欧表和电子兆欧表其误差是用刻度尺工作部分长度的百分数表示。例如某兆欧表其基本误差规定为1.5级,意思是说其允许误差为刻度尺工作部分长度的 $\pm 1.5\%$ 。若刻度尺工作部分长度为80mm,则允许误差为1.2mm。而绝对误差用兆欧姆表示时,则应在刻度尺上去查,由于刻度尺非线性极大,因此不同的刻度点上1.2mm对应的兆欧姆值是不相同的,甚至相差很大。

这种仪器误差表示方式为

$$\delta_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2-11)$$

式中 l ——刻度尺的工作部分长度;

Δl ——仪器示值 A 与实际值 A_0 所对应的指针在刻度尺上位置之间的距离。

三、说明书中常见误差名词

一切计量器具总是在一定的外部条件下工作的,当外部条件不同时,其性能和误差也就不同。因此一个仪器的额定允许误差,都是对应于一定的外部条件而言的,所以对温度、湿度、大气压等外部影响量的要求应作统一规定,并在此规定下确定仪器的误差与其他性能。

电子仪器的说明书中常见的有“固有误差、变动量、工作误差”，“基本误差、附加误差”等名词。

(一) 基准条件与固有误差[4]

1. 基准工作条件 (简称基准条件)

基准条件定义：为确定固有误差，以一组带公差的基准值和基准范围的影响量的集合为条件，此条件称为基准条件。

电子测量仪器的基准条件，在制造厂不特别指明时，外部影响量应按表 2-1 规定，内部影响量的额定值在产品标准中规定。

表2-1 电子测量仪器的基准工作条件

影响量(外部)	基准数值或范围	公差
环境温度	20°C	±2°C
相对湿度	45%~75%	
大气压强	86~106kPa	
交流供电电压	220V	±2%
交流供电频率	50Hz	±1%
交流供电波形		$\beta^* = 0.05$
交流供电电压的纹波		$\frac{\Delta V^{**}}{V_0} < 0.1\%$

* β 为失真因子，即交流供电电压波形的失真应保持在 $(1+\beta) A \sin \omega t$ 与 $(1-\beta) A \sin \omega t$ 所形成的包络之内。

** ΔV 为纹波电压的峰-峰值， V_0 为直流供电电压的额定值。

2. 固有误差

固有误差：测量仪器在基准条件下使用时的误差。可见固有误差与基准条件是对应的，在估计测量仪器的误差时，若用仪器说明书中给出的固有误差数值，则仪器使用的实际条件应符合基准条件的规定。

固有误差可选用前述误差表示方式的任何一种来表示。

(二) 正常条件与基本误差

在1976年前仪器说明书中给出的是基本误差和附加误差的数值。

基本误差与固有误差的物理意义是相同的，仅是基本误差所对应的为正常条件。正常条件比基准条件规定的公差要宽些。例如正常条件中规定的气候条件为：温度 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度45%~75%，大气压力86~106kPa。而基准条件中规定的气候条件为：温度 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度45%~75%，大气压力86~106kPa。

基本误差的定义：计量器具在规定的正常条件下所具有的误差。基本误差可选用前述仪器误差表示方式的任何一种来表示。

在估计仪器的误差时，若使用的是基本误差的数值，则仪器实际使用条件应符合正常条件。

（三）变动量与附加误差

1. 变动量

“变动量”与“固有误差”搭配使用，用于1976年以后；“附加误差”与“基本误差”搭配使用，用于1976年以前。变动量与附加误差的物理意义是相同的。

变动量的定义：由于某一影响量（如温度，湿度等）偏离基准工作条件所规定的数值而引起仪器示值的变化量。示值变化量是指在影响量变化后仪器示值相对于影响量符合基准条件规定时的仪器示值的变化量。所以，严格地说，变动量和附加误差不能称为误差，因为误差必须是相对于真值而言的，正由于这个原因称其为变动量比称为附加误差更合理。

2. 变动量与附加误差的表示方式

变动量与附加误差虽然严格说不是误差，但都可用前面介绍的仪器误差表示方式中的一种来表示。变动量（附加误差）的表示方式可同固有误差（基本误差）相同，也可以不同，但在两者合成求总误差时，应换算成同一种误差表示方式。

3. 变动量的计算^[6]

变动量与附加误差的定义是类同的，因此它们的计算公式完

全相同，下面仅讨论变动量的计算。

变动量的计算公式随着检定时标准仪器示值保持常数或被检仪器示值保持常数而不同。现以检定电子电压表的温度变动量为例，列出变动量的计算公式。

设检定方法为比较法，用标准表与被检表同时测量一稳定电压。

(1) 检定时保持标准表示值为常数

设在 22°C 时标准表示值 A_0 ，被检表示值 $A_{22^{\circ}\text{C}}$ ；在 32°C 时标准表示值 A_0 ，被检表示值 $A_{32^{\circ}\text{C}}$ 。则变动量为

$$\Delta_g = A_{32^{\circ}\text{C}} - A_{22^{\circ}\text{C}} \quad (\text{绝对误差表示})$$

$$\frac{\Delta_g}{A_m} \quad (\text{引用误差表示})$$

$$\frac{\Delta_g}{A_0} \quad (\text{相对误差表示})$$

(2) 检定时保持被检表示值为常数

设在 22°C 时标准表示值 $A_{022^{\circ}\text{C}}$ ，被检表示值 A ；在 32°C 时标准表示值 $A_{032^{\circ}\text{C}}$ ，被检表示值 A 。则变动量为

$$\Delta_g = A_{022^{\circ}\text{C}} - A_{032^{\circ}\text{C}} \quad (\text{绝对误差表示})$$

$$\frac{\Delta_g}{A_m} \quad (\text{引用误差表示})$$

$$\frac{\Delta_g}{A_{022^{\circ}\text{C}}} \quad (\text{相对误差表示})$$

已知基本误差与附加误差，求总误差，从误差理论来看是误差合成问题，可以按误差合成方法进行计算，但对于电子测量仪器，国家有关文件中对其合成方法有所规定，即仪器的允许误差为基本误差和工作条件内最大附加误差的代数和，基本误差和附加误差的最大值应在技术条件中指明。工作中应按这一规定进行计算。