

电子测量仪器

李常蔚 李锦林 编著

内 容 简 介

本书简要地介绍了电子测量仪器的特点及其发展情况；阐述了各类电子测量仪器中典型仪器的类型、基本原理、用途、性能及新技术等。

本书可供仪器仪表使用单位和有关科技组织部门的工作人员及领导干部参考，也可作为大专院校师生的辅助读物。

电 子 测 量 仪 器

李常蔚 李锦林 编著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 2 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1980 年 2 月第一次印刷 印张：2 5/8

印数：0001—24,100 字 数：58,000

统一书号：15031·273

本社书号：1717·15—7

定 价： 0.30 元

目 录

第一章 电子仪器与电子测量仪器	1
第二章 电子测量仪器的发展	6
一、主要特性大幅度提高	6
二、固体化和集成化	7
三、一机多用	8
四、数字化	9
五、自动化和系统化	9
第三章 电压电流测量仪器	12
第四章 信号发生仪器	22
一、通用信号发生器	22
二、特殊信号发生器	24
三、函数信号发生器	24
四、扫频信号发生器	25
五、脉冲信号发生器	25
第五章 信号分析测量仪器	30
一、示波器	30
二、频谱分析仪	38
第六章 频率和时间测量仪器	43
第七章 网络特性测量仪器	49
一、阻抗特性图示仪	50
二、频率特性描绘仪	52
三、网络分析仪	53
第八章 电波特性测量仪器	55
第九章 电子元器件测量仪器	60

第十章 电子测量用辅助仪器.....	67
一、波形记录器.....	67
二、磁带记录器.....	72
第十一章 自动测量系统.....	74
一、自动数据集录系统.....	74
二、电子器件和设备的自动测试系统.....	76
后 记	79

第一章 电子仪器与电子测量仪器

在生产斗争和科学实验的过程中，人类经过不断地实践和认识，逐步发展和正在完备着自己认识自然和改造自然的整套操作工具，其中也包括电子仪器。电子仪器是用于观测和计量电现象的科学仪器。

由于电现象的测量较之其它物理现象的测量方便，而其它物理现象又可以通过多种相应的传感器、换能器转换为电的变化，因此利用电子的运动特性来观测和计量各种物理现象的仪器广泛应用于国民经济和科学实验的各个领域。

电子仪器除在各个学科的实验室中作精密测试和计量外，在工农业各部门也被广泛地作为检测、控制、测量设备之用。而无线电电子学的发展更是离不开电子仪器，它们是相辅相成地发展起来的。如果说机床是机械工业的基础，电子仪器则可认为是电子工业的基础。今日电子工业的迅速发展，作为其基础的电子仪器的作用是很大的，诸如通信、电视、雷达、计算机等现代电子技术的革新，无线电材料、元件和器件的不断创新，均与电子仪器的改进和日臻完善密切相关。

电子仪器始于二十世纪二十年代前后，至今已有半个多世纪的历史了。回顾电子学的发展过程可知，十九世纪三十年代开始出现了电磁学，十九世纪八十年代又诞生了电气工业，与此结伴而来的就有了电气测量的发展。但是，作为现代工业和现代科学必不可少的工具的电子仪器，却是本世纪初电子管的发明而引起的技术革命的产物。由于电子管的发明，一九一〇年至一九一五年出现了远距离无线电话；一九一四

年至一九一八年第一次世界大战期间，军事无线电通信普遍应用；一九二二年开始出现无线电广播；在三十年代又相继出现雷达、电视和微波通信。所有这些重要的发展创造了一门新兴的工业——电子工业，正是电子工业给电子仪器的发展提出了巨大的需要。同时，也由于电子管发明之后，电子技术应用于测量仪器本身，才使得对各种物理量进行精确测试的电子仪器有了迅速发展的可能。在这近半个世纪内，随着无线电电子学特别是半导体技术的发展，电子仪器在性能、功能以及在外形结构等各方面都取得了很大的进展，新的测试技术和新的仪器不断出现。

电子仪器的实际应用，也随着科学技术的发展而不断适应和发展。五十年代前，电子仪器大部分是用于两个方面：一是适用面广的仪器，如电压电流表、信号发生器、电子示波器等，它们广泛用于科学技术中的多种测试，根据实验的需要而随时改变组合。另一种情况是，配合电子工程的需要出现了专用的仪器，用于指示电子设备和系统（如电视、雷达中心）的工作状态的各种监视器和检测器，它们都是固定的设备组合。

近年来，庞大复杂的电子工程系统日渐增加，如外弹道测量系统、巨型相控阵雷达、卫星通信中心、大型电子计算机等，为了在运转过程中监视其性能，为了能迅速地寻找出故障，出现了专用的监视检测系统。这种系统内包含大量各类电子仪器，要求通用性和固定性相结合。例如大规模自动化测试系统、综合数据处理系统、自动网络分析系统等，从而把电子仪器的应用推进到新的阶段。

可以这样说，电子仪器的发展，首先决定于生产实践和科学实验的需要。现代化的工农业，现代化科学技术和军事装备的发展要求研制和生产各种新型的高精度的电子仪器，而

电子仪器面貌的改变则是由于物理新原理、计算技术、新型元件和器件的革新，每当出现一代新的电子器件时都带来了电子仪器的显著改进。

半个多世纪的电子仪器的发展，按器件特性大致可分为三个时期：第一个时期是二十世纪二十年代到五十年代的电子管仪器时期，即第一代电子仪器。第二个时期是二十世纪五十年代开始的晶体管仪器时期，即第二代电子仪器。第三个时期是二十世纪七十年代进入的集成电路时期，即第三代电子仪器。

我国的电子仪器，建国以来，在毛泽东思想指引下，从无到有发展很快。在短短的二十几年里，已经历了电子管化和晶体管化的阶段并且正向着集成化、自动化迈进。

电子仪器一般分为三大类：

(1) 电气测量仪器。即当电子的运动主要作为能量(电力)来使用时，对其运动的基本量(如电流、电压、功率)进行测量的仪器。

(2) 电子测量仪器。即当电子的运动主要作为信息来使用时，对其运动信息进行测量的仪器。

(3) 电子应用仪器。即利用电子的运动特性对其它运动信息(如温度、压力、流量等)进行测量的仪器。

本书主要介绍电子仪器的第二类即电子测量仪器。

由于被测对象的不同要求，电子测量仪器的种类、型号极其繁多，常用的大体可分为如下九类：

(1) 电基本量测量仪器。这类仪器包括电能量和电路参数测量仪器。电能量测量仪器有各种电压表、电流表、功率计；电路参数测量仪器有各种 R 、 C 、 L 电桥和阻抗电桥等。

(2) 信号发生仪器。即电子电路、部件、整机的调试及测量所需的信号源。根据用途不同种类很多，如调频调幅发生

器、标准信号发生器、脉冲发生器、频率合成器、函数信号发生器、噪声发生器、功率发生器、特殊信号发生器等。

(3) 信号分析测量仪器。这类仪器主要是用来观察和分析电波形并记录测量有关参数的仪器。根据显示和记录方式的不同分为时域分析和频域分析两类。时域分析仪器有宽带示波器、脉冲示波器、取样示波器、行波示波器等,频域分析仪器有波形记录器、波形分析器、频谱分析仪等。

(4) 频率和时间测量仪器。这类仪器主要是用来测量电信号的时间间隔、频率、周期和显示其结果的仪器。例如电子计数器、频率稳定度测试仪、时间间隔测量仪、普通频率计和波长表等。

(5) 网络特性测量仪器。即对电子电路中网络的频率特性、功率特性、噪声特性、阻抗特性等进行测量的仪器。例如阻抗测试仪、频率特性图示仪、相关仪等。

(6) 电波特性测量仪器。即对电波传播、电磁场强度、干扰强度等进行测量的仪器。如标准接收机、场强计、干扰测量仪、杂散功率测量仪等。

(7) 电子元器件测量仪器。这类仪器是用来测量电子元器件各种电参数或检查电子元器件能否正常工作的测试仪器。根据测试对象不同分为电子元件测试仪器、电子管测试仪器和半导体器件测试仪器。电子元件测试仪器测量电阻、电感和电容等元件的参数;电子管测试仪器如电子管参数测试仪、电子管输出功率测试仪、电子管噪声测试仪等;半导体器件测试仪器如晶体管参数测试仪、特性曲线图示仪、集成电路测试仪等。

(8) 电子测量用辅助仪器。在电子测量的不同过程中,需要对电信号进行放大、检波、滤波、隔离、衰减处理,在这种测量中所使用的多属单一功能的各种仪器,这类仪器以及为

各种电子测量所提供的交直流稳定电源都可称为辅助仪器。例如直流放大器、交流放大器、选频放大器；各种检波器、滤波器、衰减器、定向耦合器、测量线；纸带和磁带记录器；交流和直流稳压电源等等。

(9) 自动测量系统。即对电子仪器和系统作多项目的电性能测量的仪器设备。这类测试系统一般是多功能的、可进行综合性测量的装置。例如数据综合处理系统、接收机综合测试系统、电视机测试系统及自动网络分析系统等。

以上分类主要是根据性能来划分的，还有按用途或频段来划分的，分类方法目前尚未完全一致。下面，在叙述电子测量仪器的发展后，我们将按上述分类对各类主要电子测量仪器的基本原理、用途、性能、类型、特点等作进一步介绍。

第二章 电子测量仪器的发展

近年来,电子测量仪器发展很快,目前的主要发展特点大致可归纳如下: 各种主要性能大幅度提高; 由于集成电路已普遍使用,所以仪器日趋小型轻量化;数字化、程序化、自动化得到很大发展;一机多用,并出现了大型自动测量系统。可以说,今天的电子测量仪器面貌已焕然一新,较十年前的水平有了一个飞跃。

一、主要特性大幅度提高

近年来各类电子测量仪器的主要性能和技术指标,如频宽、精度、速度、分辨力、灵敏度、稳定性等都有很大提高。测量频段自超低频到几十千兆赫已经没有空白,最低频率可测到 0.000001 赫,最高可达 150 千兆赫以上。仪器单机的覆盖频率很宽,例如,频率计数器可测至 18 千兆赫,时间间隔测量仪的分辨能力达 100 微微秒。测量的最微小参数是电容,达 10^{-19} 法;最大参数是电阻,达 10^{18} 欧。

宽带示波器的频宽由 100 兆赫发展到 500 兆赫。取样示波器的频宽已超过 18 千兆赫,示波器的灵敏度和扫描速度等主要指标普遍提高了 $1-2$ 个数量级。

数字电压表的分辨力从毫伏级提高到毫微伏级,精度已达百万分之一以上,测量速度高达 1000 次/秒。

电子计数器的直接计数能力从 10 兆赫提高到 1000 兆赫,而晶体振荡器的频率稳定度从 $1 \times 10^{-6}/\text{天}$ 提高到 $5 \times$

10^{-12} /天,增加了五、六个数量级。被测信号不仅可以是通常的连续波、调频、调幅信号,而且可以是脉冲信号,脉冲群和脉冲调制信号。

信号发生器的改进也很显著,出现了扫频仪器和稳定度极高的频率合成器,其稳定度高达 5×10^{-11} /天,频率达 18 千兆赫以上的频率合成器。

仅从上面列举的一些数字可以说明,目前的电子测量技术已相当精确和精密了。但是,随着近代无线电电子学的发展,尤其是空间技术、遥感技术、激光技术和微电子学的发展,势必提出更高的要求。事实上,电子测量仪器目前仍有很多尚待解决的问题,这就促使测量技术和方法需要进一步改进,性能需要继续提高。

二、固体化和集成化

大约在 1952 年左右,电子测量仪器就着手采用半导体技术,在这之前大都是电子管的。1959 年出现了第一台全晶体管化的电子计数器。进入六十年代,由于半导体技术和微波固体器件的发展,很大部分的电子测量仪器已经实现了固体化。在采用了发光二极管以后,使数字电压表、电子计数器实现了全固体化;信号发生器除功率发生器外,固体源取代了电子管式的发生器;示波器除示波管外,也全部实现了固体化。目前已有频率高达 120 千兆赫的固体扫频信号发生器出现。

电子测量仪器的集成化是六十年代提出的,到六十年代末、七十年代初得到了飞快的发展,大规模集成电路已逐步地应用到各类仪器装置中去。目前电子测量仪器所采用的集成电路占固体电路的 50% 左右。可以预计,到七十年代后期,高度集成化的仪器将占主导地位。

由于固体化和集成化的发展和微带线、电调器件的使用，使电子测量仪器的小型轻量化有了不少进步，为研制新型电子测量仪器和扩展其应用范围提供了有利条件。目前液晶显示技术业已成熟并达到实用阶段。较小型的5位数字多用表，其交直流电压的量程为200毫伏—1200伏，精度为0.1%；直流电流为200毫安—2安，精度为0.2%；电阻为200欧—20兆欧，精度为0.2%；体积仅有 $22 \times 6 \times 25$ 厘米³，重量包括电池在内才1公斤。这种仪器只有一块印刷电路板，用两块集成电路，集成了3000多个元器件做成的。最近出现的手持探头式数字多用表，重量不到0.2公斤。

三、一机多用

电子测量仪器一机多用的设想是在五十年代提出来的，1953年就出现了插件式示波器。进入七十年代，插件式结构被多种仪器所采用，而且有很多改进和创新。例如，印刷电路板卡片插入式结构就是插件式结构的一种发展。

现有的示波器可同时容纳四个插入单元，因而一台示波器能够起到多台仪器的作用。如作为宽带示波器、取样示波器、时域反射计、电子计数器、数字万用表、频谱分析仪、信号发生器、半导体特性图示仪等等。通过插件的更换，通用计数器也可用来测量频率、周期、频率比、时间间隔、电压、电流、相位等多种参数。数字多用表也扩展了使用范围，除测量直流电压、直流电流、高低电阻、交流电压外，还可以测量频率、周期和时间间隔。

随着集成电路技术的发展，为满足日益增长的多样性测量的要求，一些本身就具备多种测试的装置也相继出现，网络分析仪就是一个非常突出的例子，它几乎可以测量高频、超

高频、微波频段的所有参数，是一部成套的测试装置，从而为电子测量仪器的多功能化开辟了更加广阔的前景。

四、数 字 化

电子测量仪器的数字化优点很多，首先是读数精确、直观、分辨力高、响应速度快、使用方便，从而提高了测量效率。另外，由于数字仪器便于程序控制和数据处理，这就为与计算机相结合实现自动化测量提供了前提条件。所以，电子测量仪器的数字化，其意义不只限于将逐步代替读数不准确的指针式仪器和游标式读盘，更重要的是为仪器程序化、自动化提供了先决条件。

最早实现数字化的是电压表和频率计，第一台数字电压表和计数器是在五十年代初期出现的。经二十多年的时间，随着电子学和电子测量技术的进步，现在各类仪器几乎都实现了数字化。如数字信号发生器、数字示波器、数字接收机等。就是非电量的测量，如压力、应力、流量、温度、计时、几何尺寸、转速、里程等也都在实现数字化。

近年来出现的一种数字示波器为数字化开辟了一个新的途径。这种数字仪器与其它数字仪器不同，它设有单独的數字读出装置，数字直接显示在示波管的屏幕上，其字母、符号是由专用的集成化字符发生器产生的。这就使数字读出与波形显示得到了结合，这种组合体将比带有单独的数字显示装置的仪器更节约、更方便。

五、自动化和系统化

随着数字仪器的蓬勃发展，围绕数字电压表和电子计数

器进行了很多改革,如采用自动打印记录以保存测量数据,使用简单的逻辑程序和实现量程的自动转换以减少操作失误等。这都是为实现仪器的自动化所作努力的一部分。此外,诸如功能变换、零字抑制、自动零点调整、自动校准、自动过荷指示和保护、自动判别极性和自动定位等技术,目前也都比较成熟。这些对于自动化测量装置而言,都是必不可少的。

为适应自动化测量的需要,测量仪器必须具备程序控制输入电路和编码输出电路,由内部或外部程序器进行控制。目前的自动测试装置不外有两种类型:一种是仪器本身实现了自动化测量并具有计算功能;另一种是采用穿孔带、穿孔卡、磁带控制或者采用计算机控制的多种仪器组合自动测量系统。我们一般说的自动测量系统是指后一种而言。当前这两种装置都已成批生产,达到实用阶段。

大型自动化测试系统早在1958年就开始进行研究,但一直进展不大。到了六十年代后期,由于克服了可靠性差,程序编制复杂,仪器与计算机接口等问题以后,才得到迅速发展。目前世界各主要仪器公司都在生产各种自动测试系统。采用这种系统可对绝大多数电学参数进行测量,如电阻、电容、电感、电缆、变压器、半导体器件、数字电路、线性电路、网络分析、频谱分析、波形分析、航空电子设备以及高频收发信机等,都得到了高效率 and 可靠的测量结果。频率覆盖从直流到几十千兆赫。例如,一种传输特性自动测定装置,可测量滤波器、放大器、增音器、衰减器、同轴电缆、线性集成电路等网络的射频传输特性、损耗、过载特性、串扰特性和噪声电平等。它包括由微型计算机、打印机、磁带机、纸带机等组成的控制台;由频率合成器、选频电平表等组成的测试台;由键盘、显示终端组成的,可做人和机对话的显示台等三部分,每点的测量时间不超过0.2秒,几天的工作量可在几十秒内完成。

再如一种自动网络分析系统,可测量负载、隔离器、放大器、衰减器、滤波器、开关、移相器、定向耦合器、二极管、三极管等十八种有源和无源网络的多种参数,而且,一种通用测量程序可测七种微波元件的二十六个微波参数,如驻波系数、传输系数、反射系数、增益、相位、电阻、电导、阻抗等。频率范围为 100—18000 兆赫。用这种装置在厘米波段上测一个滤波器的相位、衰减、驻波特性、几兆赫测一点,共 50—60 个频率点,全部测量时间只需 20 秒,结果可立即用显示器显示并同时打印在数据表格上。这种装置还可以修正系统误差,因此精度提高了,效率也提高了。

虽然自动化、系统化的电子测量设备的发展历史很短,但目前品种已相当多,内容十分广泛,涉及的领域也非常广阔。随着各类学科的进步,不难预料,自动化测量系统将会有更大的发展,其性能将日臻完善。

综上所述,可以预计,今后几年内电子测量仪器将进一步实现固体化、数字化、自动化、系统化和多功能化,其中固体化尤其是集成化乃是关键。从现有的混合集成电路、微波集成电路、单片微型计算机等的水平来看,一代新的电子测量仪器和设备正在研制或已研制成功。

当然,电子测量仪器的发展与新工艺和新器件的发明密切相关,同时测量方法和测量技术的改善也起着同样重要的作用,有关情况将结合相应仪器作简要介绍。

第三章 电压电流测量仪器

电压和电流是基本的电学参数，电压表和电流表是最常用的电子测量仪器。在四十年代前，电压和电流的测量主要借助动圈式电表。经过不断的改进，动圈式电表具有很高的灵敏度，带有光学装置的检流计，可测至10微微安的直流电流，配合精密电位差计，可测0.1微伏的直流电压。经过硒整流器和氧化亚铜或热电偶的转换，利用动圈式电表便能对交流电压和电流进行测量。由于结构简单、使用方便，这类电压和电流表一直沿用到现在。它的不足之处是，要从被测源中直接取得能量，量程较窄，过荷能力差，灵敏度不高，读数误差大等。有些检流计的灵敏度虽然很高，但响应时间长，对环境要求高，使用不方便。

电子管发明以后，研制成电子管电压表和电流表。直流电子管电压表和电流表的基本原理是，被测量经放大后产生与被测量成比例的电量，由动圈式表头作指示。交流电子管电压表和电流表的基本原理是，被测量经检波后放大或放大后检波，获得与被测量成比例的电量，由动圈式表头作指示。这类电压表和电流表由于利用指针作读数指示，通称模拟式电压表和模拟式电流表。模拟式电压表具有输入阻抗高、响应时间快、动态范围大、灵敏度高而过荷能力强等优点。这是电压和电流测量仪器的重要改进。

五十年代，电子管电压表和电流表向半导体化过渡的时候，出现了数字式电压表，这是电压和电流测量仪器的革新。数字式电压表比模拟式电压表的改进是，用数字读出代替指

针指示,不会引入人为误差,并且具有读数速度快、分辨力强、自动化程度高等优点。目前,数字电压表和电流表已经获得广泛的应用,并有很大的提高。本章重点介绍数字电压表。

根据用途的不同,电压和电流测量仪器大体可分为:电压和电流标准、电压和电流校准器、模拟电压和电流表、数字电压和电流表四类。

直流电压标准是化学电池。一次直流电压标准要求存放在严格的环境条件下,使用起来不太方便;二次直流电压标准的化学电池,近年来逐渐由温度补偿的齐纳稳压二极管所代替,电子测量仪器已普遍使用齐纳稳压管标准电压代替化学电池。电压标准配合精密的电阻分压器可构成一次或二次电流标准。利用各种交流-直流转换器,如热偶元件和热敏元件,可构成各频段的电压和电流标准。

电压和电流标准的覆盖范围比较窄,不能用作宽量程的电压标准。要扩展量程,可使用电压和电流发生器,其输出直流电压从 0.1 微伏到 1 千伏,直流电流从 1 微安到 1 安的大范围内变化。交流电压和电流标准的频段多在低频范围。

电压和电流校准器是电压和电流发生器、比较器和指零器的组合,专用于校正各类电压表和电流表。

模拟电压和电流表按频率划分,有直流和交流两类。直流电压和电流表按电路结构划分,又有直接放大和斩波放大两种,如图 3-1 所示。直接放大的电压和电流表,不容易克服零点漂移的困难,对微电压和电流的灵敏度不易提高,但电路简单,多用于一般电压和电流测量。

斩波放大的直流电压和电流表,先将直流经斩波器变换成方波,经交流放大器放大,再经二极管检波器由表头指示读数。斩波器有机械式、光电式和振动电容器等多种。

交流电压和电流表按频段划分,有低频、宽频、高频和超