

高等学校教材

电子元件与材料测试技术

周东祥
潘晓光

编著



黑龙江科学技术出版社

内 容 提 要

本书较全面地介绍了电子元件与材料基本电参数的测试方法、原理以及提高测量准确度的途径,对常用的实验数据处理、统计分析方法及可靠性理论和实验作了必要的阐述。主要包括,与电子材料测试技术有关的误差理论及测试结果的处理方法,电阻、电容、铁电与压电及电子敏感元件等的测量原理与测试技术,测量系统及测量自动化的基本问题。

本书适用于大学本科电子元件与材料专业的学生学习,也可供有关工程技术人员参考。

电子材料与测试技术

周东祥 编著
潘晓光

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街 35 号)

黑龙江新华附属印刷厂印刷·黑龙江省新华书店发行

787×1092毫米32开本11.375印张 230千字

1989年11月第1版·1989年11月第1次印刷

印数: 1—550册 定价: 2.10元

ISBN 7-5388-0680-6/TN·10

前 言

本教材系高等学校工科《电子元件与材料》专业用统编教材。由《电子材料与固体器件》编审委员会电子材料与器件编审小组评选审定并推荐出版。

本教材的编写和审阅是依据电子材料与器件编审小组审定的编写大纲进行的，计划50学时左右。

近年来，电子元件与材料的发展十分迅速，新理论、新材料、新器件不断涌现，相关的测试技术也不断更新。考虑到教学、科研及生产的需要，本书在阐述基本理论及基本测试技术的同时，力求反映国内外在该领域的新发展和新成就。本书的基本内容包括三大部分。第一部分介绍与电子材料测试技术有关的误差理论及测试结果的处理方法，并结合实际重点介绍理论的应用问题。第二部分详细介绍电阻、电容、铁电与压电及电子敏感元件等的测量原理与测试技术。这部分在编排中，力求逐章成线，重点突出，试图给读者留下比较系统的印象。此外，考虑到近年来对电子元器件可靠性要求的不断提高，在这一部分中还介绍了关于电子元件失效分析及可靠性试验的基本理论，其中包括失效的物理化学及数学模型以及可靠性试验方法等。第三部分介绍了测量系统及测量自动化的基本问题，列举了一些常用的测量电路，

并概略地介绍了微机在测量中的应用技术。

为适应教学和自学的需要，每章后面附有习题，用以检验对书中正文掌握的情况。

天津大学谢道华、张之圣两位老师详细审阅了全书并提了许多宝贵意见，在此表示诚挚的谢意。

本书由周东祥同志任主编。周东祥同志执笔编写第一、二、三、六、七章，潘晓光同志执笔编写第四、五章，最后由周东祥统校全书。

对在本书的编写过程中给予支持和帮助的同事们表示衷心的感谢。

编著者

目 录

绪论	1
第一章 测量结果处理的理论基础	5
§ 1-1 测量的基本知识	5
§ 1-2 随机误差基本理论及分析方法	8
§ 1-3 系统误差的判别及消除	23
§ 1-4 误差的合成与分配	33
§ 1-5 数据处理及函数关系评定	41
习 题 一	57
第二章 电阻式元件的测量	59
§ 2-1 电子元件与材料测试的基本概念	59
§ 2-2 电阻和电阻率	62
§ 2-3 分压式测量原理	64
§ 2-4 电阻式电桥电路	69
§ 2-5 替代法测量原理	71
§ 2-6 欧姆表法	73
§ 2-7 电阻的交流法测量	76
§ 2-8 高电阻测试技术	78
§ 2-9 四电极法测量电阻	82
§ 2-10 高温下电阻的测量	86
§ 2-11 电阻器噪声的测量	88

习 题 二	96
第三章 电容元件及电介质材料特性测量原理	98
§ 3-1 电容器的基本参数	98
§ 3-2 介质测量的电极系统	100
§ 3-3 电桥法概述	105
§ 3-4 西林电桥	108
§ 3-5 双 T 电桥	115
§ 3-6 谐振法	119
§ 3-7 高频测试技术	130
§ 3-8 电介质材料的击穿试验	133
习 题 三	141
第四章 敏感元件参数的测量	143
§ 4-1 电阻式敏感元件测试的特点	143
§ 4-2 热敏电阻器特性参数的测量	150
§ 4-3 湿敏电阻器特性参数的测量	167
§ 4-4 气敏元件特性参数的测量	178
§ 4-5 压敏电阻器特性参数的测量	185
§ 4-6 力敏电阻器特性参数的测量	197
§ 4-7 磁敏电阻器特性参数的测量	204
§ 4-8 光敏电阻器特性参数的测量	206
习 题 四	211
第五章 铁电、压电材料参数的测量	213
§ 5-1 铁电材料参数的测量	213
§ 5-2 压电材料主要参数的测量	229
§ 5-3 热释电系数的测量	246

习 题 五	256
第六章 电子元件失效分析与可靠性试验方法	
概论	258
§ 6-1 失效与可靠性的基本概念	258
§ 6-2 失效的数学与物理化学模型	262
§ 6-3 可靠性试验	274
§ 6-4 加速寿命试验	286
习 题 六	297
第七章 测量电路系统与测量自动化	299
§ 7-1 信号采集电路	300
§ 7-2 信号处理电路	307
§ 7-3 非线性元件的线化处理	314
§ 7-4 信号的显示与记录	319
§ 7-5 测量自动化概述	335
§ 7-6 微型计算机在电子元件测量中的应 用	341
习 题 七	350
主要参考文献	351
附录 I 误差函数表	
附录 II t分布表	355

绪 论

一、电子元件与材料测量的意义

测量是人类认识自然的一种手段和过程。著名科学家门捷列夫曾经说过：“没有测量就没有科学”。人们通过测量可以对事物进行客观的分析和评价。回顾科学技术的发展历程，无论哪一种新元素的发现还是哪一种新效应的证实，无论是宏大的宇宙天体还是微小的原子世界，若要认识它们，都离不开测量。测量与人类的科学事业、工农业生产、家庭生活等都是密切相关的。

随着科学事业的不断发展，各学科之间的渗透性越来越强，所研究的对象也越来越广泛。对一个新课题的研究，往往需要进行大量的、繁复多样的测量工作，因此测量学在科学研究中的地位也日趋重要。

电子测量作为测量学的新分支，近几十年来得到了迅速的发展。电子测量一般泛指以电子技术为手段进行的测量，它涉及的内容十分广泛，例如对电量、磁量以及非电物理量的测量等。广泛地说电子元件与材料的测量也应属于电子测量的范畴。但是，由于电子元件与材料学科的本身所包含的内容已经十分广泛，它不仅涉及到电子学的领域而且更多地与物理学中的原理、效应、化学中的反应等紧密相连，可以

说，电子元件与材料学科早已发展成为一个独立的、以许多学科为基础的新型的边缘学科。这就要求作为这门新学科的重要研究手段的电子元件与材料的测量技术也要不断地发展和完善。

另外，电子元件与材料的种类繁多，所要测量的项目也多种多样，这是电子测量学科所无法包罗的。如电子元件中的敏感元件，有热敏、气敏、光敏、力敏、湿敏等等，对它们的测量所采用的方法也各有所异，许多测量原理与测试技术都尚待研究。这对于新理论、新效应的开发和对于原有理论、效应的进一步证实都是非常重要的。但应该指出，电子元件的测量仍是在电子测量学的基础上发展的，而电子元件的发展则对电子测量技术不断提出新的要求，因此两者是相辅相成、互相促进的。

近年来，电子计算技术发展十分迅速。70年代初期微型电子计算机被大量引入测试系统，使电子测量技术开始走上了新的里程。由于计算机的引入，不仅可以实现测量及数据处理等的自动化，提高了测量精度，而且对科学技术的发展也产生了巨大的影响。这种“智能”化的测试系统还将不断地向前发展。

总之，高精度、高水准的现代化测试技术是科学技术现代化的重要标志，也是电子元件与材料学科发展的必要手段。

二、电子元件与材料测量的特点

电子元件与材料测量的特点主要有以下几点：

1. 待测量的范围广

由于元件及材料的种类很多，元件有电容、电阻、电感、敏

感元件等,材料有无机、有机、绝缘材料、半导体材料等。在这些名目繁杂的元件与材料中,标志其特性的参数也各不一样,因此在测量中所涉及到的测量原理、测试手段也非常多,所以在测试时应针对不同元件、材料,采用不同的方法进行测量。

2. 待测量的量程宽

正因为元件的种类很多,因此待测量程极宽。例如,热释电元件的输出电流仅有 10^{-10} 安培的数量级,而 PTC 热敏电阻等元件的瞬时电流却可高达几十个安培;又如同一湿敏电阻的变化范围可达 5 个数量级以上。对于如此宽广的量程,普通的测试仪表是很难胜任的。

3. 需要不同的应力源系统

由于电子技术的不断发展,对元件的要求也不断提高。因此若要对元件的寿命作出确切的评价就需要在各种应力条件下对元件进行可靠性试验,这就必须有各种具有现代化水平的应力源设备。以敏感元件为例,其本身乃是参数随不同物理量变化的元件,因此对其测量时就必须有相应的物理环境来配合测量。换句话说,就是对元件本身特性测量的同时,还要对相应物理环境因素作出满足相当精度的评价。

4. 迫切要求测量自动化

由于以上所述诸特性,如果仅靠手工测量,很难满足高精度的要求,必须靠有微型计算机配合的自动化测量系统来进行自动化测量。

三、《电子元件与材料测试技术》课程的任务

本课程是高等学校《电子元件与材料》专业的一门重要的

专业基础课。根据教学大纲的要求，本课程的主要任务是学习有关测量的基本概念、测量误差理论及数据处理方法，以及一些电子元件通用的基本测量技术等。

本课程学习的重点应放在测量的基本原理、测量方案的制定、测量中应注意的问题以及对测量结果的分析上。至于一些具体的电路方案是为了适应电子测量自动化的新发展，向学生介绍一些在自动化测量中常常用到的基本电路知识，以期在将来的工作中起个抛砖引玉的作用。

另外，本课程是理论性及实践性都很强的课程，因此，既不能把本课程作为纯理论来学习，也不能把它降为一般的实验课，而应注意二者的紧密结合。希望通过本课程的学习，能够对提高学生的科学分析能力及实验动手能力都有所帮助。

第一章 测量结果处理的理论基础

§ 1-1 测量的基本知识

1-1-1 测量的基本概念

测量是人们借助某种手段对客观事物取得数量概念的认识过程。测量结果通常包含某种单位的数学表示，但有时根据需要，也常常表示为一条曲线或显示为某种图形。

一般而论，测量实际就是把一个被测量与一个充当测量单位的已知量进行比较的过程。在比较过程中，使用的体现测量单位的器具称为量具。在实际测量中只有少量的量具能够参与直接比较，例如尺子、量杯等。而在大多数情况下，则需要借助专门的装置或设备才能完成。这些装置和设备一般称为仪器。对于某些复杂的测量工作，必须有许多的仪器、仪表组合在一起才能完成，这样的系统叫做测试系统。

近年来，由于微形电子计算机被引入测试系统，测量逐步实现了自动化。这些自动化测试系统在测量中几乎所有的测量步骤（包括数据的采集、数据的处理、结果的显示等）都是由系统自动完成的，因而大大地提高了测量精度，扩展了测量范围。

由于计算机技术的不断进步，自动化测量系统也不断地更新和发展。今后发展的主要方向就是在自动化系统中更加充分地发挥计算机的作用，以软件代替硬件，全面实现测试仪表及测量系统的“智能”化。

1-1-2 误差的基本概念

所谓误差一般是指测量误差。就是指当使用测量仪器进行测量时，所得数据与被测量的实际值之差。它是由于使用的测量仪器、测量方法、外界环境、操作技术等多方面因素造成的。

一、误差的表示法

常用误差的表示方法有绝对误差和相对误差两种。

1. 绝对误差

绝对误差是指测量值 x 与被测量的真值 A_0 的差。即

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

所谓真值，系指在一定时间条件下某物理量所体现的真实数值。由于真值一般无法求得，故式(1—1—1)只有理论上的意义，在一般的测量中， A_0 常以高一级标准仪器的示值 A 来代替，此时

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

称为示值误差，通常也把示值误差称为绝对误差。

绝对值与 Δx 相等，符号相反的值称为修正值常用 C 表示，即

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

如果由高一级标准给出受检仪器的修正值，则该仪器的实际值为

$$A = x + C \quad (1-1-4)$$

2. 相对误差

用绝对误差表示，一般不容易看出仪器的精度，所以常用相对误差来表示。所谓相对误差，系指绝对误差与被测量实际值 A 的百分比记为

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

如果用示值绝对误差与仪器的示值的百分比来表示相对误差，则称为示值相对误差，一般理论分析用前者，而工程上常常用后者来表示。

二、误差的性质及分类

误差按性质分类主要有系统误差和随机误差，此外还有粗大误差等。

1. 系统误差

系统误差（简称系差）是指在一定条件下误差的数值保持恒定，或按某种确切的函数规律变化的误差。前者又称为恒定系差而后者叫做变值系差。变值系差又有累进性、周期性、按复杂函数关系变化的等等。

系统误差表明了一个测量结果偏离真实值或实际值的程度。在误差理论中，还常常把系统误差的倒数称为准确度，即系统误差越大准确度就越低，系统误差越小准确度越高。

2. 随机误差

随机误差，是一种具有随机变量一切特性，在一定条件下服从统计规律的误差。

由于随机误差服从统计规律，因此必须多次测量，取得

大量数据，按统计方法，处理测量结果才有实际意义。

随机误差表现了测量结果的分散性，所以在误差理论中，常用精密度来表征随机误差的大小，随机误差越大精密度越低，随机误差越小，精密度越高。

3. 粗大误差(又称粗差或差错)

粗大误差是指在一定条件下测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差。严格来说，粗差并不是单独的类别，它本身既可能有系统误差的性质，又可能有随机误差的性质，只不过在一定条件下其绝对值特别大而已。

粗大误差产生的原因多半是测量方法不当、偶然因素的影响及测试人员的粗心大意等。

§ 1-2 随机误差基本理论 及分析方法

1-2-1 误差的实验估计与频率直方图

当进行一个实验时，自然不能对某个量仅做一次测量，而必须经过多次重复测量，这种多次测量，由于受到多种因素的影响，一般不会得到相同的数值。根据多次测量之间的变化，就能估计这个实验的精度，这就是所谓的实验估计。

为了得到这个实验估计，必须研究各次测量读数之间是如何发生变化的。

在排除系统误差的影响(以下讨论在非指明的情况下，均做此假定)及等精度条件下对某一物理量测量 n 次，得 x_1 、 x_2 、 $\cdots x_i$ 、 $\cdots x_n$ 。把全部 x_i 按大小顺序分成 q 组，令每组

内 x_i 出现的次数分别为 $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_g$, 相应的频率为 $p_1^*, p_2^*, \dots, p_i^*, \dots, p_g^*$ ($p_i^* = m_i/n$)。

以 x 为横坐标, 以 $p^*/\Delta x$ 为纵坐标作图, 就是所谓随机变量 x 的频率直方图。参看图 1—1。

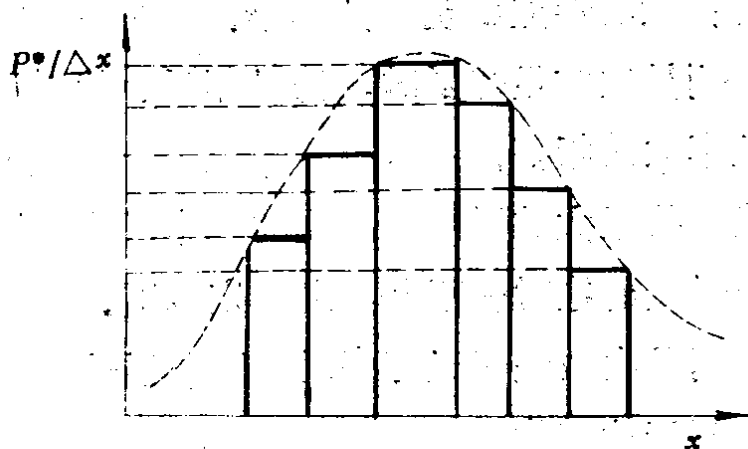


图 1—1 频率直方图 (1)

由图可见, 所有直方块的顶点大都位于虚线所示的曲线之下。

当增加组数即区间 Δx 越来越窄, 且测量次数 n 足够多时, 图 1—2 中的各顶点将越于一条光滑的曲线, 如图 1—2

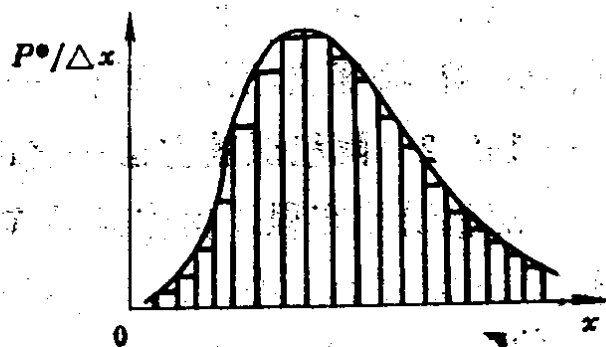


图 1—2 频率直方图 (2)

所示。此时纵坐标将依概率趋于其概率密度, 即 $p^*/\Delta x \rightarrow p(x)$ 。

图 1—1 及图 1—2 代表随机变量 x 的分布曲线, 但由于假定了无系统误差存在, 而随机误差

$$\xi = x - M. \quad (1-2-1)$$

故图 1—1、图 1—2 也代表随机误差 ξ 的分布曲线。

上述随机误差的直方图，是一种被大量实践证明了的具有普遍意义的统计规律，在误差理论中，把这种规律总结为下述四条著名的公理。

(1) 在一系列等精度测量中，绝对值小的误差出现的几率大，绝对值大的误差出现的几率小。

(2) 当测量次数足够多时，符号相反、绝对值相等的误差出现的几率大致相等。

(3) 绝对值很大的误差，出现的几率极小。因而在有限次测量中，误差的绝对值不会超出一定范围。

(4) 当测量次数趋于无穷多时，随机误差平均值的极限将趋于零。其表达式为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i \right) = 0 \quad (1-2-2)$$

利用频率直方图可以直观地看出误差的分布情况，但缺点是粗糙、精度差，所以必须进一步探索一套数学表达方法。

1-2-2 随机误差方程——正态分布

随机误差方程，也称高斯方程。下面简要介绍其推导过程。

设在等精度条件下对被测量 x 进行 n 次测量，得 $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ ，相应的真误差为 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n$ ，于是：

在 $(\xi_1, \xi_1 + d\xi)$ 区间，误差出现的概率为 $P_1 = p(\xi_1) d\xi$ ，

在 $(\xi_2, \xi_2 + d\xi)$ 区间，误差出现的概率为 $P_2 = p(\xi_2) d\xi$ ，