

电子计量考核教材

电子元件阻抗参量

中国计量科学研究院无线电处

国防科工委第二计量测试研究中心 合编

电子工业部计量测试研究中心站



中国计量出版社

内 容 提 要

本教材是为适应电子元件计量测试人员业务培训需要组织编写的。主要内容包场：电子元件计量基础知识，低频阻抗计量和测量方法，高频集总参数阻抗计量和测量方法，电子元件阻抗参数主要标准件介绍和量值传递及校准方法等，电子元件测量仪器检定规程介绍和电子元件测量仪器主要应用也占一定篇幅。为了便于计量检定人员考核复习，本教材最后一章为复习思考题及解答。

本教材可供各级计量人员培训之用，也可供大专院校有关专业师生参考。对于从事电子计量仪器生产、使用人员，本教材也是一本有用的参考书。

电子计量考核教材

电子元件阻抗参量

中国计量科学研究院无线电处

国防科工委第二计量测试研究中心 合编

电子工业部计量测试研究中心站

—♦—

中国计量出版社出版

(北京中宣部11527号)

中国计量出版社印刷厂印刷

—♦—

开本 787×1092/32

印张 9 字数 202 千字

1987年4月第1版

1987年4月第1次印刷

印数1—5 000

定价 2.20元

统一书号 15210·734

《内部发行》

电子计量考核教材编委会

郭群芳 贾树清 常新华

王洪汤 席德熊 赵 基

吴 所 张关汉

本书执笔人

张关汉 (第一、四、五章)

阮永顺 (第二、三章)

前 言

为贯彻落实计量法,提高电子计量测试专业队伍的素质,根据全国计量检定人员考核委员会的规定,要在全国范围内对从事电子计量测试的人员进行培训和考核。培训需要统一的教材,考核需要统一的出题范围。为适应这一迫切需要,全国计量检定人员考核委员会无线电、时间频率、电子元器件分委员会决定组编一套电子计量测试考核教材。这一决定得到了全国计量检定人员考核委员会办公室的认可和国防科工委标准计量局的大力支持,也得到了中国计量科学院无线电处、国防科工委第二计量测试研究中心,航天部二院 203 研究所,电子工业部计量测试研究中心等单位的有关专家积极响应,并投入了这套教材的编写、审校工作。

这套教材计划按器件和参量分册出版,其中电子器件包括电子元件阻抗参量、半导体分立器件和集成电路;无线电基本参量包括时间频率、电压、功率、衰减、相位、微波阻抗、噪声、场强、脉冲、失真度、调制度、信号源、超低频等。

根据这套教材的编写目的,编写着重阐述:有关参量计量测试的主要概念、定义和名词术语;各级标准以直接检定计量器具的工作标准为主;各种测量技术和方法;计量测试中应注意的问题。每一分册都附有大量的思考题,回答这些思考题的基础知识均能在书中找到。有关参量的检定系统表及其说明,本应作为其重要内容,但由于这些检定系统表均在修订过程中,此次均未编入。

本书编委会对书稿的编写、审稿进行了认真的工作,执

笔者也作了很大努力，但因时间仓促，书中疏漏和错误之处在所难免，希望读者批评指正。

中国计量科学研究院无线电处
国防科工委第二计量测试研究中心
电子工业部计量测试研究中心站

1986年11月

目 录

第一章 元件参数测量和计量的基础知识	(1)
§ 1.1 国际单位制基本知识	(1)
一、计量单位制	(1)
二、基本国际单位制定义	(1)
三、国际单位制主要单位表	(4)
§ 1.2 测量误差的一般概念和运算	(4)
一、基本术语	(4)
二、不确定度的评定	(4)
三、A类与B类不确定度的合成	(5)
四、总不确定度的给出	(6)
五、微小误差准则	(6)
六、关于不稳定性引起的误差	(7)
§ 1.3 元件阻抗标准量具的技术特性	(8)
§ 1.4 关于检定条件的讨论	(14)
§ 1.5 检定结果的数据处理	(18)
第二章 交流阻抗的定义及基本测量方法	(21)
§ 2.1 交流阻抗的定义及连接头	(21)
一、无屏蔽的两端阻抗的定义	(23)
二、两电极阻抗的定义	(24)
三、三电极导纳的定义	(26)
四、两端口导纳的定义	(31)
五、五端口阻抗的定义	(34)
六、四端口阻抗的定义	(35)
七、连接头及转换夹具	(36)
§ 2.2 电抗测量及各种型式的交流电桥	(39)

一、测量小电容的交流电桥	(39)
二、测量中值电容的交流电桥	(46)
三、测量大电容的交流电桥	(51)
四、测量空芯电感器的交流电桥	(54)
五、测量铁芯电感器的交流电桥	(57)
§ 2.3 电阻测量及各种电桥线路	(60)
一、中值电阻测量	(62)
二、低值电阻的测量	(63)
三、高值电阻及绝缘电阻测量	(66)
§ 2.4 低频数字阻抗仪	(68)
一、宽频数字阻抗仪	(68)
二、低频数字LCR计	(74)
第三章 低频阻抗量值传递及标准器	(77)
§ 3.1 交流阻抗量值传递系统	(81)
一、电阻国家基准器与标准传递系统	(81)
二、电容国家基准及电容值传递系统(低频部分)	(83)
三、标准电感检定系统	(85)
§ 3.2 低频交流标准阻抗器	(86)
一、实验室用的交流电阻器	(86)
二、标准电容器	(92)
三、标准电感器(低频)	(103)
四、组合元件标准器	(109)
§ 3.3 低频交流阻抗检定规程介绍	(110)
一、名词术语的定义	(111)
二、技术要求	(113)
三、检定方法	(115)
四、数据处理及结果评价	(118)
第四章 高频阻抗的基本测量方法	(120)
§ 4.1 定义、术语、等效电路	(120)
一、元件高频参数有关定义、术语	(120)

二、测量类别和等效串、并联电路	(124)
三、等效串、并联电路的互换	(128)
§ 4.2 高频阻抗测量方法概述	(130)
§ 4.3 指零法高频阻抗测量	(132)
一、变量器电桥	(132)
二、双 T 导纳桥	(134)
三、高频指零阻抗仪器的优缺点	(136)
§ 4.4 谐振法高频阻抗测量	(138)
一、概述	(138)
二、Q 表法高频阻抗测量	(140)
三、谐振同轴线	(155)
四、谐振式高频电感电容测量仪	(163)
五、数字式自动 Q 表	(165)
六、高 Q 元件测量装置	(168)
§ 4.5 矢量阻抗法测量及仪器	(178)
一、矢量阻抗表	(179)
二、自动阻抗桥 (LCR 表)	(181)
三、高频阻抗分析仪	(192)
四、矢量分析仪	(221)
§ 4.6 高频阻抗测量特例——介质材料复介电系数的测量	(223)
一、基本定义及测量意义	(223)
二、哈森-瓦特电极系统	(224)
三、电导模拟损耗件——不确定度的旁证	(227)
第五章 高频阻抗标准及检定	(230)
§ 5.1 高频阻抗量值检定系统	(230)
§ 5.2 高频阻抗标准的定标方法	(233)
§ 5.3 高频阻抗标准件及应用	(236)
一、高频 Q 值标准及应用	(236)
二、 $0\ \Omega$ 、 $0\ S$ 、 $50\ \Omega$ 标准件及应用	(244)
三、四端对标准空气电容器	(247)

四、四端对校准用R-L标准	(248)
五、同轴标准电容器	(251)
六、1 MHz香蕉插头电容标准	(251)
七、1 MHz香蕉插头电感标准	(252)
§ 5.4 标准空气电容器的残量分析及测试	(252)
一、空气可变电容器残量分析	(253)
二、通过可变电容器本身总等效电导的变化确定残量	(254)
三、在校高频率下直接测量空气电容器的残感和残阻	(256)
四、利用高频Q表直接测量空气可变电容器的残量	(259)
第六章 复习思考题及解答	(262)

第一章 元件参数测量和计量的基础知识^{〔1〕〔2〕}

§ 1.1 国际单位制基本知识

一、计 量 单 位 制

计量单位制亦称计量制度，它是计量工作的基础，也是一个国家法制的重要内容。

为了在全世界统一计量单位制，消除多种单位制并用的现象，于1960年第十一届国际计量大会上通过正式建立国际单位制的决议，并决定其国际符号为SI。国际单位制是在应用米制越来越广泛的基础上进一步发展起来的，它明确和澄清了很多量与单位的概念，它的单位是根据物理规律严格而明确定义的，同时废弃了一些不科学的习惯概念和用法。

二、基本国际单位制定义

(1) 长度单位——米(m)

光在真空中在 $1/299\,792\,458$ 内行进的距离。(这是1983年国际计量大会通过的新定义，废止了原先利用氪-86原子辐射波长所定义的米长度)。

(2) 质量单位——千克(kg)

千克是质量单位，等于国际千克原器的质量。

(3) 时间单位——秒(s)

秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。

(4) 电流单位——安培 (A)

安培是一恒定电流,若保持在处于真空中相距 1 m 的两无限长,而圆截面可忽略的平行直导线内,则在此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} N。

(5) 热力学温度单位——开尔文 (K)

热力学温度单位开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

表1-1 常用 SI 单位

分 类	量	单位名称	符 号
SI 基本单位	长 度	米	m
	质 量	千克,公斤	kg
	时 间	秒	s
	电 流	安(培)	A
	热力学温度	开(尔文)	K
	物质的量	摩(尔)	mol
	发光强度	坎(德拉)	cd
SI 辅助单位	平 面 角	弧 度	rad
	立 体 角	球 面 角	sr
SI 导出单位	频 率	赫(兹)	Hz
	压强(压力)	帕(斯卡)	Pa
	能,功,热量	焦(耳)	J
	功率,辐(射)通量	瓦(特)	W
	电位,电压	伏(特)	V
	电容	法(拉)	F
	电阻	欧(姆)	Ω
	电导	西(门子)	S
	电感	亨(利)	H
	电容率(介电常数)	法(拉)每米	F/m
	磁 导 率	亨(利)每米	H/m

(6) 发光强度单位——坎德拉 (cd)

坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/683 \text{ W/sr}$ 。

(7) 物质的量单位——摩尔 (mol)

a. 摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012 kg 碳-12的原子数目相等。

b. 在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合。

表1-2 SI 词头

因 数	词 头 名 称		符 号
	原文(法文)	中 文	
10^{18}	exa	艾	E
10^{15}	peta	拍	P
10^{12}	téra	太	T
10^9	giga	吉	G
10^6	méga	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	déca	十	da
10^{-1}	déci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳	n
10^{-12}	pico	皮	p
10^{-15}	femto	飞	f
10^{-18}	atto	阿	a

三、国际单位制主要单位表

国际单位制包括 SI 单位、SI 词头和 SI 单位的十进倍数与分数单位三部分，与本书内容有关的常用单位名称和符号见表 1-1。SI 词头见表 1-2。

§ 1.2 测量误差的一般概念和运算

一、基本术语

(1) 真值 (true value)

表征在研究某量的条件下严格确定的量值。

(2) 测量的不确定度 (uncertainty of measurement)

表征着量值的范围的一个评定，而被测量的真值位于其中。不确定度分为：

A 类：统计不确定度；

B 类：非统计不确定度。

(3) 合成不确定度 (combined uncertainty)

测量结果一般包含几个不确定度分量，按方差合成法将它们合成的结果称合成不确定度。

(4) 总不确定度 (overall uncertainty)

将合成不确定度乘以一个因子所得的乘积。

(5) 误差 (error)

测量结果减被测量的真值。它可分为偶然误差与系统误差。

二、不确定度的评定

A 类不确定度用统计法评定，并用标准差 S 表征。 S 的计算方法有多种。最常用的为贝塞尔法。

设对某量作多次等精度独立测量，测得结果为： $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

则： 平均值 $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$

残差 $v = x_i - \bar{x}$

单次测量的均方根差（标准差）为：

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1-1)$$

该公式称为贝塞尔公式。

B类不确定度可用估计方法确定其表征值 U_j （近似标准差）。

若估计真值 a 以概率 P 落在测量结果 $X \pm b$ 的范围内，则根据 P 的大小可由 b 算出 U_j ，而 U_j 之值见表 1-3。

表1-3 根据概率和误差区间求表征值 U_j

$P(\%)$	50	68	90	95	99	99.7
U_j	$1.6b$	b	$\frac{b}{1.6}$	$\frac{b}{2}$	$\frac{b}{2.6}$	$\frac{b}{3}$

当取用测量平均值作测量结果时，其不确定度用平均值的标准差表示。

当测量结果独立变化时（独立的偶然误差情况），平均值的不确定度表示为：

$$S_{\bar{x}_i} = \frac{1}{\sqrt{n}} S_i \quad (1-2)$$

或

$$U_{\bar{x}_i} = \frac{1}{\sqrt{n}} U_j \quad (1-3)$$

三、A类与B类不确定度的合成

若测量结果包含A类与B类不确定度分量，它们的表

征值为:

$$S_1, S_2, \dots$$

$$u_1, u_2, \dots$$

合成不确定度为:

$$\sigma = \sqrt{\sum S_i^2 + \sum U_j^2} \quad (1-4)$$

这里假定任意两不确定度分量间独立无关。

如果任意两分量相关或对分量掌握不够, 需可靠时, 合成不确定度可认为:

$$\sigma = \sum S_i + \sum U_j \quad (1-5)$$

关于无关不确定度分量的寻找, 可以这样来考虑: 当分析不确定度来源时, 由不同原因引起的不确定度分量无关; 由同一原因引起的不确定度分量相关, 为避免相关系数的计算 (以便应用公式 1-4), 它们可用代数相加法预先并成一项。

四、总不确定度的给出

总不确定度可以用极限误差表征:

$$v = K\sigma \quad (1-6)$$

其中: K 为置信因子, σ 为合成不确定度。给出 v 时 K 值必须注明。

在一般情况下, 取 $K = 2 \sim 2.5$, 有时取 $K = 3$ (此时置信概率接近 0.9973)。

五、微小误差准则

为了简化误差的合成和计算, 如果某一测量的误差比其它测量的误差小三倍以上, 则该测量误差可以当作微小误差予以忽略。

设有几项误差, 其综合误差用平方相加:

$$\Delta = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2)^{1/2}$$

若当没有 Δ_1 时仍有 $\Delta \approx \Delta' = \left(\sum_1^n \Delta_i^2 \right)^{1/2}$ ，则计为 Δ_1 是微小误差而可以忽略。当 Δ_1 小于 $1/3\Delta$ 时，该忽略是允许的。这里 Δ' 不包括 Δ_1 项。

这是因为：误差是个估计数，没有必要对它作二位数以上的估计，于是，当用 Δ' 代替 Δ 而有二位有效数字时， Δ' 的相对误差至多不会超过5%，即：

$$\frac{\Delta - \Delta'}{\Delta} \leq 0.05$$

$$0.95\Delta \leq \Delta' = \sqrt{\Delta^2 - \Delta_1^2}$$

所以

$$\Delta_1^2 \leq 0.1\Delta^2$$

$$\Delta_1 \leq 0.32\Delta < \frac{1}{3}\Delta$$

六、关于不稳定性引起的误差

上述讨论只涉及与时间无关的量的测量误差，这种量的特点是无论在测量过程中，还是在从得出测量结果到使用这结果的一段时间间隔内，该量的真值是不变的。然而，实际的各类物理量，总是会随时间而变化，是时间的函数；此外还是周围环境条件参数（影响量）的函数。因此，不仅在测量它那一小段时间内它的真值随测量的环境条件的变化而变化，而且，在测出其量值后经过一段时间，其真值也会发生变化，以至人们在后来使用这量值时已不是当初测量所得的量值了。如果这时仍沿用当初的测量结果，那么在原有的测量误差之外，还得加上被测量在这段时间过程中的变化量，即量值的不稳定性误差。

对于很不稳定的被测对象，把测量误差减少到比不稳定性误差小许多就意义不大了，比如对于许多标准阻抗件（标准电阻器、标准电容器、标准Q值线圈）它们的年稳定度均

比定度它们量值时所给出的总不确定度要小很多（年稳定度为0.01%时，定度误差为0.03%也够了）。

§ 1.3 元件阻抗量标准量具的

技术特性

阻抗标准量具是以具体的实物形态来体现测量值，反映测量仪器典型使用状态的一种特殊被测件。

标准量具的两个主要特性是标称值和总不确定度。

标称值通常是制造者为了使量具起一定的计量作用而把它所体现的量值标示在其外壳上的近似值。

总不确定度实际上是量具的极限固有误差，定义为在规定的检定条件下量具的标称值和量具的真值之值的差值。即

$$\Delta = Y_H - Y_0 \quad (1-7)$$

式中： Δ ——量具的总不确定度（也称量具极限固有误差，简称量具误差）；

Y_H ——量具标称值；

Y_0 ——量具真实值。

实际标准量具的技术特性规定视不同的量具而异，表1-4列出美国 GR 公司几种标准电容器的典型技术指标，我们将讨论这些技术指标含义和相互关系。

(1) 调整准确度和校准准确度

公式 (1-7) 表示的量具误差，考虑到真值 Y_0 是时间 t 的函数，可更普遍地表示成：

$$\Delta = Y_H - Y_0(t) \quad (1-8)$$

$t=0$ 时的量具误差为：

$$\Delta(0) = Y_H - Y_0(0) \quad (1-9)$$