

集总参数阻抗测量——计量指南

〔美〕 R.N.Jones 著

张关汉
席德熊 译
王世明

7
计 量 出 版 社

内 容 提 要

30千赫到300兆赫频段的二端阻抗测量要用到各种不同的方法,诸如指零法、谐振法、复数伏安比法和比较法。每一种方法都可以有若干种具有特定性能和优缺点的仪器作代表。本计量指南希望能对那些不太精通阻抗测量的科技人员有所帮助,使其能够针对特定需要,选择和应用最好的阻抗测量仪器。其内容包括测试范围、精度以及适用性和操作难易等。除了在选择合适的仪器方面提供帮助以外,本指南还给出了使仪器得以提高精度的一些操作要领,选择标准件的准则,扩展仪器正常测量范围的方法,也讨论了讯号源和指示器,并有专门一章叙述了连接头的使用和评价。最后,本指南还列举了广泛的参考书目,有助于读者对超越本书范围的特殊问题作深入的探索。

关键术语:接头、电容量、电容器、检测器、讯号源、阻抗仪器、阻抗标准、电感量、电感器、测量方法、电抗、电阻、标准。

本书可供计量测试人员、科技工作者、仪器设计人员以及大专院校有关的专业师生参考。

The Measurement of Lumped Parameter Impedance: a Metrology Guide

R. N. Jones

U.S. Government Printing Office Washington, 1974

集总参数阻抗测量——计量指南

[美] R. N. Jones 著

张关汉 席德熊 王世明 译

李 远 校

责任编辑 刘宝兰

*

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本850×1168 1/32 印张4 1/4

字数104千字 印数1—7000

1983年2月第一版 1983年2月第一次印刷

统一书号 15210·211

定价 0.67 元

科技新书目: 38—181

原 编 者 说 明

本书是 NBS（美国国家标准局）电磁处电磁计量情报中心推荐的计量指南丛书之一。这套丛书力图全面地比较各种电磁量的测量方法，其目的是在测量方法的选择、使用和评价等方面针对特殊应用提供指导。这套丛书是由测量专家在收集了大量文献的基础上编写的，可满足技术人员的需要（这些技术人员对本指南涉及的参量的测量未经专门训练）。因此，这套丛书对教师、设计工程师、合同验收监督人员、计量检定人员以及那些需要专门的测量技巧又没有时间和设备对其所包含的复杂性去作亲自研究的一般工程师和科学家是有用的。根据上述想法，每一种测量指南包括下列内容：

1. 测量技术所依据的物理原理的描述；
2. 通过对误差方程或典型量程及精度讨论指出每一种方法所能获得的精度；
3. 讨论每一种测量技术的优缺点，也包括对各个误差源或者特定操作系统的误差方程的讨论；
4. 讨论每一种技术的仪器要求（包括标准）；
5. 操作中的问题、建议或例子；
6. 列举广泛的参考书目，以利读者探讨超出本书范围的详尽测量方法。

计量指南丛书编者

W. J. Anson

目 录

1. 引言	(1)
1.1 用途	(1)
1.2 本指南的适用范围	(1)
1.3 限制精度的因素	(2)
1.4 怎样使用这本指南	(6)
1.5 阻抗测量仪器的更新	(6)
2. 测量类别和等效串联并联关系	(7)
3. 测量方法及其效能	(10)
3.1 指零法 (二端)	(10)
a. 指零法原理	(11)
b. 交流电桥的特性	(11)
c. 误差源	(13)
d. 优点和缺点	(14)
3.2 指零法 (三端)	(14)
a. 一般评述	(14)
b. 优点和缺点	(15)
3.3 谐振法	(15)
a. 一般评述	(15)
b. 串联谐振	(18)
c. 并联谐振	(20)
d. 用于确定残余阻抗的谐振法	(21)
e. 误差源	(23)
f. 谐振法的优缺点	(23)
3.4 复数伏安比法	(25)
a. 一般评述	(25)
b. 矢量阻抗表	(26)
c. L - C 表	(27)
d. 六端口耦合器	(27)

e. 误差源	(28)
f. 优点和缺点	(28)
3.5 比较器和差示测量	(31)
3.6 自动测量	(32)
3.7 其他方法	(33)
a. 时域反射计	(33)
b. 频域反射计	(33)
c. 扫频	(33)
d. 开槽测量线	(34)
e. 反射损耗电桥	(34)
4. 各种方法所用的仪器	(37)
4.1 指零法仪器	(37)
a. 麦克斯韦尔臂乘电桥	(37)
b. 西林电桥	(40)
c. 导纳比率电桥	(44)
d. 变压器比率电桥	(47)
e. 双 T 电桥	(51)
f. 休斯顿 (Thurston) 电桥	(55)
g. 约恩 (Young) 电桥	(58)
h. 波恩 (Byrne) 电桥	(61)
i. Q -电桥	(65)
4.2 谐振仪器	(68)
a. Q -表	(68)
b. 导抗传递比较仪	(71)
4.3 复数伏安比法阻抗测量仪器	(74)
a. 矢量阻抗表	(74)
b. L - C 表	(78)
c. 矢量电压表	(81)
d. 六端口耦合器	(82)
4.4 用作比较器的仪器	(84)
5. 测量要领和技术	(85)
6. 标准	(87)

6.1 一般评述	(87)
6.2 为什么阻抗校准是费钱的	(87)
6.3 如何降低校准费用——一个维护标准的建议	(89)
6.4 作为一个标准应具备哪些特点	(89)
6.5 同轴线	(90)
7. 量程扩展	(91)
7.1 串联接法	(91)
7.2 并联接法	(94)
8. 讯号源和检测器	(96)
8.1 相敏检波器	(98)
9. 转接器的应用和评价	(100)
9.1 转接器问题的提出	(100)
9.2 什么是转接器	(101)
9.3 通常采用的转接器的二端表示法	(102)
a. 均匀传输线	(102)
b. “ π ” 或 “ T ” 网络	(103)
c. “ L ” 网络	(103)
d. 单个元件表示法	(104)
9.4 非精密连接头和转接器的开路导纳、电长度的测量和短 路点的确定	(105)
附录 定义、单位和符号	(112)
参考书目	(116)
插图一览表	(125)
表格一览表	(128)

1. 引 言

1.1 用途

在编写本计量指南时，我们假定它的读者已相当熟悉电气测量，但不很精通阻抗测量方法、技术和仪器设备；设想读者已知道这里必须进行阻抗测量，但不知道实现这种测量应采用的最好方法是什么。本书的重点是讨论第3章中概括的各种阻抗测量方法及第4章中叙述的实现这些测量方法的各类专门仪器。其他章节则是对3、4章内容的补充，即有关测量要领、标准资料、量程扩展技术、讯号源和指示器、转换接头的使用及评价等等。

1.2 本指南的适用范围

对于阻抗测量，这本指南不是包罗万象的，读者一开始就应该明白在这本指南里能找到什么和不能找到什么。为了帮助读者了解本指南所包含素材的大致范围，我们假定一个具有下列特性和能力的理想阻抗测量仪器：

- (1) 频率范围不受限制；
- (2) 阻抗范围不受限制；
- (3) 偏压、环境、所加电源等不受限制；
- (4) 没有误差；
- (5) 实现瞬时测量；
- (6) 价格低到零；
- (7) 维护费用低到零。

很明显，这样的仪器是不存在的，否则根本就不需要这本计量指南了。所有仪器或方法都存在这样那样的优缺点，与上述理想条件的要求有一定距离。这本指南是力图提供有用的资料，利用这些资料可方便地决定采用最合适的方法和仪器以满足特殊的

要求。本指南提供的资料使评价测量方法和仪器成为可能，这就使得使用者能够决定采用正确的方法和最好的仪器。作任何这样的决定，分清上述理想条件中的主次是很重要的，诸如权衡测量速度和精度的关系，精度与成本的关系，频率范围与被测参量范围的关系，等等。

本书不包括阻抗测量的全部。频率范围下限将限制在 30kHz，而上限则限制在 300MHz。当然，有些讨论也超出这个频带以外。300MHz 以上则由另一本丛书专题讨论。

30kHz—300MHz 这个频段的阻抗测量有它的独特问题和特点，作为能量传输方法来说，它是从开路线向同轴线过渡的领域，这就产生了需要采用不同型号的转换头并互相转接所造成的不定性和困难性。另外，在这个频率范围里 $1/4$ 波长开始接近实验元件的物理尺寸，因此使用集总电路和分布电路两种理论就成为实际的和必要的了。

为了压缩内容，本书将限于讨论二端无源测量及三端无源测量。这就是说不讨论负电阻（有源器件）测量和对称配置测量，虽然所讨论的方法和仪器有的能具有这种测量能力。本书也不涉及有偏压、高功率或周围环境极端情况下的阻抗测量。

在3、4章中列举了特定测量方法和仪器的优缺点。这些优缺点是与理想仪器比较而言的，并非赞成或反对某些特定的方法和仪器的采用。

应指出，本指南中还可能未收集某些实际存在的方法和仪器，这是因为这些方法和仪器在文献资料调研中未曾见到或者未必有推广使用的价值。另外，也应注意到上述的方法和仪器是存在很多变种的。然而，我们希望主要成果不致遗漏。

1.3 限制精度的因素

当存在两种或多种方法和仪器来实现某种特定的测量时，人们往往首先选择精度较高的那一种方法和仪器。然而按照产品说明书提供的百分比误差很快地作出正确判断往往是不容易的。说

说明书固然有用，但不是整个事情的全貌。在作出选择以前必须回答下列问题：

(1) 仪器用什么数学形式给出测量数据？

有些仪器读出的是以极坐标形式表示的阻抗幅值和相角 (Z/θ)，有的是复数形式给出等效串联阻抗 ($R \pm jX$) 或等效并联导纳 ($G \pm jB$)。对于这些电抗元件还有些仪器或者给出电容或者给出电感。有时仪器又给出 Q 值或损耗因素。总之是多种多样的。为了比较各种仪器的精度，必须变换成共同的数学形式并细心考察对特定参数的百分比误差的意义。另外，为了实现严格的精度比较，还需要考虑到阻抗测量中幅值和相角变化范围是很宽的，仪器能够以什么水平测量复数阻抗量的最大最小分量也是全面比较其性能的一个重要方面。

(2) 仪器的分辨力怎样？

标尺或表头上能区分的最小刻度是非常重要的，尤其对小值的测量。有些产品还附加有游标尺以使数据多一位小数。

(3) 精度表达式中有关项的意义是什么？

特别对于电桥和指零仪器来说，精度表达式中往往包含频率和依赖于被测阻抗性质的项，例如，电阻值的精度有赖于未知阻抗的电感值有多大。“矢积”也常常是很重要的量，特别是测量很高 Q 或很低 Q 的小阻抗元件，对特定形式的测量它能大大地改变基本百分比精度。

(4) 仪器的未知端接头是什么类型或怎样连接被测件？

对接头的要求是极其重要的，必须在所有测量应用中认真考虑。有时即使一台特定的仪器按说可以提供最好的测量精度，如果转接头复杂化或者使用较长的导线，精度将受到严重的影响。这种现象将随着频率的增加及波长接近阻抗元件的实际尺寸而趋严重。

本指南的第3章和第4章中的许多图表展示出各种测量方法和仪器的效能。若这些图表能指明某种精度极限，又能清楚指明

何种方法和仪器是最精确的，这对用户将是很方便的。虽然这些图表预期表明每种测量方法和相应的仪器测量电阻、电感、电导和电容的能力，但个别情况下表明的精确度是无法作为所有情况下精确度的恰当评价的。实际上，这些图表以简短的说明给出了有代表性的百分比不确定度，但是如上所述，这些图表并不能说明个别情况下的全部问题，因此，未经反复试验是不能盲目采纳的。

为了提供一些有关测量不确定度的概念，体现当前最高测量水平的 0.1% 不确定度限也在上述图表中表示出来了。但这并不意味着特殊仪器和方法一定具有 0.1% 测量能力。

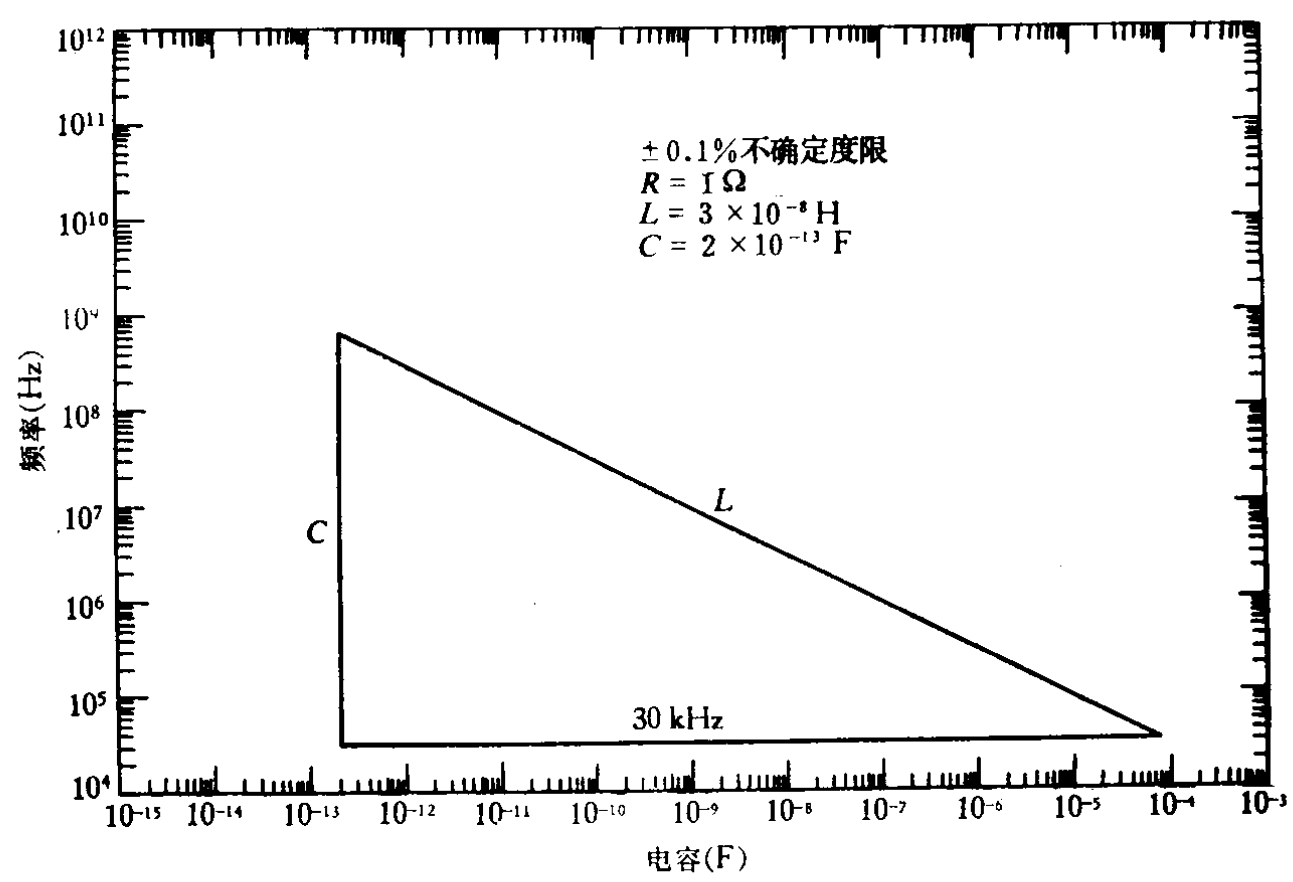


图1-1 二端电容测量的±0.1%不确定度限

图表中所用的 0.1% 不确定度限是根据商用标准的机械制造公差假定能保证为±0.001英寸导出的。由此假定可知： 3×10^{-8} 亨利， 2×10^{-13} 法拉，1 欧姆是能以 0.1% 不确定度测量的二端电感、

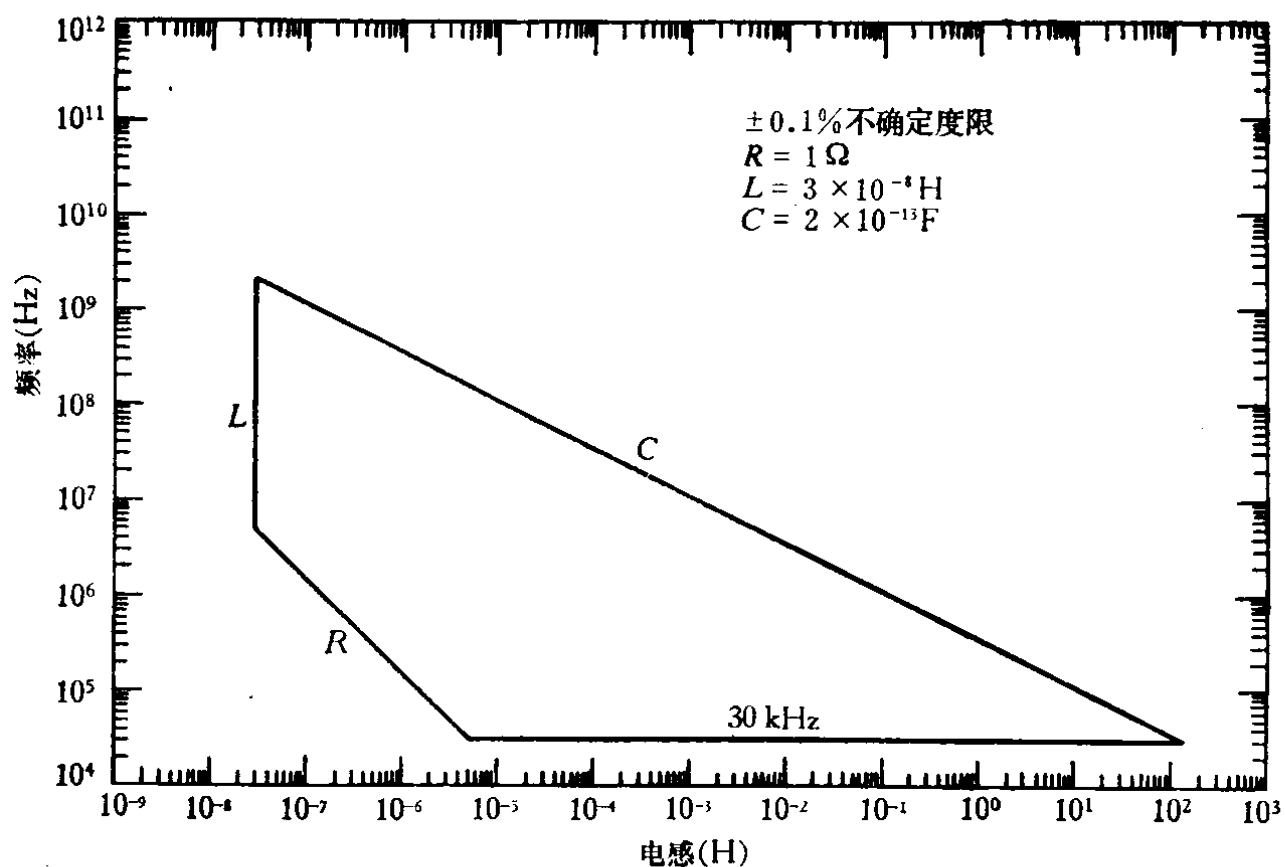


图1-2 二端电感测量的 $\pm 0.1\%$ 不确定度限

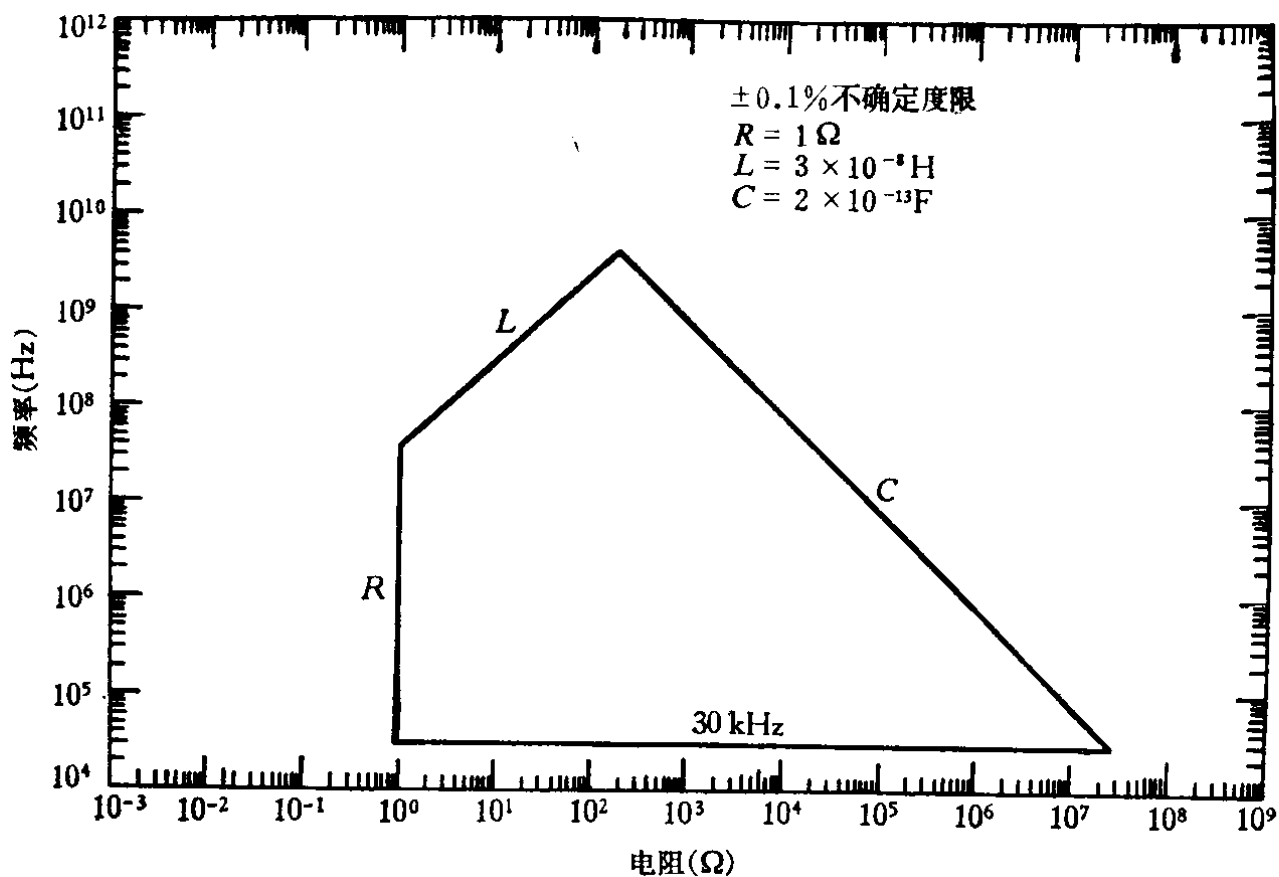


图1-3 二端电阻测量的 $\pm 0.1\%$ 不确定度限

电容和电阻的最小值。图 1-1, 1-2和1-3 表示了这些不确定度限是如何用到这些量值的测量上的, 其频率范围为 30kHz 到 300MHz。

1.4 怎样使用这本指南

这本指南的主要目的是帮助需要作特定阻抗测量的用户确定合适的方法和仪器, 在第 2、3、4 章中, 有关内容将提供这方面的帮助。在第 2 章中对实际测量进行了分类, 并提供了讨论各类方法和仪器的页码。第 3 章中讨论了各种特定方法的理论, 优点、缺点和测量各种阻抗参量的能力; 还以图表方式给出每种方法的测试性能, 这些比较图表都是一目了然的, 使用极其方便。第 4 章一开始就给出了一张概括本章所有阻抗测量仪器的性能表; 然后就是每一种仪器的详细讨论, 包括电路、方程、精度特性、优点、缺点等等。

其他章节给出了测量接头、参考建议、选择标准的原则、量程扩展技术等, 以帮助用户更好地使用仪器。讨论了讯号源和指示器, 对转接头的使用和评价也给出了一些新的资料。

1.5 阻抗测量仪器的更新

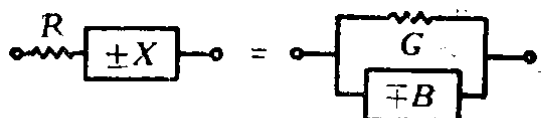
与其他领域一样, 阻抗测量也是不断发展变化的。本指南中所包括的许多方法和仪器, 读者会惊奇地发现都是过去十年中已经发展和应用了的。当然, 这也是事实, 这些方法和仪器中有许多已被现代设备所取代了。然而, 老产品并不意味着不好或没有用, 何况在成批产品目录中, 它们还出现不久。在某些情况下, 已能找到更新式的、更快速的、更先进的仪器, 但在精度、稳定性、可靠性方面未超过老产品, 因此, 保留老产品一段时间的做法是合理的。

新一代的设备强调测量速度、宽的频率范围和自动数据处理能力, 并且能容易地和计算机连接。在很宽的频率范围里能测量多种电气参数的多功能测量系统目前已不是罕见的了。在 3.6 和 3.7 节中首先强调的是设备和测量方法, 测量方法问题是新一代测量的特点。

2. 测量类别和等效串联并联关系

任何一个器件的集总阻抗都可以用电路元件的串联组合或并联结合来表示，具体要看那一种形式更方便。然而，也常常应用下列关系实现一种形式向另一种形式的变换：

串联等效为并联：

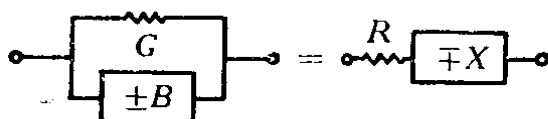


$$Z = R \pm jX \quad Y = \frac{1}{R \pm jX} = G \mp jB$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

$$B = \mp \frac{X}{R^2 + X^2}$$

并联等效为串联：



$$Y = G \pm jB \quad Z = \frac{1}{G \pm jB} = R \mp jX$$

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}$$

$$X = \mp \frac{B}{G^2 + B^2}$$

作为3、4章中所绘的各种方法和仪器的测量性能图表的补充，

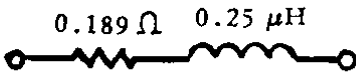
我们对各种阻抗类别进行分类，并给出一些实际例子是有用的，这些实际例子对同相或正交元件的串并联组合是有代表性的。

通过改变参量 R 、 X 、 G 和 B 的符号和量值的大小，可以获得所有可能的阻抗和导纳值，但是本指南仅限于讨论无源量，所以不包括负阻 ($-R$) 和负电导 ($-G$)。

串 联		等效为并联		实 际 例 子	页 码	类 别
$ R $	$ X $	$ G $	$ B $			
小	小(+)	大	大(-)	短路或小电阻小电感		A
大	大(-)	小	小(+)	开路或小电容大电阻		B
大	小(+)	小	小(-)	电阻器 (高值, 感性, 低 Q)		C
大	小(-)	小	小(+)	电阻器 (高值, 容性, 低 Q)		D
小	大(+)	小	大(-)	电感器 (高 Q)		E
小	大(-)	小	大(+)	电容器 (高 Q)		F
大	大(+)	大	大(-)	电感器 (低 Q)		G
大	大(-)	大	大(+)	电容器 (低 Q)		H
Z/θ		Y/θ				I

I 类是极坐标形式表示的阻抗和导纳，它可用来表示那些利用分布参数方法，但工作在集总参量范围里的仪器的性能。

串并联关系的一种典型和有用的例子是高 Q 电感器的串联数值变换为它的并联数值。假定 $0.25\mu\text{H}$ 的电感器 Q 值为 250，频率 30MHz 时有：



$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad \text{这里 } \omega = 2\pi f$$
$$\therefore R = \frac{2 \times 3.14 \times 30 \times 10^6 \times 0.25 \times 10^{-6}}{250}$$
$$R = 0.188 \Omega$$

变换为等效并联值:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

$$B = -\frac{X}{R^2 + X^2}$$

$$G = \frac{0.188}{(0.188)^2 + (47.1)^2}$$

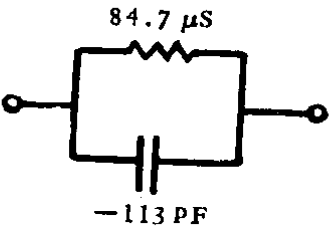
$$B = -\frac{47.1}{2220}$$

$$G = 84.9\mu S$$

$$B = -21.2mS$$

$$C = \frac{B}{\omega} = -\frac{21.2 \times 10^{-3}}{1.88 \times 10^8} = -113pF$$

因此, 30MHz时, 该电感器将等效为如图的并联电路:



在使用导纳电桥按照等效并联数值来测量这个电感器时, 常常希望作此转换。

由所举的这个例子可以看出, 如果需要测量阻抗, 它将归类于E和I。参照第3章所述, 该阻抗既可以用指零谐振法测量, 也可用复数伏安比法测量。我们可在第4章中找到下列可能采用的仪器:

指 零 法	谐 振 法	复数伏安比法
麦克斯韦尔电桥	Q 表	L-C 表
西林电桥	导抗传递比较器	矢量阻抗表
变压器比例臂桥		矢量电压表
双 T 电 桥		六 端 口 耦 合 器
Q 桥		

3. 测量方法及其效能

引言

本章将评价各种测量方法的原理和特点。所考虑的方法包括指零法、谐振法、复数伏安比法和比较法。从两个方面可以帮助读者在特定情况下选择合适的测量方法。首先在对每种方法作一叙述后，都根据第1章所述的理想仪器的判别准则列出其明显的优点和缺点；其次以图表形式一目了然地提供特定频率下能够测量的各种阻抗参量的范围；而且尽管在第4章里还要更详细地介绍它们，在这些图表里还是表明了特殊仪器的性能。这些都有助于在给定方法内选择测量方式。

对于一种特定的测量需要来说，如果存在多种可供使用的方法，就必须考虑诸如精度、费用、速度或操作难易等其他因素。另一方面，如果只有一种可行的办法，则选择过程将极其简单。第4章的内容对详细比较特殊仪器是很有用的，它将权衡各种方法的价值。

比较器方法是与测量概念不同的一种特殊测量法。它意味着用指零法、谐振法和动态法来进行阻抗比较。事实上，任何指零仪器、谐振仪器或复数伏安比仪器都可以用作比较器，在比较过程中应提供一个可行的标准。从这一点来看，它比一般的测量方法还多一个程序，然而对许多应用来说，它的重要性不可忽视。在比较法的讨论中，我们没有绘制性能图表，尽管有些仪器特别指明是用作比较器的。

3.1 指零法（二端）

测量类别：全部

a. 指零法原理

虽然存在一些很明显是例外的情况，指零仪大多采用惠斯顿电桥电路形式。在桥路的某部分跨接上电压，而在桥路的其他部分跨接指零仪器，调节电桥内的标准臂一直到指示器获得零指示。在零指示或平衡状态时，位于电路未知端的器件和电路其他元件之间存在确定的关系。为了图示这个原理，考虑图 3-1 的简单惠斯顿电路。

图中有电阻 R_x 连接在未知端。通过调整另外三个电阻能使检流计 G 指示为零，因此，桥路的 B 和 C 角为等电位。此时有：

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

及
$$I_1 R_3 = I_2 R_x$$

二个方程相除得：

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_x}$$

或
$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3 \quad (3-1)$$

对于交流测量来说，电路中的电阻可用阻抗或导纳代替，电池组换成讯号源，交流检波器代替检测计，这样，电桥方程变为：

$$Z_x = \frac{Z_2}{Z_1} Z_3 \quad (3-2)$$

这就是惠斯顿电桥方程的交流形式。

b. 交流电桥的特性

考虑了电桥的特性和性能，上述交流电桥方程及其含义存在几个方面有意义的观察结论：

(1) 在实际设计中 Z_1/Z_2 通常做成 10 的倍数， Z_3 是一个可变的标 准臂。按这种方式设计的电桥叫做比例臂电桥，此种电桥

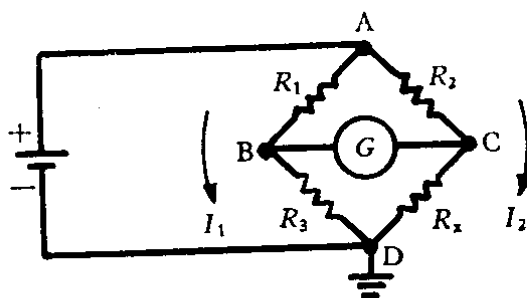


图3-1