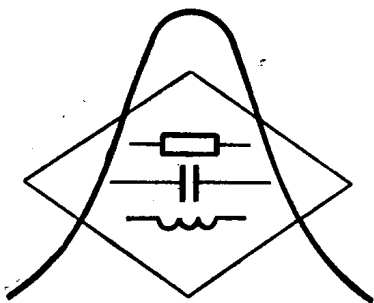


无线电计量测试丛书

10

高频集总参数阻抗 的计量测试

张关汉 李光仪 周冠平 编著



计 量 出 版 社

高频集总参数阻抗 的计量测试

张关汉 李光仪 周冠平 编著

计量出版社

1986·北京

内 容 提 要

本书是无线电计量测试丛书之一,是为适应目前电子基础元器件(如电阻器、电容器、电感器及其它无源器件)亟待给出高频应用性能参数这一需要而编写的。本分册专门讨论 30 kHz—1000 MHz 集总参数计量和测试问题。全书分五章,第一章主要介绍基本概念和高频阻抗量值的溯源性、连接头及转换等基础知识;第二章概括性地介绍高频阻抗的主要测量方法及优缺点;第三、四章详细叙述高频阻抗传统测量方法(零示法和谐振法)及仪器;第五章评述微处理器广泛应用而发展起来的复数伏安比法高频阻抗测量仪器和应用特点。

本书可供无线电计量、测试专业人员,电子仪器设计、生产人员和有关专业的大专师生参考。

无线电计量测试丛书 10

高频集总参数阻抗的计量测试

张关汉 李光仪 周冠平 编著

责任编辑 刘宝兰

—*—

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*—

开本 787×1092 1/32 印张 10

字数 232千字 印数 1—7 000

1986年3月第一版 1986年3月第一次印刷

统一书号 15210·499

定价 2.35 元

无线电计量测试丛书编委会

主 编： 汤世贤

副主编： 周清一 吴鸿适 张世箕 席德熊

编 委： （以姓氏笔划为序）

王义举 王立吉 戈锦初 古乐天

汤世贤 刘全宝 李世雄 吴鸿适

张世箕 张 伦 陈成仁 周清一

郭允晟 倪伟清 诸维明 夏虎林

席德熊 黄志洵

本分册责任编辑： 席德熊 郭允晟

出版前言

《无线电计量测试丛书》是根据计量出版社关于按学科分类组编计量测试丛书的总体设想，由本编委会邀请作者、组织编写和审订的。其目的是比较系统地传播无线电计量测试科学技术知识，促进电子学与无线电技术的发展，以适应科技进步和社会主义现代化建设的需要。

本丛书主要论述高频和微波电磁量的计量测试问题，一般不包括直流和低频的内容。丛书第一分册为“概论”，其余各分册分别阐述各主要参量及数据域的测试。“丛书”各分册既保持了相互联系，又是一本专题论著，具有独立性，因此将按成书的先后陆续出版。

本丛书的主要读者对象，是具有中等以上文化程度的无线电计量测试工作者、有关专业的科学技术人员、大专院校师生、计量管理干部，也可作为计量人员的培训用书。

无线电计量测试丛书编委会

序

本书是无线电计量测试丛书之一，专门讨论 30 kHz—1000 MHz 之间的集总参数阻抗计量和测试问题。全书分五章，第一章主要介绍基本概念和阻抗量值溯源性、连接头及转换等基础知识（张关汉编写）；第二章介绍高频阻抗的主要测量方法及优缺点（张关汉编写）；第三章详细叙述了零示法高频阻抗测量仪器和应用特点（李光仪和周冠平编写）；第四章介绍高频阻抗的谐振法测量仪器和应用特点（张关汉编写）；第五章评述复数伏安比（矢量阻抗）法高频阻抗测量仪器和应用特点（李光仪和张关汉编写）。

本书按普及和提高相结合的原则，力求系统地评述高频阻抗测量领域中经典的和现代的各种计量测试方法。也讨论常用商品阻抗测量仪器的理论、设计特点、应用、数据计算和处理、误差分析等。第一章至第四章所介绍的内容，属于传统高频阻抗计量和测试范畴。第五章内容则是属于70年代以后逐渐发展起来的，并有取代传统阻抗仪器之势的新型数字自动计量和测试仪器，我们希望对这些仪器的介绍，将会推动我国高频阻抗仪器的发展。

本书编写过程中，席德熊、郭允晟、黄志洵等同志提出了很多宝贵的意见，张世箕教授百忙中审阅了初稿。蔡业波和高怀同志分别承担了第四章第六节和第五章第二节的部分编写工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，本书错误缺点在所难免，恳请国内同行批评指正。

作 者

1984年10月

目 录

序

第一章 概述	(1)
第一节 定义、术语——集总参数阻抗基本概念	(1)
第二节 测量类别和等效串并联电路关系	(8)
一、电容器类	(8)
二、电感器类	(11)
三、电阻器类	(14)
四、等效串并联电路的互换	(16)
第三节 高频阻抗量值的溯源——量值传递系统	(18)
一、阻抗量值的导出及对标准件的要求	(18)
二、作为阻抗标准的精密同轴空气介质传输线	(20)
三、高频阻抗标准定标和传递用的双 T 导纳桥	(23)
第四节 高频阻抗测量中的接头及转换	(25)
一、阻抗测量中的接头影响	(26)
二、精密同轴连接头	(29)
三、接头转换及带测量夹具的高频阻抗测量	(33)
参考文献	(35)
第二章 测量方法及效能	(36)
第一节 零示法高频阻抗测量	(37)
一、概述	(37)
二、交流电桥特性	(38)
三、零示型仪器的优缺点	(45)
第二节 谐振法高频阻抗测量	(46)
一、概述	(46)
二、各种不同用途的谐振测量电路	(48)

三、谐振式阻抗测量仪器的优缺点	(54)
· 第三节 复数伏安比法高频阻抗测量	(55)
一、概述	(55)
二、复数伏安比阻抗测量法的基本型式	(57)
三、复数伏安比法阻抗测量的优缺点	(59)
第四节 高频矢量阻抗分析仪	(60)
一、概述	(60)
二、基本测量形式——反射系数测量	(61)
三、误差自动修正原理	(63)
第五节 高频集总参数阻抗的比较法测量 或差示法测量	(64)
第六节 其它阻抗测量技术	(65)
一、用时域反射测量技术测量阻抗	(65)
二、用扫频技术测量阻抗	(66)
第七节 自动阻抗测量技术	(67)
参考文献	(71)
第三章 零示法仪器	(73)
第一节 概述	(73)
第二节 几种基本的电桥型式	(76)
一、惠斯顿导纳电桥	(76)
二、麦克斯韦电桥	(84)
三、西林电桥	(96)
四、变量器电桥	(103)
五、双 T 网络型精密导纳电桥	(115)
第三节 测量技术	(128)
一、信号源和指示器的配接	(128)
二、测量操作技术	(130)
三、电桥的应用举例	(133)
第四节 电桥的维护和校准	(140)
一、电桥的维护	(140)

二、电桥标准量具及使用	(141)
三、电桥的校试	(159)
参考文献	(163)
第四章 谐振法仪器	(164)
第一节 高频 Q 表的原理和组成	(164)
一、 Q 值的定义	(164)
二、 Q 表原理	(166)
三、 Q 表的基本组成和调整	(168)
四、 Q 表的典型技术指标	(170)
五、高频 Q 表测试回路等效电路及残量影响	(173)
第二节 谐振测量电路主要部件的 残量确定方法	(178)
一、空气电容器残量的分析	(179)
二、在较高频率下直接测量空气电容器 的残感 L_c 和金属电阻 r_c	(182)
三、高频 Q 表测量法确定空气电容器的残量	(185)
四、通过可变电容器本身总等效电导的变化确定残量	(188)
五、电感线圈分布电容的测量	(191)
六、 Q 表接线柱电感 L_2 和电阻 r_2 的测量	(193)
第三节 高频 Q 表的应用	(196)
一、高频 Q 表基本测量应用	(196)
二、利用 Q 表进行高准确度阻抗分量的测量	(202)
三、利用 Q 表进行电介质材料的电性能测试	(213)
四、利用 Q 表进行磁性材料的测量	(218)
第四节 高频 Q 值标准	(224)
一、概述	(224)
二、 Q 值标准量具的电参数选择	(226)
三、 Q 标准量具的结构	(228)
四、 Q 标准本身有效 Q_c 和谐振电容 C_c 的定标方法	(229)
五、 Q 标准的量值传递	(235)

六、 Q 标准统计调整和校准公差给出	(236)
第五节 高频 Q 表检定	(239)
一、概述	(239)
二、高频 Q 表指示 Q 值的检定—— $\bar{Q}_{0.9}$ 定标值的应用	(242)
三、高频 Q 表残量影响系统误差的考察 —— Q_0 标准值的应用	(248)
四、如何评价高频 Q 表测量电感线圈有效 Q 值时的准确度 ..	(253)
第六节 谐振式电感电容测量仪	(256)
一、测量原理和组成	(256)
二、测量误差分析	(258)
三、仪器的检定	(259)
参考文献	(261)
第五章 矢量阻抗法仪器	(262)
第一节 矢量阻抗表	(264)
第二节 高频自动阻抗仪器	(270)
一、1MHz 数字式 LCR 表	(271)
二、 $\times 0$ kHz—10 MHz 自动 LCR 表	(276)
三、测量端四线对连接法	(281)
四、校准用标准器简介	(283)
五、高频自动阻抗仪器发展趋势	(286)
第三节 分布参数矢量阻抗分析仪	(288)
一、基本测量原理和设计	(289)
二、量值标准和计量	(295)
三、高频阻抗分析仪的主要应用	(299)
四、高频阻抗分析仪的测量夹具	(303)
参考文献	(308)

第一章 概 述

第一节 定义、术语——集总参数

阻抗基本概念^{〔1〕-〔3〕}

随着电子技术的发展，过去以直流、低频为中心的电测量工作，逐步扩展到高频、微波以至光波领域。各种频率下的电磁波特性可用特定的一些电磁量表征，如属于信号传输量的电压、功率、电场强度及噪声；属于电路量的阻抗、衰减；时间量的时间和频率等。本书是专门论述高频集总参数阻抗计量和测试的，这些阻抗量主要是用来描述 30 kHz 至 1000 MHz 频段线性无源分立元件的电路特性。由于这个频段是通讯、无线电广播、电视广泛使用的，因此，本书所讨论的内容势必是从事电子技术的各类专业人员（尤其是无线电测量、仪器制造、元器件和材料制造的计量检定人员）所特别关心的。下面我们将首先介绍一些通用的术语、基本定义及其相互关系。它们仅适合本书所讨论的特定场合下。

集总参数——当电路尺寸与波长相比足够小时，电路元件可以考虑成集中在某些点上，电路特性可用理想化的元件参数：电阻、电容、电感等表示，这类参数称之为集总参数。

分布参数——当电路尺寸与波长相比足够大时，所有电路元件可考虑是均匀分布在电路中的各点。此时电路特性的描述只能使用分布参数概念。

随着频率的提高，电路的处理方法由集总参数变为分布参数。使用集总分析的范围与使用分布分析的范围二者之间并无明确的界限。例如，有时在1 GHz 以上时，把插入同轴线中的探针看成一种集总概念的容性分压器，而另一方面，在频率低至30 kHz 时，空气线阻抗标准的分析方法却仍采用分布参数概念。又比如一端短路的 Lecher 传输线，作为分布参数传输线来看，其阻抗如下式所示：

$$\begin{aligned} Z_{in} &= Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta l} = jZ_0 \operatorname{tg} \beta l \\ &= jZ_0 \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) l \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 Z_0 ——传输线的特性阻抗；

β ——相位常数；

Z_L ——负载阻抗，短路时为零。

由上式可知，随着频率的提高，该阻抗可以是电感，也可以是电容。但当 $\beta l \ll 1$ 时，可把它看作是集总参数的电感，即一匝线圈。此时式 (1-1) 变成：

$$Z_{in} \approx jZ_0 \beta l = j\omega \frac{Z_0 l}{c} = j\omega L_e \quad (1-2)$$

式中 c ——光速；

$$L_e = \frac{Z_0 l}{c} \text{——等效电感。}$$

一般来说，除非电路尺寸与实际工作频率相应的 $1/4$ 波长可比拟，在实际应用中，把电路看成是集总元件所组成，可以使数学运算较简单。

阻抗的符号是 Z ， $Z = R + jX$ ；单位是欧姆 (Ω)。阻抗是根据欧姆定律定义为一个器件的端电压和流过该器件的电流之比 ($Z = U/I$)。这是阻抗的一种有源定义。另一

种无源定义是以长度和自由空间材料电磁特性为基础确定其量值的。两种定义在一定条件下有等效性。

阻抗概念比较适合于串联配置电路元件的电路特性的描述。上述方式定义的阻抗仅适合于电路和元件尺寸与波长相比十分小时，此时可得到较纯的基本集总参数元件：电阻器、电感器和电容器。频率提高到微波范围时，如果还用电压、电流来定义阻抗，其物理意义会变得含糊不清，因为在传输线的每一横截面上电流、电压分布都是不一样的。

反射系数——在均匀传输线上取定一参考面，入射到参考面上的电磁行波的振幅为 a ，反射回来的电磁行波的振幅为 b ， b 与 a 之比定义为反射系数 ρ 。由定义可知，反射系数的大小在 0 和 1 之间，相位角取值为 0 到 2π 之间。反射系数等于 0 为反射波全不返回的状态；此时称电路匹配。反射系数等于 1 为入射波全部返回的状态，表示完全反射。这样，反射系数用了波的概念，其物理意义明确，用以表示电路的特性是非常方便的。

不论阻抗 Z 也好，反射系数 ρ 也好，都用来表示器件及电路的特征，当然相互有关。然而 Z 是有量纲的， ρ 是无量纲的，因此没有同义的关系。可是 ρ 是基于均匀传输线上传播的波，若传输线的特性阻抗为 Z_0 ，阻抗 Z 除以 Z_0 即得到归一化阻抗 Z_n 。据传输线理论的简单推导， Z_n 和 ρ 之间可用下式联系起来。

$$Z_n = \frac{Z}{Z_0} = R + jX = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (1-3)$$

若测试中使用的均匀传输线的特性阻抗 Z_0 是已知的，则测出反射系数就可求出阻抗 Z 。近几年，随着微处理器在测量仪器中的广泛应用，高准确度的高频（1 MHz—1000 MHz）阻抗分析仪已成为商品仪器，它基于反射系数的测

量，由机内微处理器按一定的换算关系计算并显示出所需要的各种阻抗参量（详见本书第五章）。

史密斯圆图——是指处理高频和微波阻抗的计算或测定值的一种图解工具。它由几组曲线族构成，这些曲线是描述某些参量（反射系数、阻抗 Z 的电阻部分和电抗部分、驻波比、相角）随频率变化的轨迹，它们的轨迹是一系列的圆，所以称为圆图。

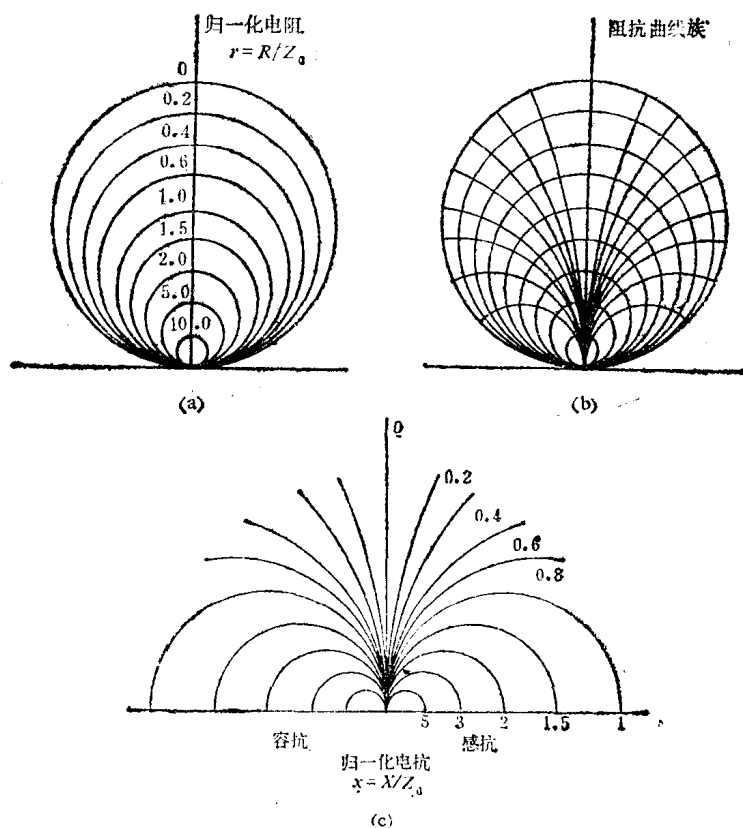


图 1-1 阻抗圆图的曲线族

由于现代高频及微波范围内的阻抗测量愈来愈趋向于由反射系数的测量转换为其它阻抗参量，史密斯圆图的应用显得很重要，图 1-1 表示它的构成。

由式 (1-3) 可见，在复数 ρ 平面上的一个点代表一定的复数归一化阻抗值。阻抗由两个分量给出，这两个分量是归一化电阻 r (或电导) 和归一化电抗 X (或电纳)。等值归一化电阻曲线是一族圆，其半径为 $1/(1+r)$ ，圆心位于 ρ 的实轴 (纵轴) 上。等值归一化电抗曲线也是一族圆，半径为 $1/X$ ，圆心位于 ρ 的虚轴 (横轴) 上。两族圆重叠在一起所组成的阻抗曲线网，就是史密斯圆图，亦称阻抗圆图。

在阻抗圆图上，为了避免曲线太杂乱以致计算发生错误，一般不画出驻波比、衰减、电长度、反射系数等曲线族，但它们可以通过放在圆图上的标尺或绘制在圆图旁边及圆图上的标度来读出，非常方便。

导纳——符号是 Y ， $Y = G + jB$ ；单位在过去用姆欧 (Ω)，现 SI 单位制改称为西门子 (S)。导纳是阻抗的倒数，通常用于描述并联组合的电路元件。

电容——符号是 C ；单位是法拉 (F)。它代表电流超前电压 90° 的电路或元件的电场储能特性。电容在并联电路里用正电纳 ($+j\omega C$) 表示，或者在串联电路里用负电抗 ($-j\frac{1}{\omega C}$) 表示。

电导——符号是 G ；单位是西门子 (S)，过去曾用姆欧 (Ω)。电导描述元件或电路的电能损失的特性。

电纳——符号是 B ；单位是西门子 (S)，过去曾用姆欧 (Ω)。它是复数导纳的虚数部分，通常用于描述并联电路，如果电路为容性，电纳为正 ($+jB$)；如果电路是感性，电纳为负 ($-jB$)。

电感——符号是 L ；单位是亨利(H)。它代表电压落后于电流 90° 的电路或元件的磁场储能特性。电感在串联电路中用正电抗($+j\omega L$)表示，在并联电路中用负电纳($-j1/\omega L$)表示。

电阻(串联)——符号是 R_s ；单位是欧姆(Ω)。它是导体或电路以发热的形式损耗能量的一种特性。它也是无源复数阻抗的实数部分。

电阻(并联)——符号是 R_p ；单位是欧姆(Ω)。它是电导的倒数，不存在电抗和电纳时，它等于串联电阻。

串联谐振——串联电路正负电抗相等的状态，电路输入电流和输入电压之间的相角为零，电流达到最大值，电路呈纯电阻，而且阻抗达到最小值。

并联谐振——并联电路正负电纳相等的状态，电路输入电流和输入电压之间的相角为零，输入端电压达到最大值，电路呈纯电阻，并且电导达到最小值。

固有(自身)谐振——某频率下电感器与其分布电容达到并联谐振，或电容器与其串联残余电感到串联谐振。

品质因数(Q 值)——符号是 Q ；无量纲。它是电路或元件最大储能与 2π 的乘积与一周期内耗能之比，用于描述电感器和电容器的品质；在串联电路里，它是电抗与电阻之比。它也用于衡量谐振电路带宽、调谐和选择性等特性。因为一个串联谐振电路中，电感和电容的端电压是串联谐振电路输入电压的 Q 倍，因此有时称为放大因数。

介质损耗角正切——符号是 $\tan \delta$ ；无量纲。它是品质因数 Q 的倒数。用于描述电容器的品质；在并联电路里，它是电导和电纳之比。

相角——符号是 θ (用于阻抗) 或 ϕ (用于导纳)；单位是度或弧度。它在并联电路中是电流超前或落后于电压的