

微波阻抗测量

(澳)P.I. 索姆洛 著
J.D. 亨特
陈成仁 译
徐燕清



人 / 民 / 邮 / 电 / 出 / 版 / 社

MICROWAVE IMPEDANCE MEASUREMENT

P.I.Somlo and J.D.Hunter

(IEE Electrical Measurement Series 2)

1 9 8 5

内 容 提 要

本书系英国电气工程师协会(IEE)电气测量丛书第二分册,对测量微波阻抗的方法进行了全面而详尽的论述。全书共分七章,内容包括:传输线和阻抗的基本概念,网络表示及分析方法,连接器、调配器和混合结头的特性测量,开槽线技术及其误差分析,各种电桥和反射计技术(包括时域反射计技术),自动网络分析仪和六端口技术等。书中详细说明了各种阻抗测量方法的工作原理、误差分析、优缺点及适用范围,给出了大量实验数据。

本书除可供从事无线电和微波计量测试、以及微波专业的工作人员参考外,还可供大专院校教师、高年级学生和研究生参考。

微波阻抗测量

〔澳〕 P.I.索姆洛 J.D.亨特 著

陈成仁 徐燕清 译

责任编辑:梁素梅

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

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 1990年6月 第一版

印张: 7²⁸/₃₂ 页数: 126 1990年6月河北第1次印刷

字数: 204 千字 印数: 1—2 000 册

ISBN7-115-04095-8/TN·288

定价: 3.60元

作者序

本书是微波阻抗测量技术的综述，旨在为计量测试专业学生提供指导，并为实际计量测试工作人员能够评价新的发展提供一个基础。

虽然特意将所用到的数学尽可能简化，但仍假设读者对电磁波和传输线理论有一基本的了解，并具有一定的代数知识。本书主要内容包括基本原理、网络分析技术、测量方法和电路描述。将具有共同性原理的测量方法各自成章。因为已有多文字出版了关于阻抗测量的大量文献，任何一位计量测试者可以很快地修改一种测量步骤，以适合自己的专用设备，因而本书不可能就某一种特定的测量方法的每种具体实施进行讨论。本书所列的参考文献，是这些专业文献中具有代表性的。

尽管自动测量系统的详细描述已超出本书范围，但所讨论的各种测量方法，包括了十九世纪最早的勒谢尔驻波实验，直至目前刚刚开始实施的六端口理论。对诸如矩阵的重新归一化，以及实时和合成脉冲时域测量等的近代分析技术也做了介绍。

P.I.索姆洛

J.D.亨 特

译 者 序

P.I.Somlo 和J.D.Hunter合著的 Microwave impedance measurement一书,系英国电气工程师协会电气测量丛书第二分册 (IEE electrical measurement series 2),该书全面论述了近代微波阻抗测量方法。

前三章论述了微波阻抗测量的基本理论,包括阻抗标准的理论和设计。第一章讨论了微波传输线和阻抗的基本概念。第二章讨论了网络表示和分析方法,包括S参数和矩阵的重新归一化,并给出了三种不同的信号流图化简方法。本章还给出了史密斯圆图的易于理解的解释及其应用。第三章介绍了微波阻抗与其他微波参量测量中经常涉及的结头、调配器和一些混合结头,这有助于深入理解和分析微波阻抗的测量问题。

第四章和第五章详细描述了近代微波阻抗测量的常规技术。第四章介绍了开槽线技术,并给出了详细的误差分析。第五章讨论了电桥和定向耦合器方法,包括简单反射计、调配反射计和扫频反射计技术。

第六章和第七章介绍了近代微波阻抗测量的时域技术和自动测量技术。

第六章详尽讨论了实时和合成时域反射计技术,给出了“定位函数”的有关概念。众所周知,将频域数据变换为时域数据的测量,有许多优点。因为时域测量带宽较窄,因而有更高的信噪比,并且没有时间颤动和零电平漂移。据1987年的最新报导,电光学波形分析仪器的时间响应已小于4ps;应用低温超导约瑟夫逊结技术的皮秒信号处理装置,已获得70GHz的带宽和5ps的上升时间。上述仪器组成的时域反射计,已可在毫米波段频率进行测试。本书所

讨论的方法可适用于分析讨论这些新型仪器的测量问题。在系统、网络或器件的脉冲响应（时域散射参数）的电磁测量中，常常遇到反卷积数学运算问题。随着时域技术的广泛应用，反卷积问题正在引起无线电学科的研究者的关注。本书作者结合一些具体问题（作者自己的研究成果），讨论了反卷积的应用，因而有助于读者对该问题的理解。

随着数字技术的发展，六十年代末出现了采用幅相检测系统的四端口自动网络分析仪（ANA）。ANA不仅可以提供相位信息，而且可以修正由于测量系统硬件不完善特性带来的测量误差。四端口ANA要求十分复杂的外差变频测量系统，因此在较高的频率上，其测量准确度有所降低。迄今，不少商品仪器的工作频率已扩展到60GHz，有的已扩展到110GHz。七十年代发展了一种更为简单和更有发展前景的“六端口”ANA技术。六端口反射计实质上是由一个合理设计的有六个端口的线性无源网络组成。一个端口连接微波振荡器；输出端口终接反射标准或被测器件；另外四个端口连接宽带功率检波器。这种利用标量功率检测的六端口技术，已应用于100kHz-100GHz的频段。最近，已研制成390GHz的准光学六端口反射计。第七章介绍了上述测量系统，着重介绍了六端口反射计的基本理论和校准方法。

附录B介绍了微波阻抗测量的误差分析和不确定度的合成问题。该附录的误差分析方法，亦适用于其他微波参量的测量问题。

本书两位作者均系澳大利亚联邦科学和工业研究院（CSIRO）国家标准研究所的高级科学家，长期从事微波测量技术和标准的研究工作，具有丰富的理论和实践。因而使本书有如下几方面的特点：（1）系统而全面地论述了微波阻抗测量的基本概念，内容洗炼、概念明晰。（2）不仅论述了开槽线、电桥和定向耦合器反射计之类的近代通用测量方法，而且较详尽讨论了诸如六端口、时域分析等近代微波阻抗自动测量技术。（3）本书在博采微阻抗测量领域的主要技术成就的同时，特别着重介绍作者本人的研究成果，其中

有的内容尚属首次发表。因而使本书具有理论与实践密切结合的特点。(4)本书的基本理论分析,采用近代较通用的微波网络分析方法,是我国微波技术界较熟悉的。例如汤世贤教授编著的《微波测量》(国防工业出版社,1981年版)以及董树义副教授编著的《微波测量》(国防工业出版社,1985年版)等书,均采用同类分析方法,易于被广大读者所理解。希望本书的翻译出版,将对我国从事微波测量和微波技术工作的同仁有所助益。

有些名词术语,国内译法不一。如Connector和Junction,国内许多书刊均译为“接头”。实际上,Connector和Junction是两个完全不同的概念。本书将Connector译为“连接器”,这与光纤术语的译法是一致的;将Junction译为“结头”或“结”。为便于读者了解有关术语的译名,书末附有部分主题索引的中英对照。

原书有几处叙述不够清楚,经与汤世贤教授讨论,为了忠实原文,译文中未作改动。极个别已发现的错误,译文已加改正。原书作者之一P.I.Somlo来信还指出了几处错误,译文中亦已改正。

徐燕清高级工程师翻译了第四章和第五章;原电子工业部十二所张伦高级工程师校对了译文;北京工业学院汤世贤教授审阅了校译稿,颇多教正,在此表示感谢。

陈成仁

于中国计量科学研究院

1988.4.7.北京

目 录

作者序

译者序

第一章 基本概念	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 阻抗概念—集总电路	(3)
1.3 阻抗概念—双导体传输线	(4)
1.3.1 阻抗沿传输线的变化	(7)
1.3.2 电压沿传输线的变化	(8)
1.3.3 同轴线	(12)
1.4 其他传输线的阻抗概念	(14)
1.4.1 波在矩形波导中的传播	(15)
参考文献	(19)
第二章 网络表示方法	(20)
2.1 常用的四端网络参数	(20)
2.1.1 S 参数和 T 参数	(23)
2.1.2 矩阵的重新归一化	(24)
2.1.3 各种参数组之间的关系	(25)
2.2 信号流图	(27)
2.3 信号流图的化简方法	(29)
2.3.1 拓扑流图化简	(30)
2.3.2 用梅森不接触环法则的流图化简	(30)
2.3.3 流图化简的矩阵方法	(32)
2.4 二端口误差盒	(33)
2.5 阻抗的图示方法	(35)

2.5.1	直角坐标和极坐标阻抗平面	(35)
2.5.2	史密斯圆图	(35)
2.5.3	史密斯圆图的特性	(36)
2.5.4	卡特圆图	(38)
参考文献		(39)
第三章 基本电路元件和器件		(40)
3.1	连接器	(40)
3.1.1	同轴连接器	(41)
3.1.2	波导连接器	(42)
3.1.3	连接器的插入损耗和重复性	(45)
3.2	精密传输线段	(47)
3.2.1	用精密传输线作为零反射标准	(48)
3.2.2	用精密传输线用作非零反射标准	(50)
3.2.3	用精密传输线作相移标准	(51)
3.2.4	影响精密传输线标准准确度的因素	(51)
3.2.5	有限电导率——趋肤效应	(53)
3.2.5.1	有限电导率对同轴传输线的影响	(56)
3.2.5.2	有限电导率对波导的影响	(59)
3.3	传输线的结头	(60)
3.3.1	单端口	(61)
3.3.1.1	匹配负载	(61)
3.3.1.2	全反射单端口	(62)
3.3.1.3	中间值反射系数标准	(64)
3.3.2	二端口	(66)
3.3.2.1	调配器	(66)
3.3.2.2	滑动短截线调配器	(67)
3.3.2.3	滑动螺钉调配器和短截线拉伸器	(70)
3.3.2.4	双短截线调配器	(72)
3.3.2.5	E - H 面调配器	(73)

3.3.2.6	多短截线调配器	(75)
3.3.2.7	匹配调节	(75)
3.3.3	三端口	(76)
3.3.3.1	E 面结头和 H 面结头	(78)
3.3.3.2	环行器(隔离器)	(78)
3.3.4	四端口	(80)
3.3.4.1	180° 混合结头、魔T	(80)
3.3.4.2	90° 混合结头、定向耦合器	(82)
3.3.4.3	定向耦合器用作稳幅器件	(86)
3.3.4.4	定向耦合器用于改善信号发生器匹配	(89)
3.4	开关	(91)
	参考文献	(92)
第四章	入射波与反射波之和的检测	(96)
4.1	基本原理	(96)
4.2	采用幅值检波器的方法	(98)
4.2.1	开槽线	(99)
4.2.1.1	探针的加载	(101)
4.2.1.2	传输线损耗	(106)
4.2.1.3	传输线的不均匀性	(108)
4.2.1.4	检波器的检波律	(109)
4.2.1.5	实际开槽线的流图	(111)
4.2.2	采用开槽线的特殊技术	(112)
4.2.2.1	大驻波比测量—罗伯茨和冯希珀尔方法	(112)
4.2.2.2	小驻波比测量	(113)
4.2.2.3	调配消除剩余反射	(115)
4.2.2.4	负载功率必须是很小时的测量	(117)
4.2.2.5	用模型修正误差	(117)
4.2.2.6	扫频测量	(117)
4.2.3	不采用开槽线的一些方法	(118)

4.2.3.1	固定多探针法	(118)
4.2.3.2	耦合器法	(122)
4.2.4	信号发生器阻抗的测量	(124)
4.2.4.1	直接法	(124)
4.2.4.2	间接法	(126)
4.3	采用幅值和相位检波器的方法	(126)
4.3.1	矢量电压表法	(126)
参考文献		(129)
第五章	反射波的检测	(131)
5.1	平衡电桥	(131)
5.1.1	180°混合结头电桥	(131)
5.1.2	90°混合结头电桥	(133)
5.1.3	G-R导纳电桥	(134)
5.1.4	伍兹电桥	(136)
5.2	不平衡电桥	(137)
5.2.1	电阻电桥	(138)
5.2.2	带状线VSWR电桥	(139)
5.3	采用定向耦合器的反射计技术	(141)
5.3.1	简单反射计	(141)
5.3.2	调配反射计	(144)
5.3.3	放大响应的反射计	(146)
5.4	扫频反射计技术	(147)
5.4.1	简单扫频反射计	(148)
5.4.2	双耦合器扫频反射计	(150)
5.4.3	高分辨度扫频反射计	(151)
5.4.4	具有史密斯圆图显示的扫频反射计	(154)
参考文献		(156)
第六章	时域反射计技术	(158)
6.1	采用陡峭上升波前的时域反射计技术	(160)

6.1.1	TDR显示的解釋	(163)
6.1.2	多次反射效应	(166)
6.1.3	小电抗不连续性的检测	(167)
6.1.4	改善灵敏度的技术	(169)
6.1.5	频谱加权改善轴向分辨率	(169)
6.1.6	在色散传输线中的工作	(169)
6.1.7	用时域反射计技术进行网络分析	(170)
6.1.8	工业应用	(171)
6.2	合成脉冲时域反射计技术和定位函数	(171)
6.2.1	采用数字处理的定位反射计技术	(175)
6.2.2	采用模拟处理的定位反射计技术	(176)
6.2.2.1	定位反射计	(179)
6.2.3	反卷积改善轴向分辨率	(186)
6.2.4	由史密斯圆图显示求定位函数	(187)
参考文献		(193)
第七章 自动微波阻抗测量方法概述		(195)
7.1	自动网络分析仪	(195)
7.2	六端口系统	(198)
7.2.1	六端口反射计理论	(199)
7.2.1.1	另一种公式表述	(204)
7.2.2	几何解释和设计考虑	(206)
7.2.2.1	具有前向信号监测的六端口	(209)
7.2.3	六端口反射计的校准	(210)
7.2.3.1	另一种校准程序	(215)
参考文献		(217)
附 录		(219)
附录A 流程图化简的数值算法		(219)
附录B 测量不确定度		(220)
参考文献		(224)

中英对照主题索引..... (225)

第一章 基本概念

1.1 引言

电磁波电路可以由集总电路、分布电路或两者混合的电路表征。集总电路的概念系指，元件可以认为是在一个点上起作用。当信号的波长远大于电路元件和它们的连接电路尺寸时，集总电路的概念便特别有用。当这个条件不满足时，电路器件对传播信号的作用，就必须认为是分布在器件的全部实体上。

术语“微波”是一个泛指的范围，就我们讨论的目的而言，其范围系从数百兆赫到数十吉赫。因为微波频率的波长通常可以与电路器件的物理尺寸相比拟或小得多，因此，在电路分析中，分布电路的概念是重要的。特别是，连接电路元件的传输线本身就是分布电路。

术语“阻抗”有其自身的演变史。它现在的定义是一个类似力的量（力、压力、电压、温度或电场强度）与一个有关的类似速度的量（速度、体速度、电流、热流或磁场强度）的复数比[1]。

1886年，奥利弗·洛奇爵士用阻抗一词定义了现在的所谓阻抗幅值或阻抗绝对值。尽管二十世纪前夕，斯坦迈兹[2]就引入了复数阻抗的定义，但一直到1933年波尔的书[3]中和1941年哈钦森的书[4]中，仍将阻抗定义成具有洛奇给出的含意。

阻抗通常是频率和传播模式的函数。它亦可能是方向的函数。在电磁场中，如果电场矢量和磁场矢量两者都是用它们的坐标分量给出的，则阻抗亦可以在坐标轴的所有方向上定义[5]。但是，一个特定方向的阻抗，不可能由其他方向的阻抗矢量分量导出。本书中，阻抗被理解为是应用于稳态条件下的阻抗。传输线的阻抗是指

沿传输线向所考虑的方向看去时，与所研究的模式相联系的阻抗。

现在，阻抗往往不只用来表示一个器件的特性，而且还用于表示器件本身。虽然将一个具有阻抗的器件称作阻抗器更确切（对照电阻—电阻器、电感—电感器、电容—电容器），但是，这个词的两个含意都被广泛采用，而且很少引起混淆。

为了方便起见，常常采用阻抗的倒数，并称之为导纳。为了用一种统一的方式来表示这两个量，博德[6]为此而杜撰了两个复合词，并建议命名为“阻纳”（“adpedance”）和“导抗”（“immittance”），这些年来，导抗一词已被普遍接受。

阻抗测量的重要性最好用实例加以说明。

(a)功率传输。众所周知，如果源和负载的阻抗呈现复数共轭，则由源到负载有最大功率传输。

(b)信号反射。如果源和负载两者的阻抗与插入的传输线特性阻抗相同，在传输线上便没有信号反射，源和负载就是匹配的。如果源与负载两者均与传输线失配，便会发生多次反射。多次反射使话音传送产生不希望的回声、电视图象上将产生重影、或使数字传输产生假脉冲。

(c)网络特性的表征。某些网络特性，例如衰减，只有在规定了嵌入网络的端口阻抗时，才能加以定义[7]。

(d)材料特性的测量。如介电常数和含水量的某些材料特性，可以方便地由阻抗测量来确定。

曾经提出过好几种传输线的定义。就我们的应用而言，将采用下述通用的定义：“传输线是将电磁能量从一处引导到另一处的系统”[8]。这个定义包括诸如同轴线、单导体或多导体明线、各种截面的波导以及多芯电缆这样一些传输线。

1.2 阻抗概念—集总电路

根据网络理论，对于一个线性网络，当在给定频率以及在稳态条件下，从任意端对进行研究时，其特性与由一个电阻器*和一个电感器或电容器构成简单组合（串联或并联）的特性是难以区分的。

一个频率为 $f=\omega/2\pi$ 呈谐和变化的电压，可以用复数函数** $V_{\exp(j\omega t)}$ 表示。当该电压加到线性网络的端点上时，根据定义，该电压与流入该端点内的电流之比，就是网络在该端点上的阻抗 Z 。对于电阻 R 与电感 L 或电容 C 串联的等效电路，其阻抗为

$$Z=R+jX \quad (1.1)$$

式中 $X=\omega L$ 或 $X=-1/\omega C$ 。对于电阻 R 与电感 L 或电容 C 并联的电路，阻抗分别为

$$Z=\frac{j\omega LR}{R+j\omega L} \quad Z=\frac{R}{1+j\omega CR} \quad (1.2)$$

对于并联的情况，阻抗用其倒数，即导纳 Y 来表示将更为方便， Y 记作

$$Y=G+jB \quad (1.3)$$

式中 $G=1/R$ 、 $B=-1/\omega L$ 或 $B=\omega C$ 。

当给出一个非线性网络或一个非线性网络元件（如半导体二极管）的阻抗时，则应将该阻抗理解为，在一个外加电压周期内的瞬时阻抗的时间平均。

*能量源用一个负电阻表征，吸能器用它们的端点阻抗中的一个正电阻表征。

**实际瞬时电压和电流当然不是复数，但可看作是复数函数实部和虚部或实部与虚部之和。

1.3 阻抗概念——双导体传输线

现在研究由分布串联电感(L)、分布串联电阻(R)、以及分布并联电容(C)和电导(G)表征的双导体传输线, 其中 L 、 R 、 C 、和 G 分别以它们每米的相应单位给出。对于这类传输线的基本段元, 电压和电流的关系可记为

$$\frac{dV}{dz} = -\left(RI + L \frac{dI}{dt}\right) \quad (1.4)$$

$$\frac{dI}{dz} = -\left(GV + C \frac{dV}{dt}\right)$$

式中 V 和 I 是沿传输线距离为 z 处的电压和电流*。 V 和 I 是复数量, 它们的时间变量 $\exp(j\omega t)$ 在式(1.4)中已被消除。式(1.4)的通解是

$$V = a \exp(-\gamma z) + b \exp(\gamma z) \quad (1.5)$$

$$I = [a \exp(-\gamma z) - b \exp(\gamma z)]/Z_0$$

式中

$$Z_0 = \sqrt{\left(\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}\right)}, \quad \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.6)$$

a 和 b 是可通过对传输线上某一点的 V 和 I 赋予特定值来确定的常数。

Z_0 称为“特性阻抗”, γ 称为“传播常数”, 它们可分别记作 $Z_0 = R_0 + jX_0[\Omega]$ 和 $\gamma = \alpha + j\beta[\text{m}]$, 其中, α 是衰减常数(N/m)**, 而 β 是相位常数(rad/m), 式(1.5)连同消除了的时间因子 $\exp(j\omega t)$, 分别代表行进方向相反、频率相同的两个波。每个波可以认为是幅度和相位不同的任意个相同频率的波的叠加。在 z 方向上, 两者都是同周期性的。单色波的空间周期或波长 λ , 是两个相邻周期上对

*式(1.4)是近似的, 适用于导体之间的距离远小于波长的那些频率[9]。

** $1\text{N} = 8.686\text{dB}$ ——译者注。

应相位点之间的距离，因此由下式给出

$$\beta\lambda = 2\pi \quad (1.7)$$

由此得到

$$\lambda = 2\pi/\beta \quad (1.8)$$

波以速度 v 传播

$$v = f\lambda = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta} \quad (1.9)$$

具有系数 a 的波沿正 z 方向呈指数衰减，称为前向波。具有系数 b 的波沿负 z 方向呈指数衰减，称为反射波。

对于 $R = G = 0$ 的无耗传输线的特殊情况（这是对实际低损耗传输线的一种有效近似），有

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}} \\ \gamma &= j\beta = j\omega\sqrt{(LC)} \\ \alpha &= 0 \end{aligned} \quad (1.10)$$

在这种情况下，由于传播速度与频率无关，故沿无耗双线传输线传播的复合（多色）信号不会畸变。这类传输线称为无色散或无畸变传输线。

更一般地说，由式(1.6)可见，只要 $R/L = G/C$ ，便能满足无畸变传输线所必须的条件 $\beta \propto \omega$ 。

将阻抗的定义应用于传输线上的某点 z 时，可以由式(1.5)求出该点往 z 方向看去的阻抗 Z_{in} 为

$$Z_{in} = Z_0 \frac{a \exp(-\gamma z) + b \exp(\gamma z)}{a \exp(-\gamma z) - b \exp(\gamma z)} \quad (1.11)$$

如果 $b = 0$ ，就没有反射波，且 $Z_{in} = Z_0$ 。因此，沿传输线各处的阻抗均为特性阻抗。并说这种传输线就是匹配的。如果沿（均匀）传输线各处的阻抗不等于 Z_0 ，则传输线就是失配的。

为了求出系数 a 和 b 之间的关系，我们在 $z = 0$ 处将传输线切断，并在该处用一个负载阻抗 Z_L 终接传输线，如图1.1所示，于是