

國外衰減計量

內 容 提 要

本书綜合了近年来国内外有关书籍与文献所发表的成果和編者在工作中的一些心得体会，比較全面地論述了有关微波衰减計量方面的基本問題，包括：衰减量的定义問題，各种标准衰减器，衰减測量系統綜述，各种主要的衰减測量方法和裝置，衰减量值的传递与衰减标准的比对等。书中重点叙述了直流替代法、音频替代法、中頻替代法、調制付載波法、高频替代法、散射参量法、駐波法等七种常用衰减測量方法的基本原理、測量系統、誤差分析及实验方法問題，并介紹了扫頻技术与自动測量技术。本书力求在闡明微波衰减計量的基本問題的同时，着重体现当代微波衰减計量的新技术、新水平及其发展方向。

目 录

第一章	引 论	(1)
第二章	衰减量的定义问题	(3)
2.1	引 言	(3)
2.2	衰减器的习惯模型	(4)
2.2.1	插入损耗	(4)
2.2.2	换能器损耗	(5)
2.2.3	衰 减	(5)
2.2.4	本征衰减	(6)
2.3	改进的Beatty衰减器模型	(7)
2.3.1	替代损耗	(9)
2.3.2	标准衰减	(10)
2.3.3	增量衰减与标准增量衰减	(11)
2.4	损耗与衰减的分量	(12)
2.4.1	反射分量	(12)
1.	比较损耗	(12)
2.	共轭失配损耗	(13)
3.	Z。失配损耗	(13)
4.	回波损耗	(13)
2.4.2	耗散分量	(13)
1.	耗散损耗	(13)
2.	耗散衰减	(14)
2.5	小 结	(14)
	参考文献	(16)
第三章	标准衰减器	(18)
3.1	概 述	(18)
3.1.1	衰减器的分类	(18)
3.1.2	衰减器的主要技术指标	(18)
3.2	几种常用的标准衰减器	(19)
3.2.1	截止式衰减器	(19)
1.	工作原理	(19)
2.	截止式衰减器的型式及其结构	(20)
3.	截止式衰减器的误差	(23)
4.	典型截止式衰减器举例	(23)
5.	目前水平	(29)

3.2.2	迴转式衰减器	(30)
1.	工作原理	(30)
2.	迴转式衰减器的误差	(31)
3.	目前水平	(32)
3.2.3	吸收式衰减器	(33)
1.	吸收式衰减器的工作原理及主要类型	(33)
2.	典型吸收式衰减器举例	(35)
3.	目前水平	(36)
3.2.4	感应分压器	(38)
3.3	小 结	(38)
	参考文献	(39)

第四章 衰减测量系统

4.1	引 言	(41)
4.2	信号源	(41)
4.2.1	稳幅	(42)
4.2.2	稳频	(44)
1.	小信号调制腔体稳频法	(44)
2.	锁相稳频法	(45)
4.2.3	信号源外对微波信号的幅度调制	(46)
4.2.4	可精确控制输出功率电平的稳幅源	(47)
4.3	测试传输线	(48)
4.3.1	匹配问题	(48)
4.3.2	连接问题	(52)
1.	洩漏	(52)
2.	重复性不良	(52)
3.	接头的失配与损耗	(53)
4.3.3	洩漏问题	(56)
4.4	检测指示系统	(57)
4.4.1	灵敏度与动态范围	(57)
4.4.2	分辨率	(58)
4.4.3	噪 声	(59)
1.	热噪声电压的计算	(59)
2.	噪声对指示系统的影响	(59)
4.5	测量误差及其表示	(63)
4.5.1	测量误差概述	(63)
4.5.2	测量误差的表示	(64)
4.6	小 结	(65)
	参考文献	(66)

第五章	衰减测量方法	(68)
5.1	综 述	(68)
5.2	直流替代法	(69)
5.2.1	基本原理	(69)
5.2.2	测量系统	(69)
1.	镇流电阻-选放功率比测量系统	(70)
2.	稳幅功率测量系统	(70)
3.	双路零差直流替代系统	(71)
5.2.3	误差分析	(72)
1.	误差源	(72)
2.	测量的总误差	(73)
5.2.4	小 结	(73)
5.3	音频替代法	(74)
5.3.1	基本原理	(74)
5.3.2	测量系统	(75)
1.	单路音频替代系统	(75)
2.	双路音频替代系统	(75)
3.	量程扩展	(76)
5.3.3	误差分析	(77)
1.	误差源	(77)
2.	测量的总误差	(84)
5.3.4	测量中应注意的问题	(84)
1.	检波器的选择与使用	(84)
2.	测量注意事项	(85)
5.3.5	小 结	(86)
5.4	中频替代法	(87)
5.4.1	基本原理	(87)
1.	串联中频替代法	(87)
2.	并联中频替代法	(87)
5.4.2	测量系统	(89)
1.	串联中频替代测量系统	(89)
2.	并联中频替代测量系统	(91)
3.	低中频锁相稳频稳幅系统	(94)
5.4.3	误差分析	(97)
1.	误差源	(97)
2.	测量的总误差	(102)
5.4.4	一些实验问题	(102)
1.	混频器非线性误差的测定	(103)
2.	截止式衰减器线性的测定	(103)

3.	系统总线性度的测定	(104)
4.	波形比较误差的检查	(105)
5.4.5	小 结	(105)
5.5	调制付载波法	(106)
5.5.1	基本原理	(106)
5.5.2	测量系统	(109)
1.	不抑制载波的双边带系统	(109)
2.	抑制载波的双边带系统	(111)
5.5.3	误差分析	(113)
1.	误差源	(113)
2.	测量的总误差	(116)
5.5.4	测量中应注意的问题	(116)
5.5.5	小 结	(117)
5.6	高频替代法	(118)
5.6.1	基本原理	(118)
5.6.2	测量系统	(120)
1.	串联高频替代系统	(120)
2.	并联高频替代系统	(123)
5.6.3	误差分析	(123)
1.	误差源	(123)
2.	测量的总误差	(124)
5.6.4	小 结	(124)
5.7	散射参量法	(125)
5.7.1	基本原理	(125)
1.	图解法	(125)
2.	解析法	(127)
5.7.2	测量系统与测量步骤	(128)
5.7.3	小 结	(129)
5.8	驻波法	(130)
5.8.1	基本原理	(130)
5.8.2	测量系统与测量步骤	(131)
5.8.3	误差分析	(132)
5.8.4	小 结	(134)
5.9	扫频衰减测量	(134)
5.9.1	测量系统和基本原理	(134)
5.9.2	测量步骤与实验结果	(136)
5.9.3	误差分析	(137)
1.	误差源	(137)
2.	扫频衰减测量的总误差	(137)
3.	与点频测量的比较	(137)

5.9节附	录	
〈附录 1〉	应用信号流图法推导电平控制系统扫频衰减测量的失配误差公式	
〈附录 2〉	应用信号流图法推导比值计系统扫频衰减测量的失配误差公式	
5.10	微波网络的自动测量简介	(143)
5.11	结 语	(147)
	参考文献	(148)
第六章	衰减量值的传递及衰减标准的国际比对	(154)
6.1	衰减量值的传递	(154)
6.1.1	量值传递问题概述	(154)
6.1.2	衰减量值的传递	(155)
6.2	衰减标准的国际比对	(157)
6.2.1	概 述	(157)
6.2.2	衰减量值的国际比对情况	(158)
1.	概 述	(158)
2.	比对用中介衰减器	(159)
3.	比对结果	(160)
4.	展 望	(161)
	参考文献	(162)
第七章	結束語	(163)
7.1	锁相技术在衰减计量中的应用	(166)
7.2	衰减的扫频测量和自动测试系统	(166)

第一章 引 論

无线电计量技术是促进整个无线电技术和无线电电子学向前发展的重要因素，衰减计量则是无线电计量中一个十分重要的项目，它与精确测定许多其它无线电参量有着直接而密切的关系。例如，在确定信号源的输出功率、放大器的增益和接收机的灵敏度以及微波传输元件的特性时，都必须使用经过精密校准的衰减器。因此，大力提高衰减计量的精确度便成为人们始终不渝的一个努力方向。

到目前为止，在国际范围内，衰减计量已达到如下水平：频率范围0~220千兆赫、最大衰减量程约150~170分贝、测量精确度0.01~0.0001分贝。

衰减计量技术大体上包括以下四个范畴：

1. 研制标准衰减器；
2. 拟定和改进测量方法；
3. 建立衰减校准装置；
4. 保证衰减量值的准确传递。

关于衰减量值的计量方法，曾经提出并付诸实际应用种类已相当多，归纳起来，不外乎有以下四种：

- (1) 依靠功率的测量，按衰减量的定义来求得其值。这种方法也称为直接法；
- (2) 与标准衰减器的衰减量相比较，即所谓替代法或比较法。这类方法在实践中有着广泛的应用並有多种形式，取决于所用的标准衰减器；
- (3) 根据衰减量的网络参数的定义，通过反射（驻波）的测量来测定衰减量。其中，最主要的是散射系数法和驻波法；
- (4) 对于可变衰减器，根据衰减量定义本身的相对性质，可以通过相对功率电平的比较来测定相对衰减量。这时，无需依赖其它微波计量单位的标准，因此称为绝对法。

以上方法的研究一般都集中在探索扩展频段、测量小或大的衰减值、提高测量的精确度以及使测量过程方便、迅速等几个方面。

标准衰减器的研制在衰减计量工作中也占有相当重要的地位。很明显，如果没有足够精确的标准衰减器提供使用，则精确的衰减计量便很难实现。

可以认为，目前在衰减计量实践中所采用的方法基本上还是十年以前那些经典方法，只是由于标准衰减器的研制水平的不断提高以及各种新技术的广泛应用，才促使整个衰减计量技术获得发展。标准衰减器研制水平的提高体现在衰减器的使用频段、衰减范围、精确度和稳定性各个方面都获得了不同程度的改善。特别是迴转式衰减器和感应分压器（比率变压器）的出现，促进了衰减计量技术的进一步发展，故这两类标准衰减器在目前已受到普遍重视。

衰减计量方法以及标准衰减器的不断改进和完善，加上扫频技术和计算机技术在计量技术中的推广应用，促成了许多新型先进衰减校准装置的建立，使测试过程向着自动化、高度精确化方向大大迈进了一步。

鉴于衰减计量在无线电计量技术中的重要性以及这门技术在近年内所取得的许多新进展,故很有必要对这方面的工作作一个比较全面的介绍和报导。本书以下各个部分便是围绕上述几个方面的问题进行了较为系统而详细的论述。

首先是关于衰减的定义,这是在衰减计量工作中必然涉及到的一个问题。然而,对于“衰减”一词的定义还存在着某种程度的混乱。这种概念上的混乱往往被忽视,结果便导致对同一物理实体采用了种种不同的术语来描述;反过来,又用同一术语来定义不同物理实体。一些定义条件被混淆在一起而未加仔细区别。其中,“衰减”和“插入损耗”两个定义在概念上的混乱是最常见的。所以,本书在系统介绍各种衰减测量方法之前,将以相当的篇幅详尽地谈谈文献中所出现的描述衰减量的各种定义,同时,着重指出在我们实际计量工作中所使用到的衰减概念究竟是指哪一种。

其次是关于各类标准衰减器的描述。如前所述,标准衰减器是完成衰减计量不可缺少的重要工具。因而,对于它们的工作原理、目前达到的最高精确度、适用范围及其发展现状都应当有一个比较明确的了解,故书中对此也作了适当的论述。

实施衰减测量的各种途径是衰减计量工作的中心课题,也是衰减计量技术的关键环节。书中对这个问题作了较为详尽的描述。除了引用文献的成果以外,也有一小部分是编者在工作中的心得体会。在这里,除了叙述完成衰减测量的各种方法的原理,还着重介绍了实现该原理的各种测量系统,特别是那些采用了近代新技术、达到高水平的系统,并指出影响测量结果精确度的种种因素以及估计各种方法误差范围的方法。对于一些实验技术方面的问题,也尽量作了介绍。

研究衰减量值传递的方法、建立正确而有效的传递系统,是保证衰减量值统一的重要手段。故本书对衰减量值的传递问题也作了一简要论述,顺便介绍了近年来在国际范围内已经开展起来的有关衰减计量国际比对方面的活动情况及比对结果。

由于本书所涉及的范围较广,编者掌握的资料有限,经验不足,加之时间仓促,编写水平又很低,许多看法纯属个人之见,难免有片面甚至谬误之处,诚恳地希望读者批评指正。

第二章 衰减量的定义

2.1 引言

在微波电路中，“衰减”一词是指在一个传输系统中，由于能量的耗散与反射，使传输功率由一点到另一点的减少。它可以是传输系统中一段传输线的属性（即所谓“衰减常数”，本书不讨论这方面的问题），也可以是插入系统的某一特定器件的属性（在以下的叙述中，为了方便，将所有具有这样属性的特定器件统称为“衰减器”，它包括固定衰减器与可变衰减器、端接了匹配负载的定向耦合器、隔离器，等等）。

显然，衰减计量的首要问题是衰减量的定义问题，即首先要搞清楚我们要计量的是什么。看来这个问题似乎很简单，其实不然。我们要求定义的量应该最能反映特定器件在“衰减”方面的特征、最易于进行实际测量、最适宜进行量值传递，还要便于应用。为了达到这样的目的，在衰减计量的发展历史上，便出现了种种术语来定义衰减量，诸如插入损耗、换能器损耗、替代损耗、耗散损耗、发射损耗、回波损耗、衰减、总衰减、增量衰减、标准衰减、本征衰减，等等，不胜枚举。不但出现的定义多种多样，而且在名词术语的使用上也存在着极大的混乱。往往用同一术语称呼概念上不同的量，或是用不同的术语称呼同一概念。例如，“插入损耗”一词就曾用作：1) 隔离器的正向剩余损耗或是可变衰减器零刻度下的初始衰减；2) 在任意信号源和任意负载组成的传输系统中因某网络的插入所导致的负载接收功率的变化；3) 在无反射信号源和无反射负载所组成的传输系统中因某网络的插入所导致的负载接收功率的变化，等等。又如：“反射损耗”和“失配损耗”这两个词曾用来表示同一概念。而“衰减”、“损耗”、“损失”等词亦经常是混用的。目前，在有关衰减量的定义及名词术语使用上的混乱仍未得到澄清，国际上亦无统一的标准规定。

衰减量定义方面的混乱状况对衰减计量是极为不利的，它可能造成：1) 错误地理解与使用不同的概念，使计量对象不清；2) 难于处理测量误差；3) 难于进行衰减量值的传递；4) 不利于评价、比较衰减器。

当然，衰减量的定义虽然混乱，但仍存在着实际上比较普遍使用的一些定义，有着相对的统一。同时，只要我们清楚了解各定义的确切含义，就不会造成错误和混淆，仍可正确使用各种定义，开展衰减计量工作。为此，本章重点介绍在文献中出现的各种衰减量定义之物理意义和应用范围。至于如何定义最好，可在今后探讨。

为了给出一个衰减器的衰减量的定义，首先要选取一种“模型”来表示该衰减器。模型不同，定义也就各异。由于衰减是与功率的传输相联系的，故衰减量很自然是通过功率来定义。另外，为了利用衰减量的定义进行分析和计算，通过功率与衰减器的网络参量的关系，常将该定义表示为网络参量的形式。通常所选

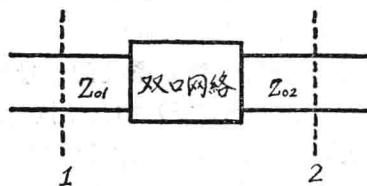


图 (3) 2.2-1 用一个双口网络表示衰减器

取的一组网络参量是散射参量，即S参量。

2.2 衰减器的习惯模型 [1] ~ [9], [11] ~ [13]

习惯上广为采用的一个衰减器模型是如图 (3) 2.2-1 所示的双口网络 (四端网络)。图中，衰减器的一切特征属性集中于网络内部，用一组S参量 ($S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$) 表示。网络两端由理想传输线连接 (无耗、无反射)，两传输线的型式及传输模式可以相同或不同，其特性阻抗分别为 Z_{01} 与 Z_{02} 。该网络由任意选择的参考面 (或端面) 1 和 2 作为其界面。

在这种模型中，没有涉及实际衰减器两端的连接接头。可以认为接头是理想的 (无洩漏、无耗、无反射、0 或 2π 整数倍的相移特性)；也可以认为双口网络既包括了衰减器本身，也包括其接头在内。

2.2.1 插入损耗

设有一任意信号源与任意负载组成的传输系统 (图 (3) 2.2-2)。图中，信号源的反射系数为 Γ_G ，负载的反射系数为 Γ_L 。在两者组成的系统中，负载得到的功率为 P_L 。当网络插入其中时，认为 Γ_G 与 Γ_L 不变，这时负载上得到的功率为 P_T 。

一个网络的插入损耗 $L_{\text{插入}}$ 定义为：在一个由任意信号源与任意负载组成的传输系统中，网络插入前负载上得到的功率 P_L 与网络插入后负载上所得到的功率 P_T 以分贝表示的比值。即：

$$L_{\text{插入}} = 10 \log_{10} \frac{P_L}{P_T} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-1)$$

用S参量表示该定义，有：

$$L_{\text{插入}} = 10 \log_{10} \left[\frac{Z_{02}}{Z_{01}} \left| \frac{(1-S_{11}\Gamma_G)(1-S_{22}\Gamma_L)-S_{12}S_{21}\Gamma_G\Gamma_L}{S_{21}(1-\Gamma_G\Gamma_L)} \right| \right] \quad (2.2-2)$$

由 (2.1)、(2.2) 两式可知：

1) 插入损耗有可能为负值。例如，当图 (5) 2.2-2 (a) 所示原来的系统不是共轭匹配时，插入一个阻抗变换网络—无耗调配器可使图 (5) 2.2-2 (b) 的系统达到共轭匹配，从而 $P_T > P_L$ ，则 $L_{\text{插入}}$ 为负值；

2) 插入损耗与给定系统的信号源和负载的阻抗有关，而非网络本身属性的表征。换言之，同一网络 (衰减器) 插入不同的系统，将有不同的 $L_{\text{插入}}$ 值。显然，它不是网络本身衰减属性的良好表征，不适于作量值传递。

插入损耗亦有称之为介入损耗、插 (介) 入损失、插 (介) 入衰减的。

另外，亦有定义在无反射信号源与无反射负载之间插入网络前后负载上得到的功率之比

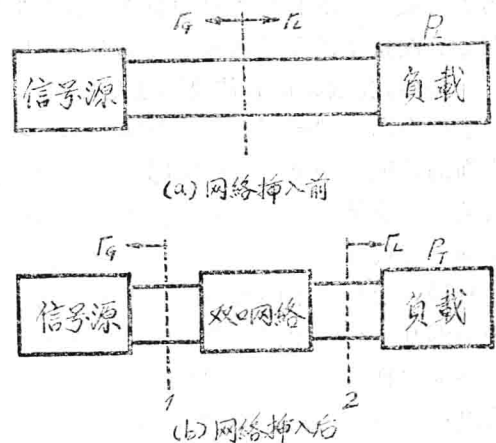


图 (3) 2.2-2 插入损耗

(以分贝表示)为“插入损耗”的,这实际上是衰减的定义(见后)。还有称隔离器的正向损耗及可变衰减器零刻度衰减为“插入损耗”的,这实则为“剩余损耗”和“初始(起始)衰减”。

因此,“插入损耗”一词有多种别称,且广泛用于各种不同的概念,必须注意其确切含义,不可混淆。

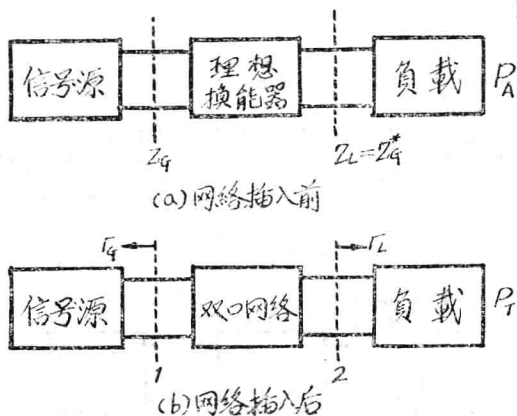


图 (3) 2.2-3 换能器损耗

2.2.2

换能器损耗

设有如图 (3) 2.2-3 (a)所示的一个传输系统。在信号源(内阻为 Z_G)与负载(阻抗为 Z_L)之间接有一理想(无耗、无反射)换能器,使得 $Z_L = Z_G^*$,因而使信号源对负载给出资用功率 P_A (最大功率)。当双口网络代替理想换能器插入系统时,负载得到的功率变为 P_T 。则一个网络的换能器损耗 $L_{\text{换能}}$ 定义为在一个信号源与负载呈共轭匹配的传输系统中,网络插入前负载上得到的最大功率 P_A (资用功率)与网络插入后负载上得到的功率 P_T 以分贝表示的比值,即:

$$L_{\text{换能}} = 10 \log_{10} \frac{P_A}{P_T} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-3)$$

其S参量表示式为

$$L_{\text{换能}} = 10 \log_{10} \left[\frac{Z_{01}}{Z_{02}} \frac{|(1-S_{11}\Gamma_G)(1-S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_G\Gamma_L|^2}{(1-\Gamma_G^2)(1-\Gamma_L^2)} \right]$$

(分贝) (2.2-4)

由 (2.3)、(2.4) 式可知:

1) 一般说来,对无源双口网络总是 $P_A > P_T$,故 $L_{\text{换能}}$ 总是正的,不可能为负值。当 $L_{\text{换能}} = 0$ 意味着后来系统中插入的双口网络也是一个理想的换能器。故此概念表征了一个给定网络趋近于理想换能器的程度, $L_{\text{换能}}$ 愈小,这种趋近程度愈好。

2) 换能器损耗亦与给定系统的信号源和负载阻抗有关,而非网络本身属性的表征。

换能器损耗也有称为总衰减、工作衰减的。

2.2.3 衰 减

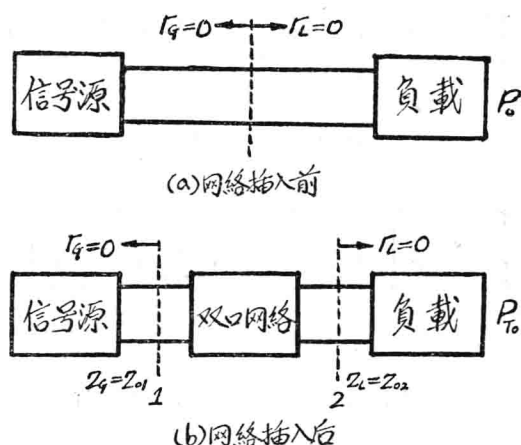
在图 (3) 2.2-2(a)的系统中,若 $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$,则给出一个无反射系统[图(3)2.2-4(a)]。衰减A定义为:在一个信号源与负载都和传输线匹配的无反射传输系统中,网络插入前无反射负载上得到的功率 P_0 与网络插入后无反射负载上得到的功率 P_T 以分贝表示的比值。实质上,衰减乃是无反射系统中的插入损耗。即:

$$A = (L_{\text{插入}}) \Gamma_G = \Gamma_L = 0 = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P_{T_0}} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-5)$$

其S参量表示式为:

$$A = 10 \log_{10} \left[\frac{Z_{02}}{Z_{01}} \cdot \frac{1}{|S_{21}|^2} \right] \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-6)$$

由(2.5)、(2.6)两式可知:衰减与给定系统中的信号源与负载的阻抗无关,其值唯一地表征了双口网络本身的属性,避免了因系统不同而产生的不确定性。由于衰减的定义具备了表征特定器件之衰减属性和可以进行量值传递的基本条件,所以,目前衰减计量中所测量的“衰减量”都广泛采用这一定义。注意这里所规定的条件 $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$ 是其定义之量唯一性的基础,必须予以保证。实际上,由于不能完全达到此条件而会有失配误差。



图(3) 2.2-4 衰 减

2.2.4 本征衰减

设在图(3) 2.2-5 (a) 的无反射系统中($\Gamma_G = \Gamma_L = 0$), 无反射负载所得到的功率为 P_0 。当一个失配双口网络插入后, 在网络的输入端与输入端应接一无耗调配器 T_B 与 T_A , 调配它们使得 $\Gamma_R = \Gamma_A = 0$ 。在这样双向无反射(双边全匹配)的条件下, 无反射负载得到的功率为 P_{T_0} 。则本征衰减 $A_{\text{本征}}$ 定义为: 在一个信号源与负载都和传输线匹配的无反射传输系统中, 网络插入前无反射负载上得到的功率 P_0 与网络插入后, 将网络两端用无耗调配器也调到无反射时, 无反射负载上得到的功率 P_{T_0} 以分贝表示的比值。即:

$$A_{\text{本征}} = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P_{T_0}} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-7)$$

其S参量表示式为

$$A_{\text{本征}} = 10 \log_{10} \frac{1}{\eta_{\max}} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-8)$$

而

$$\eta_{\max} = \frac{Z_{01}}{Z_{02}} \cdot \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_m|^2)}{|1 - S_{22} \Gamma_m|^2 - (S_{21} S_{12} - S_{11} S_{22}) \Gamma_m + S_{11}|^2} \quad (2.2-9)$$

其中

$$\Gamma_m = \frac{B}{2A} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{2|A|}{B}} \right) \quad (2.2-10)$$

$$A = S_{22} + S_{11}^* (S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}) \quad (2.2-11)$$

$$B = 1 - |S_{11}|^2 + |S_{22}|^2 - |S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22}|^2 \quad (2.2-12)$$

由 (2.2-7) ~ (2.2-12) 式可见:

1) 本征衰减与给定系统的信号源及负载的阻抗无关, 仅取决于网络本身的特性。但是, 由于这个概念太理论化, 所要求的无耗调配器及双向无反射条件很难在实际测量中实现, 加之分析计算都很复杂, 因而一般不用它表征网络的衰减属性。

2) (2.2-9) 式所表示的 η_{max} 是由调配器 T_A 、 T_R 及双口网络三者组成之合成网络的最大传输效率 (等于净输出功率与净输入功率之比, 见后面本章 2.4.2 节)。由于 T_A 、 T_R 是无耗的, 也就是双口网络的最大效率, 故 (2.2.8) 式实际上表明本征衰减乃是在双向无反射条件下的最小的换能器损耗。

本征衰减亦曾称为本征插入损耗。

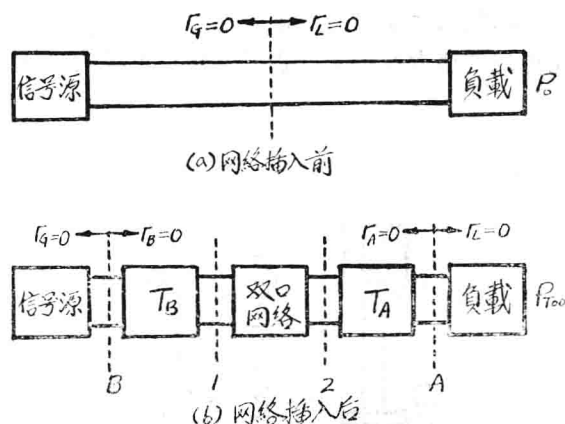


图 (3) 2.2-5 本征衰减

2.3 改进的 Beatty 衰减器模型 [9] [10] [12] [13]

前述之衰减器的习惯模型以及以此为基础所给出的各种定义都是一些理想化了的概念, 不能严格反映实际情况。当实际测量这些量时, 很难将其测出。这是因为:

1) 习惯模型中没有考虑用以将衰减器 (网络) 和系统连接的接头 (或是将接头理想化, 认为它不产生影响)。而实际衰减器总是有接头, 并且接头可能有损耗和反射, 特别对于同轴传输线更是这样。当带有损耗和反射的接头的衰减器接到不同系统时, 接头会产生不同的影响, 使测出的量彼此有差别, 有时甚至很大;

2) 在前述各定义中, 对传输系统也是理想化了。为将衰减器插入, 系统总是有一用接头对相连的可合可分的插入点。当衰减器插入其中时, 衰减器两端的接头与打开的接头对重新组合成新接头对, 构成新的闭合系统。如果接头有损耗和反射, 亦将对测量产生影响。在不同系统中, 这种影响可能不同;

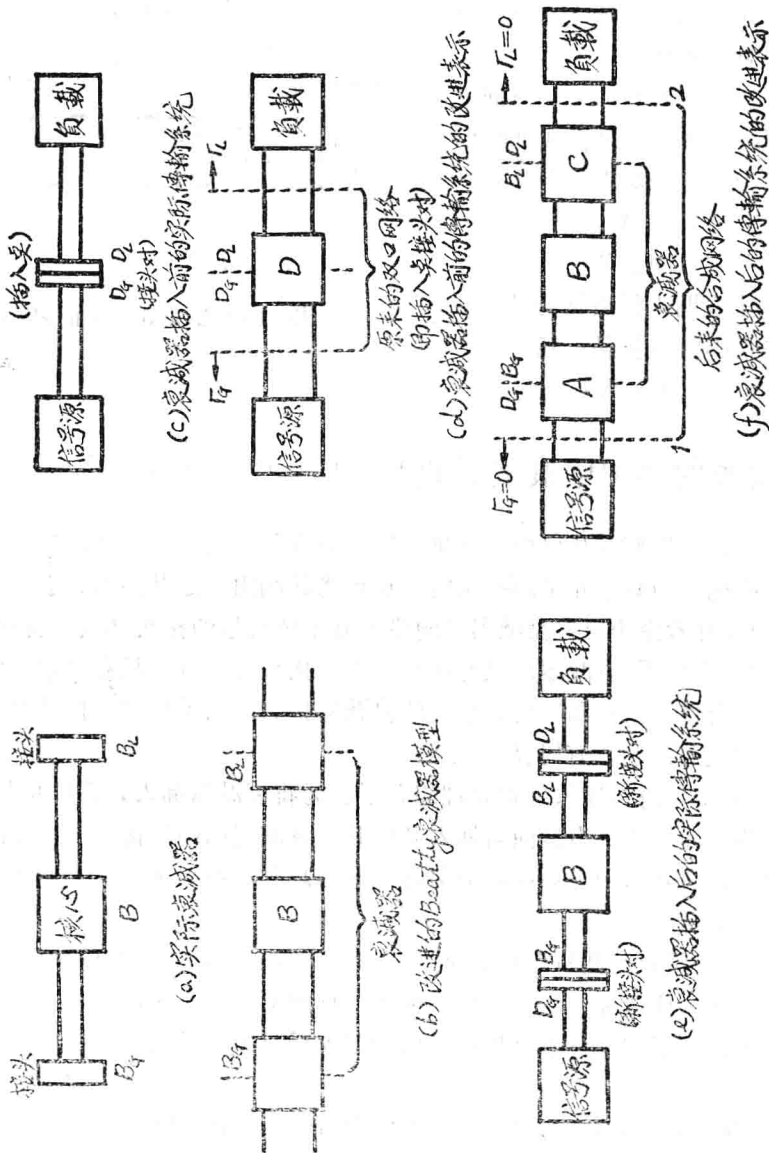
3) 前述一些定义中规定的测量条件也是理论上的条件。例如, 理想的换能器、理论上的无反射 (全匹配) 等。而实际上作为一种换能器的调配器总是有损耗的; 将系统调到无反射状况总会受到反射测量仪器本身剩余反射的限制以及受这些仪器接头的影响而不能完全达到。

鉴于上述原因, 为了使衰减量的定义更接近实际情况, Beatty 提出了一种改进的衰减器模型以及将其插入系统的改进表示方法, 如图 (5) 2.3-1 所示。图中, 一个实际衰减器被分为 “核

心”与“接头”两部分。核心部分由双口网络B表示，而接头由 B_G 和 B_L 表示[图(3)2.3-1a,b]。原来的传输系统通过表示插入点处接头对 D_G 、 D_L 的双口网络连在一起(图(3)2.3-1c,d)。当衰减器插入系统时，原系统的接头对 D_G 、 D_L 打开，分别与衰减器上的接头 B_G 、 B_L 配对连接，形成用双口网络A与C表头的新接点对。于是，由A、B、C三个级联双口网络组成一个合成的网络，代替了以前理想化的单一双口网络插入系统构成新的传输系统(图(5)2.3-1e,f)。

因此，新的衰减器模型是用三个级联双口网络表长一个接于系统上的衰减器，注意单个接头不是用网络表示的。网络表示的是接头对，在不同配对连接方式下，表示接头对的网络也不同。

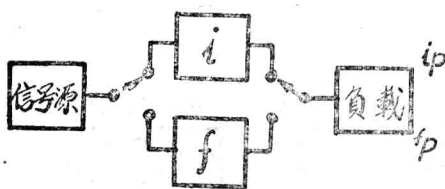
以此改进模型为基础，Beatty提出了一些新的衰减定义，可以将前述各定义统一起来，还可以严格考虑接头的影响，更接近于实际测量情况。



图(3)2.3-1 改进的Beatty衰减器模型及所插入的传输系统

2.3.1 替代损耗

综观前述衰减定义中所考虑的将网络插入传输系统的过程,其实质都是一个替代过程。如图(3) 2.3-2所示,是将网络*f*代替网络*i*的过程。例如,在定义换能器损耗时,可以认为原来的网络*i*代表理想换能器,后来的网络*f*代表被测衰减器, $i_P = P_A$, $f_P = P_T$; 在定义插入损耗(或衰减)时,可以认为*i*代表理想的接头对(无损耗、无反射), *f*代表后来插入的衰减器, $i_P = P_L$ (或 P_o), $f_P = P_T$ (或 P_{To})。这种情况对照图(3) 2.3-1的(c,e)或(d,f)来看就很清楚了。因为即使在信号源与负载之间原来没有网络,但总必须有一个插入点的接头对,而此接头对就可以看作一个网络*i*。所以,当测量网络*f*有插入损耗(或衰减)时,总是用网络*f*代替网络*i*。



图(5) 2.3-2 替代损耗

i_P —传输系统中插入网络*i*时负载上得到的功率。

f_P —传输系统中插入网络*f*时负载上得到的功率。

由此可见,可将前述之插入损耗、换能器损耗、衰减等定义统一于这样一个替代过程,并定义替代损耗 $L_{替代}$ 为:在一个由任意信号源与负载组成的传输系统中,网络*i*插入其间时负载上得到的功率 i_P 与网络*f*代替网络*i*后负载上得到的功率 f_P 以分贝表示的比值,即:

$$L_{替代} = 10 \log_{10} \frac{i_P}{f_P} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-13)$$

若将网络*i, f*的各散射系数分别加以上标*i, f*, 则替代损耗的S参量表示式为

$$L_{替代} = 20 \log_{10} \left| \frac{iS_{21} [(1 - fS_{11} \Gamma_G)(1 - fS_{22} \Gamma_L) - fS_{12} fS_{21} \Gamma_G \Gamma_L]}{fS_{21} [(1 - iS_{11} \Gamma_G)(1 - iS_{22} \Gamma_L) - iS_{12} iS_{21} \Gamma_G \Gamma_L]} \right| (\text{分贝})$$

(2.2-14)

这里,假定了信号源与负载的阻抗在替代过程中不变。由(2.3-13)、(2.2-14)式可知:

- 1) 替代损耗与给定系统的信号源和负载阻抗有关;
- 2) 替代损耗的数值原则上可在 $-\infty \sim +\infty$ 之间,但如果对信号源与负载的特性作某些规定,则可将其限定在正值范围内;

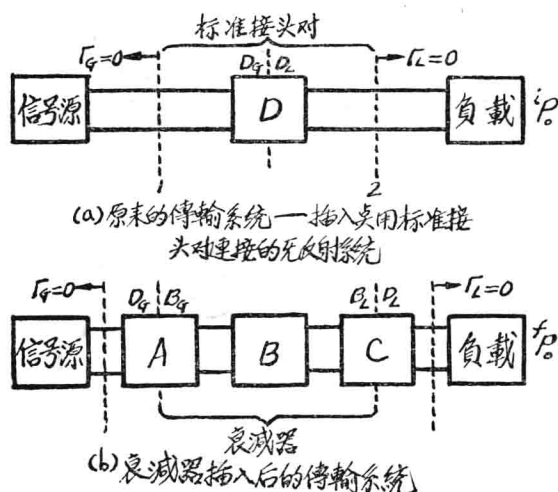
3) 可利用替代损耗概念考虑接头对测量的影响:使用改进的衰减器模型,参考图(3)2.3-1(d,f)就是一个用级联网络A、B、C组成的合成网络代替原有网络D的过程,从而可以算出含有接头影响的替代损耗。以此为基础可以分析接头在衰减计量中的影响(详细讨论

见后)；

4) 替代损耗对统一各种衰减定义提供了一个自然的基础。插入损耗、换能器损耗和衰减都可能看作替代损耗的一个特例。此外，它还特别适用于步进衰减器（在这种衰减器中，当步进时，就是一个衰减器替代另一衰减器的过程）。而可变衰减器亦可看作另一种形式的“步进”（虽然可变衰减器并未从电路中移去，但它从一个位置到另一个位置的变化也是一种替代，见本章2.3.3节）。

2.3.2 标准衰减

设有一用“标准接头对”连接起来的无反射传输系统〔图(3) 2.3-3〕，无反射条件 $\Gamma_G = \Gamma_L = 0$ 由有“标准接头”的开槽线获得。这里所谓的“标准接头”是指按标准规格精密制造的接头。它可以是普通型式（如同轴线中的N型接头），也可以是高精度接头。通常，标准接头对具有低的、然而可测量的损耗与反射。标准衰减 $A_{\text{标准}}$ 定义为：在一个信号源与负载都和传输线匹配的、由标准接头对（被测插入点）连接起来的传输系统中，衰减器插入前无反射负载上得到的功率 iP_0 与衰减器插入后无反射负载上得到的功率 fP_0 以分贝表示的比值即：



(图) 32.3-3 标准衰减

$$A_{\text{标准}} = 10 \log_{10} \frac{iP_0}{fP_0} \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-15)$$

将图(3) 2.3-3与(3) 2.3-2比较可知：代表标准接头的网络D即是网络i，而代表衰减器的级联网络A、B、C组成的合成网络就是网络f。因此，标准衰减实际上就是上述给定的无反射系统中衰减器替代标准接头对时的替代损耗： $A_{\text{标准}} = (L_{\text{替代}})_{\substack{\Gamma_G = \Gamma_L = 0 \\ \text{标准接头对}}}$ 。

可以证明，标准衰减的S参量表示式为：

$$A_{\text{标准}} = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{d21}}{a_{21} b_{21} c_{21}} [(1 - a_{22} b_{11})(1 - b_{22} c_{11}) - a_{22} b_{12} b_{21} c_{11}] \right| \quad (\text{分贝}) \quad (2.2-16)$$

式中，a、b、c、 S_d 分别为网络A、B、C、D的S参量，d上加有上标S表示网络是标准接头对。

由(2.2-16)式可以看出，当所有的接头都相同且无反射时（即 $A \equiv C \equiv D$ 且 $a_{22} = b_{11} = b_{22} = c_{11} = 0$ 时）

$$A_{\text{标准}} = (L_S)_{\substack{\Gamma_G = \Gamma_L = 0 \\ A \equiv C \equiv D}} = A_A + A_B \quad (2.2-17)$$