

微波衰减测量

Weibo Shuaijian Celiang

微波衰减测量

李镇远 张 伦 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书比较全面地论述了微波衰减测量技术,包括:衰减量的定义、标准衰减器、测量系统、各种主要的衰减测量方法、衰减测量的新技术、衰减量值的传递问题等。书中重点介绍了功率比法、音频替代法、中频替代法、高频替代法、调制副载波法、阻抗法、自校准法和扫频法等八种常用方法的基本原理、测量系统、测量步骤、误差分析及实验方法问题,并扼要介绍了约瑟夫逊效应、微波网络的自动测量与六端口测量等几种新技术。

本书适用于从事微波测量的工程技术人员,亦可供大专院校微波技术专业的师生参考。

微 波 衰 减 测 量

李镇远 张 伦 编著

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: 787×1092 1/32 1981年7月第一版
印张: 14 24/32 页数: 236 1981年7月河北第一次印刷
字数: 337千字 印数: 1—3,600册

统一书号: 15045·总2476—无6136

定价: 1.50元

序

微波技术在现代化的科学技术、国防以及国民经济中有着重要地位，随着我国微波技术的发展，对于各种微波参量的精确测量的要求也日益迫切。三十多年来，虽然发表过很多有关微波衰减测量的文献，但全面论述这个问题的专著甚少，使从事这方面工作的人员深感不便。正是这种现状，激励着作者尝试对这一技术专题进行一次比较全面的回顾。

本书在国内外所发表的成果的基础上，结合作者的心得体会，力图比较全面系统地将微波衰减测量这一专门技术的各个方面反映出来。在叙述基本概念与原理时，尽量阐明其物理意义；在介绍各种测量系统、说明其特点的同时，注意了结合我国的实际情况和突出新技术、新水平；为了贯彻理论联系实际的原则，对每一种测量方法的具体步骤、实验方法问题与注意事项、误差分析等作了比较详细的讨论，并尽可能给出一些数量概念；考虑到标准衰减器在衰减测量中的重要性，书中列出了专门的章节加以介绍；对于衰减测量的某些共性问题，亦单独成篇，以期引起重视；有关衰减测量的一些新发展和衰减计量中的量值传递问题，也予以适当反映。通过这些内容，希望本书能够使读者在实际工作中多少感到一些方便。由于作者水平不高，疏漏错误之处可能不少，期望读者批评指正。

本书初稿完成于 1974 年，曾作为内部资料印行。这次公开出版，作了大量补充与修订。

在编写本书的过程中，曾得到本单位的领导与许多同志的支持和鼓励。中国计量科学研究院无线电室、七机部二院计量站功率组的同志们曾热情地提供资料，在此一併致谢。

作者

一九八〇年五月于北京

目 录

第一篇 衰减量和标准衰减器

第一章 绪论	1
第二章 衰减量的定义	4
2-1 衰减与插入损耗的定义	4
2-2 微波网络和散射参量	6
2-3 微波传输系统中的衰减器	11
2-4 衰减量的各种定义及其S参量表示式	14
参考文献	19
第三章 标准衰减器	21
3-1 截止式衰减器	21
3-2 迴转式衰减器	35
3-3 感应分压器	45
3-4 小结	54
参考文献	56

第二篇 衰减测量系统

第四章 信号源	57
4-1 对微波信号源的一般要求	57
4-2 微波信号源的自动稳幅	58
4-3 微波信号源的自动稳频	62
4-4 从信号源外部对微波信号实现幅度调制	66

4-5	可精确控制输出功率电平的稳幅源	67
	参考文献	69
第五章	测试传输线	70
5-1	匹配问题	70
5-2	连接问题	83
5-3	泄漏问题	89
	参考文献	91
第六章	检测指示器	92
6-1	常用的微波功率检测器	92
6-2	检测方式与灵敏度、动态范围的关系	96
6-3	提高指示器分辨力的方法	100
6-4	噪声对输出指示的影响	101
	参考文献	106

第三篇 衰减测量方法

第七章	功率比法	111
7-1	基本原理	111
7-2	测量系统	112
7-3	测量步骤	123
7-4	实验问题	125
7-5	误差分析	126
7-6	小结	130
	参考文献	131
第八章	音频替代法	132
8-1	基本原理	132
8-2	测量系统	135
8-3	测量步骤	140

8-4	实验问题与注意事项	142
8-5	误差分析	151
8-6	小结	164
	参考文献	166
第九章	中频替代法	167
9-1	基本原理	167
9-2	测量系统	170
9-3	测量步骤	190
9-4	实验问题与注意事项	191
9-5	误差分析	197
9-6	小结	208
	参考文献	210
第十章	高频替代法	212
10-1	基本原理	212
10-2	测量系统	215
10-3	测量步骤	227
10-4	测量误差	228
10-5	小结	231
	参考文献	232
第十一章	调制副载波法	233
11-1	基本原理	233
11-2	测量系统	238
11-3	测量步骤	249
11-4	实验问题与注意事项	251
11-5	误差分析	253
11-6	小结	260
	参考文献	261

第十二章 阻抗法	263
12-1 散射参量法	263
12-2 调配反射计法	274
12-3 驻波法	288
12-4 小结	296
参考文献	298
第十三章 自校准法	299
13-1 基本原理	299
13-2 测量系统	312
13-3 测量步骤与注意事项	317
13-4 误差分析	321
13-5 小结	328
参考文献	329
第十四章 扫频法	330
14-1 微波扫频测量系统概述	330
14-2 测量系统和原理	333
14-3 测量步骤	341
14-4 误差分析	343
14-5 小结	358
参考文献	359
结语	360

第四篇 微波衰减测量中应用的一些新技术

第十五章 约瑟夫逊效应的应用	365
15-1 概述	365
15-2 超导量子干涉器件	366

15-3	利用干涉器件的衰减测量系统	373
15-4	误差分析	379
15-5	小结	382
	参考文献	383
第十六章 微波网络的自动测量		384
16-1	概述	384
16-2	自动网络分析仪	385
16-3	自动网络分析仪的误差分析	392
16-4	自动网络分析仪的误差估计	401
16-5	自动网络分析仪的典型测量实例	407
16-6	小结	411
	参考文献	412
第十七章 六端口测量技术		414
17-1	概述	414
17-2	基本原理	415
17-3	六端口反射计	420
17-4	六端口矢量电压表	426
17-5	六端口自动网络测试系统	430
17-6	六端口反射计的几何解释	438
17-7	推荐的六端口电路	440
17-8	小结	443
	参考文献	444
第十八章 衰减量值的传递		445
18-1	概述	445
18-2	衰减量值传递的误差流图	446
18-3	传递用衰减器	448

18-4 衰减量值的国际比对.....	457
18-5 小结.....	459
参考文献.....	460

第一篇 衰减量和 标准衰减器

第一章 绪 论

微波衰减测量技术是微波技术的一个重要组成部分。在许多微波系统中例如雷达系统、多路通讯系统等都要考虑微波功率在传输与发射中的损耗问题以及接收信号时的灵敏度问题，而这些都是和衰减测量分不开的；在研制与生产微波设备、仪表、微波元、器件的过程中，测试其性能的热测、冷测系统的建立及测试技术，也涉及到衰减测量技术；在建立功率、噪声的标准以及这些微波参量的计量中，衰减测量技术也与它们紧密相关。因此，随着微波技术在科学技术、国防及国民经济中的应用日益广泛，衰减测量技术也日益成为微波技术人员和计量部门所努力研究项目之一。纵观这一技术三十多年的发展历史，现已形成了一套比较完整的理论与方法，进入了成熟的阶段。

目前，在国际范围内，从总体上看微波衰减测量已经达到这样的水平：频率范围，由低频直到亚毫米波；测量量程，0.0001~170 分贝；测量精度， 10^{-2} ~ 10^{-4} 。

微波衰减测量技术大体包括以下几个范畴：

1. 研究衰减量的定义问题；
2. 研究测量原理与方法；

3. 研制标准衰减器和高精度、高质量的衰减器；
4. 研制各种衰减校准与测量装置；
5. 研究衰减量的计量与量值传递问题。

由于历史原因，使衰减量的定义在名词、术语与实际应用中仍有某种混乱，国际上亦未统一。然而实践中还是有一个通用的定义，这就是“衰减”。本书介绍的衰减测量方法和衰减器的校准定标，除另作说明者外，均依上述定义为准。同时在谈到“匹配”时亦指无反射匹配。目前实际应用的衰减测量方法，根据其原理可归纳为以下几大类：

1. 功率比法：依靠功率或相对功率的测量，根据基本定义确定被测衰减量；

2. 替代法：用精确已知的标准衰减器的变化量替代被测衰减量来确定被测衰减量；

3. 阻抗法：通过特定负载条件下的阻抗测量来确定被测衰减量；

4. 自校准法：使传输线上功率电平产生精确已知的相对变化，根据基本定义来确定被测衰减的变化量；

5. 扫频法：在宽频带上对被测衰减量实行直接、快速、连续的扫频测量；

6. 可以测量衰减的综合测量技术：例如约瑟夫逊效应、网络分析技术、六端口测量技术等；

7. 其它：例如通过测量 Q 值确定被测衰减量等方法。

1-4 的方法称为“经典”方法；5-6 是近年发展起来的新技术。总的看来，虽然出现了一些新技术和新进展，但大多集中在扩展频段、扩大量程、提高精度以及使测量过程简便快速等方面，而在提出新的原理使测量精度有质的飞跃上进展不大。所以衰减测量不象其它物理量如长度、频率等的测量那样有极

高的精度，至今仍未突破 10^{-4} 的限度。

衰减测量方法是本书的重点，故对于上述 1-5 的最广泛采用的方法将在第三篇中按测量原理、测量系统、测量步骤、实验问题与注意事项、误差分析诸方面作较为详细的论述，并对每种方法的重点加以简要小结及总的评述，使读者对各种方法的优劣与适用范围有一综合的、全面的认识，上述第 6 类方法将在第四篇简要介绍；至于第 7 类方法，因应用不广，且只能解决某些需要，故本书就不介绍了。

在各种衰减测量系统中，有一些共性问题，为了使读者从总体上对它们有所了解，特在第二篇中将它们按照信号源、测试传输线和检测指示器等三个方面加以综合介绍。

标准衰减器是衰减测量和其它微波参量测量的重要工具，它们与衰减测量技术的应用和发展有着密切的关系，第三章将对几种常用标准衰减器的基本工作原理、技术特性、产生误差的主要因素等问题详加讨论。

研究衰减量值的传递方法、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，在第十八章中对这一问题作了简要的介绍。

第二章 衰减量的定义

2-1 衰减与插入损耗的定义

本书主要讨论微波元器件对通过它们的电磁波所产生之衰减现象的定量测量问题。由于这些物件通常可看做一个等效的

电信网络，故可引用网络分析的理论来描述这种衰减现象。由此引出“衰减”一词的定义（参见图 2-1）：

在一个信号源与负载均与传输线匹配的无反射传输系统中（这时信号源的反射系数 $\rho_G = 0$ ，负载的反射系数 $\rho_L = 0$ ），网络插入前在负载上得到的功率 P_0 与插入后在同一负载上得到的功率 P_{L0} 以分贝表示的比值称为该网络的衰减 A 。即

$$A = 10 \lg \frac{P_0}{P_{L0}} \quad (2.1)$$

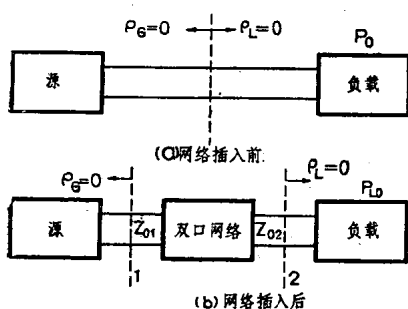


图 2-1 定义衰减的系统

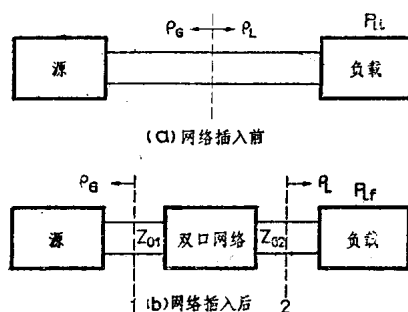


图 2-2 定义插入损耗的系统

日常的实际测量中，还常使用“插入损耗”一词，它定义为（参见图 2-2）：

在一个由任意的信号源和负载组成的传输系统中（这时存在有反射， $\rho_G \neq 0$ ， $\rho_L \neq 0$ ），网络插入前在负载上得到的功率 P_{Li} 与网络插入后同一负载上得到的功率 P_{Ll} 以分贝表示的比值，即为该网络的插入损耗 L_I 。即

$$L_I = 10 \lg \frac{P_{Li}}{P_{Ll}} \quad (2.2)$$

比较这两个定义，可见“衰减”就是传输系统中匹配良好无反射时所插入网络本身的“插入损耗”。

在微波衰减测量中，正确地使用这两个定义是极为重要的，为此作如下说明：

1. 衰减与给定系统中源和负载的阻抗无关，其值唯一地表征了网络本身的属性。这就是说，一个具有已知衰减值的网络，可以在任何系统上应用或作量值传递，不会因系统不同而使其衰减值有所改变。保证衰减值唯一性的基本条件是 $\rho_G = \rho_L = 0$ ；

2. 插入损耗与给定系统中源和负载的阻抗有关，其值不具有唯一性。同一网络插入不同 ρ_G 与 ρ_L 值的系统中，将得到不同的插入损耗值，故抽象地谈某一网络的插入损耗多大是没有意义的；

3. 目前微波衰减测量中所测的“衰减量”，都广泛采用“衰减”的定义以保证量值传递的唯一性。故在测量中要尽量采取措施（例如各种调配技术）力争使由网络向源和负载方向看过去的反射系数 ρ_G 、 ρ_L 近似为零。然而，由于定义衰减的条件 $\rho_G = \rho_L = 0$ 是理想化的，实际的传输系统很难完全达到，特别是在微波频段更加困难，故真正测量的量乃是在 $\rho_G \approx 0$ 、 $\rho_L \approx 0$ 情

况下该网络的插入损耗。只是在这种意义上，插入损耗的概念才有实用价值，且至今仍与“衰减”一词共同使用。因此，必须强调指出，以后介绍的各种衰减测量方法都是采用“衰减”这一定义，而将 ρ_G 、 ρ_L 不能真正为零所造成的差别作为失配误差处理。

4. 一个网络的衰减值恒为正数，它体现的纯粹是“能量的减小”。但网络的插入损耗值则不然，在某些传输系统中接入网络后可使原来不匹配的负载与源调整到共轭匹配（例如所接网络是一个无耗调配器），因而使 (2.2) 式中的 $P_{Li} > P_{Li}$ 。这时，这个网络的插入损耗就成为负值，也就是和失配时相比，由于能量反射的减小，负载上出现了“能量的增大”。因此，视网络及所在系统的情况而异，该网络的插入损耗并不总是意味着能量有损耗。

在微波技术发展过程中“衰减”一词曾与不少术语相混淆，出现同名异义或同义异名的现象，对此读者需审慎区别。与衰减有关的各种术语及定义详见 2-4 节。国外于 1972 年曾提出过“特征插入损耗”一词代替“衰减”的定义^①，但尚未普遍采用。

2-2 微波网络和散射参量

2-2-1 微波网络

对于微波电路，既可以采用电磁场理论的方法、也可以采用网络分析的方法研究。前者由于十分繁复，故不便于日常的技术工作。

^① 见 1972 年 12 月美国 IEEE 标准委员会批准的“IEEE 标准 474~1973”文件。