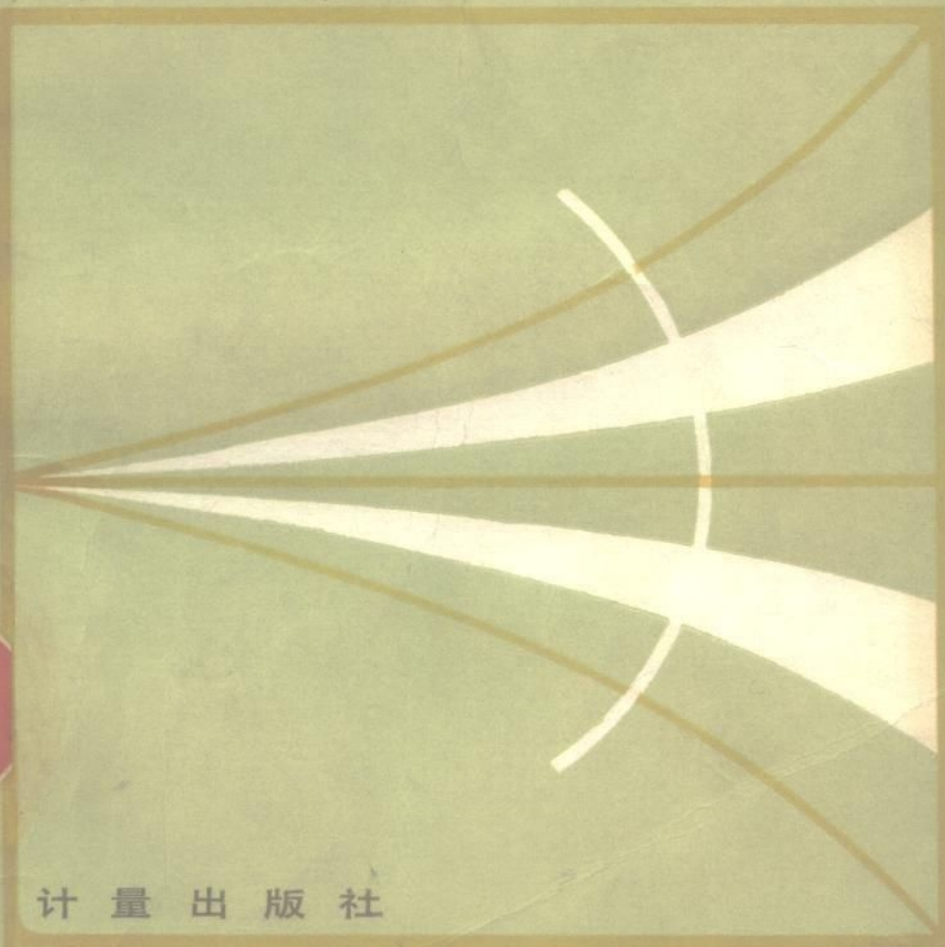


[英] F. L. 沃纳 著

微波衰减测量

宋孟宗 顾 及 等译



计量出版社

微波衰减测量

[英] F.L.沃纳 著

宋孟宗 顾 及 等译

计量出版社

1982

内 容 提 要

本书是系统论述微波衰减测量的专著。全书共分十五章，并有八个附录，每章末尾均附有大量参考文献。作者几乎博采了微波衰减测量领域的全部重要文献，综合数十年来的主要成果，从微波网络的基本理论出发，严格定义了关于微波衰减及其测量的各种常用名词术语，并用散射参数和信号流图导出了这些术语的数学表达式；全面阐述了各种衰减标准、微波衰减测量技术及其误差分析；对自动网络分析仪和超导量子干涉器件在微波衰减测量中的应用等新技术作了详尽介绍。此外，对自动测量问题也给予了较大的注意。

本书的读者对象是从事微波计量测试和微波工程的科技工作者，亦可供大专院校微波专业的教师、高年级学生和研究生阅读参考。

Microwave Attenuation Measurement

F. L. Warner

IEE Monograph Series 19

Peter Peregrinus Ltd.

First Edition: 1977

微波衰减测量

(英) F. L. 沃纳 著

宋孟宗 顾及 等译

计量出版社出版

(北京和里里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

开本 850 × 1168 1/32

印张 10 3/4

字数 279千字

印数 1—6 000

1982年11月第一版

1982年11月第一次印刷

统一书号 15210·157

定价 1.65 元

科技新书目：24—146

译 者 的 话

本书根据英国电气工程师协会 (IEE) 专题丛书第 19 卷 “Microwave Attenuation Measurement” 1977 年第一版译出。作者 F.L. 沃纳是微波衰减测量领域的权威, 凭借其丰富的理论造诣和实践经验, 在书中对微波衰减测量领域所用的各种标准、测量方法和误差分析, 进行了系统的阐述、分析和评价。但需指出, 本书所用“微波”一词的频域含义, 实际上包括 0.01—40 GHz 甚至包括毫米波段和亚毫米波段。全书共分十五章, 并附有八个附录, 大致可分成五个部分。

(1) 第一章介绍了衰减测量在微波雷达和微波通信工程中的重要性; 第二章从微波网络的基本理论出发, 精确定义了关于微波衰减及其测量的各种常用名词术语, 并用散射参量和信号流图导出了这些术语的数学表达式; 第十五章比较和评价了各种衰减测量方法, 并展望了发展前景。这部分是全书的纲目, 它不仅使读者建立起微波衰减测量的量是什么以及各被测量之间有什么关系的明晰概念, 而且向读者展示了微波衰减测量的概貌。这部分概念清晰、内容精练。

(2) 第三章和第四章详细介绍了微波衰减测量所采用的各种直流、音频、中频和微波标准, 其内容涉及各种衰减标准发展的演变过程、基本原理、工艺结构和误差分析等诸多方面, 叙述异常详尽。这两章对从事衰减计量和产品设计的科技工作者有很大的参考价值。

(3) 第五章到十三章, 作者结合一些典型装置, 全面地介绍和分析了各种衰减测量方法和有关衰减传递标准。这部分内容, 理论和实践紧密结合, 是全书的重点。作者在介绍各种测量方法的同时, 特别注意到介绍一些新技术, 诸如详细叙述了微波自动网络分析仪、超导量子干涉器件等新技术在衰减计量测试中的

应用；此外，对微波衰减的自动测量问题也给予了较大的注意。需要指出，在第九章关于小衰减测量的叙述中，没有介绍“功率方程方法”的应用，是其不足之处。功率方程方法与第 9.2 节的反射计法颇相雷同，但其概念是建立在端面不变参量的基础上的。功率方程方法设备简单、操作简便、准确度高，已为国内外所广泛采用^{〔1-4〕}。

(4) 本书专辟第十四章详细介绍误差处理方法。误差和不确定度是测量过程的固有特性，是表示测量质量的重要指标。但是，有关术语和具体处理方法颇不统一，这种不一致在一定程度上反映了概念上的混乱。本章明确定义了术语“误差”和“不确定度”，并讨论了误差的累积问题。作者认为，在不确定度的合成和结果表示中，必须给出尽可能多的资料和毫不含混地明确说明表示方式，并列举了微波衰减测量实际应用的具体例子。

(5) 八个附录是正文的有效补充，使本书内容更臻完整，每个附录都独立成章节。这不仅对于从事微波计量测试和微波工程的科技人员颇具参考价值，而且对于深入研究微波衰减计量测试的科学工作者也有较大的启发性。

综观全书可以看出：本书作者博采了微波衰减测量领域的几乎全部重要文献，综合了数十年来的一些主要成果，系统阐述了微波衰减测量技术的各个方面，每章末尾均附有大量参考文献。书中有些内容尚属第一次发表。本书内容充实、深浅适中、概念明晰，不仅对于从事微波计量测试、仪器设计制造以及微波雷达、微波通信工程的科技工作者是一本有价值的参考书，而且对于高等学校教师、高年级学生和研究生亦是一本很好的参考读物。

最后需要指出，自本书问世以后，微波衰减测量技术又有了新的进展，其中最具有代表性的是微波六端口自动网络分析仪(ANA)技术的应用^{〔5-8〕}。用六端口 ANA 在 3GHz 上测量小衰减的精密度为 0.0003 分贝，到 60 分贝时为 0.15 分贝，在频率扩展到 18 GHz 时，误差仅为 3GHz 时的两倍。用六端口 ANA 测量衰减的最

大优点是可将测量频率的上限扩展到 300 GHz 以上,同时又保证有很高的测量准确度。

本书出版后,微波衰减测量技术其他方面的主要进展包括:

(1) 1978年川神友照^[9]提出的阶梯相位调制方法。川神提出了两种测量系统,一种系统适用于衰减和相移的同时测量和自动精密测量;另一系统可用于大衰减测量。(2) 1979年T.Guldbrand-sen^[10]报导的一种适用于自动测量的精密回转衰减器,它所达到的精密度仅受噪声、短期漂移和开关元件可重复性的限制。

(3) 本书作者 1980 年导出了一组微波衰减测量中的失配不确定度的新方程^[11]。该方程由源和负载反射系数的模以及被测器件复数散射参量所给出。在校准精密回转衰减器时,应用新方程将使小衰减测量总的不确定度大为降低。

原书中有几处讲得不够清楚,为了忠实于原文,译文中未作增删,但个别地方有明显错误,译文中加了译者注。

本书由宋孟宗和顾及二人担任主译。梁文烈同志翻译了第十三章和第三章前两节,谢上次同志翻译了第九、十一、十二章;沈长青同志翻译了第五、十章,陈成仁同志翻译了第十四章;吴良济同志翻译了附录一至七,陈苏姜同志翻译了附录八。全书由陈成仁和宋孟宗同志校对。限于译校者的学识水平,不当之处在所难免,敬希读者指正。

译 者

1981 年 2 月

参 考 文 献

- [1] G.F.Engen, "An introduction to the evaluation of microwave systems using termination invariant parameters", NBS Mono., No 112, 1969.
- [2] 钟进, "功率方程概念及其应用", 无线电计量, 2 (1975), 30-62.
- [3] G.F.Engen, "An extension to the Sliding Short method of connector and adapter evaluation", J.Res.NBS, 75C, 2&4 (1971), 173-183
- [4] R.F.Clark, "Maximum limits of efficiency for low-loss reciprocal adapters", IEEE Trans., IM-25, 4 (1976), 312-314.

- (5) G.F.Engen, "The six-port measurement technique (a status report)"
Microwave J., 21, 5 (1978), 18.
- (6) 胡希平, "六端口技术——一种自动微波网络测量新技术", *无线电计量*,
1 (1979), 40-67.
- (7) C.A.Hoer, "Performance of a dual six-Port automatic network ana-
lyzer," *IEEE Trans., MTT-22*, 12(1979), 993-998.
- (8) G.F.Engen, "A review of the six-port network analyzer development
at NBS", *CPEM Digest*, 1980, p.323
- (9) T.Kawakami(川神友照) "Microwave attenuation and phase-shift meas-
urement using stepped phase modulation", *IEEE Trans., IM-27*, 1
(1978), 33-38.
- (10) T.Guldbrandsen, "Precision model for microwave rotary vane atten-
uator", *IEEE Trans., IM-28*, 1(1979), 59-66.
- (11) F.L.Warner, "New expression for mismatch uncertainty when mea-
suring microwave attenuation", *PIEE-Part H*, 127, 2 (1980), 66-69
(London).

原 序

三十年来已经发表了一百多篇关于微波衰减测量的文献。虽有少数几本书专辟一章讨论这个十分重要的课题，但多数内容均较陈旧。近年来，可以用于测量微波衰减的方法日益繁多，使刚参加微波工作的新手无所适从。本书博采所有已发表的有关此课题的重要文献，对各种不同方法进行了分析比较，有些比原文讨论得更加详尽。此外，还包含一些尚未报导的新内容。

本书主要是由作者为IEE假期学校所写“射频电学测量”的讲稿扩充而成。IEE假期学校是1973年在Surrey大学和1976年在Lancaster大学举办的。

尽管本书内容广泛详尽，但只要电子学知识达到中专水平的工人就不难理解其主要内容。本书所用主要符号一览表附在目录后面。波导代号与英国标准3939第2.3节一致。

作者的工作单位原叫Royal Radar Establishment (RRE)，1976年3月26日由两单位合并更名为Royal Signals and Radar Establishment (RSRE)。本书中凡提到作者及其同事们所做的工作，在合并前完成的就称为RRE的工作；在合并后完成的则称为RSRE的工作。

非常感谢现已退休的同仁Ian Harris，因为本书3.3节、14章、附录3、附录7和附录8的几乎全部内容均引自他迄今尚未发表的著作；附录8是由于他对超导的一些方面感兴趣而撰写的，这为我们提供了约瑟夫逊结用于衰减测量的简洁背景材料。

作者也深切感谢Charles Ditchfield，他对微波活塞衰减器有深入的研究，欣然为本书撰写了4.2节。

F.L. Warner

1976年10月

目 录

主要符号	(1)
第一章 绪 言	(9)
第二章 关于衰减的各种基本定义和表达式	(12)
2.1 插入损耗和衰减	(12)
2.2 衰减的反射分量和耗散分量	(14)
2.3 替代损耗	(15)
2.4 变换器损耗	(16)
2.5 电压损耗	(17)
2.6 网络效率	(18)
2.7 资用功率传输系数	(19)
2.8 失配损耗因子	(20)
2.9 级联二端口	(21)
2.10 置于隔离器之间的可变衰减器替代损耗的测量	(22)
2.11 失配误差和不确定度	(24)
2.12 泄漏	(26)
参考文献	(28)
第三章 直流、音频和中频衰减标准	(29)
3.1 开尔文 - 华莱分压器	(29)
3.2 感应分压器	(35)
3.2.1 引言	(35)
3.2.2 感应分压器的结构	(36)
3.2.3 感应分压器的基本理论	(39)
3.2.4 感应分压器的误差	(43)
3.2.5 两个多位十进感应分压器串联时的误差	(50)
3.2.6 双级感应分压器	(52)
3.2.7 小结	(54)
3.3 中频活塞衰减器	(55)
3.3.1 引言	(55)
3.3.2 活塞衰减器的理论	(56)
3.3.3 波型的激励和纯度	(62)
3.3.4 设计方法	(68)
3.3.5 误差来源小结	(73)
参考文献	(74)
第四章 微波衰减标准	(77)
4.1 回转衰减器	(77)
4.2 微波活塞衰减器	(90)

4.2.1	引言	(90)
4.2.2	活塞衰减器的一些典型设计	(92)
4.2.3	用作绝对标准的活塞衰减器	(96)
	参考文献	(99)
第五章	测量衰减的功率比法	(102)
5.1	单功率计法	(102)
5.2	双通道功率比法	(106)
5.3	采用稳幅信号源的系统	(109)
5.4	功率比法自动衰减校准装置	(114)
	参考文献	(115)
第六章	射频替代法	(117)
	参考文献	(123)
第七章	中频替代法	(124)
7.1	概述	(124)
7.2	频率变换	(126)
7.3	串联替代法的误差及其减小措施	(130)
7.4	并联替代法的误差及其减小措施	(131)
7.5	各种现代的中频替代装置评述	(132)
	参考文献	(134)
第八章	音频替代法	(136)
8.1	用测辐射热器作为平方律检波器的音频替代系统	(136)
8.2	加拿大国家研究院(NRC)的音频替代系统	(139)
8.3	调制副载波法衰减校准装置	(140)
8.3.1	引言	(140)
8.3.2	RRE 调制副载波系统详述	(142)
8.3.3	调制副载波法衰减校准装置的误差	(145)
8.3.4	用调制副载波系统测量大衰减的特种技术	(152)
8.3.5	用调制副载波系统自动校准回转衰减器	(155)
	参考文献	(159)
第九章	通过反射系数测量确定小衰减	(161)
9.1	驻波指示器法	(161)
9.2	反射计法	(164)
9.3	小结	(174)
	参考文献	(174)
第十章	扫频技术	(175)
10.1	引言	(175)
10.2	扫频系统中所用的各种器件	(175)
10.2.1	扫频信号源	(175)
10.2.2	宽带检波器	(180)
10.2.3	定向耦合器	(181)
10.2.4	PIN 二极管稳幅器	(181)

10.2.5 比值计	(184)
10.3 扫频衰减测量系统	(185)
10.4 小结	(192)
参考文献	(193)
第十一章 微波网络分析仪	(198)
11.1 引言	(198)
11.2 各种网络分析仪	(199)
11.3 固有系统误差的消除	(204)
11.4 其他校准方法	(210)
11.5 微波网络分析仪的误差源	(212)
11.6 不确定度的估算	(213)
11.7 小结	(215)
参考文献	(216)
第十二章 测量微波衰减的其他方法	(219)
12.1 Laverick 的三通道法	(219)
12.2 Peck 的自校准法	(220)
12.3 双通道零值法	(222)
12.4 单振荡器穿核脉冲法	(223)
12.5 Q 值法	(226)
12.6 短路测量线法	(229)
12.7 测量局部波导衰减的 Somlo 固定探针法	(231)
12.8 双热敏电阻的惠斯登电桥法	(233)
12.9 超导环约瑟夫逊结法	(235)
12.10 其他方法	(239)
参考文献	(240)
第十三章 衰减传递标准	(244)
13.1 引言	(241)
13.2 定向耦合器传递标准	(244)
13.3 定向耦合器波导开关传递标准	(245)
13.4 旁臂开关定向耦合器传递标准	(247)
13.5 可变波导衰减器传递标准	(249)
13.6 同轴衰减器传递标准	(251)
参考文献	(253)
第十四章 误差的消除和不确定度的确定	(255)
14.1 引言	(255)
14.2 误差和不确定度	(256)
14.3 概率的应用	(257)
14.4 多次反射产生的系统误差所引起的不确定度	(259)
14.5 不确定度的合成和结果表示	(260)
14.6 不确定度的确定及其表示的例证	(262)

参考文献	(266)
第十五章 结束语	(268)
15.1 各种现行衰减测量方法评述	(268)
15.2 前景展望	(271)
参考文献	(272)
附录	(273)
附录一 散射参数	(275)
附录二 信号流图	(277)
附录三 理想导电圆筒内的消失电磁场	(281)
附录四 回转衰减器两端叶片不共面和中间叶片衰减量不够对性能的影响	(301)
附录五 测辐射热器的平方律偏差	(303)
附录六 用调制副载波系统测量衰减时噪声引起的误差	(305)
附录七 复平面上圆的双线性变换	(307)
附录八 弱耦合超导环理论	(313)

主要符号

本书正文中已明确定义的带各种不同下标的那些通用符号不一一列出，在下标位置打一星号[*]代替。全书均采用 SI 制。

A_* = 衰减，单位分贝

A_c = 环形铁芯截面积

B_* = 磁通密度

B = 波导阶梯的电纳

C_* = 电容

C = 图13.5中定向耦合器的耦合参数

D_* = 开尔文-华莱分压器或感应分压器的位置

D = 使用麦逊不接触环路法则时求得的分母

E_* = 电场强度

F = 噪声系数（用功率比表示）

G_* = 电导

G_1, G_2 = 12.9节讨论的接收系统增益

H_* = 磁场强度

I_* = 电流

J = 测辐射热器常数

$J_n(x)$ = 第一类 n 阶贝塞尔函数

K_* = 常数

L_* = 电感

L_1 = 插入损耗，单位分贝

L_s = 替代损耗，单位分贝

L_T = 变换损耗，单位分贝

L_V = 电压损耗，单位分贝

M_1 = 发生器与二端口之间的失配损耗因子（第二章）

M_2 = 二端口与负载之间的失配损耗因子

M_1 = 测量衰减时的失配误差

M_s = 测量增量衰减时的失配误差

M_* = 互感 (第三章)

M = 式(4.13)定义的量

M_* = 测得的电压比 (第十一章)

N = 环形铁芯的线圈总匝数 (第三章)

N_s = 数字系统的基点

N = 式(4.4)定义的量

P_* = 功率

Q = 谐振腔品质因数

R_* = 电阻

R_p = 微波活塞衰减器的衰减率 (第四章)

R = 变换圆的半径 (第九章)

S_* = 电压驻波比

T = 变压器匝数比 (第三章)

T = 式(8.1)中的常数

T_0 = 标准参考温度 (290 K)

T = 图13.5中定向耦合器的传输参数

U = 式(8.1)中的常数

U = 不确定度 (第十四章)

U_r = 不确定度的随机分量

U_s = 不确定度的系统分量

V_* = 电压

W_0, W_2, W_1 = 当微波输入功率分别为0、 P_2 和 P_1 时, 测辐射热器上耗散的直流偏功率。

W = 从原点到变换圆圆心的距离 (第九章)

W = 雪崩二极管本征区宽度

X_* = 电抗

Y_* = 导纳

Z_* = 阻抗

Z_0 = 传输线或波导特性阻抗

a = 半径 (第三章)

a = 双线性变换式中的复数量 (第九章)

a = 矩形波导的宽边尺寸 (第九章)

a_1, a_2 等 = 复数入射波幅

a_i, a_o = 环形铁芯内、外半径

b = 环形铁芯宽度 (第三章)

b = 双线性变换式中的复数量 (第九章)

b = 波导阶梯的归一化电纳

b_1, b_2 等 = 复数出射波波幅

c = 环形铁芯的平均周长 (第三章)

c = 自由空间中的电磁波速度 = 2.997925×10^8 m/s

c = 双线性变换式中的复数量 (第九章)

d = 导线直径 (第三章)

d'' = 10股绞合电缆的直径 (第三章)

d = 活塞衰减器圆筒内径 (第四章)

d = 双线性变换式中的复数量 (第九章)

d = 定向耦合器的方向性, 单位分贝 (第十章)

d = 图 12.8 b 中表示的距离

e = 自然对数的底 = 2.718 281 828

e = 电子电荷 = $-1.602 19 \times 10^{-19}$ C

e_* = 信号幅度

e_0, e_1, e_2 = 自动网络分析仪校准常数

f_* = 频率

h = 普朗克常数 = $6.626 2 \times 10^{-34}$ J,

h_n = 通用波导的窄边尺寸

h_r = 减高波导的窄边尺寸

i_* = 电流

j = $\sqrt{-1}$

$k =$ 玻耳兹曼常数 $= 1.38063 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$k = \rho_{nm}/a$ (第三章)

$k =$ 双线性变换式中的复数量 (第九章)

$k = V_{B1}/V_A$ (第十二章)

$k = [\text{antilog}(A/20)]^{-1}$ (第十三章)

$k_0 =$ 耦合系数

l_* = 长度

$l_{11}, l_{12}, l_{21}, l_{22} =$ 二端口网络散射参数

$\bar{l} =$ 感应分压器一段绕组的平均漏感

$m =$ 调制深度

m_{11}, m_{12}, m_{13} 等 = 散射参数

$n = 10$ 段自耦变压器中抽头与地之间的段数 (第三章)

$n =$ 回转衰减器转动 90° 时所需蜗杆轴转数 (第四章)

$n =$ 测辐射热器常数 (第八章)

$n =$ 重复测量次数 (第十四章)

n_{11}, n_{12}, n_{13} 等 = 散射参数

$o_{11}, o_{12}, o_{21}, o_{22} =$ 图11.6和图11.7中的散射参数

$P =$ 测辐射热器上的射频输入功率

$p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22} =$ 图11.6中的散射参数

$q =$ 活塞衰减器在 $z = 0$ 时 H_{12} 波与 H_{11} 波的幅度比

$q_1, q_2 =$ 图11.6和图11.7中的散射参数

$r =$ 圆柱坐标系中的径向距离

$r = \frac{E}{V}(1 + m \sin \omega_m t)$ (第八章)

$r_{s1}, r_{s2}, r_{s3} =$ 开尔文-华莱分压器中的引线电阻和接触电

阻

$r_t =$ 环形自耦变压器的总串联电阻

$\bar{r} = r_t/10$

$r_1, r_2 =$ 图 11.6 中的散射参数

$s =$ 图13.5中短路-匹配开关的反射系数

s_* = 一组测量值的标准偏差

$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ = 二端口网络的散射参数

$S_{11b}, S_{12b}, S_{21b}, S_{22b}$ = 测量替代损耗起始时可变二端口的散射参数

$S_{11e}, S_{12e}, S_{21e}, S_{22e}$ = 测量替代损耗终结时可变二端口的散射参数

t = 叠层厚度 (第三章)

t = 耿氏二极管外延层厚度 (第十章)

$t = \frac{O_{21}Q_2}{1 - O_{22}Q_1}$ (第十一章) t = “学生氏- t ” 因子

$$u = \frac{P_{21}r_2}{1 - P_{22}r_1}$$

v = 耿氏二极管中的延迟区速度

v_s = 雪崩二极管本征区空穴运动速度

$v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}$ = 图11.7中的散射参数

w = 环形铁芯盒子的厚度

w_1, w_2 = 图11.7中的散射参数

$x = \Gamma_c$ 的实部 (第二章) $x' = \Gamma_2$ 的实部 (第二章)

$$x = \frac{v_{21}w_2}{1 - v_{22}w_1} \quad (\text{第十一章})$$

x = 加到 X 放大器的锯齿波电压的一部分

x = 波导壁到叶片的距离 (第十三章)

\bar{x} = 一组测量的平均值 (第十四章)

x_i = 一组测量的第 i 个值 (第十四章)

$y = \Gamma_c$ 的虚部 (第二章)

$y' = \Gamma_2$ 的虚部 (第二章)

$y = |\Gamma|e^{-2\alpha m'}$ (第十二章)

z = 圆柱坐标系中的轴向距离

z_1, z_2, z_3 = 图 3.16 b 中的串联阻抗

Γ_* = 反射系数