

微波測量方法

〔美〕M. 憚特 H. 辣帕璞德 主編 吳培亨 張善傑 王定章 王相元 譯

73.459
586

微波測量方法

〔美〕 M. 惲特 H. 辣帕璞德 主編

吳培亨 張善傑 王定章 王相元 譯

上海科學技術出版社

內 容 介 紹

本书共分廿章,全面介紹微波頻率的各种測量技术,其中包括微波傳輸、頻譜、微波器件、微波管、天綫和微波材料等方面的測量。

本书搜集的資料較丰富,对于每个量都介紹不同的測法,介紹測量方法时,先概述理論根据,然后逐一列出步驟,更佐以具体数字实例。对于仪器性能的要求、測量注意事項、測量結果的分析、誤差产生原因等都作了詳細的討論。

本书可供微波技术有关的工程技术人员和科学研究工作者参考之用,特別有利于进行系統規範化的实验工作;此外也可用作高等学校有关专业师生的参考讀物。

HANDBOOK OF MICROWAVE MEASUREMENTS

Moe Wind and Harold Rapaport (主編)

Polytechnic Institute of Brooklyn • 1958 年第二版

微 波 測 量 方 法

吳培亨 張善傑 王定章 王相元 譯

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

商务印书館上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/27 印張 31 9/27 插頁 4 排版字数 777,000

1963 年 12 月第 1 版 1964 年 11 月第 2 次印刷

印数 2,801—8,800

統一书号 15119·1753 定价(科六) 4.70 元

原 序

近年来我們看到了微波工程領域的迅速成长和发展。結果对于工程技术人員队伍的需要也在增加，这些人員應該熟悉表征微波工程的原理与技术。特別是，工程师和技术人員必須精通大量各色各样所需的測量方法。虽然有可能依照相当少的特征量(如电压駐波比、衰减等)来划分微波測量的范疇，但是一般地說，确定每个特征量都有許多不同的技术。不幸，許多关于各种可能的測量技术的資料散見于各处，因此很多完美的方法往往仍未采用。本书的目的就是对微波測量方法作对照和統一。准备时所持的見解是要滿足工程和技术这两方面人員的需要。

本书分成廿个主要的部分，各致力于一个特定的特征量。显然，这样的划分是任意的，不能理解作絕对的。每一章都介紹关于按步測量某一特征量的許多不同方法的詳細資料。在大多数情形中測量手續都列成逐步漸進的形式。凡是在可能的場合都插入例子，以补充說明測量步驟及有关的計算。此外，每一章一般都包含丰富的相关联的原理、設備描述、精确度的討論等。

主編者

第 二 版 序

本书在 1954 年春第一次印刷后不久，就很明显，原版不能滿足不断对于这类书的要求。我們决定，与其作第二次印刷，倒不如使第二版問世，以便包含扩充的参考資料和对于第一版的改正和修訂。

主編者

09819

譯 者 序

本书系根据英文本“Handbook of Microwave Measurements”一书譯出。这是一本二十多位微波工作者集体編写而成的总结性著作，比較全面、系統地介紹了在微波頻率的各種測量方法。书中在概述了測量的基本原理后，即举出各種方法，逐一系列明工作步驟、注意事項，有时更佐以具体測量的实例，說明各种方法的应用。对于仪器設備、电路安排、測量誤差等也有詳細的描述或分析。

本书初版于1954年，离現在已近十年，必然会感觉到某些內容不免落后于形势。例如某些仪器已經比較陈旧或者已經被更优秀的代替；又例如，最近迅速发展的微波鉄氧体旋磁材料和器件的測量完全沒有涉及，等等。但是，书中所討論的課題却是微波測量中最重要、最基本的方法，其意义十分深远。此外，本书搜集的資料比較丰富，叙述也有条理，同样不因時間的推移而逊色。所以，无论从选题的典型性、材料的丰富多彩或者叙述的系統有条理等方面来看，本书都不失为一本有用的参考书。

书中介紹了不少仪器型号及有关工厂、生产单位，等等。这些仅仅是为了便于了解或查考其确实的技术規格，不能认为該項仪器（即使目前还不是陈旧的）是唯一的或最优的。所引証的一些測量規範也只能作为参考，不能认为是当前測試和設備的标准；当变更設備时，应该相应地安排更恰当的測試方法。

譯者才疏学淺，对于原书的体会一定有不足之处，难免发生錯誤；热誠地希望讀者多多指教。

譯者謹序

于南京大学物理系

目 录

原 序

譯者序

緒 論	1
0-01 电磁波-水波的类型	2
0-02 无限空間中的电磁波	7
0-03 有限空間中的电磁波	10
0-04 微波測量有关的基本量	12
第1章 頻率和波长的測量	25
1-01 頻率和波长之間的关系	25
1-02 頻率和波长測量中的一般考虑	26
1-03 用开縫綫段測量波长	28
1-04 用 $L-C$ 調諧电路頻率計測量頻率	36
1-05 用諧振腔頻率計測量頻率	39
1-06 用外差式頻率計測量頻率	49
1-07 用頻率标准測量頻率	55
1-08 諧振腔頻率計的調整和校准	67
第2章 駐波比的測量	78
2-01 傳輸綫上駐波的实例	78
2-02 一般的开縫綫段技术	80
2-03 电压駐波比最小值位置的确定	88
2-04 高电压駐波比的測量	90
2-05 一些誤差的根源	92
2-06 开縫綫段的精密校准	94

4 目 录

2.07 电压驻波比的精密测量(开缝线段法)	97
2.08 电压驻波比的精密测量(谐振腔法)	100
2.09 电缆至电缆的电压驻波比	105
2.10 电缆至硬线的电压驻波比	105
第3章 衰减的测量	119
3.01 定义	119
3.02 测量衰减可用的一些方法	120
3.03 测辐射热计-伏特表法的设备要求	122
3.04 用测辐射热计-伏特表法测量衰减	129
3.05 射频替代法测量衰减	141
3.06 用中频替代法测量衰减	158
3.07 用音频替代法测量衰减	164
第4章 功率的测量	168
4.01 微波功率和功率测量的性质	168
4.02 低功率测量中的一般考虑	174
4.03 低功率测量的基本电桥电路方法	184
4.04 用于低功率测量的改进电桥电路	187
4.05 低功率测量的一般步骤	201
4.06 低功率技术推广至测量中、高功率电平	204
4.07 用量热器技术直接测量中和高功率电平	211
4.08 高功率测量的专用设备	216
4.09 可用的商品功率测量设备	218
4.10 器件的功率容量的测量(烧毁测试)	220
4.11 在脉冲功率条件下使用测辐射热计的特殊考虑	223
第5章 Q值的测量	230
5.01 Q值的定义	230
5.02 谐振电路的型式	232
5.03 基本测量技术	233
5.04 测量时的注意事项	238
5.05 半功率点(带宽)法测量Q值	239
5.06 开缝线段法测量Q值	251

5.07	Q 值的衰减时间测量法	257
5.08	Q 值测量的拐点法	259
第 6 章	阻抗的测量和其他等值表示法	261
6.01	两端(终端)结构的表示法	262
6.02	测量方法——两端结构	263
6.03	四端网络的表示法	270
6.04	各种表示法的效用	277
6.05	三点法	279
6.06	阻抗测量的半精密方法	285
6.07	半精密方法——耗散(有耗)的网络	295
6.08	测量的精密方法以及有关的表示法	312
6.09	多端网络	332
附录	用三个任意的输入输出测量来确定四端结构的等值电路参量	339
第 7 章	击穿功率和击穿电压的测量	341
7.01	影响击穿的因素	341
7.02	测量方法	342
7.03	击穿的检测	345
7.04	电离情况对击穿功率的影响	346
7.05	极限,误差和精确度	346
7.06	在 60 赫的击穿测试	350
第 8 章	传播常数的测量	352
8.01	绪论	352
8.02	由衰减测量确定衰减常数	355
8.03	由电压驻波比的测量确定衰减常数	357
8.04	由驻波图案导出衰减常数	360
8.05	用可变短路线测量衰减常数(在开缝线段和待测传输线之间存在不连续性)	363
8.06	用有耗短路线测量衰减常数(应用于低衰减值的测量)	367
8.07	相位常数的测量——开缝线段法	371
8.08	相位常数的测量——可变短路法	372
8.09	两种不同的导波波长的精密比较	373

第9章 頻譜分析	377
9.01 頻譜分析和雷达工作的关系	377
9.02 射頻脉冲中的頻率分布	378
9.03 典型的頻譜分析器	381
9.04 頻譜測量	389
9.05 低頻頻譜分析器	396
9.06 諧波和全景頻譜分析器	398
9.07 回波諧振腔	401
第10章 介电常数的測量	404
10.01 复数的介电常数	405
10.02 介电常数的有关量	406
10.03 波导中的介质試样視為四端結構	407
10.04 介质測量技术对非均匀、非各向同性材料的应用	410
10.05 波导或同軸綫中进行試驗的介质試样的制备	411
10.06 含有解超越方程的介电常数两点測量法	411
10.07 含有两个电抗終端器的介电常数測量	418
10.08 高損耗材料介电常数的測量	422
10.09 介电常数不依赖于試样安放位置的測量	425
10.10 复数介电常数不依赖于試样长度的測量	427
10.11 无耗介电常数不依赖于試样安放位置的測量	428
10.12 无耗介电常数不依赖于試样长度的測量	430
10.13 由“距离不变量”表示法推导介电常数	431
附录 I 介质試样和波导之間空隙的修正	434
附录 II 測量設備中的耗散对測得的数据的修正	435
附录 III 复数超越方程的近似解	443
附录 IV 平均法	444
第11章 射頻泄漏的測量	447
11.01 緒論	447
11.02 屏蔽室屏蔽效率的測量	447
11.03 电綫的泄漏参量的測量	452
第12章 混合接头	466

12.01	混合接头的某些例子	466
12.02	待测量的定义	469
12.03	输入电压驻波比的测量	471
12.04	隔离的测量	473
12.05	耦合系数的测量	479
12.06	电压驻波比的测量——不平衡电桥法	482
12.07	功率比较——用混合接头	486
12.08	TBX-1 BR 阻抗电桥	488
12.09	803 A 型甚高频阻抗电桥	491
12.10	IM-96/U 驻波指示器	492
12.11	1602-A 型特高频导纳电桥	494
第 13 章	定向耦合器特性的测量	497
13.01	定向耦合器的元件	497
13.02	双定向耦合器	498
13.03	待测量的定义	498
13.04	主线电压驻波比的测量	499
13.05	辅线电压驻波比的测量	503
13.06	耦合度的测量	505
13.07	主线介入损失的测量	507
13.08	方向性的测量	509
13.09	方向性结果的一般意义	535
13.10	各种测量方向性方法的比较	539
第 14 章	噪声的发生	540
14.01	噪声的一般分类	540
14.02	噪声的类型和噪声的发生	541
14.03	噪声发生器	552
14.04	噪声指数测量	567
14.05	噪声测量仪器	570
第 15 章	半导体二极管特性的测量	579
15.01	变频损耗的测量	579
15.02	噪声温度、噪声指数、噪声比的测量	595

15.03	Y 因数的测量	600
15.04	仿真半导体二极管的结构	602
15.05	半导体二极管灵敏度的测量	604
15.06	射频阻抗的测量	609
15.07	中频阻抗的测量	612
15.08	平衡半导体二极管	618
15.09	使用和貯藏半导体二极管的注意事项;错误的测试	621
15.10	半导体二极管的机械和电结实性	622
15.11	半导体二极管和发射机的关系	622
15.12	半导体二极管烧毁的原因	624
15.13	半导体二极管烧毁的理论	625
15.14	半导体二极管烧毁测试	627
第 16 章	接收机特性的测量	635
16.01	噪声指数	636
16.02	用各种发生器测量噪声指数	637
16.03	用不同的检波器测量噪声指数	642
16.04	单级噪声指数的测量	648
16.05	射频响应曲线的测量	649
16.06	射频增益或传输损耗;镜频和中频抑制	653
16.07	射频增益的测量——高阻抗变频器	653
16.08	射频增益的测量——低阻抗变频器	656
16.09	作射频测量的一般注意事项	659
16.10	统调的测量	661
16.11	加热漂移的测量	661
16.12	重复频率漂移的测量	662
16.13	自动频率控制调谐系数的测量	662
16.14	本地振荡器辐射的测量	663
16.15	变频增益的测量	664
16.16	振荡器注入的测量	665
16.17	中频响应曲线的测量	667
16.18	中频增益的测量	669

16.19	对于脉冲調制的中頻响应	671
16.20	中頻脉冲响应的測量	672
16.21	自动增益控制特性的測量(中頻)	674
16.22	柵地-阴地級联放大器中和的測量	675
16.23	檢波器效率和綫性的測量	675
16.24	等值加载的測量	677
16.25	鉴頻器响应曲綫的測量	678
16.26	自动增益控制特性(第二檢波器)的測量	679
16.27	自动頻率控制特性的測量	684
16.28	視頻响应曲綫的測量	687
16.29	視頻增益的測量	689
16.30	視頻脉冲响应的測量	690
16.31	直流恢复电路特性	690
16.32	超再生式接收机測量	692
16.33	半导体二极管-視頻接收机測量	694
第 17 章	調速管特性的測量	696
17.01	反射式調速管的工作	696
17.02	在諧振腔間隙中的場引起的电子注的速度調制	697
17.03	在反射极区域的聚束	697
17.04	振蕩的模式	698
17.05	諧振腔对波导的耦合	699
17.06	反射式調速管模式的測量	700
17.07	效率的測量	705
17.08	頻率牵引的測量	705
第 18 章	磁控管特性的測量	709
18.01	磁控管效率	709
18.02	磁控管效率的測量	709
18.03	磁控管的稳定性	715
18.04	磁控管熄火数的測量	717
18.05	磁控管的頻率牵引	724
18.06	頻率牵引的測量	725

第 19 章 双工管特性的测量	732
19-01 双工管的功用	732
19-02 双工管的一般性质	733
19-03 泄漏能量	735
19-04 收发管和前置收发管中总泄漏功率的测量	736
19-05 尖峰能量的测量	740
19-06 平顶功率的计算	744
19-07 直接耦合功率和衰减	744
19-08 电弧泄漏功率	747
19-09 谐波泄漏	747
19-10 电弧的损耗	748
19-11 收发管和前置收发管恢复时间的测量	751
19-12 反收发管恢复时间的测量	754
第 20 章 天线测量	757
20-01 天线特性的定义	757
20-02 设备要求	758
20-03 辐射图案的测量	760
20-04 输入阻抗的测量	767
20-05 偏振的测量	768
20-06 增益的测量	770
附 录	773
A. 史密斯图的应用	773
B. 雷基图的应用	781
C. 传输线图的应用	784
D. 阻抗匹配技术及其限制	812
索 引	827

作者: Anthony B. Giordano and Harold Rapaport

緒 論

當我們在低頻或直流的系統進行電測量時，電磁場和波之傳播的概念通常是無甚意義的。在低頻，電路元件（綫圈、電容器、電阻器）的實際尺寸可以做得比波長小，因此在穩定狀態可以認為電壓和電流的效果是在整個系統各處同時建立起來的。進一步，系統中各種不同的元件可以用一定的常數來表征（例如 L 或 C ），這些常數都不依賴於時間或空間。所以在低頻電路中對電磁場的任何分析或考慮均可略去。這便是把電路元件視為“集總”的網絡分析的观点。很好地建立起來的電壓和電流的概念具有確定的和唯一的意義，並且因為在特定頻率兩者的相互關係能迅速確定，並能對系統作完全的描述，所以沒有必要深究複雜的電磁場的本質。

在電磁能量的頻率增加時，電路元件（測量儀器也然）的尺寸如果還須比波長小，它們將無實際的尺寸。一般地，發生這種情形的頻率定為 10^9 赫的數量級。在這個頻率範圍內，從分析的观点看來，忽略場是不適當的。元件的電性質不能認為是集總的，電容和電感的普通概念亦將失去其意義。事實上，就是“電壓”這一名詞亦將失去其確切的意義，因為在某一瞬時，電場強度在兩點之間的綫積分 $\int E \cdot ds$ 亦不復與路徑無關。電流也有同樣的情況。因此很明顯可以看出，在微波頻率不再可能用電壓和電流為唯一的集總元件的簡單網絡來描述系統的電性質。系統的电感、電容、電阻必須認為是分布于系統各處的，而且必須用電場強度和磁場強度的概念來代替電壓和電流的概念。此外，當頻率增加時，通常的低頻傳輸技術和測量技術已不能推廣，而必須終於放棄。因此，

如果想获得有意义的测量和分析的话，必须把注意力集中于电磁场上。

本书这一章的目的是介绍基本的电磁场概念，它们表征微波测量的观点和技术。

0.01 电磁波-水波的类型

使电磁波传播形象化的最简单方法可能是同水波进行比较。在很多方面电磁波是同水波类似的。当水的静止表面突然受到扰动后，可考虑发生了一系列事件。扰动的直接作用下，即可看到从该区域发射出水波，并且以不断变大的圆圈形向外传播。如果，以一片软木漂浮在水面为例，则我们将看到它开始作上下振动，不过一定要经过充分长的时间，才能使波动从扰动点行至软木。再者，如果保持扰动，并使其为周期性的（例如正弦形），则软木将以确定和一样的节拍在最大和最小位置（相对于未扰表面而言）之间上下振动。从这些观察中可以得出结论，运动（能量）由扰动源通过水波传至软木上，并且这种传输是以一定的速度进行的。进一步还可以观察到波之传播方向是同扰动力运动的方向成直角的。观察电磁波将获得类似的图象。在空间的每一点（或沿着一条传输线），电场和磁场强度随着时间周期地在最大和最小值之间变化，并且在垂直于电场和磁场两者的方向传播。另外，如果设想观察者将时钟停住，而测量这些电磁波的量在空间的变化，则他将发现电场和磁场强度是各点不同的，一如水波中的波峰和波谷。

1. 无限漫延媒质中的水波

考虑如图 0.1 所示的将能量从讯号源经波而传输至终端的典型系统。如果认为传输媒质是水，则所生成的水波将以确定的速度从扰动源发出，并具有随时间和空间变化的特殊结构。如果假设讯号源产生正弦激发，则波扰动将维持下去。若再假设媒质是无限漫延的，则不会出现反射。

当波离开扰动源向前行进时，可用一组坐标 x, y, z 和时间来描述它。当认为媒质无耗时，图 0.2 说明传播波的时-空依赖性。坐标系由图

0.2(a)规定,而扰动激发则取沿 y 轴的方向,如图 0.2(b)所示. 产生的波沿着 x 轴传播,其振幅决定于时间和 x ; 波沿着 x 轴的时-空变化可见图 0.2(c). 如果注意空间某一定点(例如 x_1)上振幅随时间变化的关系,则由图中垂直的 x_1 轴可以看出振幅由时间 t_1 为最大开始,在 t_5 时通过最小值,而在 t_9 重又回至最大. 另一方面,如果对特定的一段时间内振幅的空间变化有意义时,则可应用图中所画的虚线. 显而易见,若时间增加,则扰动在 x 增加的方向上行进. 在图 0.2(c) 中,平面 x_1 和 x_2 选得相距 $1/2$ 波长,而

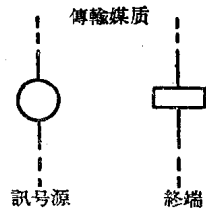


图 0.1 由波傳輸能量的系統

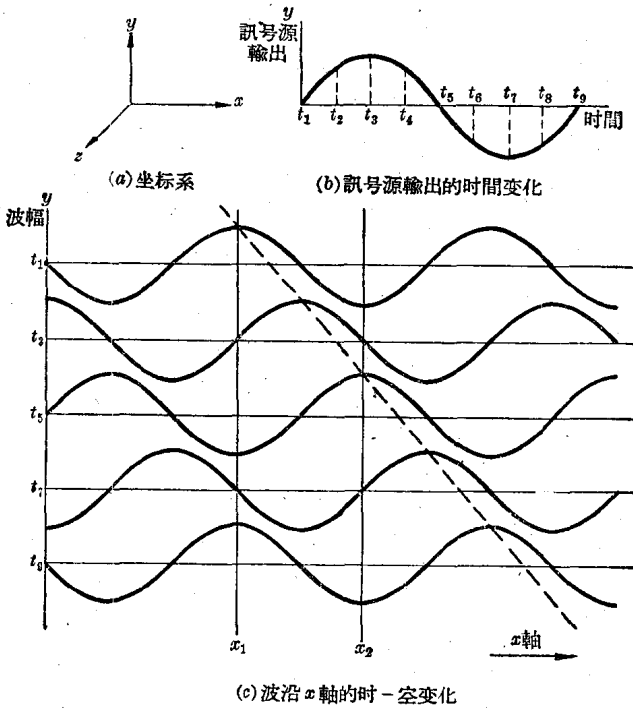


图 0.2 平面波的傳播

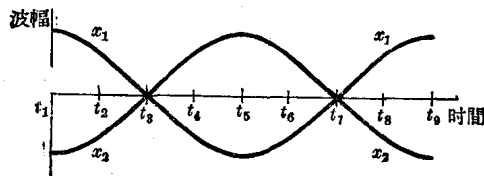


图 0.3 平面波在傳播軸上两个位置的时间变化

图 0.3 则表示 x_1 和 x_2 处振幅(同时测量)的关系作为时间的函数。

2. 范围有限的媒质中的水波: 驻波

如果传输媒质的范围是有限的, 原来的发射波将为一物体所阻, 产生反射波。如果扰动是时间的周期函数, 则发射和反射的波将组合而产生驻波。

举例来说, 假设图 0.1 系统中的终端将发射波完全反射, 使终端上的波幅为零。这一条件表示终端和媒质间的完全失配。反射波将迭加在发射波上而产生驻波, 如图 0.4 所示的形态。在这一图中, 不同的发射波 F 和反射波 R 的条件选得同图 0.2 中各时间间隔内存在的条件相对应。图 0.5 则表明合成的驻波作为时间和空间的函数。

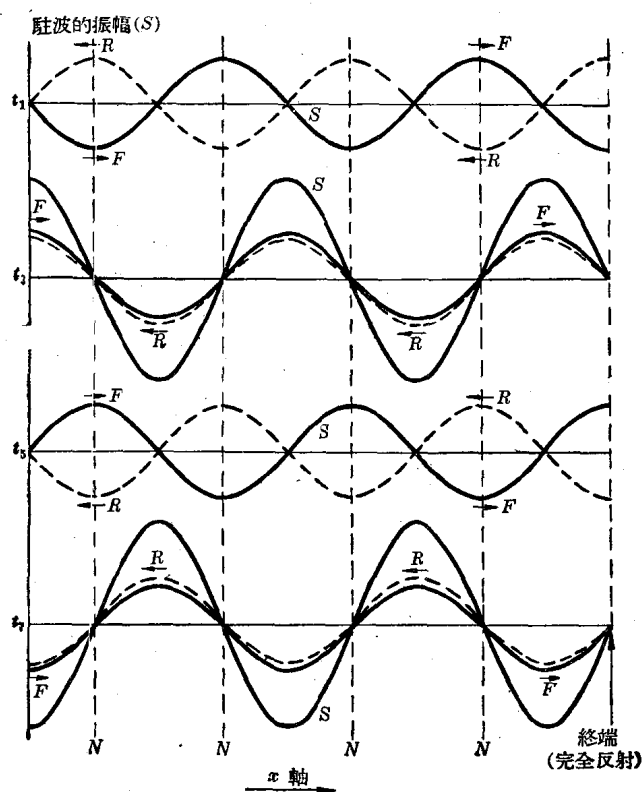


图 0.4 驻波的构成: 完全失配