

集成固体微波电路

吴万春 编



國防工業出版社

集成固体微波电路

吴 万 春 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了集成固体微波电路的理论和分析方法, 特别着重于微带电路和固体电路的分析。内容有微波集成总元件电路、微带线特性计算、微带滤波器、定向耦合器和功率分配器、微带阻抗匹配网络、肖特基二极管混频器、变容管和阶跃二极管倍频器和变频器、pin 管控制电路、雪崩管、体效应管以及微波晶体管振荡器和放大器等。

本书可供从事微波中继通讯、卫星通讯、雷达、导航、制导、电子对抗、遥控遥测、遥感技术, 射电天文学以及微波测量仪器等方面的工程技术人员以及大专院校师生参考, 也可以作为微波技术专业研究生参考资料。

集成固体微波电路

吴 万 春 编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 31 723 千字

1981年5月第一版 1981年5月第一次印刷 印数: 0,001—4,500册

统一书号: 15034·2094 定价: 3.15元

序 言

集成固体微波电路是一门较新的微波技术，近来应用广泛，发展很快，已成为微波通信、雷达、导航、制导、电子对抗、遥控遥测、遥感技术、测试仪器以及空间技术等领域中关键技术。在我国，从70年代开始，集成固体微波电路就受到极大重视，并已用到许多国防和民用工程中。

1974年以来，我曾从有关工厂和研究所中收集了集成固体微波电路方面的一些资料，编写成讲义，并在几个单位进行过讲解，反映尚好。现在原讲义基础上修改补充，整理出版。由于作者水平有限，错误难免，希读者指正。

集成固体微波电路虽然是一门新技术，但它是在原有微波理论上发展起来的，是电磁场理论和网络理论的具体应用。为了更好地把理论和实际结合起来，编写中尽量把理论推导和工程设计联系在一起，使得读者在工程设计中不断提高理论，为进一步发展打下基础。

本书共分十七章，包括两大部分。前九章是无源微波电路，主要阐述微波网络的综合理论和微带线的传输理论以及微带元件电路的网络综合和工程设计。后十章是有源微波电路，主要阐述微波混频器、倍频器和变频器，开关、衰减器和移相器，放大器和振荡器的基本原理以及它们的工程设计。有关微波半导体器件的工作原理也作了必要阐述，以备从事微波电路工作者，了解器件的基本知识。本书还给出大量设计实例，以为从事实际工作人员的参考。

在本书的编写过程中，西安邮电器材厂技术科和情报室的同志曾给予帮助，吴小平同志承担了本书全部描图工作，在此谨向他们致以感谢。

吴万春

目 录

第一章 集成固体微波电路概论	1
1.1 引言	1
1.2 集成固体微波电路简介	1
1.3 微波集成电路的基片材料	2
1.4 微波集成电路的导体材料	3
1.5 集成固体微波电路的元件和电路结构	4
1.6 集成固体微波电路的问题	5
第二章 微波网络基础	7
2.1 引言	7
2.2 传输线的特性	7
2.3 单端口网络	10
2.4 双端口网络	12
2.5 微波网络的散射矩阵	18
2.6 双端口网络的传输矩阵	21
2.7 双端口网络的衰减和插入衰减	23
2.8 对偶定理	24
2.9 福斯特定理与电抗函数	27
2.10 集总参数双端口无耗网络的综合	30
2.11 微波无耗等长传输线双端口网络的综合	32
第三章 微波集成集总元件电路	37
3.1 引言	37
3.2 电阻器	37
3.3 电感器	38
3.4 电容器	41
3.5 集总元件复合低通滤波器的设计	42
3.6 集总元件混合电路	43
第四章 微带传输线的特性	46
4.1 引言	46
4.2 保角变换	47
4.3 不对称空气带状线的特性	49
4.4 介质微带传输线的特性	54
4.5 用迭代渐近法计算微带传输线的特性	57
4.6 用格林函数法计算微带传输线的特性	60
4.7 微带传输线的衰减	64
4.8 微带传输线中的高次模	69
第五章 微带线的不连续性和电路元件	74
5.1 引言	74
5.2 微带线的不连续性和接头的计算方法	74

5.3 微带线的开路端	77
5.4 微带线的阶梯不连续性	81
5.5 微带线的电容间隙	84
5.6 微带线的拐角	86
5.7 微带线的T形接头	88
5.8 微带线的十字接头	90
5.9 用微带线实现集总元件	91
5.10 微带线谐振器及其等效电路	94
5.11 微带线的K变换器和J变换器	98
5.12 微带传输线到其他传输线的过渡器	101
第六章 耦合微带线的特性及其电路分析	103
6.1 引言	103
6.2 耦合微带线的传输线方程	104
6.3 耦合微带线的特性计算	107
6.4 耦合微带线的矩阵分析	109
6.5 耦合微带线节的等效电路	114
6.6 耦合微带线节的应用	118
第七章 微带线滤波器	121
7.1 引言	121
7.2 微波滤波器的低通原型	121
7.3 微带线低通滤波器的设计	125
7.4 频率变换	129
7.5 只有一种电抗元件的低通原型	135
7.6 微带线带通滤波器	137
7.7 微带线带阻滤波器	150
第八章 微带线定向耦合器、环形电桥和功率分配器	160
8.1 引言	160
8.2 耦合微带线定向耦合器	160
8.3 微带支线定向耦合器	169
8.4 微带支线阻抗变换定向耦合器	174
8.5 微带线环形桥	177
8.6 微带线三端口功率分配器	182
第九章 微带线阻抗匹配网络的设计	187
9.1 引言	187
9.2 1/4波长阶梯阻抗变换器	187
9.3 微带渐变线阻抗变换器	193
9.4 微带线低通滤波阻抗变换器	197
9.5 耦合微带线带通滤波阻抗变换器	203
9.6 电抗性负载阻抗匹配网络的低通原型	204
9.7 微带线带通阻抗匹配网络的设计	207
9.8 负阻负载阻抗匹配网络的低通原型	215
9.9 微带线负阻负载匹配网络的设计	220
第十章 微波集成表面势垒二极管混频器	223

10.1	引言	223
10.2	表面势垒二极管的物理特性	224
10.3	表面势垒二极管等效电路和电路参数	228
10.4	微波二极管混频器的网络参数	230
10.5	微波二极管混频器的变频损耗	233
10.6	微波二极管混频器的噪声性能	237
10.7	微波集成单端混频器	240
10.8	微波集成平衡混频器	245
10.9	微波集成平衡混频器对	252
10.10	微波集成双平衡混频器	256
10.11	微波集成双平衡混频器对	259
第十一章 微波集成参量放大器		261
11.1	引言	261
11.2	变容二极管的基本理论	261
11.3	变容管的等效电路和电路参数	266
11.4	非线性电抗电路的基础理论	268
11.5	非简并参量放大器的特性	272
11.6	微波集成单管参量放大器的设计	279
11.7	微波集成双管平衡参量放大器	286
11.8	宽带集成参量放大器的设计	287
第十二章 微波集成倍频器和上变频器		298
12.1	引言	298
12.2	变容管的倍频特性	298
12.3	变容管倍频器的电路参数计算	301
12.4	微波集成变容管倍频器的设计	309
12.5	阶跃二极管的倍频特性和倍频器的设计	312
12.6	用开关电容分析阶跃二极管谐波发生器	320
12.7	微波集成上变频器的设计	330
第十三章 微波集成 pin 二极管控制部件		336
13.1	引言	336
13.2	pin 管的基本特性及其等效电路	336
13.3	pin 管的开关特性	339
13.4	微波集成 pin 管开关电路的设计	344
13.5	微波集成电调衰减器的设计	350
13.6	微波集成 pin 管移相器的设计	355
第十四章 微波集成雪崩二极管振荡器和放大器		364
14.1	引言	364
14.2	雪崩二极管碰越模的基本特性	364
14.3	微波集成碰越模振荡器的电路设计	370
14.4	碰越模振荡器的噪声	376
14.5	微带碰越模振荡器的频率稳定性	377
14.6	微波集成碰越模放大器	379
14.7	俘越模的基本原理和工作特性	383

14.8 微带俘越模振荡器的电路设计	390
14.9 微波集成俘越模放大器	392
第十五章 微波集成转移电子振荡器和放大器	395
15.1 引言	395
15.2 转移电子器件的静态特性	395
15.3 转移电子器件的动态特性	399
15.4 转移电子器件的振荡模	401
15.5 耿氏振荡器的特性	405
15.6 微波集成耿氏振荡器的电路设计	409
15.7 转移电子放大器	412
15.8 转移电子器件的其他应用	416
第十六章 微波集成晶体管放大器与振荡器	418
16.1 引言	418
16.2 微波双极晶体管的特性	419
16.3 微波场效应晶体管的特性	424
16.4 微波晶体管双端口网络的特性	429
16.5 微波晶体管双端口网络的噪声	444
16.6 微波晶体管高增益放大器的设计	452
16.7 微波晶体管低噪声放大器的设计	459
16.8 微波晶体管功率放大器的设计	464
16.9 微波晶体管振荡器	470
第十七章 单片微波集成电路	476
17.1 引言	476
17.2 半导体基片的微带传输线	476
17.3 半导体-二氧化硅基片的微带传输线	478
17.4 单片集成电路的微波器件	484
结束语	487
参考资料	488

第一章 集成固体微波电路概论

1.1 引言

40年代是微波技术的探索和研制的一个黄金时代。这时候主要技术是波导和同轴线电路，并以微波电子管作为有源元件，固体器件除老式的点接触微波二极管外，很少研制和应用。因而这时微波功率产生的代价高，效率低。电路设计主要靠经验，很少分析综合。计算的主要工具是计算尺。其后十余年，微波技术的发展极其缓慢，基本上处于停滞状态。

在60年代里，微波技术领域出现了不少有价值的研究成果。其中最主要的成就之一，就是集成固体微波电路的出现，它使得小型、轻量、耗能少，可靠性高的微波设备的实现成为可能。以前有人预言，微波技术已达到成熟的程度，没有多大发展前途了。但集成固体微波电路一出现，立即显示出强大的生命力，它的发展极其迅速，使微波领域又呈现出一派欣欣向荣景象。

60年代里，在微波技术上还有两大革命性的成就：一是设计出一些新型的微波半导体器件；一是应用计算机辅助来设计微波电路。而集成固体微波电路就是在这些科学成就的基础上发展起来，反过来它又是应用这些科学成果的典范。可以这样说，一个集成固体微波电路的设计者，如果不懂得微波半导体器件的原理，不知道计算机的微波电路设计程序，一定不能很好地完成他的工作任务。

本书的目的，在于介绍集成固体微波电路的一些基本概念和电路设计方法，这里包括微波集成的无源电路和有源电路的设计，以及一些有关的微波半导体器件的原理和应用。至于设计计算，主要依靠一些设计公式和曲线图表。关于应用计算机辅助来设计集成固体微波电路，限于篇幅，本书未曾涉及，希从事这方面工作的人员，应当注意这个问题。

1.2 集成固体微波电路简介

集成固体微波电路和一般低频集成电路一样，有半导体集成电路(或称单片集成电路)和混合集成电路两种形式。前一种是把微波半导体器件和无源元件都制作在一块半导体基片上所构成的微波集成电路；后一种是把微波无源元件制作在塑料、陶瓷、蓝宝石或铁氧体等介质基片上，而把微波半导体器件装配在上面所构成的微波集成电路。目前最常用的集成固体微波电路主要是采用混合集成电路，只有在毫米波波段内才用硅或砷化镓单晶基片来制作单片集成电路。这是因为，在通常的微波波段内，采用半导体基片损耗太大，效果不佳。但到毫米波波段上，元件间连接是个大问题，若采用半导体基片来制作单片集成电路，损耗既不太大，又可避免元件间连接的麻烦，真是两全其美。今后我们讨论的集成固体微波电路主要是混合集成电路，对于单片集成电路，留在最后一章加以讨论。

制作微波混合集成电路的典型方法如下。

(1) 基片制作

一般陶瓷基片必须经过粗磨、细磨和抛光三道工序，粗磨以达到所需尺寸，略留点余量；细磨以准确控制尺寸；然后抛光，以达到所需的表面要求。通常表面光洁度优于0.5微米 ($\nabla 12$)，即可保证基片有良好的性能。

(2) 基片金属化

基片磨光后，先真空蒸发200~400埃的铬，以便对主要导体（金或铜）提供良好的附着表面。然后真空蒸发2500埃的金层（或铜层），再电镀金（或铜）到5微米以上的厚度，这样就在基片上形成了金属化薄膜（镀铜膜时还须再镀一层金，以作为保护层）。

(3) 光刻

基片表面金属化后，即可进行光刻。首先在金属薄膜上涂上一层感光剂，然后把具有电路图案的底片放在感光剂上，进行曝光。曝光的基片进行定影和显影后，放入腐蚀剂中，把多余的金属薄膜腐蚀掉，留下的就是完整的电路图案。

(4) 最后把所需的微波半导体器件焊接到电路图案中器件所在的位置上，再装上屏蔽外壳和输入输出等接头，就构成了微波集成电路。

1.3 微波集成电路的基片材料

微波集成电路的理想的基片材料应具有以下的特点：

- (a) 相对介电常数大；
- (b) 损耗角正切小；
- (c) 在所需频率和温度范围内，介电常数应恒定不变；
- (d) 整块基片的各处厚度应恒定不变；
- (e) 电阻率和介质强度要高；
- (f) 热传导率要高。

各种基片材料的电特性列于表1.3-1中。表中没有包括象塑料那样的弹性基片。表中所列的相对介电常数 (ϵ_r) 和损耗角正切 ($\tan \delta$) 之值，是在10千兆赫和25千兆赫分别测得的，括号内之值是在9.28千兆赫下测得的。研究和测量表明，蓝宝石和高纯度的氧化铝(99.5%以上)用作混合微波集成电路的基片最为优越，其他材料基片也具有特定的用途。

表1.3-1 各种基片材料的电特性

材 料 名 称	相对介电常数(25℃)		损耗角正切(25℃)	
	10GHz	25GHz	10GHz	25GHz
96%氧化铝	8.9(9.2)	8.7	0.0006	0.0007
99%氧化铝	9.0(9.7)	8.9	0.0001	0.0003
99.5%氧化铝	9.5	9.0	0.0002	0.0001
99.9%氧化铝	9.9	—	0.000025	—
99%氧化铍	6.1	6.0	0.0001	0.004
99.5%氧化铍	6.1(6.8)	6.0	0.0001	0.004
石 英	3.78	3.78	0.00015	—
硼硅玻璃(无碱)	5.74	—	0.036	—
蓝 宝 石	11.0	—	0.0002	—
二氧化钛	90(100)	—	0.002	—
铁氧体/石榴石	13~16	—	0.0002	—

1.4 微波集成电路的导体材料

微波集成电路的理想的导体材料应具有以下特性:

- (a) 电导率高;
- (b) 电阻温度系数小;
- (c) 对基片有良好的附着力;
- (d) 有良好的可腐蚀性;
- (e) 有良好的可焊性;
- (f) 容易蒸发和电镀。

表 1.4-1 列出几种导体材料的特性。表中除示出它们的电特性外, 还示出它们与基片的附着力, 以及把它们附着到基片上的制作方法。这些制作方法是:

- (1) 真空蒸发;
 - (a) 通过掩模蒸发
 - (b) 在整个基片表面上蒸发, 然后光刻
- (2) 直流溅射;
- (3) 真空蒸发后再电镀;
- (4) 直流溅射后再电镀;
- (5) 印制和烧结。
 - (a) 图案直接印制
 - (b) 在印制和烧结剂上光刻图案
 - (c) 在电镀银剂上光刻图案

研究和测试表明, 在这些导体材料和制作方法中, 最好的制作微波集成电路的方法有二: (1)是真空蒸发铬-金薄膜再电镀金, 然后进行光刻; (2)是电镀银厚膜再进行光刻。此外, 对于特定的用途, 必须应用特定的方法, 这在研究具体电路时再进行讨论。

表1.4-1 各种导体材料的特性

材 料 名 称	与铜的电阻 率 之 比	δ (2GHz) (微米)	表 面 电 阻 $\left(\frac{\Omega}{2 \times 10^{-7} \sqrt{f}}\right)$	热 胀 系 数 ($\alpha_T / ^\circ\text{C} \times 10^{-6}$)	附着力	制作方法
银 Ag	0.95	1.4	2.5	21	坏	E, S_c
铜 Cu	1	1.5	2.6	18	很坏	E, P
金 Au	1.36	1.7	3.0	15	很坏	E, P
铝 Al	1.6	1.9	3.3	26	很坏	E
钨 W	3.2	2.6	4.7	4.6	好	S_p
钼 Mo	3.3	2.7	4.7	6.0	好	S_p
铬 Cr	7.6	4.0	7.2	9.0	好	E
钛 Ta	9.1	4.4	7.9	6.6	很好	S_p
Mo-Mg	$5 \times \text{Mo}$	—	—	—	很好	S_c

[注] E = 真空蒸发, S_p = 溅射, P = 电镀, S_c = 印制和烧结。

1.5 集成固体微波电路的元件和电路结构

集成固体微波电路同普通低频电路一样，是由有源元件、无源元件和传输线所构成。其中有源元件都是微波半导体器件，无源元件除集总参数元件外，分布参数元件是由相应的传输线所构成，因此与所用的传输线密切相关，下面分别简述之。

1. 微波固体器件

微波固体器件又称微波半导体器件，它是集成固体微波电路中的有源元件，是制作振荡、放大、检波、变频以及控制电路等组件所必不可少的部分。集成固体微波电路中最常用的固体器件有下列几种：

- (1) 表面势垒二极管（又称肖特基二极管）；
- (2) 变容管（包括阶跃二极管）；
- (3) 隧道二极管（包括反向二极管）；
- (4) pin二极管；
- (5) 雪崩二极管；
- (6) 转移电子器件（又称体效应管或耿氏管）；
- (7) 微波晶体管。

这些半导体器件各有各的电路应用，各有各的工作原理。以后我们将以这些半导体器件为出发点，在讨论器件工作原理基础上，就其电路应用来讨论各种组件的微波电路结构的设计和研制。

2. 微波集成传输线及其元件

集成固体微波电路的无源元件有用集总参数和分布参数元件两大类。集总元件主要用在微波低端，可用薄膜和厚膜技术进行制作，这种元件与低频集成电路元件相差不多，只不过更小些，制作工艺更复杂些罢了。分布参数元件随着所用集成传输线的不同，元件结构和设计方法就大不一样。用于集成固体微波电路的传输线，主要是微带线，此外还有悬带线、槽线、平面电路以及鳍线等。图 1.5-1 示出一个微波集成平衡混频器，其中一些无源元件和传输线都是用微带线构成。图 1.5-2 示出一个微波集成滤波器，它是用槽线构成。

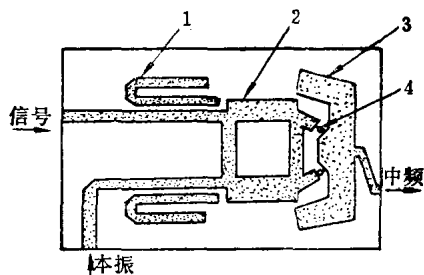


图 1.5-1 微带平衡混频器

1—镜像抑制滤波器；2—混合接头；3—高频旁路；
4—混频二极管。

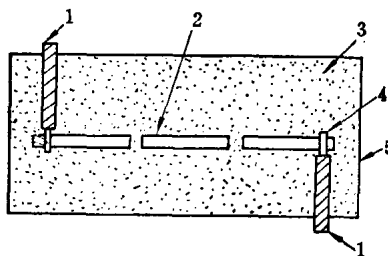


图 1.5-2 槽线带通滤波器

1—输入输出同轴线；2—槽线谐振器；3—金属化
表面；4—同轴线内导体；5—基片。

在这些电路结构中，都是把介质基片表面金属化，光刻出所需图案以构成无源元件，有源器件是另外焊上的。虽然微波集成传输线和分布参数元件有好多种，但目前在应用中

只有微带线最常见，其它电路结构有的部分应用，有的还在理论研究阶段，将来能否广泛应用，有待于进一步研究和发展。

表 1.5-1 列出各种微波电路结构的比较。

表1.5-1 各种微波电路结构的比较

电 路 结 构	微带结构	槽线或平面电路	集总电路	普通带状线	同轴线或波导
造 价	2	2	1	2~3	4
大小和重量	2	3	1	4	5
再现性	1	1	1	2~3	4
可靠性	1	1	1	2	3
电路损耗	2~3	3	4	2	1

1.6 集成固体微波电路的问题

一般来说，集成固体微波电路有以下一些问题须待探讨：

1. 推广和采用问题

集成固体微波电路虽然在理论上和工艺制作上都比较成熟，但目前我们还没有广泛地加以采用。原因之一，是由于一些从事微波技术工作人员对集成固体微波电路的设计和研制还不很熟悉，误以为其设计和研制比较困难，当前条件不够成熟，难以选用。其实不然，集成固体微波电路的电路设计和工艺要求，并不是我们所想象的那么严格，反而是设计简单，制作容易，设备费用不大，需要技术不多，一般工厂都可以进行设计研制。因此，必须广泛宣传，大力推广，使我国电子工业能更快地向前发展。

2. 可靠性问题

以前微波机器用的多是波导或同轴元件，因而它是极其稳定的，可靠性是很高的。但现在的集成固体微波电路，由于电路尺寸小，制造精度要求高，如果温度上升，电路的导体尺寸和器件特性就要发生变化，要想制作不亚于以前微波电路的稳定的集成固体微波电路，虽然有些困难，但不是不可克服的，事实上一些稳定性高的固体微波电路已经研制出来。

集成固体微波电路采用的是半导体器件，它的寿命和可靠性都比微波电子管为高，因而器件的可靠性提高了。同时许多元件可集成在一块基片上，减少了连接部分和可动部分，这样连接部分和可动部分发生故障的机会减少了。总的来说，可以期望集成固体微波电路的稳定性和可靠性都比以前的微波电路为高。

3. 使用问题

一般来说，微波集成固体电路几乎没有调整部件，发生故障也不可能进行局部修理，只能整个换掉。所以我们可以设想，采用集成固体微波电路的机器，不需要熟练的技术人员进行操作，一般人都可以使用。而原来的微波机器，在使用过程中经常要进行调整，对没有这方面训练的人是很难加以使用的。在目前技术水平下，实现无调整的微波电路困难还很多，但已做了不少努力来解决这个问题。例如，引入了电子可调元件（如变容管电调，YIG 磁调等），采用了电控元件，以及设计出平衡式之类的特殊电路来补偿元件的不平衡等。

4. 提高性能问题

由于集成固体微波电路的结构简单，连接部分少，器件不用封装，所以有可能提高电路特性和加宽带宽。在以前微波电路受到结构庞大、连接部分多和器件封装而影响其性能改进，现在采用了集成固体微波电路就能发挥其优良的高频性能。但应考虑到微波集成电路的损耗较大，功率容量小，所以仍有使其性能恶化的危险，设计时必须注意这一点。

5. 小型化和轻量化问题

集成固体微波电路的小型化和轻量化是显而易见的。和微波电子管的电路相比，它的耗能少，电源电压低，不需要庞大而复杂的电源，这是集成固体微波电路一个最大优点。这个问题对微波的某些特殊应用来说，是必不可少的。例如，卫星上的微波机器，必需具有这个条件才行。此外，在研究小功率的民用微波机器时，采用集成固体微波电路，更能充分发挥这方面的优点。

目前微波半导体器件的输出功率还不够大，不能同微波电子管相抗衡，这是限制集成固体微波电路应用一个主要问题。但利用多个半导体器件的功率合成办法，有可能克服这个缺点，相控阵全固体雷达就是这样做的。

第二章 微波网络基础

2.1 引言

在微波系统中,每个微波元件都可能和几个微波传输线相联接,按照所连接的传输线数目多少,微波元件可分成单端口、双端口、三端口、四端口等微波元件。每个微波元件可看成一个微波网络,随着微波元件端口数目的不同,微波网络也分为单端口、双端口、三端口、四端口等微波网络。实际所用的微波元件可高达四端口,四端口以上的微波元件就很少应用了。

微波网络是研究微波元件的一种方法,其目的有二:一是根据微波元件的结构,求得它的等效电路,推导它的工作特性,这就是微波网络的分析;另一是根据微波元件的工作特性,综合出它的等效电路,最后用微波结构实现之,这就是微波网络的综合。微波网络的分析 and 综合是现在从事微波的工程技术人员必须掌握的基本方法。

微波网络有线性与非线性之分。在线性微波网络中,电路参数为一常数,无论在什么复杂因素作用下,决不会产生新的频率分量。在非线性微波网络中,电路参数随信号的强弱而变,信号通过这种电路后,要产生频谱变换,微波工程中的振荡、调制、检波、变频等过程,就是通过非线性电路完成的。

本章首先定义出微波网络端口上的电压和电流,这对了解等效电路的意义是很必要的,然后导出线性网络的阻抗矩阵、导纳矩阵、转移矩阵、散射矩阵等,这给我们分析微波电路提供数学工具,最后讨论几个微波网络中常用的定理以及网络的综合方法,以供我们综合具体微波网络的需要。

2.2 传输线的特性

我们已经知道,无穷长均匀传输线是一种最简单的传输机构,它所传输的电磁波没有反射,功率流沿着传输线直向无穷远方。无穷长传输线可用一个端接匹配负载的传输线来代替,它所传输的波也没有反射。下面我们先研究无限长线上的电磁场,然后研究它的电压和电流,最后研究它的特性和阻抗。

1. 无穷长均匀传输线的电场和磁场

不管传输线的横截面的形状如何(矩形波导、圆波导、同轴线、带状线、微带线等),也不管其传输何种模式的波(TEM模、TE模、TM模或混合模),无穷长均匀传输线的电场和磁场可表示为

$$\begin{cases} \vec{E}_t = \sum_k V_k(z) \vec{e}_k(u, v) \\ \vec{H}_t = \sum_k I_k(z) \vec{h}_k(u, v) \end{cases} \quad (2.2-1)$$

式中, $\vec{E}_t$ 和 $\vec{H}_t$ 是传输线横截面上的电场和磁场, 它是空间坐标 (z, u, v) 的函数, 而 V_k 和 I_k 是纵向坐标 z 的函数, 是个标量, 叫做模式电压和电流, 它们可写为

$$\begin{cases} V_k(z) = A_k e^{-\gamma_k z} \\ I_k(z) = B_k e^{-\gamma_k z} \end{cases} \quad (2.2-2)$$

其中, A_k 和 B_k 是常数, $\gamma_k = \alpha_k + j\beta_k$ 称为传输常数, α_k 是衰减常数, β_k 是相移常数; 而 $\vec{e}_k(u, v)$ 和 $\vec{h}_k(u, v)$ 是横截面上坐标 (u, v) 的函数, 是个矢量, 叫做模式矢量函数, 它们表示传输线横截面上电磁场的分布。由此可见, 这个柱坐标系统中沿 z 方向传输的波具有如下特点:

(1) 在无穷长均匀传输线中, 对于随时间变化的正弦电磁波, 它的电场和磁场任一模式都是行波, 传输常数 $\gamma = \alpha + j\beta$ 。这个电磁波在 z 为常数的某一横截面上, 电磁场按 $\vec{e}(u, v)$ 和 $\vec{h}(u, v)$ 分布, 并且沿 z 轴的任何横截面上都是一样。同时随着 z 的不同, 场强按 $e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} \cdot e^{-j\beta z}$ 而变, 也就是说, 当电磁波从 $z = 0$ 传到 $z = d$ 处, 场强的振幅将衰减到原值的 $e^{-\alpha d}$ 倍, 相位滞后了 βd 。

(2) 在无穷长均匀传输线中, 任一模式的电场横分量 $\vec{E}_t$ 与磁场横分量 $\vec{H}_t$ 相正交, 在时间上同相, 两者的比值为—常数, 称为波阻抗 η 。传输线的波阻抗与其横截面形状和传输的模式有关。例如, 对于 TEM 模,

$$\eta_{\text{TEM}} = \frac{E_t}{H_t} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.2-3)$$

对于 TE 模,

$$\eta_{\text{TE}} = \frac{E_t}{H_t} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\lambda_g}{\lambda} \quad (2.2-4)$$

对于 TM 模,

$$\eta_{\text{TM}} = \frac{E_t}{H_t} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\lambda}{\lambda_g} \quad (2.2-5)$$

式中, ϵ 为传输媒质的介电常数, μ 是它的导磁率, λ 是无限传输媒质中的波长, λ_g 为该模式的波导波长。

(3) 在无穷长均匀传输线中, 沿传输线传输的功率 P , 不管波的模式如何, 场强的纵分量对功率传输都没有贡献, 即

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{S} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S \vec{E}_t \times \vec{H}_t^* \cdot d\vec{S} \quad (2.2-6)$$

这是因为, 纵向电场和纵向磁场的矢积为零, 纵向电(磁)场和横向磁(电)场的矢积虽不为零, 但因两者相位相差 90° , 故其平均值为零。同时由于在无耗传输线中 $\vec{E}_t$ 和 $\vec{H}_t$ 正交而且同相, 故有

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S \vec{E}_t \times \vec{H}_t^* \cdot d\vec{S} = \frac{1}{2} \int_S |E_t| |H_t| dS \quad (2.2-7)$$

式中, S 是传输线的横截面积。再把 $\eta = E_t/H_t$ 代入上式, 则得

$$P = \frac{1}{2} \int_S |E_t| |H_t| dS = \frac{\eta}{2} \int_S |H_t|^2 dS = \frac{1}{2\eta} \int_S |E_t|^2 dS \quad (2.2-8)$$

2. 传输线的电压和电流

为了把任意均匀传输线中某一模式的电磁波等效成为双导线中传输的波, 则必须把该模式的电场和磁场, 与双导线上的电压和电流发生联系。一种等效方法是把模式电压和电流作为等效双导线上的电压和电流, 这样等效传输线的特性阻抗, 就是该模式的波阻抗了。

另一种等效方法是沿用低频传输线上电压和电流的定义, 把该模式横向电场和磁场与等效双导线上的电压和电流的关系, 定义为

$$\begin{cases} V = \int_l \vec{E}_t \cdot d\vec{l} \\ I = \oint_l \vec{H}_t \cdot d\vec{l} \end{cases} \quad (2.2-9)$$

这样定义的电压和电流视模式和积分路径的选择而异。例如, 对于微带线中的准 TEM 模, 电压的积分路径须选在横截面上, 并且从中心导带到接地板, 如图 2.2-1 所示。于是该电压为

$$V = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

电流的积分路径也须选在同一横截面上, 并且围绕着中心导带, 于是该电流是

$$I = \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

在无穷长均匀传输线中, 按 (2.2-9) 式定义的电压和电流之比, 称为特性阻抗, 即

$$Z_0 = \frac{V}{I} \quad (2.2-10)$$

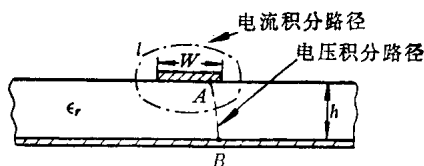


图 2.2-1 微带线中电压和电流的积分路径

对于薄窄微带线, 计算结果, 其特性阻抗是

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \quad (2.2-11)$$

把任意均匀传输线等效为双导线后, 线上的电压与电流的关系即可用传输线方程表示为

$$\begin{cases} \frac{-dV}{dz} = j\omega L_1 I \\ \frac{-dI}{dz} = j\omega C_1 V \end{cases} \quad (2.2-12)$$

式中, L_1 是传输线的单位长电感, C_1 是传输线的单位长电容, 由于假定传输线是无耗的, 故忽略了单位长电阻和电导。把 (2.2-12) 式合并, 消去其中 I 或 V , 则得

$$\begin{cases} \frac{d^2 V}{dz^2} = -\omega^2 L_1 C_1 V = -\beta^2 V \\ \frac{d^2 I}{dz^2} = -\omega^2 L_1 C_1 I = -\beta^2 I \end{cases} \quad (2.2-13)$$

解 (2.2-13) 式, 并假定传输线上只有入射波, 没有反射波, 于是得到 V 和 I 的解答是

$$\begin{cases} V^+ = V_0^+ e^{-j\beta z} \\ I^+ = I_0^+ e^{-j\beta z} \end{cases} \quad (2.2-14)$$