

现代微波滤波器的 结构与设计

上册

甘本祓 吴万春 编

科学出版社

现代微波滤波器的结构与计

(上 册)

甘本祹 吳万春 编

科 学 出 版 社

1973

内 容 简 介

本书是一部资料手册性的著作,它全面而系统地总结了微波滤波器领域的发展成果,提供了大量结构类型、设计图表和专用数据,讨论了选用原则和发展方向。全书分上下两册,上册包括现代微波滤波器的设计基础、重要图表数据以及低通、高通、带通、带阻微波滤波器的各种实用结构、设计步骤、调试方法和研制实例。下册包括微波阻抗匹配器、微波定向耦合器、微波大功率滤波器、微波多工滤波器、微波等时延网络、可调微波滤波器、介质滤波器、毫米波滤波器等各种特殊类型的微波滤波器及其他变形结构的设计和发展方向。

本书可供从事微波通讯、雷达、导航、电子对抗、卫星接力、导弹制导、测试仪器、微波集成电路等系统的生产和研制人员,以及大专院校师生参考。

现代微波滤波器的结构与设计

(上 册)

甘本祯、吴万春 编

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1973年8月第一版 开本:787×1092 1/16

1973年8月第一次印刷

印数:0001—15,050 字数:628,000

统一书号:1502·67

本社书号:198·15—7

定 价: 2.80 元

毛主席语录

路线是个纲，纲举目张。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

序 言

在微波技术发展之初，微波滤波器的应用还是极其有限，而设计也十分烦琐。但是，如今微波滤波器已成了许多设计问题的关键之一。它不仅广泛地用于微波通讯、雷达、导航、电子对抗、卫星接力、导弹制导、测试仪表等系统中，而且，其分析和设计方法可为许多微波元件所借鉴。现在，几乎可以这样断言：没有一个完善的微波系统不使用微波滤波器或其类似的结构了。因此，国内外对它的研制工作都很重视。为了适应这种需要，我们编写了这本书。

最初，我们曾打算翻译出版《微波滤波器、阻抗匹配网络与耦合结构》一书*，对此，刘佑铭、许铁聪、解建和、李翠珍、胡荣垣等同志曾付出辛勤劳动，他们和编者一起对该书的大部分章节进行了译校。但鉴于该书出版距今已经八年，这期间微波滤波器方面又有了许多新发展，遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”、“去粗取精”的教导，最后研究决定在参考该书的基础上重新进行编写，增加了许多反映当前发展水平的新的内容。分上下两册出版。

联系我国当前生产和科研需要的实际情况，我们认为应使本书面向实际工作的读者。因此，在编写中力图做到：一方面对在研制和生产任务中要选用和设计某种微波滤波器的读者，不必阅读大量篇幅，就可较快选定和设计出所需的滤波器。另一方面，对那些从事总体设计从而对微波滤波器的主要类型、基本性能、发展水平和结构特点有必要作全面了解了的读者，能提供一些全面的资料。此外，对那些从事它种微波元件或器件设计的读者，也能从中得到一些有用的资料和启示。因此在编写时我们尽量收入一些近几年出现的新结构、新方法、新方向。

但由于近年来微波滤波器的发展迅速，而编者水平有限，时间仓促，加之是对国内外资料进行综合编写，因此错误和缺点一定很多，希广大读者批评指正。

编 者

1972年7月

* G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones, "Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structures". McGraw-Hill Book Co., New York, 1964.

目 录

序 言	I
第一章 微波滤波器的地位、发展和选用	1
1.1 概述	1
1.2 微波滤波器的进展	1
1.3 微波滤波器的流程图	3
1.4 常用微波滤波器的比较	5
1.5 用滤波器来分离和迭加信号	6
1.6 阻抗匹配网络和耦合结构	7
1.7 时延网络和慢波结构	10
第二章 现代微波滤波器的设计基础	11
2.1 概述	11
2.2 滤波器的转移函数和衰减	12
2.3 滤波器的影象参数	18
2.4 归一化低通原型滤波器的一般概念	20
2.5 最平坦低通原型滤波器	23
2.6 切比雪夫低通原型滤波器	25
2.7 双终端低通原型滤波器的对称性	34
2.8 只有一种电抗元件的低通原型滤波器	34
2.9 椭圆函数低通原型滤波器	38
2.10 低通原型滤波器的时延特性	46
2.11 频率变换	52
2.12 元件损耗对滤波器的影响	56
第三章 微波滤波器元件	62
3.1 概述	62
3.2 横电磁波传输线的一般性质	62
3.3 同轴线的特性及其设计图表	66
3.4 带状线的特性及其设计图表	69
3.5 平行耦合带状线的特性及其设计图表	74
3.6 平行耦合矩形杆带状线	85
3.7 传输线的不连续性	90
3.8 传输线谐振器	97
3.9 平行耦合线的滤波器节	99
3.10 波导的特性	103
3.11 波导谐振器的谐振频率和无载 Q 值	106

3.12	波导中的膜片和销钉加载	110
3.13	波导中的小孔耦合	120
第四章	微波低通和高通滤波器设计	132
4.1	概述	132
4.2	用微波结构模拟集总元件	132
4.3	糖葫芦式同轴线低通滤波器	135
4.4	带状线梯型低通滤波器	140
4.5	带状线椭圆函数低通滤波器	141
4.6	半集总元件微波高通滤波器	144
第五章	窄带微波带通滤波器设计	148
5.1	概述	148
5.2	耦合谐振器带通滤波器的基本原理	149
5.3	K 、 J 变换器的微波实现及其等效电路	152
5.4	集总元件耦合谐振器滤波器	155
5.5	电容间隙耦合传输线滤波器	159
5.6	电容间隙和并联电感交替耦合滤波器	168
5.7	并联电感耦合波导滤波器	173
5.8	小孔膜片耦合波导谐振器滤波器	177
5.9	$1/4$ 波长耦合波导滤波器	181
5.10	十字形电容耦合宽阻带带状线滤波器	183
5.11	梳状线带通滤波器	191
第六章	宽带微波带通滤波器设计	198
6.1	概述	198
6.2	半波长谐振器平行耦合带通滤波器	198
6.3	$1/4 \lambda_0$ 并联或串联短截线滤波器	207
6.4	$1/2 \lambda_0$ 短截线和 $1/4 \lambda_0$ 联接线带通滤波器	215
6.5	交指型带通滤波器的一般概念	218
6.6	终端短路式交指型滤波器的设计	222
6.7	终端开路式交指型滤波器的设计	235
6.8	圆杆交指型滤波器的设计	239
6.9	电容加载交指型带通滤波器	253
第七章	窄带微波带阻滤波器的设计	260
7.1	概述	260
7.2	窄带微波带阻滤波器的设计公式	261
7.3	窄带带阻滤波器谐振器的微波实现	266
7.4	带阻谐振器的调谐及其耦合的实验调整	269
7.5	带状线带阻滤波器的设计	271
7.6	波导带阻滤波器的设计	274
7.7	损耗对带阻滤波器的影响	277

第八章 微波滤波器的准确设计的基本理论和带阻滤波器的准确设计	279
8.1 概述	279
8.2 由集总元件到分布元件的频率变换	279
8.3 单位元件和黑田变换	283
8.4 S 面网络的微波实现	286
8.5 基型微波带阻滤波器的准确设计	297
8.6 多节数基型带阻滤波器的快速设计	303
8.7 平行耦合式和支线式带阻滤波器的准确设计	317
8.8 宽阻带微波椭圆函数带阻滤波器的准确设计	325
8.9 窄阻带微波椭圆函数带阻滤波器的准确设计	334
8.10 指型椭圆滤波器的准确设计	337
第九章 微波带通滤波器的准确设计	345
9.1 概述	345
9.2 交指型结构的电容矩阵及其变换	345
9.3 交指型结构的 S 面等效网络	349
9.4 S 面高通原型滤波器的综合	354
9.5 交指型带通滤波器的试验设计	357
9.6 交指型结构的分布电容数据表	359
9.7 用数据表进行交指型带通滤波器的准确设计	388
9.8 $1/4$ 波长短截线带通滤波器的准确设计	397
9.9 半波长谐振器平行耦合带通滤波器的准确设计	400
第十章 微波带通滤波器的调试方法以及损耗的影响	402
10.1 概述	402
10.2 单加载谐振器 Q 值的测量和耦合调整	402
10.3 双加载谐振器的测量和调试	406
10.4 对称谐振器对的测试	408
10.5 多谐振器带通滤波器的调谐	410
10.6 带通滤波器频带中心衰减的计算	413
10.7 最小频带中心衰减的窄带带通滤波器的设计	413
参考资料	416

第一章 微波滤波器的地位、发展和选用

1.1 概 述

滤波器是无线电技术中许多设计问题的中心,可利用它们来分开或组合不同的频率,如在变频器、倍频器以及多路通信中。电磁波频谱是有限的,且须按应用加以分配;而滤波器既可用于限定大功率发射机在规定频带内辐射,反过来又可用于防止接收机受到工作频带以外的干扰。在阻抗匹配中也有象滤波器的网络,如在两个不同特性阻抗的传输线之间,或在有内阻的发生器与电抗负载(如参量放大器中的二极管)之间。有时需要得到一定的相位(或时延)特性,如脉冲压缩或展宽,或补偿其他滤波器或色散结构(如一段波导)所产生的相位失真等,也需要滤波器。总之,从超长波经微波到光波以上的所有电磁波段,都需要滤波器。

从传输线的观点,或从集总参数滤波器的观点,都可以研究微波滤波器。实践证明,后一观点对微波滤波器的总体设计更为有用。

微波滤波器可以按不同的观点进行分类:按作用分类(如带通、带阻等);按结构分类(如同轴线、波导等);按工作方式分类(如反射式、吸收式等);按应用分类(如可调或固定调谐的);按加载方式分类(如单终端的、双终端的等);按能量形式分类(电磁的、自旋波的、声的等);按频带大小分类(如宽带、窄带等);按功率容量分类(如大功率、低功率)等等。显然这些分类,多少有些随意性,因而在各种分类方式间都会有相当的重迭。

实用中对微波滤波器的要求是各种各样的,人们也抱着不同的目的来查阅有关滤波器的资料,有的人为了设计某一体系需要了解各种微波滤波器的结构、性能和选用原则,有的人却要为一部件选用特定的滤波器或寻找满足其特殊要求的设计方法,还有的则要求为其他微波元件、器件的设计查寻方法或工具等等。因此本章的目的是:

(1) 对微波滤波器提供一个纲要性的介绍,以便从品种繁多、性能各异的微波滤波器中,选用所需的结构和设计方法。

(2) 简要地讨论微波滤波器在微波工程中的地位、发展和应用,以使读者明确,本书的对象不仅是微波滤波器的研制人员,而且可能为更广大的读者服务,例如需要宽频带天线馈电设备的天线研制人员;需要宽频带阻抗匹配装置的微波电子器件的研制人员;需要微波时延网络的总体工程技术人员,以及其他特殊微波电路设计的广大工程技术人员等等。

1.2 微波滤波器的进展

在微波技术突飞猛进的发展中,微波滤波器是一个极其活跃的分支,以至要想全面而详尽的讨论其进展,需要相当的篇幅,这里只对近年来的主要进展和发展趋势作一简单的

概括。

1. 从个别应用到一般应用

如果考虑到一个微波空腔谐振器就是一个微波滤波器的基本单位的话,可以说它也是微波技术中研究最早的基本课题之一。但事实上或者是由于初期微波设备所承担的任务还较低级,或者是由于微波滤波器的分析、设计和制造均很繁难,因此,当初人们宁可直接应用单腔谐振器,而较少地把它们组合成具有更为优良性能的微波滤波器。但是随着微波理论和技术的发展,微波波段中电子设备的增多、频谱的拥挤,加之电子对抗技术的普遍应用,促使微波滤波器在应用的广度和深度上都进展极大。这点带着设计任务来阅读本书的读者,一定是深有感受的。而本章后面几节也将对一些基本应用作一番讨论。

2. 设计方法从繁到简、从粗糙到精确

过去人们用场与波的方法对一些简单的微波滤波器结构进行分析和设计,已感相当困难。而现在却可以成套地应用现代网络综合理论成果,顺利地进行各种微波滤波器的综合了,并有电子计算机所解出的大量的曲线和数据可用,简化了人工计算,提高了设计精度。

3. 型式多样和元件化、标准化

由于应用的广泛和设计制造工艺的进展,微波滤波器已从极少的几个品种发展到数以十计的结构类型。一些常用的结构已元件化和标准化。印刷电路式或微波集成电路式的微波滤波器亦开始广泛研制。

4. 与其他有源或无源微波元件和器件的结合,日益密切

现在,微波滤波器已成为无源微波元件的主角之一,它不仅能完成本身的任务,而且能代替其他一些微波元件的功能,或者把另外一些微波元件看成微波滤波器结构来进行设计。除了本书将要讨论的定向耦合器、阻抗匹配器、时延网络等外,例如图 1.2-1 所示

的微分相移器并不是滤波器,但它是基于平行耦合线的理论,也可看成一种滤波器来分析和设计。

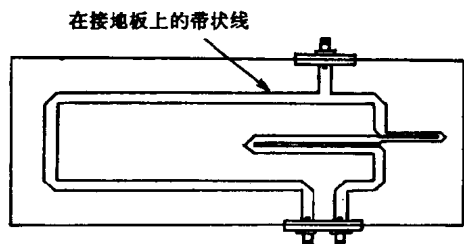


图 1.2-1 宽带 90° 微分相移器

半导体器件工艺飞跃进步及其向更高频的发展,已使得微波滤波器技术也用于各种半导体器件中。例如倍频器、变频器、放大器以及二极管相移器、开关和调制器等等,在微波集成电路中它们结合成一个整体。

5. 各种新型材料用于微波滤波器

微波材料的进步及其在微波滤波器中的应用,大大地提高了滤波器的性能。例如微波铁氧体、铁电体、等离子体、超导体都已开始成功地用于微波滤波器中。

6. 调谐的高速和自动化

众所周知,当初微波单腔谐振器的调谐已相当困难,更不用说多个谐振器组合成的滤波器了。但现在已可对微波滤波器进行快速电调,例如钇铁石榴石磁调滤波器和变容管电调滤波器就是最好的范例。

7. 向新波段进军

人们对毫米波和亚毫米波滤波器的兴趣正在日益增长,研制这一新波段的滤波器除

了发展厘米波波段已有的技术外(例如用 TE_{01} 圆波导段制成毫米波滤波器), 还广泛引用光学上的成果, 例如法布里-珀罗特谐振器以及其他各种滤波器和定向耦合器结构已从光学中援引过来。可以预料, 随着新型功率源和传输线的研制, 这些新波段滤波器的研制工作将更加活跃。

1.3 微波滤波器的流程图

微波滤波器的品种繁多, 性能各异, 而实用中对微波滤波器的要求又各不相同, 因此, 为了帮助设计者根据不同的需要来选择微波滤波器的类型、结构和设计方法, 下面两节将对此作一些简要的评述。

图 1.3-1 中以流程图的形式归纳了各种直接用于滤波目的的微波滤波器及其设计关系, 它们绝大部分在本书上册中都作了研究。图中注出了所在章节, 以便设计时查找。直接从流程图中读者就可概括了解到滤波器的类型(例如是带通还是带阻, 是宽带还是窄带等), 设计该种滤波器的方法(例如是准确设计, 还是近似设计, 有无现成数据表可查等), 以及各种微波滤波器在结构上和设计方法上的演变关系和联系。

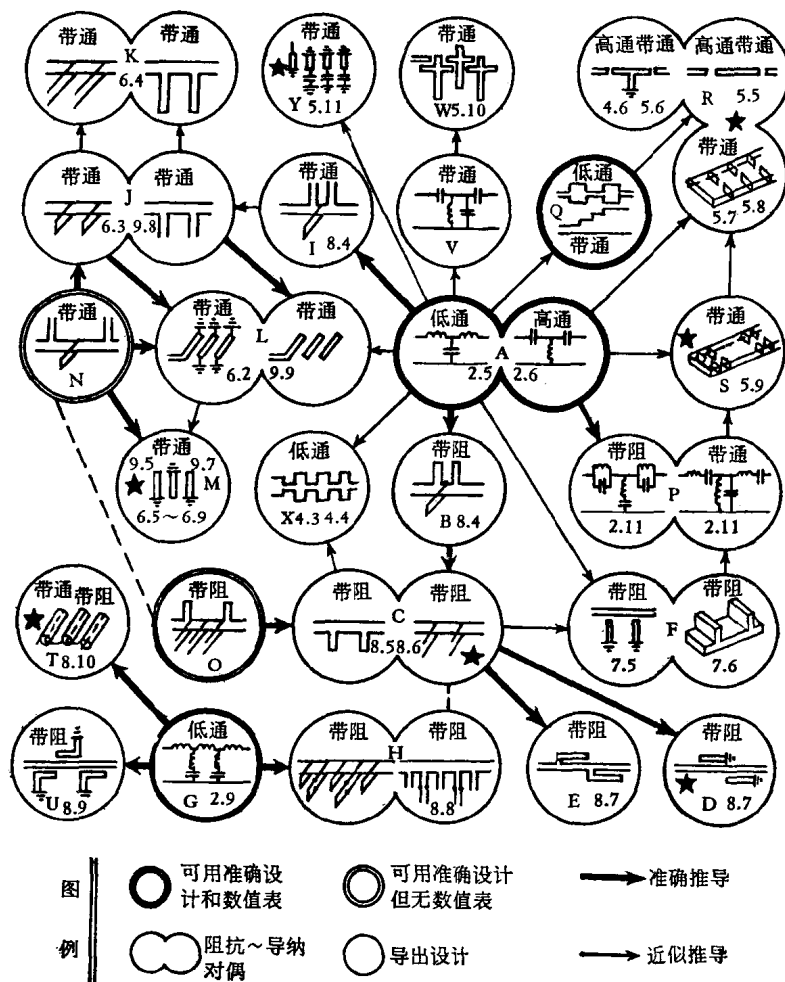


图 1.3-1 微波滤波器的流程图

为了加深对该图的了解,下面作几点补充说明:

(1) 图中的大多数滤波器虽然都用平行双导线或带状线表示,但情况绝不仅此,其中许多滤波器也可制成波导、同轴线或同轴线带状线混合形式,那样不仅能达到同样(甚至更好)的性能,而且有时结构会更加紧凑。事实上双导线构成的滤波器,除了在微波低端偶有使用外,一般是不太使用的。但它在表示滤波器的结构原理上比较明确,故不仅在本图中而且在今后具体滤波器的分析中,经常用作原理图。

(2) 图中只表示了极少几种低通或高通滤波器,这是因为微波滤波器事实上只适用于某一波段(既无需扩展到0,也无法扩展到 ∞),对其显示出通、阻特性。而所谓“低通”“高通”,都不过是相对而言罢了。对于低通,也许尚可解释,因为有时需要某种滤波器结构可以通过直流。而对于频带扩展到无限大的高通,则根本无法实现。实用中,是把微波宽带带通滤波器作为高通滤波器使用的。

(3) 区别于低频滤波器,微波滤波器的主要特点之一就是其尺寸可与波长相比拟(习惯上称之为“可公度”)。因而当波长(从而频率)变化时,它必然表现出周期特性,即滤波器除主响应外,还有周期性的副响应。因此,其第二个附加响应的位置(或者说它与主响应的距离)常是一个十分重要的指标。今后,在比较各种滤波器性能时,常用 ω_{SPB} 来表示带通滤波器第二通带的中心频率,而用 ω_{SSB} 来表示带阻滤波器第二阻带的中心频率。例如图中(W)圆中的带通滤波器,其 ω_{SPB} 可做到 $5\omega_0$ 或更高,因而实用于需要宽阻带的带通滤波器的场所。

(4) 描述微波滤波器响应优劣的指标之一是从通带过渡到阻带的快慢,称之为响应的“边缘陡度”或滤波器的“选择性”。对于具有椭圆函数响应的滤波器,今后将定义一个称为“选择性因数”的参量,而对于一般响应(例如最平坦或切比雪夫响应),则一般用其无限大衰减极点次数来表示其陡度。因此,在比较滤波器时常说明其有一次或高次衰减极点,显然,极点次数越高,边缘陡度越大。在带通滤波器中,如果主、副响应间没有衰减极点,则用主响应与第二通带间峰值衰减的分贝数作为性能的参考,用符号 $(L_A)_{USB}$ 表示之。例如图中(R)圆和(S)圆中的带通滤波器,它们在 ω_0 与 ω_{SPB} 之间的阻带区里(常称为上阻带),就没有衰减极点,而上阻带响应在 $(L_A)_{USB}$ 处变平。而且在这种情况下, $(L_A)_{USB}$ 的数值还受滤波器相对带宽的影响。此外,研究表明,在主、副响应间有一次衰减极点的滤波器,只要有任何失谐发生,靠近这个极点的地方就容易产生假信号(即一个寄生通带)。因此,今后当说到某滤波器在某处有一次衰减极点时,就应当同时想到调谐的准确性。

(5) 在分析微波滤波器时,常忽略其谐振器的损耗,但事实上谐振器的 Q 值是有限的。无载 Q 值越高,对于一定的相对带宽,该滤波器通带的插入衰减就越小,因此无载 Q 值也常是选用滤波器时应当注意的问题。在这方面波导或空腔型滤波器显然最为优越,但是它们的体积庞大,而且受高次模的威胁较大,因此,在需要宽带的场所,通常都选用带状线、同轴线或半集总元件的滤波器。然而许多带状线或同轴线滤波器中常需要有介质支撑,这势必使 Q 值进一步减小。为此,在比较滤波器时,说明其是自撑式或需要用介质支撑,也是十分重要的。

(6) 图中标以星号的滤波器,是表示它对于许多应用场所具有引人注意的折衷选择机会,然而并不是说它在各方面必然是最好的选用对象。常常出于特殊的考虑,可能宁愿选用某种不带星号的滤波器。

(7) 在下册中还将研究大量的微波滤波器及其有关结构, 它们有的是图中几种滤波器的组合(例如多工器), 这种组合常带有一定的任意性, 即根据具体任务而变, 因此不可能将它们都反映在图中。另外一些, 它们与图中滤波器有着密切的关系, 甚至可作为一种原型滤波器来用(例如阶梯变换器), 因而在图中就可以表示出这种关系, 如图中的(Q)等圆就是如此。还有更大量的滤波器结构, 它们与图中的滤波器有着完全不同的原理和 design 方法, 因此根本不必要将它们画在一张流程图中。而且由于它们各自适用于特定的场所, 读者从对它的有关论述中甚至从章节的名称上, 即可判断其取舍, 故在此无需赘述。

1.4 常用微波滤波器的比较

本节把一些常用微波滤波器分为几类, 加以评述, 作为选用的参考。

1. 直接耦合或1/4波长耦合谐振器滤波器

这是一种端耦合滤波器, 如图 1.3-1 中的圆(R)和圆(S)所示意。它适用于同轴线、带状线、波导各种形式, 在 $\omega = 0$ 处有一次衰减极点, 而附加通带以 $2\omega_0$ 为周期(即 $\omega_{SPB} = 2\omega_0$), 在主、副响应间无衰减极点, $(L_A)_{USB}$ 随相对带宽 \mathcal{W} 的增加而减少(当 $\mathcal{W} \leq 20\%$ 时, 其大小合适; 而当 $\mathcal{W} = 70\%$ 时, 它通常只有 5—10 分贝)。其设计方法有二: 一是基于集总元件低通原型, 另一是基于阶梯阻抗变换器原型。前法适于较小的相对带宽 ($\mathcal{W} < 20\%$) 和中等通带波纹的窄带带通滤波器的设计, 而后法则适用于较大的相对带宽 ($\mathcal{W} > 20\%$ 乃至倍频程) 和较小的通带波纹(例如 $L_{Ar} = 0.01$ 分贝) 的宽带带通或高通滤波器的设计。实用中, 同轴线高通滤波器以这种结构最为流行。在波导带通滤波器中, 它是最简单应用最广而性能又相当优良的形式。显然, 当作同轴线或带状线形式时, 需要介质支撑。

2. 平行耦合式带通滤波器

对于前一类端耦合滤波器, 当用 TEM 微波结构时, 要相对带宽大, 就要耦合紧, 即要求小而精确的间隙。若谐振器不用端耦合, 而用边耦合, 则较大的不太精确的间隙是可行的, 从而制造容易。这就得到图 1.3-1 中圆(L)所示的平行耦合滤波器, 它有开路耦合线和短路耦合线两种对偶形式, 在 $\omega = 0$ 和 $\omega = 2\omega_0$ 处有一次衰减极点, $\omega_{SPB} = 3\omega_0$ 。它既可用于窄带也可用于宽带, 但当用于宽带时, 为了得到谐振器间的强耦合, 就要用厚带或三层交错薄带的形式, 这样结构就较复杂且需要支撑, 故较少用于宽带。但当 $\mathcal{W} \leq 15\%$ 时, 用印刷电路的开路平行耦合线形式却非常方便, 故窄带应用较广。然而, 需要注意其阻带特性并不十分理想, 在 $\omega = 2\omega_0$ 处稍有失谐时, 就会出现寄生通带。

3. 交指型带通滤波器

这种滤波器如图 1.3-1 的圆(M)所示, 其结构紧凑、坚实, 性能优良, 制造公差要求低, 有适用于各种带宽的结构和设计方法, 故应用极广, 本书亦用了较大的篇幅讨论它。它有终端短路和终端开路两种基本形式, 前者适于窄带, 后者适于宽带, 既可做成印刷薄带形式, 又可做成圆杆或矩形杆自撑式, 还可用人为地电容加载来减小体积。 $\omega_{SPB} = 3\omega_0$, 在 $\omega = 0$ 和 $\omega = 2\omega_0$ 处有衰减极点(终端短路式为一次极点, 终端开路式为三次极点)。圆杆和矩形杆都有设计曲线可供应用, 对终端短路式带通滤波器, 还有成套的快速设计曲线, 对于准确设计也有一套较完整的元件数值表。

4. 梳状线带通滤波器

这是一种结构更为紧凑的滤波器,示于图 1.3-1 的圆(Y)。在许多方面,它与电容加载的交指型滤波器很相似,但它的所有电容都加在同一边。谐振器长度取决于加载电容的大小,通常为 $1/8$ 波长。其衰减特性不对称, $\omega_{SPB} \geq \omega_0 \lambda_0 / 2l$ (例如,当 $l = \lambda_0 / 8$ 时, $\omega_{SPB} = 4\omega_0$), 故适于需要宽阻带应用的场所。在 $\omega_0 = 0$ 和 $\omega = \omega_0 \lambda_0 / 4l$ 处有衰减极点。与交指型一样,结构牢固,可自撑,制造公差亦低。但现用的设计方法只适于窄带设计。

5. 带阻滤波器

波导型的带阻滤波器如图 1.3-1 的圆(F)所示,只适用于窄带,而 TEM 带阻滤波器则有适用于各种带宽的优良结构,且容易用准确设计方法。如图 1.3-1 中的圆(B)、(C)、(D)、(E)所示。其中圆(C)的形式常用于低通滤波器或宽阻带设计,而圆(E)适于中等带宽,圆(D)适用于窄阻带。

6. 椭圆函数型滤波器

在各种滤波器响应中,椭圆函数响应是最为优越的,这是因为,这种类型的滤波器通带和阻带均为等波纹特性,陡度较大,因此同样的选择性,它可以有更为紧凑的结构。虽然集总元件椭圆函数滤波器已出现有好些年,但直到最近几年才找到了较好地实现它的微波结构,它们都可用准确设计方法进行设计,如图 1.3-1 的圆(G)、(H)、(T)、(U)所示。其中圆(H)和圆(U)适于带阻滤波器设计,而圆(T)既适合于带阻又适合于带通,且由于它是指型结构,故有“指型椭圆滤波器”之称。其结构相当紧凑,可以直接应用集总元件椭圆函数滤波器的结果。而且带通、带阻的设计方法相同,因而特别适用于高陡度宽带应用,带宽可大于倍频程。但由于机械结构的复杂性,在 C 波段以上不宜选用。圆(U)适于窄阻带设计,而圆(H)常有阻抗幅度太大实现困难的问题,最近已有用最佳设计方法以改进响应,降低阻抗幅度,但目前尚无图表可用,设计极其繁琐。由于椭圆函数滤波器的阻带衰减极点可以控制,因而常用作谐波抑制器。

1.5 用滤波器来分离和迭加信号

从本节开始简要地谈谈微波滤波器的基本应用等有关问题,以使读者了解本书材料的可能应用范围,大大地超过了经典滤波器的应用,覆盖了许多其他微波工程问题。这些问题,虽包括滤波器结构,但常常不是滤波问题。它们可以称之为“滤波器变形结构”,在本书下册中将研究其中一些主要类型的结构和设计。

滤波器结构最直接最基本的应用,当然是抑制不需要的信号频率,而使需要的信号频率顺利传输。这类通用滤波器可设计成低通、高通、带通、带阻的衰减特性,如图 1.5-1 所示。显然,这些特性只能近似达到,因为任何实际滤波器结构都有高频极限,在此极限上由于接头影响和元件谐振等将使其特性变坏。除了大功率滤波器在下册中讨论外,在上册中主要讨论这些通用滤波器。

实用中常把几个滤波器组合成双工或多工器,以分离或迭加信号。图 1.5-2 为一个三信道多工器示意图,它能将 2—4 千兆赫的信号分到三个信道中。为了使输入端电压驻波比很低,必须专门设计各信道滤波器和特殊的接头匹配网络。反之,如果将图中信号流的方向反过来,就可使三个信道的信号迭加在一起。显然,如果不用多工器而直接将各分

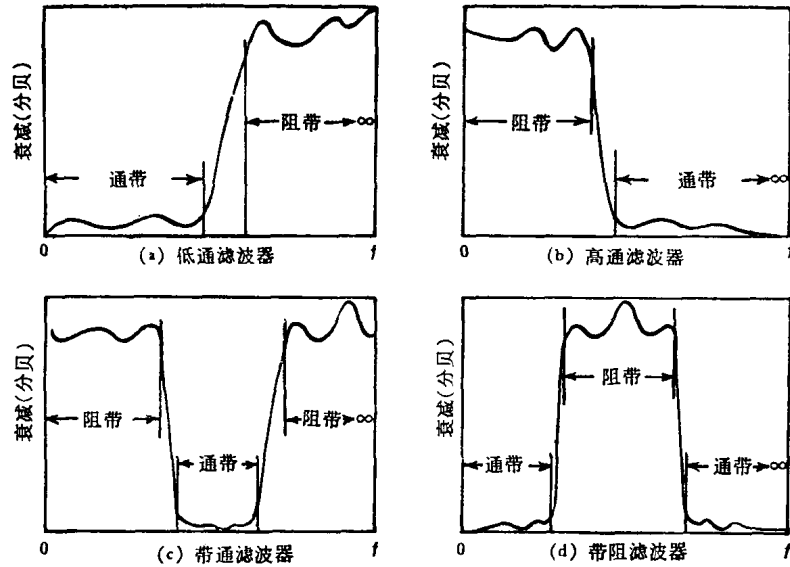


图 1.5-1 滤波器特性的四个普通形式

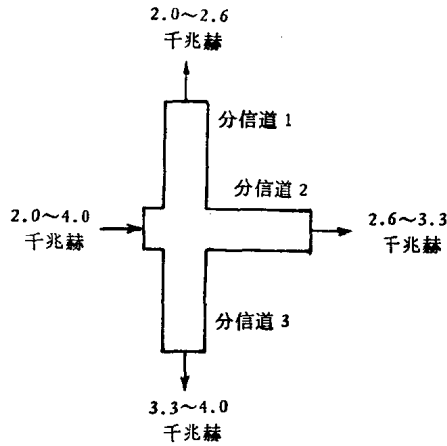


图 1.5-2 三信道多工器示意图

信道用简单的传输线接头来迭加,则由于反射和泄漏,将造成很大的能量损耗。有关多工器问题在下册中讨论。

1.6 阻抗匹配网络和耦合结构

为了使信号源和负载间无反射(实际上是低反射)传输,需要恰当设计阻抗匹配网络和耦合网络。可以证明,有效的宽频带阻抗匹配网络和耦合结构必须是滤波器结构。本

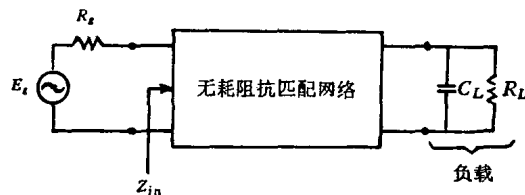


图 1.6-1 阻抗匹配问题举例

节简述一下有关的概念,其详细情况在下册中予以研究。

先以图 1.6-1 的实例来看看宽频带阻抗匹配的情况。图中待匹配的负载由电容 C_L 和电阻 R_L 并联组成,无耗阻抗匹配网络接于信号源和负载之间,信号源内阻为 R_g 。于是信号源与阻抗匹配网络之间的反射系数是

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - R_g}{Z_{in} + R_g} \quad (1.6-1)$$

式中 Γ 是频率的函数。如果匹配网络设计成使该图中 R_L 与 R_L 左边电路之间的反射系数的所有零点都在左半平面上,则其限制的最好结果,由下式表示:

$$\int_0^{\infty} \ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right| d\omega = \frac{\pi}{R_L C_L} \quad (1.6-2)$$

显然,对于无源网络 $0 \leq |\Gamma| \leq 1$; 全反射时 $|\Gamma| = 1$; 全传输时 $\Gamma = 0$; 故 $\ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right|$ 越大,传输越好。但(1.6-2)式指出: $\ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right|$ 对 ω 的曲线下的面积不能大于 $\pi/(R_L C_L)$ 。

若要在 ω_a 到 ω_b 的频段内有良好的阻抗匹配,则最好结果是除了该频段外的其他频率上 $|\Gamma| = 1$, 即 $\ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right| = 0$ 。或者说 $\ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right|$ 曲线下的有用面积都集中在匹配良好的区域内。按此规定,(1.6-2)式应变为

$$\int_{\omega_a}^{\omega_b} \ln \left| \frac{1}{\Gamma} \right| d\omega = \frac{\pi}{R_L C_L} \quad (1.6-3)$$

若设在此频段内 $|\Gamma|$ 为常数,则有

$$|\Gamma| = \begin{cases} e^{\frac{-\pi}{(\omega_b - \omega_a)R_L C_L}} & (\omega_a \leq \omega \leq \omega_b) \\ 1 & (0 \leq \omega \leq \omega_a, \text{ 和 } \omega_b \leq \omega \leq \infty) \end{cases} \quad (1.6-4)$$

由(1.6-4)式可见,对于图 1.6-1 中的负载,理想的阻抗匹配网络应是在阻抗匹配带边上截止很陡的带通滤波器结构。当然要达到(1.6-4)式所示的矩形特性,匹配网络必须用无限个元件才行,这是不现实的。好在实践证明,简单的匹配网络对阻抗匹配就有很大改进,而当匹配元件数目增加时,每加一个元件的贡献将急剧变小,因此简单的匹配网络性能,与无限个元件的匹配网络性能十分接近。图 1.6-2 示出实际阻抗匹配带通滤波器的 $|\Gamma| \sim \omega$ 曲线的一种可能形式。曲线 1 是窄带情况,而曲线 2 是宽带情况,两者的负载和匹配网络元件数目均相同。

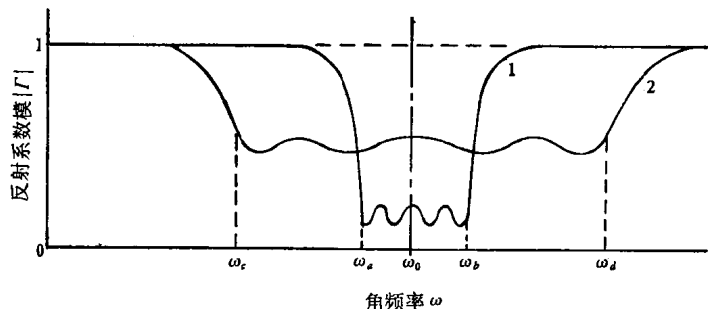


图 1.6-2 说明带宽与匹配程度关系用图

上面虽只用一个例子来说明,但可以证明,不管负载的性质如何(只要不是纯电阻),类似的结论都适用。基于此可知:有效的宽频带阻抗匹配结构必须是滤波器结构。

下面再看看耦合网络的情况。对于一般的振荡器或放大器而言,其输入或输出阻抗可以等效为一个电阻和一个或两个电抗元件。这时,与上相似,若要宽频带特性最佳,则必须用阻抗匹配滤波器。

对于负阻放大器,情况稍有不同,关键在于内阻是负值。以图 1.6-3 为例,该电路左

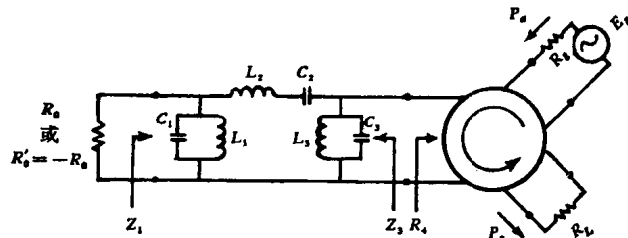


图 1.6-3 说明滤波器结构用于设计负阻放大器的例子

边的反射系数为

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - R_0}{Z_1 + R_0} \quad (1.6-5)$$

右边的反射系数为

$$\Gamma_3 = \frac{Z_3 - R_4}{Z_3 + R_4} \quad (1.6-6)$$

由于插入中间的带通滤波器是无耗的,故两反射系数幅值应相等(即 $|\Gamma_1| = |\Gamma_3|$),而相位可不等。

从环行器右边进来的资用功率直接进入滤波器网络,部分功率反射回环行器,最后被终端 R_L 吸收。从发生器到 R_L 的转换增益是

$$\frac{P_r}{P_a} = |\Gamma_3|^2 \quad (1.6-7)$$

式中 P_a 为发生器的资用功率, P_r 是从滤波器网络反射回来的功率。

若图 1.6-3 左边的电阻 R_0 为正,则转换增益特性可能象图 1.6-4 的曲线 1 那样,这时,由于 $|\Gamma_1| = |\Gamma_3|$ 很小,故滤波器通带内的增益很低。但若 R_0 用负电阻 $R'_0 = -R_0$ 来替换,则左边的反射系数变为

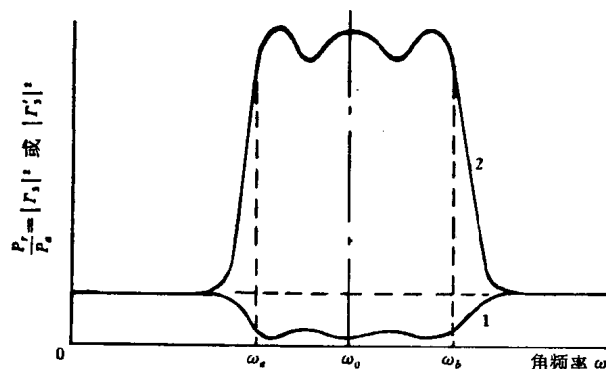


图 1.6-4 转换增益曲线