

邮电高等学校参考教材

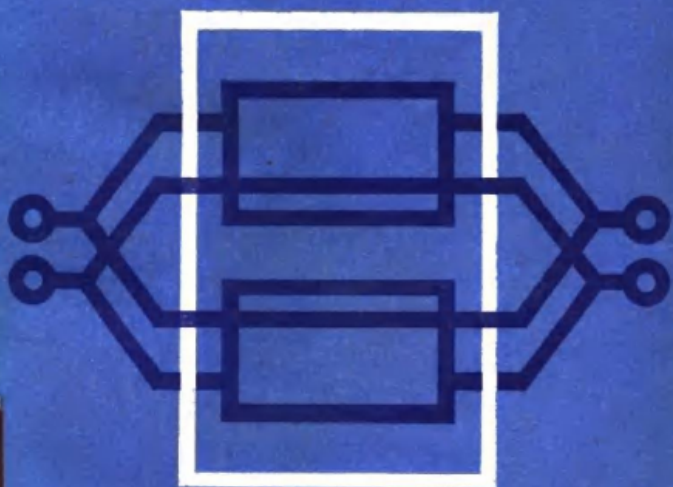
# 无源与有源滤波器 —理论与应用

徐守义 李国祥

〔美〕 陈惠开 著

译 万金良 审校

江崇吉 王承训



人民邮电出版社

*Passive and Active Filters  
Theory and Implementations*

by

Wai-Kai Chen

John Wiley & Sons 1986

**内 容 提 要**

本书较为精练地总结了电阻端接无源网络综合的内容。在此基础上,一方面介绍了有源RC网络综合;另一方面介绍了宽带匹配网络、兼容阻抗以及级联综合等较为深入的无源网络综合内容。全书分为十一章,1.网络综合的基本原理;2.滤波器的逼近问题及频率变换;3.无源滤波器综合;4.电阻端接网络的设计;5.有源滤波器综合的基本原理;6.灵敏度;7.有源双二阶节;8.有源二端口网络的实现;9.宽带匹配网络的设计;10.无源级联综合理论;11.兼容阻抗的一般理论。书中附有大量例题、习题及参考文献。

本书可用作大学高年级生与研究生网络理论课的教材或教学参考书,也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员和大学教师参考,还可供对网络理论与应用感兴趣的科技工作者自学。

邮电高等学校参考教材

**无源与有源滤波器—理论与应用**

[美]陈惠开 著

徐守义 李国祥 江崇吉 王承训 译

王金良审校

责任编辑 徐德霖

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: 850×1168 1/32 1989年12月 第一版  
印张: 19 8/32 页数: 308 1989年12月河北第1次印刷  
字数: 510 千字 印数: 1—1 500册

ISBN7-115-04084-2/TN·279

定价: 4.35元

## 译者序

本书主要讲述无源网络综合与有源网络综合两部分内容。从该书的取材上可以看出，作者讲述无源网络综合内容的目的，一方面是将它作为有源网络综合的基础，另一方面是要力图提供关于无源网络综合的近代内容，以给读者更加系统与完整的知识。这主要体现在作者将宽带匹配网络及兼容阻抗的课题收入本书之中，其目的是为了解决在频变负载及给定传输特性的情况下，在源与负载之间实现匹配的问题。这些内容将纯阻负载及窄带的网络综合研究课题扩展到了复数负载及宽频带的情况。在讲述这部分内容时，作者使用了散射参数及散射矩阵，散射矩阵与阻抗矩阵、导纳矩阵及传输矩阵等有所不同，它的参数是在网络加载的情况下得到的，且对于一般网络来说总是存在的。作者对上述研究课题曾写过专著，并发表过大量科学论文；相比之下，本书所涉及的内容可以说是深入浅出了。

关于有源网络，它也是作者所感兴趣的研究领域之一。随着集成电路制作工艺的迅速进展，对于从事电子技术工作的人员来说，这方面的内容显得越来越重要。本书几乎用了一半的篇幅详细而全面地阐述了这方面的问题。

本书强调物理概念，对较难理解的问题，均给予了物理诠释。本书也注重逻辑推理与数学推导及证明，对所涉及到的定理几乎均给予了严格的证明。对于工程应用，本书也给予了足够的重视，书中附有大量的图表可资利用，对于各种电路的优缺点也作了比较，使从事实际工作的人员能够从众多的设计方案中选出最合理的方案。本书各章后均附有大量的习题及参考文献，以加强并引伸叙述。在目前所流行的讲述无源与有源模拟网络综合的书籍中，此书

是一本较好的参考书。它适宜作研究生及大学高年级学生网络理论与应用课程的教学参考书，也可供有关科研工作者及工程技术人员和大学教师参考。

出于上述考虑，我们把这本书译成了中文。在本书的翻译过程中，得到了作者的热情支持与鼓励，在此特向陈惠开教授表示深深的谢意。翻译完毕，请陈大榕教授审阅了全部译稿，并提出了许多宝贵的修改意见，谨此致谢。

书中用到的一些专业术语，有些目前国内尚无标准译名，为此，在书后编排了中英文对照内容索引。关于姓名译名，主要参照了“英语姓名译名手册（修订本）”（辛华编，商务印书馆）。

本书由徐守义（第一至第三章），李国祥（第四至第六章），江崇吉（第七至第九章），王承训（第十至第十一章）译，由万金良对全部译文作了校对并翻译了序言。由于译者水平有限，对译文中不当之处，请读者批评指正。

## 序 言

电气滤波器正深深地渗入到近代技术之中，很难找到不以某种形式利用滤波器的电子系统。因此，对于准备走上工作岗位的电机工程系学生和欲扩展其技能的从业工程师来说，学习滤波器方面的知识是十分重要的。本书的目的正是为了满足这种需要。

与数字滤波器相呼应，这本书欲为大学高年级或研究生一年级的近代模拟滤波器理论与设计概论课，提供基本教材。拟将本书用作两个季度或一个学期课程的教科书。它的先导课程应当是线性网络和系统分析，其中介绍了有关拉普拉斯变换和状态变量方面的知识。对于后三章来说，还需要对复变函数论和矩阵代数有所了解。

随着固体电路技术的进展和数字计算机的广泛应用，在电机工程系，用一个学期或两个季度的时间去安排模拟滤波器设计这门课程的教学计划，趋势是朝着压缩无源综合和扩展有源网络设计的方向发展。之所以这样做，是由于认识到集成电路制作技术的巨大进展，这种技术往往提供较某些无源元件便宜得多的有源器件。因此，近代综合技术大多倾向于使用有源器件，它同电阻器及电容器组合起来，实际上在许多频段上排除了使用电感器的必要。这样的有源 $RC$ 网络或无感滤波器引起了人们的极大关注，这是因为与对应的无源网络相比，通常来说，它们重量轻且体积小，并且使用集成电路技术可将它们制成超小型，从而使廉价的大规模生产成为可能。因此，在总的滤波器生产和应用中，它们所占的比重在日益增长。然而，由于有源器件对高频特性的限制，有源 $RC$ 滤波器的带宽有限。大多数的有源 $RC$ 滤波器可使用至接近 $30\text{kHz}$ 。这对于语音和数据通信系统是相当适用的。相反，无源滤波器不受这样的

限制，它们可用至接近500MHz，这里的限制是由无源元件的杂散效应引起的。此外，无源滤波器的灵敏度一般比有源滤波器的低。

基于这些看法，我们决定集中讨论无感滤波器，这里的有源器件是运算放大器。为了对其它论题提供基础知识，我们也将无源滤波器的综合包括进来。例如，可由无源电阻端接 $LC$ 梯形网络原型来设计有源滤波器。此外，也收入了无源综合的其它基本方法，使学生对于模拟滤波器能有巩固的基础知识。之所以将分析、设计和应用模拟滤波器的理论、方法和步骤结合在一起讨论，是因为我们希望在学完这本书之后，使学生有能力进行某些简单的滤波器设计，且对进一步深入学习具有足够的基础知识。

对内容作这种选择的附带意义是强调了运算放大器的重要性。对电气工程的近代实践有着深远影响的两大进展是数字系统的微处理器和模拟系统的运算放大器。学生具有这两方面的实践经验是绝对必要的。本书强调了运算放大器的实用性。

看一下目录，对这本书所涉及的范围便会一目了然。第一章介绍了模拟滤波器设计的基本原理，包括基本的有源组件及网络函数的性质。第二章对逼近问题给予了十分完善的说明，其中包括常见的巴特沃思、切比雪夫、倒切比雪夫以及贝塞尔—汤姆逊响应，频率变换也收入其中。通过在第一章中所确立的正实函数概念，在第三章中讨论了 $LC$ 和 $RC$ 单端口网络的策动点导抗函数性质和它们的实现方法。将这些方法加以引伸，以使用 $LC$ 或 $RC$ 梯形网络或并联梯形网络去实现各类转移函数。第四章讨论电阻端接无损二端口网络的综合，并对双端接无损巴特沃思和切比雪夫梯形网络给出了设计显公式。这些梯形结构还可作为第八章中所描述的耦合有源滤波器综合的原型网络。

下面的四章讨论有源滤波器综合。第五章介绍了两种基本方法和两种网络结构，研究了每种方法的优缺点。将灵敏度问题概括在第六章之中，除了讨论各种类型灵敏度及它们之间的相互关系外，还给出了网络函数灵敏度的一般关系。第七章开始讨论有源滤波

器，包括单放大器一般双二阶节和多放大器一般双二阶节。梯形网络的模拟在第八章中进行研究。关于无源梯形网络的模拟以下述三种方式完成：使用模拟电感、使用频变负电阻以及对梯形网络的框图表示进行模拟。

后三章概括了较深入的无源滤波器综合内容。第九章涉及到宽带匹配网络的设计，用它去均衡电阻性信号源和频变负载，以获得预先规定的变换器功率增益特性。无源级联综合的理论在第十章中加以描述。学生们会立刻发现有源综合较相应的无源综合简单得多。这是因为利用运算放大器作为缓冲器，各个网络节可以单独设计。最后，两个频变阻抗的兼容问题在第十一章中处理。指明了，从本质上讲，这一问题可归结为某种类型全通函数的存在问题。

这本书的目的是要对滤波器的设计提供一种统一的近代处理方法。内容的安排使它们得以相互加强。本书强调基本概念、近代设计方法和应用。使用了大量的实际例子对理论加以说明和补充。预备知识是典型大学生的数学基础，包括微积分、复变函数及简单的矩阵代数加之有关拉普拉斯变换方法的运算知识。当内容的深度超出所拟定的范围时，我们给出了有关的参考文献。因此，对于从事实际工作的工程师来说，如果想得到一本滤波器方面的着实可靠的入门书籍时，本书也可作为关于这一领域的指南。

本书的内容在过去几年已在芝加哥伊利诺大学的课堂上用过。将此书用于一学期或两个季度的模拟滤波器设计课，没有遇到什么困难。例如，前八章所包含的内容适于讲述一学期，全书适用于两个季度的课程。因此，后三章的无源综合内容本来可以放到第四章之后，却放到了末尾，这样做是为了使前八章的内容很好地满足一学期课程的要求。

本书的一个突出特点是它包含了宽带匹配网络设计和兼容阻抗的内容，通常这些课题是被排除在大学生课程之外的。但是，最近所取得的进展表明，可以将这些重要的滤波器用作大学生课程的教材。认真的学生将会发现，仔细地阅读这些章节会感到满足并增长

见识。

在每一章的末尾均包括了各种各样的习题，以加强并引伸叙述。大多数习题已经过课堂检验，以保证它们的难度及复杂程度同这本书的要求相一致。此外，三角形符号被用来表示运算放大器，因为这是在文献中最普通和公认的用法。

我对历年来我的许多学生表示感谢，他们和我一起检验了这本书的内容。我对芝加哥伊利诺大学我的同事们表示感谢，他们提供了使人上进的讨论环境。对Puszka Luszka所给予的鼓舞人心的讨论表示个人的感谢。特别感谢Yi-Sheng Zhu, Joseph Chiang和Eishi Yasui，他们仔细、认真地阅读了全部手稿，并帮我准备了许多表格。也对大连工学院Jin-Liang Wan表示感谢，他校对了全部手稿。Yi-Sheng Zhu和Eishi Yasui还帮我准备了索引。Carlos-Lisboa博士校对了前三章并作了详细评论。最后我对我的妻子Shiao-Ling和孩子Jerome和Melissa在我写作本书的过程中所给予的谅解和耐心，表示谢意。

陈惠开

于伊利诺州芝加哥



# 目 录

<b>第一章 网络综合的基本原理</b> .....	( 1 )
1.1 网络综合问题 .....	( 2 )
1.2 滤波器的分类 .....	( 4 )
1.3 组件 .....	( 8 )
1.3.1 反相放大器 .....	( 14 )
1.3.2 同相放大器 .....	( 17 )
1.3.3 回旋器 .....	( 18 )
1.4 转移函数 .....	( 21 )
1.4.1 变换器功率增益 .....	( 24 )
1.4.2 二端口网络的串联和并联 .....	( 25 )
1.5 特勒根定理 .....	( 29 )
1.6 无源导抗 .....	( 34 )
1.7 正实函数 .....	( 39 )
1.8 等效正实条件 .....	( 44 )
1.9 网络函数的换标 .....	( 48 )
1.10 小结及建议的阅读材料.....	( 51 )
参考文献.....	( 53 )
习题.....	( 54 )
<b>第二章 滤波器的逼近问题及频率变换</b> .....	( 59 )
2.1 巴特沃思响应 .....	( 60 )
2.1.1 巴特沃思响应的极点.....	( 63 )
2.2 切比雪夫响应 .....	( 69 )
2.2.1 切比雪夫多项式 .....	( 69 )

2.2.2	等纹波特性和极点	( 71 )
2.2.3	切比雪夫响应的极点	( 76 )
2.3	倒切比雪夫响应	( 88 )
2.3.1	倒切比雪夫响应的零点和极点	( 91 )
2.3.2	倒切比雪夫响应与其它响应的比较	( 94 )
2.4	贝塞尔—汤姆逊响应	( 97 )
2.4.1	最平延迟特性	( 99 )
2.4.2	贝塞尔—汤姆逊响应的极点	( 105 )
2.5	频率变换	( 107 )
2.5.1	高通变换	( 108 )
2.5.2	带通变换	( 111 )
2.5.3	带阻变换	( 114 )
2.6	小结及建议的阅读材料	( 117 )
	参考文献	( 118 )
	习题	( 119 )
<b>第三章</b>	<b>无源滤波器综合</b>	<b>( 123 )</b>
3.1	LC单端口网络综合	( 123 )
3.1.1	福斯特规范型	( 127 )
3.1.2	考尔规范型	( 129 )
3.2	RC单端口网络综合	( 133 )
3.3	用梯形展开法综合二端口网络	( 140 )
3.3.1	LC梯形网络	( 142 )
3.3.2	RC梯形网络	( 151 )
3.4	用并联梯形网络综合二端口网络	( 157 )
3.5	小结及建议的阅读材料	( 168 )
	参考文献	( 169 )
	习题	( 170 )
<b>第四章</b>	<b>电阻端接网络的设计</b>	<b>( 174 )</b>

4.1 兼容阻抗问题 .....	( 174 )
4.1.1 $z_{11}$ 、 $z_{22}$ 和 $y_{22}$ 均为电抗函数 .....	( 176 )
4.1.2 $z_{12}$ 的有理化 .....	( 177 )
4.1.3 留数条件 .....	( 181 )
4.2 二端口网络的实现 .....	( 185 )
4.3 电阻端接二端口网络的综合 .....	( 193 )
4.3.1 博德法 .....	( 196 )
4.3.2 布龙—杰沃茨法 .....	( 198 )
4.4 宽带匹配网络：初步研究 .....	( 201 )
4.5 双端接网络 .....	( 206 )
4.5.1 巴特沃思网络 .....	( 206 )
4.5.2 切比雪夫网络 .....	( 214 )
4.6 小结及建议的阅读材料 .....	( 221 )
参考文献 .....	( 222 )
习题 .....	( 223 )
<b>第五章 有源滤波器的综合：基本原理</b> .....	<b>( 226 )</b>
5.1 级联法 .....	( 227 )
5.2 一阶网络 .....	( 232 )
5.3 双二阶节网络 .....	( 240 )
5.3.1 负反馈拓扑结构 .....	( 240 )
5.3.2 正反馈拓扑结构 .....	( 246 )
5.4 增益常数的调整 .....	( 253 )
5.5 直接法 .....	( 256 )
5.5.1 单放大器实现 .....	( 257 )
5.5.2 双放大器实现 .....	( 262 )
5.5.3 状态变量实现 .....	( 265 )
5.6 双二阶函数 .....	( 270 )
5.7 小结及建议的阅读材料 .....	( 276 )

参考文献	( 278 )
习题	( 279 )

## 第六章 灵敏度 ( 281 )

6.1 灵敏度函数	( 281 )
6.2 幅度和相位灵敏度	( 287 )
6.3 多参量灵敏度	( 289 )
6.4 增益灵敏度	( 292 )
6.5 根灵敏度	( 297 )
6.5.1 根灵敏度的计算	( 300 )
6.5.2 多参量根灵敏度	( 307 )
6.5.3 根灵敏度间的一般关系	( 309 )
6.6 网络函数灵敏度的一般关系	( 315 )
6.7 小结及建议的阅读材料	( 319 )
参考文献	( 320 )
习题	( 321 )

## 第七章 有源双二阶节 ( 325 )

7.1 单放大器带通双二阶节	( 325 )
7.2 RC—CR变换	( 329 )
7.3 单放大器一般双二阶节	( 334 )
7.4 多放大器一般双二阶节	( 353 )
7.4.1 基本组件	( 355 )
7.4.2 加法四放大器双二阶节	( 357 )
7.4.3 三放大器双二阶节	( 364 )
7.4.4 状态变量双二阶节	( 370 )
7.5 小结及建议的阅读材料	( 376 )
参考文献	( 378 )
习题	( 380 )

<b>第八章 有源二端口网络的实现</b> .....	( 384 )
8.1 梯形网络 .....	( 384 )
8.2 电感模拟 .....	( 387 )
8.3 频变负电阻 .....	( 396 )
8.4 梯形网络的跳耦模拟 .....	( 404 )
8.4.1 带通跳耦滤波器 .....	( 415 )
8.4.2 跳耦实现的另一种形式 .....	( 428 )
8.5 灵敏度分析 .....	( 439 )
8.6 小结及建议的阅读材料 .....	( 451 )
参考文献.....	( 453 )
习题.....	( 454 )
<b>第九章 宽带匹配网络的设计</b> .....	( 459 )
9.1 宽带匹配问题 .....	( 459 )
9.2 单端口阻抗的传输零点 .....	( 461 )
9.3 对 $\rho(s)$ 的基本约束条件 .....	( 464 )
9.4 均衡器的设计步骤 .....	( 475 )
9.5 对 $RLC$ 负载的设计显公式 .....	( 492 )
9.5.1 巴特沃思网络 .....	( 493 )
9.5.2 切比雪夫网络 .....	( 501 )
9.6 小结及建议的阅读材料 .....	( 511 )
参考文献.....	( 512 )
习题.....	( 513 )
<b>第十章 无源级联综合理论</b> .....	( 518 )
10.1 主定理.....	( 520 )
10.2 非互易实现.....	( 529 )
10.2.1 $E$ -型节 .....	( 530 )

10.2.2 退化E-型节: A型、B型、C型及布龙节·····	( 533 )
10.2.3 理查兹节·····	( 539 )
10.3 互易实现·····	( 542 )
10.4 主定理的证明·····	( 549 )
10.4.1 正实函数 $W_1(s)$ ·····	( 549 )
10.4.2 $W_1(s)$ 的次数·····	( 552 )
10.4.2.1 公共二次因子 $g(-s)$ ·····	( 553 )
10.4.2.2 公共二次因子 $g(s)$ ·····	( 554 )
10.4.2.3 公共因子 $(s+\sigma_0)$ 及 $(s+\sigma_0)^2$ ·····	( 554 )
10.5 小结及建议的阅读材料·····	( 555 )
参考文献·····	( 556 )
习题·····	( 557 )
<b>第十一章 兼容阻抗的一般理论</b> ·····	<b>( 562 )</b>
11.1 散射矩阵的归一化·····	( 562 )
11.2 兼容定理·····	( 565 )
11.3 无损互易二端口网络 $N$ 的实现·····	( 573 )
11.3.1 $Y_{e1}(s)$ 是非奇异的·····	( 573 )
11.3.2 $Y_{e1}(s)$ 是奇异的·····	( 574 )
11.3.3 举例说明·····	( 575 )
11.4 特殊兼容阻抗·····	( 579 )
11.4.1 等兼容阻抗·····	( 579 )
11.4.2 恒定阻抗·····	( 580 )
11.5 兼容定理的证明·····	( 581 )
11.6 兼容定理的推广·····	( 585 )
11.7 小结及建议的阅读材料·····	( 586 )
参考文献·····	( 587 )
习题·····	( 588 )
<b>译名及内容索引</b> ·····	<b>( 591 )</b>

# 第一章 网络综合的基本原理

与科学家注重理论分析不同,工程师主要关心的是设计。传统上讲,这指的是利用试凑方法、实验技能以及手册和图表进行工作。直到第二次世界大战以后,以**综合**这个名称为标志,关于设计的科学依据才完全形成了。此后,综合已变成现代电气工程中最重要的学科之一。分析与综合间的对比大致如图1.1所示。如果给定网络和激励,要求确定响应,这个求解过程称为**分析**。若给定激励和响应,要求不经反复试验而准确地确定一个网络,称为**综合**。在上述意义上,分析和综合是对立的两个方面。分析一词来源于希腊语ly-sis和ana,意思是分解一个复杂系统。另一方面,综合指的是用元件或部件构成一个复杂系统。在网络综合中,我们主要关心的是设计出满足预先规定之激励——响应特性的网络。

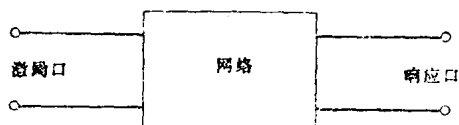


图 1.1

**电气滤波器**是为了从信号混合物中,分离、通过或抑制一组信号而设计的一种装置。就较大规模的而言,电视、收音机是电气滤波器的典型例子。当把电视机调到特定的频道时,它仅通过该频道所发射的信号,而阻塞全部其它信号。就小规模而言,滤波器是设计通信系统,例如电话、电视、收音机、雷达和计算机所利用的基本电子组件。事实上,电气滤波器已非常广泛地渗入到现代技术中,以致很难找到任何不以某种方式利用滤波器的电子系统。本书的目的是介绍一些基本概念和现代滤波器的设计方法。缺乏这些基

本知识，电机工程毕业生就谈不上掌握文献或进一步的实践。

## 1.1 网络综合问题

分析与综合有显著不同。首先，在分析中通常存在唯一解。对比起来，在综合中解不是唯一的，且可能根本无解。例如，在图 1.2 中，内阻  $R_1 = 10$  欧的信号发生器，能够提供的最大功率是  $|V_1|^2 / 4R_1 = 100/40 = 2.5$  瓦；而要求的输出功率是  $|V_2|^2 / R_2 = 36/10 = 3.6$  瓦，要设计达到上述要求的无源网络是不可能的。作为另一个例子，考虑阻抗函数



图 1.2

$$Z(s) = \frac{4(s^2 + 7s + 10)}{s^2 + 5s + 4} \quad (1.1)$$

这一阻抗至少可实现如图 1.3 所示四种不同  $RC$  网络的策动点阻抗。因此，就策动点阻抗而言，就存在许多产生同样输入阻抗的网络。

其次，网络分析仅采用几种基本方法，例如节点法、回路法或状态变量法。而另一方面，综合则采用多种方法，且涉及到近似处理。图 1.4 是理想低通滤波器的传输特性，从  $\omega = 0$  到  $\omega = \omega_c$ ，所要求的转移函数幅度是常数，对于全部大于  $\omega_c$  的  $\omega$ ，幅度是零。这样完美的传输特性不可能用有限数目的网络元件来实现。那么，为了得到所希望的传输特性，我们能够做什么？我们不是去寻求过分理想化的性能标准，而是规定在给定频带上可允许的损失或衰减的



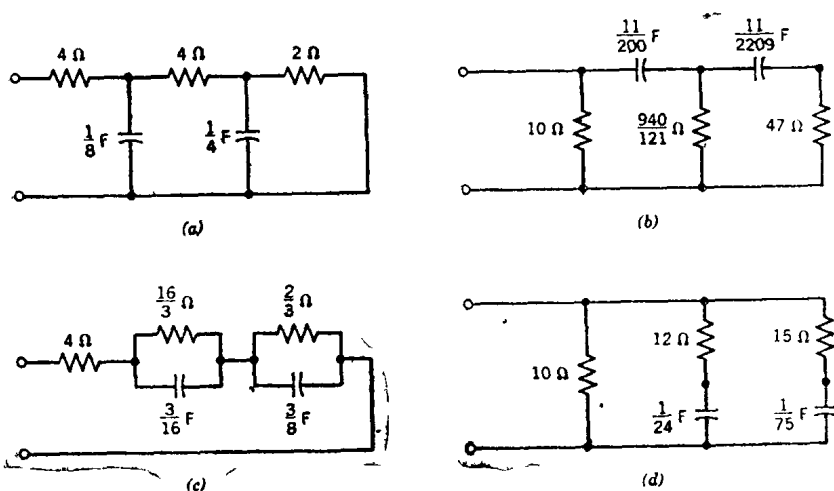


图 1.3

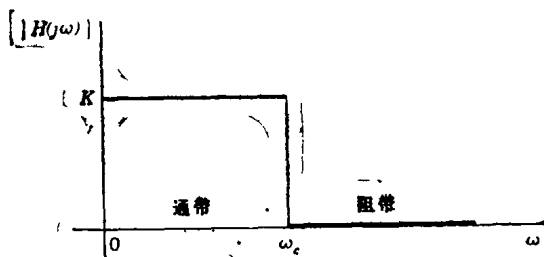


图 1.4

最大值，以及在别的频带上可允许损失的最小值。图1.5的阴影区域表示一种折衷方案，规定了从0到 $\omega_c$ 和从 $\omega_c$ 到 $\infty$ 的最大偏差，这就是所谓的逼近问题，在第二章中将作更详细的讨论。

如何完成网络的综合？通常遵循的步骤如下：第一步是确定表示系统的合适的模型，并规定技术要求。例如，我们希望设计一个电压源到运算放大器输入端的耦合网络，以获得如图1.4所示的理想低通传输特性，则图1.6的网络模型和转移电压比函数

$$|H(j\omega)| = \frac{|V_2(j\omega)|}{|V_1(j\omega)|} \quad (1.2)$$