

滤波器理论导论

[美] D. E. 约翰森 著

董绍书 李进文 译

赵辰 校

人民邮电出版社

UBOQI LILUN DAOLUN

滤波器理论导论

【美】D.E. 约翰森著

顾绍书 李远文 译

赵 辰 校

人民邮电出版社

INTRODUCTION TO FILTER THEORY

DAVID E. JOHNSON

1976.

内 容 提 要

本书较系统地介绍了无源和有源模拟滤波器现代理论和设计,内容浅显易懂。全书共十二章,包括网络基本理论;滤波器指标的逼近函数;频率变换;网络函数的无源综合,有源综合和有源滤波器。此外,还介绍了滤波器的时域特性和灵敏度。

本书可供从事通信、仪表等方面的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

滤 波 器 理 论 导 论

[美] D. E. 约翰森 著

颜绍书 李远文 译

赵 辰 校

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

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 1981年2月第一版

印张: 9 24/32 页数: 156 1981年2月天津第一次印刷

字数: 255千字 印数: 1—3,200册

统一书号: 15045·总2421-有5178

定价: 1.20 元

译 序

在现代技术中广泛使用电滤波器，随着高速电子计算机的普及，电滤波器的分析和设计多采用五十年代发展起来的现代滤波器理论。但是，目前系统地介绍现代滤波器理论的书还不多，能作到浅显易懂者则更少。本书较系统地介绍了无源和有源模拟滤波器的现代理论和设计，在讲法上注意了深入浅出，并附有许多例子和习题，比较易懂，容易掌握，适合通信，仪表等有关专业的大学生和工程技术人员阅读参考。

这本书只是初步地介绍现代模拟滤波器理论的有关课题，是一本中等水平的读物，还有许多类型的滤波器和设计方法没有涉及，但读者有了这些基本理论和设计技能后，就可比较容易地深入这些课题。要进一步研究的读者可参阅书后所附的〔H〕和〔T, M〕等参考文献。阅读本书的读者应具有电路理论方面的基础知识。

本书曾请胡筠教授审阅。郭曼泽同志译出了第十章初稿，在此一并致谢。

对原书中的笔误或排版错误，译者已作了改正。

限于译者水平，错误或不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

译 者

目 录

序言	1
第1章 绪论	3
1.1 简史	3
1.2 基本定义	4
1.3 滤波器类型	6
1.4 小结	10
习题	11
第2章 网络函数	13
2.1 网络函数的性质	13
2.2 霍尔维茨检验	15
2.3 二端对网络和参数	18
2.4 例子	20
2.5 由幅度函数求转移函数	22
2.6 网络函数的标定	24
2.7 分析与综合	27
2.8 正实函数	29
2.9 小结	32
习题	33
第3章 全极点滤波器的近似	38
3.1 低通的一般情况	38
3.2 勃脱华兹低通滤波器	39
3.3 勃脱华兹转移函数	42
3.4 契比雪夫低通滤波器	44
3.5 参数对契比雪夫响应的影响	51

3.6	勃脱华兹滤波器与契比雪夫滤波器的比较	53
3.7	相位响应	57
3.8	契比雪夫滤波器的转移函数	58
3.9	小结	62
	习题	63
第4章	频率变换	66
4.1	引言	66
4.2	低通到高通的变换	67
4.3	低通到带通的变换	69
4.4	低通到带阻的变换	75
4.5	例子	77
4.6	$RC:CR$ 变换	79
4.7	小结	81
	习题	82
第5章	无源综合初步	84
5.1	转移函数	84
5.2	LC 策动点函数	84
5.3	LC 函数的实现	87
5.4	单端负载的实现	93
5.5	零点移动	99
5.6	要求零点移动的实现	103
5.7	私有极点	106
5.8	小结	108
	习题	108
第6章	有理转移函数近似	113
6.1	倒契比雪夫滤波器	113
6.2	椭圆函数滤波器	116
6.3	椭圆滤波器函数的获得	120
6.4	椭圆滤波器转移函数的形式	126

6.5	小结	127
	习题	128
第7章	相移和时延滤波器	132
7.1	引言	132
7.2	幅度和相位函数	132
7.3	全通滤波器	135
7.4	桥型实现	138
7.5	定阻桥型网络	141
7.6	时延	144
7.7	贝塞尔滤波器	146
7.8	具有最大平坦时延的全通滤波器	150
7.9	小结	152
	习题	153
第8章	时域分析	155
8.1	信号失真	155
8.2	阶跃响应和冲击响应	156
8.3	低通滤波器响应	159
8.4	小结	163
	习题	163
第9章	无源综合—进一步研究	165
9.1	双端负载的实现	165
9.2	双端负载的梯型网络	169
9.3	双端负载梯型网络的例子	172
9.4	预畸变	176
9.5	小结	180
	习题	180
第10章	有源综合初步	183
10.1	引言	183
10.2	理想的运算放大器	185

10.3	非理想的运算放大器	189
10.4	运算放大器的应用	191
10.5	无限增益、多重反馈滤波器	194
10.6	一般型式的 $VCVS$ 滤波器	198
10.7	双二次型滤波器	202
10.8	通用双二次型电路	206
10.9	高阶滤波器	209
10.10	小结	214
	习题	215
第11章	有源滤波器	222
11.1	一般方法	222
11.2	无限增益多重反馈低通滤波器	223
11.3	$VCVS$ 低通滤波器	225
11.4	双二次型低通滤波器	227
11.5	状态变量低通滤波器	228
11.6	双二次型椭圆低通滤波器	230
11.7	无限增益 MFB 高通滤波器	232
11.8	$VCVS$ 高通滤波器	233
11.9	双二次型高通滤波器	235
11.10	无限增益 MFB 带通滤波器	237
11.11	$VCVS$ 带通滤波器	238
11.12	正反馈带通滤波器	240
11.13	双二次型带通滤波器	242
11.14	多重谐振子带通滤波器	243
11.15	$VCVS$ 带阻滤波器	249
11.16	无限增益 MFB 带阻滤波器	251
11.17	双二次型带阻滤波器	252
11.18	多重反馈全通滤波器	254
11.19	双二次型全通滤波器	255

11•20	贝塞尔滤波器	256
11•21	小结	257
	习题	257
第12章	灵敏度	261
12•1	定义	261
12•2	几种灵敏度恒等式	262
12•3	几种灵敏度函数	264
12•4	例子	268
12•5	根灵敏度	271
12•6	变分	274
12•7	小结	277
	习题	278
附录		
A	低通系数	281
B	低通二阶因式	283
C	正实条件的推导	285
参考文献		298

序 言

本书是作为无源和有源模拟滤波器理论及设计的导论性课程而编写的。因为，从广义上讲，滤波器是一种将输入信号变换成规定的输出信号的装置。所以很明显，滤波器理论实际上就是电路理论。因此，本书可供在通常的二年级课程之后开设的中等电路理论课程使用。的确，凡是网络书中常见的许多内容，诸如正实函数，福斯特 (Foster) 网络和柯尔 (Cauer) 网络，一端对网络和二端对网络综合等等，本书都把它们收集在内。凡具有初等电路理论和拉氏变换基础的学生，学习本书内容是易于理解的。

现代滤波器理论的各种基本课题，诸如近似问题，频率变换，转移函数的无源和有源综合等，多散见于各种电路课本和杂志中。因此，本书的宗旨即是致力于将这些材料收集到一本书内，并适当地作了处理和论述以供在校大学生，在职工程师以及初学滤波器者的需要并都能接受。

作为滤波器导论课或者中等的电路课程，本书的内容可供使用一学期，它也可以在更广泛的电路课程中作为滤波器理论的补充教材。

本书对近似法问题作了详尽论述，包括勃脱华兹。契比雪夫，倒契比雪夫，贝塞尔和椭圆滤波器函数。在最后一类椭圆滤波器函数中，由于采用新近推导出来的一种方法，从而不再需要应用和理解椭圆函数，这就使得大学肄业生也能掌握这种重要的滤波器类型了。

本书对低通，高通，带通，带阻，全通和恒定时延等滤波器，从有源综合和无源综合观点都作了探讨。在无源综合中，对单端和双端电阻负载的无耗梯型网络都作了推导。对定阻网络 and 对称桥型

也进行了讨论。所介绍的有源综合是采用运算放大器作为有源元件。对大部份常用的有源电路都作了介绍和分析，其中有的是以前只在电路理论杂志上介绍的新设计。

为了完整起见，还加了时域分析和灵敏度两章。在灵敏度一章中，除了通常的灵敏度函数之外，还专门用了一节来介绍变分，它用了齐次函数的简捷概念。

第1章 绪 论

1.1 简 史

电滤波器是这样一种网络，它以某种规定的方式将输入信号转换成要求的输出信号。这些信号既可以在时域中研究也可以在频域中研究。与此相对应，滤波器的输出要求也可用时间或者频率来描述。在后一种情况下，滤波器通常是一种有“频率选择”作用的装置，它让某些频率的信号通过而使其他频率的信号受到阻塞或衰减。

电滤波器已大量渗入现代技术中。很难设想一个稍微复杂的电子设备不使用这样或那样的滤波器。在现代通信和信号处理方面，电话、电报、电视、无线电、雷达、声纳和太空人造卫星等只不过是滤波器作为它们的重要部件的一些例子而已。

滤波器理论始于1915年，其时美国的坎贝尔 (Campbell) 和德国的华格纳 (Wagner) 分别各自发明了电波滤波器。滤波器理论实质上是沿着文献上称为“经典滤波器理论”和“现代滤波器理论”的两个方向发展起来的。经典理论是由坎贝尔，若贝尔 (Zobel) 等人在1920年代发展起来的，其中心内容是用影象参数法来设计无源集总滤波器，(参见[V], [RB]*)，使用这种理论可以轻而易举的得出满意的结果，因为有许多现成的设计资料可资利用。但是要得出更精密和准确的结果，还是现代滤波器理论更好些。

现代滤波器理论是由柯尔 (Cauer)，达林顿 (Darlington)

• 这些缩写的参考文献按字母顺序列在本书后面的参考文献中。

等人在1930年代发展起来的，它比经典理论更有普遍性，更有效。实质上，它包括用转移函数对滤波器技术指标的近似，以及使用能精确实现此转移函数的方法来设计网络。于是，近似问题和实现问题可以分别以最优和精确的方式给以解决。现代理论的缺点（要求复杂的运算），由于高速计算机的普及而被大大地克服了。因此，现代理论变得比经典理论更普及了。

滤波器可以按几种方法来分类。例如模拟滤波器是用来处理模拟信号，即信号是时间的连续函数，而数字滤波器则是用来处理数字化的连续波形。滤波器按其设计的工作频段可分为集总元件设备或分布元件设备。最后按照其使用的元件类型可分为无源滤波器或有源滤波器。在电滤波器中常用的元件是电阻，电容，电感以及晶体管 and 运算放大器等电子器件。此外，有些滤波器还使用了机械，晶体，和开关器件。

本书的目的是导论性地介绍现代的模拟滤波器理论。我们将研究近似问题，转移函数的特性，无源和有源集总元件滤波器的实现。凡是想对这些课题作进一步研究，或对其他课题诸如数字滤波器、机械滤波器、晶体滤波器、N分路滤波器、分布元件滤波器等有兴趣的读者，可参阅参考文献[H]和[TM]。

因为，按照我们给滤波器所作的一般定义，它是一种能将输入信号变换成规定的输出信号的装置，所以滤波器理论实际上就是电路理论。的确，在典型的中等电路书籍中就研讨了一般理论并将它应用到滤波器设计中。因此，我们的目的也可以说是在介绍中等电路理论课程及其在现代滤波器理论中的应用。

1.2 基本定义

一个单端输入和单端输出的滤波器可以用图1.1的符号表示，其中 $x(t)$ 是输入信号而 $y(t)$ 是输出信号。如果该滤波器是由线性，集总元件组成，并且 t 是一个连续变量，则 x 与 y 就由线性常

的微分方程相联系，并可以进行拉氏变换，如果其初始储能为零，则得

$$Y(s) = H(s) X(s) \quad (1.1)$$

其中 $s = \sigma + j\omega$ 为复频率

$Y(s)$ 和 $X(s)$ 分别是 $y(t)$ 和 $x(t)$ 的拉氏变换，而网络函数 $H(s)$ 就是输出和输入变量的拉氏变换之比。当 $S = j\omega$ (ω 的单位为弧度/秒) 时，该网络函数是复数并可写成

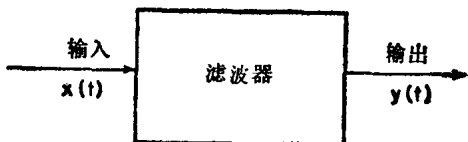


图 1.1 滤波器的符号表示

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (1.2)$$

式中 $|H(j\omega)|$ 是幅度，或模值， $\phi(\omega)$ 是相位。幅度响应和相位响应分别是 $|H(j\omega)|$ 和 $\phi(\omega)$ 随 ω 变化的曲线，并可用来表征这一滤波器的特性。例如，若 ω_1 为该滤波器要传通的信号频率时， $|H(j\omega_1)|$ 就比较大，如果 ω_2 是被该滤波器阻止的信号频率时， $|H(j\omega_2)|$ 就比较小（在理想情况下为零）。

我们也可以用指数型式来表示网络函数

$$H(j\omega) = e^{-\gamma(j\omega)} \quad (1.3)$$

其中

$$\gamma(j\omega) = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \quad (1.4)$$

在这种情况下我们有

$$\alpha(\omega) + j\beta(\omega) = -\ln H(j\omega) = -\ln |H(j\omega)| - j\phi(\omega)$$

或

$$\begin{aligned} \alpha(\omega) &= -\ln |H(j\omega)| \\ \beta(\omega) &= -\phi(\omega) \end{aligned} \quad (1.5)$$

γ ， α 和 β 都是没有量纲的量， α 的单位用奈而 β 的单位用弧度或度。定名为衰减的 α 经常乘上因子 $20 \log_{10} e$ ，把它换算成分贝单位，即是以分贝为单位的衰减值由下式给出：

$$\begin{aligned}
\alpha_{\text{db}} &= (20 \log_{10} e) \alpha \\
&= -20 \log_{10} e^{-\alpha} \\
&= -20 \log_{10} |H(j\omega)| \quad (1.6)
\end{aligned}$$

在滤波器理论中的另一个重要的量是时延或群时延 $T(\omega)$ 。其定义是：

$$T(\omega) = \frac{d\beta(\omega)}{d\omega} = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \text{ 秒} \quad (1.7)$$

我们将看到,如果要求信号通过滤波器的失真很小,则相位响应和时延就很重要。在第7章中将看到,如果其相位响应是直线的(在这种情况下其时延就是常数),则信号就一点也不会失真。

根据滤波器的用途,设计者可能对滤波器函数的某一方面更注意些。例如,当滤波器是作选频用时(即通过某些频率的信号而阻止其它频率的信号),那末其衰减 $\alpha(\omega)$ 或者其幅度 $|H(j\omega)|$ 是重要的特性。反之,当要求输出信号的失真很小时,就应特别重视相位响应或时延特性。

1.3 滤波器类型

选频滤波器是这样一种装置,它通过某些频率位于滤波器通带内的信号,而阻止或衰减另一些频率位于滤波器阻带内的信号。可以利用幅度函数 $|H(j\omega)|$ 或衰减函数 $\alpha(\omega)$ 的特征,按其通带和阻带的位置来划分滤波器的类型。一个理想滤波器是在通带内具有线性相位响应和零衰减,而在阻带内则有无限大衰减($|H(\omega)| = 0$)。

通常碰到的选频滤波器类型定义如下:

(1) 低通滤波器在0和截止频率 ω_c 之间为通带,高于 ω_c 是阻带,其带宽 $B = \omega_c$ 。

(2) 高通滤波器在0和截止频率 ω_c 之间为阻带,高于 ω_c 是通带。

(3) 带通滤波器在两个截止频率 ω_L 和 ω_U ($\omega_U > \omega_L$) 之间为

通带，在 0 和 ω_L 之间以及 ω_U 以上为阻带。其带宽 $B = \omega_U - \omega_L$ 。

(4) 带阻滤波器 $\omega_L < \omega < \omega_U$ 为阻带， $0 < \omega < \omega_L$ 及 $\omega > \omega_U$ 为通带。（也叫作带除滤波器）

(5) 全通滤波器它平等地传通所有的频率信号，即对所有频率信号其 $|H(j\omega)|$ 为常数，但其相位 $\phi(\omega)$ 通常是频率的函数。

很遗憾，理想的滤波器特性是不能实际实现的。我们将会看到，这是由于实际的网络函数 $H(S)$ 是两个多项式之比，而 $|H(j\omega)|$ 不可能具有截然划分通带和阻带所需要的那种不连续性。因此，滤波器设计者必需得出这样的响应函数，即是它既可以实现而又在规定的容限内逼近理想响应。

例如，低通滤波器的理想幅度响应规定为：

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= A & 0 < \omega < \omega_c \\ &= 0 & \omega > \omega_c \end{aligned} \quad (1.8)$$

如图1.2所示，在图中还用实线画了一条逼近于理想而又可实现的响应曲线。阴影区代表响应曲线不许超越的容限范围。一个在实验室得出的实际低通滤波器的响应曲线示于图1.3。

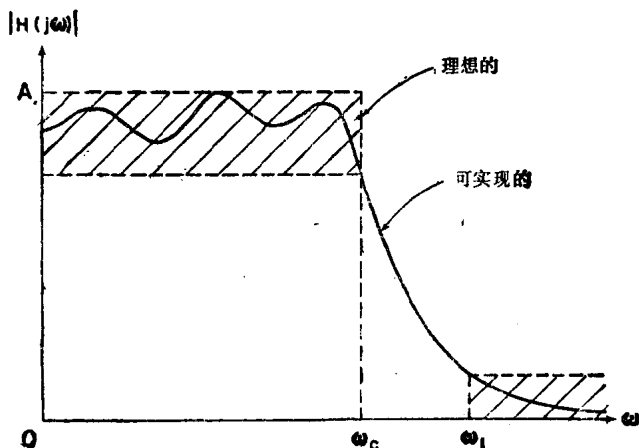


图 1.2 低通滤波器响应

在理想情况下，通带 ($0 < \omega < \omega_c$) 和阻带 ($\omega > \omega_c$) 划分得很清楚。但是，在可实现的情况下，就必须给截止点下个定义。通常将 ω_c 定义为 $|H(j\omega)|$ 下降到最大值 (如图1·2中的 A) 的 $1/\sqrt{2}$ ($= 0.707$) 的那一点。因为 $|H(j\omega)|^2$ 通常与功率有关；又因在 ω_c 处， $|H(j\omega)|^2$ 为其最大值的一半，所以 ω_c 又叫作半功率点。最后，在 ω_c 处的衰减 α_{dB} 之值为

$$\begin{aligned}\alpha_{dB}(\omega_c) &= -20 \log_{10} \frac{A}{\sqrt{2}} \\ &= 3 - 20 \log_{10} A \\ &= 3 + \alpha_{dBmin}\end{aligned}$$

所以在 ω_c 处的衰减，比最小衰减 α_{dBmin} 大 3 dB，由于这个原因，有时又把它叫作 3 dB 点。(要注意， $\log_{10} 2$ 只是近似地而不是精确地等于 0.3，所以 3dB 点与半功率点并不完全一样；但是，通常对这两种叫法是不加区别的。)

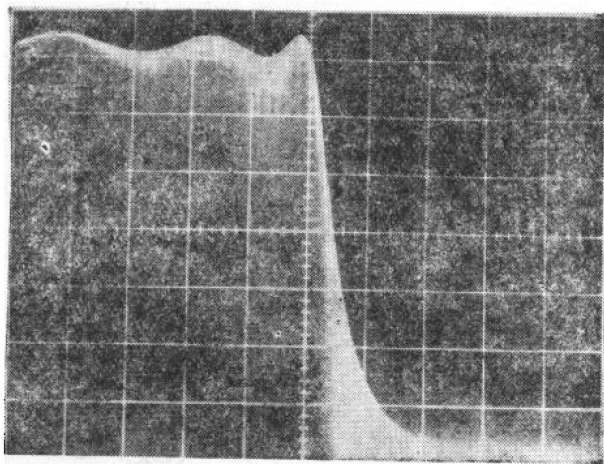


图 1·3 一个实际低通滤波器的响应

由图1·2可清楚地看到，在非理想情况下，阻带中仍有些传通 (在通带中同样也有些衰减)，如果说大于 ω_c 就是阻带，小于 ω_c 就