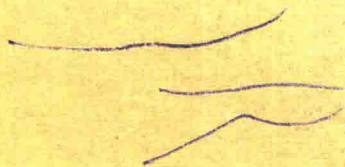
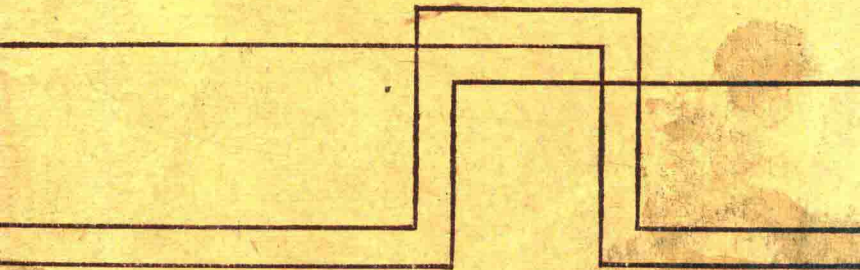


有源 滤波器 设计



一〇五室译



西北电讯工程学院

有源滤波器设计

A.B.威廉斯 著

一〇五室 译

西北电讯工程学院资料室

译者的话

这本设计手册，内容较精练、实用，易为广大设计滤波器工程人员所掌握使用。

遵照毛主席“洋为中用”“应当尽量吸收进步的外国文化”的方针，为了满足教学和科研工作的急需，我们组织翻译了这本书。

本书译自 Arthur B. Williams “Active Filter Design” ARTECH HOUSE INC., 1975。对于原文中个别无益的字句，已作了删改。

由于译者水平有限，对于译文中错误和缺点，请读者批评指正。

译者

1976年10月

前 言

本书为一般电子设计人员提供利用简单的公式和设计图表设计有源滤波器的直接方法。虽然制作这些图表需要高等数学和专业知 识，然而现在利用基本规定和准则就能够进行复杂的设计。

归一化有源椭圆函数低通滤波器的表格列于附录中。利用这些表不难设计这类极为有用的滤波器。

有一章从频率域和时间域预计所列举设计的特性。这部分有助于设计人员选择最佳滤波函数。

利用所提供的预先计算好的数据几乎能设计任何类型的滤波器。根据表中列出的低通值，通过简单变换就能设计高通、带通和带阻滤波器。

选择好合适的数值设计之后，设计人员必须保证在具体实现时能满足生产要求。实际问题已经预先考虑到了。讨论了元件容限的影响、放大器的限制以及电阻器和电容器的选择，并且建立了获得满意的滤波器的准则。在任何元件需要调整的场合，提供了一些调准技术。

有一章是关于特种滤波器类型。这包括选择性陷波滤波器、固定和可调相移网络以及延迟均衡器。

许多内容是第一次提出，并对滤波问题提供了新的解决办法。以前，有源带通滤波器设计涉及难于运算的方程式和复杂的RC合成技术。概略地指出了一种设计方法，包括简单的公式连同数值表；此设计方法能得出与理论上预计相一致的实际滤波器。

A. B. 威廉斯

目 录

第一章 有源滤波器介绍	1
1.1 有源滤波器简史	1
1.2 关于有源滤波器的某些错误概念	2
1.3 频率和阻抗的标度	3
1.4 本手册的使用	6
第二章 响应函数的选择	7
2.1 复频平面	7
2.2 频率响应标准	9
a. 低通滤波器	10
b. 高通滤波器	11
c. 带通滤波器	13
d. 带阻滤波器	17
2.3 瞬变响应考虑	18
a. 群延迟	18
b. 低通滤波器的群延迟	19
c. 带通滤波器的群延迟	19
d. 阶跃响应	21
e. 低通和带通滤波器的阶跃响应	21
2.4 勃特沃斯多项式	21
2.5 切比雪夫近似法	23
2.6 最大平坦延迟特性	28
2.7 椭圆函数响应	28

第三章 利用图表设计有源滤波器	40
3.1 全极点低通和高通滤波器.....	40
a. 低通滤波器的设计.....	41
b. 高通滤波器的设计.....	44
3.2 椭圆函数低通和高通滤波器.....	45
a. 低通滤波器的设计.....	48
b. 高通滤波器的设计.....	52
3.3 宽带带通滤波器.....	56
3.4 宽带带阻滤波器.....	58
第四章 选择性带通滤波器	62
4.1 单极点对的实现.....	62
a. 单个放大器的实现.....	62
b. 状态变量极点对线路.....	64
4.2 一个全极点带通滤波器的设计程序.....	66
a. 实数极点变换.....	67
b. 复数极点变换.....	67
4.3 调整技术.....	72
a. 频率调整.....	72
b. Q 调整.....	74
第五章 特种有源滤波器	75
5.1 陷波网络.....	75
5.2 延迟均衡器和相移网络.....	77
a. 可调延迟和振幅均衡器.....	78

b. 全通延迟均衡器	79
c. 可调相移网络	83
5.3 状态变量椭圆函数滤波器	83
a. 状态变量组件	84
b. 低通设计	87
c. 高通滤波器	89
d. 带通滤波器	93
5.4 有源全通延迟线	98

第六章 可实现性及一些实际考虑 106

6.1 对于容限的灵敏度	106
6.2 放大器的限制	108
a. 开环增益和相移	108
b. 输入和输出阻抗	111
c. 动态范围	111
d. 放大器的选择	112
6.3 无源元件的选择	115
a. 电阻器的选择	115
b. 电容器的选择	116

第七章 附录 121

7.1 归一化全极点低通滤波器表	121
表7.1a——勃特沃斯归一化低通值	121
表7.1b——0.1分贝波动切比雪夫归一化低通值	122
表7.1c——0.5分贝波动切比雪夫归一化低通值	123
表7.1d——最大平坦延迟归一化低通值	124

7.2 归一化椭圆函数低通滤波器表	125
7.3 滤波器多项式根的表	156
表7.3a——勃特沃斯归一化多项式根	156
表7.3b——0.1分贝切比雪夫归一化多项式根	157
表7.3c——0.5分贝切比雪夫归一化多项式根	158
表7.3d——最大平坦延迟归一化多项式根	159
7.4 运算放大器基础的复习	160
7.5 参考文献	167

第一章

有源滤波器介绍

1.1 有源滤波器简史

有源滤波器是在三十年代首次引进的。然而早期的结构很笨重，因为当时是用真空管作为增益元件的。体积庞大需要功率高和费用大，使它们比不过无源 LC 滤波器。事实上，有源滤波器诞生于为构成它们所必需的技术之前。

在四十年代后期发明晶体管时，许多早先的缺点消除了，因此重新激发了对有源滤波器新的兴趣。早期的约束是需要将有源元件的数量减至最小。得益的代价太大，所以，按经验来考虑费用，以晶体管代替电感线圈是一样的。遗憾的是，将晶体管减至最少，限制了早期有源滤波器只能是简单的低选择性电路。

随着晶体管变得经济及其参数逐渐改进，设计方法也发展了，这时晶体管构成了运算放大器，它具有接近无限大的增益，十分高的输入阻抗和接近零的输出阻抗。在这些放大器上引进 RC 回授网络，从而得到高性能的滤波器。在五十年代，模块晶体管化运算放大器已成为商品。然而价格高使有源滤波器局限于应用在考虑体积，而不是经济为最重要的场合。

对有源滤波器最有影响的因素是六十年代中期采用了 UA709 单片运算放大器。这是第一个集成电路放大器，它的性能与分立电路相同，而且成批生产中产量高。

采用标准低价现用的微电子运算放大器，现在可以很容易得

作从直流到 500 千赫范围的有源滤波器。它们正被广泛用于许多领域，如：航空、电话和数据通信、音频系统、精密仪器等。本书试图提供设计此类滤波器的简单明了的方法。

所讨论的有源滤波器将局限于由联接运算放大器的集总电阻和电容器组成的无电感线圈网络。虽然打算采用分立元件，但是包括淀积RC网络和单片运算放大器的微电子技术发展水平，可以制成这些电路。其次激光电阻器微调法可用于需要滤波器调整的地方。

1.2 关于有源滤波器的某些错误概念

无源和有源滤波器的设计一般都认为是繁难得不可思议的事，并仅限于专家才会。公公道道地说，无源滤波器的工程设计确实需要从工程学校或文献一般不能得到的专门知识，例如线圈绕制技术，为了产生实际元件数值的特殊电路的变换等。可是，大多数有源滤波器可以采用现用元件来装配，并能设计成可得到的实际元件值。

滤波器的作用是产生一输出对输入的频率响应。此响应可表示为S的两个多项式之比（此处 $S = j\omega$ ），称为转移函数。分子多项式的根称为零点，分母多项式的根称为极点。无源滤波器或有源滤波器均可提供所希望的转移函数。当有源和无源滤波器具有相同的极点和零点，且工作于其线性范围时，两者的响应比较起来完全没有有什么区别（除了常数增益倍数以外）。

过去，有源滤波器曾有不稳定的坏名声。振荡的倾向主要是两个因素造成的结果：采用较不稳定的线路结构和临界稳定的放大器。本手册提供的结构因其高稳定性而被选用。采用如所指出的标准集成电路运算放大器可保证放大器的稳定性。

有源滤波器的主要缺点是缺乏调整能力，至使频率响应完全受元件容限所支配，而无源滤波器却具有可调电感线圈。本书给出的设计技术指出了调整谐振的简便方法，譬如窄带带通滤波器就需要这种调整。

1.3 频率和阻抗的标度

一给定有源滤波器的频率响应可以移动（或伸缩）到频率轴的不同范围，其方法是将电阻器或电容器值除以频率标度因数FSF。频率标度因数是所需移动后的响应的基准频率与具有等效衰减的给定滤波器频率之比。通常选择3分贝点作为低通或高通滤波器的基准频率，中心频率作为带通滤波器的基准频率。

附录中的表是对1弧度处具有3分贝点的低通滤波器给出的。这些滤波器被认为是“归一化”于1弧度。欲移动此3分贝点到所需频率，必须确定频率标度因数。频率标度因数可表达为：

$$FSF = \frac{\text{要求的基准频率}}{\text{现有的基准频率}} \quad (1-1)$$

分子分母必须用相同的单位表示，或是赫，或是弧度，这里弧度等于 $2\pi f$ 。下面的例子给出频率标度因数的计算方法。

例 1-1

要求：等效响应的3分贝点为1000赫。

给定：图1-1a的归一化低通滤波器及图1-1b所示的响应。

结果：计算频率标度因数

$$FSF = \frac{2\pi 1000 \text{弧度}}{1 \text{弧度}} = 6280 \quad (1-1)$$

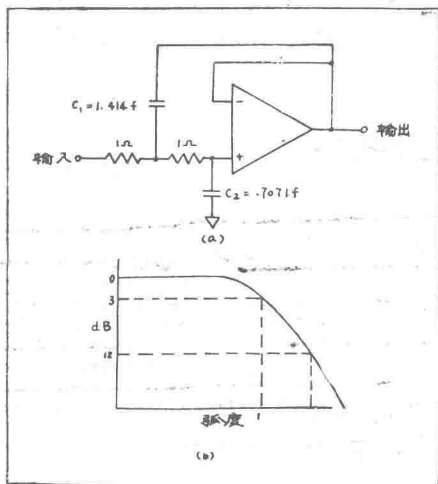


图 1-1 归一化低通滤波器及其频率响应

将电容器值除以频率标度因数便得到图 1-2a 的去归一化滤波器和图 1-2b 所示响应。应该注意，频率轴上所有的点都已乘以频率标度因数。

显然，得出的电容器值太大，不实用。这个问题用阻抗标度来解决。若所有电阻器值都乘以一因子 Z ，且所有电容器值都除以 Z ，则一线性有源或无源 RC 网络将保持其响应不变。

基本例子是时间常数为 RC 的简单 RC 网络。如果 R 乘以 Z ， C 除以 Z ，则在时间常数表达式中两 Z 相消。

图 1-2a 的电路中，若电阻器乘以等于 10,000 的 Z ，电容器除以 Z ，则得出图 1-3 的电路。所得到的值一定是实用的。

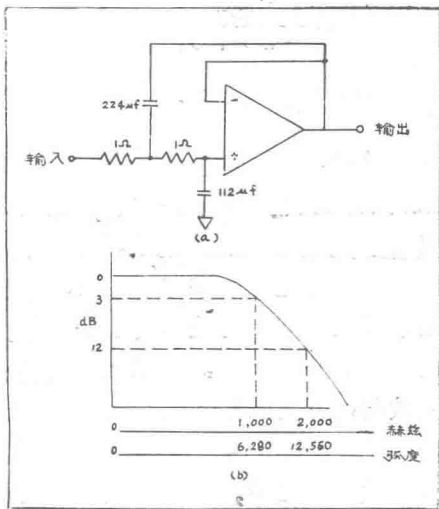


图1-2 去归一化低通滤波器及其频率响应

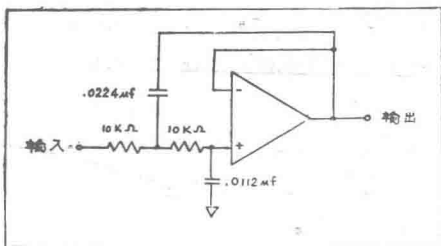


图1-3 阻抗已标度的去归一化低通滤波器

频率和阻抗标度的过程可以合并为一步：

$$C = \frac{C_{\text{归一化}}}{Z \times F S F} \quad (1-2)$$

$$R = R_{\text{归一化}} \times Z \quad (1-3)$$

1.4 本手册的使用

设计有源滤波器的方法由两个基本步骤组成。开始，必须求出满足频率响应条件的滤波器转移函数。可能需要在两种滤波器类型之间进行选择：一种是能提供陡峭滚降，但瞬态特性差的滤波器；另一种是选择性较差，可能需要较多的节数才能满足技术条件，但瞬态失真较小的滤波器。第二章讨论各种滤波器响应函数，并提供图表数据，以便设计者能按其需要选择最好的滤波器类型。

特定的转移函数选好之后，就必须设计满足此响应的电路。附录中对第二章所述的每一转移函数提供了归一化的表。对于低通、高通和宽带带通以及带阻滤波器，这些表的用法在第三章中介绍和说明。对于选择性带通滤波器见第四章。

若所需滤波器为特种类型，如：陷波网络、延迟均衡器或相移网络或状态变量椭圆函数滤波器，第五章介绍若干有效的线路和设计程序。

选择好转移函数和随之设计滤波器以后，必须考虑要采用的电阻器和电容器的类型和容限以及运算放大器的类型。第六章提出了最佳元件选择的准则。

第七章给出了归一化滤波器表和供进一步阅读的广泛的参考文献目录。

此外，第七章中有一节复习运算放大器原理，供可能不熟悉其理论和应用的读者参阅。

第二章

响应函数的选择

2.1 复频平面

一无源或有源线性网络有一个频率响应，它可用转移函数来描述。此转移函数可表示为：

$$T(S) = \frac{E_{\text{输出}}}{E_{\text{输入}}} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2-1)$$

$N(s)$ 和 $D(s)$ 是 S 的分子多项式和分母多项式。若以 $j\omega$ 代替 S ，这里 $j = \sqrt{-1}$ 和 $\omega = 2\pi f$ ，则转移函数就可直接算出。

例 2-1

给定：

$$T(s) = \frac{1}{S^2 + 1.414S + 1} \quad (2-2)$$

证明此转移函数就是图 1-1 电路的转移函数。

结果： a) 代入 $S = j\omega$

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 + j1.414\omega} \quad (2-3)$$

b) 求在 $\omega = 0, 1, 2$ 弧度的值

ω	$T(j\omega)$	衰 减 - dB
0	1	0
1	$0.707 \angle -45^\circ$	-3
2	$0.424 \angle -137^\circ$	-12.3

此表与图1-1b的响应一致。

我们说例 2-1 的转移函数是二阶转移函数，因为分母多项式的最高次幂是2。

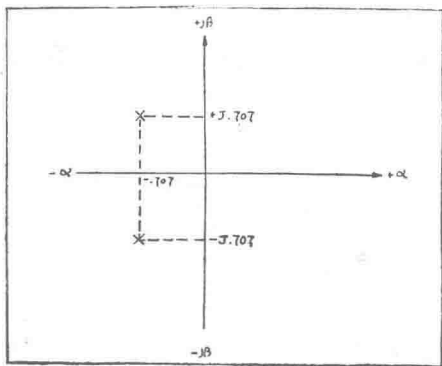


图 2-1 式2-2的复频平面表示法

转移函数也可以用多项式根表示。方程式 2-2 分母的两个根是：

$$S = -0.707 + j0.707$$

和 $S = -0.707 - j0.707$

这些复数可在复平面中表示。横坐标是 α ， α 即根的实数部份，纵坐标是 β ，根的虚数部份。分子根用 0 表示，称为零点，分母根用 X 表示，称为极点。图2-1示出例2-1的复平面表示法。

当图1-1的电路去归一化为图1-2的电路，转移函数也同样变化。去归一化转移函数变为：

$$T(s) = \frac{1}{S^2 + 8880S + 39.46 \times 10^6} \quad (2-4)$$

分母具有以下根：

$$S = -4440 + j4440$$

和 $S = -4440 - j4440$

将归一化坐标乘以频率标度因数，可从原归一化根直接导出这些根。用频率标度因数倍增或缩小元件值的方法变换滤波器，也须用频率标度因数使极点和零点（如果有的话）值倍增或缩小。

极点和零点在数学上受到的限制是它们总成对发生，彼此共轭，但实数轴上的极点和零点例外，它们不受这种限制，可以单个发生。

2.2 频率响应标准

若干参数确定一滤波器的特性。最通常规定的要求是频率响应。当给定一频率响应条件时，滤波器类型必须选择得能满足此要求。为此，将技术条件变换为归一化要求，然后将此归一化要求与归一化曲线相比较，以便选择满意的滤波器。然后将选定的滤波器对需要的频率去归一化。