

[美] 哈里Y—F拉姆 著 冯嵩云 应启珩 陆延丰 孟宪元 译

模拟和数字滤波器 设计与实现

7314596
2011
1

模拟和数字滤波器 设计与实现

[美] 哈里 Y-F 拉姆 著

冯喬云 应启珩 译
陆延丰 孟宪元



人民邮电出版社

8510496

D03127

Analog and Digital Filters: Design and Realization

Harry Y-F. Lam

1979

Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey

内 容 简 介

本书系统地介绍了(有源、无源)模拟滤波器和数字滤波器的理论与设计方法。叙述了现代滤波器设计所需要的基本理论和知识;然后列举大量的实例来说明运用解决实际问题的方法。每章末,给出了简要的结论;附有典型习题,可供读者练习,更好地掌握书中的基本内容。

本书除了可用作大学有关专业师生的教学参考书外,还可作为有关工程技术人员自学滤波器理论和设计方法的技术读物。

模拟和数字滤波器设计与实现

[美] 哈里 Y-F 拉姆 著

冯喬云 应启珩 陆延丰 孟宪元 译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河南邮电印刷厂印刷

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 1985年3月第一版

印张: 22 16/32 页数: 360 1985年3月河南第一次印刷

字数: 597 千字 印数: 1—6,500 册

统一书号: 15045·总2956-有5386

定价: 3.55元

译者的话

在现代电子技术中，滤波器的应用极其广泛。在模拟信号或数字信号的处理过程中都需要采用相应的滤波器。因此滤波器的理论和设计方法已成为无线电技术专业重要的学习课程。从事滤波器设计的工程技术人员也需要系统地了解滤波器的理论和设计方法，以便在工程实践中能设计出更好的设备和装置。

本书是作者在美国加利福尼亚大学伯克利分校讲授滤波器设计课程的基础上编写的。本书将模拟滤波器与数字滤波器统一考虑，系统地讲述它们的理论和设计方法。为便于读者学习掌握，在内容的阐述上比较注重理论与实际相结合，循序渐进、步步深入。首先，系统地叙述了现代滤波器设计所需要的基本理论和知识，然后注重讲明运用理论解决实际问题的方法。略去一些冗长的数学推导，但又阐明了问题的实质。使读者对滤波器的设计原理和方法有清晰的概念。书中并列有大量实例来说明理论或设计方法，每章末给出简要的结论，附有大量的典型习题，以便读者学习时练习和更好地掌握本书的基本内容（如果需要更深入地钻研有关理论和论著，在各章末还推荐了有关文献）。因此本书既可用作大学有关专业学生学习滤波器课程的参考教材，也可用于有关工程技术人员自学滤波器理论和设计方法时的参考书。

参加全书翻译的有孟宪元（第一、五、六、七章）、冯彛云（第

二、十章)、陆延丰(第三、八、九章)、应启珩(第四、十一、十二、十三章)。冯磊云对全部译稿进行了审阅。高永泉参加了部份译稿的校对工作。

原书有些错误在译文中已经改正。限于译者水平,难免有错误或不当之处,希读者指正。

译 者

1982年于清华大学无线电电子学系

前 言

滤波器的基本概念最早是由 G. 坎贝尔和 K. 瓦格纳在 1915 年分别提出的，这和他们从事传输线和振动系统的工作有关系。自那时起，滤波器理论和滤波器工艺的研究一直在发展着。今天，滤波器已被广泛地运用在电子技术中，以致很难想象在一个稍许复杂的系统或设备中不用这种或那种形式的滤波器。

本书是作者在加利福尼亚大学伯克利分校任教时组织与讲授三、四年级滤波器设计课程的成果。课程是根据两方面的目的组织的。第一个目的是给学生一些滤波器设计的基本知识和工具，使学生在学完课程后能够设计一些简单的(模拟和数字)滤波器；另一个目的是使学生在学完模拟和数字滤波器更进一步的课程时有坚实的基础。本课程的先修课是 E. S. 顾和 C. A. 德索所写的《基本电路理论》的半年课程。

本书的基本方法是注重实际。处理方法是简单的，然而能阐明内容的本质。解释原理时采用直观的(理论上是可靠的)办法，并以大量的例子说明设计方法和步骤。本书从基本的问题出发一步一步把学生引导到相当高深的课题。当材料超出所设计的水平时，作者就给出有关的参考文献。因而，本书既适合三、四年级学生作为滤波器设计课程的教材，也同样适合从事实际工作的工程师们作为滤波器方面的入门指导。作者的用意是使学过一两门电路理论课的读者可顺利地理解本书。

本书经严密地组织安排，以便给读者最大量地讲述滤波器方面的许多内容。第一章到第四章讨论模拟滤波器设计的基本知识。第二章包括了无源和有源滤波器的组成单元。第三章介绍网络函数的

性质。讨论了希尔伯特变换的含义、最小相位函数的概念和构成网络函数的各种方法。第四章讨论构成无源网络数学基础的霍尔维茨多项式和正实函数。

第五章到第七章，作者讨论无源电路实现的问题。根据第四章建立的正实函数的概念，在第五、六章讨论 RC 和 LC 策动点函数的性质。在这些性质的基础上，推导出 RC 和 LC 策动点函数的实现方法。第七章用这些方法实现各类转移函数。特别是用 RC、LC 和达林顿梯型电路来综合低通、带通和高通型的转移函数，用格形电路实现全通转移函数。

第八章讨论寻求合适的转移函数的问题。详尽地讨论了幅频特性为巴特沃思与切贝雪夫型的滤波器和群时延特性为贝塞尔型的滤波器。还包括有帮助设计的附加图表。第九章介绍了灵敏度的概念。第十章讨论有源滤波器。讨论了两种基本方法：直接法包括实现无源 RC 单口和双口滤波器；间接法着重二阶有源滤波器的实现。单级和多级放大器的技术都考虑了。讨论了每种技术的优缺点。第十章还研究了非理想运算放大器对电路特性的影响。最后介绍了一类只包括运算放大器和电阻的有源电路(称为有源 R 电路)。业已证明，这类电路在高频中应用是很广泛的。

第十一章到第十三章讨论数字滤波器。第十一章介绍数字滤波器的基础，包括 Z 变换、逆 Z 变换、离散付里叶变换、频率响应、抽样定理和数字滤波器的组成单元。第十二章讨论寻求合适的数字转移函数的方法(这里要求很好地理解第八章)。详尽地讨论了冲激不变法和双线性变换法。第十三章论及了数字滤波器的实现。还介绍了一种消除无延回路的方法。

每一章末包含有为加强和扩充讲授内容的一整套习题，大部份习题都已经过课堂检验，保证它们的困难程度和复杂程度对学生都是适宜的。为了防止接连几年都用同样的习题，每个练习都有一些相似的习题，这些习题只是数字参量和细节有所不同。

作者感谢威斯康辛大学(密耳瓦基)的 J. D. 麦克弗森教授和亚

伯达大学的 K. A. 斯特罗姆斯摩教授阅读本书最后的全部手稿。还要感谢 1974—1976 年进修本课程的学生们作的贡献，他们热情的课堂合作和交流才能使本书的初稿得以修正和提高。作者愿意向加利福尼亚大学(伯克利)的 L. O. 赵，C. A. 德索和 E. S. 顾诸教授及贝尔电话实验室(马塞诸州南安道佛)的 F. J. 威特，C. F. 库尔斯和 R. P. 斯奈塞诸先生表示感谢，感谢他们的鼓励，建设性的批评和精神上的支持。还要感谢加利福尼亚大学(伯克利)电气工程和计算机科学系提供一个本书得以完成的优异环境。

最后，作者还要向他的妻子爱莉斯表示衷心的感谢，她抄写了手稿的第一、二稿(为同学用)，并维持了家庭安宁和平静。

HARRY Y-F. LAM

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
1-1 幅度函数	3
1-2 相位函数和群时延函数	9
1-3 设计程序	12
参考文献和阅读资料	14
习题	14
第二章 组成单元	18
2-1 表示方法	19
2-2 电路元件	20
2-2-1 基本组成单元	21
2-2-2 从属组成单元	24
参考文献和阅读资料	41
习题	42
第三章 网络函数的特性	54
3-1 复变量的多项式	54
3-2 网络函数	58
3-2-1 希尔伯特变换	59
3-2-2 偶部和奇部	66
3-2-3 相位函数与幅度函数	71
参考文献和阅读资料	76
习题	76
第四章 正实函数和无源性	80
4-1 霍尔维茨多项式	83

4-2 正实(PR)函数	94
4-3 无源性	100
参考文献和阅读资料	101
习题	102
第五章 无损策动点函数的特性和实现	109
5-1 无损策动点函数的特性	109
5-2 无损策动点函数的实现	115
5-2-1 福斯特实现方法	115
5-2-2 考尔实现方法	119
5-3 简要结论	134
参考文献和阅读资料	135
习题	136
第六章 无源 RC 策动点函数的特性和实现	141
6-1 RC策动点阻抗函数的特性	142
6-2 RC策动点导纳函数的特性	148
6-3 福斯特实现方法的例子	153
6-4 考尔实现方法	155
6-4-1 考尔 I 型	156
6-4-2 考尔 II 型	163
6-5 简要结论	171
参考文献和阅读资料	173
习题	174
第七章 转移函数的无源实现	182
7-1 梯形网络	182
7-1-1 RC梯形网络	183
7-1-2 LC梯形网络	197
7-1-3 其它的考虑	204
7-2 格形网络	210
7-3 达林顿方法	213

7-3-1 单端端接的无损网络	216
7-3-2 两端端接的无损双口网络	225
7-4 简要结论	239
参考文献和阅读资料	242
习题	243
第八章 滤波器的逼近	250
8-1 巴特沃思逼近	256
8-1-1 基本性质	260
8-1-2 转移函数	262
8-1-3 电路实现	267
8-1-4 例题	270
8-2 切贝雪夫逼近	274
8-2-1 切贝雪夫多项式	274
8-2-2 切贝雪夫滤波器	277
8-2-3 转移函数	290
8-2-4 电路实现	295
8-2-5 例题	297
8-2-6 椭圆滤波器	298
8-3 贝塞尔逼近	301
8-3-1 转移函数	302
8-3-2 设计和实现	308
8-3-3 过渡型滤波器	311
8-4 基本的频率变换和网络变换	313
8-4-1 低通到低通的变换	313
8-4-2 低通到带通的变换	318
8-4-3 低通到带阻的变换	324
8-4-4 低通到高通的变换	329
8-4-5 阻抗换算	332
8-4-6 例题	334

8-5 全通滤波器	337
参考文献和阅读资料	339
第八章 附录	339
习题	350
第九章 灵敏度	361
9-1 极点和零点的灵敏度	361
9-1-1 计算方法	362
9-1-2 一般结论	372
9-2 网络函数的灵敏度	375
9-2-1 一般结论	376
9-3 二阶滤波器的灵敏度	378
参考文献和阅读资料	381
习题	382
第十章 有源滤波器	388
10-1 直接实现法	390
10-1-1 用无源电路直接实现	390
10-1-2 具有RC双口网络的直接实现——顾氏法	398
10-1-3 具有RC单口的直接实现	405
10-1-4 用状态变量法直接实现	419
10-2 级联实现方法	423
10-2-1 单级放大器的双二阶电路	425
10-2-2 多级放大器的双二阶电路	445
10-2-3 互补电路结构	464
10-2-4 零极点对的选择	469
10-2-5 极点灵敏度的考虑	471
10-3 非理想运算放大器的考虑	472
10-3-1 倒相电压增益放大器	474
10-3-2 不倒相电压增益放大器	479
10-3-3 积分器	481

10-3-4 弗兰特带通滤波器节	485
10-4 无电容的有源电路	490
10-4-1 高 Q 高频带通有源 R 双二阶电路	490
10-4-2 有源 R 双二阶电路	493
参考文献和阅读资料	505
习题	508
第十一章 数字滤波器导论	523
11-1 数字信号和系统	523
11-2 Z 变换	534
11-2-1 Z 变换的性质	538
11-2-2 逆 Z 变换	541
11-3 富立叶变换	548
11-3-1 采样定理	552
11-4 离散富立叶变换	558
11-5 基本组成单元的考虑	566
11-6 稳定性考虑	570
11-7 简单数字滤波器举例	573
11-8 数字滤波器的分析	576
参考文献和阅读资料	578
习题	580
第十二章 数字滤波器的设计	586
12-1 无限冲激响应数字滤波器的设计	591
12-1-1 数值积分技术	593
12-1-2 冲激不变变换	599
12-1-3 双线性变换	615
12-1-4 频率变换	625
12-1-5 全通数字滤波器的设计	636
12-2 有限冲激响应数字滤波器的设计	639
12-2-1 频率采样法	643

12-2-2	窗函数法	645
12-2-3	对有限冲激响应数字滤波器的一些评价	648
	参考文献和阅读资料	649
	习题	651
第十三章	数字滤波器的实现	658
13-1	无限冲激响应数字滤波器的实现	658
13-1-1	直接实现	659
13-1-2	间接实现	686
13-2	有限冲激响应数字滤波器的实现	695
	参考文献和阅读资料	699
	习题	700

第一章 绪 论

从最普遍的意义上说，“过滤器”是一个器件或系统，它按指定的方式变换通过它的输入。本质上，一个过滤器按这样一个方式把输入变换到输出，即输入的某些合乎要求的特性在输出中仍保留，而不合乎要求的特性被抑制掉。

过滤器种类繁多，这里仅举几个例子，在汽车中，滤油器把那些悬浮在通过它的油中的有害微粒除去；空气过滤器放过空气，但是阻止脏物和灰尘到达汽化器。有色玻璃可以作滤光器用来吸收某些波长的光，因此改变了到达照相机感光膜上的光。

设计一个电气滤波器是为了从需要的和不需要的混合信号中区分和传递需要的信号。复杂的滤波器的典型例子是电视机和收音机。更确切地说，当一个电视机调谐到某一频道，如第二频道时，它将让第二频道发射的信号(伴音和图象信号)通过，而阻塞所有别的信号。从较小的规模来看，滤波器在许多通讯系统如电话、电视、收讯机、雷达和声纳中是一个基本的电子部件。滤波器在电源变换电路中和一般的电力系统中亦可以找到。事实上，滤波器已被广泛地运用到现代技术中，以致很难想象有任何稍复杂的电子装置不采用这种或那种形式的滤波器。

滤波器可以按许多方法分类。模拟滤波器是用来处理模拟的或连续时间的信号；数字滤波器是用来处理数字信号(具有量化幅度电平的离散时间信号)^①。模拟滤波器又可以分为集总的或分布参数

^① 我们在第十一章来讨论数字滤波器。下面讨论中，我们只涉及模拟滤波器和连续时间系统。

的滤波器，这取决于滤波器的频率范围^①。最后，模拟滤波器还可以分为**无源的或有源的滤波器**，这取决于实现滤波器时采用的元件类型。

用较抽象的术语来描述，一个滤波器是用一组**输入—输出对**或

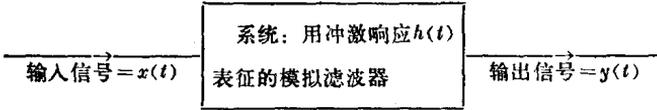


图 1-1 滤波器是带有一组规定的输入—输出特性的系统

激励—响应对表征的系统，如图 1-1 所示，其中

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (1-1)$$

在写(1-1)式时，我们假设所考虑的单输入单输出的模拟滤波器是**因果的、线性的、集总的和时不变的**，并且 $h(t)$ 是滤波器的冲激响应。式(1-1)的拉普拉斯变换得到：

$$Y(s) = H(s) \cdot X(s) \quad (1-2)$$

式中 $Y(s)$ 、 $H(s)$ 和 $X(s)$ 分别是 $y(t)$ 、 $h(t)$ 和 $x(t)$ 的拉普拉斯变换。这里滤波器是用它的转移函数(当 $s = j\omega$ 时即频率响应函数)^② $H(s)$ 来表征的。

因为 s 或 $j\omega$ 是一个复变量，所以 $H(s)$ 或 $H(j\omega)$ 是复数量。即 $H(j\omega)$ 有一**实部** $\text{Re}[H(j\omega)]$ 和一**虚部** $\text{Im}[H(j\omega)]$ 。而且

$$H(j\omega) = \text{Re}[H(j\omega)] + j \text{Im}[H(j\omega)] \quad (1-3)$$

用极坐标表示，我们可以写成

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\angle H(j\omega)} \quad (1-4)$$

其中 $|H(j\omega)|$ 和 $\angle H(j\omega)$ 分别表示 $H(j\omega)$ 的**幅度**和**相位导前角**，并且有以下关系式：

$$\begin{aligned} |H(j\omega)|^2 &= \{\text{Re}[H(j\omega)]\}^2 + \{\text{Im}[H(j\omega)]\}^2 \\ &= H(j\omega) \cdot H(-j\omega) \end{aligned} \quad (1-5)$$

① 在这本书中，我们只考虑集总滤波器。

② 在正弦稳态的分析中，我们令 $s = j\omega$ 。

$$\angle H(j\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[H(j\omega)]}{\text{Re}[H(j\omega)]} \quad (1-6)$$

$$\text{Re}[H(j\omega)] = |H(j\omega)| \cos \angle H(j\omega) \quad (1-7)$$

$$\text{Im}[H(j\omega)] = |H(j\omega)| \sin \angle H(j\omega) \quad (1-8)$$

注意式(1-5)的最后一个等式成立，是因为假设 $H(s)$ 的全部系数为实数。

1-1 幅度函数

如前所述，使用滤波器的一般目的是为了从需要的和不需要的混合信号中区分和传递需要的信号。对于无线电接收机，进入接收机的信号是电噪声和包括接收台在内的所有电台信号的混合信号。把收音机调谐到特定的频率刻度，我们就能滤除掉所有不需要的电台信号，而让所要电台发射的信号通过。因为受因果系统的限制，我们既不能装一个接收机，它只让一个特定的频率 ω_p 通过，而抑制掉所有其它的频率，也不能够建造一个广播电台，它只准确地在 ω_p 频率上广播。因而我们设置一个滤波器，它让包含频率 ω_p 的频率间隔 $(\omega_{p1}, \omega_{p2})$ 内的信号通过，而抑制所有其它的频率，这里“通过”和“抑制”是按相对的含义而不是绝对的含义来使用的。

从式(1-2)，我们得

$$|Y(j\omega)| = |H(j\omega)| \cdot |X(j\omega)| \quad (1-9)$$

$$\angle Y(j\omega) = \angle H(j\omega) + \angle X(j\omega) \quad (1-10)$$

方程式(1-9)说明输出信号的幅度是输入信号幅度和滤波器频率响应函数幅度的乘积。这意味着当滤波器在某个频率范围内，比如说 ω_{s1} 和 ω_{s2} 之间，有等于零(或接近于零)的幅度函数 $|H(j\omega)|$ ，则当输入信号在这个频带 $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$ 内时，输出信号幅度将为零(或近似为零)。*因而间隔 $(\omega_{s1}, \omega_{s2})$ 称作滤波器的阻带。类似地，如果幅度函数 $|H(j\omega)|$ 在频带 $(\omega_{p1}, \omega_{p2})$ 内是大于或等于接近1的