

有源滤波器 的快速实用设计

[美] D·E 约翰逊

J·L 希尔伯恩 著

潘秋明 译

人民邮电出版社

RAPID PRACTICAL DESIGNS OF ACTIVE FILTERS

David E. Johnson, John L. Hilburn

John Wiley & Sons, Inc. 1975

内 容 提 要

本书是一种工程设计手册，介绍各种常用的有源滤波器的基本理论、电路形式和响应曲线，分析了它们的优缺点，详尽给出了用图表快速进行设计的实用方法和设计实例。在每章末尾总结有设计程序、设计图表及设计建议。可供电子线路设计初学者和专业人员、大专院校电子技术专业师生以及研制集成电路的生产部门参考使用。

有源滤波器的快速实用设计

[美] D. E. 约翰逊 著
J. L. 希尔伯恩
潘秋明 译

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：787×1092 1/32 1980年6月第 一 版
印张：8 页数：128 1980年6月河北第一次印刷
字数：183 千字 印数：1—10,500 册

统一书号：15045·总2361—有5149

定价：0.65 元

前 言

本书介绍有源滤波器的简化快速设计方法，即通过查表的方法完成实用滤波器的全部设计。本书希望适用于从初学者到专家的所有有源滤波器设计人员。滤波器电路所用的元件是集成电路运算放大器、电阻和电容。所有的设计表都是按标准的常用电容值编制的。

利用这些表可以构成下面几种型式的滤波器：

1. 低通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
2. 高通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
3. 带通滤波器（二到八阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
4. 带阻滤波器（或陷波器）（二阶或四阶巴特沃斯或切比雪夫响应）。
5. 相移或全通滤波器（二阶）。
6. 恒时延滤波器或贝塞尔滤波器（二阶、三阶或四阶）。
7. 全通恒时延滤波器（二阶）。

对于切比雪夫响应，几乎所有的滤波器都给出了0.1、0.5、1、2和3dB波纹宽度的设计数据。

每种滤波器在本书分别专设一章加以讨论。在每章末尾概括了设计程序并给出了适当的设计表。对于所考虑的每种电路都给出了实用的设计建议。每章都包含最常用的滤波器，如压控电压源(VCVS)、无限增益多路反馈和双二次电路的设计。此外，在低通、高通、带通和时延电路里，还包括作者自己设

计的几种多路反馈滤波器，它们都具有优良的工作性能。第六章讨论一种新型滤波器，它既具有贝塞尔型又具有全通型的滤波器特性。

对于所讨论的大多数型式的滤波器都给出了许多详细的例子，而且还附有所得响应的实际照片。例如，2.5节给出了压控电压源低通滤波器的详细设计，这可用为总的设计指导。然而，使用本书却无需通读各章，因为在每章末尾的摘要里都已给出了全部必需的知识。

本书是我们合著的这类题材的第二本书；由于各人对每本书所做的贡献相同，因此，在本书我们互换了署名的次序。

D. E. 约翰逊

J. L. 希尔伯恩

译者序

滤波器是除放大器以外使用最广泛的模拟电路部件。滤波器的小型化在电子线路的小型化中起着非常重要的作用。在低频范围，普通的 LC 滤波器由于需要很大的电容和电感，产生了体积、重量、感应、失真和干扰等一系列问题。多少年来，人们总是想利用其他器件代替它们，特别是取代电感。有源滤波器就是其中一个很重要的方法。

运算放大器的应用，特别是集成电路运算放大器的广泛应用及其性能的提高和价格的降低，为有源滤波器的广泛使用创造了非常有利的条件。在低频和超低频范围，原来的 LC 滤波器将越来越多地为有源滤波器所代替，这是毫无疑问的。

近年来，有源滤波器的理论研究工作 and 实际设计制作技术的研究工作非常活跃，有关这方面内容的书籍和论文很多。在这本书中，作者介绍了各种常用的有源滤波器的基本理论和电路形式，分析了它们的优缺点，给出了详尽的用图表进行设计的方法。和别的著作不同的是，作者在本书中对各种电路的设计全部采用标准电容值，使用起来非常方便。本书按滤波器的种类分章，各章自成体系，读者只需查阅各章末尾的设计程序摘要就可以进行滤波器设计，确实是一本“快速”和“实用”的设计手册。

原书中有些明显的差错和提法不妥的地方我们作了更正，有几个地方还加了译者注，以便于初学者参考。

本书译稿承成都电讯工程学院卢铁城同志和1020所邱致和同志校阅，谨此致谢。

译者

1979年4月

• 3 •

目 录

1. 绪论	(1)
1.1 滤波器理论基础	(1)
1.2 运算放大器	(3)
1.3 电阻和电容	(4)
2. 低通滤波器	(6)
2.1 基本理论	(6)
2.2 巴特沃斯低通滤波器	(7)
2.3 切比雪夫低通滤波器	(9)
2.4 设计表	(10)
2.5 压控电压源低通滤波器	(12)
2.6 无限增益多路反馈低通滤波器	(14)
2.7 双二次低通滤波器	(15)
2.8 多路反馈低通滤波器	(16)
2.9 多路反馈低通滤波器设计实例	(26)
2.10 压控电压源低通滤波器设计程序摘要	(29)
2.11 无限增益多路反馈低通滤波器设计程序摘要	(48)
2.12 双二次低通滤波器设计程序摘要	(63)
2.13 多路反馈低通滤波器设计程序摘要	(68)
3. 高通滤波器	(74)
3.1 基本理论	(74)
3.2 压控电压源高通滤波器	(76)
3.3 无限增益多路反馈高通滤波器	(79)
3.4 双二次高通滤波器	(80)
3.5 多路反馈高通滤波器	(81)

3.6	多路反馈高通滤波器设计实例	(89)
3.7	压控电压源高通滤波器设计程序摘要	(91)
3.8	无限增益多路反馈高通滤波器设计程序摘要	(109)
3.9	双二次高通滤波器设计程序摘要	(121)
3.10	多路反馈高通滤波器设计程序摘要	(124)
4.	带通滤波器	(133)
4.1	基本理论	(133)
4.2	二阶节的级联	(135)
4.3	压控电压源带通滤波器	(136)
4.4	无限增益多路反馈带通滤波器	(138)
4.5	正反馈带通滤波器	(139)
4.6	双二次带通滤波器	(140)
4.7	多路反馈带通滤波器	(143)
4.8	多级谐振器型带通滤波器	(145)
4.9	压控电压源带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(149)
4.10	无限增益多路反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq$ 10)	(155)
4.11	正反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 50$)	(158)
4.12	双二次带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 100$)	(163)
4.13	四阶多路反馈带通滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(169)
4.14	多级谐振器型带通滤波器设计程序摘要(阶数 = 4、 6、8)	(183)
5.	带阻滤波器	(195)
5.1	基本理论	(195)
5.2	压控电压源带阻滤波器	(197)
5.3	多路反馈带阻滤波器	(198)
5.4	双二次带阻滤波器	(199)
5.5	压控电压源带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 10$)	(202)
5.6	多路反馈带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 25$)	(205)

5.7	双二次带阻滤波器设计程序摘要($Q \leq 50$)	(207)
6.	相移和时延滤波器	(215)
6.1	全通滤波器	(215)
6.2	二阶单运算放大器全通滤波器	(217)
6.3	双二次全通滤波器	(218)
6.4	恒时延或贝塞尔滤波器	(219)
6.5	贝塞尔滤波器的实现	(220)
6.6	全通恒时延滤波器	(222)
6.7	单运算放大器全通滤波器设计程序摘要	(224)
6.8	双二次全通滤波器设计程序摘要	(230)
6.9	贝塞尔(恒时延)滤波器设计程序摘要	(235)
6.10	全通恒时延滤波器设计程序摘要	(241)
	参考文献	(243)
	附录A	(245)
	附录B	(247)

1. 绪 论

1.1 滤波器理论基础

滤波器是一种通过一定频率的信号而阻止或衰减其他频率信号的部件。能通过的频率构成通带，而被衰减的频率则构成滤波器的阻带。按通带和阻带在频域内的位置，滤波器分为低通、高通、带通、带阻和全通等类。这些型式以及恒时延滤波器将在以后分别以一章的篇幅进行讨论。

滤波器的性能可用其幅度响应来衡量，它是滤波器传递函数 $H(s)$ 的幅度 $|H(j\omega)|$ 对角频率 ω ($\omega=2\pi f$, rad/sec)或频率 f (赫)的响应曲线。在所有情况下，我们取 $H(s)=V_2(s)/V_1(s)$ ，其中 V_2 和 V_1 分别为滤波器的输出和输入电压。对于每种滤波器，其理想幅度响应和逼近于理想情况的在物理上可实现的响应的例子将在相应的章节里加以介绍。

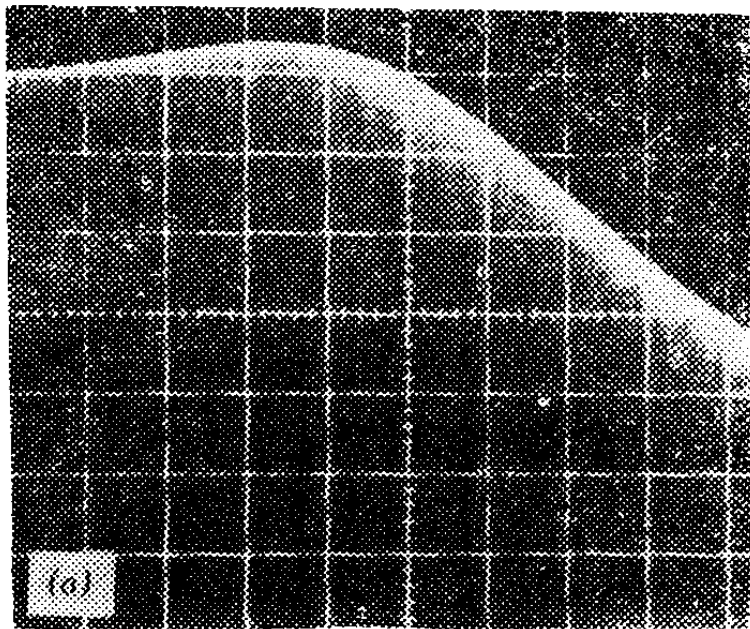
除幅度响应以外，滤波器的另一重要特性是它的相位响应，即 $\phi(\omega)$ 对 ω 所构成的曲线，这里 $\phi(\omega)$ 由下式定义：

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (1.1)$$

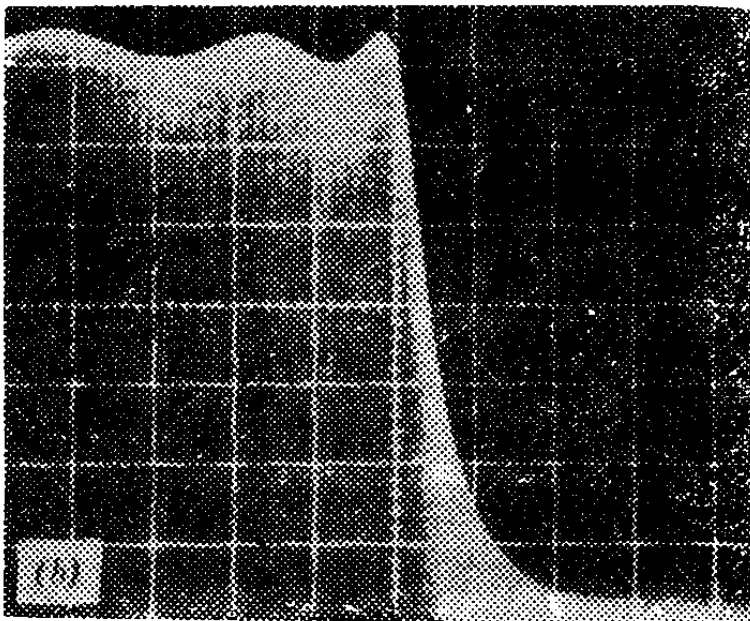
在某些滤波器设计中，如第六章要讨论的全通和贝塞尔滤波器，相位响应就是我们所关心的特性。

在早期的著作中〔1〕*，作者讨论了低阶，主要是二阶和四阶有源滤波器的快速设计方法（对于各种滤波器，“阶”这

* 引用的参考文献列于书末的文献目录中。



(a) 二阶



(b) 六阶

图 1—1 低通滤波器幅度响应

个术语将在以后给出定义，今后将可看到，阶数越高则通带和阻带的分界越陡，因而滤波器越好)。高阶滤波器比低阶滤波器优越，如图 1—1 所示。其中，(a) 为二阶低通滤波器的幅度响应，(b) 为同种类型的六阶低通滤波器的幅度响应。这些是实际电路的响应，其结构将在第二章里叙述。

无源滤波器由电感、电容和电阻构成，在一定频率范围内是很适用的。然而，在低频范围，由于电感尺寸和性能的限制，无源滤波器是不理想的。因而多少年来，设计师们力求

用模拟电感特性的有源器件来代替电感。近年来，小型化的进展使有源元件在价格上可以和电感相竞争，而且通常还比电感便宜，这就加速了用有源器件代替电感的趋势。

用有源部件代替电感以得到滤波器的方法有许多种（参考文献〔2〕到〔8〕）。本书用的有源部件为集成电路运算放大器，这将在下一节简单地加以叙述。我们介绍的大多数设计都是制作

有源滤波器时通用的。此外，对于大多数型式的滤波器，我们还介绍了一种由作者自己设计的新电路。给出了每种型式滤波器的设计表，设计人员根据技术指标可以简单地选择相应的表格并得出电路元件值。本书所列参考文献对每种滤波器都提供了若干参考资料，供对理论细节感兴趣的读者使用。然而，为了使用本书介绍的设计程序制作滤波器，读者只需参考每章末尾设计表前设计摘要的内容。

1.2 运算放大器

我们用的主要的有源部件是运算放大器，其符号示于图 1—2。运算放大器为一多端部件，为简单起见，我们只画出三个端点，即反相输入端(—)，同相输入端(+)和输出端。输出电压决定于输入端的电压差，因而图 1—2 所示的运算放大器经常被认为是一个差分

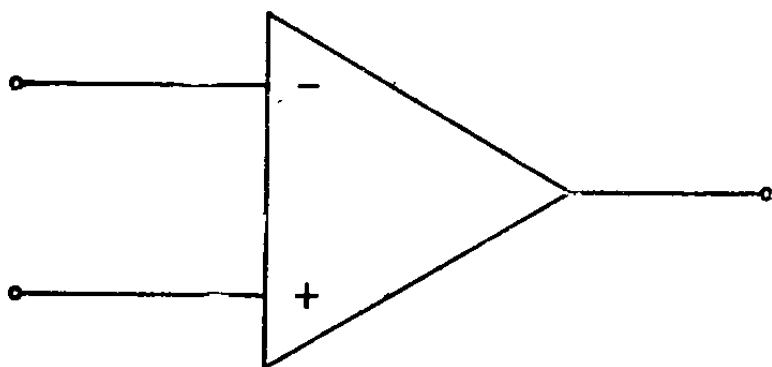


图 1—2 差分运算放大器

运算放大器。其他未画出的端子的用途在产品说明书里有说明，通常包括电源输入端、频率补偿端和调零端。

在推导下面几章的设计公式时，我们假定运算放大器两个输入端的电位差为零，它们的输入电流也为零。对理想运算放大器来说，这是对的；如果按照产品说明书正确使用运算放大器，实际的运算放大器也很接近这种理想情况。理想运算放大器的其余特性是具有无限大的输入阻抗而输出阻抗为零，实际的运算放大器也接近于这样的特性。这就允许人们可以将两个

或更多的电路级联起来而不会明显地影响它们各自的工作。

有许多出版物对市售的运算放大器的特性和使用作了详细的说明(如参考文献〔2〕、〔4〕和〔9〕至〔18〕)。此外,大多数制造厂都出版了包含具体运算放大器性能指标的详细产品目录。参考文献〔9〕给出了大量的产品目录。

一般说来,为了稳定地工作,集成电路运算放大器需要频率补偿。一些运算放大器为内部补偿式,如741、536、107、5556、740和747(双741)。为了区分不同的制造厂家,使用了不同的表示符号,如 μ A741、AD741、MC1741、LM741、RC741、SN72741、CA3056A等等都是741型运算放大器。其他的运算放大器要求外部补偿,其补偿情况由产品目录说明,通常在很高的频率和增益时这种补偿是很有用的。如709、748、101和531型就是这类运算放大器的例子。

为了使下面几章给出的电路获得最好的结果,设计人员应当使用有足够的增益和带宽的运算放大器。例如,制造厂给出的开环增益至少应是滤波器增益的50倍〔11〕。其他的要求在每章末尾摘要中给出。

1.3 电阻和电容

常用的三种电阻为炭质合成电阻,金属膜电阻和线绕电阻。其中,炭质合成电阻最便宜,大量地用于设计要求不太严格的滤波器中。特别是用于在室温下使用的滤波器中。在我们的例子里,使用容差为5%的炭质合成电阻来构成二阶、三阶

一些著名的制造厂为伯尔—布朗研究公司、费尔柴尔德半导体公司、摩托罗拉公司、国家半导体公司、RCA公司、西格涅梯克斯(Signetix)公司和德克萨斯仪器公司。

和四阶滤波器。当性能要求高，或者温度因素较重要时，应采用金属膜或线绕电阻。对于五阶、六阶滤波器，设计要求比较严格，需采用容差约为2%的元件。七阶和八阶设计要求更加严格，应当使用容差为1%的元件。在我们的例子中，五到八阶滤波器使用容差为1%的金属膜和线绕电阻。

至于电容，陶瓷圆片电容是很通用和经济的。但是它只应用在要求非常不高的情况下。比较可取的是聚酯树脂电容，我们在许多设计例子中都使用这类电容。对应用条件严格和性能要求高的滤波器，在大多数情况下，最好选用聚苯乙烯或聚四氟乙烯电容。要更好地了解电阻和电容，读者可以参考文献〔2〕第317~319页。

最后还需指出，构成高阶滤波器，比如七阶和八阶，只有在有经验的设计人员通过测试设备对电路元件检测以后才能进行。

2. 低通滤波器

2.1 基本理论

低通滤波器是一个通过低频信号而衰减或抑制高频信号的部件。理想的低通滤波器幅度响应如图2—1虚线所示，可以实现的近似于理想特性的幅度响应如实线所示。

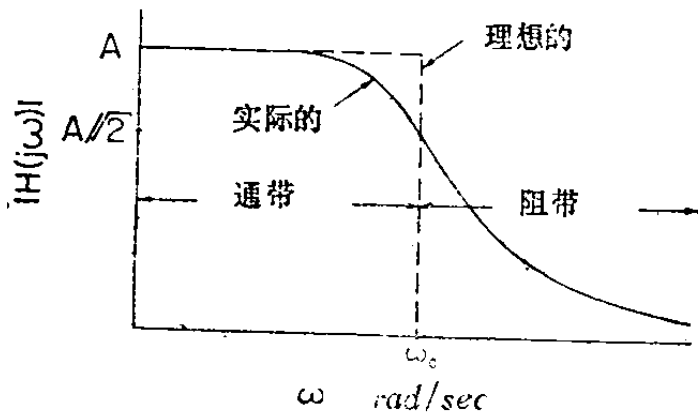


图 2—1 低通滤波器幅度响应

ω_c 的定义是当 $|H(j\omega)|$ 下降为最大值（在图2—1中用A表示）的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 时的频率。

有些作者认为阻带开始于 $\omega_1 > \omega_c$ 点，这里 $|H(j\omega_1)|$ 远低于 $A/\sqrt{2}$ ，并在 ω_c 和 ω_1 之间定义一个过渡带（ $\omega_c < \omega < \omega_1$ ）。对我们来说，这种精确的划分没有必要，我们只简单地认为阻带就是 $\omega > \omega_c$ 的区间。

幅度响应也可按分贝（dB）数画成曲线，并用 α 表示，它的定义为：

$$\alpha = 20 \log_{10} |H(j\omega)| \quad (2.1)$$

这样，在截频点， α 低于最大值 $20 \log_{10} \sqrt{2} = 3 \text{dB}$ 。

当然，理想的低通幅度响应不可能在物理上加以实现；然而，可用下面的传递函数对理想特性加以逼近

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Gb_0}{s^n + b_{n-1}s^{n-1} + \dots + b_1s + b_0} \quad (2.2)$$

其中， G, b_0, b_1, \dots, b_n 为适当选择的常数。(2.2) 式表示一个 n 阶全极点近似式，其所以这样称呼是因为它的分母多项式为 n 次幂而分子为常数（因而它没有有限零点，只有有限极点）。低通滤波器的增益是传递函数在 $s=0$ 时的值，很明显，在 (2.2) 式里，增益就是 G 。

我们将把讨论限定在全极点函数，故 (2.2) 式将表示各种 n 值时的一般情况。关于其他类型的近似以及对低通滤波器理论的完备的叙述，读者可参阅典型的滤波器和电路理论书籍，如参考文献 (19) 至 (22)，最近的书籍如 (23)、(24)。

有许多种低通滤波器，最通用的也许是巴特沃斯和切比雪夫型。它们的传递函数都为 (2.2) 式的类型，差别仅仅在于常数 b_0, b_1, \dots, b_{n-1} 的选择。在本章中，我们将简略地讨论巴特沃斯和切比雪夫低通滤波器的性能并给出简单快速的设计方法。

2.2 巴特沃斯低通滤波器

一种用所谓最平通带特性去逼近理想低通特性的滤波器叫巴特沃斯滤波器 (21)、(22)。其幅度响应为

$$|H(j\omega)| = \frac{G}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}};$$
$$n=1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

* 零点是当传递函数为零时的 s 值，而极点是当传递函数为无穷大时的 s 值。

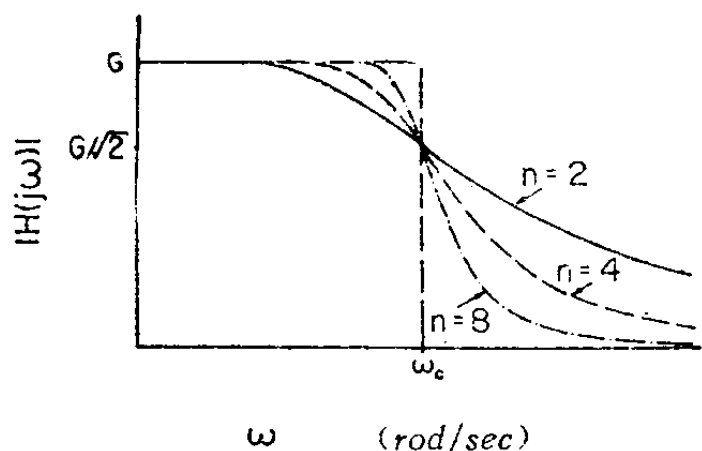


图 2—2 巴特沃斯滤波器幅度响应

(在 $\omega = \omega_c$ 附近)和它进入阻带以后的衰减速率一样,也较差。下一节将要介绍一种牺牲一些巴特沃斯低频特性但在其他区域的幅度特性很好的滤波器,这就是切比雪夫滤波器。例如,在较高的频率,巴特沃斯响应的衰减速率约为 $-20ndB/十倍频$ (“十倍频”表示频率变化十倍),它显然低于切比雪夫滤波器的相应的衰减速率*[21]。

理想的相位响应是斜率为 $-\tau$ 的直线,这里 τ 为时延,将在第6章讨论。从相位响应的观点来看,巴特沃斯滤波器优于切比雪夫滤波器,这就是说,在整个通带内,前者的相位响应更接近于直线[21]。一般说来,滤波器幅度响应越好,则其相位响应越差,反之亦然。图2—2给出的巴特沃斯滤波器的相位响应示于图2—3。

这里 n 为滤波器的阶。从图2—2(图中表示了 n 为几种不同值的情况)可见,随着 n 的增长,响应更加接近理想特性。

巴特沃斯滤波器在 $\omega = 0$ 附近有很好的幅度特性,但它的截止特性

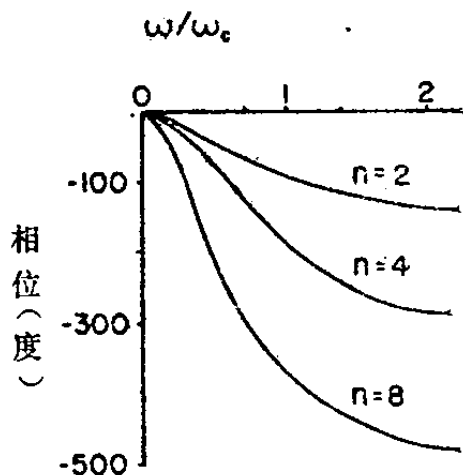


图 2—3 巴特沃斯滤波器相位响应

*这句话是不准确的。可以证明,在远大于截频的区域,所有全极型滤波器的衰减率都是 $-20ndB/十倍频$,只是在截频附近,巴特沃斯滤波器衰减下降率近似于 $-20ndB/十倍频$,而切比雪夫滤波器则可能远大于 $-20ndB/十倍频$ 。因此这句话应该是“在截止区,切比雪夫滤波器比巴特沃斯滤波器具有更大的衰减”。

——译者

2.3 切比雪夫低通滤波器

切比雪夫低通滤波器的幅度响应^[22]由下式给出

$$|H(j\omega)| = \frac{K_1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2(\omega/\omega_c)}}; \quad n=1, 2, \dots \quad (2.4)$$

这里， ε 和 K_1 为常数， C_n 是第一类 n 阶切比雪夫多项式。图2—4表示了 ε 值相同而 n 值不同的几个实例。由图可见，在通带内，具有幅度相等的波纹。随着 n 的增加，波纹数目增加，同时阻带内的衰减也增加。由此得出，在通带内波纹幅

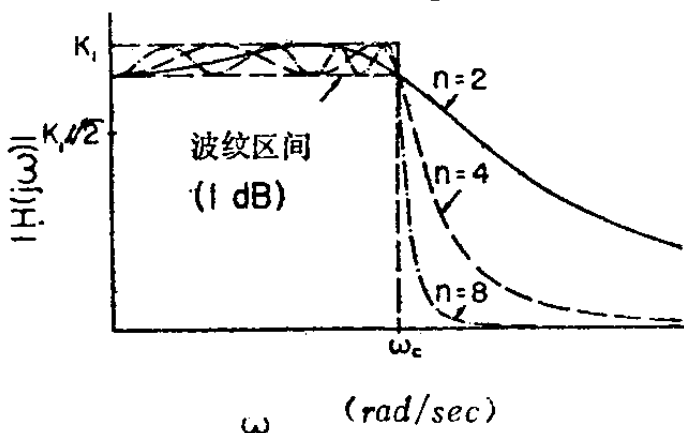


图 2—4 切比雪夫滤波器幅度响应

度一定时，随着 n 值的增加，对理想特性的近似越好。

当 $K_1 = 1$ 时，波纹幅度为 $RW = 1 - 1/\sqrt{1 + \varepsilon^2}$ ，而用分贝定义时为

$$RW_{dB} = 20 \log \sqrt{1 + \varepsilon^2} = 10 \log(1 + \varepsilon^2)$$

此值决定于 ε 的选择，它可以用来表征滤波器的性能。例如，1dB切比雪夫低通滤波器，其幅度响应（用dB表示）具有1dB的通带波纹宽度*。由图2—4显然可见，这里所定义的 ω_c 为等波纹区间的边缘而不是通常的3dB截频点（3dB波纹的滤波器除外）。在我们讨论的切比雪夫滤波器中，我们将把 ω_c 看作是截频点，该点就是等波纹区间的终止频率。对于各种 n 值和波纹幅度（分贝）， ω_c 值与通常的3dB截频的关系可由表2—1查

*这里按原文字面意义译为波纹宽度，实质上是指波纹幅度。——译者