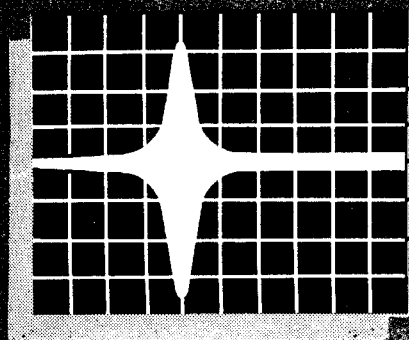




[美] J·L·希尔本 D·E·约翰逊 著

内 容 提 要

本书介绍了一种用图表来设计有源滤波器的方法,既简单又实用,不必作任何计算,只要根据技术要求选择合适的图表便可查出电路的元件数值。这种滤波器可以采用运算放大器及标称系列元件构成。

本书共分六章,分别介绍:1.低通滤波器;2.高通滤波器;3.带通滤波器;4.带阻滤波器;5.相移及延迟滤波器。每种设计都有实例说明过程,并附有照片显示电路特性。

本书简明扼要,易学易做。对电子线路设计人员、实验工作者及大专院校师生都有实用价值。

Manual of Active Filter Design

John L. Hilburn David E. Johnson

McGraw Hill, Inc., 1973

有源滤波器设计手册

[美] J. L. 希尔本 D. E. 约翰逊 著

徐绮云 沈幼文 译

凌成枝 校

*

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张: $5^{3/4}$ 字数: 146,000

1980年11月北京第一版·1980年11月北京第一次印刷

印数1—4,500册·定价1.10元

统一书号: 15038·新600

译 者 序

使用集成电路运算放大器和少量元件来构成各种有源滤波器的历史并不长,尤其在我国只是近几年的事。这种有源滤波器具有许多优点:滤波性能优良,便于调整,特别适合频率较低的情况,价格低,体积小。在国外已广泛地应用于各种电子仪器中。在我国随着集成电路运算放大器的大量生产,这种滤波器的应用也必将日益广泛。

本《手册》介绍了用查阅图表来设计有源滤波器的实用而简单的方法。一般有源滤波器的理论与制作都较复杂,必须进行繁琐的计算,使应用受到了一定的限制。而本书所提供的则是一种不必进行任何计算,只要根据技术要求查阅图表便可进行设计的高效率方法。本书共六章,各种滤波器分章讨论,用实例来说明设计步骤并附有照片显示电路的特性。各章结尾都有设计步骤概要及大量图表。由于它们都很完整,有独立性,所以在设计某种滤波器时,不需要通读全文。本书对电子线路设计人员、实验工作者及大专院校师生都有实用价值。

希望本书的出版能对推广使用新技术有所裨益。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 有源滤波器	1
1.2 运算放大器	1
1.3 电阻与电容	2
第二章 低通滤波器	4
2.1 基本电路和方程	4
2.2 低通勃脱华斯滤波器	6
2.3 二阶低通勃脱华斯滤波器	7
2.4 低通契比雪夫滤波器	9
2.5 二阶低通契比雪夫滤波器	9
2.6 四阶低通勃脱华斯和契比雪夫滤波器	11
二阶低通滤波器的设计步骤提要	12
四阶低通滤波器的设计步骤提要	33
第三章 高通滤波器	49
3.1 基本电路和方程	49
3.2 二阶高通滤波器	50
3.3 四阶高通滤波器	51
二阶高通滤波器的设计步骤提要	52
四阶高通滤波器的设计步骤提要	74
第四章 带通滤波器	90
4.1 二阶带通滤波器的基本电路和方程	90
4.2 二阶 VCVS 带通滤波器	90
4.3 二阶多路反馈带通滤波器	92
4.4 二阶正反馈带通滤波器	93

4.5 高阶带通滤波器	95
二阶 VCVS 带通滤波器的设计步骤提要 ($Q \leq 4$)	97
二阶多路反馈带通滤波器的设计步骤提要 ($Q \leq 10$)	104
二阶正反馈带通滤波器的设计步骤提要 ($Q \leq 40$)	122
高阶带通滤波器的设计步骤提要	131
第五章 带阻滤波器	132
5.1 基本电路和方程	132
带阻滤波器的设计步骤提要	134
第六章 相移和时间延迟滤波器	148
6.1 全通滤波器	148
6.2 恒定时间延迟滤波器或贝塞尔滤波器	151
全通(相移)滤波器的设计步骤提要	153
贝塞尔滤波器(恒定时间延迟滤波器)的设计步骤提要	166
参考文献	173

设计图表目录

图表

2.10(a)	K (参数) $\sim f$ (频率) 曲线	($f_c = 1 \sim 10^2$ 赫)
2.10(b)	" "	($f_c = 10^2 \sim 10^4$ 赫)
2.10(c)	" "	($f_c = 10^4 \sim 10^6$ 赫)
2.11	二阶低通勃脱华斯滤波器	(增益=2)
2.12	" "	(增益=4)
2.13	" "	(增益=6)
2.14	" "	(增益=8)
2.15	" "	(增益=10)
2.16	二阶低通契比雪夫滤波器	(1/2 分贝, 增益=2)
2.17	" "	(1/2 分贝, 增益=6)
2.18	" "	(1/2 分贝, 增益=10)
2.19	" "	(1 分贝, 增益=2)
2.20	" "	(1 分贝, 增益=6)
2.21	" "	(1 分贝, 增益=10)
2.22	" "	(2 分贝, 增益=2)
2.23	" "	(2 分贝, 增益=6)
2.24	" "	(2 分贝, 增益=10)
2.25	" "	(3 分贝, 增益=2)
2.26	" "	(3 分贝, 增益=6)
2.27	" "	(3 分贝, 增益=10)
2.28	四阶低通勃脱华斯滤波器	(增益=4)
2.29	" "	(增益=36)
2.30	" "	(增益=100)

2.31	四阶低通契比雪夫滤波器	(1/2 分贝, 增益=4)
2.32	" "	(1/2 分贝, 增益=36)
2.33	" "	(1/2 分贝, 增益=100)
2.34	" "	(1 分贝, 增益=4)
2.35	" "	(1 分贝, 增益=36)
2.36	" "	(1 分贝, 增益=100)
2.37	" "	(2 分贝, 增益=4)
2.38	" "	(2 分贝, 增益=36)
2.39	" "	(2 分贝, 增益=100)
2.40	" "	(3 分贝, 增益=4)
2.41	" "	(3 分贝, 增益=36)
2.42	" "	(3 分贝, 增益=100)
3.6(a)	K (参数) $\sim f$ (频率) 曲线	($f_c = 1 \sim 10^2$ 赫)
3.6(b)	" "	($f_c = 10^2 \sim 10^4$ 赫)
3.6(c)	" "	($f_c = 10^4 \sim 10^6$ 赫)
3.7	二阶高通勃脱华斯滤波器	(增益=1)
3.8	" "	(增益=2)
3.9	" "	(增益=4)
3.10	" "	(增益=6)
3.11	" "	(增益=8)
3.12	" "	(增益=10)
3.13	二阶高通契比雪夫滤波器	(1/2 分贝, 增益=2)
3.14	" "	(1/2 分贝, 增益=6)
3.15	" "	(1/2 分贝, 增益=10)
3.16	" "	(1 分贝, 增益=2)
3.17	" "	(1 分贝, 增益=6)
3.18	" "	(1 分贝, 增益=10)
3.19	" "	(2 分贝, 增益=2)
3.20	" "	(2 分贝, 增益=6)

3.21	二阶高通契比雪夫滤波器	(2 分贝, 增益=10)
3.22	" "	(3 分贝, 增益=2)
3.23	" "	(3 分贝, 增益=6)
3.24	" "	(3 分贝, 增益=10)
3.25	四阶高通勃脱华斯滤波器	(增益=4)
3.26	" "	(增益=36)
3.27	" "	(增益=100)
3.28	四阶高通契比雪夫滤波器	(1/2 分贝, 增益=4)
3.29	" "	(1/2 分贝, 增益=36)
3.30	" "	(1/2 分贝, 增益=100)
3.31	" "	(1 分贝, 增益=4)
3.32	" "	(1 分贝, 增益=36)
3.33	" "	(1 分贝, 增益=100)
3.34	" "	(2 分贝, 增益=4)
3.35	" "	(2 分贝, 增益=36)
3.36	" "	(2 分贝, 增益=100)
3.37	" "	(3 分贝, 增益=4)
3.38	" "	(3 分贝, 增益=36)
3.39	" "	(3 分贝, 增益=100)
4.11(a)	K (参数) $\sim f$ (频率) 曲线	($f_0=1\sim 10^2$ 赫)
4.11(b)	" "	($f_0=10^2\sim 10^4$ 赫)
4.11(c)	" "	($f_0=10^4\sim 10^6$ 赫)
4.12	VCVS 带通滤波器	($Q=2\sim 4.6$)
4.13	" "	($Q=3\sim 6.9$)
4.14	" "	($Q=4\sim 9.2$)
4.15	多路反馈带通滤波器	($Q=2$, 增益=2)
4.16	" "	($Q=3$, 增益=2)
4.17	" "	($Q=4$, 增益=2)
4.18	" "	($Q=5$, 增益=2)

4.19	多路反馈带通滤波器	($Q=6$, 增益=2)
4.20	" "	($Q=7$, 增益=2)
4.21	" "	($Q=8$, 增益=2)
4.22	" "	($Q=10$, 增益=2)
4.23	" "	($Q=2$, 增益=6)
4.24	" "	($Q=4$, 增益=6)
4.25	" "	($Q=6$, 增益=6)
4.26	" "	($Q=8$, 增益=6)
4.27	" "	($Q=10$, 增益=6)
4.28	" "	($Q=4$, 增益=10)
4.29	" "	($Q=6$, 增益=10)
4.30	" "	($Q=8$, 增益=10)
4.31	" "	($Q=10$, 增益=10)
4.32	正反馈带通滤波器	($Q=15$, 增益=4)
4.33	" "	($Q=20$, 增益=4)
4.34	" "	($Q=30$, 增益=4)
4.35	" "	($Q=40$, 增益=4)
4.36	" "	($Q=15$, 增益=10)
4.37	" "	($Q=20$, 增益=10)
4.38	" "	($Q=30$, 增益=10)
4.39	" "	($Q=40$, 增益=10)
5.4(a)	K (参数) $\sim f$ (频率) 曲线	($f_0=1\sim 10^2$ 赫)
5.4(b)	" "	($f_0=10^2\sim 10^4$ 赫)
5.4(c)	" "	($f_0=10^4\sim 10^6$ 赫)
5.5	带阻滤波器	($Q=2$)
5.6	" "	($Q=3$)
5.7	" "	($Q=4$)
5.8	" "	($Q=5$)
5.9	" "	($Q=6$)

5.10	带阻滤波器	$(Q=7)$
5.11	" "	$(Q=8)$
5.12	" "	$(Q=10)$
5.13	" "	$(Q=15)$
6.7(a)	K (参数) $\sim f$ (频率)曲线	$(f_0=1\sim 10^2 \text{ 赫})$
6.7(b)	" "	$(f_0=10^2\sim 10^4 \text{ 赫})$
6.7(c)	" "	$(f_0=10^4\sim 10^6 \text{ 赫})$
6.8	全通(相移)滤波器	$(\phi=\pm 10^\circ)$
6.9	" "	$(\phi=\pm 20^\circ)$
6.10	" "	$(\phi=\pm 30^\circ)$
6.11	" "	$(\phi=\pm 40^\circ)$
6.12	" "	$(\phi=\pm 50^\circ)$
6.13	" "	$(\phi=\pm 60^\circ)$
6.14	" "	$(\phi=\pm 70^\circ)$
6.15	" "	$(\phi=\pm 80^\circ)$
6.16	" "	$(\phi=\pm 90^\circ)$
6.17(a)	T_d (延迟时间) $\sim f$ (频率)曲线	$(f_0=1\sim 10^2 \text{ 赫})$
6.17(b)	" "	$(f_0=10^2\sim 10^4 \text{ 赫})$
6.17(c)	" "	$(f_0=10^4\sim 10^6 \text{ 赫})$
6.18	贝塞尔(恒定时间延迟)滤波器	(增益=2)
6.19	" "	(增益=6)
6.20	" "	(增益=10)

第一章 绪 论

1.1 有源滤波器

滤波器是一种能够通过某些频率信号，抑制或衰减另一些频率信号的装置。无源滤波器是由电感、电容及电阻构成的。但是，由于受到尺寸和实际性能的限制，电感在某些频率范围是不适用的。因此，近几年来有一种趋向，即用能模拟电感效应的有源器件来代替电感。随着有源器件的小型化，它在价格上已与电感不相上下，甚至在许多情况下比电感更为便宜。所以，这种趋向正在不断加快。

本手册介绍了用标称系列元件构成各种有源滤波器的简便方法。这些滤波器具有规定的滤波特性。这里所用的有源器件是集成电路运算放大器，我们将在下一节作简单的介绍。每种类型的滤波器都附有设计图表，设计人员可以根据技术要求简便地选择合适的图表，然后查出电路的各元件值。本书对每种滤波器都提供了大量的参考资料，可供对理论细节感兴趣的设计人员查阅。使用本手册时，仅需参阅各章末尾所附图表前的设计步骤提要即可。

1.2 运算放大器

构成有源滤波器的基本元件是运算放大器，它的符号如图 1.1 所示。图上只表示出三个端：反相输入端(—)、同相输入端(+)

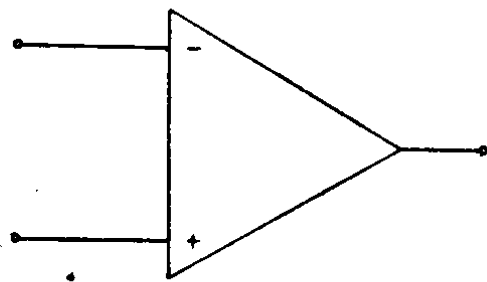


图 1.1 差分运算放大器

与输出端。然而，实际的运算放大器是一种多端器件。其他各端，一般说来包括电源连接端、频率补偿端和失调调整端，是由制造厂规定的。

下列各章中所给出的公式是在这样的假设下导出来的：即在运算放大器的两个输入端之间的电压为零，流入两个输入端的电流为零。这种假设对理想运算放大器来说是正确的，对于实际运算放大器来说，只要按照制造厂的规定来使用也是十分接近的。

许多刊物详述了现有运算放大器产品的特性及用途(见[1]①-[12])。另外，大多数制造厂的产品目录也有这方面的具体资料。[1]中列有很多制造厂商的名单，其中包括伯尔-布朗研究公司(Burr-Brown Research Corp.)、费尔卡特半导体公司(Fairchild Semiconductor)、莫托洛拉公司(Motorola)、国家半导体公司(National Semiconductor)、美国无线电公司(RCA)、西格纳铁克公司(Signetix)及得克萨斯仪器公司(Texas Instruments)等一些较有名望的制造厂。

图 1.1 表示的运算放大器是一种普通常用的差分输入放大器。一般地说，要使集成电路运算放大器工作稳定，需要有频率补偿。有些运算放大器如 741 型，是内部补偿的。 $\mu A741$, $AD741$, $MC1741$, $LM741$, $RC741$, $SN72741$, $CA3056A$ 等都是 741 类型的。型号上的差别只是为了区别不同的制造厂。另一些内部补偿运算放大器包括：536, 107, 5556, 740 及 747(双 741)型。其它的运算放大器如 709, 748, 101 和 531 型等，根据制造厂的规定需要有外部补偿，一般用于较高的频率和增益。

为使下面各章所提出的线路能有最佳的效果，设计人员应该采用具有足够大的增益及频率范围的运算放大器。例如，制造厂所提供的开环增益至少应该是滤波器增益的 50 倍[4]。另一些建议将在各章末的设计步骤提要中提出。

1.3 电阻与电容

普通用的电阻有三种类型。炭合成电阻用得最为广泛，它可以用于要求不高的滤波器，尤其是在室温情况下使用的滤波器。我

① 方括号内为所引证的参考文献编号。

们所举的各例都使用了误差为 5% 的炭合成电阻, 因为这种电阻最经济实用。如果滤波性能要求很高, 或者温度特性很重要, 那么可以采用金属膜电阻或线绕电阻。

关于电容, 陶瓷圆片电容是很普通而又便宜的一种, 多应用在对要求不高的滤波器上。常用而又合适的是聚酯薄膜电容。我们所举的各例中, 大多采用这种电容。对性能要求很高的滤波器, 最好选用聚苯乙烯电容和聚四氟乙烯电容。

对电阻电容的深入讨论, 读者可参考文献[2]的 317—319 页。

第二章 低通滤波器

2.1 基本电路和方程

低通滤波器是一种能通过低频信号,抑制或衰减高频信号的装置。它的特性可以用振幅响应曲线来表示,这就是传递函数 $H(s)$ 的振幅 $|H(j\omega)|$ 对频率 ω (弧度/秒) 或 f (赫) 的变化曲线。这里 $\omega = 2\pi f$ 。在任何情况下,我们都令 $H(s) = V_2(s)/V_1(s)$, 式中 V_2 是输出电压, V_1 是输入电压。举例如图 2.1 所示, 图中虚线所表示的响应曲线是理想情况, 而实线所表示的则是接近理想的实际情况。 ω_c 为截止频率(或用赫为单位, 则 $f_c = \omega_c/2\pi$), 它的定义是该点所对应的振幅 $|H(j\omega)|$ 为最大值的 $1/\sqrt{2}$ ($=0.707$) 倍, 图中最大值以 A 表示。通带范围为 $0 \leq \omega \leq \omega_c$, 阻带范围为 $\omega > \omega_c$ 。

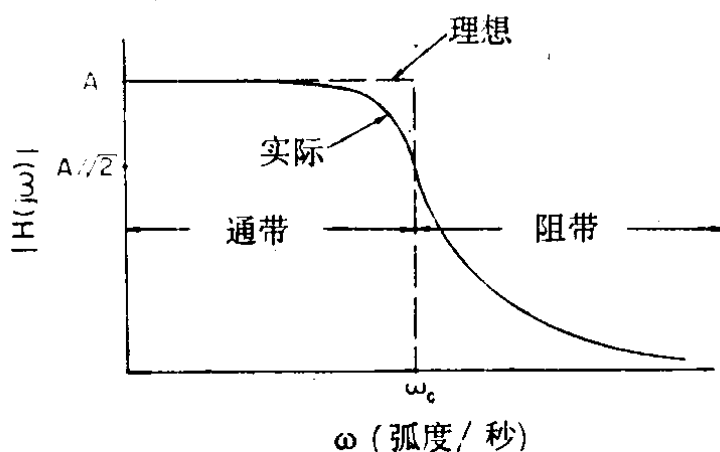


图 2.1 低通振幅响应

另外, 振幅响应也可以绘成用分贝(dB)表示的振幅(以 α 表示)对频率 ω (或 f) 或对 $\log \omega$ (或 $\log f$) 的变化曲线。如图 2.2 所示, 截止频率所对应的 α 为 -3 分贝。

近似于理想的二阶低通滤波器可用下述传递函数来表示:

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{K}{s^2 + as + b} \quad (2.1)$$

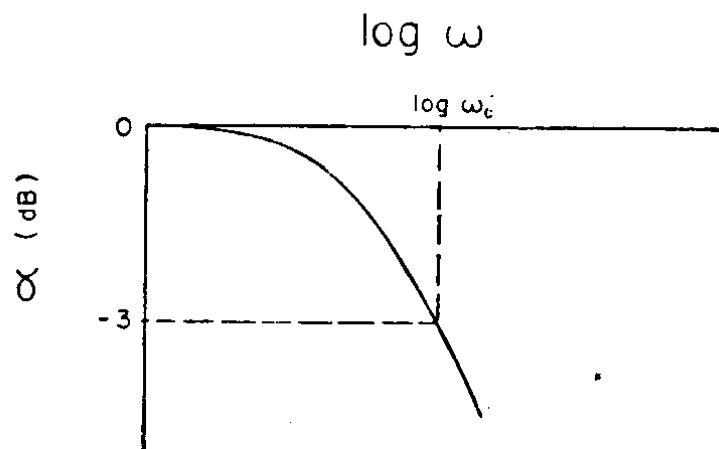


图 2.2 用分贝表示的振幅响应

式中 a 与 b 是可以适当选择的常数, K 是另一个常数[13]。“二阶”指的是分母多项式的幂次。高阶传递函数除了分母的幂次较高以外, 与(2.1)式相类似。低通滤波器增益是它的传递函数在 $s=0$ 时的值, 因此从(2.1)式可以求出增益等于 K/b 。

用有源器件代替电感以得到低通滤波器的方法很多 ([2]、[6]、[13]、[14])。我们采用赛伦-凯(Sallen and Key)的方法, 该方法中所用的有源器件就是第一章所介绍的运算放大器。赛伦-凯二阶低通滤波器示于图 2.3, 图中电阻和电容可适当选择, 以满足(2.1)式中 a 和 b 。运算放大器连同电阻 R_3 和 R_4 构成一个电压控制电压源(VCVS), 因此, 赛伦-凯网络是 VCVS 型网络。

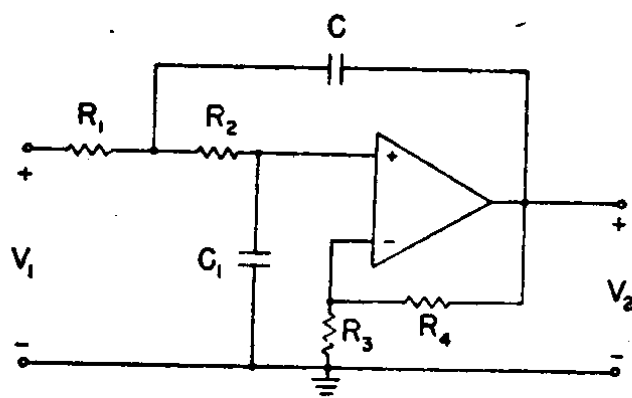


图 2.3 二阶低通滤波器

高阶滤波器可用两只或更多的二阶滤波器串联组成。例如, 我们将在 2.6 节中介绍的一个四阶低通滤波器是由两只如图 2.3 的网络串联而成的。

图 2.3 的分析表明, 要得到(2.1)式, 必须:

$$\begin{aligned} K &= \frac{\mu}{R_1 R_2 C C_1} \\ a &= \frac{1}{R_2 C_1} (1 - \mu) + \frac{1}{R_1 C} + \frac{1}{R_2 C} \\ b &= \frac{1}{R_1 R_2 C C_1} \end{aligned} \quad (2.2)$$

式中 $\mu = 1 + \frac{R_4}{R_3}$, μ 值是这个 VCVS 网络的增益, 而且因为 $K/b = \mu$, 所以它也是滤波器的增益。

低通滤波器的类型有很多, 最常用的两种是勃脱华斯(Butterworth)和契比雪夫(Chebyshev)型。下面几节中我们将对这两类滤波器予以简要说明, 并提出简单的设计方法。

2.2 低通勃脱华斯滤波器

低通勃脱华斯滤波器是接近理想的低通滤波器, 具有较平坦的通带特性[16]、[17]。它的振幅响应是:

$$|H(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}} \quad (2.3)$$

式中 n 是滤波器阶数。从图 2.4 的曲线中可以看出, 滤波器的特性随着 n 的增加而改善。我们将在 2.3 节和 2.6 节中分别研究 $n=2$ 和 $n=4$ 的情况。

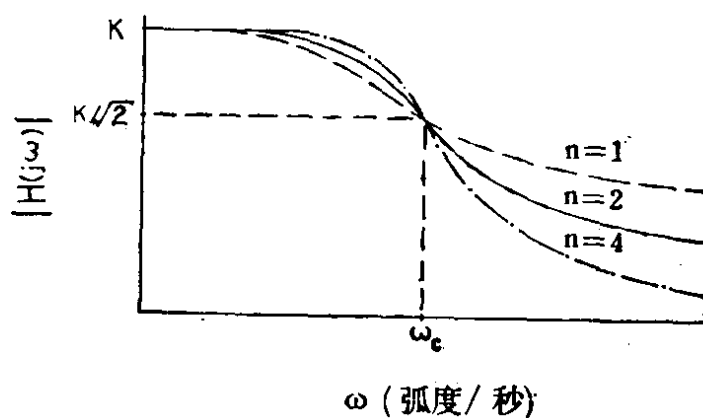


图 2.4 勃脱华斯振幅响应

勃脱华斯滤波器的优点是在通带中具有所谓最大的平坦单调

响应。但是,它的截止特性次于在 2.4 节中要研究的契比雪夫滤波器。例如图 2.4 中,对于较高的频率,振幅大约以 $-20n$ 分贝/十倍频程的速率衰减[16],这与契比雪夫滤波器相比是较差的(十倍频程是指一个频率为另一个频率的 10 倍时,它们之间的间隔)。

2.3 二阶低通勃脱华斯滤波器

我们用图 2.3 设计一个二阶低通勃脱华斯滤波器,并对给定的截止频率 f_c 求出电容 C 和 C_1 , 电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 的实际数值,以满足(2.2)式。

为了简化设计,我们制成了一些图表,按下述的方法可以用来查得电容和电阻值。我们可以在图 2.10a、b 或 c 中找出给定的 f_c 。当 f_c 在 1 赫与 10^2 赫之间,选用图 2.10a; 在 10^2 赫与 10^4 赫之间,用图 2.10b; 在 10^4 赫与 10^6 赫之间,用图 2.10c。一旦确定了 f_c 的位置后,我们可以在图上的各标称电容值中选择一个电容 C , 然后就能从图上求得一个 K 参数的值。现在我们来求电容 C_1 和各电阻的值。图 2.11 至 2.15 就是用来求二阶低通勃脱华斯滤波器的这些值的。如果要使滤波器的增益为 2, 就用图 2.11。从图中可以查得与已知的 K 参数相对应的各电阻值和电容 C_1 的值; 该图中 C_1 等于 C 。当增益为 4、6、8、10 时,可用图 2.12 至图 2.15, 以同样的方法求得电阻和 C_1 ; 如图所示, C_1 一般等于 C , 而在增益较高时则 C_1 又等于 $2C$ (我们没有把增益大于 10 包括在内, 因为在这种情况下元件数值范围很大, 且灵敏度很高[2])。最后, 我们选择尽可能接近图表指示值的标称系列电阻来制作电路。

概括说来, 在这些曲线中我们可以在 1 赫至 10^6 赫范围内选择 f_c , 选择一个标称系列的电容 C , 选择一个数值为 2、4、6、8、10 的增益, 并用标称系列的 C_1 与实用的电阻值构成图 2.3 所示的二阶低通勃脱华斯滤波器。再补充一点, 假如要把截止频率从一个值变到另一个值, 只要简单地在图 2.10a、b 或 c 中选择新截止频率的电容值来改变电路中的电容, 而不必改变 K 参数值。

举例来说, 假定我们需要 f_c 为 1000 赫, 从图 2.10b 中可以看