

有源低通滤波器在智能仪器中的应用

潘 敦 苏丽英 戴在平

(电子工程系)

摘 要

本文介绍的有源低通滤波器,是用RC网络配合运算放大器来模拟LC滤波特性的传递函数,以构成滤波器——有源滤波器。

在智能仪器中,将模拟量转换为数字量,后经微电脑处理及将一些输出的数字量恢复成模拟量的过程。它不可避免地会产生量化噪声和干扰,因此,必须在输出端加一级滤波器,将其清除。有源滤波器体积小,幅频特性好,可用于智能仪器中,但其计算十分繁琐、复杂,本文利用电子计算机进行大量计算来确定其参数,并制成数据表格,它适合于工程上经常采用的查表法。因而减少了大量的人工计算,并提高精度。

前 言

作为智能仪器之一的微电脑超低频信号发生器,存在着取样量化噪声。为了消除这种噪声,在信号发生器的输出端,加一级有源滤波器装置,以使有用的信号波形平滑。

过去所使用的滤波器主要是采用LC无源电路,它不需要另接其它电源就能发挥作用,且可得到较好的频率特性;然而,带铁芯的电感线圈在低频和超低频段的尺寸很大。随着电子技术朝着集成化方向发展,人们提出取消笨重的LC滤波器,用可模拟电感效应的有源器件代替电感,並通常采用带深度负反馈的运算放大器与RC网络构成,产生了有源滤波器。

有源RC滤波器和无源LC滤波器一样可以制成低通滤波器,高通滤波器和带通滤波器,本文所叙述的仅是低通滤波器。

原 理

低通滤波器是一个允许通过低频信号並衰减或抑制高频信号的部件。它的特性可用幅频响应来衡量。理想的低通滤波器的幅频响应如图1虚线所示。理论上的通带为 $0 \leq \omega < \omega_c$ 阻带为 $\omega \geq \omega_c$ 。其中 ω_c 为截止角频率(截止频率

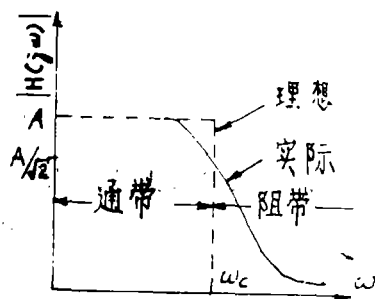


图1. 低通幅频响应

本文1984年10月20日收到。

$f_c = \omega_c / 2\pi$)。实际上, 滤波器的幅频响应, 只能近似理想的幅频响应, 如图 1 中实线所示。通常, 截止角频率 ω_c 的定义是: 当 $|H(j\omega)|$ 下降为最大值 (图 1) 中为 A 的 $1/\sqrt{2} = 0.7071$ 时的角频率。

(一) 根据实际的传递函数的频率响应与理想频率响应的逼近情况, 可以有不同种类的低通滤波器。

1. *Butterworth* (巴特沃斯) 低通滤波器是用最平坦的幅频响应逼近低通特性, 其幅频响应由下式表示:

$$|H(j\omega)| = \frac{G}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \quad (1)$$

式中 G 为增益, 幅频响应特性由图 2 所示。

2. *Chebyshev* (切比雪夫) 低通滤波器: *Chebyshev* 低通滤波器其幅频响应如下式所示:

$$|H(j\omega)| = \frac{K_1 G}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)}} \quad (2)$$

式中 G 为增益, K_1 和 ε 为常数, C_n 为第一类 *Chebyshev* 多项式。

其幅频响应特性曲线如图 3 所示。在通带内幅频响应具有相等的波纹, 随着阶数增加, 波纹数目也增加, 同时阻带内的衰减也增加。

3. *Bessel* (贝塞尔) 低通滤波器幅频响应在通带以外变化缓慢, 但是其相位响应特性在通带内是一向右倾斜的直线, 如图 4 所示。随着阶数 n 的增加, 线性度越好。

(二) 按电路形式分类。

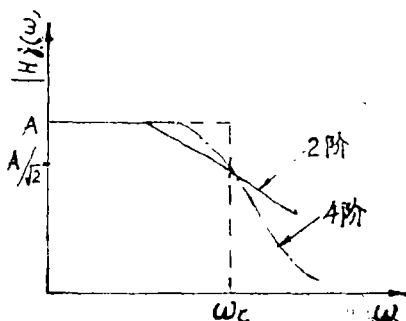


图 2 巴特沃斯低通滤波器的幅频响应

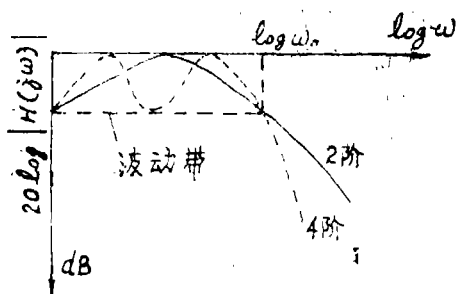


图 3 切比雪夫滤波器幅频响应

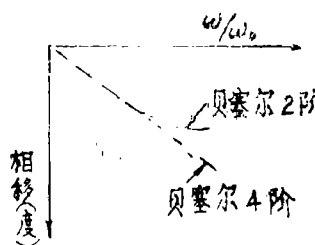


图 4 贝塞尔滤波器相位响应

1. 压控电压源低通滤波器

其运算放大器的接法是同相输入, 如图 5 所示。其优点是: 所用网络元件少, 特性容易调整, 输出阻抗低, 元件分布范围小, 能够获得较高的增益。另一个明显的优点是: 可以通过一个电位器调整压控电压源的增益, 以精确地调整滤波器的增益。

2. 无限增益多路反馈低通滤波器

如图6所示,这种滤波器通过 C_1 和 R_2 两个反馈支路,同时这里的运算放大器作为无限

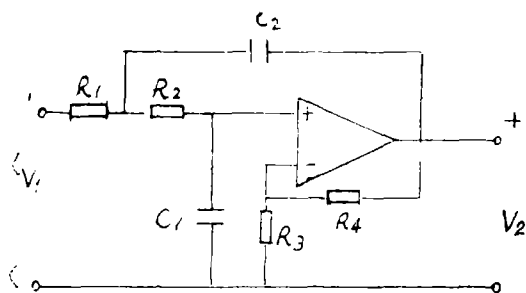


图5 二阶压控电压低通滤波器

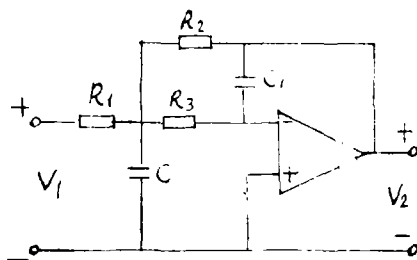


图6 二阶无限增益多路反馈低通滤波器

增益部件使用。因此,称这种滤波器为无限增益多路反馈低通滤波器,它的优点是所用的网络元件少(每节比压控式电路少用一个电阻),特性稳定,输出阻抗低。

设计方法

经典的设计方法是利用滤波器的传递函数的特征多项式根的零极点分布来计算滤波器的参数。这种方法十分繁琐,当滤波器的节数很多时,计算的工作量更大,更为复杂。电子计算机问世后,特别是电子线路应用计算机进行辅助设计后,给滤波器的设计带来极大的方便。利用计算机可以进行滤波器的优化设计,大大减少了调整滤波器电路参数的工作,给工程上找到简便的设计方法。工程上,在一定的精度范围内,要求设计方法简捷,因此,采用计算机对滤波器进行大量的数据优选,得出各种类型滤波器的大量统计数据 and 曲线,从而提供最适当的设计参数。这样在滤波器的设计中就可节省设计过程和调整过程,只用查表就可得到滤波器的各参数值,进行设计。

现举一实例,分别用计算法和查表法加以说明、比较。

设计一个增益为1分贝(dB)的贝塞尔低通滤波器,并采用压控电路(图7)。

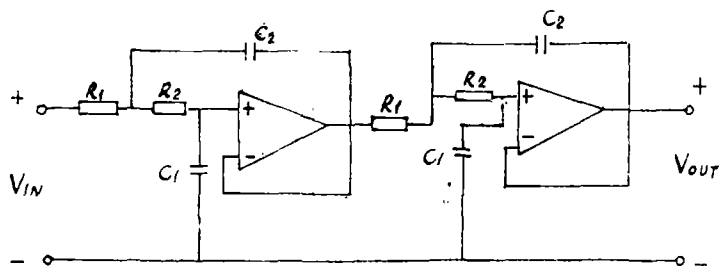


图7 四阶贝塞尔压控式低通滤波器

我们已经知道贝塞尔低通滤波器的传递函数如式(3):

$$H(p) = \frac{1}{(1 + a_1 p + b_1 p^2)(1 + a_2 p + b_2 p^2)} \quad (3)$$

其中 a_1, a_2, b_1, b_2 为贝塞尔多项式系数。

(1) 计算法

根据四阶贝塞尔压控式低通滤波器的 RC 网络，我们不难得出：

$$H(P) = \frac{1}{1 + \omega_c C_1 (R_1 + R_2) P + \omega_c^2 R_1 R_2 C_1 C_2 P^2} \times \frac{1}{1 + \omega_c C'_1 (R'_1 + R'_2) P + \omega_c^2 R'_1 R'_2 C'_1 C'_2 P^2} \tag{4}$$

比较式(3)和式(4)，以滤波器的第一节为例，可以得到：

$$R_{1/2} = \frac{ac_2 \pm \sqrt{a^2 c_2^2 - 4bc_1 c_2}}{4\pi f_c C_1 C_2} \tag{5}$$

而当 C_1, C_2 确定后，且满足以下条件：

$$\frac{C_2}{C_1} \geq \frac{4b}{a^2} \tag{6}$$

并设截止频率为 20HZ，那就不难计算出其它几个参数：

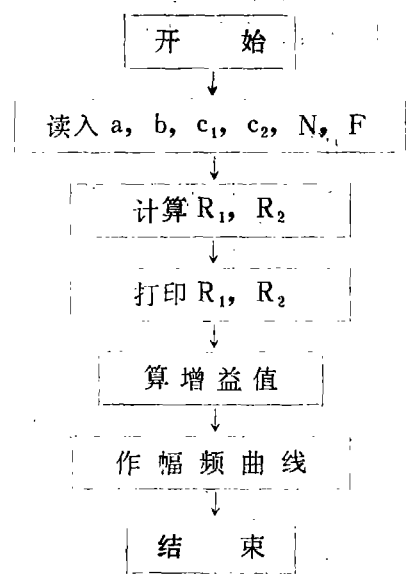
表 1 说明了该实例的各参数：

表 1

滤波器节数		一		二	
系 数		a	b	a	b
电 容		$C_1: 0.05$	$C_2: 0.1$	$C_1: 0.01$	$C_2: 0.1$
电 阻	计 算	$R_1: 34.68$	$R_2: 178.54$	$R_1: 42.97$	$R_2: 573.19$
	标 称	$R_1: 33$	$R_2: 180$	$R_1: 43$	$R_2: 560$

单位： $C, \mu F$ $R, K\Omega$

低通滤波器程序设计流程图



程序设计:

```

10 PRINT "BESSEL LOWPASS FILTER"
20 DIM H(50), B(50), D(50,5), M(50), N(50), O(50), T(50), S(50,5)
30 READ N, F
40  $Q_0 = 6.28318531 : Q_1 = 2.30258508$ 
50 FOR K = 0 TO 50
60  $H(K) = F/25 * (1 + K)$ 
70  $K_7 = 2 - INT(LOG(H(K)/Q_1))$ 
80  $H(K) = INT(H(K) * 10^{\uparrow K_7 + 0.5}) / 10^{\uparrow K_7} : NEXT K$ 
90 FOR I = 1 TO N/2
100 READ C1, C2, A, B
110  $M = C_2/C_1 : IF M < 4 * B/A/A THEN END$ 
120  $K = SQR(A * A * C_2 * C_2 - 4 * B * C_1 * C_2)$ 
130  $L = 2 * Q_0 * F * C_1 * C_2$ 
140  $R_1 = (A * C_2 - K)/L : R_2 = (A * C_2 + K)/L$ 
150 PRINT "COMPONENT VALUES(C IN MICROFARADS R IN MILLION-
      OHMS): "
160 PRINT "SECTION", I
170 PRINT "R1=", R1, "R2=", R2, "C1=", C1, "C2=", C2
180 GOSUB 500 : NEXT I
190 GOSUB 600
200 FOR K = 0 TO 50 : M(K) = B(K) : NEXT K
210 FOR I = 1 TO N/2
220 READ R1, R2, C1, C2
230 GOSUB 500 : NEXT I
240 GOSUB 600
250 FOR K = 0 TO 50 : T(K) = B(K) : NEXT K
260 FOR I = 1 TO N/2 : READ A, B
270 FOR K = 0 TO 50 :  $G_1 = (1 - B * (H(K)/F)^{\uparrow 2})^{\uparrow 2}$ 
280  $G_2 = (A * H(K)/F)^{\uparrow 2} : G = G_1 + G_2 : S(K, I) = 0$ 
290  $S(K, I) = S(K, I) - 10 * LOG(G)/Q_1 : NEXT K, I$ 
300 FOR K = 0 TO 50 : O(K) = S(K, 1) + S(K, 2) : NEXT K
310 FOR I = 1 TO N/2 : READ R1, R2, C1, C2
320 PRINT "SECTION", I, "R1=", R1, "R2=", R2
330 GOSUB 500 : NEXT I
340 GOSUB 600
360 FOR K = 0 TO 50
370  $G_1 = (1 - 3 * (H(K)/F)^{\uparrow 2/7} + (H(K)/F)^{\uparrow 4/105})^{\uparrow 2}$ 

```

```

380  $C_2 = (H(K)/F - 2 * (H(K)/F) \uparrow 3/21) \uparrow 2$ 
390  $G = G_1 + G_2 : N(K) = 0$ 
400  $N(K) = N(K) - 10 * LOG(G)/Q_1 : NEXT K$ 
410 GOSUB 700
420 END
430 DATA 1,20,0.05,0.1,1.3397,0.4889,0.01,0.1,0.7743,0.389,0.016,0.032,
        0.05,0.1,0.02,0.27,0.01,0.1,1.3397,0.4889,0.7743,0.389,0.04664,
        0.08445,0.05,0.1,0.02035,0.27115,0.01,0.1
500 REM AMPLITUDE-FREQUENCY RESPON
510 FOR K=0 TO 50
520  $G_1 = (1 - R_1 * R_2 * C_1 * C_2 * (H(K) * Q_0) \uparrow 2) \uparrow 2$ 
530  $G_2 = ((R_1 + R_2) * C_1 * Q_0 * H(K)) \uparrow 2$ 
540  $G = G_1 + G_2 : D(K, 1) = 0$ 
550  $D(K, I) = D(K, I) - 10 * LOG(G) / Q_1$ 
560 NEXT K : RETURN
600 FOR K=0 TO 50
610  $B(K) = D(K, 1) + D(K, 2)$ 
620 NEXT K : RETURN
700 REM GRAPH SUBROUTINE
710 CLS
720 PRINT "INSERTION GAIN(DB)" : PRINT
730 PRINT "+ ... + ... + ... + ..."
740 FOR K=0 TO 50
750 PRINT TAB(1)H(K), TAB(10) "I" ,
        TAB(35.5+T(K)*6) "*", TAB(40.5+N(K)*5) "+",
760 PRINT TAB(45.5+M(K)) "$",
        TAB(55.5+B(K)*5) "*", TAB(60.5+O(K)) "&"
780 NEXT K : PRINT "FREQUENCY(HZ)"
790 RETURN
BESSEL LOWPASS FILTER
COMPONENT VALVES (C IN MICROFARADS; R IN MILLIONOHMS):
SECTION 1
 $R_1 = 0.0346816$   $R_2 = 0.178538$   $C_1 = 0.05$   $C_2 = 0.1$ 
COMPONENT VALVES (C IN MICROFARADS, R IN MILLIONOHMS):
SECTION 2
 $R_1 = 0.0429764$   $R_2 = 0.573192$   $C_1 = 0.01$   $C_2 = 0.1$ 
SETION 1 :  $R_1 = 0.0164$   $R_2 = 0.08445$ 
SETION 2 :  $R_1 = 0.02035$   $R_2 = 0.27115$ 

```

(2) 查表法

给定截止角频率 ω_c ，以及阶数和增益，选择电容 C 值，由 $K = 100 / f_c C'$ (C' 以 μF 为单位的 C 值)，查四阶压控式贝塞尔滤波器的设计表 (3)，就可得到滤波器的各个参数值，如表 2 所示，其截止频率 f_c 为 20HZ。

表 2

滤波器节数	1		2	
系 数	a	b	a	b
电 容	$C_1: 0.05$	$C_2: 0.1$	$C_1: 0.01$	$C_2: 0.1$
电 实 际	$R_1: 16.1$	$R_2: 84.45$	$R_1: 20.35$	$R_2: 271.15$
阻 标 称	$R_1: 16$	$R_2: 82$	$R_1: 20$	$R_2: 270$

单位: $C: \mu F$ $R: K\Omega$

从以上的两个表格可以看出：虽然算法与查表法所得的电阻值不相同，但两个方法的 R_1 与 R_2 的比值是相同的，而且这两组参数制作出相应的滤波器的幅频响应与取标称值后制作的滤波器的幅频响应，基本上符合贝塞尔滤波特性。但是查表法和用计算机辅助设计法各有所长。前者直接查表，快速实用，在精度要求不是很高的情况，略胜一筹，适于工程上的应用，后者可减少因计算值与标称值的偏差而带来的频率特性的变化，至于采用何种方法，可视具体需要而定。

本文仅对用计算机对滤波器的参数计算提出粗浅见解，不妥之处，请读者提出宝贵意见。

参 考 文 献

[1] 北方交通大学编，有源低通滤波器，人民铁道出版社出版，(1979)。
[2] 孔有林编著，集成运算放大器及其运用，人民邮电出版社，(1980)。
[3] 有源滤波器的快速实用设计〔美〕DE.约翰逊著，潘秋明译，人民邮电出版社，(1980)。
[4] U.Tietze.Ch.Schenk, Advanced Electronic Circuits, (1978)。

APPLication Of Active Low—Pass Filter To Intelligent Lnstrument

Pan Dun Su living Dai Zalpin

Abstract

The active Low-Pass filter introduced in this PaPer coordinates RC network into OPERational amplifier to simulate transfer function of LC filter charact eristic.

In intelligent instrument, analog quantities are Converted into digit quantities and then some Output digit quantities precessed by micro-brain must be returned to analog quantities. This process brings quantiting noise and interference into existene unavoidably, which must be clearedup. Therefore, one-level filter is cascaded behind output stage. active filter is used in inte lligent instrument because its size is small and amplitude-frequency characteristic is good, but calculations for design is quite tedious. In this paper electronic computer is used for doing a large number of calculations to determine parameters. Data are tabulated, which are suited to practice. so a vast amount of artificial calculations have been reduced and precision has been risen.