第18卷 第1期
1996年3月
西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL
Vol. 18 No. 1
March 1996

有源带通滤波器的设计、调试与应用

豆耀华 张素萍
(国家地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

摘 要 所述的有源带通滤波器是采用现代网络理论,通过查图表反复计算数值调试并利用多项式综合滤波器的设计理论得到的设计结果,从频率响应特性曲线和电路结构可见,它完全满足了设计时所提供的各项技术指标的要求。文中详细地讨论了由单元电路到全极点多反馈滤波网络电路设计时的理论根据,各支路参数实际的计算和调试方法。这种电路结构简单合理,调试和维修十分方便,代替了无源滤波器中的大型电感和电容,有利于设备小型化。

主题词:设计 设备调试 有源带通滤波器

1 概述

对要求较高的有源带通滤波器件在设计时是一项比较复杂的工作,作者根据现代网络理论,通过查图表的方法和一系列的计算及合理的选择电路类型,按技术指标的要求,设计出了陡度系数较高的有源带通滤波器的实用电路。有源带通滤波器的频率特性响应的传递函数方程式为:

$$H(s)=\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{a_mS^m+a_{m-1}S^{m-1}+\cdots+a_1S+a_0}{b_nS^n+b_{n-1}S^{n-1}+\cdots+b_1S+b_0}$$

式中 $V_0(s)$代表输出信号,它的每一个根值代表一个零点,Vi(s)代表输入信号,它的每一个根值对应一个极点,其中 a、b 为实常数,m、n=1,2,…(m<n);S=jω 为复频率,一个 n 阶频率响应特性的传递函数可分解成为 $H_1,H_2,\cdots H_n$ 为各因式的乘积,其中每个因式可计算得到一个有源滤波节,最后将各个有源滤波节电路串联,就成为具有 n 阶传递函数频率响应特性的有源带通滤波器。

2 根据电路技术指标选择电路类型

有源带通滤波器的设计一般是在工程技术中给予的技术指标下,根据现代网络设计理论、传递函数、公式和图表,设计出完全符合技术指标所要求的有源带通滤波器。而且电路的类型很多,为了满足同类型的技术指标,可以选择不同类型的电路。本文所讨论的是遥测地震台网模拟传输设备中的其中一路有源带通滤波器。通过反复多次的实验调试,我们选择了全极点多反馈的有源带通滤波器电路(MFBP)。

图 1 所示的一个单节有源带通滤波器电路实现了带通极点对,此类型的有源带通滤波器的幅频特性十分接近理论上的滤波特性,而且元器件数量少,成本低,调试比较简便。其各节极点和 Q 值也都能够设计成独立的调整。图 1 电路中的输入电阻 R_1 分成了两个电阻,R_{1a}和

R_{1b}，形成了一个分压器，这样使得电路增益可以控制。两个电阻的并联值等于 R_1，以便利于保持谐振频率不变。本电路的关系式为：

$$T(S)=\frac{SR_2C}{S^2R_{1a}R_2C^2+S2R_{1a}C+(1+R_{1a}/R_{1b})}$$

式中 C 是任意值，其中 R_{1a}，R_{1b}和 R_2 的计算公式为：

$$R_{1a}=R_2/2A_r \qquad (1)$$

$$R_{1b}=\frac{R_2/2}{2Q^2-A_r} \qquad (2)$$

$$R_2=Q/\pi f_rC \qquad (3)$$

式中 A_r 是在谐振频率处要求的增益，f_r 是谐振频率。遥测地震台网多路传输设备中所要求的技术指标是：(1)中心频率(如第二路频率)$f_0=900$ Hz；(2)3 dB 带宽 $\Delta f=240$ Hz($f_L=780$ Hz，$f_H=1020$ Hz，包括±20 Hz 的防卫度)；(3)阻带衰减量大于 40 dB；(4)阻带上限频率和阻带下限频率分别为：$f_{hc}=1260$ Hz，$f_{LC}=540$ Hz；(5)带通内纹波系数小于 1 dB；(6)总增益大于 25 dB；(7)输入输出阻抗为 600 Ω。

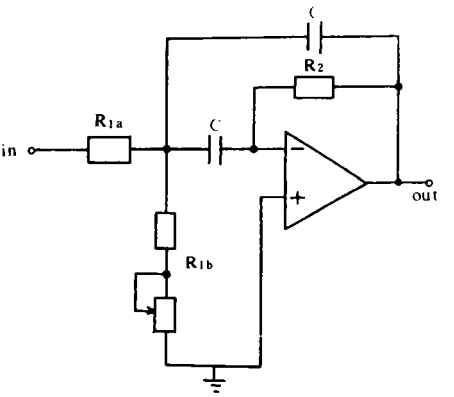

图 1 单节多反馈有源带通滤波电路

Fig. 1 Circuit of single-node and multi-feedback active band-pass filter.

根据技术指标和选择的多反馈有源带通滤波器电路类型，通过变换获得对应的带通函数的极点结构，由此计算本电路的元器件值。

带通的带宽为 $B_w=f_H-f_L=f_c$

带通的几何中心频率为 $f_0=\sqrt{f_L\times f_H}$

品质因数为 $Q=f_0/B_w$

有源带通滤波器频率响应曲线边沿的陡度系数是重要的技术指标之一，它可定义为

$$A_r=\text{阻带带宽}/\text{通带带宽}$$

3 电路参数的确定与设计方法

3.1 按照所要求的技术指标变换成几何对称的技术指标

(1)几何中心频率 $f_0=\sqrt{f_L\times f_H}=891.96$ Hz；

(2)陡度系数 $A_S=$阻带带宽/通带带宽$=3$；

(3)阻带带宽 $B_w=f_{HC}-f_0^2/f_{HC}=240.01$ Hz。

3.2 按照有源带通滤波器电路技术指标要求查图表确定元器件参数

3.2.1 估算滤波电路的阶数

图 2 是估算滤波电路阶数的曲线图，横坐标是归一化阻带端点频率 Ω，纵坐标为阻带衰减值 dB。根据阻带衰减要求衰减量应大于 40 dB，本电路取为 45 dB。又由于为了满足 $A_s=3$，在图 2 中取 A 点，可见陡度系数 n 至少等于 5 才能满足电路频率响应的要求。

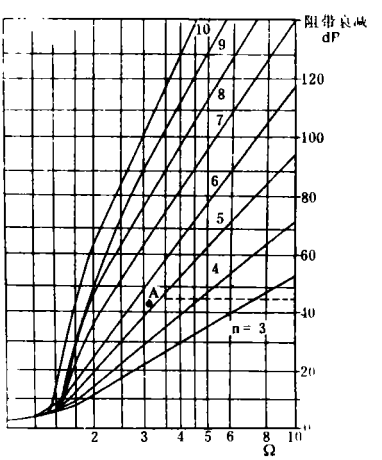

图 2 滤波器衰减特性

Fig. 2 Attenuation characters of the filter.

3.2.2 查极点位置

表 1 为有源带通滤波器参数表，表中 n 代表阶数，$-\alpha$ 为实部，β 为虚部，同时表中给出了 3 到 10 阶的参数，查得 n=5 阶时的复数极点为

$$\alpha \pm \beta = \begin{cases} -0.6190 \pm j\,0.8254 \\ -0.3559 \pm j\,1.5688 \end{cases}$$

实数极点　$\alpha_0 = -0.6650$。

表 1　有源带通滤波器的极点位置表

n	$-\alpha$	$\pm j\beta$	n	$-\alpha$	$\pm j\beta$
3	0.9622	1.2214	8	0.4222	0.0640
	0.9776			0.3833	0.7716
4	0.7940	0.5029		0.2878	1.2066
	0.034	1.5470		0.1122	1.4798
5	0.6190	0.8254	9	0.3700	0.4704
	0.3559	1.5688		0.3230	0.9608
	0.6650			0.2308	1.2634
6	0.5433	0.3437		0.08604	1.4740
	0.4672	0.9991		0.3840	
	0.2204	1.5069	10	0.3384	0.2120
7	0.4580	0.5933		0.3164	0.6198
	0.3649	1.1286		0.2677	0.9853
	0.1522	1.4983		0.1847	1.2745
	0.4828			0.06706	1.4389

3.2.3　变换成带通形式

根据以上给出的公式，带通的 Q 值为

$$Q_{带通} = f_o/Bw = 3.75$$

式中 f_0 是几何带通中心频率，而 Bw 是通带带宽，然后进一步变换的方法如下：

复数极点具有以下形式

$$-\alpha \pm j\beta$$

其中 α 是实数坐标，而 β 是虚部，给定了 α、β、$Q_{带通}$ 和 f_0 后，用下述一系列计算可得到两种 Q 值和中心频率，从而确定一对滤波节：

$$C=\alpha^2+\beta^2=1.06445$$

$$E=C/Q_{带通}^2+4=4.07569$$

$$D=2\alpha/Q_{带通}=0.33013$$

$$G=\sqrt{E^2-4D^2}=4.07569$$

$$Q=\sqrt{(E+G)/2D}=6.09511$$

$$M=\alpha Q/Q_{带通}=1.006098$$

$$W=M+\sqrt{M^2-1}=1.116715$$

$$F_{ra}=f_0/W=805.94\ \text{Hz}$$

$$F_{rb}=f_0\times W=1005.04\ \text{Hz}$$

由上式可见，这两种带通滤波节谐振频率 F_{ra} 和 F_{rb} 有相同的 Q 值。

实数极点按下式计算

$$Q = Q_{带通}/\alpha_o = 5.6391,\ f_r = f_0 = 900\ \text{Hz}$$

各类计算时必需使小数点后面保持 5 位有效值，以便得到准确的值，这是因为要区分相近的

数值。对于 M、W 两式要求较高，它的值要计算到小数点后第六位。中间频带总增益要求大于 25 dB，每节分配 5 dB，令 $A_0=1.778$，则

$$A_r = A_0\sqrt{1+Q^2(f_o/f_r - f_r/f_0)^2} = 2.98505$$

A_r 是带通节在谐振频率 f_r 处的增益；带通节在 f_0 处的增益比 f_r 处的增益要小，这是因为 f_r 是电路的峰值频率。上述计算结果是把 α、β、α_0 代入变换式后所计算的第一个滤波节的基本参数，如表 2 所示的第一波节 $f_r=805.94$ Hz，Q 值为 6.09511，$A_r=1.8464$。

表 2 各滤波节的基本参数

节	f_r(Hz)	Q	A_r
1	805.94	6.09511	1.8464
2	1005.04	6.09511	1.8464
3	703.85	10.76581	5.128
4	1108.31	10.76581	5.128
5	900.00	5.6391	1.1

4 各元件值的选择与调试方法

将 5 个单反馈有源带通节串联，选择高精度的电容器，本电路选 $C=0.01$ μF，各滤波节电阻值的计算按上述公式(1)、(2)、(3)式进行，最终实用电路见图 3。为了阻抗匹配，独立设计了图中输入和输出级。电路图中各部件的误差必需保持在 2%以内，为了调谐，R_{1b} 设计成可调，Q 值的调整可用 R_2 来完成，然而这将影响谐振频率，只要使用误差小于 1%的元件值，对此类型的有源带通滤波器调整甚微。

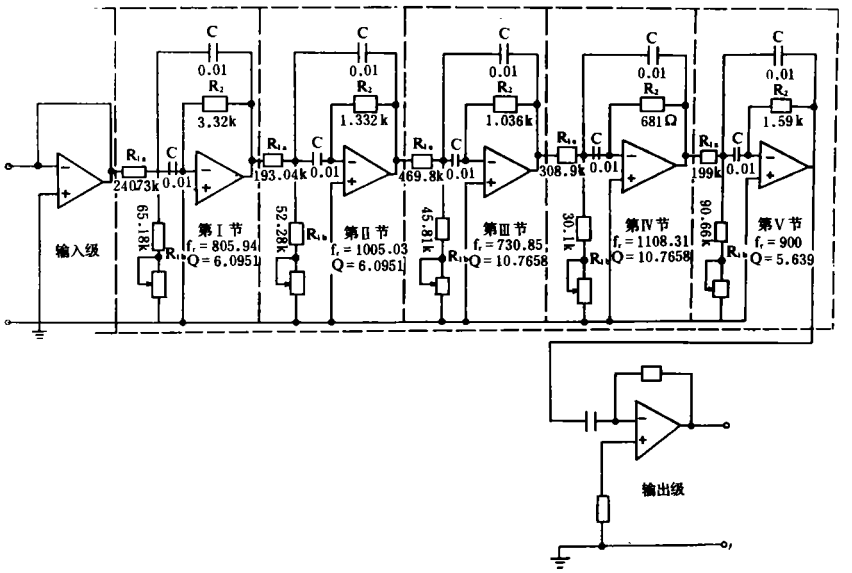

图 3 5 阶有源带通滤波器电路图

Fig. 3 Circuit of the 5-steps active band-pass filter.

理论计算结果与实际的极点频率总有点偏差，为此每个滤波节可以将正弦波(其频率为

滤波节的 f_z)加到滤波器的输入端来独立调整，主要是调整极点频率和 Q 值，然后逐点观察频率响应特性曲线，使得曲线边缘陡度系数、峰点高度尽可能对称，中间曲线显得平稳，滤波节的相移调整可由示波器监视，采用李沙育图形调整 R_{1b}，使得椭圆形接近直线为止。图 4 为实测的频率响应特性曲线，它完全满足了技术指标所提出的要求。电路通过实际运行工作十分稳定可靠。

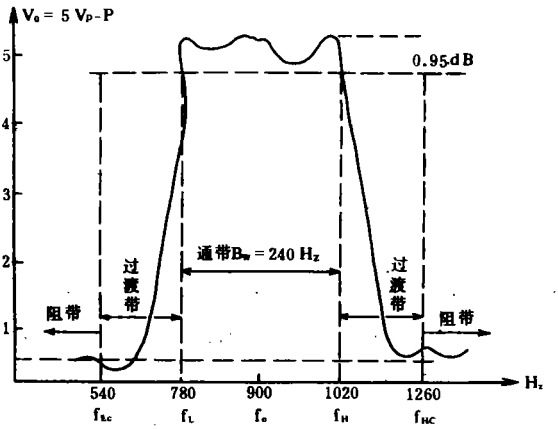

图 4　5 阶有源带通滤波器频率响应特性曲线

Fig. 4　Frequency response characters of the 5-steps active band-pass filter.

5　讨论

作者用此类型的有源带通滤波器电路(3 路中心频率分别为 900 Hz、1260 Hz、2340 Hz)来代替遥测地震台网传输设备中的 LC 无源滤波电路，通过联调和实际运行，与原电路相比较性能要优异得多。由于滤波网络采用了高精度的集成运放电路，所以能够设计出较高的阻抗，使得各波节电容取值较小，而与 LC 无源滤波器相比不需要大的电感和特殊绕制的电感线圈和高质量的磁芯，使得尺寸和成本相当低。如果带通的频率在 50 kHz 以上，因受运算放大器增益的限制一般不能够满足有源滤波器的要求，要增加成本扩展放大器的频带，从而使得有源滤波器的频率可以达到 500 kHz。而 LC 无源滤波器的频率可以达到几百兆赫的频率范围。

采用微功耗集成运算放大器或者单电源供电的集成运放，使得整机的功耗可以降得很低，而 LC 无源滤波器不需要考虑功耗问题。

(本文 1995 年 6 月 10 日收到)

参考文献

1　Chrisfian E. Eistnmann E. Filter Desing Tables Graphs. New York: Johnand Sons, 1966.

2　豆耀华，关于《微功耗遥测地震发讯设备》的研制. 西北地震学报，1993，15(3)：70－75.

3　Johnson D E, J L Hilbarn. Rapid Practical Desings of Active Filter. New York: John Wilty and Sons Inc, 1975.

4　D E Johnson, J R Johnson, H Pmoor. A Hand Book of Active Filters. New Jersey, 1980.

DESIGN, MODULATION AND APPLICATION OF THE ACTIVE BAND-PASS FILTER

Dou Yaohua and Zhang Suping
(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou* 730000)

Abstract

The active band-pass filter is designed by using the modern network theory and multinomial synthetic filter and by modulating and calculating repeatedly through the examination of charts. Its frequency-response curve and circuit structure completely satisfy the needs of various technical indexes. This paper discusses in detail the theoretical basis of the design from unit circuit to full-pole and multi-feedback filter network circuit, as well as the methods of calculating and debugging the parameters of various subbranch circuits. These circuit structures are simple and reasonable, and very easy to modulate and repair. Thus they replace the large-scale inductance and capacitance, and help miniturize the installations.

Key words: Design, Equipment modulation, Active band-pass filter