

有源滤波器的设计

〔日〕柳 泽 健 著
金 光 磐

北京邮电学院数字通信专业译

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书对用以代替LC滤波器的、含有运算放大器的有源RC网络的设计方法及有关的必要理论基础,作了比较易懂和较全面的阐述。全书共10章。第一章介绍各种类型滤波器的适用范围;第二章介绍作为有源网络综合基础的各类二阶函数;第三、四章分别介绍一般RC电路和双T电路的传输特性及其应用;第五章介绍典型运算放大器的特性及其应用;第六章讨论设计中一个重要判别准则——灵敏度,并作有关计算;第七、八、九章介绍有源滤波器总体设计的经验法则,从最小损耗、最大动态范围等原则考虑,提出了零、极点分配、增益常数分配以及基本节安排等方法。书末附有实用设计图表。

有 源 滤 波 器 的 设 计

〔日〕柳 泽 健 著
金 光 磐

北京邮电学院数字通信专业译

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

天 津 市 第 一 印 刷 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

限 国 内 发 行

~
*~

开本: 787×1092 1/32 1978年2月第一版
印张: $74/32$ 页数: 114 1978年2月天津第一次印刷
字数: 160千字 印数: 1—10,000册
· 统一书号: 15045·总2191-无639
定价: 0.67元

目 录

第一章 什么是有源滤波器?	1
1.1 LC滤波器和有源滤波器	1
1.2 有源滤波器的历史	5
1.3 有源滤波器的特点和使用范围	9
第二章 传递函数	13
2.1 传递函数的极点和零点	13
2.2 各种传递函数	19
2.3 二阶传递函数的种类和性质	26
第三章 RC电路的性质	34
3.1 RC二端阻导的性质	34
3.2 RC电路的传递函数	39
第四章 双T电路的性质	45
4.1 退化至二阶函数	45
4.2 对称双T电路	47
4.3 潜在对称双T电路	50
4.4 可以在右半平面上具有零点的双T电路	52
第五章 运算放大器的性质	54
5.1 运算放大器的理想特性和标准放大电路	54
5.2 运算放大器的电路和直流放大特性	63
5.3 运算放大器的频率特性和补偿方法	70
5.4 其他特性	79

第六章 灵敏度	83
6.1 灵敏度函数	84
6.2 增益及相移的灵敏度	85
6.3 Q和频率的灵敏度	90
6.4 极点和零点的灵敏度	93
6.5 多参量灵敏度	95
第七章 单一运算放大器型的电路	98
7.1 电路的选择	98
7.2 正反馈电路的基本构成	99
7.3 设计的方法	101
7.4 RC元件初始值偏差的影响	112
7.5 对应于温度变化的稳定度	116
7.6 频率限度	125
7.7 相移电路	131
7.8 设计的例子	135
第八章 单调谐电路	141
8.1 电路	141
8.2 设计方法	148
8.3 设计的例子	150
第九章 双二阶电路	152
9.1 电路的构成	152
9.2 设计的方法	167
9.3 元件的灵敏度	169
9.4 频率限度	170
9.5 设计的例子	174

第十章 使动态范围最大和通带内损失最小的方法	178
10.1 与动态范围和通带内损失有关系的因素	178
10.2 最适当的极点和零点组合方式	181
10.3 最适当 h_j 的选择方法	188
10.4 最适当的链接顺序	189
附表 设计图表	194
附表一 巴特伍兹滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	204
附表二 贝塞耳滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	205
附表三 通过带波动0.25分贝的切比雪夫滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	206
附表四 通过带波动0.5分贝的切比雪夫滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	207
附表五 通过带波动1分贝的切比雪夫滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	208
附表六 通过带波动2分贝的切比雪夫滤波器在归一化电容器值和归一化频率下的传递函数	209
附表七 联立切比雪夫滤波器在归一化频率下的传递函数	210
参考文献	213
索引	215
日本以外的外国人名汉英对照表	218

第一章 什么是有源滤波器？

滤波器是一种能从含有很宽频率成分的信号中选出所需要的成分、并将不需要的成分衰减掉的电路。过去在滤波器中主要是使用由线圈和电容器组成的LC滤波器。这种滤波器是无源电路，即不需电源就能发挥作用，并可以做到有足够好的频率特性。然而，线圈是在磁心上缠线作成的。用于超低频段的滤波器，尺寸就变得很大而且成本也高。

滤波器中能否不用线圈的问题，很早就提出来了。最初，人们热衷于研究用RC取代LC来制作滤波器。但是，如果使RC滤波器具有尖锐的鉴别特性，那么它对所通过的信号成分的衰减就变得很大，其结果是必需用放大器来补偿。

因此，从开始就研究由RC和放大单元组成的、与LC有相同特性的滤波器。这就是本书里要提出的有源滤波器。

在本章中作为引论，首先给出简单的滤波器特性，然后以LC电路和有源RC电路分别获得这种特性，并说明它们的差别。其次，叙述有源滤波器的历史发展和它的特点。阅读本章时，希望能抓住有源滤波器的概念。

1.1 LC滤波器和有源滤波器

为了便于理解，最好从实际的例子开始。作为最简单的例子，让我们来考虑由下式给出的输出电压 V_2 与输入电压 V_1 的比值。

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^6}} \quad (1.1)$$

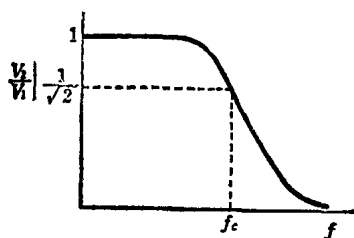


图1·1 低通特性

式(1·1)表明, 当 $f \ll f_c$ 时, 其值大约为 1; 当 $f \gg f_c$ 时, 其值单调地下降。因而, 可以把图 1·1 所示特性理解为以 f_c 为交接点的低通滤波器。这个特性称为巴特伍兹特性, 是一种有代表性的

的特性。并且, 称 f_c 为截止频率。

实现式(1·1)的特性的 LC 电路示于图 1·2。试计算这个电路的输入、输出电压比。这里用交流电路理论中的戴维宁定理最为便利。首先, 将端子 2 的 R 拆掉, 求开路电压 V_{2f} 。

$$V_{2f} = \frac{1/j\omega C_2}{R + j\omega L_1 + 1/j\omega C_2} \cdot V_1 \quad (1.2)$$

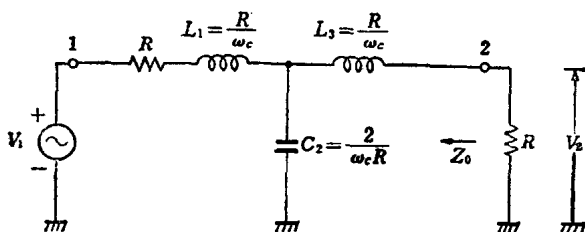


图1·2 用LC电路的结构

其次, 令 V_1 为零, 求从端子 2 视入的电路阻抗,

$$Z_0 = j\omega L_3 + \frac{(R + j\omega L_1)/j\omega C_2}{R + j\omega L_1 + 1/j\omega C_2} \quad (1.3)$$

根据戴维宁定理, 图 1·2 的输出电压 V_2 可以用下式来计算。

$$V_2 = \frac{R}{Z_0 + R} \cdot V_{2f} \quad (1.4)$$

将式(1·2)和(1·3)代入式(1·4), 在引入 $L_1 = L_3$ 的条件下,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R/j\omega C_2}{(R + j\omega L_1)(2/j\omega C_2 + R + j\omega L_1)} \quad (1.5)$$

在这个式子里代入写在图1·2中的L和C的值，便得到下面的结果。*

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(1 + jf/f_c)[1 + jf/f_c - (f/f_c)^2]} \quad (1.6)$$

取上式的绝对值，就变成下式

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^6}} \quad (1.7)$$

除系数1/2外，式(1·7)与式(1·1)相同，因而，显然实现了所希望的特性。

下面试用有源RC电路来实现这一特性。使用正反馈型的电路，就得到图1·3的形式。图中注明+1的三角形框框是有源元件，它表示增益为1、输入阻抗为无限大、输出阻抗为零的理想放大器。如果使用第五章中所讲的运算放大器，就可以得到充分理想的近似特性。

试对这个电路进行计算。首先，断开 R_3 和 C_3 ，用图 中所注的电压和电流，就得到下列关系：

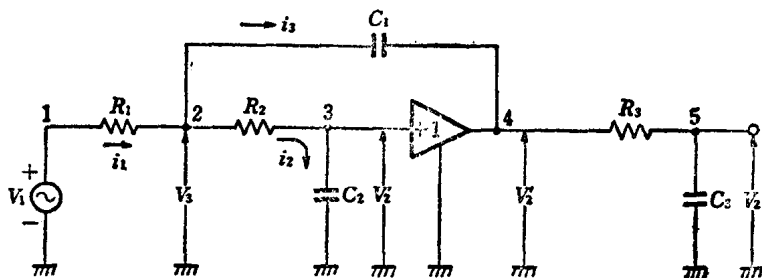


图1·3 用有源RC电路的结构

* 注 象这样的函数称为传递函数。

$$i_2 = j\omega C_2 V'_2$$

$$V_3 = V'_2 + R_2 i_2 = (1 + j\omega C_2 R_2) V'_2$$

$$i_3 = j\omega C_1 (V_3 - V'_2)$$

$$V_1 = V_3 + R_1 (i_2 + i_3) = (1 + j\omega C_2 R_2) V'_2 + R_1 (j\omega C_2 - \omega^2 C_1 C_2 R_2) V'_2$$

从而,

$$\frac{V'_2}{V_1} = \frac{1}{1 + j\omega C_2 (R_1 + R_2) - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \quad (1.8)$$

另一方面, R_3 和 C_3 电路上的电压 V_2 与 V'_2 的关系与 V'_2 和 V_3 的关系相同, 故得:

$$\frac{V_2}{V'_2} = \frac{1}{1 + j\omega C_3 R_3} \quad (1.9)$$

这里把运算放大器的输出阻抗作为零, 所以把两个电路连接在一起时 V_2 和 V_1 的关系仍可用上两式求得:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{(1 + j\omega C_3 R_3) [1 + j\omega C_2 (R_1 + R_2) - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2]} \quad (1.10)$$

现在, 按照下列方式选取各元件值:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = R \\ C_1 &= 2/\omega_c R \\ C_2 &= 1/2\omega_c R \\ C_3 &= 1/\omega_c R \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

这样, 式(1.10)变为下列形式:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{(1 + jf/f_c) [1 + jf/f_c - (f/f_c)^2]} \quad (1.12)$$

除了系数 $1/2$ 以外, 这与式(1.6)相同, 所以, 取绝对值就变成式(1.1), 显然实现了所希望的特性。

比较图1.2和图1.3, LC滤波器和有源滤波器的差别就很清楚了。首先, LC滤波器由LCR组成, 不要电源; 而有源滤

波器应用放大器,所以没有外部电源不能工作。有源滤波器所起的实质作用,不管怎么说,也在于有放大器,并通过 C_1 的正反馈来实现式(1·1)的特性。不论采取什么方法,仅用RC电路,不能得出式(1·1)的特性。在图1·3的电路里,是将二阶电路和一阶电路的特性结合在一起,组成总的传递函数。在有源滤波器中,对于更高阶的传递函数,通常是分解为二阶和一阶的传递函数来实现。在LC滤波器中,根据所选电路形式的不同,可以有若干不同的元件值,可是确定了电路和给定了R以后,诸LC的值就唯一地决定了。在有源滤波器中,根据放大元件的用法不同,有种种不同的构成滤波器的方法。可是当电路确定后,元件还可以取不同的值。例如从式(1·10)看,如果 $R_1 \approx R_2$, C的大小就可以有很多不同的值。

在LC滤波器中,线圈中所用的磁心的饱和特性限制了输入电压的最大值,但通常对这一点不必介意。在有源滤波器中,最大输入电压由放大器的动态范围决定,所以必须充分注意。并且,在输入非常小时,放大器的噪声就成为问题。

从以上对比可以看出,LC滤波器有很多有利因素,但需使用线圈是它最大的缺点。由于集成化的进步,电子设备正在不断小型化,所剩下来的仅仅是滤波器,因为只有线圈的制作不能小型化。有源滤波器所用的RC元件必须有相当高的精度,在现在的技术条件下还不能立即直接用单块集成的构造制作出滤波器,只有在将来才有这种可能性。下面回顾有源滤波器的历史。

1·2 有源滤波器的历史*

有源滤波器起源甚早。斯各脱在1938年所发表的RC窄带

* 请参看书末“有源滤波器的发展”

放大器可以看做是最早的有源滤波器。图1·4是他曾经使用过的电路，以后主要是在音频带的选频放大器中逐步得到应用。但是，从1954年林威尔发表使用负阻抗变换器(NIC)的RC滤波器以后，就从滤波器理论的角度受到注意。他的方法达到了这样的程度：用一个把负阻抗变换器与两个RC电路交插的结构可以补偿电话电路的损失。高阶的传递函数的组成便有了实现可能。从此，提出了各种各样的有源滤波器，我们可以大致区分为三类：

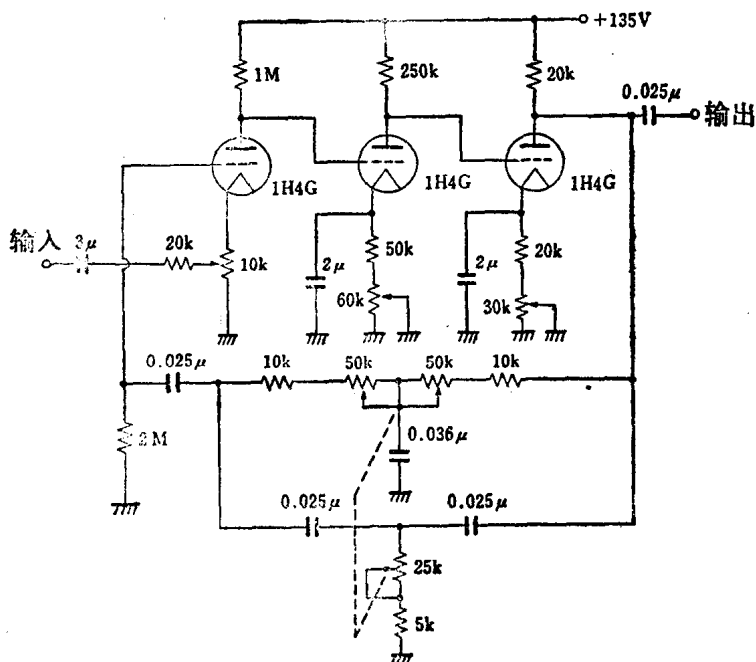
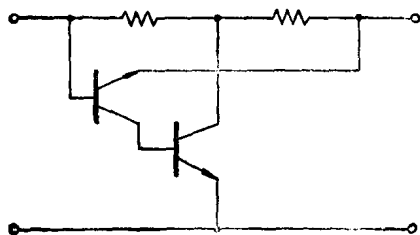


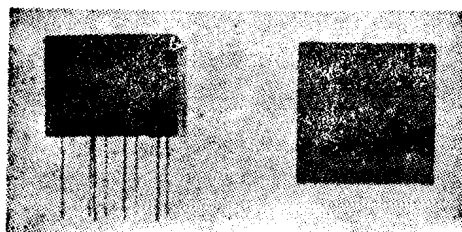
图1·4 斯各脱的选择性放大器

- (1)用负阻抗变换器的(图1·5a),
- (2)用回转子的(图1·5b),

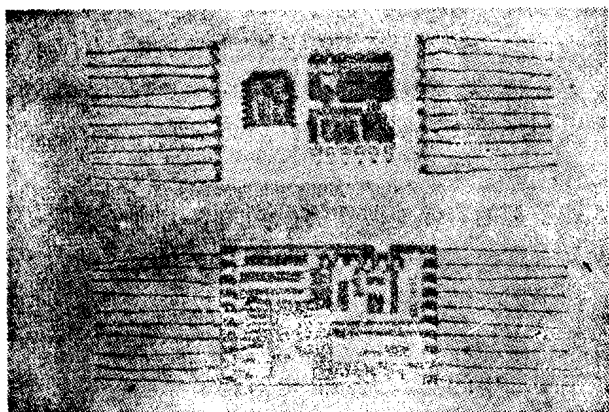
(3) 用反馈放大器的(图1·5c)。



(a) 拉苦型负阻抗变换器电路图



(b) 薄膜集成电路回转子



(c) 铝薄膜混合集成电路有源滤波器

图1·5 有代表性的有源元件和有源滤波器

最初使用负阻抗变换器的有源滤波器，对任意分数形式的传递函数，能用一个负阻抗变换器构成，这是上述其他方法所没有的优点。可是，当元件变值时，使与它们有关的滤波器特性离开其原来特性很远，就是说，具有元件的灵敏度颇大的缺点，这是在使用这一方法时所不能忘记的。不过，如果与其他方法比较，它存在着在高频使用的可能性，所以又引起人们的兴趣。

在回转子的输出端子上接上C，从输入端子看好象是L，因此可以用这样一个二端对网络来实现有源滤波器。应用正向和逆向跨导构成回转子的例子如图1·6所示。如果将LC滤波器的L全部用回转子和C的组合来代替，就可以作出与这滤波器完全等效的有源滤波器。这种形式的有源滤波器原封不动地承袭了LC滤波器的元件灵敏度低的优点，所以用它来实现具有象电话电路的分路滤波器那样高级特性的滤波器是最适宜的。

通常的线圈中必然有损耗，我们用Q作为其品质因数。在超低频滤波器中须用数亨以上的电感线圈，绕线电阻和磁心的损失颇大，其Q的大小在10以上就非常困难。与此相比，电容器的Q要大得多，在低频下很容易得到几百以上的Q。所以，如果可以制成损失小的回转子，就可以制作出不用线圈的高Q电感元件。

回转子型的有源滤波器的成功与否和有无方法以低廉的成本制成具有高Q、消费电力小的回转子有关。薄膜混合集成电路的回转子已在通信设备的均衡器等处实际使用。但是，即使用混合集成电路，它的费用也不能下降，用于有源滤波器，也不能和使用三节运算放大器的电路竞争。当可以批量生产低成本的利用单块集成电路的回转子时，方有实用的可能性。

对有源滤波器的最初的合理的、实用化的建议是斯各脱提

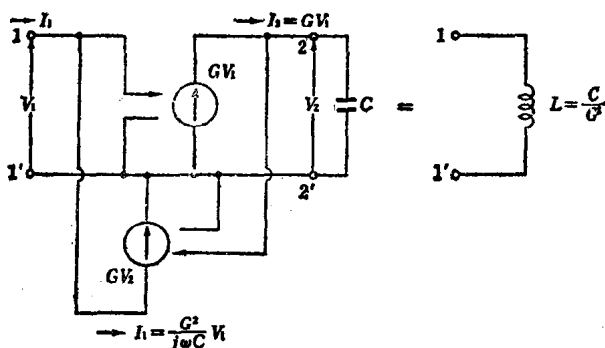


图1·6 回转子

出的反馈放大器的滤波器。对于反馈型滤波器，按照前节说明的要点，通常是将传递函数分解为二阶的分数函数，每个二阶函数用一个反馈放大器来实现。这种型式的基本形式是在1955年由赛伦凯提出的。

反馈型滤波器成功的最大原因是单块集成电路技术的进步，使得有可能以低廉价格提供高增益的运算放大器。由于价格的降低，有源滤波器中使用多少个运算放大器，就不再成什么问题，广泛采用以三个至四个放大器构成一个二阶函数的、但设计和调整却很简单、性能又优越的双二阶型滤波器，就变为完全可能了。

本书以实用为重点，将尽量缩短对于使用运算放大器的有源滤波器的理论的论述。下面试就有源滤波器的特点和使用范围加以说明。

1·3 有源滤波器的特点和使用范围

人们研究过的、用来代替LC滤波器的不仅有有源滤波器。

弹簧和重物要发生机械的共振，这是大家所熟知的。利用压电现象或磁滞伸缩现象也可以变电的振动为机械振动。利用机械的共振特性所作成的滤波器，有机械滤波器、陶瓷滤波器、晶体滤波器等。现在，也可用在技术上完全不同的相位同步环（称为锁相环，简化符号是PLL）得到滤波器特性。

机械滤波器 图1·7表示用耦合子把象殷钢*那样温度系数小的金属共振子连接起来，再以压电陶瓷的、电振动至机械振动的变换元件来作激励源，而利用其纵向振动的例子。这种形式的滤波器的Q高，可以制成在音频频域内具有任何特性的带通滤波器。最近已有人用作电话线上的通路滤波器。

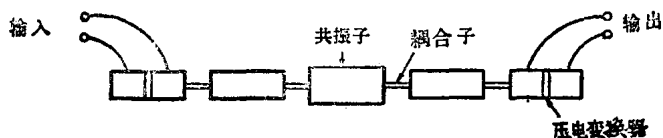


图1·7 机械滤波器

陶瓷滤波器 电至机械的变换和共振子均用压电陶瓷的PZT（锆钛酸铅）等所制作的滤波器，不能有极好的特性，但是可以得到便宜的带通滤波器。调幅和调频的无线电收音机中的中频滤波器多半使用这种滤波器。

晶体滤波器 利用石英晶片的压电现象的共振子是现在可以得到的元件中有最高Q的元件，适用于高级的带通滤波器。价格高、设计和制作困难是它的缺点。

锁相环 图1·8表示锁相环的方块图。锁相环具有一种牵引式的振荡器。它可以直接用作调频检波器等，它还有带通滤波器的特性。我们虽不能使它象其他滤波器那样具有任意特性，

* 殷钢是铁镍合金，含镍36%——译者注。

可是，用单块集成电路和少许的外加部件，便可组成锁相环，因此它的用途很广。

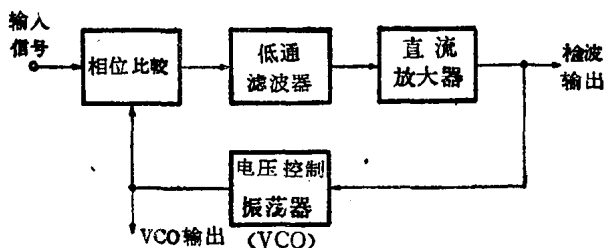


图1·8 锁相环

上述各种滤波器，全部都限用于实现带通特性。相对来说，有源RC滤波器和LC滤波器一样，对低通、高通等不论什么样的特性都可以实现。图1·9表示各种滤波器可以应用的频率范围和所可得到的Q值范围。

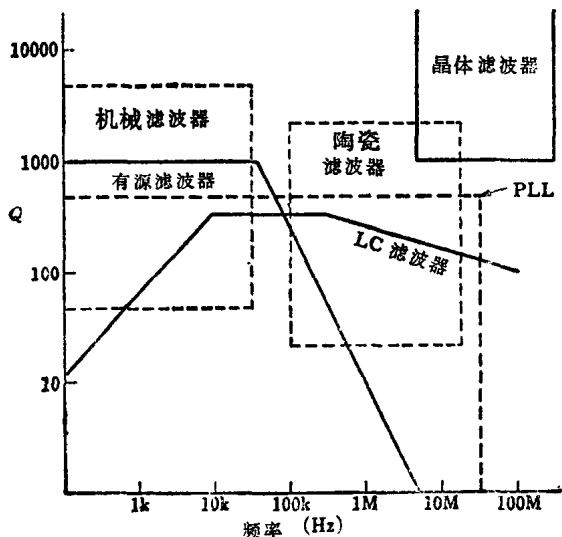


图1·9 各种滤波器的应用范围

从图1·9可以看出有源 RC 滤波器在100千赫以下可以广泛应用。除了必须有电源和成本不十分低廉外，在这个频率范围内，它具有能与 LC 滤波器充分竞争的特点。有源滤波器的最大弱点是在100千赫以上的高频不能与LC或陶瓷滤波器竞争。但是，如果能制作出以单块集成电路构成的有源滤波器，便可以解决这个问题。这就是今后要解决的最大课题。