

有源滤波器相位响应

第3部分：带通响应

作者：Hank Zumbahlen

简介

在本系列的第一篇文章中¹，我考察了滤波器相位与滤波器实现拓扑结构的关系。在第二篇文章中²，我考察了低通和高通响应滤波器传递函数的相位偏移。这篇文章将重点讨论带通响应。虽然滤波器主要针对幅度响应而设计，但在一些应用中，相位响应可能非常重要。

出于考察目的，有源滤波器的传递函数实际上是滤波器传递函数和放大器传递函数的级联（见图1）。

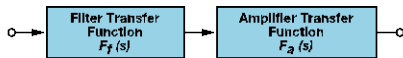


图1. 滤波器作为两个传递函数的级联。

带通传递函数

把低通原型的分子改为 $H_0 \frac{\omega_0}{Q}$ ，结果将把滤波器变成一个带通函数。这会在传递函数内引入一个零点。分子中的一个s得到一个零点，分母中的一个s得到极点。零点将产生频率上升响应，而极点将产生频率下降响应。

二阶带通滤波器的传递函数变为：

$$H(s) = \frac{H_0 \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (1)$$

此处的 ω 为滤波器增益峰值化时的频率 ($F_0 = 2 \pi \omega_0$)。

H_0 为电路增益（Q峰值化），定义为：

$$H_0 = H/Q \quad (2)$$

其中，H为滤波器实现的增益。

对带通响应来说，Q有特殊意义。它是滤波器的选择性。定义为：

$$Q = \frac{F_0}{F_H - F_L} \quad (3)$$

其中， F_L 和 F_H 为响应比最大值相差-3 dB时的频率。

滤波器的带宽 (BW) 定义为：

$$BW = F_H - F_L \quad (4)$$

可以证明，谐振频率 (F_0) 为 F_L 和 F_H 的几何平均值，这就意味着， F_0 在对数尺度上将出现在 F_L 和 F_H 二者的中点。

$$F_0 = \sqrt{F_H F_L} \quad (5)$$

另需注意的是，在对数尺度上，带通响应的波裙在 F_0 左右始终是对称的。

带通滤波器对各种Q值的幅度响应如图2所示。在此图中，中心频率的增益归一化为1 (0 dB)。

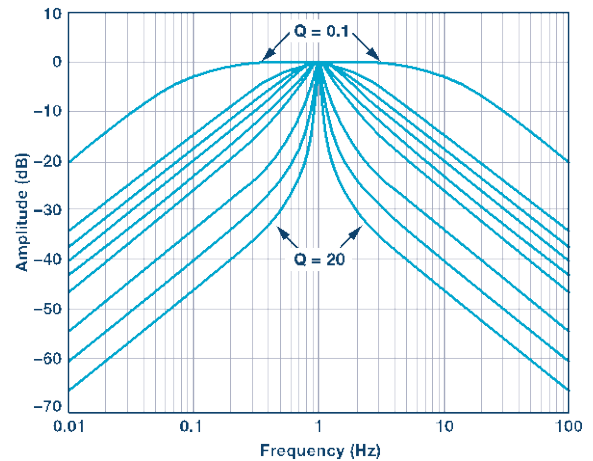


图2. 归一化的带通滤波器幅度响应

虽然本文主要关注相位响应，但了解下滤波器幅度响应也很有用。

这里需要提醒一下。带通滤波器有两种定义方式。窄带情况为经典定义，如上文所示。然而，在某些情况下，如果高、低截止频率相差很大，则带通滤波器采用独立的高通和低通部分进行构造。这里所说的相差很大是说至少相差2个倍频程（频率×4）。这就是宽带情况。本文中，我们主要关注窄带情况。对于宽带情况，可将滤波器视为独立的高通和低通部分。

虽然带通滤波器可用巴特沃兹、贝塞尔或切比雪夫等标准响应定义，但它们也通常按照其Q和 F_0 定义。

带通滤波器的相位响应为：

$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{2Q\omega}{\omega_0} + \sqrt{4Q^2 - 1}\right) - \arctan\left(\frac{2Q\omega}{\omega_0} - \sqrt{4Q^2 - 1}\right) \quad (6)$$

请注意，不存在单极点带通滤波器。

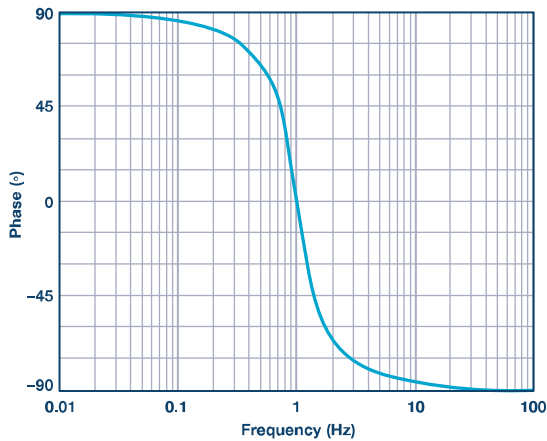


图3. 归一化的带通滤波器相位响应

图3从中心频率的1%到中心频率的100倍对公式6进行估值。中心频率的相移为0°。中心频率为1，Q等于0.707。此Q与前一篇文章中使用的Q相同，但该篇文章中我们使用的是 α 。记住， $\alpha = 1/Q$ 。

观察后发现，此曲线的形状基本上与低通（和相应的高通）的曲线形状相同。但是，本例中相移从中心频率下方90°开始，在中心频率处趋于0°，最后结束于中心频率上方-90°。

在图4中，我们考察了在Q不断变化时带通滤波器的相位响应。观察传递函数可以发现，相位变化可能发生在相对较大的频率范围内，变化的范围与电路的Q成反比。同样，在观察后发现，曲线的形状与低通（和高通）响应相同，仅范围有差异。

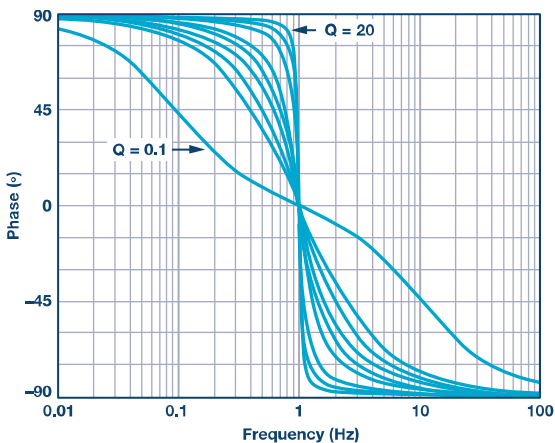


图4. Q不断变化时归一化的带通滤波器相位响应

放大器传递函数

之前的部分显示，传递函数基本上就是单极点滤波器的传递函数。虽然放大器的相移通常被忽视，但它可影响复合滤波器的整体传递。本文随机选择了AD822用于滤波器的仿真。这样选择的部分原因是为了最大程度地降低对滤波器传递函数的影响。这是因为，放大器相移的频率明显高于滤波器本身的转折频率。AD822的传递函数如图5所示，其信息直接取自数据手册。

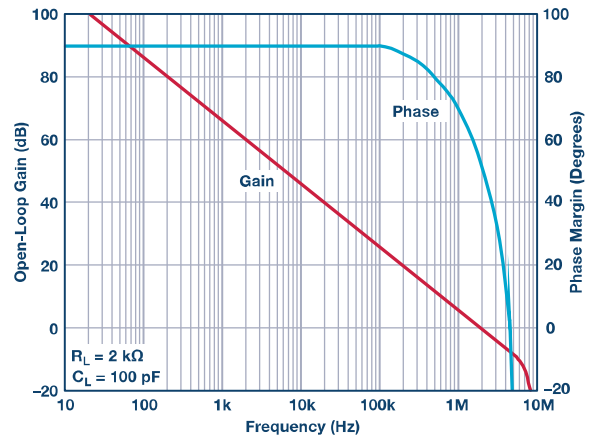


图5. AD822波特图增益和相位。

示例 1：Q = 20 的 1 kHz 2 极点带通滤波器

第一个示例开始时是作为带通设计的滤波器。我们随意选择了一个1 kHz的中心频率和数值为20的Q。由于Q在较高的一侧，因此我们将使用双放大器带通 (DABP) 配置。同样，这是随意选择的。

我们使用参考1的设计公式。相应的电路如图6所示：

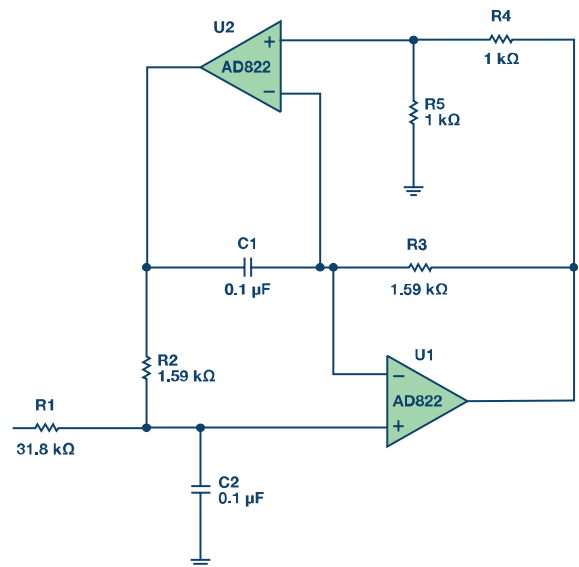


图6. 1 kHz、Q = 20的DABP带通滤波器。

本文中我们主要关注相位，但我认为考察下幅度响应也很
有用。

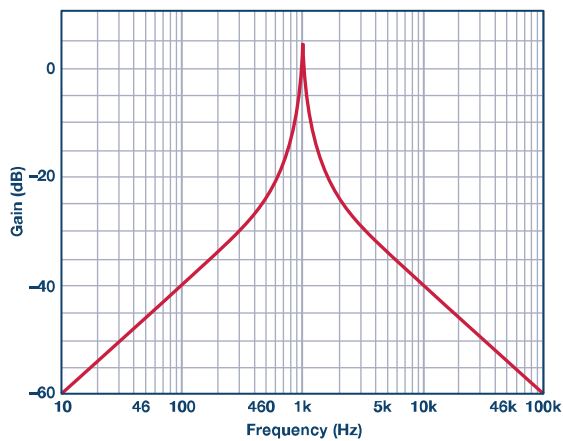


图7. 1 kHz、 $Q = 20$ 的DABP带通滤波器幅度响应。

图8所示为相位响应：

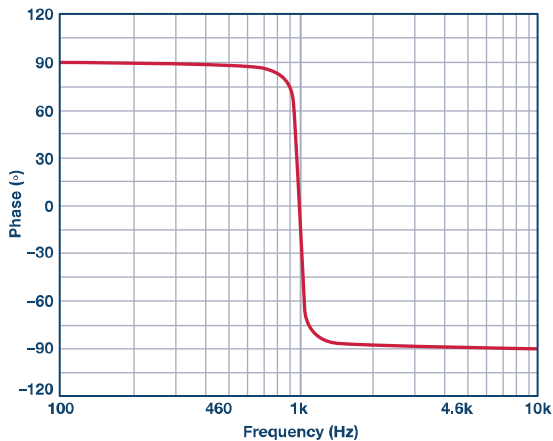


图8. 1 kHz、 $Q = 20$ 的DABP带通滤波器相位响应。

应当注意，DABP配置为同相。图8与图3一致。

示例 2：从 1 kHz、3 极点 0.5 dB 切比雪夫低通到带通滤波器的转换

滤波器原理以低通原型为基础，低通原型可以其他形式表

示。本例使用的原型是1 kHz、3极点、0.5 dB切比雪夫滤波器。选择切比雪夫滤波器是因为，如果响应不正确，它可以显示得更清楚。例如，通带中的纹波将不会排成一行。在本例中，巴特沃兹滤波器可能过于宽松。选择3极点滤波器是为了能够转换一个极点对和单个极点。

LP 原型的极点位置（来自参考 1）为：

级	α	β	F_0	α
1	0.2683	0.8753	1.0688	0.5861
2	0.5366		0.6265	

第一级为极点对，第二级为单极点。请注意，用 α 表示两个完全不同的参数的做法是不可取的。左侧的 α 和 β 为复平面上的极点位置。这些是转换算法中使用的值。右侧的 α 为 $1/Q$ ，这正是物理滤波器设计等式所希望看到的。

现在，低通原型被转换成了带通滤波器。参考1中列出的一系列等式用于转换。原型滤波器的每个极点都将转换成一个极点对。因此，转换完成时，3极点原型将拥有6个极点（3个极点对）。此外，原点处将有6个零点。不存在单极点带通。

转换过程的部分工作是指定可合成的滤波器的 3 dB 带宽。在这种情况下，该带宽将被设为 500 Hz。产生的转换结果如下：

级	F_0	Q	A_0
1	804.5	7.63	3.49
2	1243	7.63	3.49
3	1000	3.73	1

实际上，先将更低的增益和Q部分放入串中可能很有用，因为这可最大程度地提高信号电平处理能力。前两级存在增益要求的原因在于，相对于总滤波器中心频率，它们的中心频率将会衰减（也就是说，它们将在其他部分的波裙上）。

由于结果得到的Q适中（小于20），因而将选用多级反馈拓扑结构。我们使用参考1中多路反馈带通滤波器的设计方程设计滤波器。图9显示了滤波器本身的原理图。

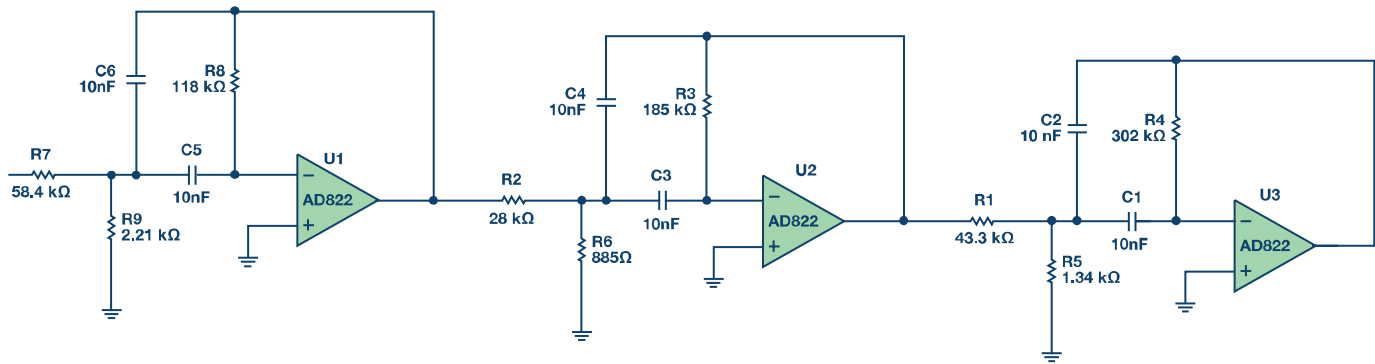


图9. 1 kHz、6 极点、0.5 dB 切比雪夫带通滤波器。

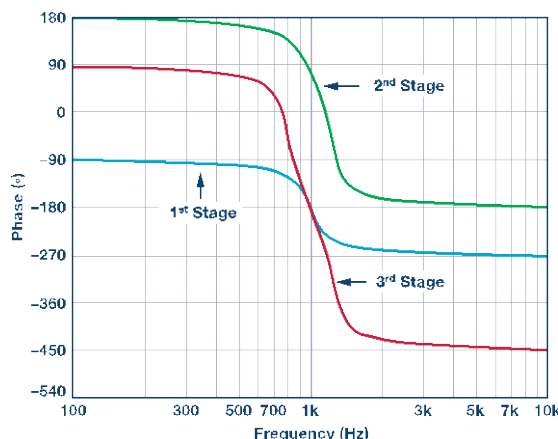


图10. 1 kHz、6极点、0.5 dB切比雪夫带通滤波器的相位响应。

图10中可以看到完整滤波器的相移。曲线图单独显示了第一部分的相移（第1部分）、前两个部分的组合相移（第2部分），以及完整滤波器的相移（第3部分）。这些曲线显示了“实际”滤波器部分的相移，其中包括放大器的相移和滤波器拓扑结构的反相。

图10中有几点细节需要注意。第一，相位响应具有累积性。第一部分显示了180°的相位变化（滤波函数的相移，忽视了滤波器拓扑结构的相移）。第二部分显示了因具有两部分而产生的360°相位变化，每个部分180°。记住， $360^\circ = 0^\circ$ 。第三部分显示了540°的相移，每个部分180°。还应注意，在高于10 kHz的频率处，我们开始看到相位因放大器响应而轻微滚降。还可以看出，滚降也具有累积性，会随着每个部分而增大。

在图11中我们可以看到完整滤波器的幅度响应。

结论

本文讨论的是带通滤波器的相移。在前面几篇文章中，我们考察了与滤波器拓扑结构相关的相移以及低通和高通拓扑结构的相移。在后续文章中，我们将考察陷波滤波器和全通滤波器。在最后一期，我们将总结并考察相移如何影响滤波器的瞬态响应，同时还会考察群延迟、脉冲响应、阶跃响应，以及它们对信号的意义。

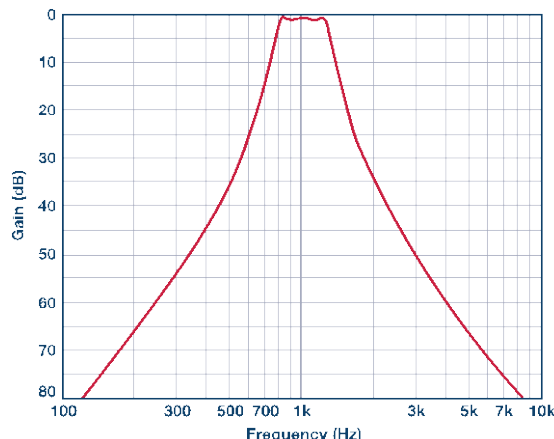


图11. 1 kHz、6极点、0.5 dB切比雪夫带通滤波器的幅度响应。

尾注：

- ¹ Hank Zumbahlen. “有源滤波器中的相位关系”。模拟对话，第41卷第3期，2007年。
- ² Hank Zumbahlen. “有源滤波器的相位响应第二部分：低通和高通响应”。模拟对话，第43卷第3期，2009年。

其他参考文献：

- Daryanani, G. 有源网络合成和设计的原理。John Wiley & Sons, 1976。
- Graeme, J., G. Tobey和L. Huelsman. 运算放大器设计和应用。McGraw-Hill, 1971。
- Van Valkenburg, Mac. 模拟滤波器设计。Holt, Rinehart and Winston, 1982。
- Williams, Arthur B. 电子滤波器设计手册。McGraw-Hill, 1981。
- Hank Zumbahlen, 《基本线性设计》第8章。ADI公司，2006年。
- Hank Zumbahlen, “第5章：模拟滤波器。” 运算放大器应用手册。Newnes-Elsevier, 2006。
- Hank Zumbahlen, 线性电路设计手册。Newnes-Elsevier, 2008。
- Hank Zumbahlen, “有源滤波器中的相位关系”。模拟对话，第41卷，2007年。
- Zverev, Anatol I. 滤波器合成手册。John Wiley & Sons, 1967。

Hank Zumbahlen [hank.zumbahlen@analog.com] 1989 年进入 ADI 公司，最初担任驻加州的现场应用工程师。在过去数年中，他还作为高级应用工程师，参与了培训和研讨会发展工作。此前，他在 Signetics（飞利浦）担任类似职位，还曾在多家公司担任设计工程师，主要涉足测试和测量领域。Hank 拥有伊利诺伊大学的电子工程学士学位 (BSEE)。他是《线性电路设计手册》(Newnes-Elsevier 2008)的作者。



Hank Zumbahlen

该作者的其它文章：

良好接地指导原则

第 46 卷第 6 期