



何宾 2015.07

有源滤波器的设计理论

- 模拟滤波器在信号链的应用中一般用作抗混叠滤波器。
 设计模拟滤波器的时候关于通带和截止带设定会用到采
 样定理的知识。
 - 在时域中,信号经过滤波在采样是s(t)和h(t)卷积,然后再跟 δ(t) 相乘。

 $s(t) \otimes h(t) \bullet \delta(t)$

► 对应到频域,信号S(ω)和H(ω)相乘,然后再跟δ(ω)卷积 S(ω)●H(ω)⇔δ(ω)





有源滤波器的设计理论



原始信号和低通滤波器的频谱

3



信号经过低通滤波器的频谱



有源滤波器的设计理论

采样函数 $\delta(t)$ 的频域结构 $\delta(\omega)$



经过滤波的信号跟 $\delta(\omega)$ 卷积后的频谱







■ 从图中可以看出,在频域轴上,频谱周期延拓。

- 在滤波器的过渡带内会产生频谱混叠只要混叠区域不干扰到有用信号频 谱(混叠区域幅度足够小或者避开有用信号区域)就不会产生错误。
- 根据频谱的对称性,0到fs/2的区域被称为奈奎斯特域。
- 由于实际中滤波器不能做到0过渡带,所以采样率fs要大于信号带宽fa的数倍。

5





内容包括

- 设计要求
- 设计过程
- 运放选择





有源滤波器设计 --设计要求

- 假设所感兴趣信号的最高频率为100Hz,信号幅度为0~4Vpp,
- 使用2K的频率对信号采样。
- 期望达到12位的精度
- fa = 100H为最高频率,设置它为低通滤波器的-3dB截止频率。
- fs<mark>为采样率</mark>2kHz。
- 根据奈奎斯特采样定律,超过fs/2的信号将混叠到0~fs/2频段中,其中(fs-fa)~fs间的频率成分将混叠回0-fa频段内。为了保证 0~fa频段内12位的精度,即72dB的动态范围。









 高于fs-fa的频率分量都应该被低通滤波器限制在-72dB以下。
 将ADC的最大量程归一化后为0db,则12bit ADC能测量到的最小 信号为-72db,要使混叠到带内的信号不干扰ADC采样,则需要衰 减到-72db以下。所以,截止频率应该为fs-fa=1.9kHz,衰减量为 72dB。







- 在Altium Designer主界面主菜单下,选择WEBENCH-
 - >WEBENCH Design Center->WEBENCH Filter Designer。
- 自动打开IE浏览器。在"FILTER DESIGNER VISUALIZER" 窗口中输入滤波器设计参数。

9



行初示1/心切入在这时	
设计过程	
 Lowpass Highpass Bandpass 	Click to design with default specifications. Start Filter Design
Attenuation Cutoff Frequency(fc): 100 Hz Gain(Ao): 1 V/V 0.00 dB © Search Filter Response Pick Filter Response Stopband Stopband Stopband Attenuation(Asb): -72 dB Stopband Frequency(fs): 1900 Hz Supply Voltage 0 Hz ♥ Dual Supply Single Supply Supply Voltage ♥ Enter Passband Ripple (AAmax) Specs Passband Ripple Passband Ripple Specification(AAmax): 0.5 dB Magnitude Flatness Lower Test Frequency(f1F): 0 Hz	$2\Delta A_{MAX} \qquad \qquad$

____ Enter Group Delay Flatness Specs

Enter Step Response Specs

Start Filter Design



■ 滤波器设计参数

- □ Gain (滤波器增益, Ao): 1。
- □ Cutoff Frequency (截止频率, fc): 100Hz。
- □ Stopband Frequency(阻带频率, fs): 1900Hz。
- □ Stopband Attenuation (阻带衰减, Asb): -72dB。
- □ Supply Voltage: +/-12V。该界面中,右侧给出了对应的响应特性曲线
- 选中Enter Flatness Specs前面的复选框。



- 出现Passband Ripple子窗口。在该窗口中,按下面设置参数
 - □ Flatness Specification (通带起伏, △Amax):0.5dB。
 - □ Magnitude Flatness Lower Test Frequency(平坦度范围起点频率, f1F)
 - : 0Hz.
 - □ Magnitude Flatness Higher Test Frequency(平坦度范围终止频率,f1F)
 - : 100Hz
 - 单击 "Start Filter Design" 按钮。



■ 出现滤波器设计界面



FILTER DESIGNER(BETA) VISUALIZER

Copyright © 2009 Altium Limited 13



- WEBENCH为设计滤波器提供了最大的灵活性和方便性。设计界面中由6个组成部分组成:
 - □1是设计优化,可以在阻带衰减、冲击响应和成本之间优化。
 - □ 2是设计条件修改,可以在设计过程中随时修改设计条件。
 - □ 3是方案筛选,可以推动滚动条对待选方案的性能进行筛选,例如阻带衰减值、阶数、波动和延时等。
 - 4是方案可视化对比,将待选方案的延时、阻带衰减和阶数等参数显示在 三维图中,图的坐标表示的参数可以在下拉菜单中选择。
 - □ 5是待选方案,表格中有各方案的特性参数。
 - □6是方案性能曲线对比,可以点击曲线进行放大,方便查看。



■ 设计中首先选择滤波器频率响应的类型,常用的有Bessel,

Butterworth和Chebychev。概括来说:

- □ Bessel拥有最平坦的通带和最缓的截止速率;
- □ Chebychev拥有最陡的截止速率,但其通带起伏最大;
- □ 而Butterworth的表现为两者的折衷。



- 单击设计界面中的"性能曲线",观察幅频特性,三种滤波器的 -3dB的截止频率均为100Hz。
- 将左图放大,观察三种滤波器在截止频率上的差异,从图中可以 看到黄色曲线(Chebychev)下降的最快,绿色曲线(
 - Butterworth) 下降速率居中。







在Solution界面中,给出了几种可选的方案,选择Butterworth型 滤波器一行。单击该行最前面的按钮。

Solutions: (7 found)

Select	Filter Response	Color	Or der	Max Q	Att (dB)		
		_		_			
	Butterworth	Green	3	1	-76.72		
< >	0.5dB Chebyshev	Yellow	3	1.706	-79.61		
<►	Linear Phase 0.5°	Black	3	0. 95	-73.43		
• •	Transitional Gaussian to	Red	4	0. 58	-89. 54		
<	Besse1	B1ue	4	0.81	-88. 17		
∢	Transitional Gaussian to	Aqua	4	1. 32	-94.48		
<	Linear Phase 0.05°	Magenta	4	1. 07	-93.00		



■ 出现FILTER DESIGNER DESIGN SUMMARY界面。





- 1是设计优化,可以在电路对元件的敏感程度、成本和占用PCB面积之间 进行优化;
- 2是器件的选择,支持选择不同型号的运放;
- □ 3是拓扑选择,可以选择MFB型或者Sallen-key型;
- 4是滤波器类型修改,可以在设计中重新选择滤波器的类型;
- □ 5是电路原理图,图中增益参考可以修改;
- 6是器件修改,可以改变电路图中的元件,方便设计优化调整。



- 简单来说:
 - S重反馈(MFB)型滤波器是反相滤波器,其Q值、截止频率等对元器件 改变的敏感度较低,量产时有一定优势,缺点在于输入阻抗低,增益精度 不够好;
 - Sallen-Key型滤波器是同相滤波器,其优点在于拥有高输入阻抗、增益设置与滤波器电阻电容元件无关,所以增益精度极高、且在单位增益时对元器件的敏感度较低。
- 由于该设计增益设置为1,所以选择Sallen-Key型。



有源滤波器设计 --设计过程 ■ 单击 "Select Alternate" 按钮, 打开备选列表后 "simulation" 中有"正弦波"的器件才支持仿真 Solutions: (646 found) Show All OpAmps 1k Price(US\$ Footprint(m... Edit Part Number Simulation Chann... VccMin(V)

在当前界面工具栏内,单击"Sim Export"按钮,准备导出文件 并在Altium Designer中进行仿真。

22.5

0.0

0.0

1

2

4

2.6

10

4

0.60

0.10

0.18

Select

Select

Select

OPA244NA/250

TL072QDREP

TL064CNSR



- 在提示对话框中,选择Altium Designer,WEBENCH工具准备导出仿真文件到Altium Designer中。
- 单击 "Export" 按钮。
- 单击 "Download File" 按钮。
- 打开对话框界面,指定保存文件路径。





在Altium Designer主界面主菜单下,选择WEBENCH->Open WEBENCH Design。指向刚才保存文件的目录打开设计。



在Altium Designer主界面主菜单下,选择WEBENCH->WEBENCH Simulation Engine->Run WEBENCH Simulation Engine, Altium开始运行仿真。











有源滤波器设计 --运放选择

■ 増益带宽积

- □对于MFB结构运放的GBP最小为100×Gain×fc。
- □对于Sallen-key结构
- 注:(1)当Q<=1时,运放GBP至少为100×Gain×fc;而高Q值的 Sallenkey结构需要更高GBP的运放:
 - (2)当Q>1时,运放GBP至少为100×Gain×Q3×fc;
- 压摆率:

SlewRate > $(2\pi \times V_{OUTP} - P \times f_c)$



过采样简化模拟滤波器设计

- 也许你会对三阶滤波器不满意,多一个元件毕竟多一些成本。
 为解决这个问题,可以提高采样率到20kHz。这样,只需担心
 19.9kHz和20kHz之间的信号是否会混叠到0-100Hz间。这样,设定阻带为19.9K,我们拥有了更宽的过渡带。
 使用WEBENCH重新设计后,一个两阶滤波器就可以满足甚至
 - 超过我们的期望。



过采样简化模拟滤波器设计







二阶滤波器的幅频响应和相频响应





过采样简化模拟滤波器设计

- 根据运放选择的方法,至少需要的带宽为10kHz,压摆率仅需 0.024V/uS,一个普通的uA741就满足这些要求。
- 但为了提高直流精度,我们选择OPA277,其增益带宽积为 1MHz,压摆率为0.8/uS,失调电压仅为20uV。







该电路具有很好的幅频响应特性。

- 从图中可以看到,在19kHz处衰减达到了-80dB。但是,随后 增益曲线开始上升,对更高频率处的抑制能力下降,这是 Sallen-Key型滤波器特有的高频溃通现象。
 - 这是由于电容C1、C2在高频处逐渐短路带来的,而增益曲线最终将稳定在R_o / R1这个点。其中:R_o为运放的开环输出阻抗。从图中可以看到,增益曲线稳定在-47dB,即通过等式:

 $-47 = 20\log(R_0/11.25k)$

得到RO为50欧姆,符合高精度Bipolar运放低开环输出阻抗的特点。



过采样简化模拟滤波器设计

一解决高频溃通现象常有的方法

在Sallen-Key后面加RC滤波器。幅频响应特性,RC电路可以获得很好的滤波效果,但是大大增加了滤波电路的输出阻抗,并给滤波器带来了附加的相移。











过采样简化模拟滤波器设计 --解决高频溃通现象常有的方法

在采样率提高后,需要:

□ 首先需要考虑CPU的处理能力是否能跟上。

其次,需要考虑的问题是虽然通过提高采样率能简化模拟滤波器设计,并 很好的抑制高于fs/2的噪声,但是fa-fs/2内增加的噪声怎么办?

■ 不用担心,虽然fa-fs/2这部分噪声增大了,但它们不会混叠到

0-fa中,只需使用一个数字滤波器就可以完成噪声的滤除工作。













一步减小感兴趣的通带内的噪声.



过采样简化模拟滤波器设计 --解决高频溃通现象常有的方法

由于Delta-Sigma ADC常常用数MHz的采样率对数Hz的信号 进行过采样,因此在模拟滤波器端,Delta-Sigma ADC通常只 需要一个简单的RC滤波器,这个RC滤波器可能会大大提高设计 者的设计精度。



多阶滤波器改善过渡带





多阶滤波器改善过渡带 -- TINA-TI中的AC分析

在TINA-TI 主界面主菜单下,选择Analysis->AC Analysis->AC

Transfer Characteristic...,

	Ana	ysis T&M Tools TI Utilities		Help
ł		ERC		+ 🗨 100% 🖵 🎼
J		Mode Select Control Object Set Analysis Parameters		- ୢୖ୶୕ୄଢ଼ୢୖୢୗଽ <u></u> <mark>- ≻ - 74 - I ଡ଼ ‡</mark> ଡ଼
-		DC Analysis	Þ	
		AC Analysis	۲	Calculate nodal voltages
-		Transient		Table of AC results
-		Steady State Solver		AC Transfer Characteristic
-		Fourier Analysis	F	



多阶滤波器改善过渡带 TINA-TI中的AC分析 ■ 打开 "AC Transfer Characteristic" 按如下设置参数:	"对话框界面。在该界面中,	
AC Transfer Characteristic Image: Start frequency Image: Ima	1 OK Cancel <u>H</u> elp	



Altıum.

多阶滤波器改善过渡带 -- TINA-TI中的AC分析

■ 单击 "OK" 按钮。

信号经过4个运放后的幅频曲线,









经过1、2、3运放后的幅频曲线





多阶滤波器改善过渡带 -- TINA-TI中的AC分析



通过1运放的幅频曲线



通过3运放的幅频曲线



通过2运放的幅频曲线



通过4运放的幅频曲线



- 何宾老师出版的《Altium Designer 15.0电路仿真、设计、验证与 工艺实现权威指南》一书中所有设计案例源代码、书中所用半导 体器件相关参考手册、书中所用PCB制板工艺设计资料、Altium 提供的元件库封装等设计资源请通过如下地址进行下载
- http://www.gpnewtech.com/download/altium
- 如将本书做为教材需ppt源代码请访问如下地址:
- http://www.gpnewtech.com/ppt



