

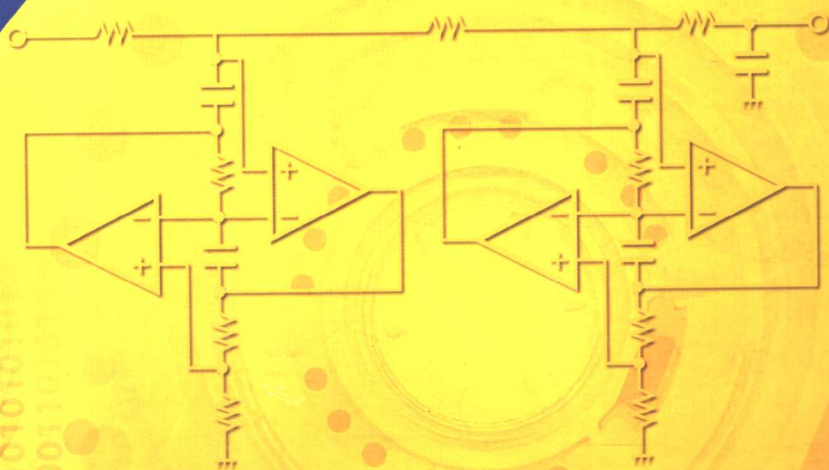
图解实用电子技术丛书

测量电子电路设计 ——滤波器篇

从滤波器设计到锁相放大器的应用

[日] 远坂俊昭 著

彭 军 译



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

测量电子电路设计 ——滤波器篇

从滤波器设计到锁相放大器的应用

〔日〕 远坂俊昭 著

彭 军 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2005-4936 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一,也是《测量电子电路设计——模拟篇》的姊妹篇,主要介绍如何从放大的信号中除去有害噪声,提取有用信号的滤波技术。书中介绍处理低频信号所必需的 RC 滤波器、有源滤波器、LC 滤波器,以及低频滤波器中能够实现极限 Q 值的锁相放大器的设计方法等,同时还提供大量的实验数据和模拟数据。

模拟篇中主要从高精度信号测量的观点,举具体的设计和制作实例详解模拟电路的基本电路,即放大电路。

本书的读者对象主要是电子工程技术人员,也可供电子、自动化、仪器仪表等相关专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

测量电子电路设计:滤波器篇/(日)远坂俊昭著;彭军译.——北京:
科学出版社,2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-017182-9

I. 测… II. ①远…②彭… III. ①电子测量-电路设计②滤波器-设计
IV. TM930.111-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 041385 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 6 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—4 000 字数: 262 000

定 价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

本书是《测量电子电路设计——模拟篇》一书的姊妹篇。

《测量电子电路设计——模拟篇》主要着眼于对来自传感器的具有一定 S/N 的微弱信号电压进行放大的技术。本书的主题则是从放大的信号中除去有害噪声,提取有用信号的滤波技术。

无论是由一个电阻和一个电容构成的 RC 滤波器,还是分析频率高达几十吉赫的频谱分析器都统称为滤波器,可见其包含的种类和技术非常庞杂。

本书在介绍应用于处理低频信号的 RC 滤波器、有源滤波器、 LC 滤波器,以及低频滤波器中能够实现极限 Q 值的锁相放大器(Lock-in Amplifier)的设计方法的同时,还提供了大量的实验数据和模拟数据。

通常关于滤波器的专业书籍,既要颇费力气地阐述理论,又要介绍进行设计时必要的事项。而本书则将重点放在实用设计所必需的技术问题上。这些内容对于直接进行实际设计无疑是非常有用的,只是有关滤波器基础理论的内容相对而言略显单薄。因此,书末罗列出参考文献,以供希望进一步深入学习滤波器理论知识的读者参考。

要想了解锁相放大器,需要具备一定的锁相环(Phase Locked Loop, PLL)基本知识,不过简明易懂地介绍 PLL 中使用的滤波器参数计算方法的专业书籍并不多见。

本书对于 PLL 中使用的滤波器的计算问题,不但在介绍其设计方法的同时还提供大量的实验数据和模拟数据,所以请因 PLL 知识比较欠缺而感到困惑的读者务必阅读这些内容。

同时,也向那些对于锁相放大器的使用方法感到困惑的在物理、化学等领域工作的读者推荐本书。为了熟练地使用测量仪器,必须熟知测量仪器的原理。当进行某种实验时,不仅需要购置正规厂家的测量仪器建立测量系统,还需要自制夹具提高实验准确性和速度。

如果任何配件都寄希望于向厂家定做,既花费时间而又未必

合适。请务必阅读本书,学习并掌握自制前置放大器和滤波器、排除外来噪声的技术,以便能够完成独创性的、质量更高的实验。

《测量电子电路设计——模拟篇》和本书都是在 CQ 出版株式会社董事兼电子电路技术研究会主持人蒲生良治先生的建议下着手编写的。利用休息日,为进行计算机模拟而敲键盘,握着电烙铁做作业,原本预定半年完成,结果花了 5 年的时间。

在此,谨向耐心等待迟到稿件的蒲生良治先生和作者的恩师——(株)NF 电路设计集团常务董事荒木邦尔先生,以及给予了许多帮助的电子电路技术研究会的各位同仁致以深深的谢意。

而且,还要向包饺子高手——妻子宏子因怠慢而深表歉意,同时感谢她给予我的支持。

著 者

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 滤波器的特性与种类	1
1.1.1 各种滤波器——本书介绍频率意义上的 滤波器	1
1.1.2 噪声与滤波器的带宽	3
1.1.3 滤波器对白噪声的滤波效果	3
1.1.4 防混淆作用的低通滤波器	5
1.1.5 高通滤波器(HPF)的作用	7
1.1.6 带通滤波器(BPF)的作用	8
1.1.7 带阻滤波器(BEF)的作用	8
1.1.8 模拟滤波器与数字滤波器	9
1.1.9 能够自制的滤波器	10
1.1.10 由厂家制作的滤波器	11
1.2 滤波器的频率响应与时间响应特性	12
1.2.1 滤波器的阶数与衰减陡度	12
1.2.2 最大平坦:巴特沃斯特性	13
1.2.3 快速调整阶跃响应的贝塞尔特性	13
1.2.4 实现陡峭特性的切比雪夫特性	14
1.2.5 更加陡峭——椭圆(Elliptic)特性	15
1.2.6 滤波器的副作用——对响应特性的影响 ...	15
1.2.7 高通滤波器的时间响应特性	15
1.2.8 带通滤波器的时间响应特性	19
第 2 章 RC 滤波器与 RC 电路网络的设计	21
2.1 最简单的 RC 滤波器	21
2.1.1 RC 低通滤波器的特性	21
2.1.2 DC 前置放大器上附加 RC 滤波器	22
2.1.3 RC 滤波器的多级连接	23

2.2 加深对 RC 电路网络的印象	26
2.2.1 表现电路网络动作的万能曲线	26
2.2.2 设计时利用渐近线	27
2.2.3 高频截止/低频截止的 A 万能曲线	28
2.2.4 描述相位返回特性的 B 万能曲线	29
2.2.5 PLL 电路中应用的高频截止的 B 万能曲线 ...	30
2.2.6 应用于 OP 放大器相位补偿的低频截止的 B 万能曲线	33

第 3 章 有源滤波器的设计

3.1 概 述	37
3.1.1 有源滤波器——确定参数值时的自由度高 ...	37
3.1.2 2 阶有源滤波器设计基础	38
3.2 有源低通滤波器的设计	40
3.2.1 经常使用的正反馈型 2 阶 LPF(增益=1)的 构成	40
3.2.2 5 阶巴特沃斯 LPF 的计算例	41
3.2.3 使 LPF 具有放大率的滤波电路	43
3.2.4 正反馈型 LPF(增益 $\neq 1$)的构成	43
3.2.5 减小元件灵敏度和失真的多重反馈型 LPF ...	45
3.2.6 有源 LPF 的高频特性	47
3.3 有源高通滤波器的设计	49
3.3.1 正反馈型 2 阶 HPF 的构成	49
3.3.2 5 阶切比雪夫 HPF 的计算例	50
3.3.3 多重反馈型 HPF 的构成	51
3.4 状态可调滤波器的设计	52
3.4.1 状态可调滤波器的概念	52
3.4.2 反转型与非反转型在特性上的差别	53
3.4.3 在可变频率-可变 Q 的通用滤波器中的应用 ...	57
3.4.4 状态可调滤波器模块	57
3.4.5 低失真率的双截型滤波器	58
3.5 带通滤波器的设计	59
3.5.1 将 LPF 与 HPF 级联	59
专栏 A 状态可调滤波器在低失真率振荡器中的应用 ...	61
3.5.2 $Q=10$ 以下的 1 个 OP 放大器的多重	

反馈型 BPF	62
3.5.3 中心频率为 1kHz, $Q=5$ 的带通滤波器	63
3.5.4 2 个放大器的高 Q 值 BPF	65
3.5.5 能够用于评价 OP 放大器噪声的带宽 100Hz 的 BPF	66
3.6 带阻滤波器的设计	69
3.6.1 使用 BPF 的带阻滤波器	69
3.6.2 测量失真用的双 T 陷波滤波器	71
附录 有源滤波器设计用的归一化表	73
 第 4 章 LC 滤波器的设计	79
4.1 LC 滤波器概述	79
4.1.1 LC 滤波器在 10kHz 以上的使用价值高 ...	79
4.1.2 利用归一化表和模拟器使设计变得简单 ...	80
4.1.3 LC 滤波器的两种类型	81
4.2 LC 滤波器的设计	81
4.2.1 低通 LC 滤波器的设计	81
4.2.2 归一化表的使用方法	83
4.2.3 由低通滤波器(LPF)变换为高通滤波器(HPF) 84	
4.2.4 变换为带通滤波器(BPF)	85
专栏 B 函数台式计算机的应用	88
4.2.5 BPF 的带宽越窄响应越慢	89
4.3 LC 滤波器的实验制作	91
4.3.1 附有 5 阶低通滤波器的前置放大器	91
4.3.2 巴特沃斯 BPF 的试制	94
 第 5 章 模拟 LC 型有源滤波器的设计	97
5.1 模拟 LC 的概念	97
5.1.1 不希望使用线圈	97
5.1.2 实现 FDNR 的电路	98
5.2 实用的 FDNR 滤波器的设计	98
5.2.1 5 阶 LPF 的设计	98
5.2.2 特点——不受 OP 放大器直流漂移的影响 ...	100
5.2.3 注意最大输入电平	102
5.2.4 信号源电阻为 0Ω 的 FDNR 滤波器	102

5.2.5	信号源电阻为 0Ω 的 FDNR 5 阶低通滤波器的试制	105
5.2.6	抗误差用 7 阶切比雪夫滤波器的设计	108
5.2.7	特性的检验	110
5.2.8	利用高速 A/D 转换器减轻滤波器的负担 ...	112
5.2.9	将电容变换为电感的 GIC	113
第 6 章 滤波器使用的 RLC		117
6.1	滤波器使用的电阻器	117
6.1.1	各种电阻器	117
6.1.2	滤波器电路中的金属膜电阻器	117
6.1.3	电阻的频率特性	119
6.2	滤波器使用的电容器	121
6.2.1	电容器要注意等效串联电阻 R_s	121
6.2.2	精密滤波器中不使用铝电解电容器	124
6.2.3	叠层陶瓷电容器	126
6.2.4	薄膜电容器	128
6.2.5	苯乙烯电容器	130
6.2.6	云母电容器	130
6.3	滤波器使用的线圈	133
6.3.1	线圈的种类和等效电路	133
6.3.2	微型电感(圆筒形)	135
6.3.3	壶形铁心	138
6.3.4	用壶形铁心制作电感器的要点	139
6.3.5	基于壶形铁心的 100mH 电感器的设计 ...	142
6.3.6	方形金属外壳电感器	145
6.3.7	环形铁心	147
6.3.8	环形铁心电感器的设计例	148
专栏 C 关于 E 系列标准值		151
第 7 章 变压器对噪声的阻断/抑制作用		153
7.1	变压器概述	153
7.1.1	不可轻视变压器的作用	153
7.1.2	变压器的基本动作	153
7.1.3	变压器的等效电路	154

7.1.4 决定低频特性的激磁电感和线圈电阻	155
7.1.5 决定高频特性的泄漏电感和线圈电容	157
7.2 利用输入变压器改善测量放大器的噪声特性 ...	158
7.2.1 利用输入变压器使信号升压	158
7.2.2 进一步改善低噪声 OP 放大器电路的 噪声特性	159
7.2.3 输入变压器也有除去共模噪声作用	160
7.2.4 输入变压器的参数	163
7.2.5 将变压器输出开路求激磁电感	163
7.2.6 将变压器输出短路求泄漏电感	165
7.2.7 输入变压器的典型参数	165
7.2.8 输入变压器的模拟	166
7.2.9 高频范围凸峰的补偿	167
7.3 除去来自电源的噪声	169
7.3.1 电源噪声的混入由变压器的参数规格所决定	169
7.3.2 电源变压器的形状	170
7.3.3 阻断共模噪声的静电屏蔽	171
7.3.4 抑制泄漏磁通的电磁屏蔽	174
附录 针对电源噪声的噪声滤波变压器	175

第 8 章 共模扼流圈的应用

8.1 复习——电子设备的外来噪声	179
8.1.1 外来噪声有共模型和简正型	179
8.1.2 简正模噪声及措施	179
8.1.3 由于共同接地发生的共模噪声	181
8.1.4 设备内部的共模噪声	181
8.2 共模扼流圈的应用	182
8.2.1 共模扼流圈的作用	182
8.2.2 共模扼流圈的等效电路	183
8.2.3 共模扼流圈的绕制	184
8.2.4 选择泄漏电感小的扼流圈	186
8.3 电源用传输滤波器	187
8.3.1 传输滤波器的动作	187
8.3.2 传输滤波器的选用	188
8.3.3 传输滤波器的数据与使用状态下不同	189

8.3.4	传输滤波器的安装方法	190
8.3.5	注意脉冲电流使铁心饱和的问题	191
8.3.6	注意传输滤波器漏电流引起的触电	193
8.3.7	意外情况下的共模扼流圈铁心	194
 第9章 锁相放大器的原理与实验		197
9.1	锁相放大器概述	197
9.1.1	通频带变窄与 Q 值的提高	197
9.1.2	锁相放大器的结构	198
9.1.3	相敏检测器 PSD	200
9.1.4	乘法运算中转换——同步检波	201
9.1.5	不需相位调整的双相位锁相放大器	202
9.1.6	动态余量表征能够允许的噪声量	203
9.1.7	相位噪声决定测量极限	205
9.1.8	用时间常数表征低通滤波器的特性	206
9.1.9	噪声密度的测量	207
9.2	锁相放大器的实验	208
9.2.1	试制的锁相放大器概况	208
9.2.2	使用 74HC4046 的 PLL	209
9.2.3	VCO 特性的改善	211
9.2.4	利用相位频率型比较器进行相位比较	213
9.2.5	参考信号电路的具体构成	214
9.2.6	产生准确的参考信号	214
9.2.7	PLL 低通滤波器参数的计算	217
9.2.8	相位调整电路	218
9.2.9	PLL 电路响应特性的确认	220
9.2.10	相位调整电路的设计要点	223
9.2.11	PSD 的设计要点	224
9.2.12	时间常数电路的设计要点	226
9.2.13	DC 增益与动态余量	227
专栏 D	相位检波器模块	228
9.2.14	矢量运算求振幅和相位	229
9.2.15	锁相放大器的调整	230

第 10 章 锁相放大器的使用方法	235
10.1 熟练使用锁相放大器	235
10.1.1 锁相放大器产品的结构	235
10.1.2 锁相放大器的使用环境	237
10.1.3 关于参考信号	238
10.1.4 输入信号的连接方法很重要	238
10.1.5 输入端的差动平衡	240
10.1.6 设定动态余量的方法	242
10.2 锁相放大器应用范围的扩大	242
10.2.1 检测微小变化	242
10.2.2 输出信号有跳动时的观测方法	243
10.2.3 截光器的应用——光测量	244
10.2.4 光源特性变化的补偿——使用截光器的 双光束法	245
10.3 利用锁相放大器的应用测量	246
10.3.1 广阔的微小信号测量领域	246
10.3.2 在红外分光光度计中的应用	247
10.3.3 在 2 次量子光分光分析中的应用	248
10.3.4 在光声光谱仪中的应用	248
10.3.5 在超导材料评价中的应用	249
10.3.6 在金属材料张力试验中的应用	251
10.3.7 俄歇电子能谱分析技术(Auger Electron Spectroscopy, AES)	251
10.3.8 在金属探测器中的应用	253
10.3.9 在涡流探伤仪中的应用	254
10.3.10 在 RLC 测量仪中的应用	255
10.3.11 在测定化学阻抗中的应用	257
10.3.12 在电子束测量中的应用	259

第 1 章 概 述

1.1 滤波器的特性与种类

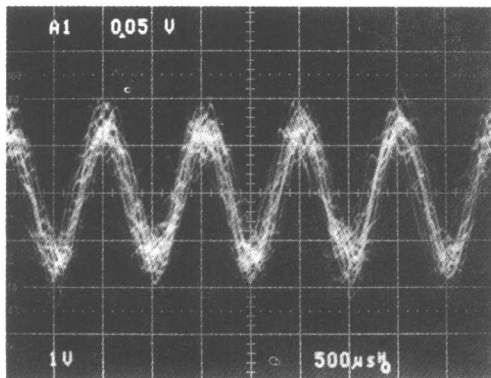
1.1.1 各种滤波器——本书介绍频率意义上的滤波器

在电气领域以外也存在着大量的过滤器(filter)。例如,在我们生活中过滤咖啡用的纸过滤器、阻挡紫外线的 UV 滤光片等。过滤器的作用就是除去不需要的成分,只选择需要的成分。

在电气领域滤波器不仅有频率意义上的滤波器,还有时间意义上的滤波器。例如,根据到达的时间选择信号,或者只在设定的时间工作的滤波器。

本书主要介绍频率范围在 1MHz 以下的低频模拟滤波器。

传感器领域中有检测温度、振动、光、距离等物理量的各种传感器。在很多情况下,从传感器所获得的信号中,不仅有希望得到的信息,同时也混有不需要的噪声。当传感器检测到的信号比较弱时,在传送传感器信号的过程中还会有噪声混入。这时如照片 1.1 所示,无法判别信号与噪声。噪声会使信号的值漂动,信号的准确度下降,这时就需要使用滤波器。



照片 1.1 来自传感器的信号(混有噪声)波形

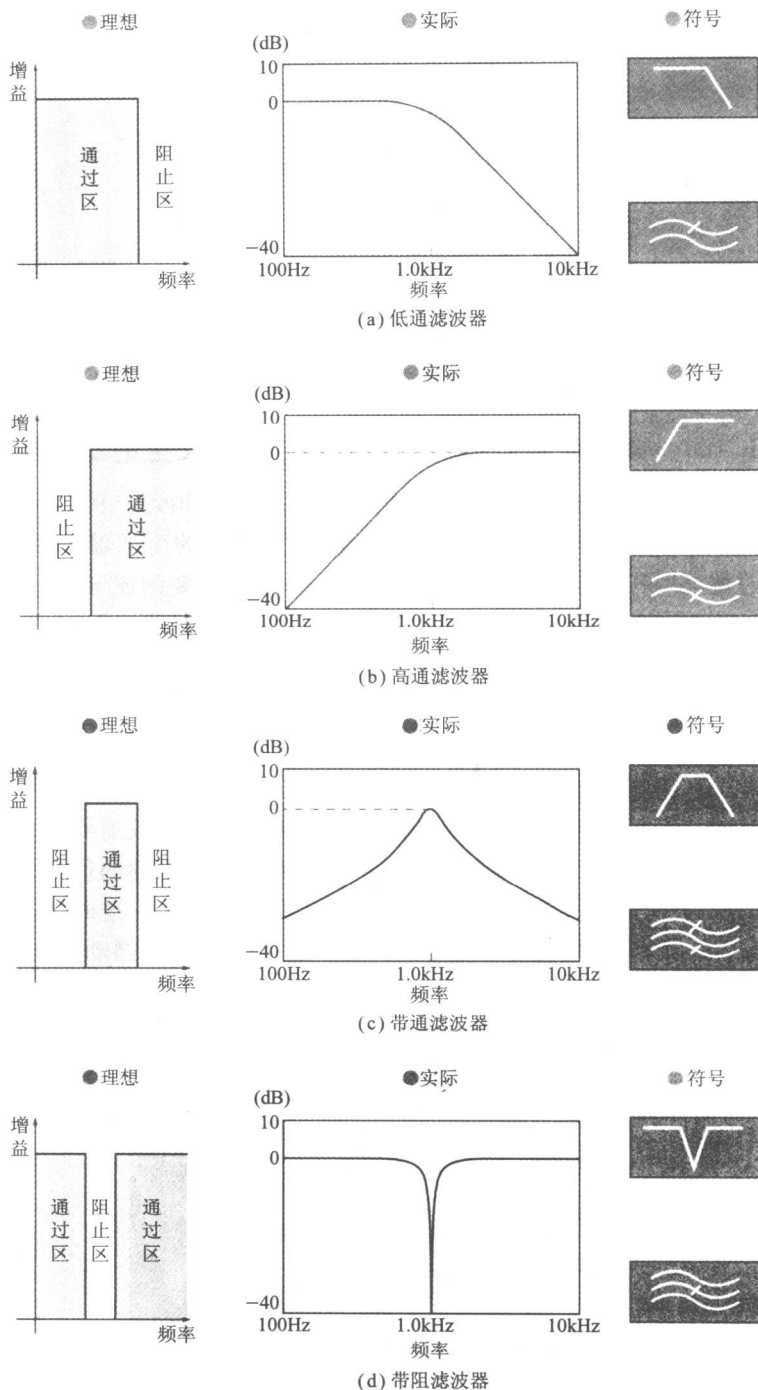


图 1.1 频率意义上的滤波器

如果能够干净地除去混入的噪声成分,只保留信号频率成分,就可以高精度地处理所获得的信号。

如图 1.1 所示,从选择频率成分的角度分类,滤波器主要有以下四种:① 低通滤波器(LPF)——允许截止频率以下的成分通过;② 高通滤波器(HPF)——允许截止频率以上的成分通过;③ 带通滤波器(BPF)——允许特定的频率成分(频带)通过;④ 带阻滤波器(BEF)——只除去特定的频率成分(频带)。

能够通过滤波器的频带与被衰减的频带的分界叫做截止频率。

1.1.2 噪声与滤波器的带宽

滤波器的任务是“除去噪声频率,选择目的信号”。不过就噪声而言,实际上也有很多种。

如果希望检出的信号与希望除去的噪声的频率成分很明确,就很容易确定出最合适的滤波器及其特性,也可以定量地表达它的滤波效果。

但是由于工作环境的不同,噪声的种类也各不相同。如果欲除去的噪声对象不明确,很难用“某种特性的滤波器具有怎样的效果”来定量地进行评价。最常见的噪声是白噪声。白噪声是一种均匀地包含所有频率的噪声(“白”是各种基本颜色的综合表现。),如电阻器产生的热噪声、二极管产生的噪声以及 OP 放大器的中频发生的噪声都是白噪声。

例如,电阻器产生的热噪声是由导体内部的自由电子做不规则运动(布朗运动)产生的,它的振幅由下式表示:

$$V_n = \sqrt{4kTRB} \quad (V_{rms})$$

式中 k ——玻尔兹曼常量($k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$);

T ——绝对温度, K;

R ——电阻值, Ω ;

B ——带宽, Hz。

就是说,电阻器产生的热噪声与绝对温度、电阻值以及带宽的平方根成正比。对于滤波器来说,重要的是“频谱均匀的噪声的振幅与带宽的平方根成比例”。

1.1.3 滤波器对白噪声的滤波效果

假设带宽为 1MHz 的放大器产生了 $1V_{rms}$ 白噪声。此时若其中插入一个 10kHz 的低通滤波器(LPF),那么输出噪声为

$$1V_{\text{rms}} \times \sqrt{\frac{10\text{kHz}}{1\text{MHz}}} = 0.1V_{\text{rms}}$$

如果插入的是 100Hz 的 LPF, 输出噪声减少到

$$1V_{\text{rms}} \times \sqrt{\frac{100\text{Hz}}{1\text{MHz}}} = 0.01V_{\text{rms}}$$

对于带通滤波器(BPF)也可以作同样的考虑。带通滤波器的特性如图 1.2 所示。BPF 的带宽越窄, 则 Q 值越大, 除去噪声的效果越显著。

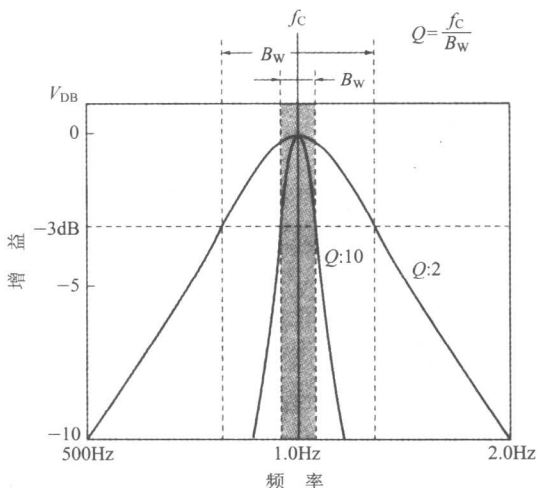


图 1.2 带通滤波器的 Q 值

对于高通滤波器(HPF)来说, 如果插入 100Hz 的 HPF, 那么输出噪声为

$$1V_{\text{rms}} \times \sqrt{\frac{999.9\text{kHz}}{1\text{MHz}}} = 0.99995V_{\text{rms}}$$

如果插入 10kHz 的 HPF, 其输出噪声为

$$1V_{\text{rms}} \times \sqrt{\frac{990\text{kHz}}{1\text{MHz}}} \approx 0.995V_{\text{rms}}$$

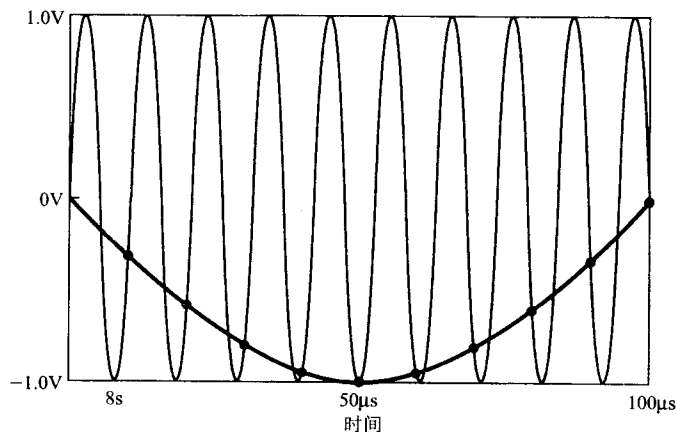
输出噪声几乎没有减少。这表明, 由于低频范围的带宽比高频范围窄, 所以在白噪声的场合即使阻断了低频范围的噪声也很难减少总的噪声输出。

这并不是说 HPF 没有作用, HPF 在截断直流漂移、降低特定的低频噪声(来自电源的感应噪声——交流噪声)等方面还是能够发挥作用的。

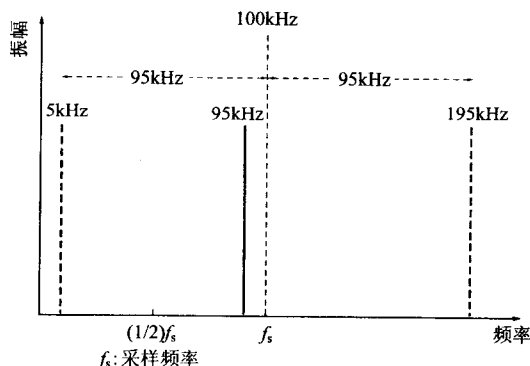
各种滤波器中,在信号测量方面使用更多的是低通滤波器。在放大传感器信号的前置放大器的初级电路中,为了除去噪声必须使用 LPF。其原因是,如果噪声密度相同,那么频率越高对总噪声电压的影响就越大,所以除去高频噪声能够明显地降低总噪声电压。

1.1.4 防混淆作用的低通滤波器

处理模拟信号时 A/D 转换器是必不可少的。在使用 A/D 转换器对模拟信号进行量化处理,即数字化时,如果信号中含有高于采样频率 $1/2$ 以上的频率成分,那么如图 1.3 所示,就会产生完全不同的频率成分,从而发生量化误差。这种现象称为混淆效应



(a) 用时域表现混淆:用100kHz对95kHz的信号采样时发生5kHz的混淆误差波形



(b) 用频域表现误差:在采样频率的两端产生偏移信号频率分量的频谱

图 1.3 A/D 转换中产生的混淆误差