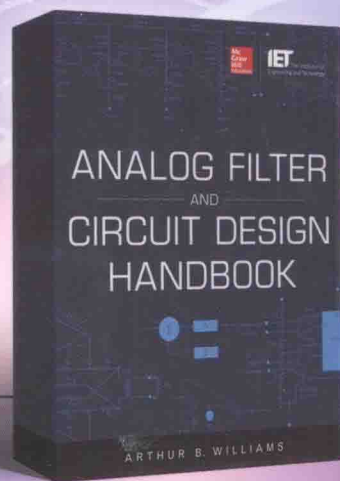


模拟滤波器与 电路设计手册

*Analog Filter
and
Circuit Design
Handbook*



[美] Arthur B. Williams 著

路秋生 译

国外信息技术精品丛书

模拟滤波器与电路设计手册

Analog Filter and Circuit Design Handbook

[美] Arthur B. Williams 著

路秋生 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本手册共分 19 章, 分别对各种有源、无源滤波器的设计、滤波器计算机辅助设计、滤波器响应的数学特性、线性电路、非线性电路、预失真电路、阻抗变换、开关电容滤波器、幅度均衡器、延迟均衡、波形产生与变换、反馈放大器和大信号输出放大器、功率放大器的散热设计、扬声器分频网络、电压反馈、电流反馈放大器工作特性等内容做了分析讨论。

本书适合从事滤波器设计的工程技术人员, 以及相关电子类专业的本科生、研究生阅读。

Analog Filter and Circuit Design Handbook

ISBN: 9780071816717

Copyright©2014 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright©2015 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。版权©2015 由麦格劳-希尔教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号图字: 01-2014-2941

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟滤波器与电路设计手册 / (美) 威廉姆斯 (Williams, A.B.) 著; 路秋生译. —北京: 电子工业出版社, 2016.1
(国外信息技术精品丛书)

书名原文: Analog Filter and Circuit Design Handbook

ISBN 978-7-121-27938-6

I. ①模… II. ①威… ②路… III. ①模拟滤波器—电路设计—技术手册 IV. ①TN713-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 309838 号

策划编辑: 柴 燕 责任编辑: 刘海艳

特约编辑: 张海波

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 30.5 字数: 780.8 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

译 者 序

滤波器在各种电子电路中得到了广泛的应用，滤波器设计需要用到许多相关专业知识，同时也需要用到一些相关数学工具，还可以利用一些相关计算机辅助设计工具来简化滤波器的设计。滤波器设计质量对电路的抗干扰性、工作稳定性和信噪比等技术指标都有很重要的影响，有许多技术指标来评价滤波器的设计质量。

本手册作者 B.Williams 先生有超过 45 年的滤波器和模拟电路设计经验，著有 8 部关于滤波器和模拟电路设计的书，同时也是众多专利的持有人。B.Williams 先生是 IEEE 电路和系统学会（长岛）的前主席和 IEEE 奖的获奖者，是 2007 年“电子滤波器设计技术发展终身发展奖”领奖人，是 Telebyte 公司首席科学家，在 Telebyte 公司他参与了电信行业测试设备的设计。

像世界上其他优秀技术手册一样，本《模拟滤波器和电路设计手册》也是一本鲜明的技术手册。本手册的第一个特点就是系统地分析和介绍了模拟滤波器和电路设计的有关知识，对有关滤波器和模拟电路设计做了简洁、细致的分析讨论，思路简洁清晰，配有丰富的滤波器设计数据，供滤波器设计人员在滤波器和电路设计工作中参考。

本手册利用计算机辅助设计程序，给出了滤波器计算机辅助设计实例，通过有关极点表、元件值和响应曲线对有关的各种滤波器类给以了介绍。通过对本手册的学习可以帮助读者建立起有关知识点之间的联系。本手册的第二个特点是注重有关模拟滤波器和电路设计的基础知识和基础概念的建立。重要的是对有关基础知识和功能主要从应用的角度进行介绍。本手册的第三个特色是注重实用性。

本手册共 19 章，第 1 章介绍了现代网络理论，第 2 章介绍了响应特性选择，第 3 章介绍了低通滤波器设计，第 4 章介绍了高通滤波器设计，第 5 章介绍了带通滤波器，第 6 章介绍了带阻滤波器，第 7 章介绍了时域网络，第 8 章介绍了 LC 滤波器设计和使用电阻性网络的优化，第 9 章介绍了 LC 滤波器和有源滤波器的元器件选择，第 10 章介绍了归一化滤波器设计表，第 11 章介绍了开关电容滤波器，第 12 章介绍了可调和固定延迟与幅度均衡器，第 13 章介绍了电压反馈运算放大器，第 14 章介绍了线性放大器应用，第 15 章介绍了非线性电路，第 16 章介绍了脉冲成形，第 17 章介绍了波形发生器，第 18 章介绍了电流反馈放大器，第 19 章介绍了大信号放大器。全手册内容丰富，实用性强。

电子工业出版社引进了系列的国外优秀科技图书，借鉴国外的先进科技知识，以促进国内本行业的技术进步。

我很高兴能将模拟滤波器和电路设计手册介绍给国内读者，由于译者水平有限，错漏之处在所难免，敬请各位读者指正。

参与本书翻译的还有赵红、秦拥军、张玲、汪赵强、陈媛、唐继芳、赵晶、孟利民、吴平正、陈圣文、何修献、何玉华、陈燕、陈梅。

另外在翻译本节的过程中得到了许多同事的帮助和支持，译者在此一并表示感谢。这里，特别要感谢电子工业出版社给予的指导和帮助。

路秋生

前 言

已有四个电子滤波器设计手册的版本，每个新版本进一步增强了以前版本的内容，在1981年这本书的出版前，无源和有源滤波器的设计被认为是一种“黑色艺术”，由数学家和专家进行滤波器设计，主要是因为滤波器设计实现需要烦琐的计算，需要有关技能和经验。最终，这本滤波器设计手册含有所有设计的滤波器类型，这些滤波器由具有广泛技术技巧的业余爱好者、技术工程师和科学技术人员所设计。这本滤波器设计手册作为滤波器设计的参考书，它出现在维基百科上无数次作为滤波器参考的有关搜索，和被许多技术文章和论文以及其他书籍用作参考。虽然以前的电子滤波器设计手册极大简化了无源和有源滤波器的设计，仍然存在不足。滤波器设计是专业的通用模拟电路设计，一直由专家来设计完成，工作中需要有一本揭秘一般模拟电路设计，而且较滤波器设计内容更为广泛的书。这就是本书要做的工作，第一版模拟滤波器和电路设计手册不仅简化了滤波器设计，而且分解模拟设计作为一个设计技巧的感知，强调使用运算放大器作为主要构建模块来实现各种模拟功能的电路。

同时，本手册介绍了运算放大器工作和局限性的非常有用基础知识，并给出了电路实例。其中许多电路以线性和非线性方式对模拟信号完成数学运算。例如音频功率放大器和分频器的音频应用场合都用到了电压负反馈和电流负反馈，对非理想放大器的影响和分析进行了讨论，介绍了各种实现波形形成和信号波形产生的正弦和非正弦的波形振荡器。

以前出版的和滤波器有关材料在修订的模拟滤波器和电路设计手册中做了更新，新版的模拟滤波器和电路设计手册不仅简化了滤波器设计，同时增加了新的主题和丰富了旧版的内容。第1章扩展了内容，进一步强调极-零概念和它与传递函数和利用多项式的现代网络理论之间的关系。极-零概念可以为确定滤波器可用性提供有用的工具，同时也可以用作滤波器优化的指导，本手册给出了各种综合方法，讨论了有源和无源滤波器之间实现的折中，考虑到了每种类型滤波器的频率限制。

第2章介绍了标准滤波器响应类型的数学特性内容，含巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔、等波纹误差线性相位、过渡、同步调谐和切比雪夫止带恒定延迟等内容，提供这些标准多项式传递函数大量的频域和时域归一化曲线参数，给出了滤波器要求归一化和滤波器的比例缩放。本章介绍了高效椭圆函数滤波器响应，并在整个手册中加以强调。利用功能强大的计算机辅助设计程序。给出了滤波器解决方案（书版）从Nuhertz技术和ELI 1.0两个用于椭圆传递函数滤波器的设计例证。“最佳L”多项式，也称为勒让德（Legendre）或帕普里斯（Papoulis）滤波器，通过有关极点表、元件值和响应曲线包括在有关的各种滤波器类给以介绍。

第3章中介绍了利用归一化的表格和本书提供的两个滤波器计算机辅助设计程序进行无源和有源低通滤波器设计，介绍了专业无源低通滤波器设计技术，例如使用预失真设计不等终端和补偿由于元件功耗的影响（低 Q ）。内容覆盖了全极点和椭圆函数型的各种有源低通滤波器结构，对他们工作频带内的零相移低通滤波器设计技术也加以介绍。这个技术特点是在许多伺服系统中要求有频移而不应产生相位移。手册也给出了一些新有源低通滤波器的有

源构架。和广义阻抗变换器 (GIC) 设计方法一起介绍了双向有源阻抗变换器, 以实现不同阻抗的负载匹配。

第 4 章讨论了有源和无源高通滤波器的实现方法, 演示了低通滤波器到高通滤波器的数学变换, 展示了利用各种变换技术实现更为实用的元器件参数选用方法。在高通滤波器设计实例中使用了广义阻抗变换器技术 (GIC), 同时也介绍了采用延迟线来设计恒延迟高通滤波器的独特设计方法。

第 5 章中介绍了带通滤波器, 各种无源滤波器的变换、近似和有关特性, 以确保即使在中心频率、通频带或阻抗水平的极端情况下可以得到实用的元件参数值。给出了一些有源带通滤波器的实现, 这些有源带通滤波器以前认为工作频率太高而呈现低灵敏度, 同时介绍了低通滤波器到带通滤波器的变换。介绍了 Q 乘法器的方法, 这时滤波器的带宽可以调节。也介绍了一些新的带通滤波器电路结构。

第 6 章介绍了带阻滤波器的设计技术, 涵盖了无源和有源带阻滤波器的内容。介绍了具有非常陡峭滤波特性的带阻滤波器设计。

第 7 章介绍了具有最佳时域特性网络的设计, 详细讨论了全通延迟和幅度均衡器。介绍了滤波器的延迟均衡, 介绍了 LC、有源延迟线和宽带 90° 相位移网络的设计方法, 介绍了使用重复元件设计延迟时间范围为数毫秒非常大延迟时间的低频 LC 延迟线设计拓扑, 同时介绍了有关元器件参数的参数计算公式, 这些内容在以前的有关书籍中没有介绍过。

第 8 章中介绍了 LC 滤波器的设计改进, 给出了利用特别的设计技术来控制元件参数值, 以获得实用元件参数值。展示了各种窄带变换方法。新设计方法说明了在现有的设计中添加额外的传输零点来提高滤波器阻带性能而对通带影响最小。幅度均衡器电路可以补偿由于不合理的 Q 值而带来的不利影响。

对成功的模拟电路设计而言仔细进行元器件选择是个很关键的设计环节。第 9 章对各类电感、电容、电阻和寄生效应的特性进行了详细的讨论。

第 10 章针对快速设计有源和无源滤波器给出了一些归一化的表格。除了标准的多项式类型, 针对独特的恒延迟切比雪夫低通滤波器阻带特性给出了有关表格。在购买本手册的同时, 可以根据本章的有关附录下载两个程序, 其中一个程序是基于 Nuhertz 技术的滤波器解决方案(www.nuhertz.com), 利用这个程序可以设计高达 10 阶的椭圆函数滤波器, 滤波器设计解决方案可以提供滤波器的传递函数、频率响应、群延迟、时域相应、极-零图和高达 10 阶的低通滤波器椭圆函数无源滤波器的电路工作原理图。同时也有一个可用 Spice 分析的网络表。第二个程序 ELI 1.0 可以用于高达约 15 个零点复杂性 (传输零点) 或高达 31 阶的奇数阶椭圆函数滤波器设计应用场合。

第 11 章介绍了开关电容滤波器, 介绍了基于开关电容滤波器技术的理论, 给出了利用标准功能模块集成电路的设计实例, 给出了通用开关电容滤波器的架构。介绍了新集成电路 (IC) 开关电容滤波器的选用指南。

第 12 章给出了有源和无源幅度均衡和延迟均衡, 给出了固定和可调的开关电容滤波器构建方法, 在音频图形均衡器中均衡器得到了广泛使用, 用于幅度和延迟失真校正。极-零概念就和均衡器有关。

第 13 章给出了电压反馈运算放大器的理论和分析, 并对非理想运算放大器的影响进行了分析。对正反馈和负反馈、环路增益和工作稳定性等方面进行了分析, 并且也对运算放大

器的开环和闭环响应的影响进行了分析,给出了确保滤波器电路工作稳定的实用方法,详细地给出了反馈计算公式。对决定滤波器工作稳定性的幅度和相位波特图进行了分析,实用运算放大器的参数,例如电压和电流失调/偏置、输入/输出阻抗、谐波失真、电压和电流噪声、共模参数和摆率等都给以了解释和详细说明,涵盖了采用单电源供电的功率放大器电路设计方法,电压反馈运算放大器的选用指南等内容。

第 14 章介绍了线性放大电路应用的有关内容,介绍了差分输入和差分输出放大器、桥式放大器、加权模拟加法和模拟减法和其他有关线性电路应用等内容。讨论了放大器的噪声源和噪声源对电路结构的影响。介绍了如自举升压和利用 T 型网络来降低电路电阻参数值的方法,也介绍了电流源-电压源和电压源-电流源变换器和 Howland 电流泵等内容。

第 15 章介绍了非线性电路、例如 AGC 放大器,1、2、4 象限乘法器,模拟驱动器,平方和平方根函数电路,峰值检测电路,取样和保持电路等内容。介绍了理想半波和全波整流电路和绝对值电路,也介绍了交流有效值-直流变换器,给出了对数和反对数放大器构建和有关选用指南等内容。

第 16 章介绍了通过正弦波变换为各种幅值波形的波形成形方法,例如微分电路、积分电路、比较器电路、窗口比较器电路、限幅器电路和时延电路等内容,也介绍了滞后的概念。

第 17 章介绍了例如正弦波信号、方波信号、三角波信号、相位移振荡电路和锯齿波产生电路、文氏桥式正弦波振荡电路、晶体振荡电路、弛张振荡器电路等有关内容,利用这些振荡电路可以产生各种信号波形。同时介绍了有关设计方程式,给出了确保电路稳定工作的有关考虑,介绍了得到广泛使用的 555 定时器电路和 555 定时器电路的有关应用。

第 18 章介绍了电流反馈放大器的特有工作特性,给出了电流反馈放大器和电压反馈放大器的选用实例,由于电流反馈放大器和传统电压反馈放大器的电路结构不同,许多电子工程师在使用电流反馈放大器时不是非常熟练,本章突破了这个障碍。本章给出了电流反馈模型,并将电流反馈放大器模型与电压反馈放大器模型进行了比较。讨论了反馈电阻选用的重要性,介绍了如何控制环路增益、带宽和电路工作稳定型等有关内容,介绍了电流反馈放大器的选用指南。

第 19 章主要介绍了大信号输出放大器,例如 D 类音频功率放大器和其他类型的功率放大器及线路驱动器等内容。对影响这些类型功率放大器的运算放大器参数进行了讨论,给出了针对给定应用场合如何选用元器件的标准,涵盖了扬声器分频网络的设计方法。给出了利用热阻概念进行功率放大器散热设计的有关计算实例,给出了散热器的选用实例,解释了利用运算放大器构建有源输出阻抗的方法,详细说明了他们的优点和缺点。

B. Williams

作者简介

作者 B. Williams 有超过 45 年的滤波器和模拟电路设计经验，著有 8 部关于滤波器和模拟电路设计的书，同时也是众多专利的持有人。Williams 先生是 IEEE 电路和系统学会（长岛）的前主席和 IEEE 奖的获奖者，是 2007 年“电子滤波器设计技术发展终身发展奖”领奖人，是 Telebyte 公司首席科学家，在 Telebyte 公司他参与了电信行业测试设备的设计。

目 录

第 1 章 现代网络理论介绍	1
1.1 极-零概念	1
1.2 利用多项式合成滤波器	5
1.2.1 通过扩展驱动点阻抗合成	5
1.2.2 不等终端的合成	7
1.2.3 等同系数合成	8
1.3 有源与无源滤波器	9
1.3.1 频率限制	9
1.3.2 尺寸要求	9
1.3.3 经济性和易于制造性	9
1.3.4 易于调整	9
参考文献	10
第 2 章 选择响应特性	11
2.1 频率特性归一化	11
2.1.1 频率和阻抗缩放比例	11
2.1.2 低通滤波器的归一化	14
2.1.3 高通滤波器的归一化	15
2.1.4 带通滤波器归一化	17
2.1.5 带阻归一化	22
2.2 瞬态响应	26
2.2.1 非均匀时间延迟的影响	26
2.2.2 网络的阶跃响应	29
2.2.3 冲激响应	30
2.2.4 瞬态工作特性的预测	31
2.3 巴特沃斯最大平坦振幅	36
2.4 切比雪夫响应	39
2.5 贝塞尔最大平坦延迟	48
2.6 线性相位与等纹波误差	50
2.7 过渡滤波器	54
2.8 同步调谐滤波器	57
2.9 椭圆函数滤波器	58
2.9.1 使用滤波器解决方案(书版)软件设计椭圆函数低通滤波器	62
2.9.2 使用 ELI 1.0 程序设计高达 31 阶奇数阶椭圆函数低通滤波器	63
2.10 切比雪夫止带的最大平坦延迟	63
2.11 帕普里斯最优“L”滤波器	64

参考文献	65
第3章 低通滤波器设计	66
3.1 低通滤波器	66
3.1.1 全极点滤波器	66
3.1.2 椭圆函数滤波器	67
3.1.3 损耗的影响	73
3.1.4 利用预失真设计	75
3.2 有源低通滤波器	78
3.2.1 全极点滤波器	79
3.2.2 VCVS 统一电容器结构	87
3.2.3 低灵敏 2 阶节电路	88
3.2.4 椭圆函数 VCVS 滤波器	89
3.2.5 可变状态低通滤波器	93
3.2.6 广义阻抗变换器	100
3.3 最小相位移滤波器	106
参考文献	107
第4章 高通滤波器设计	108
4.1 LC 高通滤波器	108
4.1.1 低通到高通的转换	108
4.1.2 T- π 电容变换	112
4.2 有源高通滤波器	113
4.2.1 低通到高通变换	113
4.2.2 全极点高通滤波器	113
4.2.3 椭圆函数高通滤波器	115
4.2.4 状态可变高通滤波器	119
4.2.5 采用 GIC 的高通滤波器	127
4.2.6 采用广义阻抗变换 (GIC) 的有源椭圆函数高通滤波器	128
4.2.7 恒延迟高通滤波器	130
参考文献	131
第5章 带通滤波器	132
5.1 LC 带通滤波器	132
5.1.1 宽带滤波器	132
5.1.2 窄带滤波器	134
5.1.3 并联谐振电路的设计	140
5.1.4 串联谐振电路的设计	145
5.1.5 同步调谐滤波器	146
5.1.6 窄带耦合谐振电路	147
5.1.7 预失真带通滤波器	152
5.1.8 椭圆函数带通滤波器	155

5.2 有源带通滤波器	160
5.2.1 宽带滤波器	161
5.2.2 低通极点和零点的带通变换	163
5.2.3 有源带通电路的灵敏度	167
5.2.4 全极点带通结构	168
5.2.5 椭圆函数带通滤波器	182
参考文献	193
第6章 带阻滤波器	194
6.1 LC带阻滤波器	194
6.1.1 带阻电路变换	194
6.1.2 全极点带阻滤波器	195
6.1.3 椭圆函数带阻滤波器	198
6.1.4 空网络	204
6.2 有源带阻滤波器	208
6.2.1 宽带有源带阻滤波器	209
6.2.2 低通极点的带阻变换	211
6.2.3 窄带有源带阻滤波器	214
6.2.4 有源空网络	221
参考文献	225
第7章 时域网络	226
7.1 全通传递函数	226
7.1.1 一阶全通传递函数	226
7.1.2 二阶全通传递函数	227
7.2 延迟均衡节电路	228
7.2.1 LC全通结构	228
7.2.2 有源全通结构	232
7.3 全通延迟线设计	236
7.3.1 低通到全通变换	236
7.3.2 LC延迟线	238
7.3.3 有源延迟线	240
7.4 滤波器的延迟均衡	241
7.4.1 一阶均衡器	243
7.4.2 二阶均衡器	245
7.5 宽带 90° 相位移网络	249
7.6 采用重复元件的无源延迟线设计	254
7.6.1 全通延迟线	254
7.6.2 镜像参数非对称延迟线	255
参考文献	256
第8章 LC滤波器设计的改进和阻性网络的使用	257

8.1	简介	257
8.2	抽头电感器	257
8.3	电路变换	260
8.3.1	诺顿电容变压器	260
8.3.2	窄带近视	262
8.4	有寄生电容的设计	264
8.5	不合理 Q 值的幅度均衡	266
8.6	节省线圈绕组的椭圆函数带通滤波器	269
8.7	滤波器调节方法	273
8.8	测试方法	274
8.8.1	插入损耗和频率响应	274
8.8.2	滤波器网络输入阻抗	275
8.8.3	时域工作特性	277
8.8.4	群延迟	277
8.8.5	电感 Q 值测量	279
8.9	不等阻抗的设计	280
8.9.1	指数抽头的阻抗标定	280
8.9.2	用于阻抗匹配的最小损耗接口	280
8.9.3	设计用于阻抗匹配的非对称阻性 T 和 π 衰减器	281
8.10	对称衰减器	283
8.10.1	对称 T 和 π 衰减器	283
8.10.2	桥 T 衰减器	284
8.11	功率分配器	284
8.11.1	电阻性功率分配器	284
8.11.2	魔 T 分配器	285
8.12	现有设计中引入传输零点	286
	参考文献	288
第 9 章	LC 和有源滤波器的元件选择	289
9.1	基本磁学概念回顾	289
9.1.1	测量单位	289
9.1.2	磁饱和和直流极化	290
9.1.3	电感损耗	290
9.1.4	空气间隙效应	291
9.2	磁性材料和电感的物理形状因子	291
9.2.1	磁性材料	292
9.2.2	磁性线圈结构	293
9.2.3	表面安装射频 (RF) 电感	294
9.3	电容器的选用	295
9.3.1	电介质性能	296

9.3.2 电容器的结构	297
9.3.3 用于滤波器的电容器选用	299
9.4 电阻	304
9.4.1 固定电阻	304
9.4.2 可变电阻	307
9.4.3 电阻的约翰逊(热)噪声	308
参考文献	309
第10章 归一化滤波器设计表	310
第11章 开关电容滤波器	350
11.1 简介	350
11.2 开关电容滤波器理论	350
11.2.1 开关电阻	350
11.2.2 作为一个功能电路的基本积分器	351
11.2.3 开关电容滤波器噪声的限制	352
11.3 通用开关电容二阶滤波器	352
11.3.1 工作模式	353
11.3.2 工作模式特点	356
11.3.3 采用 MF10 和 LMF100 的双通用二阶滤波器	357
11.4 开关电容滤波器的类型	360
11.4.1 通用型	360
11.4.2 采用微处理器的可编程通用开关电容滤波器	361
11.4.3 引脚可编程通用开关电容滤波器	361
11.4.4 专用开关电容滤波器	362
11.5 开关电容滤波器选用指南	362
参考文献	363
第12章 可调和固定延迟与幅度均衡器	364
12.1 均衡的需求	364
12.2 均衡工作过程	364
12.2.1 幅度均衡	364
12.2.2 延迟均衡	366
12.3 用于幅度和延迟均衡器的极-零概念	367
12.4 可调延迟和幅度均衡器电路	367
12.4.1 LC 延迟均衡器	367
12.4.2 LC 延迟和幅度均衡器	369
12.4.3 有源延迟和幅度均衡器	371
参考文献	375
第13章 电压反馈运算放大器	376
13.1 基本运算放大器理论回顾	376
13.1.1 理想放大器	376

13.1.2	反相放大器	377
13.1.3	同相放大器	378
13.1.4	差分输入放大器	379
13.1.5	差分输入和输出放大器电路	380
13.2	非理想放大器分析	380
13.2.1	同相放大器分析	380
13.2.2	反相放大器分析	381
13.2.3	稳定性	381
13.2.4	开环增益效应	383
13.3	掌握运算放大器技术指标	384
13.3.1	带宽和增益	384
13.3.2	相位和增益裕量	384
13.3.3	DC 偏移	384
13.3.4	摆率限制	385
13.3.5	建立时间	386
13.3.6	共模抑制比	386
13.3.7	输出电压摆动	386
13.3.8	噪声	386
13.3.9	总谐波失真 (THD)	387
13.4	电源供电考虑	388
13.5	运算放大器的选用	390
13.5.1	运算放大器的类型	390
13.5.2	运算放大器的封装	390
13.5.3	常用的放大器	390
13.6	在生产制造过程中的有关考虑	392
	参考文献	393
第 14 章	线性放大器应用	394
14.1	电阻性反馈网络	394
14.1.1	加和减信号	394
14.1.2	仪器用放大器	396
14.1.3	交流耦合放大器	397
14.1.4	用于高输入阻抗的电压跟随器自举电路	399
14.1.5	用于降低反相放大器反馈环路电阻值的 T 网络	399
14.1.6	用于高输入阻抗的自举反相放大器电路	400
14.2	电流-电压和电压-电流变换器	400
14.2.1	电流-电压变换器	400
14.2.2	电压-电流变换器 (电流源)	401
14.2.3	Howland 电流泵	403
14.2.4	电流型放大器	404

14.3 桥式放大器	405
参考文献	406
第 15 章 非线性电路	407
15.1 理想整流器与应用	407
15.1.1 半波精密整流电路	408
15.1.2 全波精密整流电路	409
15.1.3 峰值检波器	410
15.1.4 取样和保持电路	410
15.2 自动增益控制	412
15.3 对数和反对数电路	415
15.4 乘法器	417
15.4.1 吉尔伯特单元	417
15.4.2 乘法器参数	417
15.4.3 乘法器的数学功能	418
15.5 调制器	419
参考文献	420
第 16 章 波形成形	421
16.1 积分器和微分器	421
16.1.1 理想积分器	421
16.1.2 一种实用积分器	422
16.1.3 微分器	423
16.2 比较器	424
16.2.1 基本比较器	424
16.2.2 窗口比较器	426
16.2.3 回滞	426
16.2.4 限幅器	428
16.2.5 采用比较器的延时电路	429
参考文献	431
第 17 章 波形产生	432
17.1 正弦波信号发生器	432
17.1.1 相移振荡器	432
17.1.2 维恩 (Wien) 桥式振荡器	435
17.1.3 多反馈带通振荡器	436
17.2 非正弦信号波形的产生	436
17.2.1 方波张弛振荡器	436
17.2.2 三角波张弛振荡器	437
17.2.3 555 定时器	438
17.2.4 六反相器 RC 振荡器	442
参考文献	447

第 18 章 电流反馈放大器	448
18.1 电流反馈放大器简介	448
18.2 电流反馈放大器的分析和应用	449
18.2.1 电流反馈放大器模型	449
18.2.2 稳定性	451
18.2.3 电流反馈运算放大器的摆率	452
18.2.4 采用电流反馈运算放大器实现电压反馈放大器的设计	453
参考文献	454
第 19 章 大信号放大器	455
19.1 D 类音频放大器	455
19.1.1 半桥电路拓扑	455
19.1.2 全桥拓扑	457
19.1.3 没有输出滤波器的 D 类工作	457
19.1.4 D 类 LC 滤波器设计	458
19.2 分频网络	461
19.3 变压器耦合线路驱动器结构	463
19.3.1 传统变压器耦合线路驱动器	463
19.3.2 差分变压器耦合线路驱动器	463
19.3.3 有源输出阻抗线路驱动器	464
19.4 热管理	466
参考文献	469
附录 A 软件下载	470
A.1 软件下载	470
A.2 安装和使用“滤波器解决方案”(书版)	470
A.3 安装和使用“ELI 1.0”程序,用于高达 31 阶的奇数阶椭圆函数低 通滤波器设计	471
A.4 FLTRFORM.XLS 公式电子表格	471

20 世纪 20 年代早期, 奥托·佐贝尔 (Otto Zobel) 和乔治·坎贝尔 (George Campbell) 发明了一种滤波器设计方法, 称为图像参数设计。这种设计方法使用具有相关响应工作特性的各种构件功能电路级联, 提供了一个相对简单的方法来设计滤波器。最终设计要求终端阻抗 (源端和负载端) 的镜像阻抗, 这个阻抗等于看进去网络的阻抗。但是, 看进网络的输入和输出阻抗由于网络内含有电感和电容, 所以网络的输入和输出阻抗是与频率有关的复杂函数, 而不是简单的电阻性阻抗。实用中, 滤波器工作于固定的输入和输出阻抗值, 所以要用一个复杂的阻抗来确定一个网络就不现实。本书主要讨论利用现代网络理论, 也被称为插入损耗的方法。这种方法利用我们熟悉的多项式理论来近似滤波器工作特性, 利用这些多项式可以对工作于预定输入和输出阻抗的滤波器合成。在本章给出了几个设计实例。

图 1-1 所示为常用滤波器实例。滤波器电路中含有电感、电容、电阻, 可能还含有运算放大器和晶体管等有源元件。滤波器输入输出端可以用电压源 E_s 、源电阻 R_s 和负载电阻 R_L 表示。

通过电路分析可以写出图 1-1 所示网络的电路方程式。利用现代网络理论可以求解这些方程式, 从而决定网络有关元件参数, 并从某些方面优化网络性能。

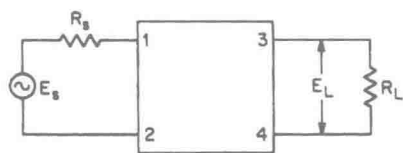


图 1-1 常用滤波器

1.1 极-零概念

图 1-1 所示的常用滤波器频率响应可以用两个含 s 的复数多项式比来决定, 其中 $s = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω 表示角频率, $\omega = 2\pi f$)。这样可以用下面的传递函数表示滤波器的频率响应:

$$T(s) = \frac{E_L}{E_s} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1-1)$$

图 1-2 所示为全极点 $n=3$ 低通滤波器的电路工作原理图和对应的频率响应特性曲线。

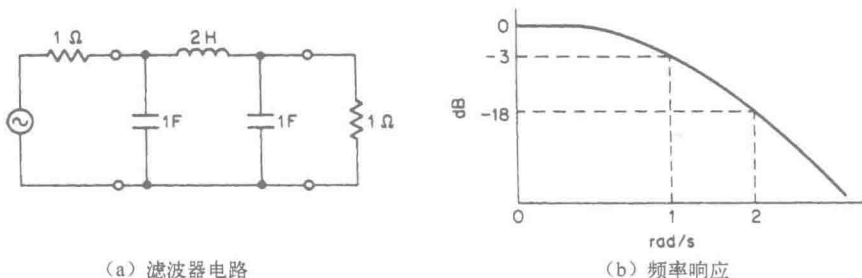


图 1-2 全极点 $n=3$ 低通滤波器