

电子滤波器设计

Arthur B. Williams 著
〔美〕 Fred J. Taylor
宁彦卿 姚金科 译
王志华 审校



科学出版社
www.sciencep.com



配套光盘

号 103-5007-3304 字图

电子滤波器设计

〔美〕 Arthur B. Williams Fred J. Taylor 著
宁彦卿 姚金科 译
王志华 审校



科学出版社

北京

图字:01-2007-3304 号

内 容 简 介

本书作为一本全面介绍电子滤波器设计的经典书籍,内容包括如何选择滤波器的响应曲线,低通、高通、带通及带阻滤波器的设计,LC 滤波器的设计,数字滤波器设计,有限冲激响应滤波器设计,无限冲激响应滤波器设计,多速率数字滤波器设计,开关电容滤波器设计,微波滤波器设计,等等。本书的特点在于内容系统全面,实用性强。

本书适合作为高等院校信号处理、信息通信等相关专业师生的参考用书,也可作为相关领域的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子滤波器设计/(美)Arthur B. Williams, Fred J. Taylor 著;宁彦卿,姚金科译;王志华审校. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022489-7

I. 电… II. ①A…②F…③宁…④姚…⑤王… III. 电子电路-滤波器-设计 IV. TN713.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 097071 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 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

*

2008 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 9 月第一次印刷 印张:36 1/2

印数:1—4 000 字数:838 000

定 价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

Arthur B. Williams, Fred J. Taylor: Electronic Filter Design Handbook

ISBN: 0-07-147171-5

Copyright © 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by Science Press and McGraw-Hill Education(Asia)Co.

本书中文简体版由科学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版,未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

著 者 简 介

Arthur B. Williams 是宽带测试仪器和数据通信产品的研究机构和制造商——Telebyte 公司的首席科学家。先前,他是 Tellabs 公司的资深工程师和管理工程师,拥有 5 本专著和 11 项专利,并为工业界提供咨询。现为 IEEE 电路与系统在 Long Island 分会的主席。

Fred J. Taylor 是 Athena 集团的创建人和董事会主席。该集团是一家 DSP 半导体硅知识产权公司 and 教育技术发明公司。他也是 Florida 大学电子与计算机工程、计算机与信息工程专业的教授,著有 10 本教科书,拥有 3 项专利,同时还为财富 500 强公司和政府机构做咨询服务。

译者序

滤波器可以有效地抑制带外噪声,均衡所使用频带的幅度、相位特性。因此,它在通信、控制及信号处理等领域都发挥着重要作用,被广泛地应用于通信、数据采集、控制等各类电子系统中。

在模拟电子线路为主的时代,要求滤波器的设计工程师不但要具备相当的工程经验,还要具备一定的数学及工程知识,以掌握复杂的逼近理论及繁琐的计算。随着电子技术,特别是微电子技术的发展,传统的手工计算被计算机代替,以往的模拟信号处理方式也被数字信号处理所代替。这些变革给滤波器的设计理论和设计方法带来了深刻的变化。对于模拟滤波器,设计者不再需要关注设计的细节,而要用更多的精力关注应用本身的需求、元器件的可实现性。而对数字滤波器,设计的自动化程度更高。

与本书的第一版(1966年)相比,《电子滤波器设计手册(第4版)》(*the Electronic Filter Design Handbook*, Fourth Edition)不但介绍了滤波器的基本理论、传统的设计方法,还向读者阐述了数字滤波器的发展、最新的EDA软件使用及部分元器件的特性。书中的设计实例不但为所介绍的理论公式提供了应用解释,也与实际的应用比较贴近。这得益于作者在工业和学术界的经历。作者 Arthur B. Williams 目前是 Telebyte 公司的首席科学家。该公司是宽带测试仪器和数据通信产品的研究机构和制造商。他曾在 Tel-labs 公司做过资深工程师和管理工程师。在学术方面,Williams 现为 IEEE 电路与系统在 Long Island 分会的主席,并拥有多本专著和多项专利。Fred J. Taylor 先生是 Florida 大学电子与计算机工程、计算机与信息工程专业的教授,著有多部教科书,并持有多项发明专利。Taylor 先生还是一家 DSP 半导体硅知识产权和教育技术发明公司——Athena 集团的创建人,并担任董事会主席。同时,他还为财富 500 强公司和政府机构做咨询服务。

为了更好地帮助大家借鉴此书,学习电子滤波器的设计和应用,促进我国电子产品的研发,我们翻译了此书。其中,宁彦卿翻译了引言、第1章~第11章及附录,姚金科翻译了第12章~第18章。全书由王志华教授审校。

鉴于译者水平所限,对翻译中出现的不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

2008年5月于清华园

前言

1981年,《电子滤波器设计手册》第1版出版,本书是第4版。1988年的第2版增加了关于数字滤波器的5章内容,并在1995年的第3版中更新。而本版则增加了模拟和数字滤波器的新内容,数字滤波器的相关章节还包含丰富的 Matlab 实例。本书还附有一张光盘,其中包含了若干不需要烦琐数学计算就能快速设计模拟滤波器的程序。

在1981年本书第1版出版之前,LC和有源滤波器的设计工作都由专家来完成。《电子滤波器设计手册》用实践的方式介绍这些滤波器的设计,提供了大量数据表格,以便使没有经验的工程师也可以设计无源或者有源滤波器。这一思想体系被扩展到1988年第2版《电子滤波器设计》中的数字滤波器章节。当时,很多书中都首次以便捷可行的方式介绍了3类滤波器的设计方法。1995年,本书的第3版中进一步更新了若干新的技术和设计方法。在本书的第4版中,包含了一些新的章节,介绍在模拟滤波器设计中使用的材料,而且还更新了包括表贴技术在内的可用元器件。一些功能强大的设计软件可以在本书所附的光盘上找到。以前设计归一化椭圆函数低通滤波器所需的数据表格被功能强大的 Nuhertz Technologies® 软件 Filter Solutions 代替,不需要复杂计算,就可以直接得到滤波器的设计结果和原理图。光盘中还提供了包含某些独立章节计算公式的 Excel 电子制表软件,过去的烦琐计算已不再需要,直接输入数据就可以得到结果。

有关数字滤波器的章节被全部修订,增加了大量的新内容。新版本中包含了《电子滤波器设计手册》以前版本的所有主题和研究内容,并增加了现代定系数数字滤波器设计的内容。本书可使读者更好地理解数字滤波器的概念,也能使读者具有多种应用领域内数字滤波器的设计能力。本书介绍了10年前使用的在当今仍然很流行的传统数字滤波器,也注意到非传统和多采样率滤波器的重要性日益凸现,强调了数字滤波器硬件或软件在实现相关的滤波器技术时的协同问题。本书第4版的作者注意到当今的工程师将会逐渐地利用计算机软件实现滤波器的设计和分析工作。因此在所附光盘中利用广泛使用的 Matlab 软件包,设计了大量的实例供读者参考。

第1章介绍了现代网络理论的概念,并讨论了有源滤波器 and 无源滤波器的关系。

第2章介绍了标准滤波器响应类型的数学性质,包括巴特沃兹(Butterworth)类型、切比雪夫(Chebyshev)类型、贝塞尔(Bessel)类型、等误差波纹(equiripple error)线性相位类型、瞬态类型、同步调谐类型和具有切比雪夫阻带衰减的恒延迟类型,还提供了这些标准多项式传递函数详尽的频域和时域参数归一化曲线。本章还讨论了高效的椭圆函数滤波器响应,其重要性在其他章节也有所体现。此外,还介绍了所附光盘上的两个程序:Filter Solutions(本书版本)和 ELI 1.0(设计椭圆函数滤波器)。

第3章包含了利用归一化表格设计无源和有源低通滤波器的方法。重点介绍了无源低通滤波器的设计方法,例如,非相等终端阻抗设计及元件损耗(低 Q)影响的补偿,并涵盖了各种不同的全极点型和椭圆函数型有源低通滤波器结构。

第4章介绍了无源和有源高通滤波器的实现方法。

第5章讨论了带通滤波器的设计。介绍了各种无源滤波器的变换、逼近和等效,确

iv 保即使在中心频率、带宽或阻抗的极端情况下,也可以获得切合实际的元件值。并提供了一些过去认为频率太高而不适于有源滤波器设计的低灵敏度带通有源滤波器的实现方法。

第6章介绍了无源和有源带阻滤波器的实现技术。

第7章介绍了最好在时域内描述网络性能的设计。详细讨论了全通延迟网络和幅度补偿器。说明了LC滤波器、有源延迟线和宽带 90° 相移网络的设计方法。

第8章介绍了LC滤波器设计的改进,包括获得切合实际元件值的特殊技术,还包括测试技术及各种衰减和阻抗匹配的阻性衰减器的设计。本章还解释了功率分配器的理论和设计方法。LC滤波器的成功设计很大程度上依赖恰当地选择和制作电感。

第9章介绍了磁性元件的设计。详细解释了在使用频段上获得最佳性能的全部过程,包括磁性材料类型及形状的选择、绕线方法等,还包括新型磁性材料的形状,并提供了MPP(铁镍钼)环形磁芯、铁氧体方形(RM)、壶形磁芯及表面贴装的射频电感的Q值曲线。

第10章讨论了LC和有源滤波器的元件选择。包括电容器特性及固定和可变的电阻器类型,并讨论了Johnson(热)噪声。从理论和实践两个角度复习了运算放大器理论。对于给定的滤波器结构和指标规定的频率范围,所需的运算放大器可以在所提供的扩展及更新后的元件选择表中迅速地找到合适的元件。本章还强调了表面贴装(SMD)元件及利用该技术在制造时应有的考虑。

第11章提供可快速设计无源和有源滤波器的归一化表格。除了标准的多项式类型外,还提供了具有切比雪夫阻带衰减的恒延迟类型归一化低通滤波器的相关表格。

第12章介绍了数字滤波器。首先讨论了模拟与数字系统之间的差异,之后描述了数字信号的表示法以及设计策略。采样定理被确立为理解和实现数字滤波器的核心,同时讨论了量化采样模式及混叠等问题。还给出了数据转换的原则和机制(从模拟域到数字域及从数字域到模拟域),最后讨论了相关的计算机算法和谱分析法。

第13章讨论了有限冲激响应(FIR)滤波器。该章首先给出了FIR滤波器的一般特征,包括稳定性。详细讨论了线性和非线性相位的FIR,给出了基于窗函数法、最小二乘法及等纹波法的FIR设计流程,同时将这些方法的应用扩展到Hilbert FIR及FIR微分器的设计中。此章描述并解释了一些FIR的特殊形式,如梳状、滑动平均、L-band、镜像、互补以及频率抽样等。FIR的设计策略通过使用Matlab软件得以增强。本章还详细讨论了FIR的结构,包括直接形式、转置形式、对称形式、格形、分布形式以及规范数字形式等。该章最后讨论了有限字长效应。

第14章讨论了无限冲激响应(IIR)滤波器。首先描述了IIR滤波器的一般特性,包括稳定性。之后给出了典型模拟滤波器:巴特沃兹(Butterworth)、一类和二类切比雪夫(Chebyshev)及椭圆滤波器的概述,并以此定义了典型数字IIR滤波器。用冲激响应不变和双线性 z 变换这两个方法,分析了从模拟滤波器到数字IIR滤波器的转换。同时还给出了利用输入-输出响应观测值进行IIR设计的自回归模拟。利用Matlab示例了IIR滤波器的设计过程。在状态变量分析的框架下分析IIR滤波器,并分别在直接I型和II型、级联型、并联型、正规型以及格形等结构中解释了这种分析方法。之后利用Matlab再次强调了状态量模型。该章最后给出了为保证定点IIR的成功实现所需的分析流程,以及如何使运行时有有限字长(定点)效应最小化的方法。

第15章讨论了多速率数字滤波器。首先给出了多速率系统的一般特性及其应用。

之后讨论了抽取和插值过程,以及相应的采样率变换。接下来利用多相结构描述了多速率系统,并将这种结构扩展到滤波器组及 DFT 滤波器组的设计中。该章最后讨论高抽取率滤波器及频率遮蔽滤波器的设计。

第 16 章讨论实现数字滤波器所用的技术。首先概述了可用的几类技术,包括通用 μ ps、DSP、 μ ps、专用集成电路(ASIC)以及现场可编程门阵列(FPGA)。考察了不同处理器的构成。分析并比较了处理器结构的不同及其对设计策略的影响。讨论了模数转换(ADC)结构,并据此对转换器结构进行了分类和比较。之后讨论并分析了与软件相关的问题及其适用的环境。该章最后给出了一个基于德州仪器公司的 DSP μ p 处理器结构实现滤波器的实例。

第 17 章讨论了开关电容滤波器。给出了该技术的支撑理论,同时给出了一些基于标准模块 IC 的设计示例。其中包含了标准构建模块的概述和便于使用的选择指南,并介绍了随书光盘中包含的设计工具 FilterCAD。利用这个工具(由凌特公司提供)能够通过一组输入参数快速设计出开关电容滤波器,该工具将给出电路原理图及预测的频率响应和时域响应。

第 18 章介绍了微波滤波器。讨论了 Kuroda 恒等式和 Richards 变换,并说明了几个微波滤波器的设计示例。

附录回顾了 DSP 的数学基础。首先详细讨论了 z 变换和 z 逆变换。之后利用 Matlab 来研究这些变换。该章最后讨论了离散傅里叶变换(DFT)。

在此作者要对 Telebyte 公司的 Leo Moodenbaugh 及 Florida 大学的 Michael Christensen 提供的帮助表示感谢。

Arthur B. Williams

Fred J. Taylor

目 录

第1章 现代网络理论导论	1
1.1 引言	1
参考文献	6
第2章 选择响应曲线	7
2.1 频率响应的归一化	7
2.2 瞬态响应	20
2.3 巴特沃兹最平坦幅度	30
2.4 切比雪夫响应	33
2.5 贝塞尔最平延迟	45
2.6 等波纹误差线性相位类型	48
2.7 瞬态滤波器	52
2.8 同步调谐滤波器	57
2.9 椭圆函数滤波器	59
2.10 具有切比雪夫阻带特性的最平坦延迟	64
参考文献	65
第3章 低通滤波器设计	66
3.1 LC低通滤波器	66
3.2 有源低通滤波器	76
参考文献	100
第4章 高通滤波器设计	101
4.1 LC高通滤波器	101
4.2 有源高通滤波器	105
参考文献	120
第5章 带通滤波器	121
5.1 LC带通滤波器	121
5.2 有源带通滤波器	145
参考文献	172
第6章 带阻滤波器	173
6.1 LC带阻滤波器	173

6.2	有源带阻滤波器	186
	参考文献	202
第7章 时域网络		
7.1	全通传递函数	203
7.2	延迟均衡节	205
7.3	延迟线的设计	212
7.4	滤波器的延迟均衡	217
7.5	宽带 90°相移网络	222
7.6	可调延迟和幅度均衡器	228
	参考文献	236
第8章 LC 滤波器设计的改进		
8.1	引言	237
8.2	抽头电感	237
8.3	电路变换	239
8.4	考虑寄生电容时的设计	243
8.5	Q 值不足时的幅度均衡	245
8.6	节省线圈的椭圆函数带通滤波器	248
8.7	滤波器的调谐方法	251
8.8	测量方法	252
8.9	终端阻抗不等设计	257
8.10	对称衰减器	260
8.11	功率分配器	262
	参考文献	264
第9章 LC 滤波器中电感的设计和选择		
9.1	磁路设计的基本原理	265
9.2	MPP 环形线圈	269
9.3	铁氧体壶形芯架	276
9.4	高频线圈的设计	281
	参考文献	288
第10章 LC 和有源滤波器中元件的选择		
10.1	电容器的选择	290
10.2	电阻器	298
10.3	运算放大器	303
10.4	一般制造考虑	312
	参考文献	313

第11章 归一化滤波器设计表	314
第12章 数字滤波器	365
12.1 信号处理	365
12.2 数字信号处理(DSP)	365
12.3 数字滤波器与模拟滤波器的关系	366
12.4 信号的表示	367
12.5 数字信号的表示法	367
12.6 采样定理	370
12.7 信号重建	371
12.8 实际的插值器	371
12.9 采样模式	372
12.10 混叠	372
12.11 数据转换	374
12.12 有限字长效应	375
12.13 信号与系统的数学表达	376
12.14 频谱表示法	377
参考文献	379
第13章 有限冲激响应滤波器	380
13.1 数字滤波器	380
13.2 FIR 数字滤波器	380
13.3 稳定性	381
13.4 线性相位行为	383
13.5 非线性相位行为	384
13.6 最小相位行为	384
13.7 FIR 设计方法	385
13.8 窗函数设计法	385
13.9 非矩形窗设计方法	387
13.10 最小二乘法 FIR 设计	389
13.11 等纹波 FIR 设计	391
13.12 等纹波 Hilbert FIR 设计	394
13.13 等纹波 FIR 微分器设计	395
13.14 特殊 FIR 数字滤波器	395
13.15 无乘法器的 FIR 滤波器	395
13.16 L-band FIR 滤波器	396
13.17 镜像和互补 FIR 滤波器	398
13.18 频率抽样 FIR 滤波器	399
13.19 Savitzky-Golay FIR 滤波器	402
13.20 升余弦类 FIR 滤波器	403

X	13.21	Matlab 对 FIR 的支持	404
11E	13.22	FIR 结构	407
22E	13.23	直接形式 FIR	407
22E	13.24	转置形式 FIR	408
22E	13.25	对称形式 FIR	408
22E	13.26	格形 FIR	409
22E	13.27	分布算法	411
22E	13.28	规范符号字(CSD)	414
22E	13.29	有限字长效应	415
22E	13.30	系数舍入	415
22E	13.31	算法误差	416
22E	13.32	缩 放	417
22E	13.33	多 MAC 结构	417
22E		参考文献	419
	第 14 章	无限冲激响应滤波器	420
22E	14.1	引 言	420
22E	14.2	典型模拟滤波器	421
22E	14.3	利用 Matlab 设计模拟滤波器	423
22E	14.4	冲激不变 IIR	424
22E	14.5	双线性 z 变换 IIR	426
22E	14.6	Matlab 对典型 IIR 的支持	430
22E	14.7	其他 IIR 模型	432
22E	14.8	FIR 和 IIR 滤波器的比较	433
22E	14.9	状态变量滤波器模型	434
22E	14.10	结 构	436
22E	14.11	直接 II 型结构	437
22E	14.12	Matlab 对直接 II 型结构的支持	439
22E	14.13	级联结构	440
22E	14.14	Matlab 对级联结构的支持	441
22E	14.15	并联结构	443
22E	14.16	格形/梯形结构	444
22E	14.17	Matlab 对梯形/格形结构的支持	446
22E	14.18	正规结构	447
22E	14.19	稳定性	448
22E	14.20	有限字长效应	449
22E	14.21	溢出算法	450
22E	14.22	寄存器溢出	450
22E	14.23	算法误差	453
22E	14.24	系数舍入误差	457

14.25	缩 放	458
14.26	零输入极限环振荡	459
	参考文献	460

第15章 多速率数字滤波器

15.1	多速率信号处理简介	461
15.2	抽 取	462
15.3	插 值	465
15.4	采样率转换	467
15.5	多相表示	468
15.6	滤波器组	472
15.7	DFT 滤波器组	476
15.8	级联积分器梳状(CIC)滤波器	478
15.9	频率遮蔽滤波器	479
15.10	Matlab 对多速率的支持	482
	参考文献	485

第16章 数字滤波器技术

16.1	信号处理简介	486
16.2	处理器结构	487
16.3	通用微处理器	488
16.4	DSP 处理器	489
16.5	DSP 寻址模式	491
16.6	循环缓冲	491
16.7	DSP 处理器的特征	492
16.8	DSP 处理器的并行性	493
16.9	定点与浮点的比较	493
16.10	DSP 测试基准	494
16.11	ADC/DAC 操作	494
16.12	ADC 衡量标准	499
16.13	ADC 的工艺问题	500
16.14	ADC 的应用	501
16.15	ADC 增强	503
16.16	DAC 技术	503
16.17	DSP 软件	504
16.18	数字滤波器的实现	510
	参考文献	515

第17章 开关电容滤波器

17.1	引 言	517
------	-----	-----

xii	17.2 开关电容滤波器理论	517
524	17.3 通用开关电容二阶滤波器	519
524	17.4 开关电容滤波器的类型	525
524	17.5 软件 FilterCAD 3.0	527
524	17.6 开关电容滤波器选择指南	527
524	参考文献	529
524	第18章 微波滤波器	530
524	18.1 微波滤波器的实现	530
524	18.2 微带和带状传输线	530
524	18.3 Richards 变换	531
524	18.4 Kuroda 恒等式	533
524	18.5 带通滤波器	536
524	18.6 使用印制电路板走线的其他设计方法	537
524	参考文献	538
524	第19章 附 录	539
524	19.1 离散系统数学基础	539
524	19.2 软件清单	562
524	参考文献	564
524	通用微处理器	16.3
524	DSP 处理器	16.4
524	DSP 寻址方式	16.5
524	前馈补偿	16.6
524	DSP 处理器的特征	16.7
524	DSP 处理器的并行性	16.8
524	定点与浮点的比较	16.9
524	DSP 测试基准	16.10
524	ADC/DAC 操作	16.11
524	ADC 测量标准	16.12
524	ADC 的工艺问题	16.13
524	ADC 的应用	16.14
524	ADC 增益	16.15
524	DAC 技术	16.16
524	DSP 软件	16.17
524	数字滤波器	16.18
524	参考文献	16.19
524	第17章 开关电容滤波器	517

第 1 章

现代网络理论导论

1.1 引言

广义的滤波器可以用图 1.1 表示。滤波器方框内包含电感、电容、电阻及其他可能的有源元件,如运算放大器和晶体管。图中的端口分别连接内阻 R_s 的电压源 E_s 和负载电阻 R_L 。

根据电路分析技术能够列出如图 1.1 所示的网络的电路方程式。用现代网络理论解出这些方程式,就可以确定对某些准则具有最佳性能的网络元件值。

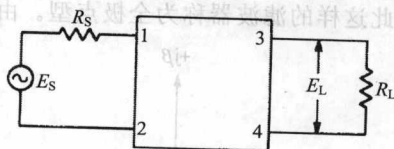


图 1.1 广义滤波器框图

1.1.1 零-极点概念

广义滤波器的频率响应可以用两个 s 的多项式之比表示(这里, $s = j\omega$; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$ 是角频率,单位是 rad/s),也被叫做传递函数,其数学表示式可写为

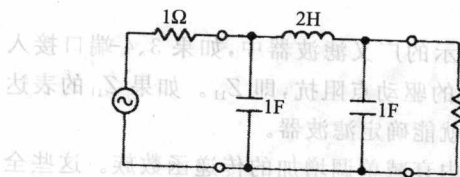
$$T(s) = \frac{E_L}{E_s} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1.1)$$

分母多项式 $D(s)$ 的根称为极点,分子多项式 $N(s)$ 的根称为零点。

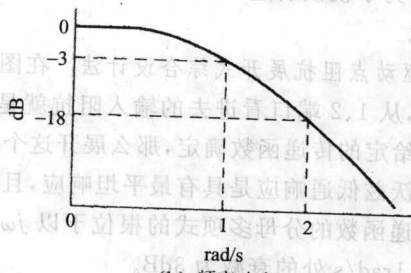
推导网络传递函数的过程相当冗长乏味,已超出了本书的范围。下面介绍一个比较简单的传递函数的计算和表示方法。

分析图 1.2(a)所示的低通滤波器,可得下面的传递函数:

$$T(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1} \quad (1.2)$$



(a) 滤波器电路



(b) 频率响应

图 1.2 一个 3 阶全极点型低通滤波器

用 $j\omega$ 代替 s , 然后在不同频点上计算式(1.2)的值。结果可用 $T(j\omega)$ 的模值和相对于直流衰减的分贝值表示(见表 1.1)。

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 - 2\omega^2 + j(2\omega - \omega^3)} \quad (1.3)$$

表 1.1

ω	$ T(j\omega) $	$20\log T(j\omega) $
0	1	0dB
1	0.707	-3dB
2	0.124	-18dB
3	0.037	-29dB
4	0.0156	-36dB

频率响应曲线如图 1.2(b)所示。

对式(1.2)的分析表明:传递函数的分母多项式有 3 个根(极点),分子多项式没有根。因此这样的滤波器称为全极点型。由于分母是一个 3 次多项式,所以也可以说该滤波器是 3 阶滤波器。3 个极点分别为 $s = -1, s = -0.500 + j0.866$ 和 $s = -0.500 - j0.866$ 。

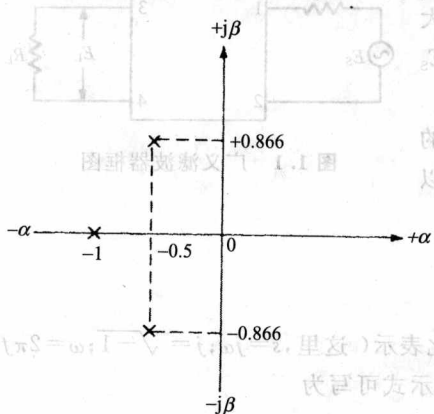


图 1.3 式(1.2)根的复平面表示

这些复数能够表示为复平面上的符号,横坐标为 α ,表示根的实部;纵坐标为 β ,表示根的虚部。每个极点都用符号“ $\times$ ”表示,零点则表示为“0”。图 1.3 是式(1.2)根的复平面表示法。

为了实现滤波器的设计,要求其传递函数的极点和零点的位置满足一定的条件。除了实轴上的极点和零点可以单个出现以外,其他位置的极点和零点都必须共轭成对出现。极点还必须限定在左半平面(即极点实轴坐标必须为负),零点则可以出现在任何一个半平面。

1.1.2 基于多项式的滤波器综合设计

现代网络理论已得到一系列对应特定指标需求的最优化标准传递函数族。综合设计就是通过这些传递函数得出电路元件参数的过程。第 11 章给出了大量的传递函数表及相应的元件值,读者不需要了解综合设计的过程。同时,所附光盘上的计算机程序也简化了设计过程。然而,为了使读者进一步了解如何确定这些数值,我们现在还要讨论几个滤波器综合设计的方法。

(1) 驱动点阻抗展开式综合设计法 在图 1.1 所示的广义滤波器中,如果 3,4 端口接入终端阻抗,从 1,2 端口看进去的输入阻抗就是该网络的驱动点阻抗,即 Z_{11} 。如果 Z_{11} 的表达式能够由给定的传递函数确定,那么展开这个表达式就能确定滤波器。

巴特沃兹低通响应是具有最平坦响应,且在阻带内衰减单调增加的传递函数族。这些全极点型传递函数的分母多项式的根位于以 $j\omega$ 轴原点为圆心、半径为 1 的单位圆上。这类传递函数在 1rad/s 处的衰减为 3dB。

传递函数式(1.2)满足上述条件。显然,在图 1.3 中,如果以 1 为半径,以原点为圆心做圆,将与实根和两个复根相交。

如果图 1.1 所示的广义滤波器中的 R_0 被指定为 1Ω ,则驱动点阻抗表达式可以利用巴特

沃兹传递函数项表示为:

$$Z_{11} = \frac{D(s) - s^n}{D(s) + s^n} \quad (1.4)$$

式中, $D(s)$ 是传递函数的分母多项式; n 是多项式的阶数。

$D(s)$ 代入式(1.4)后, Z_{11} 就可用连分式展开。该展开过程包括相除和颠倒分子分母多项式。最后结果包含一系列的项, 每一项分别代表一个电感和一个电容, 最后接一个电阻。用下面的例子说明此过程。

【例 1.1】 用连分式展开方法综合设计 3 阶巴特沃兹低通滤波器。

要求 具有 3 阶巴特沃兹响应的低通 LC 滤波器。

解 ① 用巴特沃兹传递函数:

$$T(s) = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$$

② 将 $D(s) = s^3 + 2s^2 + 2s + 1$ 和 $s^n = s^3$ 代入式(1.4), 可得:

$$Z_{11} = \frac{2s^2 + 2s + 1}{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}$$

③ 将 Z_{11} 表示为分母具有较高次多项式与较低次多项式之比的形式:

$$Z_{11} = \frac{2s^3 + 2s^2 + 2s + 1}{2s^2 + 2s + 1}$$

④ 将分母相除并颠倒余式的分子分母:

$$Z_{11} = \frac{1}{s + \frac{1}{2s^2 + 2s + 1}}$$

⑤ 进一步将多项式相除, 可得最后的表达式:

$$Z_{11} = \frac{1}{s + \frac{1}{2s + \frac{1}{s+1}}} \quad (1.5)$$

图 1.4 所示电路结构由交替的串联和并联支路组成, 称为梯形网络。其输入阻抗可以表示为下面的连分式:

$$Z_{11} = \frac{1}{Y_1 + \frac{1}{Z_2 + \frac{1}{Y_3 + L \frac{1}{Z_{n-1} + \frac{1}{Y_n}}}}} \quad (1.6)$$

全极点的低通梯形网络中除了最后一个电阻支路 $Y_n = sC + 1/R_L$ 外, $Y = sC, Z = sL$ 。

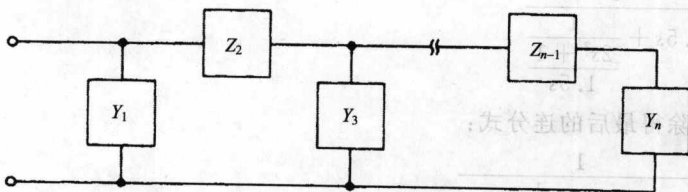


图 1.4 梯形网络