

时域和频域中的滤波



【美】 H. J. 布林契柯夫
A. I. 兹维列夫

著

颜绍书 余士本

译

73.4256
152

时域和频域中的滤波

(美) H·J·布林契柯夫 A·I·兹维列夫 著
 颜绍书 余士本 译

人民邮电出版社出版

2-158/24 d
Filtering in the Time and Frequency Domains

Herman J. Blinchikoff & Anatol I. Zverev

1976

John Wiley & Sons, Inc

内 容 简 介

本书对时域和频域滤波问题作了系统而又全面的介绍,既有理论分析又有实用的设计方法和图表,文字简明易懂,是一本实用的工程读物。全书共九章,时域分析,频域分析,线性系统响应,频率变换,全通函数,有限 Q 元件和预测,最优线性滤波,时域运算,数字滤波器。各章列有参考文献,习题和习题答案。

主要读者对象:通信、雷达等专业的科技人员,大专院校师生。

时域和频域中的滤波

[美]H. J. 布林契柯夫 A. I. 兹维列夫 著

颜绍书 余士本 译

责任编辑:李振刚

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 850×1168 1/32

1987年7月第 一 版

印张: 20 24/32 页数: 332

1987年7月河北第一次印刷

字数: 547 千字

印数: 1-2,000 册

统一书号: 15045·总3303一有5489

定价: 5.05 元

译 者 序

随着科学技术的发展，滤波器的应用日益广泛，“滤波”的概念增加了新的内容，滤波器的分析和设计方法也有很大扩展。例如时域的分析 and 设计在脉冲系统中愈来愈重要；噪声环境下，信号的过滤也是现代通信中的重要课题。该书对这些内容作了较全面而系统的介绍，例如书中用了一章介绍匹配滤波器的原理和实现，用了两章介绍时域的分析 and 设计，对数字滤波器也作了专章介绍。该书的另一特点是理论与实际结合较好，对滤波领域工程中一些常见的问题和概念有详尽的分析和明确的结论，例如各种响应相互间的制约关系，时延的概念和定义以及给定响应在时域和频域中实现的可能性等。该书内容丰富，取材合适，在一定程度上反映了现代滤波理论的发展情况。该书在内容处理上注意了时域和频域之间的联系与对比，有利于已熟悉频域滤波的读者迅速掌握滤波课题的全貌；在行文上简明扼要通俗易懂。

该书不是高深的滤波理论专著，而是为电气工程领域的工程技术人员和大专院校师生写的滤波领域工程读物：它既有理论分析又有实用的设计方法，图表和实例。如能与其姊妹篇“滤波器综合手册”（A.I.Zverev 1967）相配合，则可以使读者更为完整地了解和掌握滤波技术。阅读该书需要普通微积分，拉氏变换理论和基本电路理论方面的知识。

本书 1 至 4 章由余士本译，5 至 9 章由颜绍书译，全部译稿由王德隽、张谨、王持志校订。

由于水平所限，译文中的不妥之处敬请读者指正。

译 者

1982.10

序 言

“滤波”是电子学中一种基本的信号处理，包括对信号作各种各样的加工，例如信号的分路、解调、均衡、检测、解码、分相、积分和微分等。因此，为了保证实际系统的设计和综合，了解滤波器的能力和限制对从事系统的工程师和设备设计者来说就更加重要了。

许多滤波方面的书籍主要是为滤波器设计者写的，对于广大的读者来说就显得过于详细。他们希望论述滤波课题中的如下内容：介入衰减，群时延，时延均衡，衰减和群时延相互间的制约，衰减和冲激响应过冲相互之间的制约，以及给定响应在时域和频域中实现的可能性等。

因此，本书主要目的是向滤波器设计者以及不专门搞滤波器设计的电子学工程师们提供有用的资料，使他们能更有效和更有见识地完成他们的任务。本书的另一个目的是指出滤波领域包括前人在这学科范围内还没有论述过的概念和器件。

这里的许多材料来自1969—1975年间对同行们讲课时的内容。当时的听众大多是对一般滤波课题感兴趣的工程师。由于那次教学的效果不错，鼓励了我们来写这本书，这本书是为电气工程方面的学生以及工业应用学科方面的工程师们写的。我们力图作到大学教育与工业生产相结合。

因此，系统工程师能通过本书了解到滤波器能为他们作些什么。在电子系统设计的决策过程中，响应折衷以及设计和综合滤波器所需工作量方面的知识是非常重要的。为有助于进行这方面工作，我们为“滤波器综合手册”（Zverev著1967年）中的设计曲线提供了反归一化公式。这就使得各种类型滤波器的重要响应可以容

易地求得。这两本书相互补充更完整地介绍了滤波课题。

为了建立恰当的数学关系，我们使用了四种基本变换：富里叶变换，拉普拉斯变换，希尔伯特变换和 z 变换。前两种是联系频域特性和时域特性的，而希尔伯特变换则是联系最小相移网络的衰减和相移（群时延）的。 z 变换则是分析离散时间系统的工具。

虽然“滤波器”这个词通常是指按给定幅度响应而设计的装置，但是，由于脉冲系统（如雷达、电视和通信）和新型信号处理方法的广泛使用，大大地扩展了滤波器这一概念。

脉冲系统证实了用频率响应特性是不能充分地描述系统在时域中呈现的重要特征的。所以，冲激响应特性成了更重要的系统特性。但是，由于频域的分析 and 设计方法具有如此深厚的基础，所以在许多情况下人们还很难意识到只有用时域的方法才能获得最佳的系统特性。

时域的方法和滤波概念的推广可以用匹配滤波器的例子来说明，这种滤波器当它的冲激响应特性与它所传输的脉冲波形为镜像关系时，其输出信噪比最佳。它是名副其实真正的滤波器，但是频域未涉及它的分类和设计。这种滤波器不是选择频率的而是选择信号的；不是力求输出保持输入信号波形，而是致力于信号的检测。

书中滤波课题是直接按集总恒值参数网络来讨论的，这是由于这类元件及其分析是熟知的。我们一般并不直率的讨论硬设备而着重于它们的功能，但也涉及它们的应用和实现。固体电路工程师可以利用这些资料来设计和分析以运算放大器为基本元件的有源滤波器。微波工程师可以利用空腔谐振器和分布参数元件的集总参数等效电路，将本书所介绍的资料转换成他自己的专用资料。书中资料对数字电路，表面波设备和光学系统的设计者亦有助益。

在第一章，我们介绍系统用微分方程来描述时，如何获得实际系统的滤波函数，即冲激响应、阶跃响应、权函数和卷积积分。在第二章，介绍富里叶和拉普拉斯变换，由它们导出系统特性的频域描述，其中包括转移函数、幅度响应、相位响应和群时延响应，该

章还介绍了希尔伯特变换，它可用来建立特殊网络函数间的联系。这开始两章对于没有专门学过时域和频域关系的读者是有帮助的。

在第三章，探讨了理论的和可实现的低通响应，包括在时域和频域中的限制，描述了每一种响应的重要特征，其中专门用一节来描述上升时间和噪声带宽这两个系统设计参数。

在第四章中专门介绍归一化低通原型转换为其它滤波器类型的变换，其中对窄带带通滤波器的讨论特别详尽，因为它们的分析可以用于晶体、螺旋、同轴谐振腔、微带、叉指型和波导滤波器。

在第五章讨论了全通函数，这是一种在相位和群时延均衡以及对给定时延特性的仿真中有用的函数。实际滤波器总是带耗的，在第六章探讨了它们对理论响应的影响。实用的设计曲线显示了有限 Q 值元件对衰减特性、插入损耗和带宽的影响。

在第七章，我们把注意力由经典滤波器转到在噪声环境下信号的过滤课题，特别是匹配滤波器。因为许多通信和雷达系统采用匹配滤波方式，我们感到这个课题应该成为滤波器工程师们必须掌握的内容之一。在深入探讨匹配滤波之后，再讨论它的一个实例——利用线性调频和巴克（*Barker*）码的脉冲压缩。虽然也简短的提及光、表面波、数字和电荷传递等设备，但是我们并不着重于硬设备的实现。

在第八章，论述了两种时域综合法，在调制信号激励情况下分析线性系统的准稳法和平均时延的课题。第九章是数字滤波器，先讨论了 z 变换，再用以导出重要的滤波器特性。虽然这只是导论性的介绍，但仍然提供了具体的数字滤波，并把它与熟知的模拟滤波器相联系。

每章都附有习题和答案，整书都贯穿着数例，学习本书的预备知识是拉普拉斯变换理论，电路理论和基本微分方程。

目 录

第一章 时域分析	(1)
1.1 定义	(3)
1.2 微分方程	(4)
1.3 齐次方程的解	(6)
1.4 非齐次方程的解	(10)
1.4.1 特殊情况	(11)
1.4.2 更一般的情况	(14)
1.5 卷积积分	(16)
1.6 冲激函数	(19)
1.7 阶跃函数	(21)
1.8 冲激响应、阶跃响应和权函数	(23)
1.9 小结	(30)
参考文献	(30)
习题	(30)
第二章 频域分析	(33)
2.1 富氏变换	(34)
2.1.1 实时间函数	(35)
2.1.2 有起因时间函数	(36)
2.1.3 对称时间函数	(38)
2.1.4 巴塞伐尔定理	(39)
2.2 拉氏变换	(46)
2.3 拉氏反变换	(54)
2.4 应用拉氏变换解微分方程	(63)
2.5 转移函数	(68)
2.5.1 转移函数的导出	(68)
2.5.2 极点和零点	(72)

2.5.3 稳态响应	(74)
2.5.4 S -平面图	(83)
2.6 群时延和相位时延	(86)
2.6.1 定义	(86)
2.6.2 系统时延和信号畸变	(92)
2.6.3 相截畸变	(93)
2.6.4 已调信号的时延	(94)
2.7 希尔伯特变换	(98)
参考文献	(100)
习题	(101)
第三章 线性系统响应	(104)
3.1 理想低通响应	(106)
3.1.1 具有线性相位的矩形幅度响应	(107)
3.1.2 冲激响应	(108)
3.1.3 阶跃响应	(109)
3.1.4 具有线性相位的高斯幅度响应	(111)
3.1.5 冲激响应	(112)
3.1.6 阶跃响应	(113)
3.1.7 小结	(115)
3.1.8 佩雷—维纳条件	(116)
3.1.9 最小相移函数	(117)
3.1.10 可实现的网络	(120)
3.1.11 具有矩形幅度响应的最小相移网络	(122)
3.1.12 具有线性相位响应的最小相移网络	(124)
3.2 数学近似	(124)
3.2.1 泰勒近似	(126)
3.2.2 契比雪夫近似	(131)
3.2.3 最小二乘近似	(135)
3.3 可实现的低通响应特性	(139)
3.3.1 归一化低通响应	(140)
3.3.2 全极型网络	(140)

3.3.3	群时延函数	(141)
3.4	矩形幅度响应近似	(143)
3.4.1	最平(勃脱华兹)近似	(143)
3.4.2	等波纹(契比雪夫)近似	(153)
3.4.3	勒让德近似	(159)
3.4.4	最小二乘近似	(160)
3.5	恒群时延近似	(161)
3.5.1	最平(贝塞尔)时延近似	(162)
3.5.2	等波纹(契比雪夫)时延近似	(166)
3.5.3	最小二乘时延近似	(166)
3.6	理想时域逼近	(168)
3.6.1	高斯响应	(169)
3.6.2	等波纹过冲的瞬态响应	(171)
3.6.3	具有最小上升时间的单调阶跃响应	(173)
3.7	特殊情况	(175)
3.7.1	渐变响应	(175)
3.7.2	特殊的极点配置	(176)
3.7.3	同步响应	(176)
3.7.4	柯尔滤波器	(177)
3.8	上升时间和噪声带宽	(180)
3.8.1	上升时间	(182)
3.8.2	噪声带宽	(188)
3.8.3	噪声带宽和冲激响应能量间的关系	(191)
参考文献		(193)
习题		(195)
第四章 频率变换		(197)
4.1	归一化参量	(197)
4.2	低通滤波器	(199)
4.2.1	瞬态响应	(199)
4.2.2	元件值	(200)
4.2.3	低通计算举例	(201)

4.3	高通滤波器	(203)
4.3.1	常规变换	(203)
4.3.2	瞬态响应	(204)
4.3.3	低通和高通瞬态响应间的关系	(204)
4.3.4	元件值	(209)
4.3.5	高通计算举例	(210)
4.3.6	低通瞬态特性的保持	(212)
4.3.7	新高通变换的应用	(214)
4.4	带通滤波器	(216)
4.4.1	常规变换	(216)
4.4.2	群时延特性	(220)
4.4.3	零点—极点的位置	(221)
4.4.4	元件值	(223)
4.4.5	带通计算举例	(225)
4.5	窄带带通滤波器	(229)
4.5.1	基本定义	(229)
4.5.2	衰减计算举例	(230)
4.5.3	极点—零点的位置	(230)
4.5.4	群时延特性	(232)
4.5.5	群时延计算举例	(236)
4.5.6	宽带群时延计算举例	(237)
4.5.7	瞬态响应	(237)
4.5.8	结点型和网孔型网络的实现	(240)
4.5.9	网络设计举例	(246)
4.5.10	结点型和网孔型网络的特点	(250)
4.6	宽带恒时延带通滤波器	(252)
4.6.1	转移函数和最小二乘近似	(253)
4.6.2	最优参数表	(254)
4.6.3	归一化的衰减和群时延曲线	(254)
4.6.4	元件值	(259)
4.7	带阻滤波器	(262)

4.7.1	常规变换	(262)
4.7.2	带阻计算举例	(263)
4.7.3	窄带变换	(265)
参考文献		(268)
习题		(269)
第五章 全通函数		(271)
5.1	全通滤波器的应用	(271)
5.1.1	时延均衡	(271)
5.1.2	脉冲压缩用线性时延的综合	(272)
5.1.3	数字系统的时延均衡	(272)
5.1.4	分相网络	(273)
5.1.5	逼近技术	(273)
5.2	全通转移函数	(274)
5.2.1	一阶全通函数	(275)
5.2.2	一阶全通时延计算举例	(277)
5.2.3	具有一阶全通函数的勃脱华兹时延均衡	(278)
5.2.4	二阶全通函数	(281)
5.2.5	二阶全通的时延计算举例	(285)
5.2.6	二阶全通系统的瞬态响应	(286)
5.2.7	具有二阶全通函数的勃脱华兹时延均衡	(288)
5.2.8	时延均衡对瞬态响应的影响	(290)
5.2.9	具有线性相位的勃脱华兹滤波器的瞬态响应	(294)
5.2.10	窄带滤波器的均衡	(296)
5.3	最小二乘逼近	(297)
5.3.1	数值积分	(298)
5.3.2	滤波器群时延的均衡	(299)
5.3.3	计算用的初值	(300)
5.3.4	具有二阶全通函数的勃脱华兹时延均衡	(301)
5.4	网络的实现	(303)
5.4.1	一阶桥形节	(304)
5.4.2	二阶桥形节	(304)

5.4.3	一阶桥形等效网络	(306)
5.4.4	二阶桥形等效网络	(307)
5.4.5	二阶网络损耗的影响	(308)
5.4.6	带通时延均衡举例	(312)
参考文献		(315)
习题		(316)
第六章 有限Q元件和预畸		(318)
6.1	品质因数	(318)
6.2	有耗滤波器的响应	(319)
6.2.1	转移函数	(319)
6.2.2	瞬态响应	(320)
6.2.3	勃脱华兹滤波器的分析	(322)
6.2.4	契比雪夫和高斯滤波器的分析	(342)
6.2.5	对带通滤波器Q值的要求	(346)
6.2.6	说明例	(348)
6.3	插入损耗	(349)
6.3.1	失配损耗	(350)
6.3.2	电阻性损耗	(351)
6.3.3	插入损耗曲线	(352)
6.3.4	插入损耗的近似公式	(352)
6.3.5	最小插入损耗滤波器	(358)
6.3.6	各类滤波器插入损耗的比较	(363)
6.4	预畸	(365)
6.4.1	各类响应品质因数的最小值	(365)
6.4.2	插入损耗	(366)
6.4.3	插入损耗计算举例	(367)
6.4.4	预畸滤波器设计举例	(367)
6.4.5	小结	(368)
参考文献		(369)
习题		(370)
第七章 最优线性滤波		(372)

7.1	自相关、互相关和功率密度函数	(374)
7.1.1	周期函数分析	(375)
7.1.2	非周期(瞬变)函数分析	(378)
7.1.3	非周期函数计算举例	(379)
7.1.4	随机函数分析	(383)
7.1.5	自相关函数的特性	(385)
7.1.6	互相关函数	(387)
7.1.7	卷积和互相关之间的关系	(388)
7.1.8	线性系统输出的自相关函数	(390)
7.1.9	线性系统的输出功率密度谱	(391)
7.2	线性均方估计	(393)
7.2.1	维纳-柯罗莫格洛夫滤波	(393)
7.2.2	卡尔曼滤波	(395)
7.2.3	小结	(396)
7.3	匹配滤波	(397)
7.3.1	匹配滤波器的导出	(398)
7.3.2	矩形脉冲过滤	(402)
7.3.3	频域特性	(405)
7.3.4	匹配滤波器的综合	(407)
7.3.5	矩形冲激响应的综合	(409)
7.3.6	梯形冲激响应的综合	(411)
7.3.7	匹配滤波和互相关之间的关系	(414)
7.3.8	非最优条件	(418)
7.3.9	非白噪声输入的频谱	(423)
7.4	利用线性调频的脉冲压缩	(425)
7.4.1	线性调频信号	(426)
7.4.2	线性调频匹配滤波器	(429)
7.4.3	压缩的机理	(434)
7.4.4	旁瓣抑制	(438)
7.4.5	抽头延迟线	(441)
7.4.6	最优滤波器的实现	(443)

7.5 相位编码波	(445)
7.5.1 巴克码	(449)
7.5.2 脉冲序列的幅度频谱	(451)
7.5.3 旁瓣抑制	(453)
7.6 匹配滤波器技术	(464)
7.6.1 光信号处理器	(465)
7.6.2 声表面波装置	(466)
7.6.3 数字滤波器	(466)
7.6.4 电荷转移器件	(467)
参考文献	(468)
习题	(470)

第八章 时域综合及调制系统

8.1 逼近给定的函数	(473)
8.1.1 矩法	(474)
8.1.2 用矩法的矩形脉冲近似	(476)
8.1.3 用矩法的三角形函数近似	(478)
8.1.4 最小二乘法	(480)
8.1.5 规定指数的最小二乘近似	(480)
8.1.6 用两个规定指数来逼近矩形脉冲	(482)
8.1.7 最优幅度和指数的最小二乘近似	(484)
8.1.8 用一项指数来逼近矩形脉冲	(485)
8.1.9 用两项指数来逼近矩形脉冲	(486)
8.1.10 正交滤波器	(487)
8.2 线性时不变系统对已调波的响应	(488)
8.2.1 频谱法	(489)
8.2.2 用频谱法分析调频波	(490)
8.2.3 动态法	(490)
8.2.4 准稳态分析	(494)
8.2.5 对调幅信号的响应	(498)
8.2.6 对调频信号的响应	(500)
8.3 线性时变系统对已调波的响应	(504)

8.3.1	准稳态响应	(505)
8.3.2	一阶系统的准稳态分析	(506)
8.3.3	可分系统	(509)
8.3.4	可分系统的准稳态分析	(512)
8.3.5	用可分系统来逼近不可分系统	(513)
8.3.6	小结	(514)
8.4	通过时不变系统的平均时延	(515)
8.4.1	平均时延的定义	(515)
8.4.2	正弦波的平均时延	(516)
8.4.3	冲激函数的平均时延	(518)
8.4.4	阶跃函数的平均时延	(518)
8.4.5	矩形脉冲的平均时延	(521)
8.4.6	时延定义小结	(523)
参考文献		(524)
习题		(526)
第九章 数字滤波器		(528)
9.1	均匀抽样定理	(530)
9.1.1	定理和证明	(530)
9.1.2	时间函数的恢复	(532)
9.1.3	抽样定理的物理解释	(533)
9.1.4	内插函数	(535)
9.2	数字滤波器的定义	(536)
9.3	差分方程	(538)
9.3.1	差分方程计算举例	(539)
9.3.2	一阶差分方程的数字滤波器仿真考察用一阶差分方程	(539)
9.4	z 变换	(541)
9.4.1	定义和特性	(541)
9.4.2	s 平面到 z 平面的映射	(550)
9.4.3	频域特性	(551)
9.4.4	z 反变换	(554)
9.5	z 变换在差分方程上的应用	(556)

9.5.1	差分方程的经典解法	(557)
9.5.2	用 z 变换求解	(557)
9.5.3	系统函数和单位样值响应	(558)
9.5.4	系统响应的计算实例	(560)
9.5.5	频域函数	(561)
9.6	设计方法简介	(564)
9.6.1	冲激不变法	(565)
9.6.2	冲激不变法举例	(568)
9.6.3	双线性 z 变换	(571)
9.6.4	双线性 z 变换设计举例	(575)
9.6.5	非递归滤波器	(576)
9.6.6	非递归滤波器计算举例	(579)
9.6.7	非递归滤波的富里叶级数法	(581)
9.6.8	富里叶级数设计技术的例子	(583)
9.6.9	非递归滤波器实现举例	(586)
9.6.10	窗函数(权函数)	(588)
9.6.11	MTI滤波器设计举例	(590)
9.7	数字网络, 误差源和FFT	(591)
9.7.1	数字网络	(592)
9.7.2	滤波器的并联和级联型实现举例	(596)
9.7.3	由实际硬件引起的误差	(598)
9.7.4	快速富里叶变换	(600)
9.7.5	小结	(603)
参考文献		(603)
习题		(605)
习题答案		(607)
索引		(622)