

中国电子学会线路与系统学会

全国滤波器专题讨论会论文集

1983 上海



上海同济大学编辑

论文审阅人名单（按姓氏笔划为序）

万嘉若	王文熿	王德隽	戈以荣	毛二可	冯志彪
许德纪	孙文辉	孙怀玉	杜廉石	杨小伟	李兰友
李远文	李世煜	李国荣	李胜祖	吴敏金	沈志广
张立明	张金龙	陆明达	陈其康	林在旭	罗秋裕
金静乐	周志畅	周祖成	周敦华	郑华安	孟依群
胡 筠	莫培生	贾玉润	郭衍莹	唐 隼	凌燮亭
黄大卫	曹志刚	熊同舟	熊炳焜	颜绍书	

前 言

自从1915年开始引入电气滤波器概念以来,电气滤波器已广泛进入电子技术的各个领域,可以说现代电子设备中几乎没有不任用滤波器的。滤波器已形成独立学科,随着社会生产和科学技术的发展,对滤波器的理论研究和工艺实现必将提出更高的要求,促进滤波器在学术上和技术上更快的向前发展。

随着集成电路放大器的问世,自60年代起,有源滤波器的研制,极大地丰富了滤波器领域。70年代末期相继出现开关电容滤波器、电荷转移器件和数字滤波器已单片集成的消息。80年代起,单片集成各种滤波组件,已成为重点研究的课题。

离散数字信号处理独具优点,因此数字滤波器的研制有着重大的理论和实践意义。可以预料,数字滤波器将广泛出现在社会生活和工业生产中。

60年代中期,我国滤波器的研制和应用,与各工业先进国家相比没有很大差距,只是在此后的十年中由于停滞不前,出现明显落后状态。1978年以来,随着我国经济的发展,经过滤波器领域工作者的努力,在理论研究和制造工艺方面正以迅速的步伐赶上或接近国际水平。

为了交流滤波器研究工作经验,曾于1981在成都由成都电讯工程学院召开了《全国有源滤波器专题讨论会》。这次《全国滤波器专题讨论会》是受中国电子学会电子线路与系统学会的委托,由同济大学负责召开的。会议的重点是有源滤波器和数字滤波器,同时也兼顾了其他方面。这对学术界和工业界是一次较大规模的交流。

在电子线路与系统学会的指导和上海电子学会的协助下,这次会议的筹备工作是比较充分的。筹备小组先后召开了四次会议。去年6月在有关学报上发出征文通知之后,得到了各有关方面的积极响应,前后收到论文131篇,其中国外学者两篇,特约专题综述报告8篇。所有稿件,均邀请有关专家、学者或熟悉本领域的同人进行审阅。最后由筹备小组根据审阅人的意见,决定大会宣读论文58篇,交流论文56篇。少数稿件由于不属于本会议性质,不作交流。

本论文集刊登论文共59篇,由于受到篇幅限制,采取部分论文全文、部分论文摘要刊载的形式。从论文的内容和作者分布来看,涉及高等院校、科研院所、工程技术、生产工厂等方面,足见本专题研究的深度和广度,在国内已具有一定规模。

我们予期下次的瀟渡口专题讨论会有更大的进展。

特别要感谢论文审阅人，他们义务地为专题讨论会进行了艰苦的工作，写出了细致的审阅意见，为论文集的出版作出了贡献。

本论文集的出版，是在同济大学党政领导和电子线路与系统学会的关心和支持下进行的。在出版过程中得到上海九体五厂、上海无线电十二厂、无锡电视机厂和同济大学机电工厂的资助。谨此致谢。

这次论文集采用胶印形式，由於各位作者所写底稿字迹深浅不一，影响印刷质量，特此说明。

编者

1983年10月 上海同济

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
LEHRSTUHL FÜR NACHRICHTENTECHNIK

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
LEHRSTUHL FÜR NACHRICHTENTECHNIK
POSTFACH 10 21 48 · D-4620 BOCHUM 1

POSTFACH 10 21 48
UNIVERSITÄTSSTRASSE 150
D-4620 BOCHUM 1
TELEFON (02 34) 7 00 - 24 97 / 30 63
VERMITTLUNG 70 01
TELEX 08 25 880

Professor Huang Chu
Tong-Ji University

Shanghai
P.R. China

DEN Sept. 20, 1983

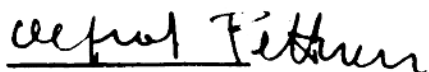
Dear Professor Huang Chu,

The Chinese Electrical Filter Conference is taking place in Shanghai from 24 to 28 October 1983. It will undoubtedly be one of the major scientific events taking place in your country this year.

I am very grateful for the invitation which had been extended to me, and I am extremely sorry that I will not be able to attend. However, I like to express at least in writing my warmest congratulations to you and your colleagues for having organized this important conference. I like to express our thanks to you and all participants for contributing their skills and for joining efforts with engineers and scientists all over the world to make new discoveries and develop existing procedures in that scientific discipline to which I have also myself devoted most of my professional activities. We are united with you in our conviction that the ultimate aim of our common endeavour is the improvement of the living conditions for all people on this earth.

I send to you and all participants my best wishes for a very successful conference.

With kind regards,
yours sincerely,



Alfred Fettweis
Professor

親愛的黃足教授：

中國濾波器會議將於1983年10月24～28日在上海召開。無疑地，這是貴國今年重要的科學方面的一次盛會。

非常感謝您對我的邀請，由於不能前往參加，我表示萬分歉意。然而，我僅用此致向組織這次重要會議的您和您的同事們表示最熱烈地祝賀。由於您和全體與會者為集體事業貢獻出自己的專長，並且參予了世界各國工程技術人員和科學工作者在這一科學領域中做出新的發現和推動現狀的努力，這也正是我所從事的最多的專業活動，謹此表示我們的謝意。

我們的信念把我們與您聯繫在一起，那就是我們共同努力的最終目標是為了改善全人類的生活狀態。

向您和全體與會者表示我最美好的祝願，祝大會圓滿成功。

謹致問候

您的誠摯的

菲特維斯（簽字）

1983年9月20日於波茨坦

1983年全国滤波器专题讨论会论文目录

前言

I 专题报告

国内外滤波器发展概况	熊同舟(1)
简介开关电源电路分析	刘名雷博士(18)
数字滤波器的发展与应用	何振亚(20)
SCF概述	莫悟生(25)
电控编程CCD横向滤波器(EPCCDTF)的发展	周祖成(32)
有源滤波器发展综述	王德简、李远文(41)
LC滤波器的机械设计	王文燿(52)
大规模集成电路在模拟领域的开拓	王定国(67)
国内滤波器现状	金麟东(75)

II 数字滤波器等

应用RCIC 数字滤波器的Zoom FFT 频谱分析的方法与实现
----- 万嘉若、杨小伟(1)

一种可变速抽因子数字低通滤波器 ----- 杨小伟、万嘉若(6)

数字信号处理专用硬件实现参数设计 ----- 万永刚(11)

自适应滤波消噪系统在计算机上的模拟及其硬件实现 -----
----- 裴正定、裴保宗(17)

滤波器的容差设计 ----- 凌燮亭(22)

CCD横向滤波器研究 ----- 朱以南、李为翰(27)

CCD传感器在光学字符阅读器中的应用 ----- 张仁鸿、汤水龙(32)

I_1 -Ch 窗函数及其应用 ----- 邹谋炎、刘瑞荣(37)

III 开关电容滤波器

波开关电容滤波器的分析 ———— 彭德尔、黄大卫、费特魏斯(1)
 NMOS 单片集成 50Hz 抑制开关电容滤波器 ———— 陈志良等(13)
 开关电容滤波器的直接实现方案 ———— 赵之凡、杜康石(18)

LDI变换型SCF的研究	熊同舟等(23)
用LDI结构实现双线性映射的SCF	熊同舟等(29)
用一个运放实现多用途低电容比双二次型开关电容	

滤波器模块	谷群山、王文煜(33)
开关电容滤波器的优化设计	叶金官(38)
二阶带通SCF反动态范围计标	李兰友(43)
时分复用开关电容网络中的应用	袁贻升、王明熙(48)
运放的有限增益与带宽对开关电容滤波器性能的影响	周宇华(53)
开关电容电路计算机辅助分析的一种有效方法	雍正正等(58)
用微型机分析SC网络	刘昌孝(63)
用不定导纳矩阵——纹号流图法求SC网络在Z域	

中的传输矩阵	林贻侠、陈其康(68)
开关电容网络的修改节点分析	汤正伟、沈志广(73)
开关电容滤波器	周志畅(78)
用纹号流图精确设计梯形SCF	查豫中(83)

IV 有源滤波器

有源C-自调谐滤波器的研制	冯志彪等(1)
适于MOS集成实现的一种有源C低通滤波器	彭水贞(8)
一种可集成的电流传递器(CCII)电路及其应用	张金龙等(13)
含C-C的FDNR全极点低通滤波器	毕治芬等(20)
自动跟踪式有源带通滤波器研究及实现	郎国扬等(25)
采用差分压控电流源(DVCCS)无损耗浮地电感的模拟	秦秀英(30)
压控有源滤波器的原理和实践	孙肖子、毛太平(35)
单运放双二次滤波器混合集成电路最佳设计及其应用	

	龚正毅、蔡国清(40)
新的有源浮地电感的分析方法	李遂文(45)
关于用集成运放实现回转器的有效带宽问题	汪德澍(50)
二阶多态RC有源滤波器电路的设计	赵述江(55)
一种过渡型滤波器在高频响传感器测量系统中的应用	王梓余(60)

有源RC滤波器的最佳设计	—— 韓文昭 (65)
大时间常数的惯性环节电路——一种超低频低通滤波器	—— 金鴻章 (70)
几种全R滤波器的试制和探讨	—— 胡 筠等 (75)
RC混合对称双T电桥选频放大器与滞回电压比较器的	

设计与调整	—— 丛茂森 (80)
双T网络有源滤波器性能分析	—— 汪克仁 (85)
音频按键接收器中的有源RC带阻滤波器设计	—— 刘晓洪 (90)
设计有源残余边带滤波器的新方法	—— 奚柏清 (95)
波RC有源滤波器的改进	—— 孟依群、黄大卫 (100)

V 无源滤波器等

70MHz中频时延滤波器幅度特性的补偿	—— 徐玉麒 (1)
70兆周中频滤波器改进设计	—— 钟友卿 (6)
SAW带通滤波器及其计称机辅助设计	—— 武以立等 (11)
LC滤波器的阻抗和频率搬移法	—— 唐子瞻 (16)
带外振铃窄带机械滤波器	—— 叶芝华 (24)
全通网络设计的几个应用问题	—— 李国策 (29)

VI 交流论文摘要

“模拟和数字滤波器”的教学和科研	—— 张贻升、葛 云 (1)
电荷耦合器件(CCD)在脉冲压缩系统中的应用	—— 林茂藩等 (1)
CCD固定权重横向滤波器误差分析	—— 叶倩平、曾 权 (2)
同步滤波器的设计方法	—— 张邦枝 (2)
光学空间滤波器在信号处理中的应用	—— 赵日昌等 (3)
无限冲击响应数字滤波器机辅设计	—— 张先萌 (3)
通讯用SCF的设计	—— 刘昌孝等 (4)
SC网络的标度与灵敏度不变性	—— 刘盛平 (4)
开关电容滤波器设计简介	—— 全茂建 (5)
关于开关电容网络的初步研究	—— 危 霖等 (5)
关于对开关电容滤波器进行计算机模拟的几个问题	—— 董在望等 (6)
单比锁相环动态跟踪滤波器	—— 张朝俊 (6)

与运放放大器时间常数无关的有源滤波器	李 乐(7)
3KHz有源低通滤波器的设计	叶树英(7)
宽带有源RC滤波器的工程逼近	李先绪(8)
RC有源滤波器的CAD	毕厚福、董松波(8)
一个多端输出的R有源滤波器电路	孙致孝(9)
全功能有源滤波器设计与实现	鄧国杨等(9)
有源滤波器用作低频频谱分析及有关问题探讨	秦卓仁(10)
几种高Q选频电路在遥控测速系统中的应用	王彩杰(10)
RC有源带通滤波器的工程设计	高相平、李述文(11)
低通有源滤波器的设计	高成良(11)
巴特沃斯RC有源滤波器的近似设计	秦树人(12)
应用厚膜器件的两种便携式声频带通滤波器组	柯士丰(12)
一种有源RC低通滤波器的试制及设想	肖学先(13)
一种新的有源R高通滤波器	张贻升、赵肖锋(13)
有源滤波器的综合设计方法	张玲玲(14)
一种有源RC滤波器的最优设计	庄镇泉、蒋 虹(14)
通用有源滤波器的研制	杜普选(15)
有源连续可调时延延迟口的设计与应用	俞德丰(15)
有源SC网络的一种分析及综合方法初探	马治平(16)
SC网络的复杂度	刘鉴平(16)
相位配对滤波器的初步探讨	蒋瑞兴(17)
Thomson-Chebyshev过渡滤波器性能计算和讨论	谈 旭、周星男(17)
声表面滤波器采用Zno溅射薄膜	何文俊(18)
YIG双选滤波器与TRF接收机	郑茂林、潘贵和(18)
L-C带阻滤波器的设计	宋家振(19)
电网滤波器抗干扰性能的实验研究与设计	陈达生(19)
机械滤波器材料特性与制造工艺的发展动向	严言忠(20)
滤波器的相位—频率调试法	万礼和(20)
广义中分定理	施兆龙(21)

前端滤波器的设计与实现	李振庭(21)
锁相环的动态滤波特性	何文霖(22)
碳碱盐并流法锰锌铁氧体矩形磁芯的特性和应用	贾振文(22)
避免浮地电压反向开关的一种方法	熊同舟等(23)
C544 模拟开关板间分布电容的研究	邵毓琳等(23)
低频机械滤波器	杨毓申(24)

I

专题报告

国内外滤波器发展概况

同济大学 熊同舟

一、引言

凡是有能力进行信号处理的装置都可以称为滤波器。电气滤波器一般是一个两端口或多端口网络，它的发展与通信技术有着密切地联系。早在1884年Vaschy, A. 提出一个 π 形阻容滤波装置[1]。此后，主要是为了改善话路的质量和传输距离，20世纪初许多人研究了线路传输理论[2~4]，并且制成了具有实用价值的滤波器[5~7]。40年代，网络理论渐趋成熟[8~10]，模拟滤波器的设计和制造均已达到较高的水平[12~13]。50年代后期开始对模拟滤波器编制了目录，设计参数表格化[14~15]，并且不断进行补充[16]，为设计工作提供了方便[14~16]。60年代起由于计算机、材料工业和集成工艺的发展，滤波器的设计与制造的理论与实现均进入新的阶段。进入70年代，由于通信、航天、勘测、地震等各个领域的需要，促使滤波器除在性能上充分满足各种不同的要求之外，并且向低功耗、高精度、小体积、稳定、可靠、价廉方向努力。截至1978年，组件实现单片集成的RC有源滤波器(17)，电热电路(ETC)[18]，电荷转移器件(CTD)[19]，电容开关滤波器(SCF)[20]和数字滤波器(DF)[21]，当然所有这些只是初步的，应当指出，对于RC有源滤波器和ETC由于受到本身条件的限制，单片集成只能在个别特殊条件下实现。而对于CTD、SCF和DF则不同，它们完全可以用MOS工艺实现单片集成，目前主要工业国家对此均十分重视，正在积极研制中。

滤波器的频率范围极宽，例如电力工业要求频率可以低到0 Hz，而微波技术要求频率可以高到1 THz (10^{12} Hz)。滤波器可以有各种不同的分类方法，按照它所选择的物理量，可以分成频率选择、幅度选择(如电视中的调幅信号)，时间选择(如PCM制中的话路信号)和信号选择(如匹配滤波器)等。根据频率的通常范围，可以分为低通、高通、带通、带阻和全通滤波器，至于梳形滤波器，由于它有周期性的通带和阻带，所以可属于带通和带阻滤波器。

用于频率选择的滤波器，按照实现技术制成一览表(图1)。根据信号处理的类型，可以分为模拟滤波器和数字滤波器。模拟滤波器系用时间和数值均为连续的

线路，离散滤波器则采用时间离散和数值连续的线路，或者时间和数值均为离散的线路。

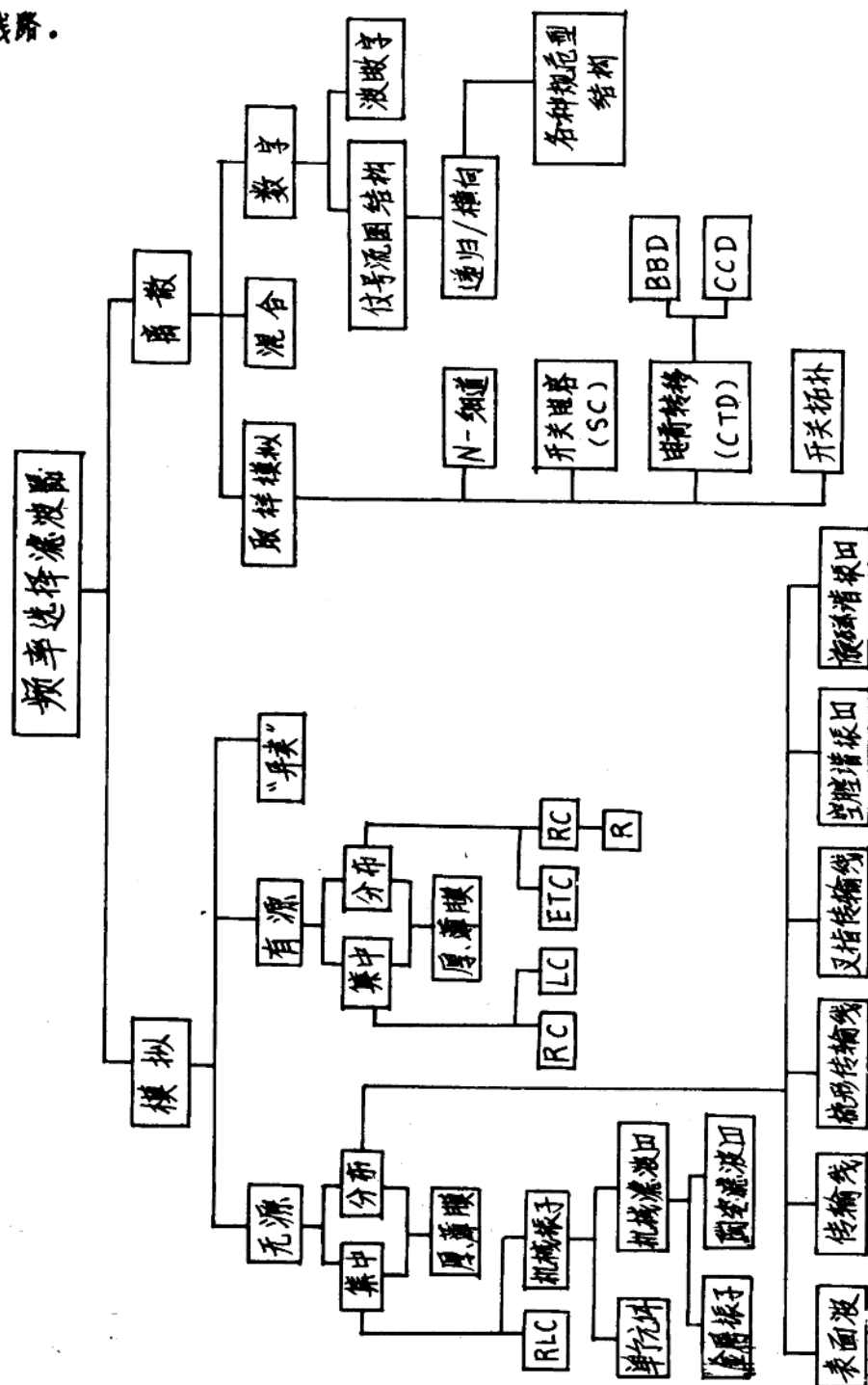


图 1

二、无源滤波器

无源滤波器的元件是 R 、 L 、 C 以及耦合变压器。由于连续模拟无源滤波器设计理论成熟，近來有源滤波器设计均系用 LC 无源滤波器作为原型，按照所给指标利用编制的手册，同时解决逼近和实现问题[22~24]。滤波器结构经常可以通过结构变换、参数修改以及寄生特性的优化，来改善杂散电容和电感的影响[25]。

无源滤波器的无源元件可以是集中型的。集中型元件适用的频率范围在100 Hz到50 MHz之间， Q 值在500到1000范围内。各种电阻元件仅薄膜电阻是适用的，因为它能作到小容差、低温度系数、良好的时间常数、不足道的噪声和很小的无功分量。所以与块状电阻和线绕电阻相比，有较大的优点[26~27]。滤波器中所用的电容元件，典型形式是纸介电容器、塑料电容器、陶瓷电容器和云母电容器。在性能上，要求具有小固有电感、小损耗角、高时间常数和低温度系数值。电感元件，除了无法集成的缺点外，并且由于线圈损失较大，很难在实际中应用。目前在改善材料性能方面取得不少成绩，主要是使用不同成份的软磁性铁氧体，尽力设法提高相对导磁率，提高比阻，并使涡流损失小到可以忽略的程度[26][28]。

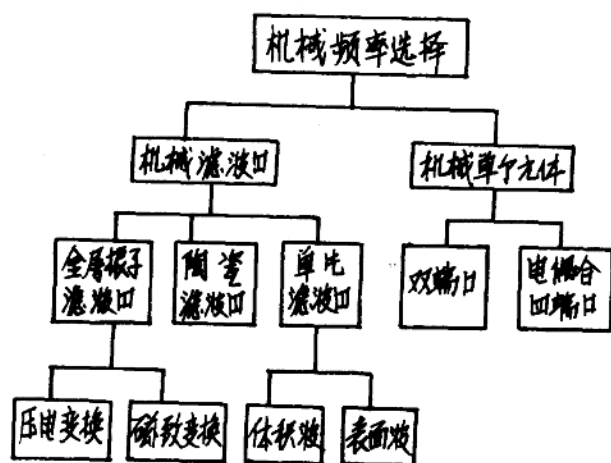
无源元件也可以是分布型的，即用厚膜技术和薄膜技术制成薄膜电路，这使滤波器第一次有可能到达小型化阶段。薄膜电路的优点主要是，体积小、可靠性高、温度系数低($\pm 5 \text{ ppm/K}$)，截止频率高($\leq 2 \text{ GHz}$)，时间常数长以及很小的杂散电容和杂散电感。这种厚膜工艺是把印刷在一块基片上(大多是 Al_2O_3 陶瓷)导电、电阻和介电质层分隔开，然后进行烧结，再采用一种调整方法(大多采用 CO_2 激光)把所实现的元件精度控制到 $\pm 20\%$ 范围以内[29~31]，厚膜电阻用贵金属或金属氧化物(例如 Ag-Pd ， RuO_2 ， Pt-Ir)涂层制成。厚膜电容可以简单的用陶瓷(95% Al_2O_3)制成，取值范围 $10 \text{ mH} \leq L \leq 500 \text{ nH}$ [27]。薄膜技术则采用高真空制造方法，可以用真空蒸发(即镀膜技术)和阴极溅射(即铝技术)来实现。基片一般是高纯 Al_2O_3 陶瓷或硼硅玻璃。制成的元件主要优点是极高的时间常数(例如薄膜电容 $0.1\%/年$ ，薄膜电容为 $0.5\%/年$)和很小的温度系数值(例如薄膜电阻 $0.2 \sim 1 \times 10^{-6}/K$ ，薄膜电容为 $\pm 100 \times 10^{-4}/K$)。制成的薄膜电感上限值达 500 nH ， $Q \leq 100$ [27][32]。

三、机械频选滤波器

在超大规模集成VLSI时代开始的今天，数字通信和一系列新型滤波器工艺相继出现，但是在现实的通信技术中，机械频选滤波器仍占有重要地位。我国目前使用

机械滤波器占总数35%以上。用各种工艺实现的机械滤波器不仅应用在通信传输例如多路复用系统和中频放大方面,并且还广泛应用于维护、检测电子等领域中。用于频率选择的机械滤波器较之纯粹用电气元件实现的滤波器,有很多优点:滤波曲线有很高的边缘陡度,较小的体积,较好的时间稳定性和温度稳定性,很高的可靠性。

图2是机械频率选择滤波器一览表。机械滤波器的第一个可供实用的装置出现在



1947年[33]。大约在1960年西德制成金属膜滤波器并用在通信装置中。我国60年代中期制成电压变换型折迭式棒状滤波器,主要用作话路滤波器,并且成功地取代了FDM和FSK系统中的LC滤波器。机械滤波器,包括金属膜滤波器、陶瓷和声表面波滤波器在内,机械振动在起元件

中耦合,工作频率一般在50KHz到0.5MHz超声范围内。铜质金属膜传播速度为5000m/s。机械滤波器的变换器可以是压电的或磁致的。压电变换器的特点是:很大的延伸率,制造简单,体积小,机电耦合系数为0.45;磁致变换器的特点是:耦合系数在很宽的范围内与温度无关,线性频率特性,机电耦合系数为0.15,较小的延伸率。由于压电陶瓷变换器制造简单,并且延伸率约为磁致结构的100倍,所以在实际应用中压电陶瓷占优势[34]。在60年代,出现许多机电变换器的新理论和新工艺[35-38]。

陶瓷滤波器通常以压电性烧结材料(如多晶锆钛酸钡,钛酸钡,硫酸锂等)制成双极或三极振子,然后再用这些分立的元件(特别是电容)组成陶瓷滤波器组[39-42]。为了实现滤波器微型化,在GHz频率范围内的单片石英、陶瓷和声表面波滤波器已经在一块基片上实现[43-44]。它们的共同特点是具有高Q值(石英为 $50 \sim 10^6$,陶瓷为 $300 \sim 3000$)和低的温度系数值(石英为 $(2 \sim 10) \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$,陶瓷为 $(2 \sim 10) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) [45]。单片石英滤波器可以制在一块石英基片上成单、双和多重滤波器[46-47]。作为机械单个元件,石英可以作为模拟振荡器、滤波线路和数字式控制仪

号发生口的部件，它的优点是：长时间的稳定性，良好的温度特性和高 Q 值。

早在1885年就发现固体的弹性表面上存在表面波现象。因为与声波相比较，通过传播过程中媒质的粒子振动，可以产生信号变换，故称为“声表面波”。声表面波滤波器是利用压电效应制成的，它的突出优点是体积很小（数量级为毫米），小于可比的电气装置约 10^5 倍。并且适用于大批量生产，工艺简单，便宜。声表面波滤波器的重要应用领域是电视技术（如图象中频滤波器）和无线电定位系统（如匹配滤波器）和雷达设备中的频率压缩装置。在设计方面大多采用叉指状结构形式，基片材料大多是用氮化镓 LiNO_3 。[48~52]。

顺便提一下，当信号的波长与设备尺寸的数量级相同时，波的传播导致网络具有分布参数。在 $10\sim 100\text{MHz}$ 范围内，设计滤波器时必须考虑集中电路所产生的“寄生”元件的影响，例如引线的电感、极化损失、集肤效应、匝间电容等。在高频情况下的滤波器， 10MHz 以下可采用铁氧体磁性线圈和聚苯乙烯电容器，在超高频 500MHz 以下可采用螺旋回路和空心线圈。当频率在 GHz 范围内时，则需要特殊的传输线（波导线），利用传输线的阻抗特性进行滤波器设计[53]，当频率更高时，采用同轴滤波器（ $f \leq 10\text{GHz}$ ）[54]，微波带状传输线滤波器（ Q 值可达2000）[55~56]，波导滤波器[57]或周期性延迟传输线[58]。70年代初期，利用钇铁石榴石（ $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ）单晶（称为YIG单晶）的铁磁谐振性质制成可调滤波器的振荡器， Q 值可超过10000[59~61]。

四、有源滤波器

从理论上讲，所有滤波任务都可以用 RC 有源滤波器来解决。但是实际上却受到许多限制，诸如 R 和 C 元件的精度要求、经济性、灵敏度、线性程度、动态范围等。就元件的绝对误差来说，近25年来经过紧张的研究，仍然没有得到解决。在有严格频率选择要求的场合下，例如频分和时分多路通信系统中，还只能使用一种混合式 RC 有源滤波器。尽管有这么多的问题存在， RC 有源滤波器的理论和实际应用仍在继续发展中[62~67]。

图3是有源模拟滤波器的分类。直接实现是用 LC 或 RLC 滤波器直接进行复制。利用原型滤波器实现，包括：回转 C 滤波器，也就是把 LC 滤波电路中所有的电感用可以视为电容的回转 C 来代替。回转 C 可以模拟接地或浮地电感[68]。广义阻抗变换器（ GIC ）是利用Bruton变换[69]，把导纳和/或阻抗变换成电容 CS 和电感