

开关电容滤波器的 原理与设计

陆明达 编著



科学出版社

开关电容滤波器的 原理与设计

陆明达 编著

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是为了及早引入开关电容新技术而编写的,偏重于介绍开关电容滤波器(SCF)的原理,并择要介绍几种设计实现的方法。各章的内容为:SCF的基本概念;状态变量型SCF;频变负阻器型SCF;双线性变换型SCF;无耗离散积分器变换型SCF;应用双线性和无耗离散积分器变换设计的SCF;电压反向开关型SCF;电气可编程SCF;开关电容网络的节点分析法。考虑到各种设计方法的具体实现,本书附有设计实例及实测曲线,这些实例既有国外的报道,也有自己的工作。

本书可供从事电路理论的高等院校教师、研究生参考,也可供从事滤波器研制、生产和使用的有关人员阅读。

开关电容滤波器的原理与设计

陆明达 编著

责任编辑 张建荣

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986年2月第一版 开本:787×1092 1/32

1986年2月第一次印刷 印张:6 7/8

印数:0001—4,500 字数:156,000

统一书号:15031·700

本社书号:4480·15—7

定价: 1.65 元

序 言

随着计算机的广泛应用以及大规模集成电路技术的发展,经典的线性定常电路理论开始转向非线性时变电路的分析与综合,连续模拟域处理也扩展到离散数字域,而且新型电路器件在陆续出现。开关电容 (Switched Capacitor) 技术及其用于选频网络——开关电容滤波器 (SCF) 正是新发展潮流中的一个分支。自一九七八年以来,本课题成为国际电路理论界最感兴趣的论题之一,迄今不衰,而单片集成的 SCF 也已作为商品投入了实际应用。

编者在本书中力图对这一技术的已有成果作一次初步的归纳,从而为这一领域的人门提供方便。最终目的是促成国内单片集成 SCF 研制成功并投入实际应用。可以预期,一旦付诸实施,通讯、电话系统的滤波网络将首先会有巨大的改革。

但限于编者的能力与水平,本书未能对这一领域作全面的阐述,有兴趣的读者可参阅其他文献。即使在所论述范围之内,也难免有错误、不当之处,敬请读者指正。

本书由陆明达执笔。共同编著者有熊同舟、施惠昌、邵毓琳。编著过程中得到同济大学电气工程系电工原理教研室全体教师的帮助指教。编者的学生也协助做了不少实验工作,在此一并致谢。

目 录

第一章 开关电容滤波器的基本概念	1
一、历史的回顾	1
二、CMOS 工艺的崛起	3
三、SCF 的基本部件	7
四、构成 SCF 的主要起因	11
五、构成 SCF 的关键单元——开关电容积分器	13
六、几点有关说明	23
第二章 状态变量型开关电容滤波器	28
一、状态变量法型双二阶基本节电路	28
二、状态变量法电路	32
三、跳耦电路	35
四、状态变量型 SCF 的设计过程	42
第三章 频变负阻器型开关电容滤波器	45
一、广义阻抗(导纳)映射器	45
二、一个新型器件——FDNR 元件	58
三、阻抗标度变换法	59
四、讨论	62
第四章 双线性变换型开关电容滤波器	65
一、ARF 与相同拓扑 SCF 的对照	67
二、映射函数 $F(z)$ 的选择	68
三、双线性变换离散阻抗的代换	86
四、双线性变换电感器及谐振器的 SC 实现	92
五、分布电容的影响及其补偿	100
第五章 无耗离散积分器变换型开关电容滤波器	108
一、映射原理	108

二、LDI 变换离散阻抗的代换	112
三、LDI 变换型 SCF 的终端近似处理	117
四、LDI 变换型 SCF 设计实例	123
五、LDI 变换型跳耦电路	126
第六章 应用双线性和无耗离散积分器变换设计的开关电容滤波器	130
一、LDI 变换与双线性变换离散阻抗间的关系	131
二、设计实例	134
第七章 电压反向开关型开关电容滤波器	143
一、理论依据	143
二、电压反向开关的概念及其实现	144
三、VIS-SCF 中基本元件的开关电容实现	149
四、VIS-SCF 的设计步骤及数字设计例	159
五、VIS 的功能	164
六、浮地回路的处理	166
第八章 电气可编程开关电容滤波器	174
一、可编程二阶节的综合	174
二、编程开关电容阵列的设计	177
三、实际设计考虑的几个问题	180
第九章 开关电容网络的节点分析法	186
一、纯电容网络的分析	186
二、开关电容网络的时域及频域分析	189
三、SCN 的双口分析	195
四、积木块分析法	198
主要参考文献	213

第一章 开关电容滤波器的基本概念

一、历史的回顾

自从一九一五年分别由 G. Campbell 和 K. Wagner 首先引入滤波器概念以来,今天,滤波器已渗入电子技术的各个领域,可以说,任何复杂的系统或设备没有不使用滤波器的。在实际制作上,无源 RLC 滤波技术迄今仍有效地在各领域中工作。六十年代以来,航天技术等新兴领域对设备器件小型化的呼声日高,小型化、微型化成了社会的急需。另一方面,电子技术特别是集成电路工艺有了突飞猛进的发展,使小型化、微型化有了可能。这种需要与可能的合拍必然导致技术的改革与进步。果然,随着低价高性能运算放大器的问世,有源滤波技术的研制曾经极大地震动了学术界与工业界。总观其发展方向,大致可分两大类:一是反馈放大器型,用有源电路(即用运算放大器构成的受控源电路)来实现给定的传递函数;二是阻抗变换器型,用回转器电路等取代经典无源 RLC 滤波器中的电感 L 。显然,由于有源滤波器中不再使用电感线圈 L ,其体积大为减小,其工艺制作也易于标准化,因此,它亦称为有源 RC 滤波器。作为派生物还有有源 R 滤波器、有源 C 滤波器。今天,无论在国内外,有源滤波器均已进入了实际应用阶段,发挥了小型、稳定的优点。关于有源滤波器的设计工作,如同无源 RLC 滤波器一样,也已经有了成套表格、图表的归纳整理可供利用。但对有源滤波技术的探讨却并未终结,其主要方向之一,就是探索单片集成的可能性,以

单片集成元件代替分立组件,使器件从小型化向微型化进展,这是理所当然的需要,也是人们梦寐以求的目标。于是用电荷耦合器件(CCD)技术构成非递归型横向滤波器的研制得以发展。但是,近年来崭露头角,最为学术界、工业界感兴趣的却是用开关电容技术构成的SCF,而且很快就进入了实际使用。对于一项新技术,有如此快的进展,确是十分令人瞩目的。

就原理而论,开关电容技术可用于选频滤波的概念,早在一九六六年,W. Poschenrieder, A. Fettweis 和 R. Boite 等人就已指出,并论证了开关电容滤波网络的特性仅取决于网络中的电容比。这一点在原理上是一个突破。因为人们在探索处理有源RC滤波器的单片实现时发现,许多有源RC滤波器的特性取决于RC乘积,而在单片处理中,极难获得精确且稳定的RC乘积。相比之下,在同一块硅片上实现精确且稳定的电容比是不难的,这只要使硅片面上氧化层的介电常数和厚度控制得比较均匀,则电容比的准确性主要取决于各电容电极的面积,这一点用现代光刻工艺是可以保证的。当然,电容越小,所占面积也越小,这样由制版造成的误差就越大。当电极面积约为 $400\text{ }\mu\text{m}^2$ 时(相应电容为零点几皮法),误差可达1—2%;当面积为 $40000\text{ }\mu\text{m}^2$ 时(相应电容为几十皮法),误差量级为0.1%。这样,电容比的准确性主要取决于小电容的准确性。因此在设计时,当最大电容面积已限时,选择合适的电容比,不要与1相差过多,则可保证小电容面积的准确性。

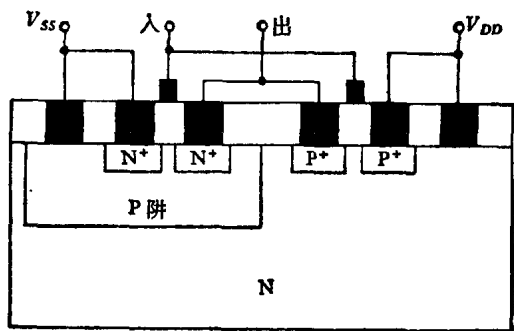
但是,理论上的可能性不即等于实际上的可能性。需要与可能的又一次合拍是在七十年代末,CMOS工艺的崛起立即为单片SCF的实现开拓了广阔的前景。

二、CMOS 工艺的崛起

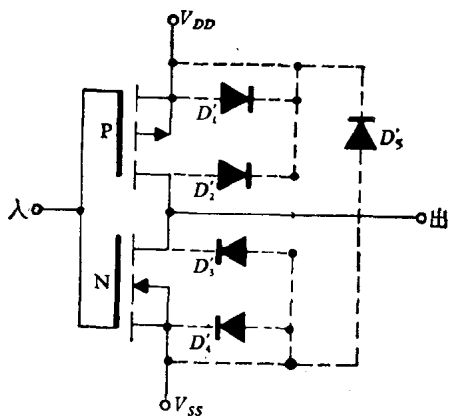
在半导体集成电路发展过程中,以 TTL 电路为代表的双极型电路与以 NMOS 为代表的单极型电路一直在激烈竞争而又相互促进。MOS 电路的主要薄弱环节在于速度。七十年代末,CMOS 工艺逐步完善,因而在速度、集成度和微功耗方面不断创造新的记录。可以说,CMOS 电路是双极型与单极型电路竞争中必然产生的应运儿。据美国集成电路工程公司报道,在一九八〇年集成电路市场销售总额 100 亿美元中,双极型电路占 53% (其中数字电路 32%, 线性电路 21%), MOS 电路占 47% (其中 NMOS 电路 29%, PMOS 电路 10%, CMOS 电路 8%)。他们预测,到一九八五年 CMOS 电路的比例将从 8% 上升到 50%。在速度方面,一九八一年日本东芝公司公布了高速 CMOS 电路 TC 40 H 系列,约 57 个品种。美国 NS 公司公布了高速 CMOS 电路 MM 54 HC 系列,共 100 个品种。加拿大 Mitel 公司也公布了高速 CMOS 电路 MD74SC 系列。这些系列均为中小规模,在电源电压 V_{DD} 为 5 V 时每级门的延迟时间小于 15 ns。随着等平面硅栅短沟道 CMOS 工艺的应用,已出现了速度为 300 MHz 的 CMOS 大规模集成电路。在集成度方面,16 K 静态 CMOS-RAM, 12 位 CMOS 微处理器已投入批量生产。64 K 静态 RAM, 32 位微处理器也已有样品……。总之,CMOS 电路在数字领域中的优势已非常明朗。而 CMOS 模拟开关,多路模拟开关,运算放大器和比较器等产品的诞生,打破了双极型工艺独霸模拟电路的一统天下,以其独具的优点显露出强大的生命力。

CMOS 集成电路全名为互补型金属-氧化物-半导体集成电路 (Complementary Metal Oxide Semiconductor)。亦可称为

互补型场效应电路。CMOS 与 PMOS, NMOS 之间最大差别在于其基本单元均由 PMOS 管与 NMOS 管互补组合, 若驱动管为增强型 NMOS 管, 负载管就是增强型 PMOS 管, 二者亦可互换。以基本单元 CMOS 反相器为例 (见图 1-1)。图示为



剖面图



电路图

图 1-1 基本单元 CMOS 反相器

以 N 型硅单晶作衬底的常规铝栅工艺 CMOS 电路。电路图中虚线连接的是寄生二极管 ($D'_1-D'_5$), 显然, 它们都处于反偏,

对电路工作没有影响。由电路结构可知,静态时,无论输入端是高电平还是低电平,总是一个管子导通,另一个管子截止,基本上无沟道电流通过。静态器件功耗只由输入保护网络(见图 1-2)和内部寄生二极管的反向漏电流所引起,这个电流通

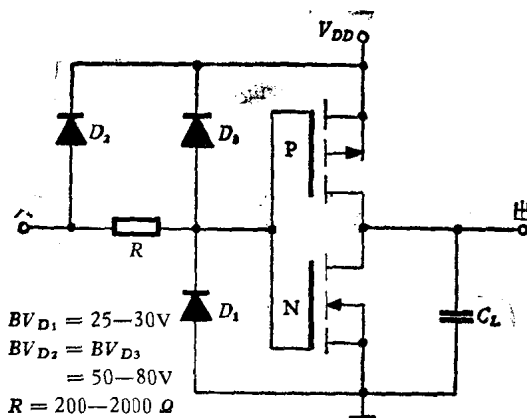


图 1-2 标准的 CMOS 输入保护电路

常也叫漏泄电流,其值在各个品种的参数表中可查得。CMOS 电路的动态功耗是由于电容的充放电所引起的。可以推知

$$P_d = CV_{DD}^2 f$$

式中

C 是外部负载电容 C_L 和内部寄生电容之和;

f 是输入信号的频率;

V_{DD} 是电源电压。

P_d 仅与工作频率有关,而与输入脉冲占空比无关。另外,在可能条件下,降低电源电压 V_{DD} 也可以降低动态功耗。

CMOS 电路的微功耗性能是其最突出的优点,也是其特点。一般小规模电路静态功耗小于 $10nW$,比双极型工艺 TTL

电路小 4—5 个数量级，比 PMOS、NMOS 也要小 2—3 个数量级。微功耗特性使 CMOS 电路成了航天装置、军用和野外电子设备中的宠儿。

微功耗特性大大减小了器件芯片的发热量，因而有良好的温度稳定性，或者说温升低。从而为器件工作的稳定性和可靠性提供了保证，也为提高电路的集成度排除了“热障碍”。

微功耗特性使器件制作时可节省许多电源设备及结构件的费用，因而降低了 CMOS 电路的成本，以低价格、高性能投入市场竞争。称霸市场的预测是有根据的。

CMOS 电路输入级漏电流极小，所以，其输入阻抗很高（容性），因而简化了电路的接口要求。

此外，尚需指出的是 CMOS 电路抗干扰能力强，噪声容限可达到 40% V_{DD} ；电源电压允许变化范围大，按不同阈值电压的常规铝栅及硅栅电路分为 8—12V 系列，7—15V 系列，3—18V 系列。

目前，国际 CMOS 电路均以 4000 系列为序。各大公司型号对照如下：

美国 RCA 公司：CD 4000 系列

美国 NS 公司：74 C00 系列

美国 Motorola 公司：MC 14500 系列

美国仙童 (Fairchild) 公司：F 4000 系列

日本东芝公司：TC 4000 系列。

我国的 CMOS 电路从一九七三年开始研制，现在已有约 100 个品种投入批量生产。一九七八年四机部颁布了 CMOS 电路系列优选品种（部标准），定名为 C 000 系列。主要生产厂家有：上海无线电十四厂，上海元件五厂，北京半导体器件三厂，常州半导体厂等。此外一些著名的综合性理工大学及各有关研究部门也有微电子学研究室，有能力作集成电路的

研制。国内 CMOS 电路的生产技术已开始逐步接近国际水平。

以运算放大器为例,它是线性集成电路的一个重要领域,也是有源滤波器的关键部件。国外已有近 500 种产品。七十年代,美国市售运算放大器都是采用双极型工艺或双极型-MOS 混合工艺制造的。只在七十年代末才有 MOS 运放上市。我国运算放大器的品种也已相当齐全,上海元件五厂与上海无线电十四厂于一九八一年仿 MC 14573 单片 CMOS 四运放获得成功,现已投入生产。

上述种种,无非说明两点,一是 CMOS 工艺以其独特之优点而崛起,为实现器件的微型化提供了现实的可能性。二是我国已经具备了生产单片集成模拟系统的基本条件,经努力,赶上国际水平,填补国内空白是完全可能的。

三、SCF 的基本部件

顾名思义,开关电容滤波器的基本部件是开关与电容,当然运算放大器是必不可少的。如前述,单片 SCF 用 MOS 工艺制造。各部件主要特性分述如下。

1. MOS 电容

制作 MOS 电容有两种方法。第一种是采用金属-氧化物-硅制作电容。图 1-3 所示为浮地 MOS 电容的构造示意图。MOS 电容的两块极板分别由金属(如铝)与多晶硅做成。另一种方法是用多晶硅-氧化物-多晶硅制作电容,其结构与上相同,只是把金属极板用另一层多晶硅取代。这两种电容的容量都取决于二氧化硅的介电常数、氧化层的厚度(一般在 $1000 \text{ \AA}$ 左右)以及电极的面积。SCF 中所用电容大致

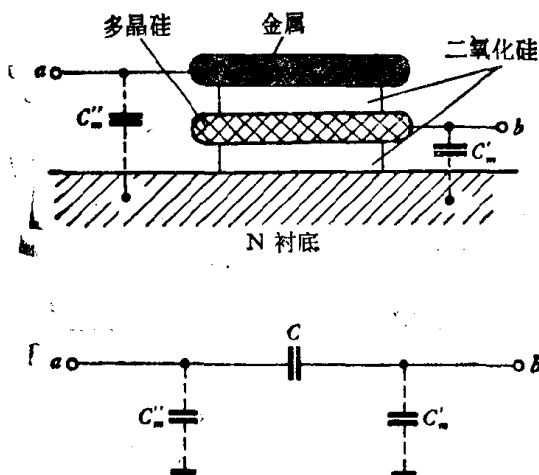


图 1-3 浮地 MOS 电容构造示意图

选在 1—40 pF 范围内。

MOS 电容的两极到衬底之间都存在寄生电容 (见图 1-3 虚线所示)。底极板与衬底之间的寄生电容为 C'_m ；顶极板与衬底之间的寄生电容为 C''_m 。这两个寄生电容的大小约为

$$C'_m = (5-20)\% C$$

$$C''_m = (0.1-1)\% C$$

若 $C = 10$ pF, 则 C'_m 可达 0.5—2 pF, 而 C''_m 只有 0.01—0.1 pF。所以, 在讨论 SCF 的结构时, C'_m 的影响一般不可忽视, 而 C''_m 的影响一般可以略去不计。

2. MOS 场效应晶体管开关

图 1-4 所示为基本单元 CMOS 双向开关(传输门)。它是由 P 沟道 MOS 管和 N 沟道 MOS 管并联组成, P 沟道 MOS 管源极与 N 沟道 MOS 管漏极相连, P 沟道 MOS 管漏极与 N 沟道 MOS 管源极相连, 分别作为传输门的入端与出端。两个管子的栅极分别接一对互为反相的控制信号 ϕ 与 $\bar{\phi}$ 。当控制信

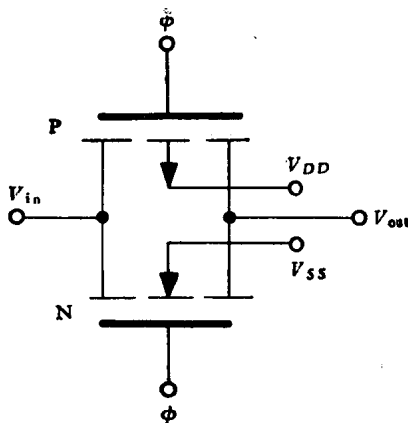


图 1-4 基本单元 CMOS 双向开关

号 ϕ 为高电平 ($\bar{\phi}$ 低电平) 时, 两个管子都导通, 导通电阻一般为几百欧姆; 当控制信号 ϕ 为低电平 ($\bar{\phi}$ 高电平) 时, 两个管子都截止, 截止电阻远大于 $50\text{ M}\Omega$ 。由于 MOS 管结构对称, 源极和漏极可以互换, 因而可以双向传输。输入输出可以互换, 故命名为双向开关。

组成双向开关的 MOS 场效应晶体管的源、漏与衬底之间, 源、漏与栅极之间均有寄生电容存在, 后者的存在将使开关控制信号进入工作回路, 显然是不希望的。在工艺制作时应尽量减少这种寄生电容。

下面给出国产 CMOS 四双向模拟开关 C514, C544, C574 的电路原理图及参数表, 以资参考。其电原理图见图 1-5。

由图 1-5 可见, 它是一个较复杂的组合开关。其中 P_1 , N_1 构成一对互补的传输主开关; P_2 , N_2 , N_3 构成一组辅助开关; 反相器是向 P 沟道管与 N 沟道管提供一对互为反相的开关控制信号。当控制信号 ϕ 高电平时, P_1 , N_1 导通, 开关开启。辅助开关 P_2 , N_2 亦导通, 使 N_1 衬底 B_1 与所要传输的电平 V_{in} 等电位。而当 ϕ 低电平时, P_1 , N_1 及 P_2 , N_2 均截止, 开

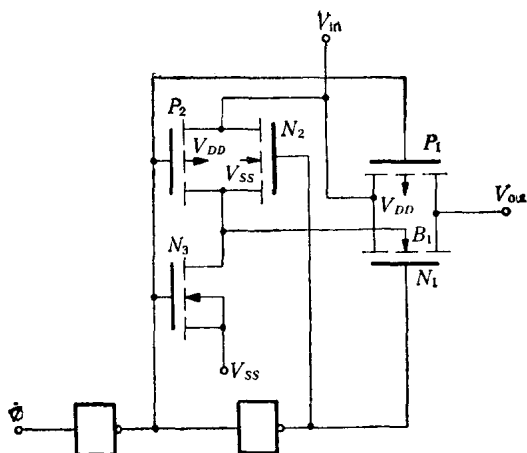


图 1-5 C 514, C 544, C 574 的电原理图 (单个开关)

关关断, 但此时 N_3 导通, 使 N_1 衬底 B_1 与电路中最低电位 V_{SS} 等电位. P_2, N_2, N_3 辅助开关的作用是改善 N_1 衬底偏置效应对传输开关导通电阻的影响. 图 1-5 是四双向模拟开关中的单个开关, 它由五个 MOSFET 及两个反相器组成, 故整个单片中共有二十个 MOSFET 及八个反相器. 其参数典型值如下 (取上海无线电十四厂出厂典型值):

测试条件	$V_{DD} = 10\text{V}, V_{SS} = 0\text{V}, T = 25^\circ\text{C}$
静态电流 I_L	$0.1\ \mu\text{A}$ (85°C 时 $1\ \mu\text{A}$)
电源电压范围	C 514 8—12 V C 544 7—15 V C 574 3—18 V
输入电流 I_{in}	$0.01\ \mu\text{A}$ (85°C 时 $0.1\ \mu\text{A}$)
噪声容限 V_{NL}	3.5 V
导通电阻 R_{on}	$< 500\ \Omega$
导通电阻路差 ΔR_{on}	$< 50\ \Omega$
关态电阻 R_{off}	$> 50\ \text{M}\Omega$

输出延迟时间	50 ns
最高工作频率	>2 MHz
输入电容	1.5 pF

微功耗特性是十分显然的。但在单片 SCF 中,可不必用这种复杂的组合开关,以上只是一个说明。

3. MOS 运算放大器

它是 SCF 中的关键部件。其典型参数为

开环增益	>60 dB
共模抑制比 (CMRR)	>60 dB
电源抑制比 (PSRR)	>60 dB
转移速率 SR	2—10 V/ μ s
功耗	5—15 mW
占芯片面积	0.2 mm ² (一般整片芯片面积约 10—20 mm ²).

四、构成 SCF 的主要起因

SCF 电路的实质是采样数据 (Sample-Data) 系统,它直接处理模拟连续信号。与数字滤波器相比,省去了 A/D、D/A 装置,这也是 SCF 能很快进入应用的原因之一。因此,SCF 虽然在离散域工作,但仍属模拟滤波器之列。

各类 SCF 的设想主要起因于流过电阻器与开关电容的电荷相同。这一点是很自然的,有源 RC 滤波技术已有效地取代了电感器,开关电容技术首先的设想当然是试图用开关电容 (SC) 来取代电阻器。

在开关电容电路中,只有电荷经带开关电容或不带开关电容的传递 (储存、释放等),故分析与综合 SCF 时,使用电荷