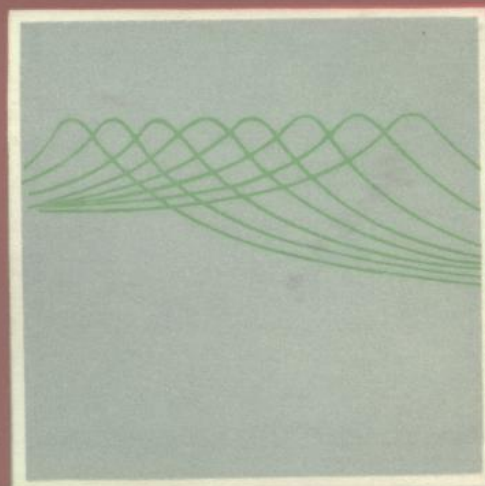


开关电容网络

李兰友 编著 李国荣 审校

KAIGUAN
DIANRONG WANGLUO



开关电容网络

李兰友 编著

李国策 审校

电子工业出版社

内 容 提 要

本书介绍开关电容网络的基本理论、开关电容滤波器的构成方法及开关电容网络的实际应用。全书共七章。第一至三章介绍开关电容网络的基本元件、基本电路、时域频域解析、噪声和动态范围；第四、五、六章详细说明开关电容滤波器的构成方法、典型器件及开关电容网络的实际应用；第七章介绍开关电容网络的计算机解析理论及典型电路的计算机辅助解析。

本书适宜无线电技术、电信、信号处理、自动控制专业大专院校师生和有关技术人员参考。

开 关 电 容 网 络

李 兰 友 编 著
李 国 荣 审 校
责任编辑 王昌喜

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京科技印刷厂印刷

开本: 850×1168 毫米1/32 印张: 10.687 插页: 1 字数: 287 千字
1985年9月第1版 1985年10月第1次印刷
印数: 11200册 定价: 3.10元
统一书号: 15290·92

序

开关电容网络，是近十余年来出现的一种新颖有源网络。它仅由开关、电容器和运算放大器组成。随着金属氧化物半导体集成电路工艺的进展，这些元件可以全部制作在一块硅芯片上，构成单片开关电容滤波器、振荡器等电路、具有价格低、性能好、体积小等优点，因而受到线路与系统的理论家和集成电路制造者的极大重视，最近几年内，已发表了几百篇文章。目前，在理论和设计技术上，渐趋成熟，单片集成的各种电路已经实用，已形成了一个新的分支学科，并在迅速发展之中。

本书作者李兰友同志，曾赴日本进修，与平野浩太郎教授一起专攻有源网络，对开关电容网络尤多研究，回国后即着手编写这本书，本书取材新颖，叙述简明，已在天津纺织工学院讲用，补充了电工和电子学基础教材中的不足，效果良好。本书可供大专院校师生及工程技术人员参考。用书数语，以志介绍。

杜 锡 钰

1984.1

前 言

随着金属氧化物半导体 (MOS) 大规模集成技术的进步,以开关电容滤波器 (Switched-Capacitor Filter) 为中心,一门新的分支学科——开关电容网络逐步形成了它的基本体系。

自 1978 年以来,开关电容网络一直是国际电路理论界广泛议论的话题之一。几年来,已经发表了大量的研究论文,国外开关电容滤波器已经产品化、系列化、商品化,并广泛应用于电话、脉冲编码调制 (PCM) 通讯、信息处理等技术中,引起了通讯机器的变革。同时,开关电容网络在其他方面的应用研究也开展起来,并且不断扩展新的应用领域。

本书在编写过程中,日本神户大学平野浩太郎教授给予了很多支持和帮助,北方交通大学杜锡钰教授为本书写了序言,天津纺织学院康健宁副教授、国防科委莫梧生副研究员也给予了很多指导,在此谨致谢忱。另外,编者所在教研室老师也给予了很多帮助,特致谢意。由于作者水平有限,书中尚难免有许多错误之处,敬希读者教正。

编 著 者

1984. 3.

目 录

概述	1
第一章 开关电容网络基础	3
第一节 构成开关电容网络的主要元件	3
一 MOS 场效应管开关	3
二 MOS 电容	4
三 MOS 运算放大器	7
第二节 开关电容基本电路	11
一 开关电容等效电阻电路	11
二 简单开关电容电路	18
第三节 含有开关电容的网络	24
一 双端口网络	24
二 回转器	26
三 开关电容仿真接地电感	28
参考文献	30
第二章 开关电容网络的时域解析	32
第一节 采样-保持信号	32
一 采样及采样信号	32
二 开关电容网络的信号	34
第二节 基本开关电容电路的差分方程式	36
一 开关电容积分器	36
二 比例器	40
三 开关电容延迟器	41
第三节 低阶开关电容网络的时域解析	45
一 一阶开关电容网络的解析	45
二 二阶开关电容网络的解析	47
第四节 离散状态方程式及其时域解析	53
一 由差分方程式到状态方程式	53
二 时间域的解析	58
参考文献	60

第三章 开关电容网络的频域解析	61
第一节 Z 变换及传递函数	61
一 Z 变换及 Z 反变换	61
二 Z 域传递函数	71
第二节 开关电容网络单元电路及传输参数	74
一 开关电容网络单元电路	74
二 传输参数	81
第三节 灵敏度	86
一 灵敏度的定义及传递函数灵敏度	86
二 Q 灵敏度和 ω_0 灵敏度	88
三 多变量灵敏度	90
四 低灵敏度电路设计	91
第四节 开关电容网络噪声特性和动态范围	92
一 输出噪声	92
二 动态范围	98
参考文献	100
第四章 开关电容滤波器 I	102
第一节 滤波器简述	102
一 滤波器的定义和分类	102
二 无源滤波器	103
三 RC 有源滤波器	107
四 数字滤波器	111
第二节 LDI 变换和开关电容滤波器设计	116
一 LDI 变换	116
二 电路参数的 LDI 变换	118
三 仿真电感开关电容网络	120
四 端接电阻开关电容仿真电路	121
五 开关电容滤波器设计举例	123
第三节 脉耦型开关电容滤波器	126
一 一般设计过程	127
二 实例设计	130
三 典型器件参数及电路	134

第四节	由 RC 有源滤波器设计开关电容滤波器	136
一	由一般开关电容等效电阻电路进行置换	136
二	由双线性变换开关电容等效电阻电路进行置换	137
第五节	电感仿真型开关电容滤波器	143
一	双线性变换开关电容仿真电感	143
二	电感仿真型开关电容滤波器设计	146
第六节	RT 型开关电容滤波器	147
一	模拟元件脉冲电荷开关电容等效电路	147
二	RT 型开关电容滤波器设计	152
三	设计举例	154
第七节	可编程开关电容滤波器	156
一	开关电容滤波器设计	157
二	可编程开关电容阵列设计	160
三	可编程开关电容滤波器实测特性	164
附录	双线性变换和 LDI 变换	166
一	双线性变换	166
二	LDI 变换	169
	参考文献	171

第五章 开关电容滤波器 II173

第一节	方块抽出法设计开关电容滤波器	173
一	由开关电容积分器构成开关电容滤波器	174
二	由开关电容延迟器构成开关电容滤波器	177
第二节	中心频率和带宽独立可调的开关电容滤波器	178
一	二阶带通开关电容滤波器电路设计	178
二	二阶带阻开关电容滤波器电路设计	185
第三节	由单元电路级联构成开关电容滤波器	188
第四节	开关电容积木块	195
一	直接由二阶函数构成的积木块	196
二	开关电容积分器构成的二阶积木块	199
三	开关电容延迟器构成的二阶积木块	204
第五节	多通道开关电容滤波器	205
一	近似 N 通道开关电容滤波器	208

二	N 通道开关电容滤波器严格设计法	210
三	幻 N 通道开关电容滤波器	216
第六节	二维开关电容滤波器初步	222
一	二维采样信号和系统	222
二	可分型二维开关电容滤波器设计	225
三	不可分型二维开关电容滤波器设计	227
	参考文献	231
第六章	开关电容电路应用	232
第一节	典型开关电容滤波器器件及应用	232
一	带通开关电容滤波器	232
二	低通、高通和带阻滤波器	237
三	可编程序滤波	242
第二节	开关电容滤波器典型器件的特性测试	245
一	R5604	246
二	R5609	252
三	R5611	255
第三节	开关电容滤波器实现集成化时的实际问题	257
一	MOS 运算放大器有限增益的影响	257
二	寄生电容及其补偿法	260
三	开关电容滤波器和其他类型滤波器的比较	263
第四节	开关电容振荡器及应用	265
一	梯形移相式开关电容振荡器	265
二	双积分环开关电容振荡器	265
三	连续鉴频振荡器	268
四	开关电容振荡器在调频广播中的应用	269
第五节	开关电容 A/D 变换器	271
一	采样-保持电路	271
二	电荷再分配型 A/D 变换器	272
三	循环比较型开关电容 A/D 变换器	278
	参考文献	281
第七章	开关电容网络计算机解析	282
第一节	开关电容网络时域解析	282

一	一般节点法状态方程式的建立	282
二	电容电压为状态变量的方程式	296
第二节	开关电容网络频域解析	298
一	一般节点法状态方程式的频域解	298
二	状态变量为电容电压的状态方程式的频域解析	307
第三节	开关电容滤波器输出噪声计算机辅助计算	311
参考文献		326

概 述

开关电容网络是由开关、电容和运算放大器构成的一种电路，是近年来随着 MOS 大规模集成技术的进步而发展起来的一个新的分支学科。

开关电容网络是模拟采样-数据处理系统。它是把信号在某一时刻的值，通过周期开关的开断、闭合和电容器保持电荷的机能，将信号进行传输和处理的一种装置。因此，开关电容网络所处理的信号，是采样-保持信号。正如用微分方程描述连续系统，用拉氏变换对连续系统进行频域解析一样，开关电容网络可以用差分方程描述系统，用离散 Z 变换对系统进行频域解析。

开关电容滤波器是由 MOS 开关、MOS 电容、和 MOS 运算放大器构成的一种大规模集成电路滤波器，是开关电容网络的中心。和 RLC 滤波器、RC 有源滤波器相比，开关电容滤波器易于实现单片集成化，适合于成批生产；开关电容滤波器的特性，当时钟频率一定时，仅仅取决于电容比值。采用特种工艺，电容比精度可达到 0.01%，并具有良好的温度稳定性，这也远比 RC 有源滤波器为佳。开关电容滤波器和可集成化的数字滤波器相比，它可以直接处理连续信号而不用 A/D、D/A 变换器，并且和数字滤波器一样，容易实现程序控制。同时，开关电容滤波器的开关驱动脉冲生成电路，也易于和开关电容滤波器电路同时集成在一个芯片上，使用简便。因此，开关电容滤波器成为目前引人注目的一种集成化滤波器。

开关电容滤波器的设计方法是国内外广泛研究的课题之一。它大体上可分为两类：一类是由模拟滤波器通过某种变换，例如，双线性变换、LDI 变换等，将模拟滤波器转化为相对应特性的开关电容滤波器电路。例如，跳耦 (Leap-Frog) 型开关电容滤波器，

RT (Resonant Transfor) 型开关电容滤波器,都属于这一类。这种方法所得开关电容滤波器特性与原模拟滤波器近似,称为近似设计法。另一类是直接由 Z 域传递函数设计开关电容滤波器,如方块抽出法,多通道滤波器等,称为严格设计法。目前,开关电容滤波器设计方法的研究方兴未艾,并且不断地开发着新的设计方法。

开关电容滤波器的设计远比模拟滤波器的设计复杂,并且在具体的设计中,设计者往往需要进行折衷选择。一般希望所设计的电路采用元件少,占用芯片面积小,滤波器特性对寄生电容不灵敏,低噪声、动态范围大, Q 值高,灵敏度低等。其中,最受设计者注目的是运算放大器有限增益带宽对滤波器性能的影响,噪声及其抑制等方面。利用电子计算机对设计的电路进行辅助设计和分析,已成为设计开关电容滤波器的重要方法之一。已经开发了大量软件供设计者使用。

开关电容滤波器也有它的局限性。这主要表现在 MOS 运算放大器的运用频率范围不宽,因而目前开关电容滤波器尚只限于在低频运用。随着 MOS 工艺的进步,特别是开发新型的不用运算放大器的电路,开关电容滤波器向高频发展是有潜力的。

除了开关电容滤波器外,利用开关电容网络也可以构成 SC 振荡器、A/D、D/A 变换器等。随着对开关电容网络的深入研究,它的应用领域也越来越广。

近几年来,国外开关电容网络的研究发展很快。我国也已经开始研究,一些大学已经开始讲授这门课程。开关电容滤波器正在试制之中,预计不久将批量生产,随之而来的应用研究将是一个广阔的天地。

第一章 开关电容网络基础

本章主要介绍开关电容网络的基础知识。第一节叙述构成开关电容网络的基本元件——MOS 开关、MOS 电容和 MOS 运算放大器；第二节叙述几种最基本的开关电容电路及其工作原理；最后，简单叙述含有开关、电容网络的解析知识。

第一节 构成开关电容网络的主要元件

利用 MOS 工艺制作的开关电容网络，主要是由 MOS 开关、MOS 电容和 MOS 运算放大器等三种元件构成的。下面讨论构成开关电容网络(以下简称“SC 网络”)时必须考虑的元件主要特性。

一 MOS 场效应管开关

MOS 场效应管可以作为开关元件来使用。例如，在图 1.1 所示的 N 沟道增强型场效应管的栅极上加正电压(大于 V_T)，则漏、源之间可视为导通；反之，如果在栅极上加零电压或负电压，则漏极电流 I_D 几乎为零。因此，当在栅极上施加正负交替的脉冲电压时，则漏极电流时通时断。这时，MOS 场效应管的动作与开关动作相似。

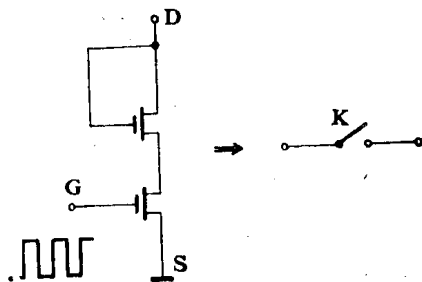


图 1.1 MOS 场效应管开关

和普通晶体管用作开关时一样，MOS 场效应管开关和理想开关还是有差别的。它的导通阻抗不为零而有数十至数百欧姆的导通电阻；断开时由于泄漏

电流的存在,阻抗也不是无穷大;并且由于寄生电容的影响,开关速度亦受一定限制。

作为网络的开关元件,希望 MOS 场效应管导通时电阻小,断开时电阻大。随着 MOS 工艺的进步, MOS 场效应管开关的导通电阻已经下降到百欧以下。例如,国产 MOS 开关场效应管 3DOK-B,当 $V_{GS} = 10V$, $I_{DS} = 2mA$ 时,导通电阻 R_{on} 小于 50Ω ;另外,场效应管的源极、漏极与衬底及栅极之间,都存在寄生电容。采用自对准现代 MOS 工艺,可使得这些寄生电容的数值极小,约为 10 mpF 左右。漏栅寄生电容的存在会导致开关驱动信号进入网络,这是我们不希望的。国产双栅 MOS 场效应管 4DO1E 的 $C_{G,D}$ 约为 0.05 pF 左右。利用电荷抵消电路技术,还可以使寄生电容的影响进一步减小。

几种常用的国产 MOS 开关场效应管主要参数如表 1-1 所示。

表 1-1 常用国产 MOS 开关场效应管

型 号	开态电阻 Ω	栅电容 pF		低频噪声 NFL dB	备 注
		C_{GS}	C_{GD}		
3DO3E-A	≤ 25	< 10	< 10	≤ 3	N 沟道
3DOK-B	≤ 50	< 5	< 1.5		
3DOKG-B	< 70	> 2.5	< 0.8		
4DO1E		< 0.5	< 0.05		双栅
3CO3E	≤ 50	< 15	< 15		P 沟道
3CO3E-A	≤ 50	< 15	< 15		

二 MOS 电 容

MOS 电容有两种构成方式。最简单的一种是用 MOS 技术制作的接地电容,其结构剖面图如图 1.2 所示。图中,金属板为电容的一个电极,N 型半导体为电容的另一电极,中间的二氧化硅膜和耗尽层为介质。其电容量 C 可写为:

$$C = A \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} \quad (1-1)$$

式中, A 为两个电极相对应部分的面积, ϵ_r 为介电系数比, ϵ_0 为介电系数。 d 表示介质的厚度。从式 (1-1) 中可以看出, 这种 MOS 电容的大小与极板面积 A 成正比, 与介质厚度 d 成反比。因此, 在具有小衬底面积的单片集成电路中制作大容量的电容是困难的。这是因为要想增大电容量, 在衬底面积限定的条件下, 只有减小介质厚度, 这样将导致介质内的电场强度增大, 从而降低了器件的耐压。

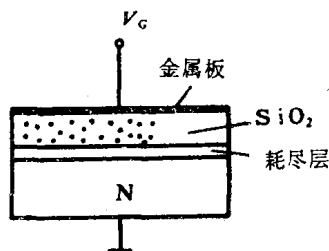


图 1.2 接地 MOS 电容

另外, 这种 MOS 电容的大小还与外加电压 V_G 有关。当栅压 V_G 为正时, N 型半导体表面上聚集电子, 耗尽区厚度几乎为零, 这时电容量最大; 当栅压 V_G 为负时, N 型半导体表面上的耗尽层加宽, 从而导致电容量变小。

图 1.3 (a) 是在硅衬底表面上, 以二氧化硅膜为介质的非接地 MOS 电容的结构剖面图。这种电容器也是平板电容器。上极板是金属膜, 下极板由 N^+ 扩散区构成, 介质是二氧化硅膜。如果忽略边缘效应, 这种电容器的电容量仍可由式 (1-1) 计算。不过一般的下极板面积比上极板大, 因此式中的 A 应取上极板面积。图 1.3 (b) 为其等效电路图。

同样, 电容量的大小也与外加电压有关。当在电容器的两个极板上加上电压 V 时 (上极板取电源正), 其典型电容-电压特性如图 1.3 (c) 所示。当外加电压为正时, 电容量几乎不变, 其大小可由式 (1-1) 计算; 当外加电压为负时, 则电容量与外加电压大小有关。

还应该指出, 这种 MOS 电容的两个极板和衬底之间存在有寄生电容。例如, 在图 1.3 (a) 中, 下极板与衬底间的寄生电容 C_{PB}

约等于 MOS 电容值的 5~20%，上极板与衬底间的寄生电容 C_{TB} 约为 MOS 电容值的 0.1~1%。因此，在将 MOS 电容纳入 SC 网络时，必须考虑 C_{PB} 及 C_{TB} 的影响以及它们之间容量值的极大差异。

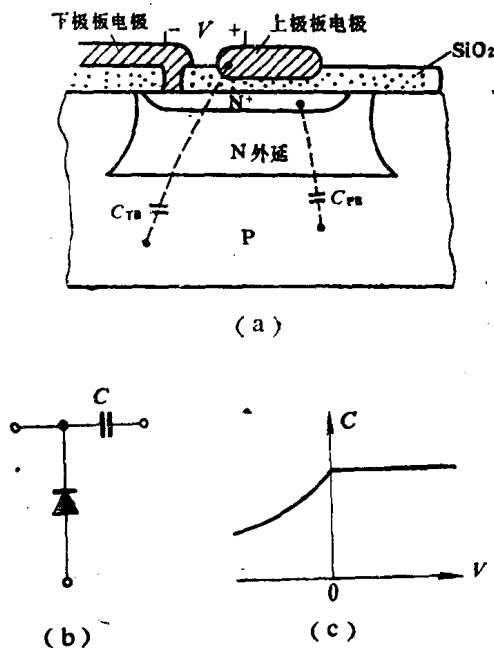


图 1.3 非接地型 MOS 电容

(a) 结构示意图 (b) 等效电路
(c) 典型电容-电压特性

对于开关电容滤波器来说，传递特性只与电容量的比值有关。因而，滤波器传递特性的精度取决于电容量比值的精度。电容比值的精度与所使用的电容面积、制版精度及工艺条件有关。为了提高电容比的精度，在工艺上采取了种种方法。例如，采用同质心版面设计、恒定的电容面积周长比以及环绕电容极板的均匀刻蚀宽度，可使得电容比的精度达到 0.02~0.3%。

MOS 电容随温度的变化率约为 $(2\sim5)\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，随电压的变

化率约为 $(1\sim 10)\times 10^{-5}/\text{伏}$ 。但由此所引起的误差是微不足道的。

图 1.4 是一个实验用 MOS 电容阵列的显微照片。在金属膜和重掺杂硅之间，以热生成的二氧化硅层为介质形成了 10 个具有精密比值的 MOS 电容。图中最外部的“括号对”是最大电容的顶板，其电容量约为 120 pF。由外向内依次每一个电容的容量是前一个的二分之一，一直到最里层第 10 个电容为最大电容的 $1/512$ 。实际测量结果表明，每个电容同整个阵列电容的比值误差小于 0.1%。衬底面积为 2.5×2.5 平方毫米。

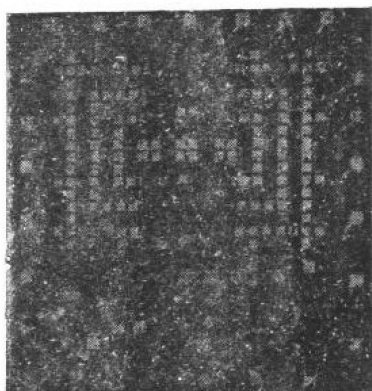


图 1.4 MOS 电容阵列显微照片

三 MOS 运算放大器

(一) MOS 运算放大器

MOS 运算放大器是开关电容网络的关键元件。目前，已经生产有多种规格的 MOS 运算放大器。典型的 MOS 运算放大器一般由输入级、驱动级和输出级组成，如图 1.5 所示。输入级为差动放大级，驱动级常包含有频率补偿电路，整个 MOS 运算放大器的增益主要取决于这两级放大器。输出级的电压增益一般近似为 1，通称为缓冲放大器。

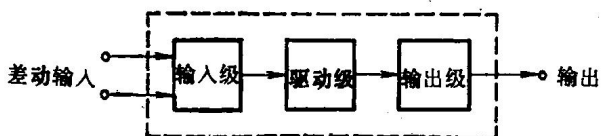


图 1.5 MOS 运算放大器构成简图