

信号处理用模拟 MOS集成电路

[美] R. 格利高林 著 杜锡钰 王文煊 张世演 译
G. C. 特密斯

人民邮电出版社



邮电高等学校参考教材

Analog MOS Integrated Circuits For Signal Processing

Roubik Gregorian
Gabor C. Temes

1986

John Wiley & Sons, Inc

内 容 提 要

本书介绍模拟MOS集成电路的工作原理、设计和应用，并讲解了开关电容滤波器、模一数与数一模变换器、放大器、调制器、振荡器等应用实例。

全书分八章，前三章阐述了关于模拟MOS集成电路的一般性知识以及学习后续各章所必需的数学和半导体器件物理基础；其余几章讨论了具体电路设计中的各种实际问题及其解决方法，还给出了一些系统应用范例。每章末附有足够的习题。这些习题既有助于读者复习巩固本章所学的内容，也可为设计作参考使用。

本书主要供大学本科高年级学生、研究生以及工程技术人员阅读。

邮电高等学校参考教材

信号处理用模拟 MOS 集成电路

[美] R 格利高林 著
G. C. 特密斯

杜锡钰 王文煊 张世演等译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京交通印刷厂印刷

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 1989 年 12 月 第一版

印张 20 28/32 页数: 334 1989 年 12 月北京第 1 次印刷

字数: 555 千字 印数: 1 万 1200 册

ISBN 7-115-04086-9/TN·280

定价: 4.70 元

译 序

随着MOS集成技术的发展,由于电感和电阻难以集成,所以人们对于采用MOS电容、开关和运放来组成网络的研究便日益重视并取得重大成果。目前开关电容网络除已经广泛用于滤波方面外,也开始用来作A/D或D/A变换器、压控振荡器、编译码电路、双音复用拨号电路以及语言处理和识别器等方面。

然而,专门介绍开关电容网络的书籍尚不多见,最近Gregorian和Temes两博士合编的《信号处理的模拟MOS集成电路》一书的出版,正适合目前的需要。该书立论严谨、叙述全面、深入浅出,有一般电路与网络理论基础的读者,便可阅读。尤其是两作者都有丰富的实践经验,他们的宝贵经验在本书中得到了很好的反映。

此书在出版前曾以讲义方式,多次在欧美许多学校、工厂讲过并获得好评。鉴于我国对集成电路的研制工作正在兴起,研究集成电路的同志日益增多,同时还考虑到一些高等院校讲授这方面课程的需要,我们将此书及时译成中文,介绍给国内的学者和工程技术人员,希望有益于他们的工作。

本书的翻译工作是在杜锡钰教授主持下完成的,王文焯教授对全书作了认真细致的校核,参加翻译工作的有杜锡钰、王文焯、张世演、吴景堂、籍义忠、裘正定。由于我们水平有限,译文中难免有错误和不妥之处,希望读者批评、指正。

序 言

本书的目的是讲述模拟MOS集成电路的工作原理,并向读者讲授如何设计和使用这类电路。这些器件的例子包含开关电容滤波器,模一数与数一模变换器、放大器、调制器、振荡器等。主要重点放在物理运用与设计过程。希望本书将用作大学中电气工程课程的高年级或研究生水平的教科书,也可作为工业电路设计者的培训教材与参考资料。作为课堂教学用的教科书,为了提高本书的教学效用,每章末均附有大量习题,这些习题可供课外作业之用。为了增强本书作为设计参考的价值,书中给出了各种表格与数值设计例题,以便讲清逐步过程。前三章是模拟MOS集成电路的一般特性、所需要的数学以及半导体器件物理的基础,提供了简明的、基础的并且(希望是)清楚的讲述。其余各章则着重介绍实际电路的设计、遇到的实际问题及其解决方法,以及系统应用的一些示例。

本书是由为短训班课程而写的一套讲稿演绎而成的。自1979年起,这些短训班课程每年都要在美国,西欧开设几次,如在洛杉矶加利福尼亚大学(UCLA)、瑞士联邦技术学院、斯图加特(Stuttgart)大学等公开讲授,并通过洛杉矶继续教育学院开设,作为高技术半导体、通信与计算机等公司的内部在职培训课程。后来,这些材料便形成了在洛杉矶加利福尼亚大学开设的模拟MOS集成电路的研究生课程的基础。因此,这些材料的组织就受到需要的影响,使其形式适合各种不同基础读者的需要。因此,曾作出努力使本书合理地自成体系,并以最初级的水平叙述所讨论的问题。对读者来说,只需要有限的准备:本科三年级的数学,并且最低要求学过一或两门关于电子学与半导体物理的入门课程。

本书的来源也影响到内容的仔细选择。因为原来的短训班课是为训练工业工程师设计模拟MOS电路开设的,理论的讨论只限于实际设计过程的最低要求。此外,当为了完成某一任务,有许多设计

技术可供使用时，本书只讨论在实际应用中最广泛试验过的一种。因此，必然会略去许多巧妙而有效的设计步骤。

两位作者都有相当多的工业生产经验，也有多方面的教学基础，我们希望这些经验在我们着手处理问题时是可以感觉得到的。

本书共有八章。第一章对开关电容电路做了基本介绍，把模拟MOS电路与其它信号处理器的实现方法做了比较，并讲了一些典型应用（但未做详细叙述）。这些内容能在一讲完成（这里一讲设想是两小时，以下各章均为一讲两小时）。

第二章描述拉氏、傅氏与Z变换，并介绍从某个模拟“模型”设计一个抽样—数据系统所需要的最重要的S—Z变换。这些内容需二到三讲，依学生的数学基础而定。

第三章扼要叙述MOS器件的物理，讨论MOSFET的线性化模型，叙述MOS电容器与开关。还简要地叙述制作MOS器件所用的技术。同样，依读者基础的不同，用二或三讲足以讲完本章内容。

第四章讨论实现MOS运算放大器的电路设计技术。包括最普遍的电路结构，以及这些电路的设计和它们的局限性，并详细地给出一个设计例子。讲完本章的全部内容约需五讲。若限制某些讨论，省去诸如4.10、4.11与4.13等节中讨论的一些特殊课题，并将设计例子留作自学，则讲课时间可以减少。

第五章研究开关电容滤波器的设计，因此是本书的焦点。正如以前提到的，讨论的设计技术限于“主流”的一个，也就是在实际应用中经过彻底检验的那一个。详细地讨论两种常用结构（级联与梯型电路）的设计，并以一数值设计举例来加以说明。这一章还讲了一些特殊电路，如开关电容N-通道滤波器与模拟电阻有源RC滤波器。讲完本章全部内容约需五讲，如取消5.8与5.9节，五讲可减到三讲。

第六章讨论开关电容电路的非滤波应用。收入门的水平讨论如电压放大器、数模与模数变换器、比较器、调制器、振荡器等这样一些重要的电路。讲完全部内容可能需要四讲；如果压缩6.3与6.5节

的详细讨论，能用两讲完成。

第七章详细讨论发生在开关电容电路中的非理想效应。这些内容对实际电路的设计者是十分重要的（尽管它看上去是十分普通的课题），因此甚至于在本科生的课程中也应做扼要的叙述。用两讲课做简明的讲解应该足够。

第八章讨论某些模拟MOS信号处理器的系统方面的问题，并说明它们在商用集成电路系统中的应用。前两节讨论模拟MOS电路的预滤波与后滤波的必要性，必须在课堂上讨论。本章其余部分以说明性文字讨论了一些特殊应用，因而能留作自学。因此本章内容可用一讲或两讲讲完，依如何处理应用例题而定。

这样，讲完本书全部内容需要多到25讲（每讲二小时）或少到16讲，依讲解的深度而定。在集中讲授时（如短课程或培训课程），全书曾用每天讲六小时，四天完成。

感谢我们的同行杜锡钰、S.C.Fan、B. Fotouhi、B. Ghaderi、S. Law、K.Martin、T.Cataltepe和H.J. orchard等诸位博士，以及我们的学生J.N.Babanezhad、F.Dunlap、T. H. Hsu、L. Larson、J. B. shyu与F.J.Wang对本书的讨论、评论和批评。Loetitia Loberman女士完成了大部分困难的打字工作。感谢她卓越的、辛苦的帮助。绘图工作是由洛杉矶加利福尼亚大学电气工程系Kayvan Abolhassani先生杰出地完成的。最后，要对我们的妻子表示我们的感谢，因为她们在我们写作本书期间承受了缺乏照顾的困难。

R.格利高林

G.C.特密斯

1986. 2

目 录

第一章 导论	1
1. 1 模拟MOS集成电路在信号处理中的应用	1
1. 2 模拟MOS信号处理器与其它实现方法的比较	6
1. 3 模拟MOS信号处理电路与系统的示例	11
习题	20
参考文献	21
第二章 变换方法	22
2. 1 模拟、数字和抽样—模拟信号和系统	22
2. 2 拉普拉斯变换	27
2. 3 傅里叶变换	33
2. 4 抽样和Z变换	34
2. 5 抽样数据信号的频谱	42
2. 6 从连续时间模型设计抽样数据滤波器	47
习题	65
参考文献	68
第三章 作为电路元件的MOS器件	69
3. 1 半导体	69
3. 2 MOS三极管	74
3. 3 MOS三极管种类; 体效应	81
3. 4 MOSFETS的小信号运用和等效电路	85
3. 5 MOS电容器	91
3. 6 MOS开关	99
3. 7 MOSFETS中的噪声	102
3. 8 模拟MOS制造工艺	106
习题	126
参考文献	129

第四章 MOS运算放大器	130
4. 1 运算放大器	130
4. 2 MOS制造工艺中的偏置电路	135
4. 3 MOS增益级	142
4. 4 MOS源极跟随器和输出缓冲器	151
4. 5 MOS差动放大器	157
4. 6 MOS放大级的频率响应	167
4. 7 未补偿的CMOS运算放大器	179
4. 8 稳定性理论与CMOS放大器的补偿	185
4. 9 补偿的CMOS运放的频率响应、瞬态响应与摆速	195
4. 10 CMOS放大器的噪声特性	200
4. 11 增强型NMOS运算放大器	203
4. 12 具有耗尽型负载的NMOS运放	211
4. 13 NMOS运放的噪声特性	222
4. 14 MOS运放设计中的实际考虑	224
4. 15 运放的设计方法和举例	239
4. 16 高性能CMOS运算放大器	263
习题	278
参考文献	284
第五章 开关电容滤波器	285
5. 1 集成滤波器	285
5. 2 开关电容积分器	290
5. 3 杂散不敏感积分器	298
5. 4 二阶节; 级联滤波器的设计	301
5. 5 开关电容梯型滤波器	317
5. 6 开关电容滤波器的定标	365
5. 7 设计举例	377
5. 8 开关电容N通道滤波器	391
5. 9 采用MOSFET电阻器的集成有源RC滤波器	417

习题	437
参考文献	442
第六章 开关电容电路的非滤波应用	444
6. 1 开关电容增益级	444
6. 2 程控电容阵列: 数字—模拟和模拟—数字变换器	451
6. 3 MOS比较器	460
6. 4 调制器、整流器和检波器	474
6. 5 开关电容振荡器	485
习题	495
参考文献	501
第七章 开关电容电路中的非理想效应	503
7. 1 开关的非理想效应	503
7. 2 电容的不精确性	516
7. 3 非理想运放的影响	526
7. 4 开关电容电路中产生的噪声	545
7. 5 开关电容电路的布局考虑	559
习题	571
参考文献	576
第八章 系统研究和应用	577
8. 1 开关电容滤波器的预滤波要求	577
8. 2 开关电容滤波器的后滤波	586
8. 3 开关电容电路在数字电话传输系统中的应用	593
8. 4 开关电容电路在数据调解器中的应用	609
8. 5 开关电容滤波器在单音信号接收器中的应用	613
8. 6 可编程开关电容滤波器	620
8. 7 语音处理中开关电容电路的应用	625
习题	639
参考文献	642
中英名词对照	644

第一章 导 论

本章介绍开关电容起模拟电阻作用的基本概念。也简要地讨论了开关电容电路的一些物理特性，然后，比较了开关电容电路的信号处理器与一些其它器件，如分立模拟电路，数字滤波器与模拟双极集成电路，最后，给出几个采用MOS模拟信号处理技术的电路和系统的代表性示例，以说明这类电路在电信系统与有关应用中的巨大潜力。

1.1 模拟MOS集成电路在 信号处理中的应用¹⁻⁴

电信号处理器一般分为两类：模拟系统与数字系统。模拟系统以电压、电流、电荷等形式传递信号，它们是连续时间变量的连续函数。音频放大器、无源或有源RC滤波器等是模拟信号处理器的一些典型例子。相反，在数字系统中，每一信号用一系列数表示，因为这些数只能包含有限数目的数字（典型的是以二进制数字或比特形式的编码），它们只能取离散值。而且，这些数是在离散时间上取得的信号的抽样值。故而，数字信号的自变量与因变量均为离散量。因为数字比特的处理常常是同步进行，所以定时或时钟电路是数字系统的重要部分。时钟电路提供一个或更多的时钟信号，每个时钟信号都包含有精确的定时脉冲，使系统各组成部分的工作同步或运行。数字系统的典型例子是通用数字计算机，或专用的计算机，例如专用于用快速傅里叶变换（FFT）计算信号的傅里叶变换，或用于语言分析的数字滤波器等的计算机。

本书讨论的大部分电路是介于上述两种主要类型之间，属于抽

样数据模拟系统类。对于这样的系统，像模拟系统一样，信号是用未编码的电量（通常是用电压）振幅来表示。然而，此系统包含一个时钟，如在数字系统一样，信号振幅只在离散的时间瞬刻被测出。在研制本书所讨论的MOS电路之前，最重要的抽样数据模拟系统是电荷转移器件，如电荷耦合器件（CCD）与斗链式器件（BBD）。在这些器件里，信号振幅是用从元件到元件转移的电荷量来表示的。除了极少数例外，这些器件不包含反馈回路，它们本质上是非递归的，所以它们更适于那些不需要准确地控制极点和零点的器件（对比一般频率选择滤波器来说），例如抽样数据迟延线、复用器、相关器等这类的应用。此外，它们需要特殊的制造技术，而不是制造数字MOS电路的标准MOS工艺，并且通常需要某种特殊的外部（输入与输出）电路。因这些原因，它们的用途限于比较少数的大公司，在那里，所需要的特殊设计基础与技术都能得到发展与维持。

相反，本书所研讨的电路能够采用标准数字MOS技术来制造，因而能与数字电路放在同一芯片上。这后一点非常重要，例如，在现代电信系统里，常常需要在同一功能块里同时具有模拟与数字功能。又，这些电路只包含少数标准的构成块：放大器、开关、电容器和偶尔包含电阻器。一旦这些构成块研制出来，并在局部现有技术方面标准化了，那么，只要用略微不同的结构或不同的大小就能适应大量的应用。

要了解模拟MOS电路最常用结构的基本概念，可设简单的模拟传递函数为：

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{b}{s^2 + as + b} \quad (1.1)$$

很容易证实图 1.1(a)的RLC电路能实现这一函数（题 1.1）。虽然这个电路容易设计、制造与测试，但在电路中出现的电感器使得它不能以集成形式来制造。事实上，对于低频应用，此电路有可能需要数值很大从而体积庞大的电感器与电容器。为了解决这个问题，设计者可以决定采用有源RC电路来实现所需要的传递函数。可以很容

易地证明, 采用三个运算放大器的图 1. 1(b)电路就能够提供式(1. 1)表明的传递函数。以电路不需要电感器, 可以用小型的分立元件实现很多的不同要求 (题 1. 2)。然而, 结果表明虽然原则上可以把这种电路集成在一个MOS单片上 (因为所需放大器、电阻器与电容器都能被集成), 但集成时仍有一些主要的实际阻碍。这些阻碍包括RC元件需要极大芯片面积, 同时这些元件需要严格的准确度和稳定度。这些要求不能很容易地由集成元件来满足, 因为电阻与电容元件的制造值以及温度引起的变动都不互相协调。对大多数应用来说, 这样产生的零一极点的变动都太大了 (此问题将在第五章 5. 1 节中详细讨论)。

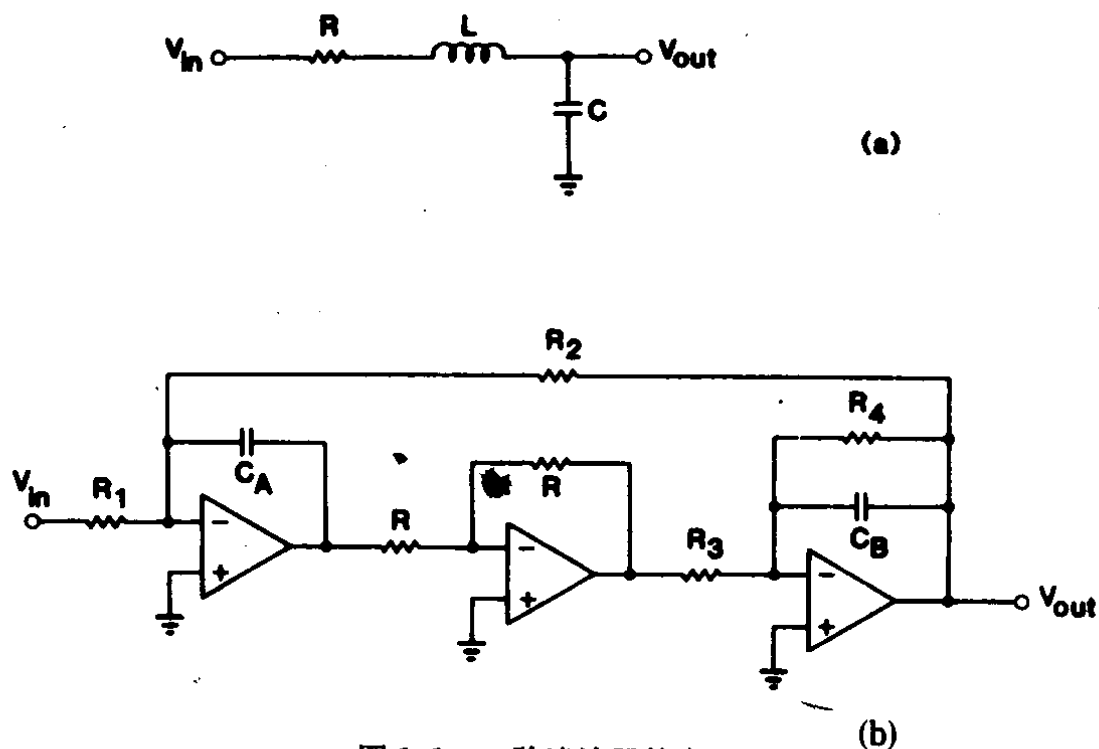


图 1.1 二阶滤波器的实现

(a) 无源电路 (b) 有源RC电路

一个能同时解决面积与匹配问题的有效措施就是用一个电容器和几个开关的组合起来代替电路中的各个电阻器。参看图 1. 2 所示的支路。图中, 四个开关 S_1 、 S_2 、 S_3 与 S_4 以远快于终端电压 v_A 与 v_B 变动的速率周期地打开和关闭。开关 S_1 与 S_4 彼此同步工作, 但与 S_2 和 S_3 反相。这样, 当 S_2 与 S_3 关闭时, S_1 与 S_4 打开, 或者反过来。当

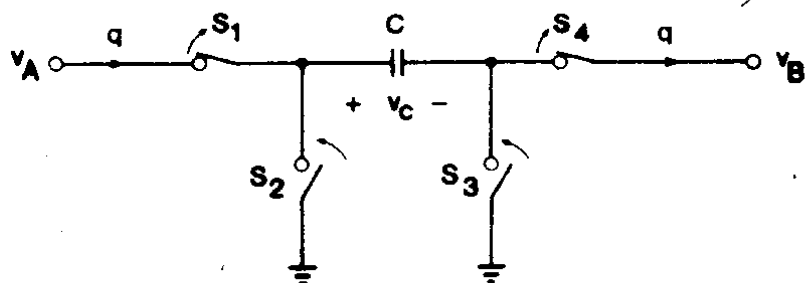


图 1.2 以开关电容实现电阻支路

S_2 与 S_3 关闭时, C 放电。下一步是 S_2 与 S_3 打开, 而 S_1 与 S_4 关闭, C 重新被充电到电压 $v_C = v_A - v_B$ 。这就使得电荷 $q = C(v_A - v_B)$ 流经图 1.2 的支路, 然后, C 又一次被 S_2 与 S_3 放电。如果这样循环每 T 秒重复一次 (T 是开关周期或时钟周期), 则流经支路的平均电流为

$$i_{av} = \frac{q}{T} = \frac{C}{T}(v_A - v_B) \quad (1.2)$$

故 i_{av} 与支路电压 $(v_A - v_B)$ 成比例。相仿, 对于一个包含电阻器 R 的支路, 得支路电流为 $i = \frac{1}{R}(v_A - v_B)$ 。所以, 如果掌握好关系式 $R = \frac{T}{C}$, 则流经这两个支路的平均电流是相同的。

所以可以说, 能用图 1.2 支路来代替图 1.1(b)电路中的所有电阻器。所得结果示于图 1.3。在此电路内, 属于不同“电阻器”但起同一作用的开关已经合并。此外, 图 1.1(b)中的第二个运放 (op-amp) 仅仅作倒相器用, 已被取消, 这是可以的, 因为只要改变与电容器 C_3 相连的两个开关的相位, 没有这个运放也可以完成所需要的倒相。从图 1.1(b)的电路变换到图 1.3 电路的细节在第五章 5.4 节讨论。

图 1.3 说明, 变换后的电路只包含电容器开关与运放。新电路的主要优点是, 所有时间常数由过去难以控制的 RC 乘积决定改为用 $(\frac{T}{C_1}) C_2 = T (\frac{C_2}{C_1})$ 形式表示。这里, 时钟周期 T 一般由石英晶体控制的时钟电路来确定, 因此是很准确与稳定的。时间常数中的另

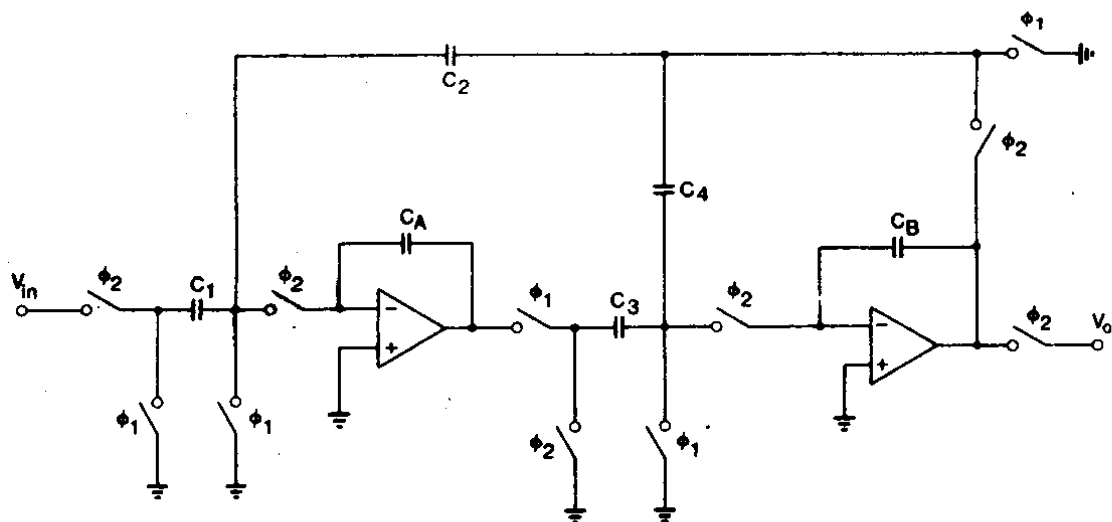


图 1.3 二阶开关电容滤波器节

一个因式是 $\frac{C_2}{C_1}$ ，也就是片内两个MOS电容的比值。在设计这些元件时，运用一些简单规则(在 3.5 节叙述)，就可能使这个比值得到数量级为 0.1% 的准确度与稳定度。所得总的准确度比起用一片内电阻器与电容器作RC时间常数能达到的准确度至少要好一百倍。

无源元件所需的面积也达到了惊人的改进。为了达到在音频段(例如 10 krad/s) 内的时间常数，甚至于在用了一个大电容器 (10 pF) 后，还需要一个 10 MΩ 的电阻。这样一个电阻器将占约 $10^6 \mu\text{m}^2$ 的面积，这是非常大的，约占一个平常芯片的 10% 面积。相反，用 10 μs 的周期，实现一个 10 MΩ 电阻器的开关电容电路中的电容为 $C = \frac{T}{R} = \frac{10^{-5}}{10^7} = 10^{-12} \text{F} = 1 \text{pF}$ 。为实现这个电容所需面积约为 $2500 \mu\text{m}^2$ ，仅为它所代替的电阻器所需面积的 0.25%。

用图 1.3 所示的三种元件(运放、电容器与开关)，大量的信号处理电路能够放在单一芯片上。一个高质量的运放能够在 5×10^4 到 $10^5 \mu\text{m}^2$ 面积上制成，而一个开关一般只需约 $50 \mu\text{m}^2$ 的面积。因为一个大芯片的面积约为 $5 \times 10^7 \mu\text{m}^2$ ，这样的芯片能容纳约 100 个运放、300 个电容器及 500 个开关。从能实现式 (1.1) 二阶传递函数的图 1.3 电路推出，这样的芯片的信号处理能力足以能实现总阶次

为 100 的传递函数。事实上，由于低频时运放能够时分（多路复用），还可以实现更高阶的函数：最近提出了一个语言分析器芯片⁵，它除了实现大量的片内数字电路以外，还实现了总共具有 308 个极点的开关电容滤波器！

除去为频率选择滤波已广泛应用的图 1.3 介绍的开关电容（SC）电路外，这样的电路还能有许多其它功能。其中包含模数（A/D）与数模（D/A）的数据变换；为自动增益控制（AGC）及其它应用的可编程增益放大；以及一些非线性运用，如乘法、调制、检波、整流、零交叉检测等等。它们也广泛地被用于大的混合模拟—数字系统，如编译码器、调解器与语言处理器。由于元件、特别是运放的质量（带宽、动态范围等）的改进，以及引入更好的电路技术，可以期待应用范围将进一步扩大。

1.2 模拟MOS信号处理器 与其它实现方法的比较

在一些应用领域内，模拟MOS信号处理器能与早先的信号处理系统的实现方法竞争、甚至于占优势，明确这些应用领域是重要的。为此，下面列举了模拟MOS（典型为开关电容）电路的一些特色，并与其它实现方法进行了比较。

1. 开关电容电路是集成电路 这个特性对于它的应用的经济性有深远的影响。这样一个电路的研制（理论设计、计算机模拟、电路设计与制造，测试与排除故障）需要一个或更多人一年的综合初始设计努力，费用为 50,000 美元以上。在这笔初始费用以后，器件能以低的单位价格，例如 5 美元以下来大量生产。因而，与价格如为 15 美元、设计费用可以忽略的分立实现方式相比较，只有在不等式

$$50,000 + 5N < 15N \quad (1.3)$$

成立时，集成实现方式才是经济的。式中，N 是需要的器件总数。按此式得 $N > 5,000$ 。很清楚，实际的数字与经验、设备、应用等等有

关，但是所给数量级是够有代表性的。

有关SC电路的集成电路 (IC) 特性的其它特点是体积小、重量轻、高可靠性及需要小的直流偏置功率。这些，例如在宇航应用方面就很重要。

2. 开关电容电路是抽样数据系统 如前所述，在SC电路里，信号值只是在周期瞬刻计出的，而抽样周期是由一晶体控制的时钟来确定。这一特点，便可能使所有极点与零点值仅与电容比有关（而不是绝对值），这就可以实现准确度与稳定性良好的高选择性响应。由于只用信号的周期性的抽样，就可能在几个信号信道间，来时分（复用）整个电路或电路中运放等部件，导致高效率的多信道系统。

最后，一个SC电路的所有时间常数正比于时钟周期 T 。结果，改变钟频 $f_c = \frac{1}{T}$ ，即可对总的增益频率响应 $H(f)$ 进行定标。作为说明，图 1.4 给出一个SC带通滤波器对于两个不同钟频的响应。很清楚，将 f_c 值从 f_{c1} 变到 $2f_{c1}$ ，只是以同一因数2在水平方面扩展响应曲线。这个特性对于电压控制振荡器(VCO)、自适应滤波器、统调滤波器等响应曲线的细调是有价值的。

电荷转移器件如CCD与BBD，以及数字滤波器也具有上述特点（时钟控制的抽样数据运用），但其他常用的信号处理器的实现则不然。

3. 开关电容电路是模拟系统 虽然它们有抽样数据特性，但SC电路仍以模拟方式处理信号，故信号值是被抽样的电压振幅，不进行任何编码。这就使得信号处理中需要的基本运算（乘法、加法、迟延）比在数字电路里更易于进行。故在芯片上运算的密度远比数字信号处理器时为高。不用任何复用，单一芯片上能容纳100个以上极点的线性滤波器节。

由于SC系统的电路简单，信号处理的速度高于数字系统，现在高到0.5 MHz信号的实时滤波已经可能，随着技术与设计的改进，这个数字还在继续上升。