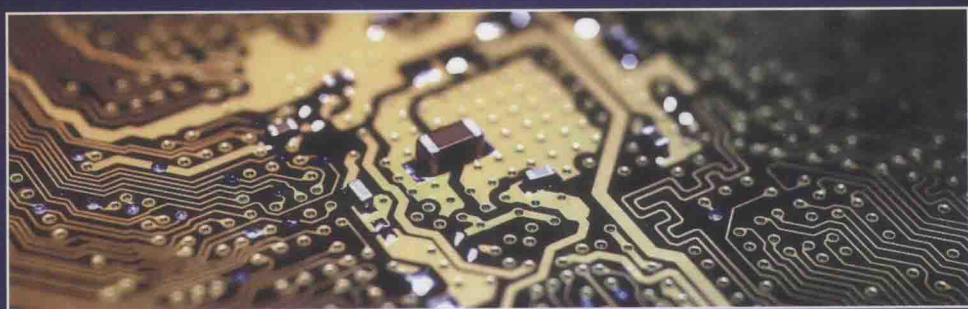


Introduction to  
CMOS OP-AMPS and Comparators

# CMOS 运算放大器和比较器的 设计及应用



[ 美 ] Roubik Gregorian 著  
黄晓宗 译



科学出版社

# CMOS 运算放大器和 比较器的设计及应用

〔美〕Roubik Gregorian 著

黄晓宗 译

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要介绍 CMOS 运算放大器和比较器的设计与应用,以及在设计过程中所遇到的实际难题和解决方法。本书共分 8 章,内容包括:MOS 晶体管、CMOS 模拟集成电路的基本模块、CMOS 运算放大器设计、比较器设计、数模转换器设计、模数转换器设计、工程考虑和设计实例等。为了进一步满足工程设计参考的需要,书中包含了大量的表格和数值计算过程,清晰明了地说明了设计的每个步骤。

本书可供工院校电子专业师生阅读,也可供电路设计工程师参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

CMOS 运算放大器和比较器的设计及应用/(美)Roubik Gregorian 著;  
黄晓宗译. —北京:科学出版社,2014.7

书名原文:Introduction to CMOS OP-AMPs and Comparators

ISBN 978-7-03-040622-4

I. C… II. ①R…②黄… III. ①CMOS 电路-运算放大器-电路设计  
②CMOS 电路-比较器-电路设计 IV. ①TN432.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 099174 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:杨安安

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京画中画印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 7 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 7 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 500 字数:353 000

定 价:52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



All rights reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled introduction to CMOS OP-AMPs and Comparators, ISBN 0-471-31778-0, by Roubik Gregorian, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

**献给我的妻子 Agnes 和我的孩子 Aris 与 Talin**

# 前言

---

运算放大器和比较器是模拟电路中最为复杂、也是最重要的两个基础模块。这两种电路广泛应用于开关电容滤波器、模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)、放大器、调制器、整流器和峰值检测器等。运算放大器和比较器的性能通常会限制整体系统的高频性能和动态范围。如果未能深入理解运算放大器和比较器的工作原理和基本极限情况,电路设计师就不能确定、甚至不能预测整体系统的实际响应情况。因此,本书将对 CMOS 运算放大器和比较器的总体结构和性能限制进行深入分析。随着超大规模集成电路的发展,电路具有越来越高的集成度,在深亚微米工艺下可以实现更高性能的数字电路,同时也使得 CMOS 模拟集成电路的设计技术不断发展变化。本书讨论的主要内容就是说明这些实际电路及其设计过程中最重要的基本原理,即便如此,对于要设计适用于大多数模拟电路应用中所需要的高性能 CMOS 运算放大器和比较器的读者来说,本书的内容已经足够详细。

本书将重点强调电路的工作原理和设计过程,也是分析和设计 CMOS 运算放大器和比较器的通用文档。本书可用于大学电子工程专业的高年级学生或者研究生的课堂教学,也可以作为电路设计工程师的培训和参考材料。为了提高课堂教学的效率,本书在每章的末尾都提供了大量的习题作为课后练习;为了进一步满足工程设计参考的需要,书中包含了大量的表格和数值计算过程,清晰明了地说明设计的每个步骤。本书前两章对 CMOS 模拟集成电路做了深入、基础和简明(希望如此)的描述,并简要介绍了半导体器件物理的必要背景知识。书中剩余的内容都是关于 CMOS 运算放大器和比较器的设计,以及在设计过程中所遇到的实际难题和解决方法。同时,书中也包含了关于运算放大器和比较器应用在 A/D 和 D/A 转换器设计中的概要介绍。如果需要更加深入地了解数据转换器的相关内容,读者可以参考 Behzad Razavi 教授的 *Principles of Data Conversion System Design* 以及 Steven R. Norsworthy, Richard Schreier 和 Gabor C. Temes 等人的 *Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design and Simulation*。

本书在一定程度上借鉴了我此前与 Gabor C. Temes 等人合著的 *Analog MOS Integrated Circuit for Signal Processing* 一书。在原始材料的基础上,本书增加了模拟 MOS 集成电路领域,特别是运算放大器和比较器的最新发展,大多数的材料和设计理念都来源于每章末尾提供的参考文献和与我共事多年的工程师。

本书内容最初来源于为短期课程准备的培训讲稿,短期课程的对象有不同学

科背景的学员,因此原始材料的组织也在一定程度受此影响。培训讲稿是针对某些专题的简单介绍,而本书的写作则是尽量做到内容完整和深入。基于这样的目的,本书的读者只需要具备较好的数学计算能力,同时具有电子学和半导体物理的概要性知识基础即可。

本书共包含 8 章内容。第 1 章介绍数字和模拟信号处理系统的基础知识,列举了几种利用 CMOS 运算放大器和比较器构建的具有代表性的电路和系统。

第 2 章简要介绍 MOS 器件的基本特性,包括 MOSFET 晶体管、MOS 电容器和开关等的线性模型。这里也简单介绍了 CMOS 工艺的情况。

第 3 章包含了 CMOS 模拟集成电路中常用的基本子电路模块。通常情况下,这些子电路组合可以实现更加复杂的电路功能。

第 4 章讨论了 CMOS 运算放大器电路的设计技术,包含了最常用的电路结构,以及其设计过程和相互的制约关系。

第 5 章讨论了 CMOS 比较器的电路原理。首先分析了单端输出自动稳零比较器,然后依次分析了简单的多级差分比较器、可再生比较器和全差分比较器。

第 6 章和第 7 章介绍了 CMOS 数模转换器和模数转换器,作为运算放大器和比较器的具体应用实例。首先介绍了数据转换器的基础知识和性能指标,然后讨论了奈奎斯特转换器的常用结构。数模转换器可以分为电压型、电荷型和电流型等三种主要类型。模数转换器可分为高速快闪型、中速逐次逼近型和低速串行型。

第 8 章利用第 4 章和第 5 章介绍的设计原理和设计技术给出了几个设计实例,以使读者熟悉运算放大器和比较器设计过程中面临的问题和各个指标之间的折中考虑。例如直流偏置、系统失调电压、电源电压噪声等实际的工程考虑都进行了详细描述。

最后,我要诚挚感谢在本书出版过程中直接或者间接给予帮助的很多人,特别是要感谢 S. C. Fan 博士、B. Fotouhi 博士、B. Ghaderi 博士和 G. C. Temes 博士,他们认真阅读了本书的手稿,并提出了宝贵的批评和建议,我万分感激。W. Irwin 和 D. Baker 女士完成了大部分艰难的文字录入工作,在此感谢她们出色的工作成果。最后,我要对家人在本书写作过程中给予的支持和理解表达最真诚的感谢,如果没有他们的理解和支持,这项工作将不可能完成。

Roubik Gregorian

# 目 录

## 第1章 引 言

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1.1 信号处理技术的分类 .....                | 1  |
| 1.2 模拟 MOS 电路中运算放大器和比较器的应用实例 ..... | 5  |
| 习 题 .....                          | 12 |
| 参考文献 .....                         | 12 |

## 第2章 电路的基本器件——MOS 晶体管

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.1 半导体 .....                 | 13 |
| 2.2 MOS 晶体管 .....             | 16 |
| 2.3 晶体管类型:衬底效应 .....          | 21 |
| 2.4 MOS 晶体管小信号工作状态和等效电路 ..... | 24 |
| 2.5 弱反型区 .....                | 30 |
| 2.6 碰撞电离 .....                | 30 |
| 2.7 MOSFET 晶体管的噪声 .....       | 31 |
| 2.7.1 散粒噪声 .....              | 31 |
| 2.7.2 热噪声 .....               | 32 |
| 2.7.3 闪烁噪声( $1/f$ 噪声) .....   | 33 |
| 2.8 CMOS 工艺 .....             | 34 |
| 习 题 .....                     | 35 |
| 参考文献 .....                    | 37 |

## 第3章 CMOS 模拟集成电路的基本模块

|                        |    |
|------------------------|----|
| 3.1 MOS 工艺中的偏置电路 ..... | 39 |
| 3.2 MOS 电流镜和电流源 .....  | 44 |
| 3.3 MOS 增益级 .....      | 51 |
| 3.4 MOS 源极跟随器 .....    | 59 |
| 3.5 MOS 差分放大器 .....    | 60 |
| 3.6 MOS 放大器的频率响应 ..... | 66 |
| 习 题 .....              | 71 |



|            |    |
|------------|----|
| 参考文献 ..... | 72 |
|------------|----|

## 第4章 CMOS 运算放大器设计

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 4.1 运算放大器 .....                      | 73  |
| 4.2 单级运算放大器 .....                    | 78  |
| 4.3 两级运算放大器 .....                    | 82  |
| 4.4 CMOS 放大器的稳定性和频率补偿 .....          | 87  |
| 4.5 CMOS 运算放大器的动态范围 .....            | 98  |
| 4.6 补偿 CMOS 运算放大器的频率响应、瞬态响应和摆率 ..... | 101 |
| 4.7 CMOS 运算放大器的噪声性能 .....            | 106 |
| 4.8 全差分运算放大器 .....                   | 108 |
| 4.9 CMOS 输出级 .....                   | 115 |
| 4.10 轨到轨共模输入范围运算放大器 .....            | 126 |
| 习 题 .....                            | 131 |
| 参考文献 .....                           | 133 |

## 第5章 比较器设计

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 5.1 比较器的电路模型 .....    | 135 |
| 5.2 单端输出自动稳零比较器 ..... | 136 |
| 5.3 差分比较器 .....       | 140 |
| 5.4 滞回比较器 .....       | 148 |
| 5.5 全差分比较器 .....      | 151 |
| 5.6 锁存器 .....         | 159 |
| 习 题 .....             | 165 |
| 参考文献 .....            | 166 |

## 第6章 数模转换器设计

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 6.1 数模转换基本原理 .....  | 167 |
| 6.2 电压型 DAC .....   | 171 |
| 6.3 电荷型 DAC .....   | 182 |
| 6.4 混合型 DAC .....   | 185 |
| 6.5 电流型 DAC .....   | 187 |
| 6.6 分段电流型 DAC ..... | 192 |
| 习 题 .....           | 199 |
| 参考文献 .....          | 201 |

## 第 7 章 模数转换器设计

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 7.1 模数转换基本原理 .....    | 203 |
| 7.2 快闪型 ADC .....     | 208 |
| 7.3 插值快闪型 ADC .....   | 213 |
| 7.4 两级 ADC .....      | 215 |
| 7.5 逐次逼近型 ADC .....   | 221 |
| 7.6 计数型和跟踪型 ADC ..... | 230 |
| 7.7 积分型 ADC .....     | 232 |
| 习 题 .....             | 236 |
| 参考文献 .....            | 237 |

## 第 8 章 工程考虑和设计实例

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 8.1 CMOS 运算放大器设计中的工程考虑 ..... | 239 |
| 8.2 运算放大器设计技术和设计实例 .....     | 250 |
| 8.3 比较器设计技术和设计实例 .....       | 274 |
| 习 题 .....                    | 279 |
| 参考文献 .....                   | 279 |

# 第1章 引言

运算放大器和比较器是模拟信号处理系统中最重要的两个基础模块。运算放大器和少量无源器件相结合就可以实现一些重要的功能,例如加法器、反相放大器、积分器和缓冲器等。这些功能和比较器的组合可以产生更多复杂的功能,例如高阶滤波器、信号放大器、模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)、输入和输出缓冲器等。使运算放大器和比较器工作速度更快总是模拟设计师们不断追求的目标。本章将简单介绍数字和模拟信号处理的基本概念。然后分析第三类信号处理技术,即采样数据模拟处理技术,这是介于模拟和数字两种主要分类之间的一种技术。最后,将列举一些利用 CMOS 运算放大器和比较器的电路和系统的典型实例,以此来说明,虽然运算放大器和比较器仅仅作为 MOS 大规模集成电路的一部分,但是具有极大的应用空间。

## 1.1 信号处理技术的分类<sup>[1~4]</sup>

电子信号处理系统通常分为两类:模拟系统和数字系统。模拟系统的信号主要以电压、电流和电荷等形式存在,是连续时间变量的连续函数。模拟信号处理典型的实例有音频放大器、有源 RC 滤波器、无源 RC 滤波器等。相比而言,数字系统中的信号由一串数字码表示。因为这些数值码只是包含有限的数位(典型情况下,数字码均用二进制码或者位来表示),仅能表示一些分离时间的值。而且,这些值都是从信号中采样得来的。因此,数字信号的独立变量和非独立变量都是分立的。因为数字位的处理通常都是同步的,时序或者时钟电路是数字系统的重要组成部分。时序提供一个或者多个时钟信号,每个时钟都包含精确的时序脉冲供系统中的模块正常工作或者实现同步。数字系统的典型实例就是通用数字计算机或者专用数字信号处理器,例如通过快速傅里叶变换(FFT)实现信号的傅里叶变换,或者在语音分析系统里面使用的数字滤波器等。

而对比而言,模拟信号处理电路利用运算放大器、比较器、电阻、电容和开关等模块,可以实现滤波器、放大器、整流器等很多功能。为了理解模拟电路中最常用结构的基本概念,下面分析简单的模拟传输函数:

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

显而易见,利用图 1.1(a)中所示的 RLC 电路可以很容易实现这种功能(习题

1.1)。虽然该电路也很容易设计、实现和测试,但是电路中的电感在集成电路中制造生产难度较大。实际上,对于低频应用,该电路将需要很大的电感和电容值,占据极大的芯片面积。为了克服这个难题,设计师将利用有源 RC 电路来实现预期的传输函数。图 1.1(b)表示了有源 RC 电路的实现方式,其中使用了三个运算放大器,实现了式(1.1)中的传输函数。电路不需要电感,可以用很小的分立器件即可满足多种应用需求(习题 1.2)。从理论上讲,在双极工艺中实现这种电路是可行的(因为所需要的放大器、电阻和电容都可以进行集成),但是实际情况是,在集成时仍然存在一些障碍。其中包括大的 RC 元件将占用很大的芯片面积,而且这些元件对精度和稳定性也有很严格的要求。这些要求在集成元件中并不能完全满足,因为对电阻和电容元件来讲,无论是制造的绝对值,还是温度引入的变化都不能达到电路要求。对于大多数应用来说,引入的零极点变化太大将影响电路的性能。

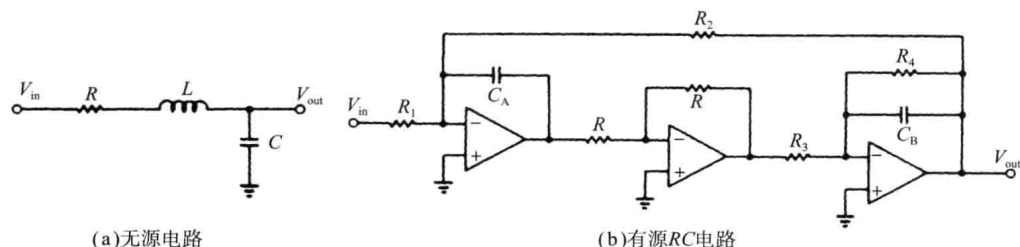


图 1.1 二阶滤波器的实现方式

在 20 世纪 70 年代中期以前,图 1.1 中所示的模拟电路就采用双极工艺制造运算放大器,并结合分立的无源器件来实现。在 20 世纪 70 年代,有两项技术上的突破使得在金属-氧化物-半导体(MOS)工艺上实现全集成模拟电路成为可能。

第一个突破就是开关电容电路技术的产生<sup>[6]</sup>,这是利用电容和一些开关的组合来有效解决半导体器件面积和匹配的问题。现在分析图 1.2 中的电路。四个开关  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  均周期性地断开和导通,其通断的速度远大于端口电压  $V_A$  和  $V_B$  的变化速度。开关  $S_1$  和  $S_4$  同步工作,但是与开关  $S_2$  和  $S_3$  反相。因此,当开关  $S_2$  和  $S_3$  导通时,开关  $S_1$  和  $S_4$  断开,反之亦然。当开关  $S_2$  和  $S_3$  导通时,电容  $C$  放电。当开关  $S_2$  和  $S_3$  断开时,则开关  $S_1$  和  $S_4$  导通,电容  $C$  上的电压被充电至  $V_C = V_A - V_B$ 。这就导致电荷  $q = C(V_A - V_B)$  流过图 1.2 中的支路。在下一周期,电容  $C$  又经过开关  $S_2$  和  $S_3$  放电,如此反复。如果这一周期每经过  $T$  秒就重复一次(其中  $T$  表示开关周期或者时钟周期),通过该支路的平均电流为:

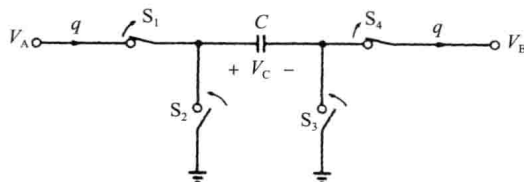


图 1.2 电阻通路上开关电容的实现方式

$$I_{AV} = \frac{q}{T} = \frac{C}{T}(V_A - V_B) \quad (1.2)$$

因此  $I_{AV}$  与支路上的电压  $V_A - V_B$  成正比。类似的,对于仅包含电阻  $R$  的支路,其上的电流可以表示为  $I = (1/R)(V_A - V_B)$ 。因此,如果满足  $R = T/C$  的关系,那么两条支路上的平均电流是相等的。从物理现象上讲,开关将无静态功耗的记忆性元件(电容  $C$ )转变成了有静态功耗且无记忆性的元件(电阻)。

因此,从这个原理上讲,似乎图 1.2 中的支路均可以用来代替图 1.1(b) 电路中的电阻。图 1.3 就表示了利用这一原理实现的电路<sup>[3]</sup>。在该电路中,开关虽然“属于”不同的电阻,但是起到的作用相同,因此可以进行组合。而且,图 1.1(b) 中的第二个运算放大器由于仅仅起到反相的作用,因此也被去掉了。将电容  $C_3$  上的开关进行简单的相位改变就可以实现反相,因此也就不需要运算放大器。

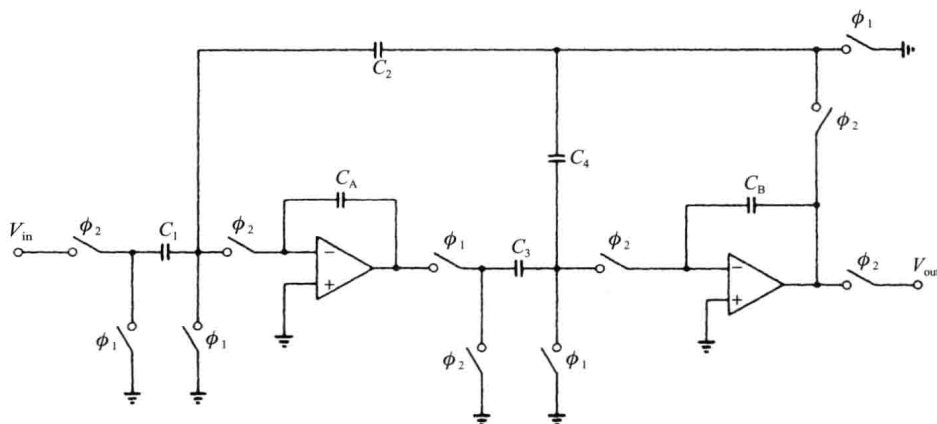


图 1.3 二阶开关电容滤波器单元

如图 1.3 所示,根据开关电容电路原理实现的电路仅仅含有电容、开关和运算放大器。新电路的主要优势是,此前由  $RC$  乘积控制的所有时间常数,可以通过  $(T/C_1)C_2 = T(C_2/C_1)$  获得。此处,时钟周期  $T$  通常都采用晶振控制时钟电路来实现,因此,时钟周期  $T$  非常稳定,也非常精确。时间常数的另一个因子是  $C_2/C_1$ ,也就是两个片上 MOS 电容的比值。在版图设计时,注意一些简单的规则就可以得到很高的精度和稳定性,比值精度可以达到 0.1% 的量级。这样,电路的总体精度至少比片上电阻和电容实现  $RC$  时间常数的精度要高 100 倍。

开关电容技术使集成电路中对无源器件的集成能力得到极大的改进。为了在音频范围内(即  $10\text{krad/s}$ )得到需要的时间常数,有时甚至需要很大的电容( $10\text{pF}$  量级)和电阻( $10\text{M}\Omega$  量级)。这样的电阻将占据大约  $10^6\mu\text{m}^2$  的芯片面积,这在集成电路中是不可接受的,通常占据了普通芯片面积的 10%。相比而言,对于典型的时钟周期  $10\mu\text{s}$ ,开关电容电路中实现  $10\text{M}\Omega$  电阻所需要的电容是  $C = T/R = 10^{-5}/10^7 = 10^{-12}\text{F} = 1\text{pF}$ 。1pF 电容所需要的面积大约为  $2500\mu\text{m}^2$ ,仅是原来电阻

所需要面积的 0.25%。

第二个使得集成模拟 MOS 电路可能实现的技术突破就是 MOS 运算放大器的设计。通常来讲,最有用的模拟电路功能就是运算放大器。在大约 1977 年前,根据功能的要求,对双极工艺和 MOS 工艺的选择有明确的界限<sup>[1,5]</sup>。MOS 工艺由于在器件密度上具有先天优势,所以广泛用于数字逻辑电路和存储器等的实现,而模拟功能的电路(例如放大器、滤波器和数据转换器等)都采用双极集成电路工艺实现,例如双极的运算放大器。但是,由于 MOS 制造技术的快速发展使其可以制造出更多复杂和灵活性很强的芯片。另外,通信技术也得到了新的发展(例如数字电话、电话线的数据传输、自适应通信信道等),这就要求模拟和数字信号处理电路在同一个功能模块中实现。模拟模块通常都需要滤波(为了抗混叠、滤波、频带分离等)、放大、采样和保持工作、电压比较,以及为数据转换提供精确的电压和电流信号。仅仅是由于采用不同工艺的原因,就将模拟模块和数字模块分开是系统设计师所不希望看到的,因为这会增加封装的成本,增加系统面积,而且还会增加互连的难度,降低系统性能。因此,急需研究出适合于 MOS 工艺的电路,使其实现所需要的模拟功能,从而与数字电路共用同一块芯片。

与双极工艺相比,MOS 工艺既有优点也有缺点。MOS 器件的输入端(栅极)具有极高的阻抗,这就可以感应电容上的电压,而不会像双极型器件需要偏置电流,不会出现放电现象<sup>①</sup>。同时,当用作电荷开关时,MOS 器件本身不会存在失调电压。而且,MOS 工艺可以制造高质量的电容。这些特征使得在 MOS 芯片上可以实现高精度的采样保持电路<sup>[1]</sup>,而这在双极工艺中是不可能实现的。

但是,从另一方面来看,MOS 晶体管的跨导本身就比双极晶体管要低。中等尺寸 MOS 器件的跨导大约为 2.5mA/V,而对双极晶体管来讲,其跨导比 MOS 晶体管要高约 50 倍。所以,MOS 工艺运算放大器的失调电压要高于双极工艺放大器(但是,MOS 晶体管的输入电容要远小于双极晶体管)。而且,MOS 晶体管的噪声比双极晶体管要高,在低频的时候更是如此。由此可见,MOS 晶体管实现的放大器性能要比同等的双极放大器差,例如失调电压、噪声和动态范围等。但是,其输入阻抗要比双极放大器大得多。

从 MOS 晶体管的这些性质来看,MOS 运算放大器最主要的应用是 MOS 大规模集成电路。此处运算放大器的设计可以利用一些重要性能指标的优势。运算放大器的负载通常非常小,一般仅需要驱动小电容。开关电容电路就属于这一类型,元器件大小的精度很重要,但是信号频率并不太高,而且动态范围也没有特殊的要求。音频频段滤波和数据转换器都在这一门类,而且过去大多数应用也属于这一类型。

---

① 在深亚微米工艺中,MOS 晶体管也会存在栅极泄漏电流。——译者注

除了图 1.3 所示的频率选择开关电容滤波器以外,许多其他功能也可以用运算放大器和比较器来实现。这包括模数转换器、数模转换器、自动增益控制(AGC)的可编程增益放大器以及峰值检测、整流、过零检测器等。这些结构在混合信号模拟/数字系统中大量使用,例如,语音编解码(Voice Codecs)、高速数据通信调制解调器(Modems)和语音处理器等。这些应用范围将随着元器件特别是运算放大器和比较器的性能指标(带宽、动态范围和功耗等)的改进而不断扩大。

## 1.2 模拟 MOS 电路中运算放大器和比较器的应用实例

本节将给出少量应用 CMOS 运算放大器和比较器的实际模拟 MOS 电路。当然,读者不能奢望在这里可以对这些系统有非常深入的理解,如果需要可以参考相关的资料。但是,这些图示将给出模拟信号处理中一些电路的基本概念。

如前文所述,CMOS 运算放大器最为广泛的一种应用就是开关电容滤波器。图 1.4(a)表示了 7 阶开关电容滤波器。其测试的频率响应如图 1.4(b)所示。器件测试得到通带变化小于 0.06dB,这已经是非常好的性能了,如果不采用大量的修调技术,其他结构的滤波器设计技术也不可能达到这样的性能。

CMOS 运算放大器显而易见的应用是电荷型的数模转换器(DAC)。通过可编程电容阵列和无失调开关电容增益级即可实现。图 1.5 表示了一个  $N$  位电荷型 DAC 的实例,其中, $V_{\text{ref}}$  为与温度无关的参考电压。DAC 的输出是参考电压与二进制数字信号( $b_1, b_2, b_3, \dots, b_N$ )的乘积。第 6 章将详细讨论这些电路的设计技术。

调制器、整流器和峰值检测器<sup>[6]</sup>都属于非线性电路的重要类型,可以利用运算放大器和比较器的组合来实现。在幅度调制器中,信号  $x(t)$  的幅度(通常也称为载波)会根据调制信号  $m(t)$  变化(调制)。因此输出信号  $y(t)$  就是载波信号  $x(t)$  和调制信号  $m(t)$  的乘积,即  $y(t) = x(t)m(t)$ 。周期性的载波信号通常由稳定的时钟源产生,是幅值为  $\pm V$  的方波。利用方波实现调制的一种简单方法就是周期性地切换输入信号  $m(t)$  的极性。图 1.6 表示了利用这一思想实现的与杂散电容无关的开关电容调制器电路。时钟相位  $\phi_1$  和  $\phi_2$  工作频率为快时钟速率  $\omega_c$ ,而相位  $\phi_a$  的变化频率为慢时钟速率  $\omega_{\text{ca}}$ 。正常情况下, $\omega_c$  要远大于  $\omega_{\text{ca}}$ (通常在 30 倍以上)。

全波整流电路是另一种重要的非线性电路,将输入信号  $V_{\text{in}}(t)$  转换为其绝对值  $|V_{\text{in}}(t)|$ 。实现开关电容全波整流电路的简单方法是增加一个比较器实现幅度调制器的功能。基于图 1.6 中调制器原理的开关电容全波整流电路如图 1.7(a)所示。此处,当  $V_{\text{in}} > 0$  时, $A$  为“1”,当  $V_{\text{in}} < 0$  时, $A$  为“0”,而当相位  $\phi_1$  为高时, $B$  点由比较器和锁存器设置为  $\bar{A}$ 。信号  $A$  和  $B$  确定了传输函数的极性,从而使负输入信号反相,而不会对正输入信号起作用。图 1.7(b)表示了一种自动稳零比较器,其设计技术的细节将在第 5 章中详细讨论。

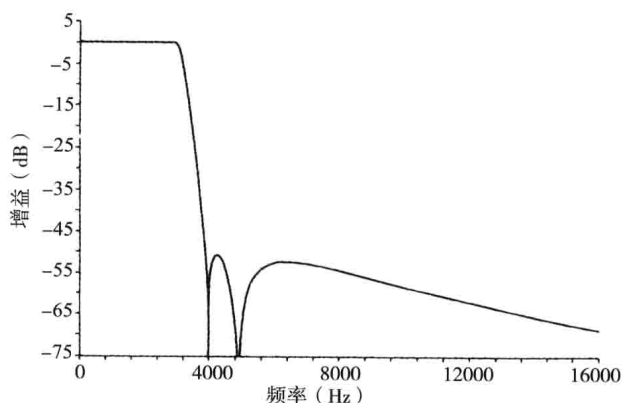
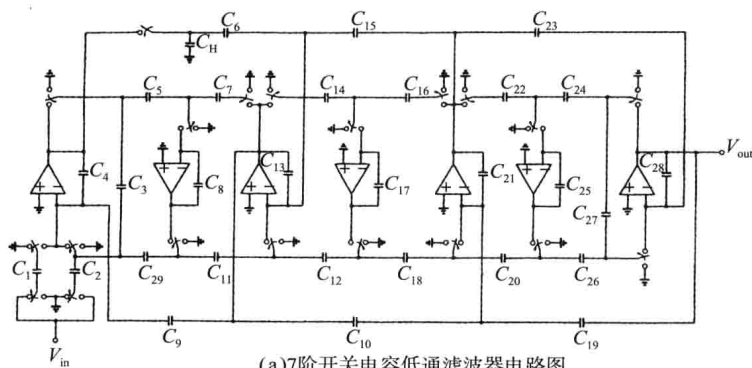
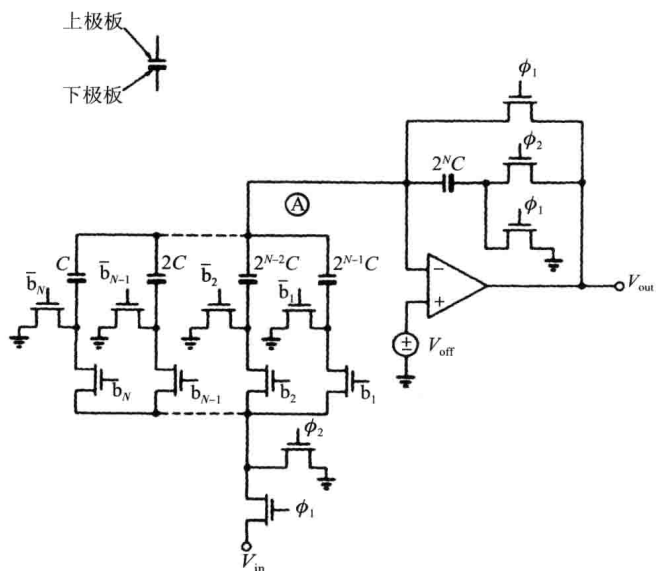


图 1.4





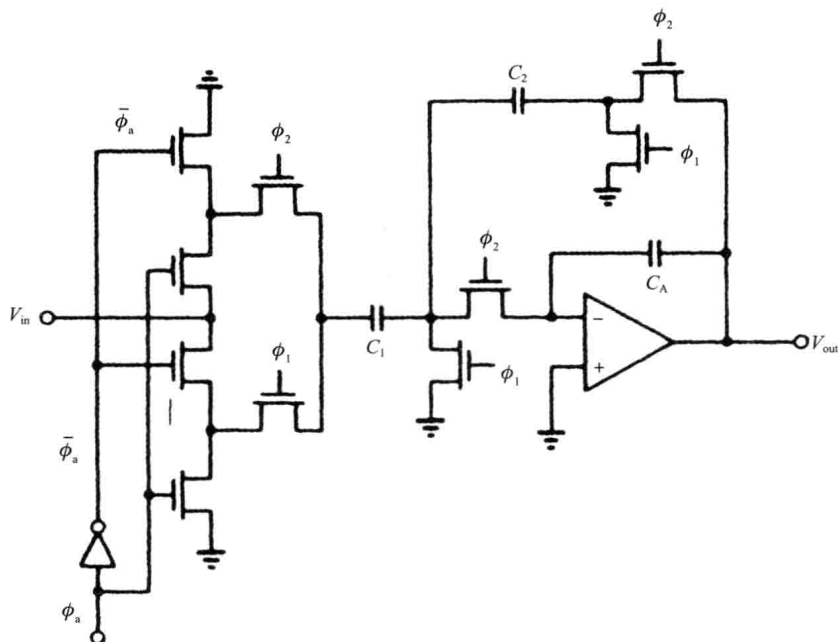


图 1.6 具有两相时钟的开关电容调制器

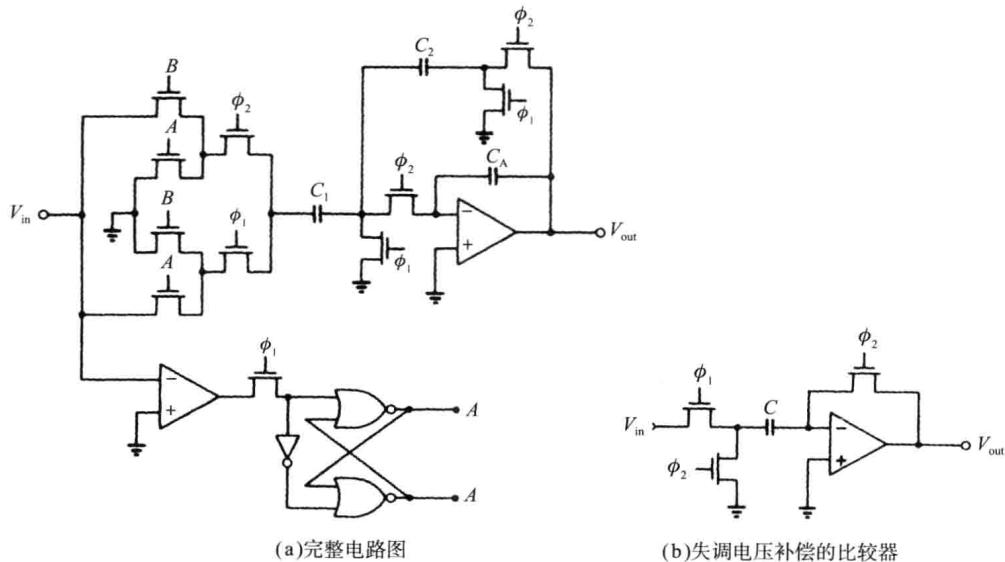


图 1.7 开关电容全波整流器

峰值检测电路是在输入信号的激励下,使得输出电压保持在最正的电压(或者在某一确定的电压)。图 1.8 表示了一种 MOS 峰值检测电路。电路中的运算放大器起着比较器的作用, $V_{in}$ 作为其输入信号,那么输出电压  $V_{out} = V_{max}$ 。如果  $V_{in} > V_{max}$ ,那么运算放大器的输出将为高电平,晶体管  $M_1$  导通,对电容  $C$  充电,直到输出电压  $V_{out} \approx V_{in}$  为