

开关电容电路讲义

取样数据电路指的是处理或产生取样信号(时间离散,但不进行幅值量化的信号)的电路。随着集成电路工艺技术和电路技术的发展,目前取样数据电路有三类:

1. 由[电荷耦合器件](#)(CCD)构成的电路
2. [开关电容电路](#)Switched--Capacitor Circuits(SC)
3. [开关电流电路](#)Switched--Current Circuits(SI)

由于电荷耦合器件只能按时钟周期顺序传递信号(串行存取方式),因此其应用范围受到限制。CCD 主要应用在三个系统方面:自扫描成像阵列、模拟横向滤波器和数字存储器,自扫描成像阵列的应用是最成功的。由于它难以实现 IIR 滤波器,这就限制了它在一般模拟信号处理系统中的应用。

本课程着重介绍[开关电容电路、电流模和开关电流电路](#)的基本内容及其应用技术,对这类电路的分析则侧重于工作原理的介绍。

本部分介绍开关电容电路的基本知识及其应用。

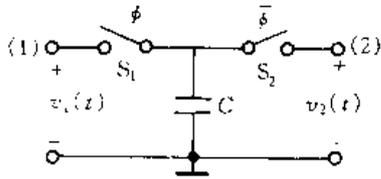
开关电容电路是由受时钟信号控制的开关和电容器组成的电路。它是利用[电荷的存储和转移](#)来实现对信号的各种处理功能。在实际电路中,有时仅用开关和电容器构成的电路往往不满足要求,所以多与放大器或运算放大器、比较器等组合起来,以实现电信号的产生、变换与处理。

利用开关电容电路来处理模拟信号在 1972 年首先提出,由于它具有的一些特殊的优点,引起了人们的重视,并加强了这方面的研究工作。1977 年发表了采用 NMOS 工艺和开关电容技术构成的话路滤波器,1978 年美国 INTEL 公司首先制成用于 PCM 电话系统的话路滤波器,从而进入了实用阶段。近年来,对开关电容的理论、分析方法和电路技术进行了多方面的研究,进一步拓展了开关电容电路技术在模拟信号处理领域的应用范围。

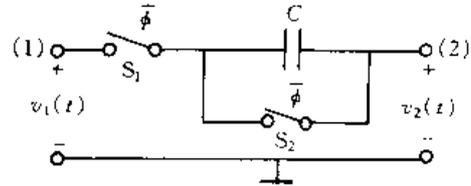
由于开关电容电路[使用MOS工艺](#),尺寸小,功耗低,工艺过程比较简单,易于大规模集成,因此得到了较快的发展和广泛的应用。

2.1 开关电容电路

2.1.1 基本开关电容单元



(a) 并联开关电容单元



(b) 串联开关电容单元

图 2.1.1 基本开关电容单元

$$q_c(t) = C * v_c(t)$$

$$(n-1)T_c \text{ 时刻, } \phi \text{ 相, } S1 \text{ 闭合, } S2 \text{ 断开} \rightarrow v_c(t) \Big|_{t=(n-1)T_c} = v_1[(n-1)T_c];$$

$$(n-1)T_c < t < (n-1/2)T_c \text{ 期间, } S1、S2 \text{ 断开} \rightarrow v_c(t) = v_c(t) \Big|_{t=(n-1)T_c} = v_1[(n-1)T_c];$$

$$(n-1/2)T_c \text{ 时刻, } \bar{\phi} \text{ S1 断开, } S2 \text{ 闭合} \rightarrow v_c(t) \Big|_{t=(n-1/2)T_c} = v_2[(n-1/2)T_c];$$

$$(n-1/2)T_c < t < nT_c \text{ 期间, } S1、S2 \text{ 断开} \rightarrow v_c(t) = v_c(t) \Big|_{t=(n-1/2)T_c} = v_2[(n-1/2)T_c];$$

则, $(n-1)T_c < t < nT_c$ 期间, 电容上的电荷变化量为:

$$\Delta q_c = q_c[(n-1)T_c] - q_c[(n-1/2)T_c]$$

$$\Delta q_c = C\{v_1[(n-1)T_c] - v_2[(n-1/2)T_c]\}$$

如果认为在一个时钟周期内 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 近似没有变化, 也即认为时钟频率足够高 ($\omega T_c \ll 1$), 以致于在一个时钟周期内两个端口的电压近似没有变化。

这时有关系式: $\Delta q_c = T_c * i_c(t)$

$$i_c(t) = \frac{\Delta q_c}{T_c} = \frac{C}{T_c} [v_1(t) - v_2(t)]$$

则基本开关电容可以**等效为电阻**

$$R = \frac{T_c}{C}$$

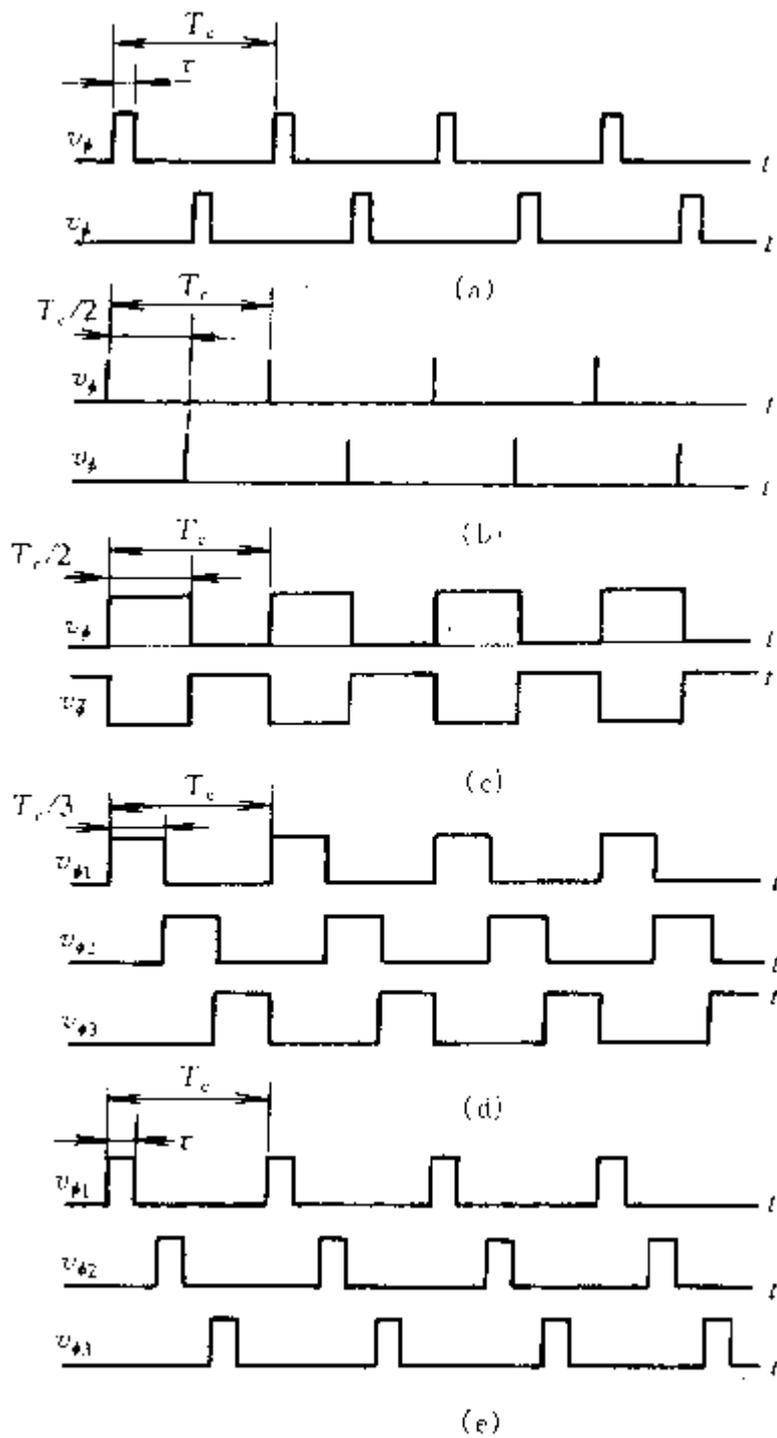


图 2.1.2 时钟信号

两相时钟信号：(a) (b)两相窄脉冲，(c)两相不重叠

v_{ϕ} 时钟信号称为 ϕ 相时钟信号， $v_{\bar{\phi}}$ 时钟信号称为 $\bar{\phi}$ 相时钟信号， T_c 为周期；

多相时钟信号：(d)三相不重叠，(e) 三相窄脉冲

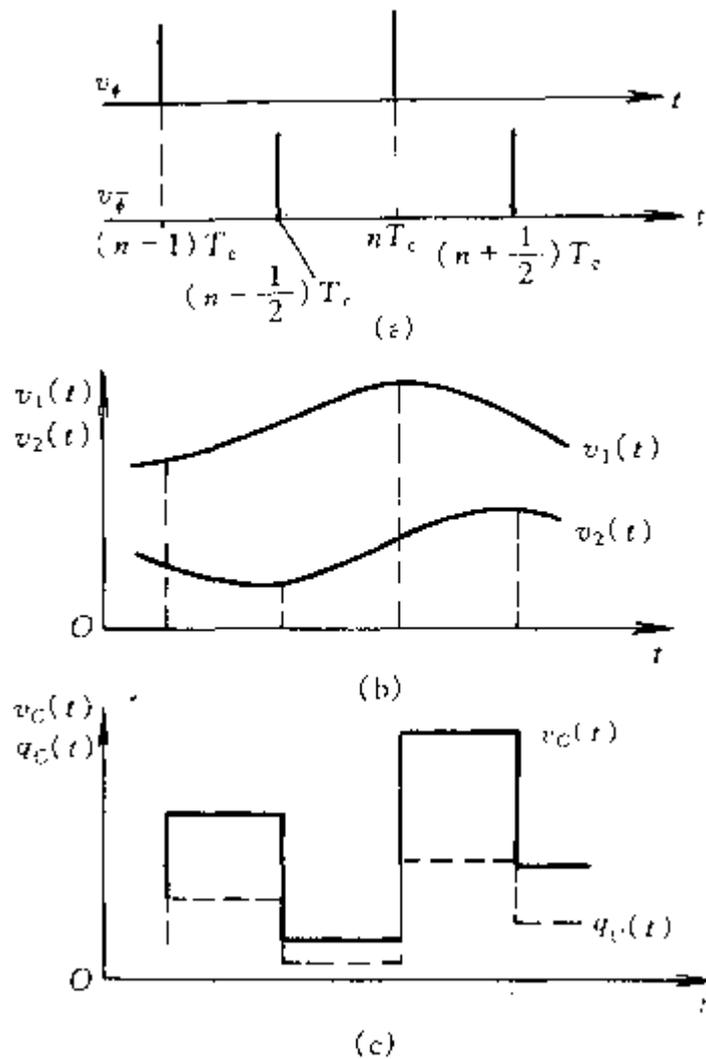


图 2.1.3 并联开关电容单元工作电压波形

开关电容的电阻作用与常规电阻中的两点重要区别：

1) 开关电容二端口之间流通的是**电荷**，而常规电阻两端之间流通的是**电流**。

2) 开关电容转移的电荷量与二端口**不同时刻**的电压值有关，而常规电阻中流通的电流与其两端的**同一时刻**的电压值有关。

2.1.2 开关电容积分器

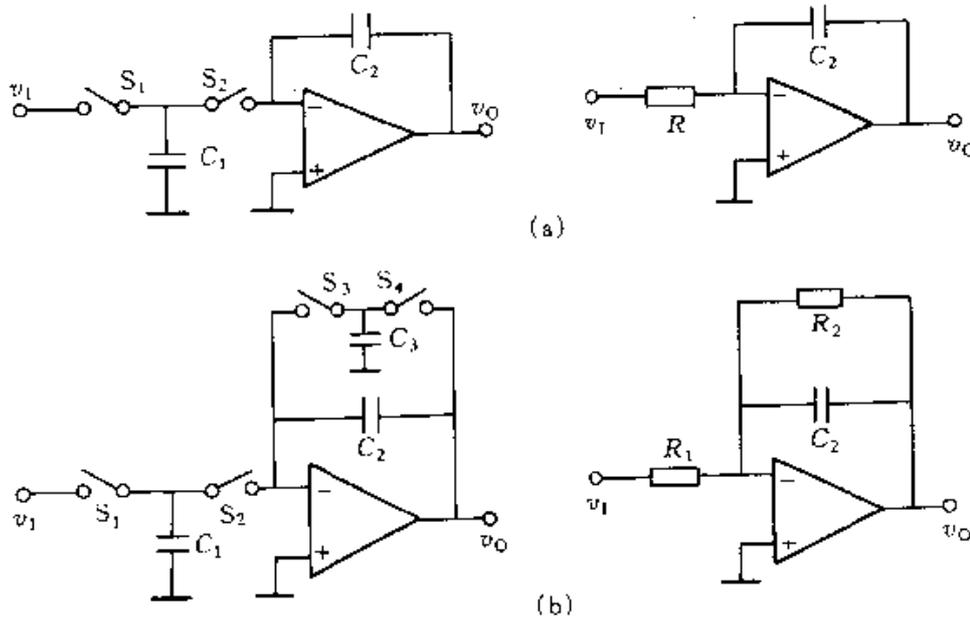


图 2.1.4 开关电容积分器及其原型电路

并联开关电容单元代替原型电路中的电阻

两个模拟开关 S_1 、 S_2 (MOS 管) + 一个小电容 $C_1=R$

用开关电容等效电阻的优点就是在集成电路中可以**用很小的面积得到很高的电阻值**

一般情况下,若用扩散电阻或多晶硅电阻在集成电路中制作大阻值的电阻,需要占很大的芯片面积,而用开关电容进行等效,只需用两个 MOS 管实现两个模拟开关和一个小电容在芯片。

从表达式 $R = \frac{T_c}{C_1}$ 可见,等效电阻值愈大,所需 C 值愈小,占用芯片的面积也愈小。

将开关电容等效成电阻的概念,简化了开关电容电路的分析和设计。这时开关电容电路的分析与一般模拟电路的分析和设计一样。这个概念也沟通了模拟电路与开关电容电路之间的联系。

2.2 开关电容电路的特点

2.2.1 易于实现稳定、准确的时间常数

在模拟电路中经常涉及到电路的频率特性、延时特性等，这些电路性能与电路的时间常数有关，这些时间常数多由电路中的元件参数：电感、电阻、电容来确定。在模拟集成电路中，制作电感是困难的，所以多采用电阻电容电路。由于受到集成电路工艺的限制，很难保证电阻和电容数值的准确和稳定，而用开关电容电路可以比较好地解决这方面的问题。

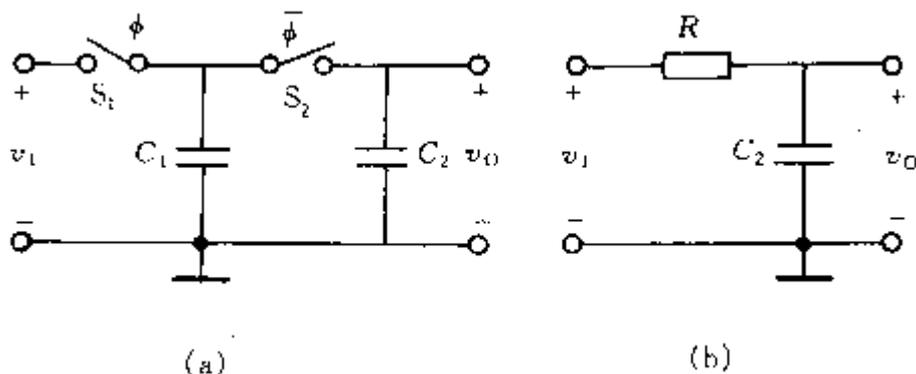


图 2.2.1 开关电容低通滤波器

$$R = \frac{T_c}{C_1}$$

时间常数

$$\tau = RC_2 = \frac{T_c}{C_1} * C_2$$

该式表明：当用开关电容等效电阻时，电路的时间常数由 T_c 和 $\frac{C_2}{C_1}$ 来确定。 T_c 是时钟

信号的周期，比较准确和稳定； $\frac{C_2}{C_1}$ 是两个电容的比值，在集成电路中实现两个电容的

比值比实现电容的绝对数值在准确与稳定性方面要容易。同样，比实现一个相同数值的电阻要容易

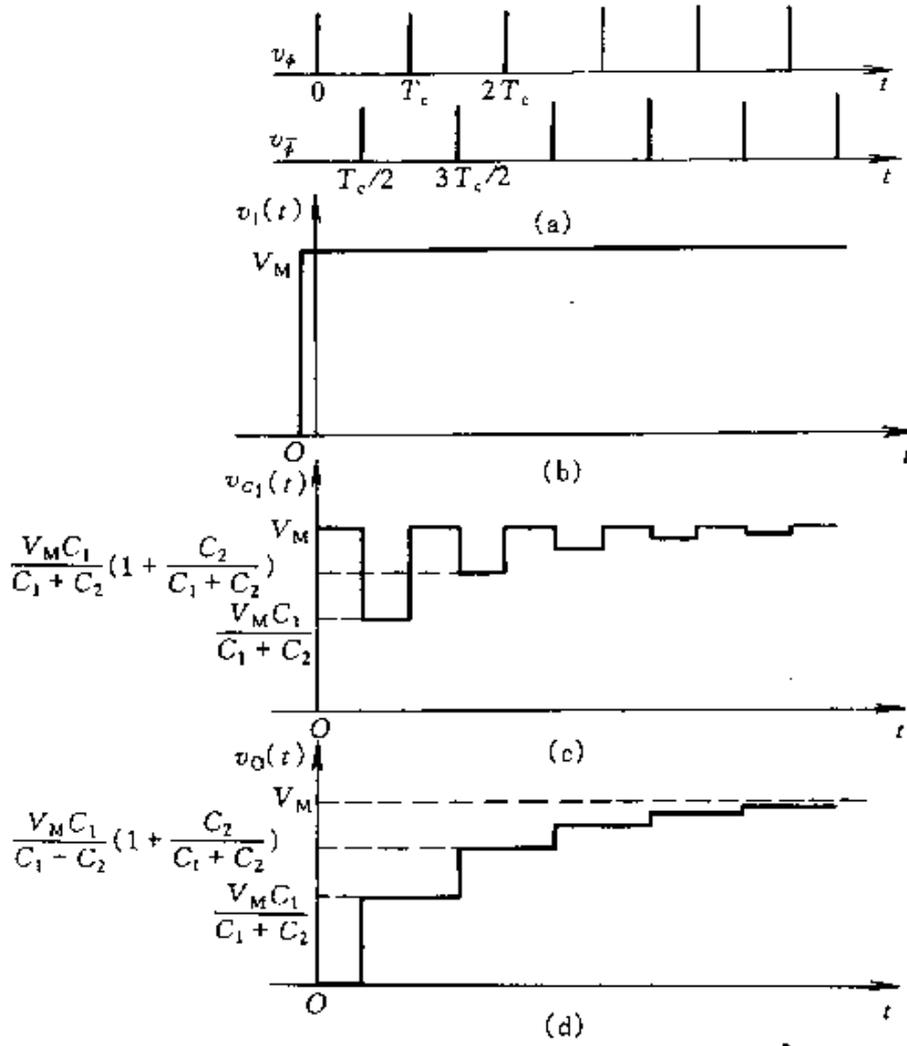


图 2.2.2 开关电容低通滤波器工作波形

2.2.2 通过调整时钟的相位实现各种不同的功能

对于同一个开关电容电路的结构，当改变控制各开关的时钟的相位时，可以得到不同的电路功能。

如下图求两个电压差值电路。

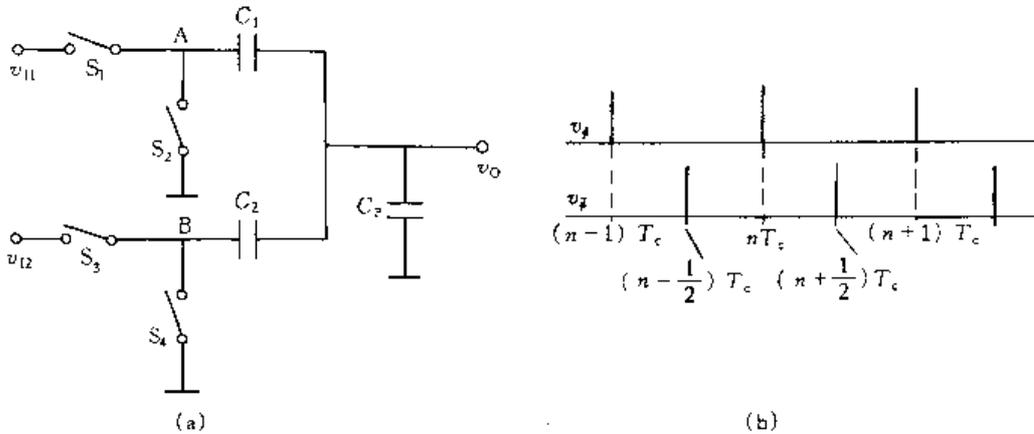


图 2.2.3 求电压差值电路

作业一

求图 2.2.3 在下面两种不同的控制时钟模式下，输出电压 $v_o(t)$ 与输入电压 $v_{11}(t)$ 、 $v_{12}(t)$ 的关系。

1) **S2、S3** 由时钟 ϕ 控制，**S1、S4** 由时钟 $\bar{\phi}$ 控制；

$$\Delta v_o(t) = \frac{1}{2 + \frac{C_P}{C_1}} [v_{11}(t) - v_{12}(t)]$$

2) **S1、S3** 由时钟 ϕ 控制，**S2、S4** 由时钟 $\bar{\phi}$ 控制。

$$\Delta v_o(t) = -\frac{1}{2 + \frac{C_P}{C_1}} [v_{11}(t) + v_{12}(t)]$$

2.2.3 频率响应的周期性

开关电容电路是一种取样数据电路，其输入信号的取样周期即为时钟周期，因此它的频率特性是**以时钟频率为周期重复**的。

它**实际能使用的频率范围**只能是在 $f \leq f_c/2$ 的限制内。（ $f_c = 1/T_c$ ）

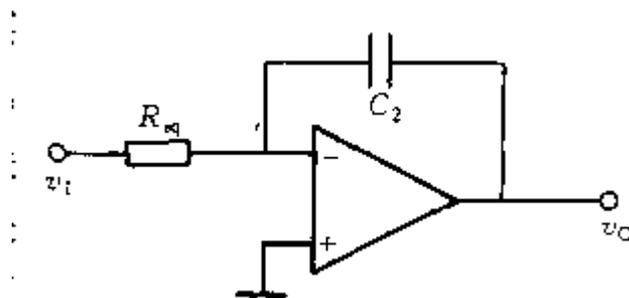


图 2.2.4 开关电容等效电路

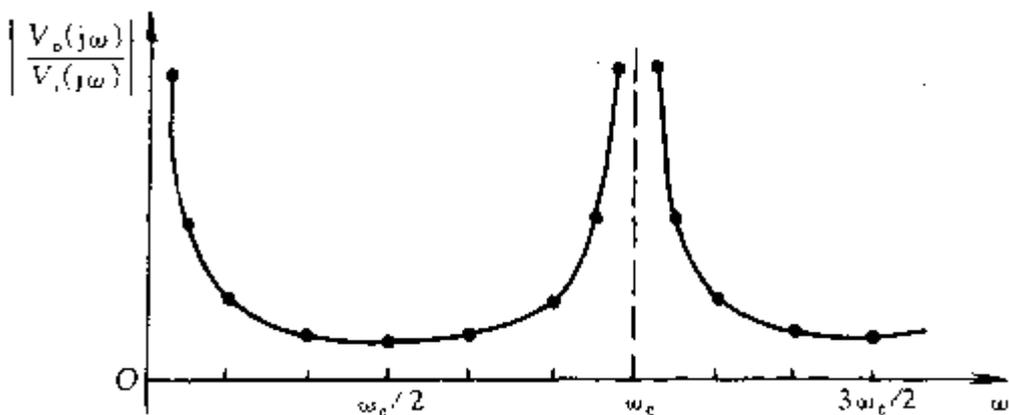


图 2.2.5 开关电容电路幅频特性

图 2.2.5 画出了图 2.2.4 所示电路中 RC 电路和相应开关电容电路的幅频特性。RC 电路的幅频特性随频率的升高是单调下降的，而其相应的开关电容电路的幅频特性只有在 $f \leq f_c/2$ 的范围内是单调下降的。在 f 在 $0 \sim f_c$ 范围内，以 $f_c/2$ 为镜像，并以 f_c 的周期重复。

两点区别：

- 1) RC 电路的幅频特性**随频率的升高是单调下降**的，而其相应的开关电容电路的幅频特性**只有在 $f \leq f_c/2$ 的范围内是单调下降**的；
- 2) RC 是**连续时间电路**，而开关电容电路是**离散时间电路**。

只有在 $\omega T_c \ll 1$ 时，二者的特性才是相近的。

这意味着输入给开关电容电路的**信号应该是限带的**，而且这个限带滤波器不能用开关电容电路实现。

2.3 开关电容电路的分析方法

由于开关电容电路的特殊工作过程，对不同的输入信号和输出信号形式，不同的时钟信号波形，可以有不同分析方法。经常遇到的有**两种情况**。

1. 输入信号是**模拟信号**；输出也是模拟信号，实际是取样保持信号；一般将其作为**连续时间系统**进行分析。在两相不重叠时钟信号控制下，输入为正弦信号。

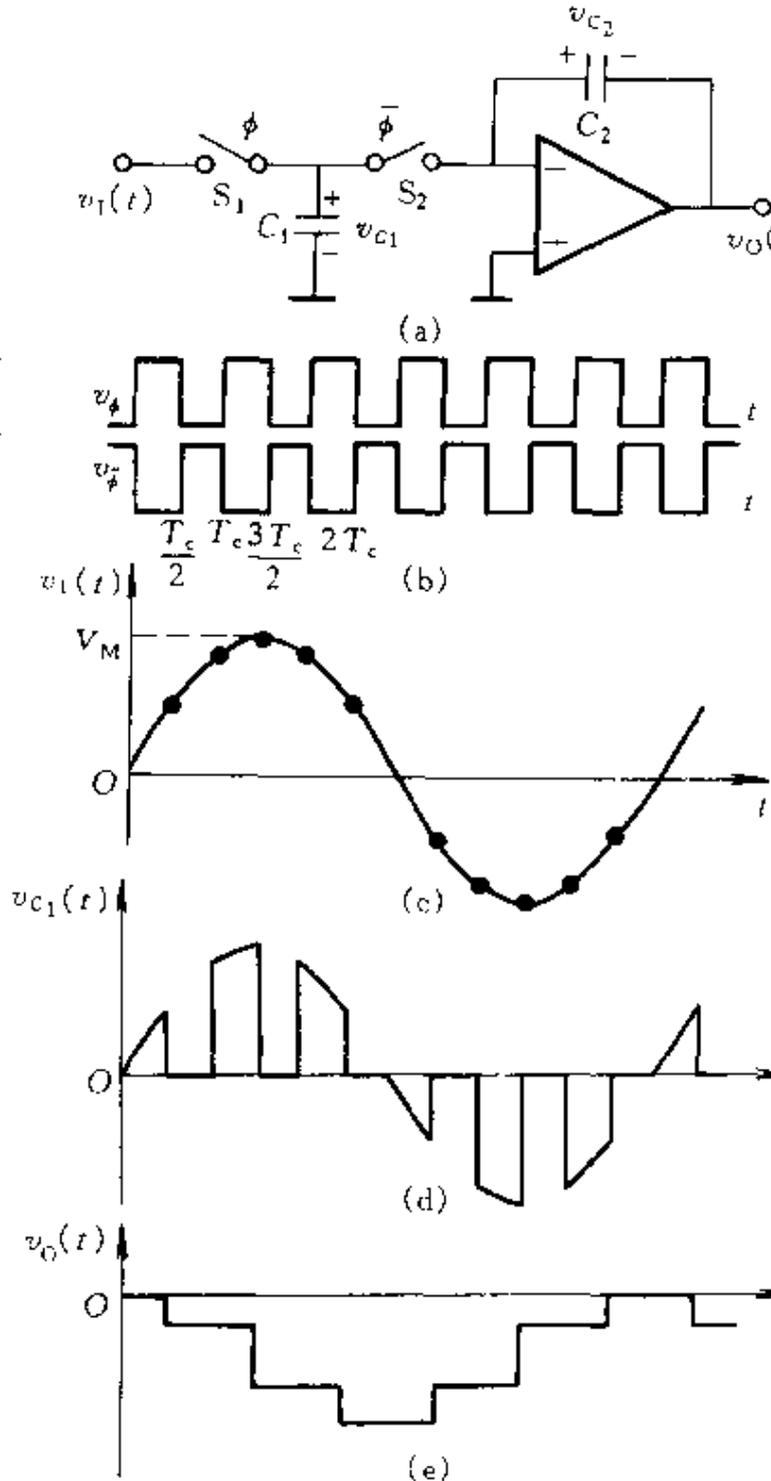


图 2.3.1 开关电容电路作为连续时间系统分析

2. 开关电容电路作为**离散时间系统**，输入信号和输出信号均可用**离散序列**表示
 在实际电路中，若使用的时钟信号是**窄脉冲**；或者时钟信号使用的是两相不重叠时钟，
 但输入信号为**分段常数信号**，则也按离散时间系统进行分析。

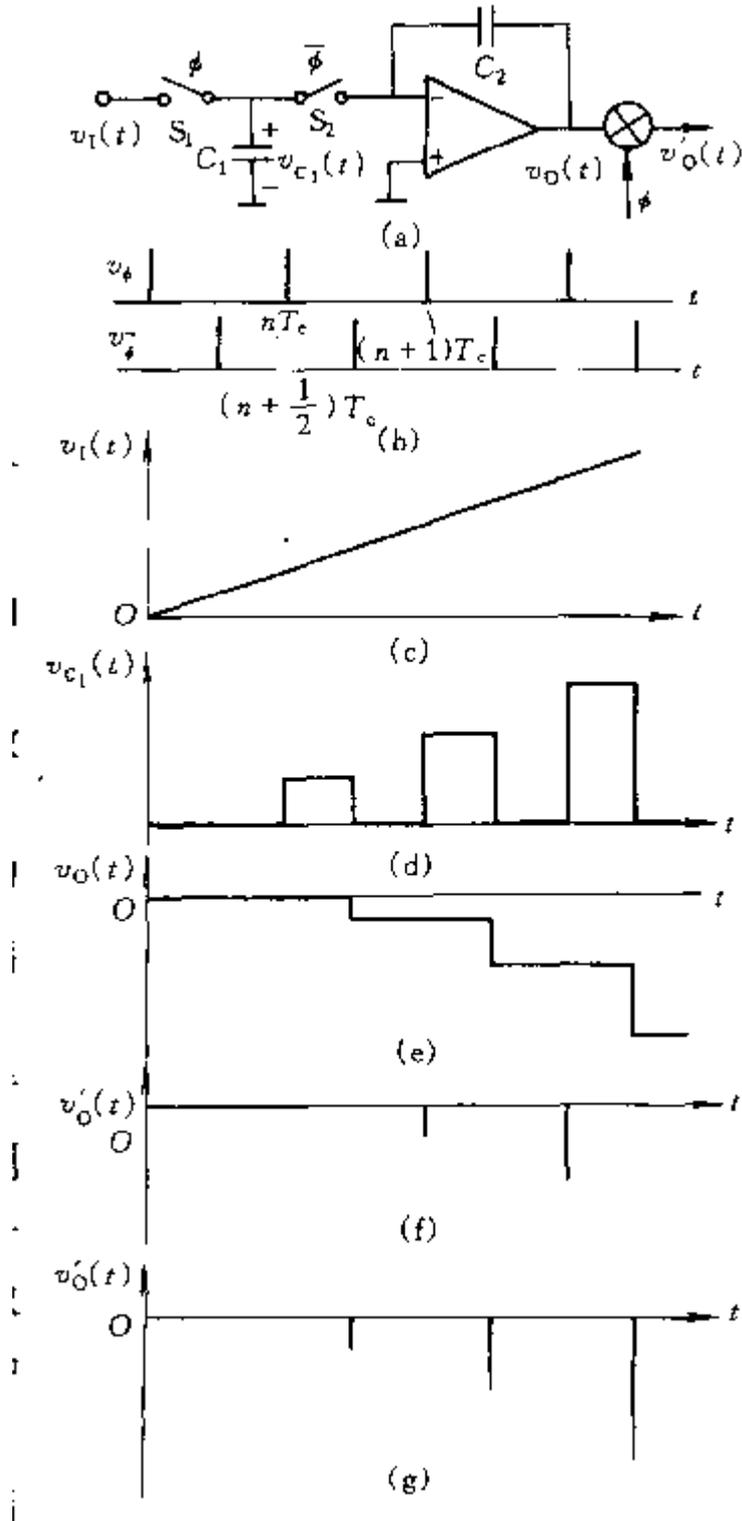


图 2.3.2 开关电容电路作为离散时间系统分析

2.3.1 电荷守恒原理

电荷守恒原理是分析开关电容电路的基本电路原理。

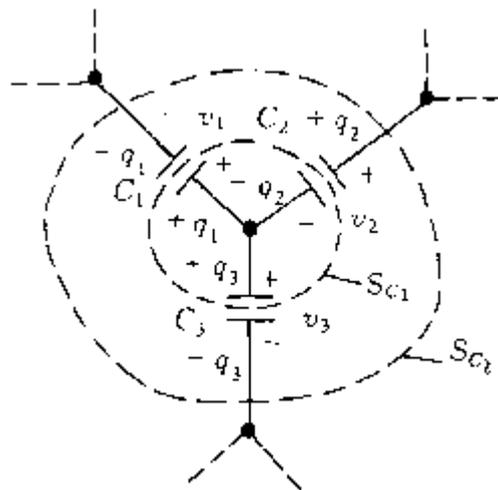


图 2.3.3 闭合面

所谓电荷守恒原理是指在开关电容电路中，用“**闭合面**”包围各电容器一个极板的集合，只要**没有导电路径**穿过这个闭合面，那么闭合面内所有电容器极板上所存储的**总电荷就不会发生变化**，并且与整个电路中开关的闭合和断开以及电容器上的电压因任何原因而发生的变化无关。

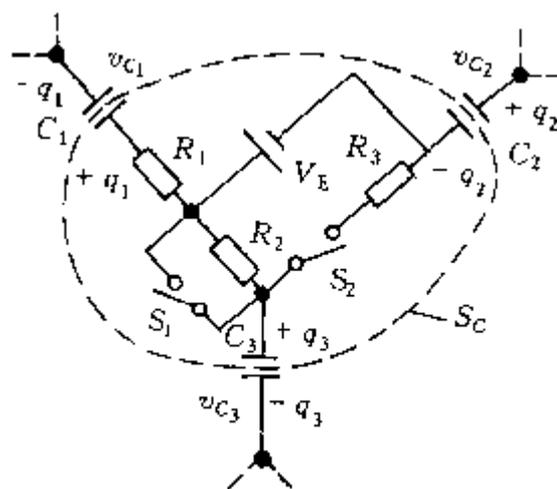
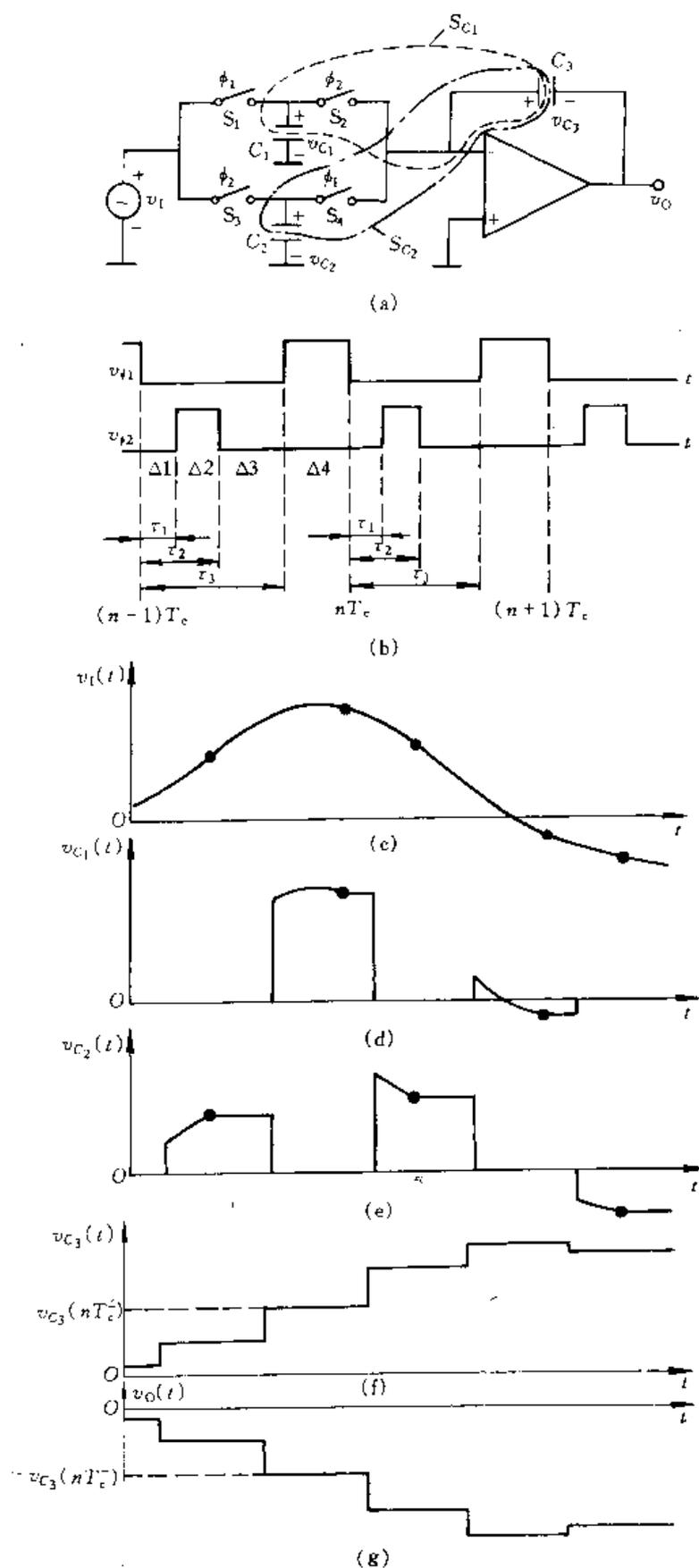


图 2.3.4 闭合面内电荷

2.3.2 开关电容电路的时域分析方法



$t = nT_c^-$ 时刻

$$v_O(nT_c^-) = -v_3(nT_c^-)$$

$nT_c \leq t < nT_c + \tau_1$ 期间

$$v_O(t) = -v_3(nT_c^-)$$

$t = nT_c + \tau_1$ 时刻

图 2.3.5 开关电容积分器电路

2.3.3 开关电容电路频域分析

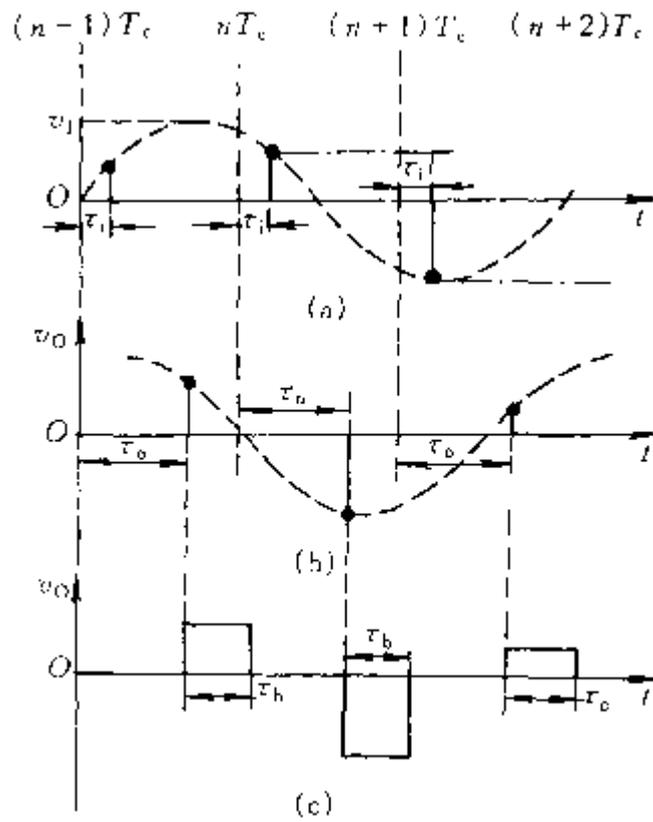


图 2.3.6 开关电容电路频域分析

2.4 连续域到离散域的映射

2.4.1 基于积分算子 $1/s$ 和微分算子 s 的数值近视技术的映射关系

2.4.2 映射的实现

2.5 开关电容积分器

2.5.1 一般积分器

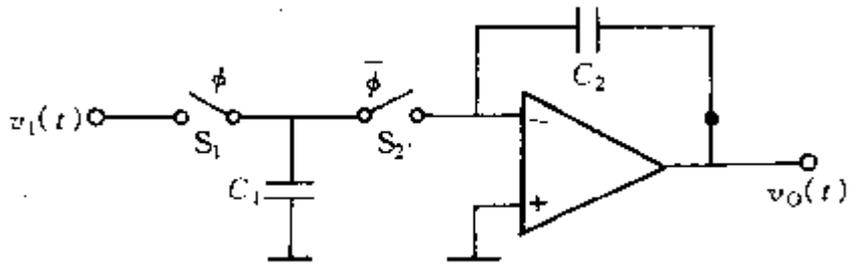


图 2.5.1 一般开关电容积分器

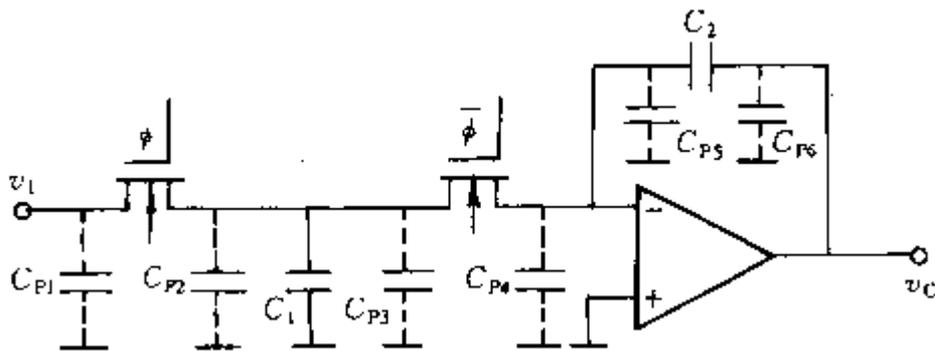


图 2.5.2 考虑寄生电容后的开关电容积分器

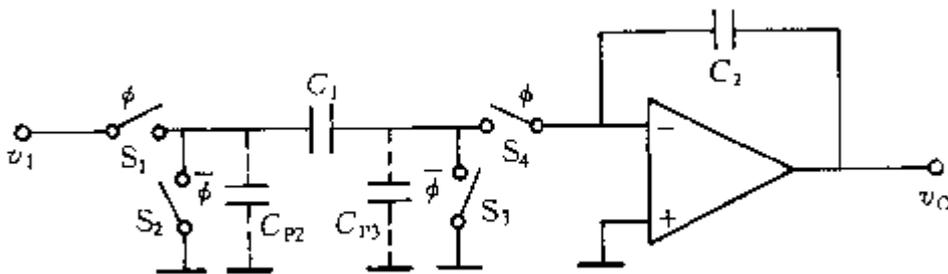


图 2.5.3 克服寄生电容影响的开关电容积分器

$$V_o(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2} V_i(j\omega)$$

2.5.2 差动积分器

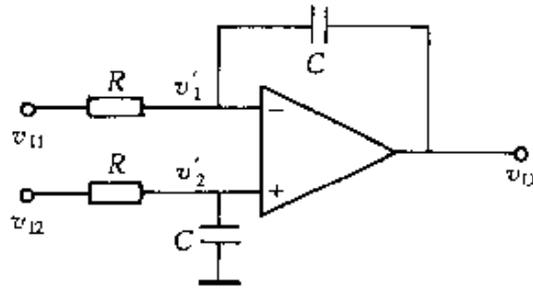


图 2.5.4 差动积分器

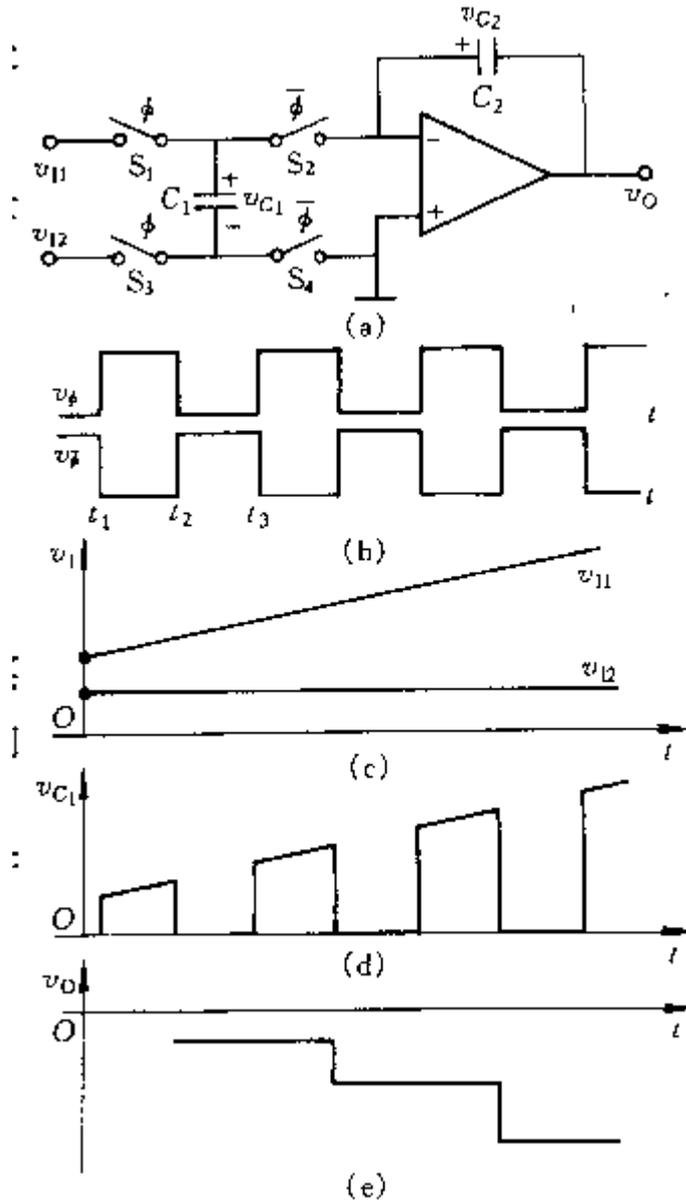


图 2.5.5 开关电容差功积分器

$$V_o(j\omega) = -\frac{1}{j\omega C_2} * \frac{C_1}{T_c} [V_{i1}(j\omega) - V_{i2}(j\omega)]$$

2.5.3 具有附加非积分输出的积分器

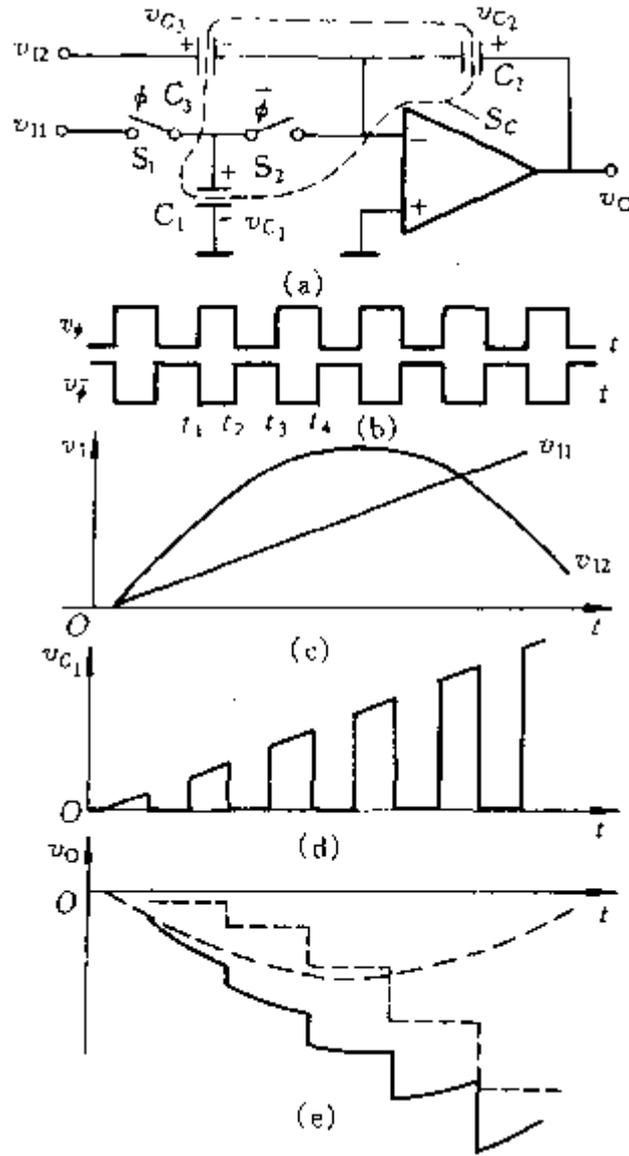


图 256 具有附加非积分输出的开关电容积分器

$$V_o(j\omega) = -\frac{1}{j\omega C_2} * \frac{C_1}{T_c} V_{i1}(j\omega) - \frac{C_3}{C_2} V_{i2}(j\omega)$$

2.5.4 开关电容压控振荡器

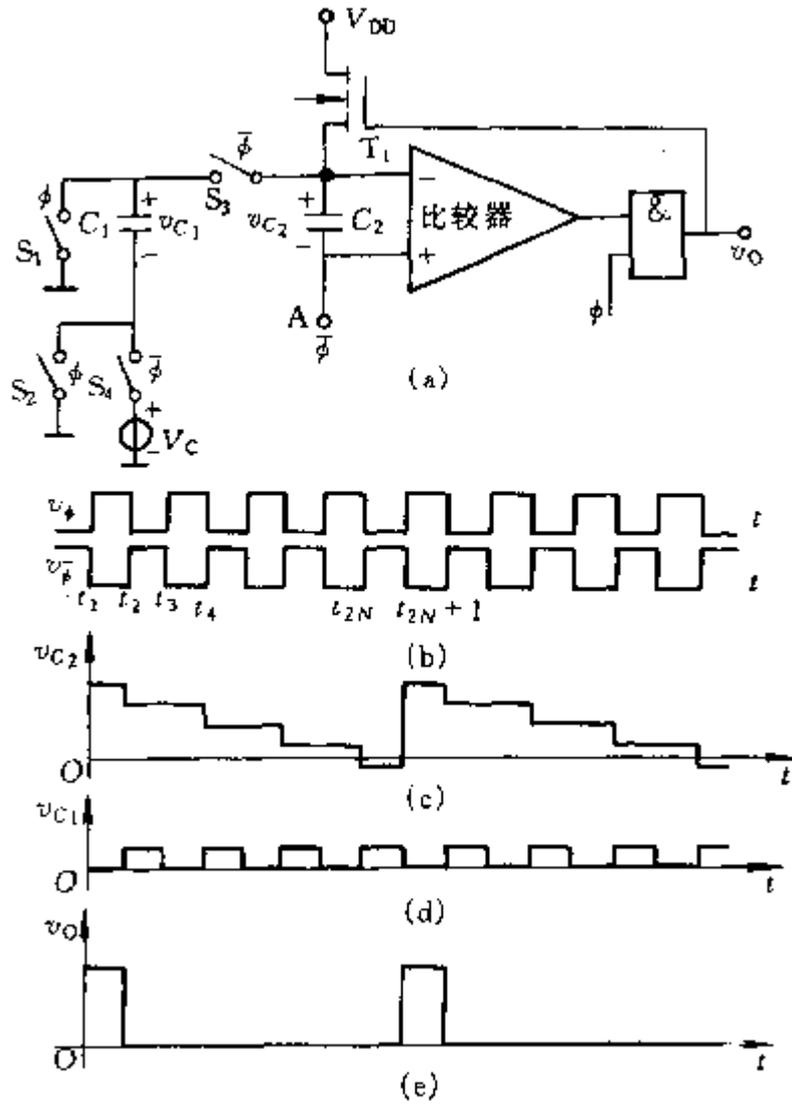


图 257 开关电容压控振荡器

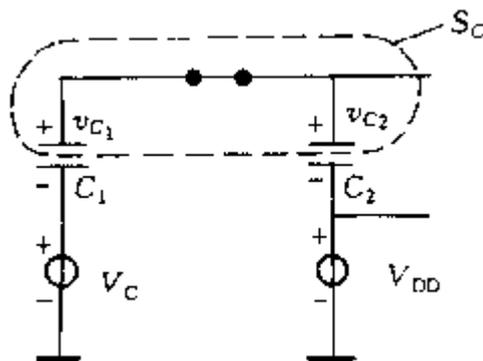


图 258 求 v_{C2} 等效电路

2.6 开关电容滤波器

2.6.1 开关电容双二阶滤波器

$$H(s) = -\frac{K_2 s^2 + K_1 s + K_0}{s^2 + \left(\frac{\omega_0}{Q}\right)s + \omega_0^2}$$

⇒

$$V_o(s) = -\frac{1}{s} \left[(K_2 s + K_1) V_i(s) + \frac{\omega_0}{Q} V_o(s) + \omega_0 V_1(s) \right]$$

$$V_1(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{K_0}{\omega_0} V_i(s) + \omega_0 V_0(s) \right]$$

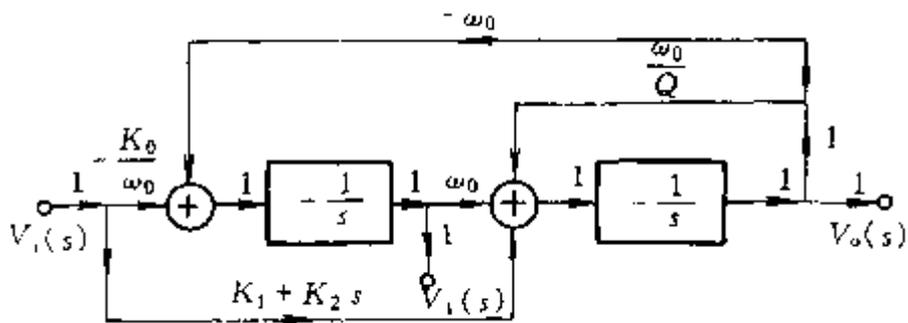


图 2.6.1 开关电容双二阶滤波器传递函数框图

用电阻、电容和运算放大器实现。

两积分器都是电流--电压积分器

K_1 、 $\frac{\omega_0}{Q}$ 、 ω_0 、 $\frac{K_0}{\omega_0}$ 为电导值， K_2 为电容值，

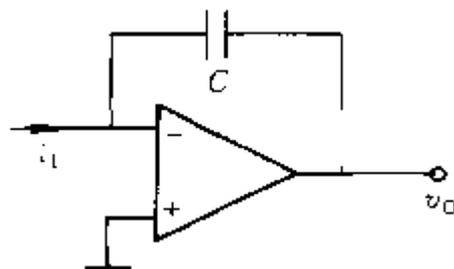


图 2.6.2 电流--电压积分器

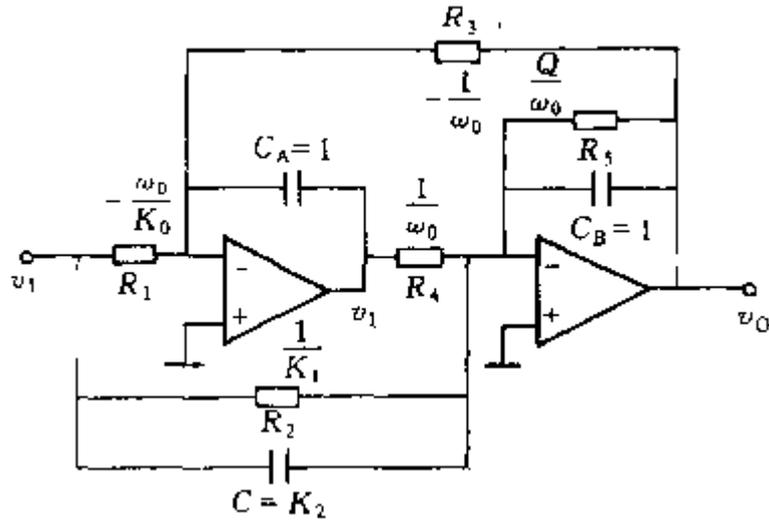
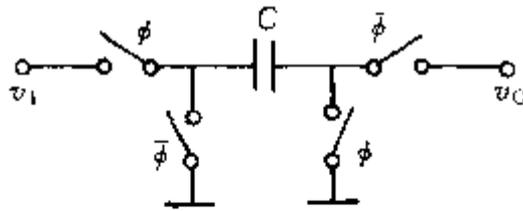


图 2.6.3 有源 RC 双二阶电路



(a)

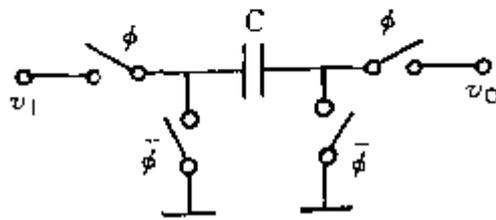


图 2.6.4 用开关电容电路实现电阻

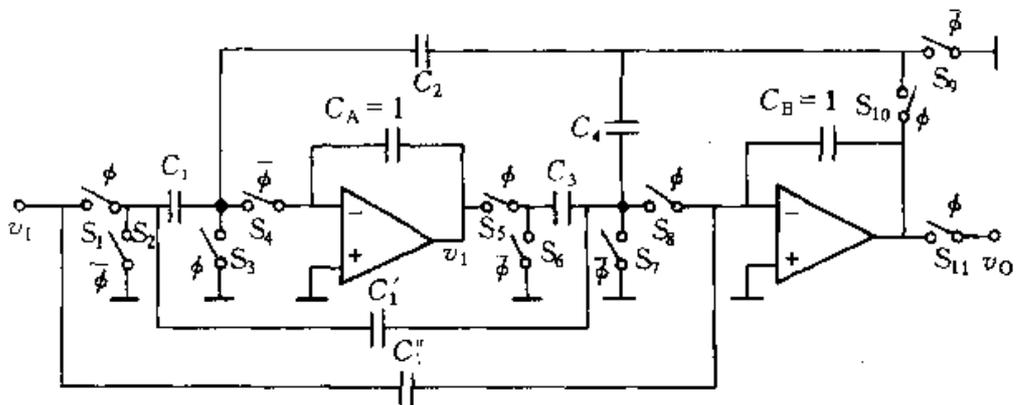


图 2.6.5 开关电容双二阶滤波器

2.6.2 开关电容梯形滤波器

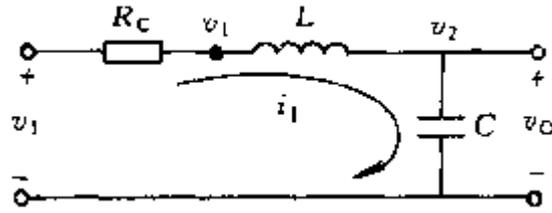


图 2.6.6 RLC 低通开关电容梯形滤波器

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \left(\frac{R_c}{L}\right)s + \frac{1}{LC}}$$

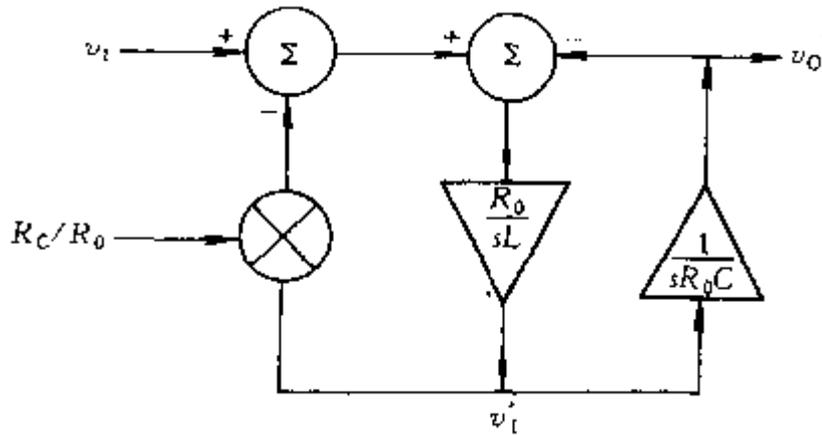


图 2.6.6 开关电容梯形滤波器框图

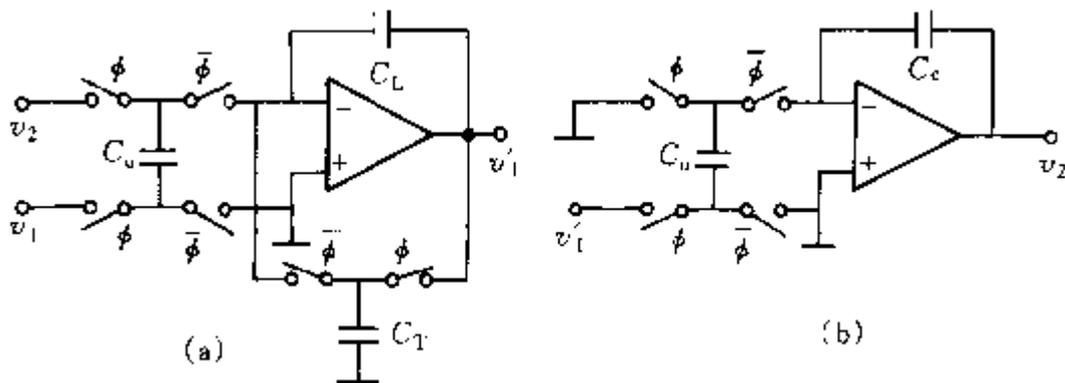


图 2.6.8 实现 $V_i(s)$ 开关电容梯形滤波器

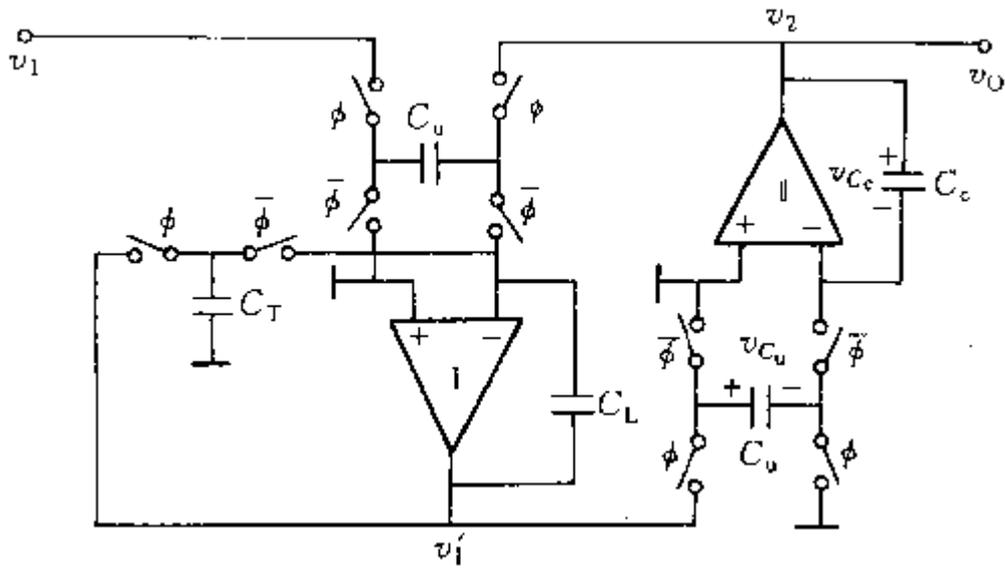


图 2.6.9 开关电容梯形滤波器

2.6.3 原型滤波器的开关电容电路的实现

2.7 非理想效应对开关电容的影响

2.7.1 直流失调的影响

2.7.2 有限直流增益的影响

2.7.3 有限运算放大器的影响

2.7.4 运算放大器有限转换速率的影响

2.8 开关电容滤波器实例

2.8.1 抗混叠滤波器

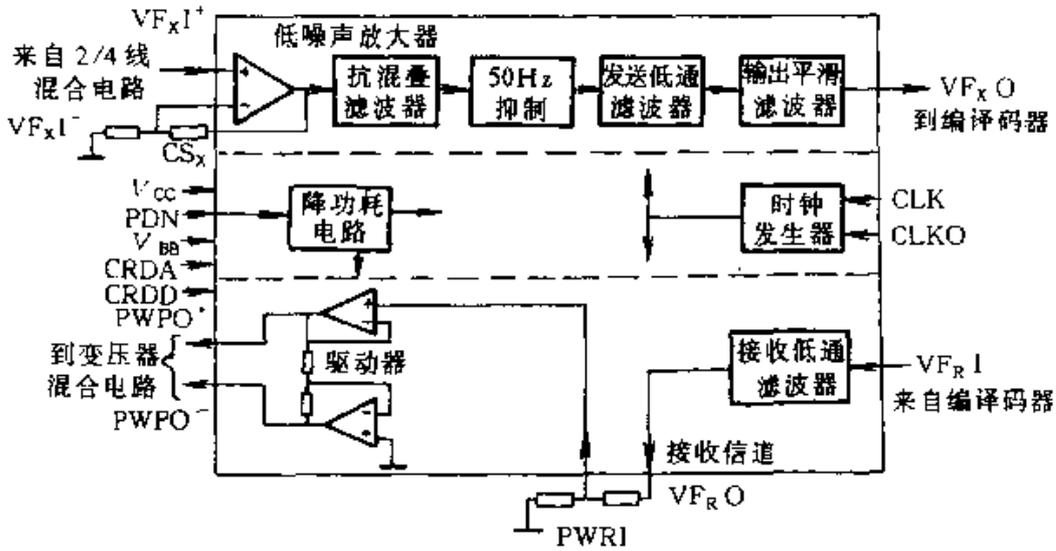


图 2.8.1 2912 滤波器内部框图

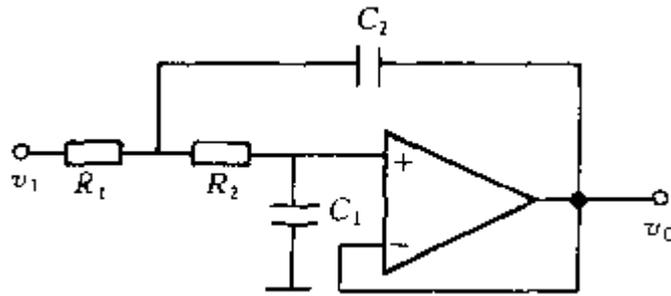


图 2.8.2 抗混叠滤波器

2.8.2 50Hz 抑制滤波器

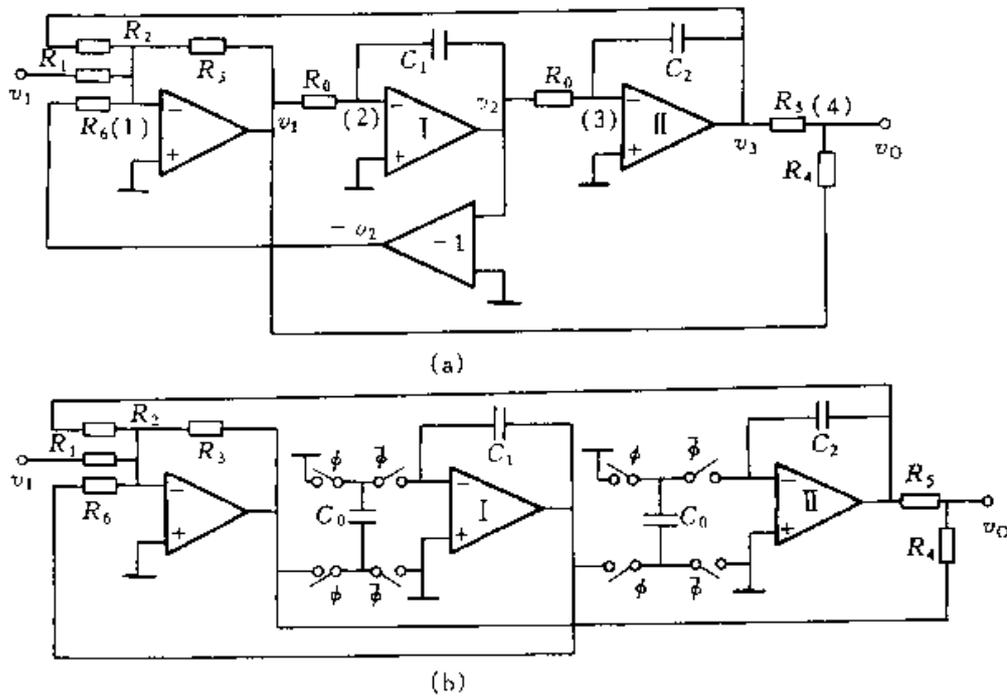


图 2.8.3 50Hz 抑制滤波器

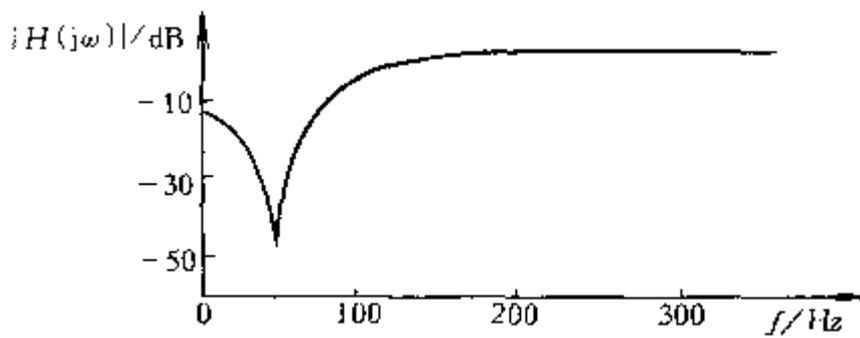


图 2.8.4 50Hz 抑制滤波器传递特性

2.8.3 发送低通滤波器

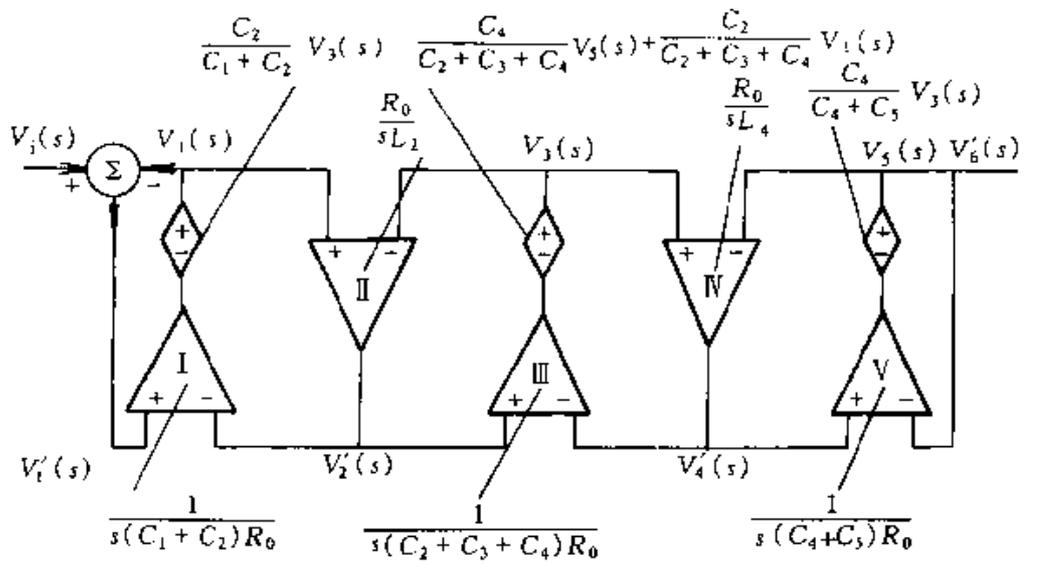
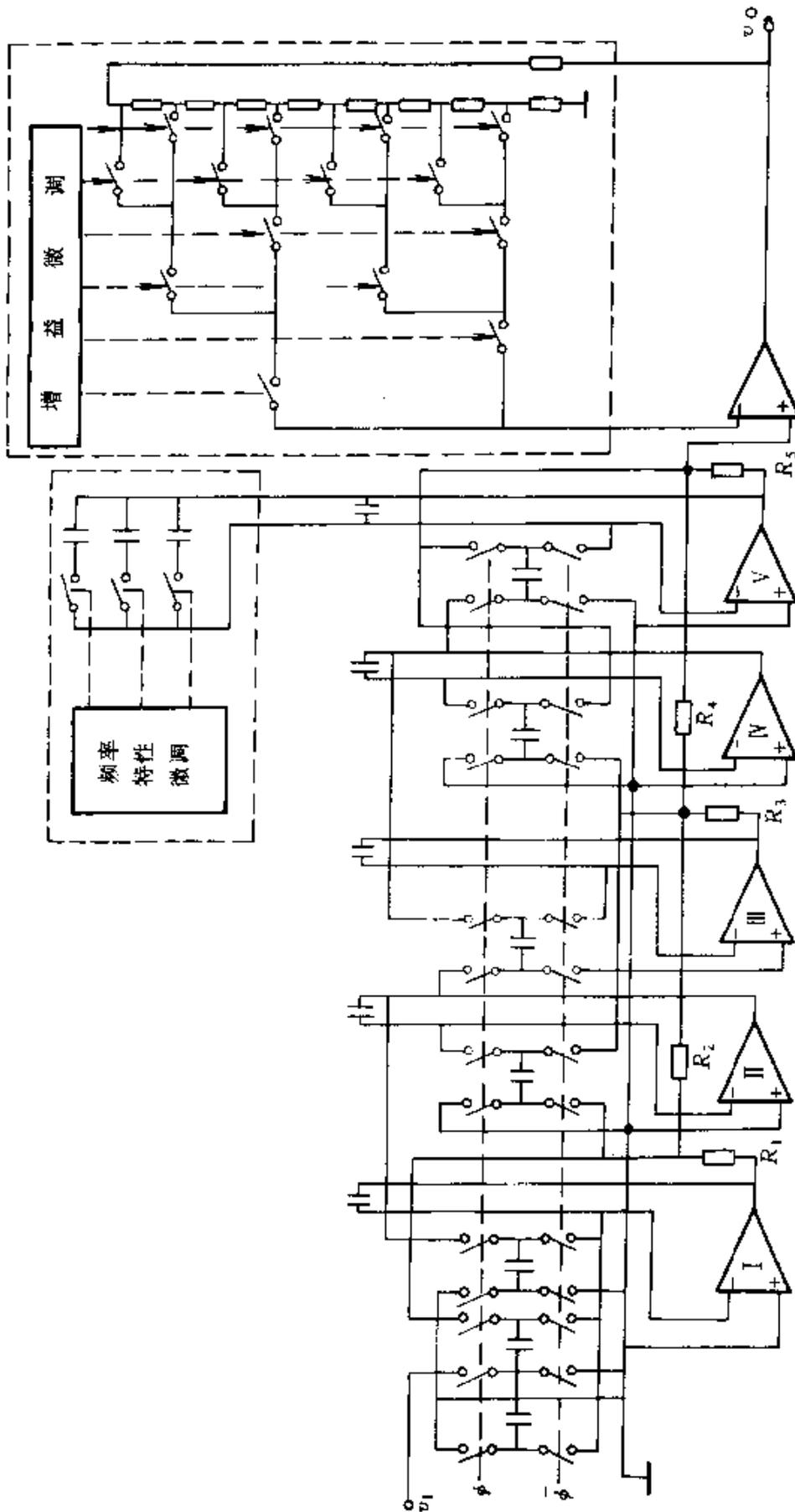


图 2.8.10 开关电容电路实现发送低通滤波器方框图

图 2.8.11 开关电容电路实现发送低通滤波器



2.8.4 接收低通滤波器

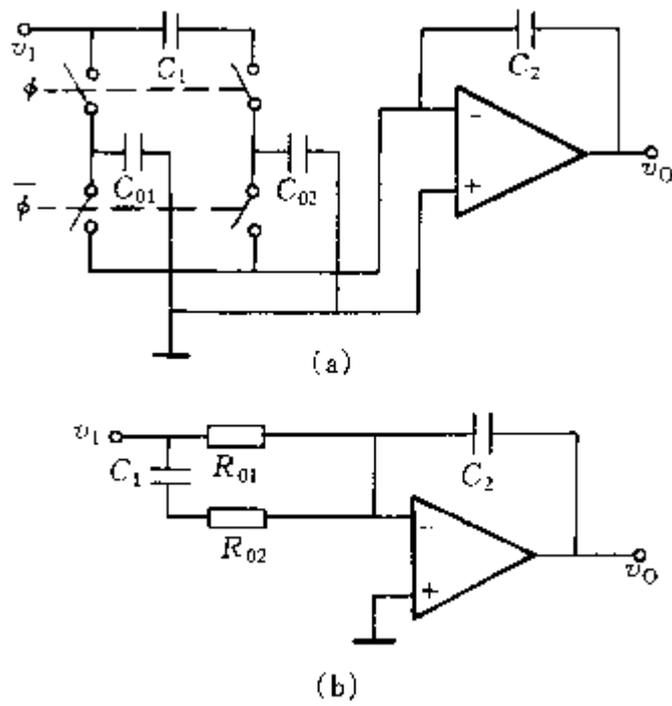


图 2.8.12 接收低通滤波