

高等学校教材

开关电容网络

陆 跃



电子科技大学出版社

高等学校教材

开关电容网络

陆 跃

电子科技大学出版社

• 1989 •

内 容 提 要

本书集中介绍了开关电容网络的通用分析方法和开关电容滤波器 的基本设计方法。详细论述了开关电容网络的计算机辅助分析法。对开关电容网络的基本原理、非理想效应及在非滤波领域的应用也作了介绍。

另外,为了配合教学,将开关电容网络模拟和优化程序 SCNSOP 作为教学辅助工具提供给读者。

本书可作为工科电子类专业本科生和研究生的教材,也可供有关工程技术人员参考。

高 等 学 校 教 材

开 关 电 容 网 络

陆 跃

电子科技大学出版社出版

(中国成都市建设北路二段四号)

四川煤田地质公司制图印刷厂印刷

四川省新华书店发行

开本 850×1168 1/32 印张 7.4375 字数 196 千字

版次1989年12月第一版 印次1989年12月第一次印刷

印数 1—2200 册

中国标准书号 ISBN 7—81016—149—0/TN·39

(15452·72) 定价: 3.20元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”

（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

1977年美国加州大学Berkeley分校的学者Hosticka、Brodersen、Gray和Hodges等人组成的研究小组集成了第一片单片Mos开关电容滤波器。随着单片集成开关电容滤波器的出现,开关电容网络的研究成了电路和系统理论学科中一个最活跃的分支,受到了电路理论工作者和集成电路设计者的广泛重视。开关电容网络的设计和分析技术在各种有关电路理论的讨论会、年会、杂志和期刊以及整个集成电路工业中成为热门话题。短短几年,有关研究人员提出了许多开关电容网络设计和分析方法,并发表了大量论文,多种开关电容滤波器和应用开关电容技术的集成电路进入实用化、商品化。目前对这一领域的研究已日趋成熟,开关电容网络的应用已从滤波器领域扩展到了几乎模拟集成电路的各个方面。

本教材按照“无线电技术与信息系统”教材编委会“电路与系统”编审小组所提出的编写大纲的内容和字数要求编写,并经编审组评选审定、推荐出版。本教材由东南大学无线电系陆跃同志编写,电子科技大学顾德仁教授担任主审。教材主要讨论了开关电容网络的基本原理、基本分析方法和开关电容滤波器的设计方法,并简单地介绍了开关电容网络在非滤波领域的应用。对于开关电容网络基本原理和分析方法,教材主要集中于其时变网络特性的论述,使读者在学过非时变电路理论的基础上,对时变电路有一定的认识,以完善读者的电路与系统理论知识,并着重介绍开关电容网络的计算机分析方法,有关开关电容滤波器设计的介绍,侧重于几种最常用的设计方法。为了配合教学,我们将开关电容网络模拟和优化程序SCNSOP作为教材的辅助工具提供给大家(有兴趣的读者可与作者联系),以帮助任课教师,并可作为本课程的实验手段。

本教材可作为“信号、电路与系统”等专业的研究生教学用书

和“无线电电子学”类专业高年级本科生的选修课教材，也可供有关科研人员参考。

在本书的编写过程中，东南大学沈永朝教授对作者给予了很多指导和帮助，电子科技大学顾德仁教授和华中工学院余玉龙教授仔细审阅了原稿，提出了非常宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中疏漏错误之处在所难免，恳请各位教师和读者批评指正。

编者

1989年3月于南京

目 录

第一章 开关电容网络基本原理	(1)
§ 1.1 开关电容网络简介	(1)
§ 1.2 开关电容等效电阻原理	(3)
§ 1.3 开关电容积分器	(4)
§ 1.4 开关电容网络的基本电路	(7)
§ 1.4.1 开关电容等效电阻电路	(8)
§ 1.4.2 开关电容积分器电路	(10)
§ 1.4.3 开关电容比例器电路	(16)
§ 1.4.4 开关电容延时器电路	(17)
§ 1.4.5 开关电容积分求和器电路	(18)
§ 1.5 开关电容网络设计中一些实际问题的考虑	(19)
§ 1.5.1 寄生电容的影响	(19)
§ 1.5.2 非理想运放的影响	(24)
§ 1.5.3 噪声的影响	(27)
§ 1.5.4 时钟频率的限制	(28)
习题	(29)
参考文献	(32)
第二章 开关电容网络分析	(36)
§ 2.1 开关电容网络的简单分析法	(36)
§ 2.1.1 电荷的存储与转换	(36)
§ 2.1.2 开关电容网络时域一般分析	(38)
§ 2.2 开关电容网络的改进节点分析法	(43)
§ 2.2.1 开关电容网络节点法和改进节点法简介	(43)
§ 2.2.2 改进节点法一	(44)
§ 2.2.3 改进节点法二	(66)
§ 2.3 开关电容网络的状态变量分析法	(80)
§ 2.3.1 开关电容网络的状态方程	(80)

§2.3.2	开关电容网络的状态方程建立	(81)
§2.3.3	开关电容网络状态变量分析法的时域和频域解	(83)
§2.4	开关电容网络的等效电路分析法	(86)
§2.4.1	开关电容网络的z域等效电路	(87)
§2.4.2	开关电容网络的等效电路分析法	(102)
§2.4.3	用通用电路分析程序SPICE分析开关电容网络	(105)
§2.5	开关电容网络灵敏度、噪声和非理想性分析	(113)
§2.5.1	开关电容网络灵敏度分析	(113)
§2.5.2	开关电容网络噪声分析	(117)
§2.5.3	开关电容网络非理想性分析	(121)
习题		(123)
参考文献		(126)
第三章 开关电容滤波器设计		(130)
§3.1	开关电容滤波器设计简介	(130)
§3.2	用开关电容等效电阻概念设计开关电容滤波器	(132)
§3.3	跳耦型开关电容滤波器设计	(138)
§3.3.1	梯型结构滤波器的状态变量表示和流图	(138)
§3.3.2	跳耦型开关电容滤波器基本节设计	(141)
§3.3.3	梯型结构有限传输极点和传输零点的实现	(144)
§3.3.4	跳耦型开关电容滤波器的设计步骤与设计实例	(148)
§3.4	用双线性变换法设计开关电容滤波器	(152)
§3.4.1	双线性变换	(152)
§3.4.2	基本电路元件的双线性模型	(154)
§3.4.3	用开关电容双线性元件模型设计开关电容滤波器	(162)
§3.5	用LDI变换法设计开关电容滤波器	(165)
§3.5.1	LDI变换	(165)
§3.5.2	基本电路元件的LDI模型	(168)
§3.5.3	用开关电容LDI元件模型设计开关电容滤波器	(174)
§3.6	开关电容双二阶节滤波器设计	(175)
§3.6.1	一般电路拓扑	(175)
§3.6.2	电路传输函数	(178)

§3.6.3	开关电容双二阶节滤波器综合	(181)
§3.6.4	开关电容双二阶节滤波器设计实例	(194)
习题		(196)
参考文献		(200)
第四章 开关电容网络在非滤波领域的应用		(203)
§4.1	开关电容放大器	(203)
§4.2	开关电容振荡器	(207)
§4.3	开关电容A/D和D/A转换器	(211)
§4.3.1	可编程电容阵列	(211)
§4.3.2	开关电容D/A转换器	(212)
§4.3.3	开关电容A/D转换器	(215)
§4.4	开关电容平衡调制器	(219)
§4.5	开关电容整流器	(222)
§4.6	开关电容峰值检波器	(223)
§4.7	开关电容锁相环	(224)
习题		(225)
参考文献		(227)

第一章 开关电容网络基本原理

§ 1.1 开关电容网络简介

开关电容网络是指由电容、运算放大器和受时钟控制的开关构成的网络。

开关电容网络最先是在高质量单片集成滤波器的研究中受到重视。高质量滤波器早期是用无源RLC电路实现的，由于电感难于集成，在六十年代，随着集成有源器件和集成运算放大器的发展，人们开始致力于用有源器件取代电感，由此导致了有源RC滤波器的发展。但有源RC滤波器的单片集成是基于混合集成技术，它除了需占用较大空间之外，还有一主要缺点就是不能同目前的主流集成工艺即MOS集成工艺兼容。因此自七十年代起，追求用MOS工艺技术单片集成高性能滤波器就成为滤波器研究的主要方向。可是用MOS工艺直接集成有源RC滤波器时，却遇到了困难。为了不占用过大的芯片面积，在采用MOS工艺时，很少将MOS电容做到大于100pF。对滤波器在音频（0~4 kHz）应用情况下，时间常数RC通常具有 10^{-4} 的数量级。假设电容已做到10pF，电阻仍具有 10^7 的数量级，如果用MOS工艺多晶硅线条或扩散区来实现这一电阻，将占 $10^6 \mu\text{m}^2$ 的面积，这大约是整个芯片的十分之一。且在集成电阻和电容时，都会有5~10%的误差。这两种误差又是不相关的，这样就会造成整个滤波器的时间常数RC有高达20%的误差，而且这种误差还会随着温度和信号电平而改变。为了克服这些缺点，如六十年代用有源器件取代电感一样，在MOS电路中用开关和电容取代电阻应运而生。用开关和电容取代电阻后，整个网络仅由MOS开关、MOS电容和MOS运放组成。电路的特性仅仅决定于电容比，在

稳定的MOS工艺条件下,电容比的精度可以做到0.01~0.1%。用开关和电容还可以很方便地实现大电阻,这样由开关电容电路实现的滤波器不仅有MOS电路的许多优点,还克服了有源RC滤波器集成时的许多不足。目前凡使用有源RC滤波器的场合均可以用开关电容滤波器代替。

在开关电容网络的研究中,开关电容滤波器的设计和开关电容网络的分析尤其受重视。开关电容滤波器的设计方法一般可以分为两类:一类是变换设计法、一类是直接设计法。变换法充分继承了以往模拟滤波器的研究成果,在设计模拟滤波器的基础上,通过一定的变换,如双线性变换、无耗离散积分器变换等,将模拟滤波器转化为开关电容滤波器。直接法则直接从滤波器的 z 域传输函数出发,基于对开关电容滤波器双二阶节和各种开关电容网络功能块的研究,通过级联法、信号流图等直接综合 z 域传输函数,得到所需要的开关电容滤波器。

开关电容网络分析是开关电容网络研究中另一个受到普遍关注的问题。由于开关电容网络中存在周期开闭的开关,所以开关电容网络的拓扑是随时间而变的,它是周期时变网络。分析周期时变网络比分析非时变网络困难得多,如需要进行精确的分析,通常有效的办法是用计算机辅助分析,近几年在开关电容网络的分析方面已提出了许多新方法,目前占主流的是改进节点法、状态变量法和等效电路法。在开关电容网络分析中,对开关电容网络的非理想性进行分析也是主要研究课题之一。这种非理想性通常包括运放的有限增益和带宽,开关有限闭合电阻等。另外,有关开关电容网络的灵敏度分析、失真分析、噪声分析等的研究,人们也做了不少工作。

在开关电容滤波器发展的同时,开关电容网络在非滤波领域也获得广泛应用。已可以用开关电容网络构成A/D转换器、D/A转换器、振荡器、放大器、调制器、锁相环等许多非滤波电路。

开关电容英文为Switched Capacitor,简称为SC。为表示简洁,本书中也将开关电容网络简称为SC网络。

§ 1.2 开关电容等效电阻原理

图1-1 (a) 是一个简单的SC电路, 其中MOS管 T_1 和 T_2 起开关作用, 它们分别由图1-1 (b) 所示时钟控制信号 ϕ 和 $\bar{\phi}$ 控制。设初始时刻为 t_1 , 这时 T_1 管导通, 电容上 C 的电荷为 CV_1 ; 在 t_2 时刻, T_2 管导通, T_1 管截止, 电容 C 上的电荷为 CV_2 。这样在一个时钟周期内, 由 V_1 端向 V_2 端传送的电荷为

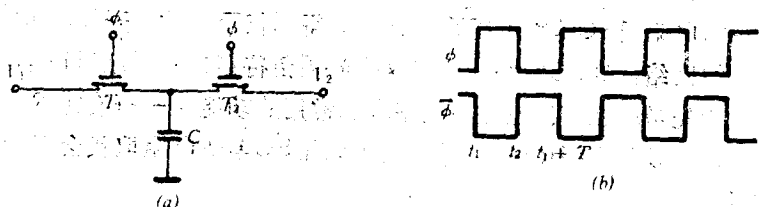


图 1-1 SC等效电阻电路

$$\Delta Q = CV_1 - CV_2 = C(V_1 - V_2) \quad (1-1)$$

定义平均电流为一个周期内电荷的流动, 则有

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{C}{T} (V_1 - V_2) \quad (1-2)$$

从上式可以看出, V_1 和 V_2 之间等效为存在一个电阻, 电阻的阻值为

$$R = \frac{V_1 - V_2}{\bar{I}} = \frac{T}{C} = \frac{1}{f_c C} \quad (1-3)$$

上式中 f_c 是控制开关的时钟频率。在以上分析过程中, 我们假设了 V_1 和 V_2 在开关导通时是不变的, 实际上只要时钟频率远远大于信号频率, 这个要求就可以自然满足。从式(1-3)可以看出, SC等效电阻的大小与时钟周期成正比、与电容值和时钟频率

成反比。如果电容取 1 pF ，时钟频率取 100 kHz ，这时SC等效电阻具有 $10\text{ M}\Omega$ 的阻值。在MOS工艺条件下要实现这么大的电阻将占用很大芯片面积，而用SC电路则仅需很小芯片面积就可以了。据估算它只占原来所需面积的 $1/400$ 。

用开关和电容构成的电路取代电阻，其原理和电路都很简单，但它在SC网络和SC滤波器的发展进程中的意义却非常重大。

§ 1.3 开关电容积分器

有了SC等效电阻的概念，就会很自然地想到如果将有源RC网络中的电阻用SC等效电阻取代就可以得到仅由运放、开关和电容构成的网络，即SC网络，关于这个问题留待第二章详细讨论。下面我们先考虑在有源电路中最基本和常用的功能块——有源RC积分器，以及将有源RC积分器中的电阻用SC等效电阻取代会有什么结果。

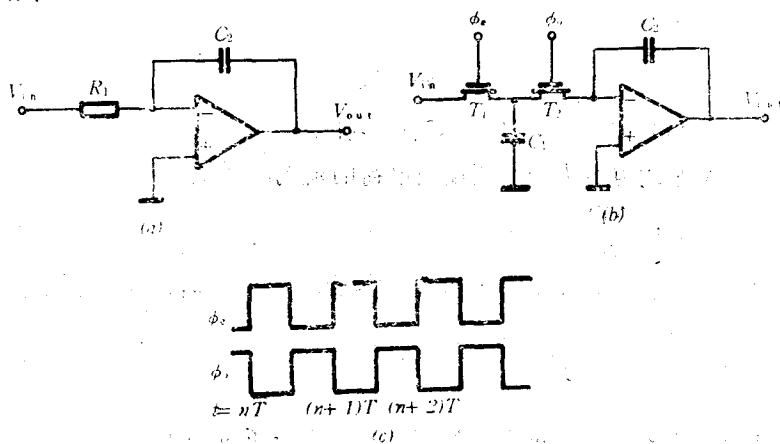


图 1-2 a. 有源RC积分器
b. SC积分器
c. 控制时钟波形

图1-2 (a) 是一个有源RC反相积分器, 该电路输入和输出之间的关系为

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{R_1 C_2} \int_{-\infty}^t V_{in}(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

对式 (1-4) 进行Laplace变换得

$$V_{out}(s) = -\frac{1}{s R_1 C_2} V_{in}(s) \quad (1-5)$$

这样求得电路的传输函数为

$$H(s) = -\frac{1}{s R_1 C_2} \quad (1-6)$$

如果积分器中的电阻用图 1-1 (a) 的SC等效电阻取代, 则得到SC积分器如图 1-2 (b) 所示, 将式 (1-3) 的SC等效电阻值代入式 (1-6) 得

$$H(s) = -\frac{1}{s C_2 (1/f_c C_1)} = -\frac{1}{s} f_c \frac{C_1}{C_2} \quad (1-7)$$

以 $s = j\omega$ 代入上式, 可以得频域传输函数为

$$H(j\omega) = -\frac{1}{j\omega} f_c \frac{C_1}{C_2} \quad (1-8)$$

从式 (1-8) 可以看出当时钟信号频率一定时, SC积分器传输函数仅是电容比 C_1/C_2 的函数。由于SC等效电阻仅是一个近似的 关系, 所以式 (1-8) 所描述的SC积分器传输函数也是一个近似关系。下面我们 从电荷守恒原理出发, 推导出图1-2 (b) 中电路的实际传输函数, 并比较它与式 (1-8) 给出的传输函数有什么区别。

设在 $t = nT$ 时刻, ϕ_1 使 T_1 导通, ϕ_2 使 T_2 截止。这样 C_1 与输入端相连通, 而与运放的反向输入端断开。电容 C_1 被充电到 V_{in} 。如初始时电容 C_2 上电压为零, 则 $V_{out} = 0$ 。在 $t = (n + 1/2)T$ 时刻, ϕ_1 使 T_1 截止, ϕ_2 使 T_2 导通, 这时电容 C_1 与运放的反相输入端连通, 因为运放的输入是虚地, 所以 C_1 的电荷瞬间传给 C_2 , 输

出 V_{out} 变为 $V_{out}[(n+1/2)T] = -C_1/C_2 V_{in}(nT)$ ，这里 $-C_1/C_2$ 也称之为积分器的增益。由于假设电路是理想的，即电路中电阻为零，故 V_{out} 可以立即达到稳定并维持在一个常数。在 $t = (n+1)T$ 时刻， ϕ_c 使 T_1 再次导通， ϕ_c 使 T_2 再次截止。因为没有另外的电荷传递到 C_2 上，输出维持在 $-(C_1/C_2)V_{in}(nT)$ 。而 C_1 又被重新充电到 $V_{in}[(n+1)T]$ 。同理，在 $t = (n+3/2)T$ 时刻， T_1 截止， T_2 导通，此时 C_2 又被 C_1 上的电荷充电。图 1-2 (b) 中，电路的输入在 ϕ_c 控制时取样，如果输出也在 ϕ_c 控制时输出，可以依据电荷守恒原理，列出差分方程

$$C_2[V_{out}[(n+1/2)T] - V_{out}(nT)] = -C_1 V_{in}(nT) \quad (1-9)$$

如果输出是 ϕ_c 控制时取样输出，则可以列出电荷守恒方程为

$$C_2\{V_{out}[(n+3/2)T] - V_{out}[(n+1/2)T]\} = -C_1 V_{in}[(n+1)T] \quad (1-10)$$

对上两式求 z 变换，经过适当整理可以求得传输函数分别为

$$H^{ee}(z) = \frac{V_{out}^e(z)}{V_{in}^e(z)} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (1-11)$$

$$H^{eo}(z) = \frac{V_{out}^o(z)}{V_{in}^e(z)} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \cdot z^{1/2} \quad (1-12)$$

这里上标 e 或 o 分别表示在 ϕ_c 或 ϕ 取样时刻。在式 (1-11) 和 (1-12) 中令 $z = e^{j\omega T}$ ，可以得到相应的 SC 积分器的频域传输函数

$$H^{ee}(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2} \frac{e^{-j\omega T}}{1-e^{-j\omega T}} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{f_c}{j\omega} \cdot \frac{\omega T/2}{\sin(\omega T/2)} \cdot e^{-j\omega T/2} \quad (1-13a)$$

$$H^{eo}(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2} \frac{e^{-j\omega T/2}}{1-e^{-j\omega T}} = -\frac{C_1}{C_2} \frac{f_c}{j\omega \sin(\omega T/2)} \cdot \frac{\omega T/2}{\sin(\omega T/2)} \quad (1-13b)$$

在 $\omega T \ll 1$ 的条件下，即时钟频率比信号频率高得多的情况下，

$e^{j\omega T}$ 可以用Taylor级数展开为

$$e^{j\omega T} \approx 1 + j\omega T - (\omega T)^2/2 - \dots$$

将 $e^{j\omega T}$ 的Taylor展开式代入式(1-13a), 忽略高阶项可得

$$H^{SC}(j\omega) = -\frac{C_1}{C_2} \frac{1}{j\omega T} = -f_c \frac{C_1}{C_2} \frac{1}{j\omega} \quad (1-14)$$

这时SC积分器的传输函数与式(1-8)给出的传输函数一样。

对以上的推导过程和结果进行分析, 我们可以得到如下一些结论:

- 1) SC网络的传输函数在不同的取样时刻一般是不一样的。
- 2) SC积分器的实际传输函数并不等于将有源积分器传输函数中的电阻用SC等效电阻表达式取代后的传输函数, 而只是一种近似。
- 3) 在时钟频率比信号频率高许多的情况下, SC积分器的传输函数与将有源积分器传输函数中的电阻用SC等效电阻关系式代入后所得传输函数近似相等。
- 4) 有源RC积分器的时间常数为 $R_1 C_2$, SC积分器的时间常数由式(1-8)可得为 $C_2/C_1 f_c$ 。这里 C_1 是取代电阻的SC等效电阻电路中的电容值, f_c 是时钟频率。单个电容的精度只能控制在10%左右, 而电容比的精度则可以控制在1%或更高的情况, 时钟频率通常可以非常精确, 所以时间常数的精度可达1%或更高。
- 5) 比较式(1-7)和(1-11), 可以看出用图1-1(a)所示的SC等效电阻取代有源RC积分器中电阻 R , 相当于将 s 用 $(z-1)/T$ 代替, 这实际上是正向欧拉(Forward Euler)变换。

§ 1.4 开关电容网络的基本电路

在第二节中, 为了解释SC网络与电阻等效之原理, 简单介绍一种SC等效电阻电路和由这种等效电阻构成的反相SC积分器。本

节我们将讨论几种常用的SC网络基本电路，这些基本电路在今后介绍的SC滤波器设计中起着重要作用，同时亦是滤波器应用的SC网络中的基本单元。

§ 1.4.1 开关电容等效电阻电路

1. 图1-1 (a) 所示的SC等效电阻电路通常称为并联SC等效电阻电路，图1-3 (a) 是串联SC等效电阻电路，开关仍由占空比为50%的时钟控制，如图1-3 (b) 所示。

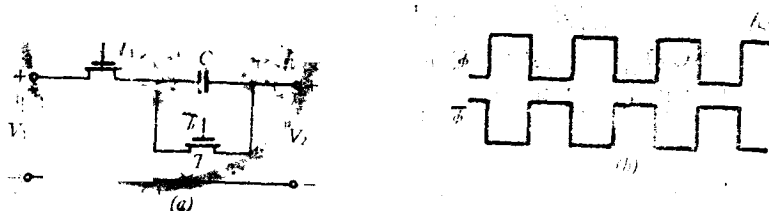


图 1-3 SC串联等效电阻

当 ϕ 使 T_1 管导通时， $\bar{\phi}$ 使 T_2 截止，电容 C 上存贮的电荷为：

$$Q_1 = C (V_1 - V_2) \quad (1-15)$$

当 $\bar{\phi}$ 使 T_2 闭合时， ϕ 使 T_1 截止， C 上电荷通过 T_2 放电为零，这时

$$Q_2 = 0 \quad (1-16)$$

在一个周期内的平均电流为

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{Q_1}{T} = \frac{C}{T} (V_1 - V_2) \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 求得等效电阻为

$$R = \frac{T}{C} = \frac{1}{f_c C} \quad (1-18)$$

这里等效电阻与式 (1-3) 的结果相同。

2. 图1-4是另一种开关电容等效电阻电路，该电路需要四个开关，时钟控制信号如图1-4 (b) 所示。