

# 开关电容 V/Q 变换器及其在接地阻抗模拟中的应用\*

李文哲

(北京邮电学院, 北京)

**摘要** 文中提出一个 V/Q 变换的广义跨导概念, 并应用在开关电容阻抗模拟中. 使用 V/Q 变换器, 可以用电压传递函数实现所希望的阻抗函数. 由此概念出发, 分别导出了前差 FD, 后差 BD 和双线性 S/Z 变换的三种接地开关电容频变负阻 SC-FDNR 电路. 如果所选用的电压传递函数电路对杂散电容不灵敏, 那么实现的模拟阻抗电路对杂散电容也是不灵敏的. 作为文中的一个例子, 用 FD-FDNR 电路组成一个谐振回路, 实验表明其频响特性与理论分析相一致.

**关键词** 有源网络; 开关电容滤波器; 开关电容变换器

## 1. 引言

实现低灵敏度滤波器的重要方法之一是阻抗模拟法. 开关电容阻抗电路可以由连续时间域的阻抗到离散时间域的阻抗变换而得到<sup>[1,2]</sup>. 根据 V/I (Voltage/Current) 换能器的开关电容等效, 开关电容跨导电路可以用来实现阻抗模拟<sup>[3-5]</sup>. 通过恰当的结构安排, 开关电容跨导电路不但可用来构成阻抗电路, 而且还可以考虑杂散不灵敏电路的实现. 文中提出一个称之为 V/Q (Voltage/Charge) 变换的广义跨导概念, 并把它应用在开关电容阻抗模拟中. 然后, 给出了一个 V/Q 变换器, 并用它来设计杂散不灵敏的开关电容阻抗电路.

## 2. V/Q 变换器

通常, 一个双端口的开关电容跨导电路可通过下面的式子来描述(只考虑单向)

$$\Delta Q_1(z) = G_{12}(z)V_2(z) \quad (1)$$

即电路端口 2 中的电压  $V_2(z)$  可以通过  $G_{12}(z)$  而变换成电路端口 1 中的增量电荷  $\Delta Q_1(z)$ . 其中  $G_{12}(z)$  是由端口 1 到端口 2 的导纳函数. 根据这个概念, 推广到三端口网络, 有

$$\Delta Q_1(z) = G_{11}(z)V_1(z) + G_{12}(z)V_2(z) + G_{13}(z)V_3(z) \quad (2a)$$

$$\Delta Q_2(z) = G_{21}(z)V_1(z) + G_{22}(z)V_2(z) + G_{23}(z)V_3(z) \quad (2b)$$

$$\Delta Q_3(z) = G_{31}(z)V_1(z) + G_{32}(z)V_2(z) + G_{33}(z)V_3(z) \quad (2c)$$

在 (2a)、(2c) 式中, 若令  $G_{13}(z) = 0$ ,  $G_{31}(z) = -G_{33}(z)$ ,  $\Delta Q_3(z) = G_{32}(z)V_2(z)$

则

$$\Delta Q_1(z) = G_{11}(z)V_1(z) + G_{12}(z)V_2(z) \quad (3a)$$

$$0 = (V_1 - V_3)G_{31}(z) \quad (3b)$$

\* 1987 年 4 月 15 日收到, 1989 年 4 月 14 日修改定稿.

(3a)和(3b)式描述了一个满足关系  $V_3(z) = V_1(z)$  的三端口网络,它把端口“3”和端口“2”的电压通过  $G_{11}(z)$  和  $G_{12}(z)$  变换为端口1的增量电荷。由于这个原因,我们称(3)式所对应的电路为 V/Q 变换器,同理  $G_{11}(z)$  和  $G_{12}(z)$  是互导纳函数。用  $V_3(z)$  除(3a)式的两边,得到

$$\Delta Q_1(z)/V_1(z) = G_{11}(z) + G_{12}(z)/(V_3(z)/V_2(z)) \quad (4)$$

式中  $\Delta Q_1/V_1$  是电路端口的输入导纳,定义为  $Y_{in}(z) \triangleq \Delta Q_1/V_1$ 。而  $V_3(z)/V_2(z)$  是由端口2到端口3的电压传递函数,定义为  $H(z) = V_3/V_2$ 。为得到所需的输入导纳,只需

$$H(z) = G_{12}(z)/(Y_{in}(z) - G_{11}(z)) \quad (5)$$

因此,寻找  $Y'_{in}(z)$  的问题就成为设计  $H(z)$  的问题了。在图1中给出了一个 V/Q 变换器,通过  $z$  域的结点电压分析,有

$$\begin{aligned} \Delta Q_1(z) &= C(1 - z^{-1})V_1(z) \\ &\quad - C(1 - z^{-1})V_2(z) \end{aligned} \quad (6a)$$

$$V_3(z) = V_1(z) \quad (6b)$$

比较(6a)、(6b)和(3a)、(3b)式,得

$$G_{11}(z) = C(1 - z^{-1}), \quad G_{12}(z) = -C(1 - z^{-1}) \quad (7a)$$

$$\text{和} \quad H(z) = -C(1 - z^{-1})/(Y_{in}(z) - C(1 - z^{-1})) \quad (7b)$$

### 3. 开关电容频变负阻电路模拟

直接观察(6)式,就会发现它有一个开关电容频变负阻电路(SC-FDNR Switched-Capacitor-Frequency Dependent Negative Resistor)中所需的因子  $(1 - z^{-1})$ ,因此图1 V/Q 变换器适合于 FDNR 电路的模拟。若采用 BD (Backward Differential) 离散变换的 FDNR 导纳,其表示式为  $Y_{in}(z) = D(1 - z^{-1})/T_0$  其中  $T = 1/f_c$  是电路时钟周期,  $f_c$  为时钟频率(双相时钟)。把  $Y_{in}(z)$  代入(7b)式,那么

$$H(z) = \frac{1}{-\left(1 - \frac{D}{CT}\right) + \frac{D}{CT} z^{-1}} \quad (8)$$

$H(z)$  可以用图(2a)中的电路实现,并且

$$H(z) = \frac{1}{-C_2/C_1 + (1 + C_2/C_1)z^{-1}} \quad (9)$$

不难看出,如果令  $D/T = C(1 + C_2/C_1)$ , 则(8)式和(9)式是相等的。把图(2a)电路和图1电路连接可得到图(3a)电路,它具有输入导纳

$$Y_{in}(z) = C(1 + C_2/C_1)(1 - z^{-1})^2 \quad (10)$$

图(2a)电路中,当输入端接电压源时,电路对所有杂散电容都是不灵敏的。所以此电路为一个杂散不灵敏电路。

由以上同样的过程。我们推导出 FD (Forward Differential)-FDNR 和双线性 Bilinear-FDNR 电路,分别示于图(3b)和图(3c)中;所对应的  $H(z)$  电路分别示于图(2b)和图(2c)中。图(2b)电路是一个具有补偿的差动积分器<sup>[6]</sup>,当令  $C_1/C_2 = C_{p1}/$

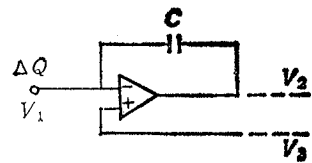
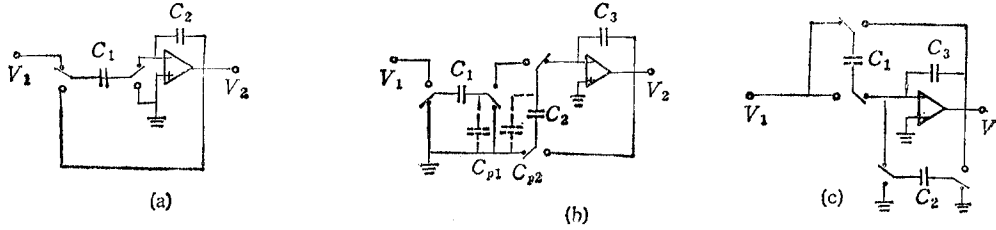


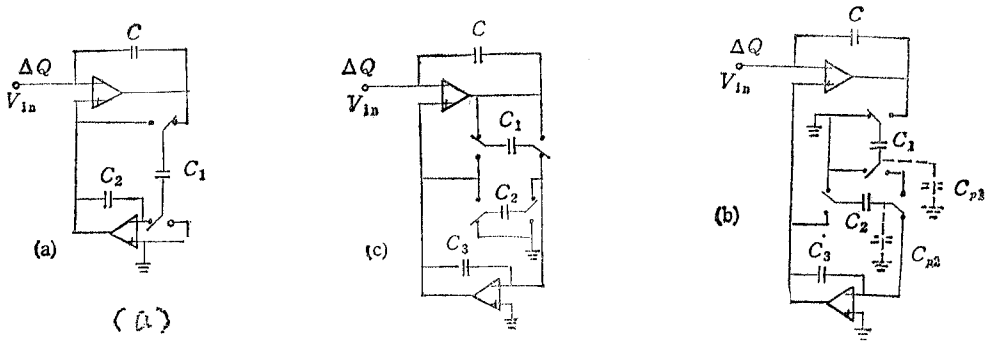
图1 V/Q 变换器

$C_{p2} = 1$  时 ( $C_{p1}$ 、 $C_{p2}$  为杂散电容), 补偿成立. 可以注意到图 (3b) 电路在原理中实际上和文献[5]中给出的 FDNR 电路等效. 其区别是前者使用通用积分器电路作为电压



(a)  $H(z) = \frac{1}{-C_2/C_1 + (1 + C_2/C_1)z^{-1}}$  (b)  $H(z) = \frac{z}{-2C_2/C_1 + (1 + 2C_3/C_1)z^{-1}}$  (c)  $H(z) = 1 + z^{-1}/[-C_3/C_1 + (1 + (C_2 + C_3)/C_1)z^{-1}]$   
 $C_1/C_2 = C_{p1}/C_{p2} = 1$

图2 电压传递函数  $H(z)$  的实现电路



(a) BD-FDNR

(b) FD-FDNR

(c) Bilinear-FDNR

$Y_{in}(z) = C(1 + C_2/C_1)(1 - z^{-1})^2$   $Y_{in}(z) = \frac{2CC_3(1 - z^{-1})}{C_1z^{-1}}$   $Y_{in}(z) = C(1 + C_3/C_1)(1 - z^{-1})^2/(1 + z^{-1})$ ,  $C_1 = C_2$   
 $C_1/C_2 = C_{p1}/C_{p2} = 1$

图3 实现的开关电容 FDNR 电路

传递函数  $H(z)$  电路, 相应实现的是一个杂散不灵敏的 FDNR; 而后者则用跨导电路(实际上, 是一个使用缓冲器作成的差动积分器, 并且用它的输出端作为差动输入的一个输入端), 也是一个对杂散电容相对不灵敏的电路<sup>[9]</sup>.

### 4. SC-CRD 谐振电路

为了说明导出电路的应用, 考虑图 (4a) 中所示的 CRD 谐振电路, 电路的电压传递函数为

$$\frac{V_o(S)}{V_i(S)} = \frac{SC_{C_2}}{S^2D + (C_{01} + C_{02})S + G} \tag{11}$$

用 FD-FDNR 代替电路中频变负阻元件, TSC 电路 (toggle-switched-capacitor) 代替  $R$ , 即得到图 (4b) 所示的 SC-CRD 谐振电路. 在 (11) 式中, 用  $R \rightarrow T/C_R$ ,  $S^2D \rightarrow 2CC_3(1 - z^{-1})^2/C_1z^{-1}$  和  $SC \rightarrow C(1 - z^{-1})$  代入, 得

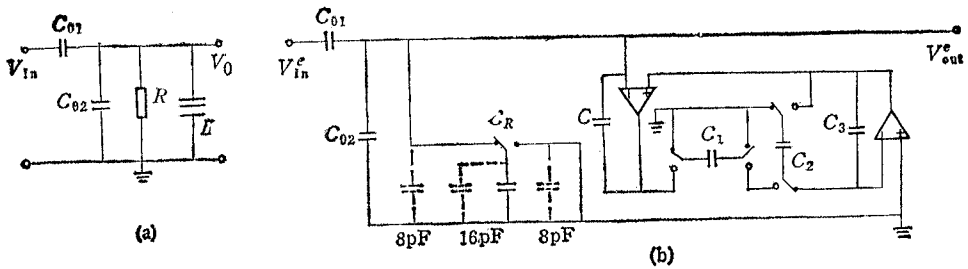


图 4 开关电容 CRD 谐振电路

$$\frac{V_{out}^e(z)}{V_{in}^e(z)} = \frac{\frac{C_{01}}{C_R} (1 - z^{-1})}{\frac{2CC_3}{C_2C_R} \cdot \frac{(1 - z^{-1})^2}{z^{-1}} + \frac{(C_{01} + C_{02})}{C_R} (1 - z^{-1}) + 1} \quad (12)$$

$V_{out}^e(z)/V_{in}^e(z)$  是一个二阶的电压传递函数。若选择元件值  $C_1 = C_3 = 5\text{nF}$ ,  $C_2 = 1\text{nF}$ ,  $C_R = 4.85\text{nF}$ ,  $C_{01} = 312.4\text{pF}$ ,  $C_{02} = 66\text{pF}$  和时钟频率  $f_c = 20\text{kHz}$ , 就可以实现一个具有中心频率  $f_0 = 1\text{kHz}$ , 选择性  $Q = 40$ , 增益  $K = 0.816$  的电压传递函数特性。构成的电路中使用 CA3140E 运算放大器和 CD4066BE 开关, 开关两端对地分别有  $8\text{pF}$  的分布电容, 这些分布电容可通过设计中的预畸用  $C_{02}$  和  $C_R$  将其吸收。

电路的元件精度误差  $\leq 0.5\%$ , 测试的频响特性见图 5, 可以看出, 由于 FD-FDNR 电路的杂散不灵敏特性, 所以谐振电路响应和理论计算完全吻合。

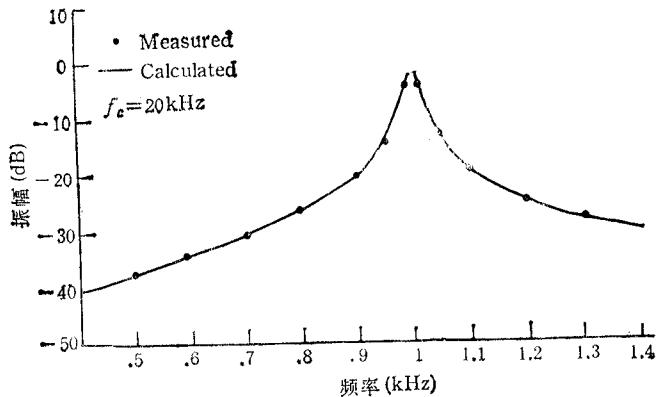


图 5 图 4 电路特性的理论值和测试结果的比较

### 5. 结论

文中提出一个称之为 V/Q 变换的广义跨导概念, 并应用于开关电容的阻抗模拟中。根据这个概念, 导出了三种 S/Z 域变换的 SC-FDNR 电路, 且当所用的  $H(z)$  电路对杂散电路不灵敏时, 所导出的 SC-FDNR 电路对杂散电容也是不灵敏的。理论通过实验

得到证明。可以预计,文中的概念也可以用在其它类型阻抗的模拟中。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] B. J. Hosticka, G. S. Moschytz, *Electron Lett.*, 14(1978)24, 788—789.
- [ 2 ] G. C. Temes, M. Jahanbegloo, *Electron Lett.*, 15(1979)3, 87—88.
- [ 3 ] S. M. Farugue, J. Vlach, T. R. Viswanathan, *IEE Proc.*, 128(1981)4, Pt. G, 227—229.
- [ 4 ] T. R. Viswanathan, et al., *IEEE Trans on CAS*, CAS-27(1980)6, 502—508.
- [ 5 ] S. M. Farugue, et al., FDNR Switched-Capacitor Filters Insensitive to Parasitic a Capacitances, ISCAS'82, pp. 440—442.
- [ 6 ] P. E. Fleischer, et al., *Electron Lett.*, 17(1981)24, 929—931.

## SWITCHING CAPACITANCE $V/Q$ TRANSVERTER AND ITS APPLICATION IN GROUNDED IMPEDANCE SIMULATION

Li Wenzhe

(*Peijing Institute of Posts and Telecommunications, Beijing*)

**Abstract** A concept of general transconductance of  $V/Q$  (voltage/charge) transformation is proposed, and applied to the simulation of switching capacitance impedance. By Using  $V/Q$  transverter, the expected impedance function can be implemented by means of voltage transfer function. Starting from this concept, the switched capacitor-FDNR (frequency dependent negative resistor) circuits of three kinds of  $S/Z$  transformation (i.e. forward differential  $S/Z$  transformation, backward differential  $S/Z$  transformation, bilinear  $S/Z$  transformation) are respectively deduced. If the selected voltage transfer function circuit is not sensitive to stray capacitance, then the implemented simulation impedance circuit is also not sensitive to stray capacitance. As an example, a resonant loop is composed of forward differential FDNR circuit. The experiments show that the characteristics of its frequency response coincide with the theoretical analysis.

**Key words** Active electric network; Switching capacitance filter; Switching capacitance transverter.