

# 开关电容振荡器的起振和幅值稳定的研究

杨永明

(重庆大学, 重庆 630044)

**摘要** 本文讨论了开关电容振荡器(SCO)的起振和幅值稳定问题。提出了SCO的起振和幅值稳定的新方法。给出了稳定性好的幅值控制电路。在多相SCO的设计中,幅值控制电路的复杂程度不随振荡器的相数增加而增加。实验结果与理论相符。

**关键词** 开关电容振荡器;起振;幅值稳定

## 一、引言

长期以来,振荡器的起振和幅值稳定问题一直是电路研究者重视的课题。近年来,用开关电容(SC)技术设计振荡器已成为热门研究课题。但研究多局限于基本振荡器的SC实现,研究开关电容振荡器(SCO)起振和幅值稳定问题的很少<sup>[1-6]</sup>。在文献[1]中,我们讨论了寄生不灵敏的SCO的实现,但没有考虑振荡器的起振和幅值稳定问题。本文针对这一问题,在文献[1]电路的基础上,讨论了起振和幅值稳定问题,提出了起振和稳幅的方法,给出了起振和稳幅性能良好的三相SCO电路。

## 二、SDO和SCO

$n$ 相序列鉴频振荡器(SDO, Sequence discriminator Oscillator)能产生 $n$ 相幅值对称、相位对称的正弦信号<sup>[2]</sup>。由序列鉴频器(SD, Sequence discriminator)网络和反馈电路构成的有源三相SDO如图1所示。以此为原型实现的三相SCO如图2所示<sup>[3]</sup>。图1电路的特征方程为

$$D(s) = (sCR)^2(3A^2 + 9A + 9) + sCR(6A + 6) + (A^2 + A + 1) \quad (1)$$

式中  $A = A_1 = A_3$  是反馈电路中放大器的增益。

图1电路中,三个输出变量  $V_1, V_2, V_3$  在  $s$  域的关系为<sup>[4]</sup>

$$\left. \begin{aligned} V_1(s) &= A \frac{(sCR + 1)V_2(s) + 2sCRV_3(s)}{3sCR + 1} \\ V_2(s) &= -(V_1(s) + V_3(s)) \\ V_3(s) &= A \frac{(sCR + 1)V_1(s) + 2sCRV_2(s)}{3sCR + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由(1)式可知,当  $A = -1$  时,SDO 电路的特征根位于虚轴上,电路满足振荡条件.与图 1 电路对应的满足双线性变换关系的 SCO 电路的特征根位于区域单位圆上<sup>[7]</sup>,图 2 SCO 电路也满足振荡条件.

图 2 三相 SCO 电路的输出变量  $V_1, V_2, V$  在  $z$  域的关系为<sup>[11]</sup>

$$\left. \begin{aligned} V_1(z) &= -\frac{(C_1/|A|) \cdot V_1(z) + C_3V_2(z) - C_2z^{-1}V_2(z) + C_4(1-z^{-1})V_3(z)}{(C_{A1}/|A|) \cdot (1-z^{-1})} \\ V_2(z) &= -\frac{C_{A2}(1-z^{-1})V_1(z) + C_{A2}(1-z^{-1})V_3(z)}{C_{A2}(1-z^{-1})} \\ V_3(z) &= -\frac{C_3V_1(z) - C_2z^{-1}V_1(z) + C_4(1-z^{-1})V_2(z) + (C_1/|A|) \cdot V_3(z)}{(C_{A3}/|A|) \cdot (1-z^{-1})} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中  $|A| = 1$ .

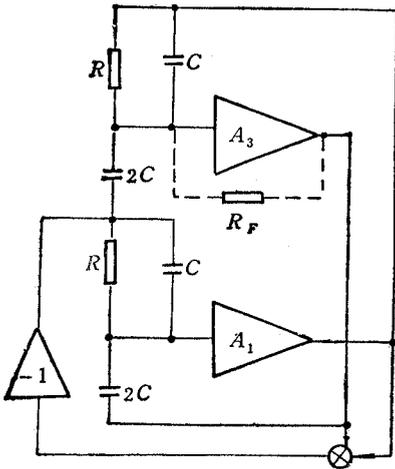


图 1 三相 SDO

### 三、起振的讨论和实现

从理论上讲,振荡电路满足振荡条件后,振荡器可持续产生振荡信号.但实际上,仅满足振荡条件的电路不能自行起振,即使外界因素激发了振荡,也有可能停振.图 2 所示的三相 SCO 电路,由于其特征根位于  $z$  域单位圆上,电路处于临界起振状态,不能确保起振.为了使实现的 SCO 自动起振,电路须存在位于  $z$  域单位圆外的复根.这就要求模拟原型电路存在一对位于  $s$  平面右半平面的复根.

由(1)式可知,模拟原型三相 SDO 的特征根为

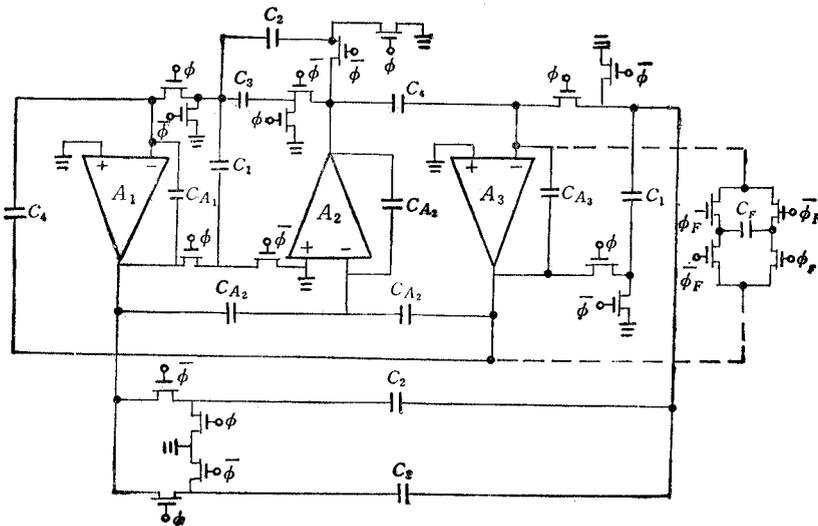


图 2 三相 SCO

由(1)式可知,当  $A = -1$  时,SDO 电路的特征根位于虚轴上,电路满足振荡条件.与图 1 电路对应的满足双线性变换关系的 SCO 电路的特征根位于区域单位圆上<sup>[7]</sup>,图 2 SCO 电路也满足振荡条件.

图 2 三相 SCO 电路的输出变量  $V_1, V_2, V$  在  $z$  域的关系为<sup>[11]</sup>

$$\left. \begin{aligned} V_1(z) &= -\frac{(C_1/|A|) \cdot V_1(z) + C_3V_2(z) - C_2z^{-1}V_2(z) + C_4(1-z^{-1})V_3(z)}{(C_{A1}/|A|) \cdot (1-z^{-1})} \\ V_2(z) &= -\frac{C_{A2}(1-z^{-1})V_1(z) + C_{A2}(1-z^{-1})V_3(z)}{C_{A2}(1-z^{-1})} \\ V_3(z) &= -\frac{C_3V_1(z) - C_2z^{-1}V_1(z) + C_4(1-z^{-1})V_2(z) + (C_1/|A|) \cdot V_3(z)}{(C_{A3}/|A|) \cdot (1-z^{-1})} \end{aligned} \right\} (3)$$

式中  $|A| = 1$ .

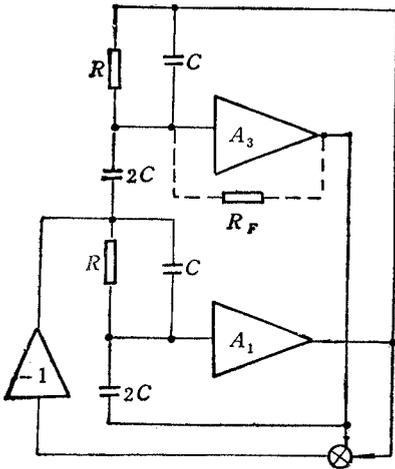


图 1 三相 SDO

### 三、起振的讨论和实现

从理论上讲,振荡电路满足振荡条件后,振荡器可持续产生振荡信号.但实际上,仅满足振荡条件的电路不能自行起振,即使外界因素激发了振荡,也有可能停振.图 2 所示的三相 SCO 电路,由于其特征根位于  $z$  域单位圆上,电路处于临界起振状态,不能确保起振.为了使实现的 SCO 自动起振,电路须存在位于  $z$  域单位圆外的复根.这就要求模拟原型电路存在一对位于  $s$  平面右半平面的复根.

由(1)式可知,模拟原型三相 SDO 的特征根为

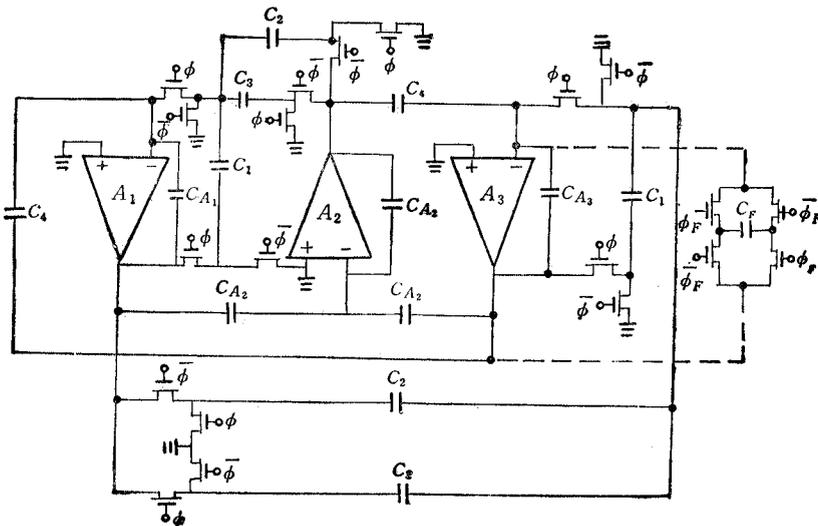


图 2 三相 SCO

$$s = \frac{-RC(6A+6) \pm \sqrt{(RC)^2(6A+6)^2 - 4(RC)^2(3A^2+9A+9)(A^2+A+1)}}{2(RC)^2(3A^2+9A+9)} \quad (4)$$

由上式可知, 要使特征根位于  $s$  平面的右半平面, 必须满足

$$\left. \begin{aligned} -(A+1) &> 0 \\ (6A+6)^2 - 4(3A^2+9A+9)(A^2+A+1) &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由(5)式可知, 仅当  $-2 < A < -1$  时, 模拟原型的特征根位于  $s$  平面的右半平面, 图 1 的 SDO 电路和图 2 的 SCO 电路才能确保起振。因此为了保证设计的 SCO 自行起振, 必须使(3)式中  $1 < |A| < 2$ 。由此可知, 能够自行起振的三相 SCO 电路仍如图 2 所示, 其中电容  $C_{A1}$ ,  $C_{A2}$ ,  $C_1$  应选得比文献[1]中的理论值略小些, 其相对偏差可选为 5% 左右。偏差越大, 起振越快, 但需保证  $|A| < 2$ 。

通过实验观察, 在上述电容取值情况下, 图 2 所示的三相 SCO 电路能自行起振。在不改变原电路结构的情况下, 解决了文献[1]中电路不能起振的问题。此方法也可用于多相 SCO 电路的设计。

#### 四、幅值稳定和控制

为了保证振荡器能够起振, 必须使振荡电路的环路增益大于 1。这样当振荡器起振后, 输出电压的幅值呈指数规律增长, 要使振荡器输出电压的幅值稳定, 必须采取稳幅措施。在振荡电路中, 实际的稳幅方法有两种: (1) 靠非线性元件的非线性限幅; (2) 采用自动增益控制电路稳幅。

图 1 的 SDO 电路和图 2 的 SCO 电路的稳幅均采用放大器的非线性稳幅。从前面的讨论可知, 要使振荡电路起振, 须使  $|A| > 1$ ,  $|A|$  越大于 1, 起振越易。但  $|A|$  越大, 振荡电路的环路放大倍数越大, 造成输出波形失真也越大, 输出电压稳定性就差。图 2 的三相 SCO 电路经过调整几个电容值可保证起振。但又出现了波形严重失真和不稳定的问题。要解决波形失真和幅值稳定问题, 第一种稳幅方法就不适宜, 必须采用自动增益调节方法。下面我们从模拟原型出发来讨论 SCO 电路的幅值稳定问题和解决方法。

最简单的自动增益控制方法是在电路中引入负反馈, 并使负反馈的深度随输出电压幅值变化, 自动调节振荡电路的环路增益的大小, 使输出电压稳定。

在图 1 的三相 SDO 电路中, 如果在  $A_2$  (或  $A_1$ ) 运放的输入和输出之间接一电阻  $R_F$  (图 1 中虚线所示), 这样就在电路中引入了负反馈。引入负反馈后的三相 SDO 的特征方程为

$$D(s) = (3A^2 + 9A + 9)(sCR)^2 + [6(1+A) + (3+A)R/R_F]sCR + A^2 + (1+A)(1+R/R_F) \quad (6)$$

式中,  $-2 < A < -1$ 。

由(6)式可知, 仅当  $6(|A| - 1) - (3 - |A|)R/R_F > 0$  时引入  $R_F$  后的电路才能起振. 这样, 振荡条件不仅与放大器的增益  $A$  有关, 还与反馈电阻  $R_F$  有关. 当  $A$  确定后, 就仅与  $R_F$  有关.

若令

$$f(R_F) = 6(|A| - 1) - (3 - |A|)R/R_F = K_1 - K_2/R_F \quad (7)$$

式中  $K_1 = 6(|A| - 1) > 0$ ,  $K_2 = (3 - |A|)R > 0$  均为常数. 由(7)式作出的  $f(R_F)$  与  $R_F$  的关系如图 3 所示.

当  $f(R_F) = 0$  时, 电路产生稳定振荡. 如果能使反馈电阻  $R_F$  在振荡器起振前大于  $K_2/K_1$ , 由图 3 可知,  $f(R_F) > 0$ , 就可确保电路起振. 振荡产生后, 输出电压逐渐增高, 如果能使  $R_F$  随输出电压增高而减小, 负反馈深度加深,  $f(R_F)$  减小, 最后达到  $f(R_F) = 0$ , 电路产生持续稳幅振荡. 同样, 如输出电压因外界因素发生变化, 也可通过反馈电路的自动调整作用来稳定输出电压. 要达到上述目的, 必须保证  $R_F$  精确的随输出电压的幅值变化. 在模拟电路中,  $R_F$  常采用热敏电阻. 在 SCO 电路中, 不宜采用热敏电阻, 因为要使电路起振,  $R_F$  的值必须较大, 这样  $R_F$  就不能集成, 而且精度也较差, 不能保证电路的精度和稳定度. 若用图 4 所示的 SC 电路来代替  $R_F$ , 可解决  $R_F$  过大不能集成的缺点<sup>[7]</sup>. 图 4 中的 SC 电阻与模拟电路中的电阻  $R_F$  之间关系满足双线性变换关系. SC 电阻的等值电阻为<sup>[7]</sup>

$$R_F = T_F / (2C_F f_F) = 1 / (2C_F f_F) \quad (8)$$

式中  $f_F$  为图 4 SC 电路的时钟频率.

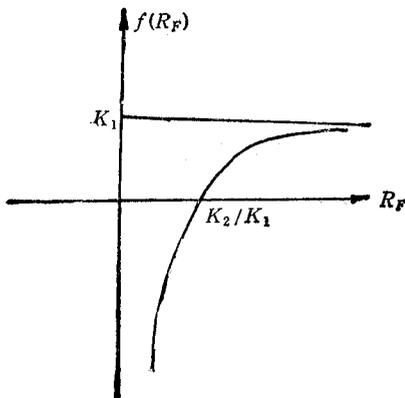


图 3  $f(R_F)$  与  $R_F$  的关系

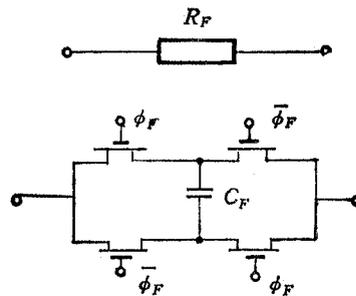


图 4 双线性 SC 电阻

由(8)式可知, 当  $C_F$  确定后,  $R_F$  的值仅与时钟频率  $f_F$  有关.  $f_F$  越大,  $R_F$  越小;  $f_F$  越小,  $R_F$  越大.

用图 4 的 SC 电阻代替  $R_F$ , 而基本 SCO 电路仍为图 2 所示的结构, 这样实现的 SCO 电路如图 2 (包括虚线部分) 所示. 实现的 SCO 为引入了负反馈的 SCO 电路. 由于基本 SCO 电路和模拟原型 SDO 电路之间满足双线性变换关系, 而图 1 中  $R_F$  与图 2 中的 SC 电阻之间也满足双线性变换关系, 因此图 1 (包括  $R_F$ ) 的三相 SDO 与图 2

(包括 SC 电阻)的三相 SCO 之间满足双线性变换关系. 当设计的 SDO 能起振和稳幅时, 相应的 SCO 也能起振和稳幅. 要使图 2 的三相 SCO 能自动稳幅, 必须保证 SC 电阻的阻值随输出电压的幅值变化, 自动调节反馈深度, 改变环路放大倍数.

由(8)式可知, 如果能使时钟频率  $f_F$  随振荡器的输出电压幅值增大而增加, 就能使  $R_F$  的值随之减小, 相应的负反馈加强, 环路增益下降, 保证振荡器输出电压稳定, 波形失真小. 实现这一幅值稳定和控制方框图如图 5 所示.

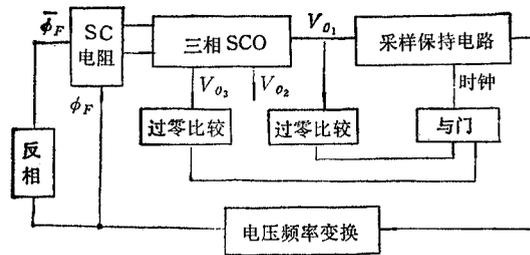


图 5 幅值稳定和控制方框图

图 5 中的  $V_{o1}, V_{o2}, V_{o3}$  为三相 SCO 的输出信号, 它们可写为

$$\left. \begin{aligned} V_{o1} &= V_{om} \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ V_{o2} &= V_{om} \sin(\omega_0 t + \varphi + 120^\circ) \\ V_{o3} &= V_{om} \sin(\omega_0 t + \varphi + 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

图 5 中采用两个过零比较器和一个与门将正弦信号变成采样保持电路的时钟信号, 使采样保持电路的输出电压与振荡器的输出电压的幅值成正比, 并使电压频率变换电路的输出脉冲信号的频率与振荡器的输出电压幅值成正比.

由图 5 可知, 起振前,  $V_{om} = 0, f_F = 0$ , 此时  $R_F = \infty$ , 负反馈支路相当于断开, 保证振荡器起振. 电路起振后, 随着  $V_{om}$  增大,  $f_F$  增大, 相应的  $R_F$  减小, 负反馈增强,  $f(R_F)$  减小, 当  $f(R_F)$  减小到零, 电路达到稳定振荡. 如果由于外界干扰造成输出电压发生变化, 也可通过幅值稳定和控制电路来自动调节, 使输出电压稳定.

图 5 所示的幅值稳定和控制方法可用于多相 SCO 电路中, 只需在某一相输出到输入间引入负反馈支路, 并采用图 5 所示的控制电路即可达到稳幅的目的. 因此本文所提出的方法适用于多相 SCO 的稳幅, 而且电路的复杂程度不随 SCO 相数增加而增加, 同时基本电路的结构不需改变.

我们用分立元件和集成电路对图 5 电路进行了实验.

电路中, 基本三相 SCO 电路中的元件参数参见文献[1],  $C_1, C_{A1}, C_{A2}$  比文献[1]中的值小 5%. 幅值控制电路中, 采样保持电路采用 LF198, 电压频率变换电路采用 LM331, 过零比较器采用 LM311.

实验观察, 不加幅值控制电路, 振荡器起振快, 但波形产生严重失真, 电源电压波动时, 输出电压不稳定. 加上幅值控制电路, 振荡器仍然起振快, 而且波形失真小, 输出电压稳定. 振荡器的振荡频率与时钟频率的关系仍满足文献[1]中的关系.

## 五、结 论

通过理论推导和实验证明本文提出的 SCO 的起振方法和自动稳幅的方法是正确的,可行的。采用本文提出的方法,可不改变原始 SCO 电路的结构,仅改变很少几个电容值,就可使电路自行起振。采用本文提出的稳幅方法,可很好地实现 SCO 电路的幅值稳定和控制,而且控制电路的复杂程度不随振荡器相数的增加而增加,特别适用于多相 SCO 的设计。实现的 SCO 电路不仅具有文献[1]中电路的优点,还具有精度高、稳定性好、波形失真小的显著优点。可望直接用于测量、控制、通信和信号处理等领域。

## 参 考 文 献

- [1] 杨永明,电子科学学刊, 10(1988)6, 491—500.
- [2] W. B. Mikhae, S. Tu, *IEEE Trans. on CAS*, CAS-31(1984), 280—291.
- [3] R. Gregorian, K. R. Matin, G. C. Temes, *Proc. IEEE*, 71(1983) 8, 941—965.
- [4] E. Vittoz, *IEEE J. of SC*, SC-14 (1979) 3, 644—647.
- [5] R. P. Colbeck, *IEEE J. of SC*, SC-19 (1984) 6, 996—998.
- [6] P. E. Fleischer, A. Ganesun, K. R. Laker, *IEEE J. of SC*, SC-20 (1985) 2, 641—647.
- [7] G. C. Temes, *Electron. Lett.*, 14 (1978) 9, 287—288.

## STUDY OF START-OSCILLATION AND AMPLITUDE-STABILIZATION OF SC OSCILLATORS

Yang Yongmin

(Chongqing University, Chongqing 630044)

**Abstract** How to start oscillation and how to stabilize amplitude in SC oscillators are discussed. New methods for start-oscillation and amplitude-stabilization of SC oscillators are presented. The control circuitry with good stability for amplitude-stabilization is given. It is shown that the complexity of the amplitude-stabilization circuitry does not increase as the number of oscillator phases in the multiphase oscillator increases. The experimental results are in agreement with the presented theory.

**Key words** Switched-capacitor oscillator; Start-oscillation; Amplitude-stabilization