

# 基于单个 CDCTA 的低压电控调谐电流模式多相位正弦振荡器的设计

王春华, 蔺海荣, 李毅, 金杰, 夏赞明

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 提出了一种全新的电流模式多相位正弦振荡器电路。该电路仅使用一个电流差分级联跨导放大器(CDCTA)和接地无源元件, 能产生  $n$  ( $n$  为奇或偶) 个等相位差的电流信号, 电路结构简单、工作电压低、输出阻抗高、振荡频率高, 而且振荡条件和振荡频率独立可调。计算机 CADENCE 软件仿真和流片测试结果验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 电流模式电路; 电流差分级联跨导放大器; 多相正弦振荡器; 模拟集成电路

**中图分类号:** TN75

**文献标识码:** A

## Design of low-voltage electronically tunable current-mode multiphase sinusoidal oscillator based on single CDCTA

WANG Chun-hua, LIN Hai-rong, LI Yi, JIN Jie, XIA Zan-ming

(School of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** A novel current-mode multiphase sinusoidal oscillator circuit was proposed. The realized circuit using single current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA) and only grounded passive elements could yield  $n$  ( $n$  being odd or even) current-output signals equally spaced in phase. It enjoyed the characteristics of simple circuit structure, low-voltage, high-output impedance, high-frequency and independently electronic adjustable of oscillation condition and oscillation frequency. CADENCE simulation and experimental results have been included to verify the theoretical analysis.

**Key words:** current-mode circuit; CDCTA; multiphase sinusoidal oscillator; analog integrated circuit

### 1 引言

随着模拟集成电路的快速发展, 多相位正弦波振荡器在通信电子, 自动控制 and 信号处理等许多技术领域中被广泛应用, 因而在过去的几十年里, 多相位正弦振荡器电路的设计受到许多国内外学者的亲睐, 基于 OTA、CFOA、CCII、CDBA、CDTA 等各种有源模块的多相正弦振荡器电路已经被报道<sup>[1-7]</sup>。但它们都需要使用多个有源元件(至少  $n$  个)。本文采用一个有源器件和少量接地无源元件, 设计了一种新的电流模式多相位正弦振荡器电路。它不仅克服了过去被提出的多相正弦振荡器的缺点, 而且具有以下优点: 电路仅由一个有源器件 CDCTA<sup>[8]</sup>和少量无源元件构成,

并无任何浮点无源元件, 也不需要额外的电流放大器, 大大地缩小了芯片面积, 非常适于集成; 电路工作在纯电流模式下, 具有工作电压低、转速快、频带宽、动态范围大等优点; 由于产生的  $n$  个电流信号都在高输出阻抗端, 因此, 它在级联或连接到其他电路中时并不需要额外的缓冲电路; 振荡条件和振荡频率能相互独立地电控调谐, 可方便快捷地输出不同幅度不同频率的电流信号, 能满足实际应用中不同的需求。计算机仿真和流片测试结果表明, 设计的电路正确可行。

### 2 CDCTA 的端口特性和实现原理

电流差分级联跨导放大器(CDCTA)是一种纯

收稿日期: 2014-06-12; 修回日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61274020); 湖南大学重点实验室基金资助项目(13K015); 湖南省教育厅科技基金资助项目(12C0918); 长沙航空学院基金资助项目(YC1203)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61274020); The Open Fund Project of Key Laboratory in Hunan University (13K015); Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (12C0918); Changsha Aeronautical Vocational and Technical College (YC1203)

电流模式有源器件，它综合了 CDTA 与 OTA 的优越性能，具有内部结构简单、低压低功耗、低输入和高输出阻抗、宽频带等优点。CDCTA 的元件符号和等效电路如图 1 所示，理想情况下的输入输出端口特性可表示为

$$V_p = V_n = 0, I_z = I_p - I_n \quad (1)$$

$$\pm I_{x1c} = I_{x1} = g_{m1} V_z \quad (2)$$

$$\pm I_{xic} = I_{xi} = g_{mi} V_{x(i-1)}, i \geq 2 \quad (3)$$

其中， $p$  和  $n$  是低阻抗电流输入端， $Z$ 、 $X_i$  和  $\pm X_{ic}$  是高阻抗电流输出端， $g_{mi}$  是第  $i$  级跨导增益，可由偏置电流  $I_{Bi}$  控制， $V_z$  和  $V_{xi}$  是在输出端口  $Z$  和  $X_i$  上的电压降（假设有一个外部阻抗连接在端口上）。电路提供了大小相同方向相反的 2 种输出电流端  $\pm X_{ic}$ ， $V_z$  和  $V_{xi}$  通过跨导转变成下一级的输出电流  $I_{x1c}$  和  $I_{xic}$ 。电路内部结构如图 2 所示。整个电路分别由 2 个基本模块组成，前部分是一个电流差分单元电路，后部分是级联的  $n$  个交叉耦合跨导单元。由图可知，CMOS 晶体管 M1~M15 和一些偏置电路、电流镜电路构成了电流差分单元，这种结构具有非常低的输入阻抗。交叉耦合跨导电路由 M16~M23，M36~M43 和一些电流源组成。多输出电流镜电路由 M24~M35，M44~M55 所构成。跨导级  $g_{mi}$  可以根据实际应用需要增加，输出端口  $\pm X_{ic}$  也可以通过电流镜扩展。

### 3 多相位正弦振荡器的设计

图 3 给出了基于 CDCTA 的多相位正弦振荡器电路，它仅需一个 CDCTA，一个接地电阻和  $n$  个接地电容，就可以输出  $n$  ( $n$  是奇或偶) 个等相位差的电流信号。因此，这种结构相对于传统多相位正弦振荡器电路大大的被简化，非常适合于集成。

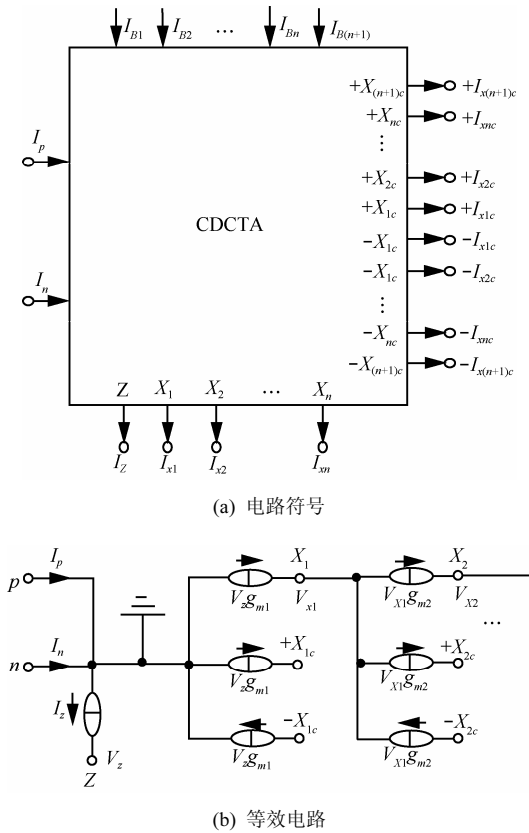


图 1 CDCTA 的元件符号及有效电路

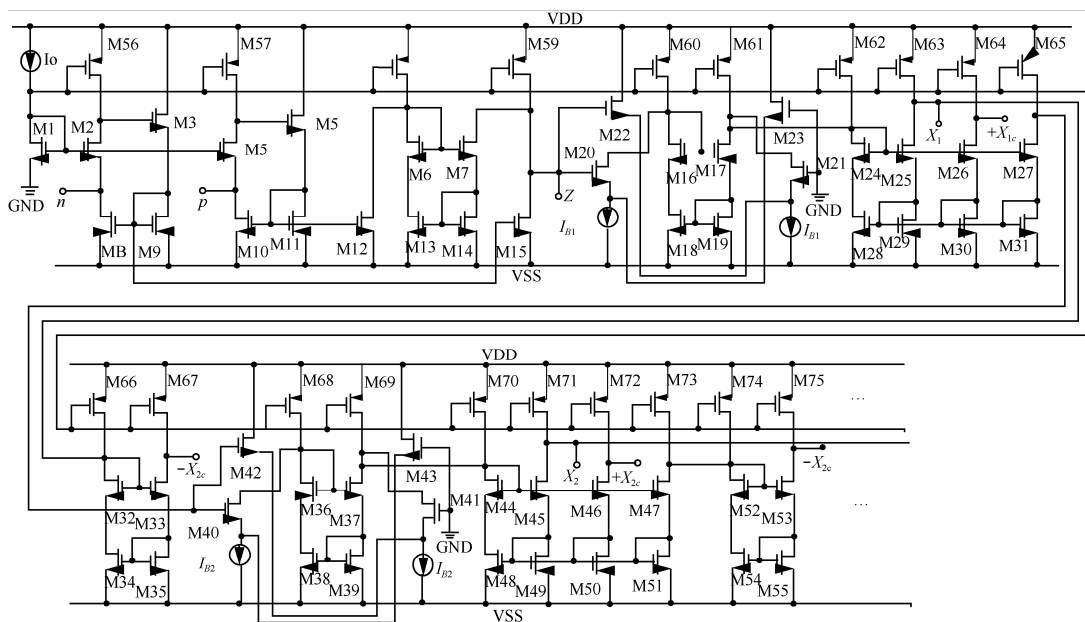


图 2 基于 CMOS 的 CDCTA 电路

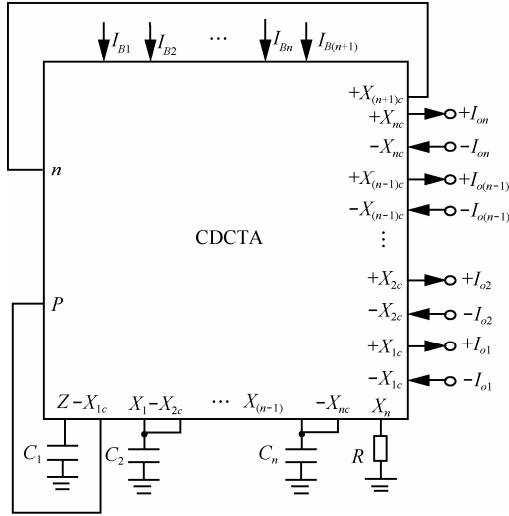


图 3 基于 CDCTA 的多相正弦振荡器

根据图 3 和式(1)~式(3), 电路输出方程有

$$\begin{cases} I_z = I_p - I_n = -I_{x1c} - I_{x(n+1)c} \\ I_{x1c} = g_{m1}[-I_{x1c} - I_{x(n+1)c}] \frac{1}{sC_1} \\ I_{x2c} = g_{m2}[-I_{x2c} + I_{x1c}] \frac{1}{sC_2} \\ \vdots \\ I_{xnc} = g_{mn}[-I_{xnc} + I_{x(n-1)c}] \frac{1}{sC_n} \\ I_{x(n+1)c} = g_{m(n+1)}RI_{xnc} \end{cases} \quad (4)$$

因此, 可获得电路开环增益为

$$L(s) = -Rg_{m(n+1)} \prod_{i=1}^n \left( \frac{1}{1 + \frac{sC_i}{g_{mi}}} \right) \quad (5)$$

假设  $g_{mi} = g_m (1 \leq i \leq n)$ ,  $C_i = C (1 \leq i \leq n)$ , 图 3 的开环增益  $L(s)$  可表示为

$$L(s) = -Rg_{m(n+1)} \left[ \frac{1}{1 + s \left( \frac{C}{g_m} \right)} \right]^n \quad (6)$$

根据巴克豪森准则, 要使振荡器保持稳定的振荡频率  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , 则  $L(s)$  必须满足

$$L(j\omega_0) = - \frac{(Rg_{m(n+1)})}{\left[ 1 + j\omega_0 \left( \frac{C}{g_m} \right) \right]^n} = 1 \quad (7)$$

即

$$\left[ 1 + j\omega_0 \left( \frac{C}{g_m} \right) \right]^n + (Rg_{m(n+1)}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{n} = \tan^{-1} \left( \frac{\omega_0 C}{g_m} \right) \quad (9)$$

其中,  $\Delta\phi$  是相邻输出电流信号相位差, 由式(8)可以知道, 只有  $n$  大于等于 3, 且是奇数时, 等式才成立, 所以输出的  $I_{oi} (i=1, 2, 3, \dots, n)$  全部为奇相位, 相邻相位差是  $\frac{180^\circ}{n}$ , 振荡器的振荡条件和振荡频率应满足

$$K = \left[ 1 + \left( \frac{\omega_0 C}{g_m} \right)^2 \right]^{\frac{n}{2}} = Rg_{m(n+1)} \quad (10)$$

$$\omega_0 = \left( \frac{g_m}{C} \right) \tan \left( \frac{\pi}{n} \right) \quad (11)$$

通过替代  $\omega_0$  到式 (10), 即有

$$K = \left[ 1 + \tan^2 \left( \frac{\pi}{n} \right) \right]^{\frac{n}{2}} = Rg_{m(n+1)} \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 这个多相正弦振荡器的振荡条件可以独立地由跨导  $g_{m(n+1)}$  控制, 即可通过调节  $I_{B(n+1)}$  改变振荡条件, 且不影响振荡频率; 与此同时, 振荡频率可通过  $g_m$  独立地电控调节, 并不会引起振荡条件的变化。因此, 它的振荡条件和振荡频率可以相互独立地电控调谐。此外, 通过利用 CDCTA 的反相电流输出端, 多相正弦振荡器可以获得电流输出  $-i_{oi} (i=1, 2, 3, \dots, n)$ , 偶相位可以从同一电路中得到。因此, 这个多相位正弦振荡电路可同时获得  $n$  相位输出信号,  $n$  可为奇数或偶数。

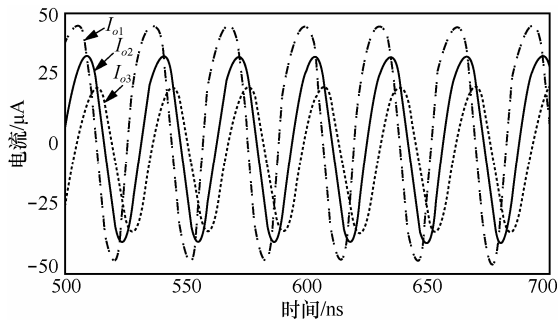
#### 4 计算机仿真及流片测试

为了验证上述理论分析的正确性, 该多相位正弦振荡器在 CADENCE 中使用 TSMC 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺进行设计, CMOS 管的参数设置如表 1 所示, 对  $n=3$  六相位正弦振荡器进行仿真, 电路仿真参数设置为  $VDD = -VSS = 1.0 \text{ V}$ ,  $I_0 = 30 \mu\text{A}$ ,  $I_{B4} = 110 \mu\text{A}$ ,  $I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = 50 \mu\text{A}$ ,  $R = 16.4 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = C_3 = 9.3 \text{ pF}$ , 理论计算振荡频率  $f_0 = 33.6 \text{ MHz}$ 。仿真结果如图 4、图 5 所示, 实测振荡频率为 33.2 MHz。计算机仿真结果说明电路正确有效。与此同时, 对于  $n=2$  四相位正弦振荡器已经采用 0.18  $\mu\text{m}$

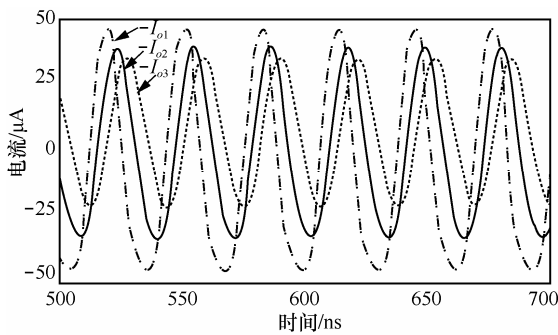
CMOS 工艺流片实现，其芯片显微照片如图 6 所示，芯片总面积仅约为  $0.85 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$ 。图 7 为四相正弦振荡器电路芯片在实验室的测试输出图像，测试结果表明本文提出的多相位正弦振荡器电路是正确可行的，具有实际应用意义的。

表 1 CMOS 管参数

CMOS 晶体管	$W(\mu\text{m})/L(\mu\text{m})$
M1~M19, M24~M39, M44~M55	24/1
M20~M21, M40~M41	1/1
M22~M23, M42~M43	60/1
M56~M57	36/0.6
M58~M75	81/0.6



(a)  $I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}$



(b)  $-I_{o1}, -I_{o2}, -I_{o3}$

图 4 六相正弦振荡器仿真波形

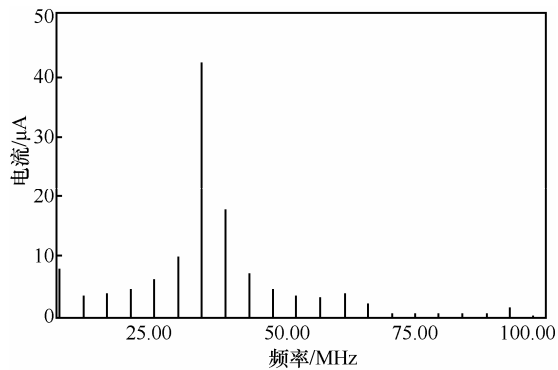


图 5 六相正弦振荡器仿真频谱

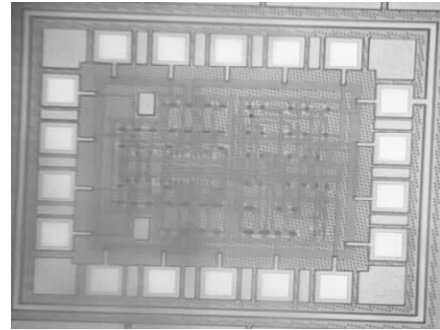


图 6 四相正弦振荡器的芯片显微照片

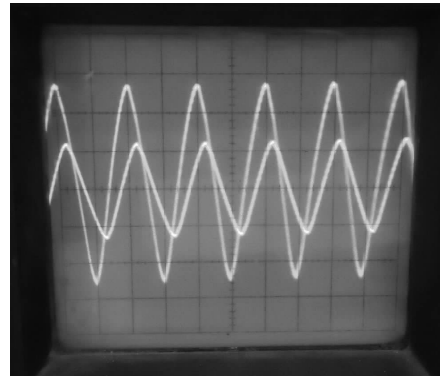


图 7 四相正弦振荡器芯片的测试结果

## 5 结束语

本文提出了一个纯电流模式模拟集成电路，它仅仅使用 1 个有源器件 CDCTA 和少量接地无源元件，实现了多相位正弦振荡器，电路具有如下优势：1) 仅含一个有源器件，结构简单；2) 所有无源元件均接地，容易集成；3) 工作电压低，功耗小；4) 振荡频率高，适用范围宽；5) 振荡条件和振荡频率可独立电控调谐,应用灵活；6) 输出阻抗高，无需元件匹配。基于这些特点，该多相位正弦振荡器具有极大的通用性，可以应用于多种模拟信号处理系统中。通过对六相和四相正弦振荡器的计算机仿真与流片测试，证明了理论分析与设计的正确有效性。

## 参考文献:

- [1] KHAN I A, AHMED M T, MINHAJ N. Tunable OTA-based multiphase sinusoidal oscillators[J]. International Journal of Electronics, 1992, 72(3): 443-450.
- [2] WU D S, LIU S I, HWANG Y S, et al. Multiphase sinusoidal oscillator using the CFOA pole[A]. Circuits, Devices and Systems, 1995, 142(1): 37-40.
- [3] ABUELMA'ATTI M T, et al. A new current-controlled multiphase sinusoidal oscillator using trans linear current conveyors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, Analog and Digital Signal

Processing, 1998, 45(7): 881-885.

- [4] 董招辉, 彭良玉等. 新颖的基于 MOCCII 的多相位正弦振荡器[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(7): 222-228.  
DONG Z H, PENG Y L, *et al.* A new MOCCII-based multiphase sinusoidal oscillator[J]. Microelectronics & Computer, 2008, 25(7): 222-228.
- [5] KLAHAN K, TANGSRIRAT W, SURAKAMPONTORN W. Realization of multiphase sinusoidal oscillator using CDBAs[A]. Circuits and Systems, Proceedings, The 2004 IEEE Asia-Pacific Conference[C]. 2004. 725-728.
- [6] TANGSRIRAT W, TANJAROEN W. Current-mode multiphase sinusoidal oscillator using current differencing transconductance amplifiers[J]. Circuits, Systems & Signal Processing, 2008, 27(1): 81-93.
- [7] 李永安. 基于 MO-CDTA 的电控调谐多功能电流模式二阶滤波器/振荡器[J]. 微电子学, 2009, 39(5): 670-672.  
LI Y A. Electronically tunable multifunctional current-mode filter/oscillator using MO-CDTA[J]. Microelectronics, 2009, 39(5): 670-672.
- [8] XU J, WANG C, JIN J. Current differencing cascaded transconductance amplifier (CDCTA) and its applications on current-mode nth-order filters[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2013, 32(5): 2047-2063.



蔺海荣 (1988-), 男, 湖南长沙人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为振荡器设计与分析、模拟集成电路设计。



李毅 (1975-), 男, 湖南桃源人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为射频电路、模拟集成电路设计与分析。



金杰 (1982-), 男, 湖南娄底人, 湖南大学博士生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。

#### 作者简介:



王春华 (1963-), 男, 湖南永州人, 湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为振荡器、滤波器设计与分析、模拟集成电路设计、现代通信电路与系统。



夏赞明 (1988-), 男, 湖南益阳人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为模拟集成电路设计。