

一款高精度宽温度范围 TCXO 芯片的设计

李晓宇, 徐静平, 钟德刚, 季 峰

(华中科技大学 电子科学与技术系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 本文基于 SMIC 0.35 μm 标准 CMOS 工艺设计了一款高精度、宽温度补偿范围的温度补偿晶体振荡器 (TCXO) 芯片. 利用函数发生电路产生符合 f - T 关系的五次多项式电压, 电路产生电压与 f - T 特性表达式中的对应项相符合, 求和电路可对各项系数进行单独调整. 电路参数的调整范围使得大部分 AT 切石英晶体均适用于本设计. 测试结果表明, 在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, TCXO 频率稳定性达到 $\pm 0.6\text{ppm}$.

关键词: TCXO; 温度补偿; 三次方函数; 五次方函数

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)01-0057-05

Design of TCXO Chip with High Accuracy and Wide Temperature Range

LI Xiao-yu, XU Jing-ping, ZHONG De-gang, JI Feng

(Department of Electronic Science & Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper presents a temperature compensated crystal oscillator (TCXO) chip with high accuracy and wide compensation temperature range, using SMIC 0.35 μm standard CMOS process. The function generation circuit can generate voltage according with the five-ordered polynomial of crystal f - T characteristics, each part of the circuit can generate corresponding voltage of each term of the polynomial, and the adder circuit can adjust the coefficient of each term separately. The adjusting range of the circuit makes most a majority of AT cut crystals can be used in this design. The test results show that the frequency stability of TCXO can reach $\pm 0.6\text{ppm}$ over the temperature range $-40^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$.

Key words: TCXO; temperature compensated; cubic function; fifth order function

1 引言

温度补偿晶体振荡器 (TCXO) 是无线通讯领域应用最广泛的频率源. 模拟 TCXO 的应用尤为广泛, 它产生和温度相关的函数电压来补偿石英晶体频率随温度的漂移. 见诸报道的 TCXO 函数电压均为三次方函数电压, 产生方法主要有两种, 一种是直接使用乘法器得到三次方电压^[1-2]; 另一种利用差分放大器的输出电流和输入电压的关系来近似得到三次方电压^[3]. 这两种方法在对 TCXO 进行补偿时只能达到 $\pm 1.5\text{ppm}$ 的补偿精度, 且补偿温度范围较窄. 使用数字温度补偿晶体振荡器可以达到更高的

补偿精度, 但无法避免相位跳变^[4].

本文设计了一款高精度、宽温度范围的 TCXO 芯片. 与传统的 TCXO 相比, 它使用五次函数发生电路, 比传统的三次方函数发生电路提供更加接近石英晶体 f - T 特性的函数电压.

2 TCXO 系统结构

2.1 温度补偿原理

图 1 是石英晶体的电气符号及等效电路. 其中 L_s 是动态电感, C_s 是动态电容, R_s 是动态电阻, C_0 是晶体的电极产生的电容. 晶体谐振频率可由 (1) 式表示为:

收稿日期: 2011-04-22; 修回日期: 2011-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60976091)

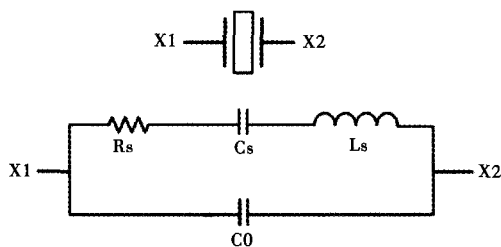


图1 石英晶体电气符号及等效电路

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \sqrt{\frac{C_s + C_0}{C_0}} \quad (1)$$

但晶体谐振频率是随温度变化的,广泛使用的 AT 切石英晶体的频率温度(f-T)特性可用一个多项式来近似.三次多项式和 AT 切石英晶体的 f-T 特性相差 0.320ppm,五次多项式和 f-T 特性相差 0.126ppm.显然采用五次多项式描述的石英晶体 f-T 特性更为准确.本文使用(2)式所表示的五次方函数来近似石英晶体的 f-T 特性:

$$f(T) = A_5(T - T_0)^5 + A_3(T - T_0)^3 + A_1(T - T_0) + A_0 \quad (2)$$

其中, A_5 是五次方系数, A_3 是三次方系数, A_1 是一次方系数, A_0 是温度为 T_0 时的频率, T_0 是 AT 切石英晶体 f-T 特性的转折点温度.为补偿(2)式所示的 f-T 漂移,压控振荡器(VCXO)必须产生满足 $\Delta f(VC) + \Delta f(T) = 0$ 的控制电压 VC. VCXO 的频率电压增益可用如下线性关系近似:

$$f(VC) = -G(VC - VC_0) + f_0 \quad (3)$$

其中, G 是 VCXO 的频率电压增益, VC_0 是 VCXO 的中心电压, f_0 是输入电压为 VC_0 时的频率.为补偿石英晶体 f-T 特性,控制电压与温度的关系如式(4)所示:

$$VC(T) = B_5(T - T_0)^5 + B_3(T - T_0)^3 + B_1(T - T_0) + B_0 \quad (4)$$

其中, $B_5 = A_5/G$, $B_3 = A_3/G$, $B_1 = A_1/G$, B_0 是常数.

图2所示即为本设计中使用的 Pierce 结构 VCXO^[5].其中 C_{var1} 和 C_{var2} 为 MOS 可变电容,它们的容值受电压 VC 控制, C_1 和 C_2 为固定电容.此电路的谐振频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}} \sqrt{1 + \frac{C_s}{C_0 + \frac{C_{L1}C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}}}} \quad (5)$$

2.2 补偿系统结构

图3是 TCXO 的结构框图.温度探测电路和函数发生电路构成补偿电路.温度探测电路产生和温

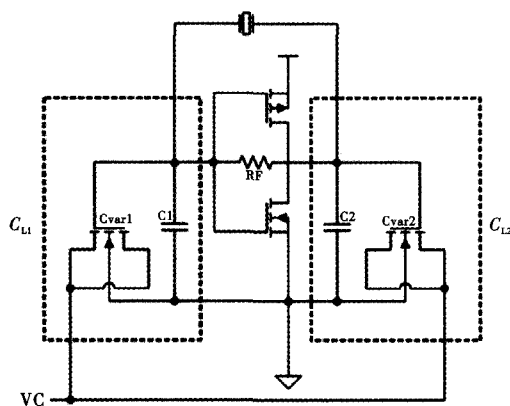


图2 压控振荡器

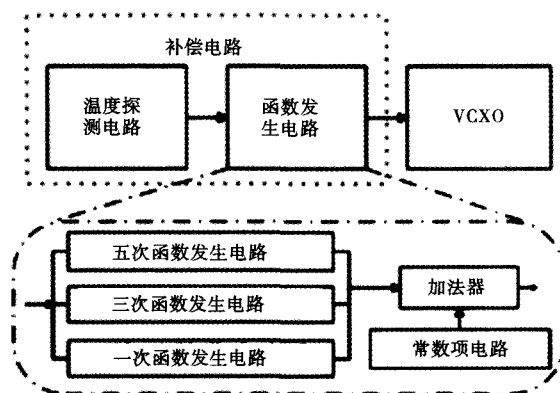


图3 TCXO 结构图

度变化呈线性关系的电压 V_T ,而函数发生电路则产生类似(4)式的电压信号,包括五次电压发生电路、三次电压发生电路、一次电压发生电路及常数电压发生电路.函数发生电路产生的电信号送入 VCXO 中用来补偿振荡器中石英晶体频率随温度的漂移,从而产生稳定的频率输出.

3 函数发生电路

函数发生电路主要包括一次函数发生电路、三次函数发生电路和五次函数发生电路.其中一次函数发生电路可通过对温度探测电路的输出进行放大和平移得到.一次函数发生电路的输出结果满足下式:

$$V_1 = k_1(V - V_{cont}) \quad (6)$$

式中, k_1 是一次方系数, V_{cont} 是恒定电压.

图4和图5分别为三次电压产生电路和五次电压产生电路,可分别产生三次电压 V_3 和五次电压 V_5 .这两个电路均由若干双输入双输出差分对和电阻组成.各放大器提供不同温度下的增益电流,电阻对电流进行加和并把电流转化为电压.每个差分对的一个输入端为 V_T ,另一个输入端为基准电压.图

6所示是一个差分对的具体电路图。由P管(PFET)提供尾电流,一端输入是VT,另一端输入是基准电压VREF。在晶体管都工作在饱和区且不考虑电阻的源级负反馈时,流过两个电阻的电流值可由下式表示:

$$I_{1,2} = \frac{I_0}{2} \pm \frac{\mu_0 C_{ox} W}{4L} V_{id} \sqrt{\frac{4I_0}{\mu_0 C_{ox} \frac{W}{L}} - V_{id}^2} \quad (7)$$

式中, V_{id} 是差分对的输入电压之差,由泰勒公式可知流过两个电阻的电流可写成:

$$I_1 \approx \frac{I_0}{2} + \frac{\sqrt{\beta I_0}}{2} V_{id} - \frac{\beta \sqrt{\beta I_0}}{16 I_0} V_{id}^3 - \frac{\beta^2 \sqrt{\beta I_0}}{256 I_0^3} V_{id}^5$$

$$I_2 \approx \frac{I_0}{2} - \frac{\sqrt{\beta I_0}}{2} V_{id} + \frac{\beta \sqrt{\beta I_0}}{16 I_0} V_{id}^3 + \frac{\beta^2 \sqrt{\beta I_0}}{256 I_0^3} V_{id}^5$$

式中, $\beta = \mu_n C_{ox} W/L$ 。以上两式含有所需要的三次方项 V_{id}^3 和五次方项 V_{id}^5 。当基准电压 V_{REF} 变化时,差分放大器的输出电流和温度的关系如图7所示。实线表示基准电压等于 V_{REFM} 时的关系,点划线表示 $V_{REF} < V_{REFM}$ 时的关系,虚线表示 $V_{REF} > V_{REFM}$ 时的关系。当 V_{REF} 较小时低温下的电流发生变化,当 V_{REF} 较大时高温下的电流发生变化,当 V_{REF} 处于中间时常温区域的电流发生变化,且电流发生变化时各晶体管均工作在饱和区,这就要求参考电压有以下关系:

$$V_{REFM} = \sqrt{\frac{I_0}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} + V_{TH}$$

$$V_{REFM} < V_{REFH1} < V_{REFH2} < V_{TH} + \sqrt{\frac{2I_0}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}}$$

$$V_{TH} < V_{REFL2} < V_{REFL1} < V_{REFM}$$

且 V_{REFH2} 、 V_{REFL2} 与 V_{REFH1} 、 V_{REFL1} 的中值都是 V_{REFM} 。若需要更大的温度补偿范围,需提供更大的尾电流或使用宽长比更小的晶体管。图4中放大器B、C、D的输出电流和温度的关系分别对应图7中 V_{REFM} 、 V_{REFL} 、 V_{REFH} 三条曲线,而放大器A通过增大源级负反馈电阻来提供“软化”三次方曲线的线性电流。图5中B对应着图7中的 V_{REFM} 曲线,C、E对应着图7中的 V_{REFL} 曲线,D、F对应着图7中的 V_{REFH} 曲线,A提供线性电压。

选择各放大器尾电流和晶体管尺寸,并使用图4和图5的连接方式后,可使各电路的输出电压满足以下关系:

$$V_n = k_n (V - V_{cont})^n \quad n = 1, 3, 5 \quad (8)$$

其中, V_{cont} 是一个常数。

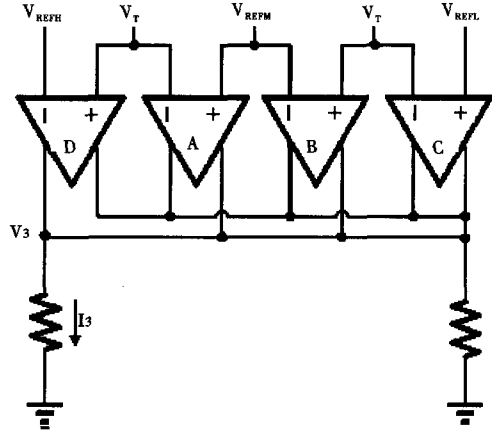


图4 三次方电路

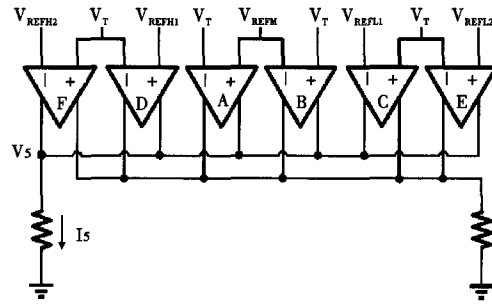


图5 五次方电路

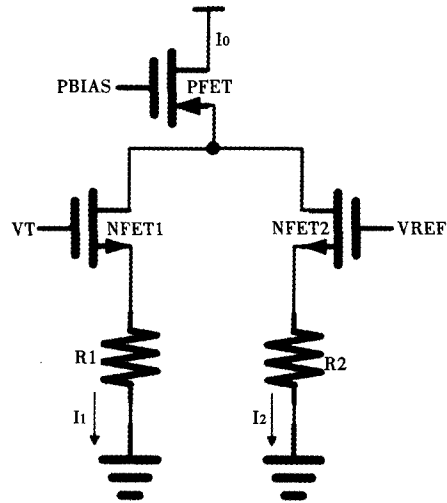


图6 差分放大器

图8所示的求和电路把各部分的电压加起来得到补偿电压 V_{out} 。 V_0 为常数电压, R_f 是反馈电阻,补偿电压如式(9)所示。

$$V_{out} = \left[1 + R_f \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) \right] V_0 - R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_5}{R_5} \right) \quad (9)$$

将(8)式代入上式可得到:

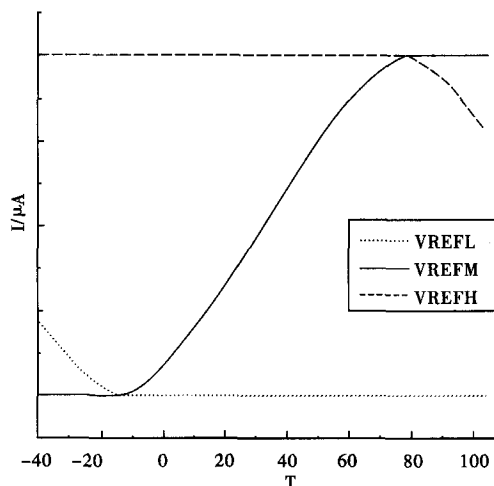


图7 差分对输入输出曲线

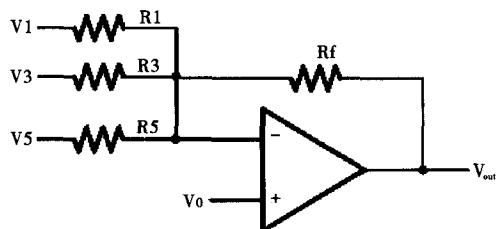


图8 加法电路

$$V_{out} = k_0 + k_1(V_T - V_{cont}) + k_3(V_T - V_{cont})^3 + k_5(V_T - V_{cont})^5 \quad (10)$$

式中,参数 k_0 、 k_1 、 k_3 和 k_5 均可由调节反馈电阻 R_f 和电阻 R_1 、 R_3 和 R_5 的比例关系来调整,最终得到合适的补偿电压。

4 仿真结果及分析

图9是三次电压产生电路、五次电压产生电路以及求和电路的仿真结果。可看出各结果都与温度呈现出明显的幂函数关系。

图10给出了补偿电压对两个使用不同石英晶体的振荡器的补偿效果。这两种石英晶体a和b的f-T特性参数和电气参数如表1和表2所示。其中图10(a)分别给出了使用补偿电压 V_{out} 和仅适用三次方函数电压时使用晶体a的TCXO的输出频率稳定度。图中虚线表示未经过补偿时TCXO的频率温度特性,实线表示使用五次函数电压 V_{out} 补偿的频率温度特性,点划线表示仅使用三次函数电压补偿的频率温度特性。仿真结果表明仅使用三次函数电压对振荡器进行补偿时,频率稳定性可达到 $\pm 1.5\text{ppm}$,和已有报道相符^[6-7]。图10(b)是对使用晶体b的TCXO的补偿效果。在使用五次函数电压 V_{out} 对振荡器补偿后,TCXO在 $-40^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$ 温度

范围内的频率稳定性达 $\pm 0.6\text{ppm}$ 。

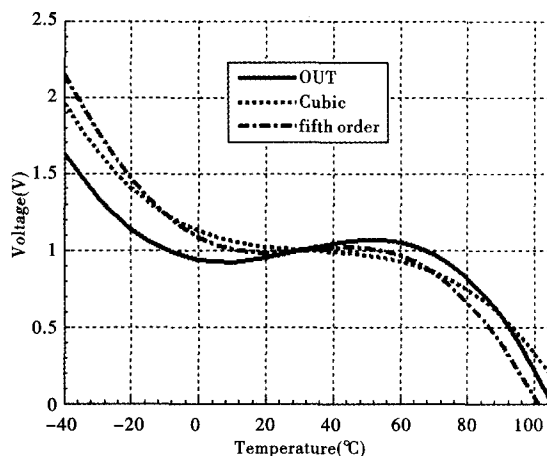
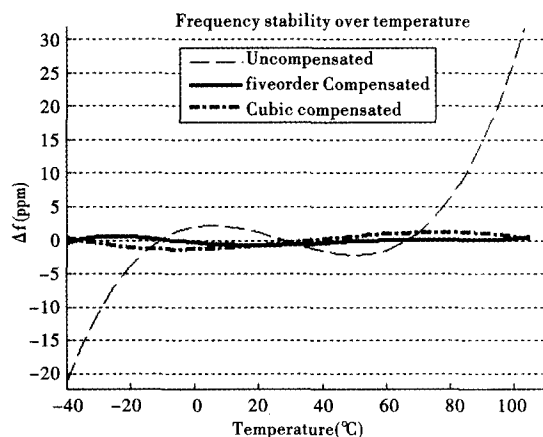
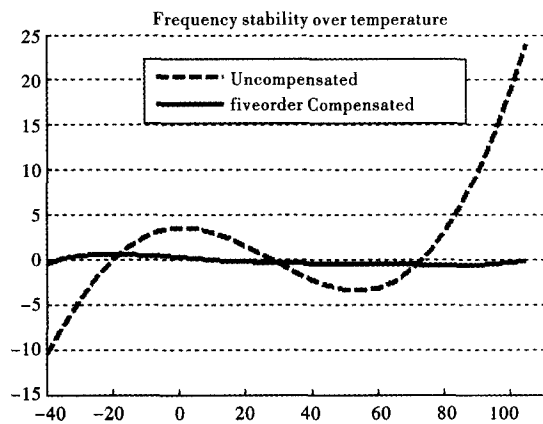


图9 函数发生电路仿真结果



(a) 石英晶体a的补偿结果



(b) 石英晶体b的补偿结果

图10 函数发生电路仿真结果

表3给出了电压VC从0V变化到2V时,可变电容器 C_{var1} 和 C_{var2} 的变化以及分别使用晶体a和晶体b时电路对谐振频率的调整。表4是本设计中可使用的石英晶体电气参数的范围,从表中可以看

出一般 AT 切石英晶体均可在本设计中使用。

本文提出了直接产生幂函数 $y=a(x-b)^n$ ($n=1,3,5$)电压的新方法,每个幂函数的系数都可通过调整电阻的比值来进行直接调整,因此本方法可得出和石英晶体频率温度特性高度相符合的函数电压,通过对各个幂函数电压的系数进行精细的调节,可在宽温度范围内取得明显的补偿效果。

表 1 石英晶体 f-T 参数

f-T 参数	A_5 nppm/ $^{\circ}\text{C}^5$	A_3 $\mu\text{ppm}/^{\circ}\text{C}^3$	A_1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
晶体 a	0	100	-10^{-6}
晶体 b	-3.6	100	-0.2

表 2 石英晶体电气参数

电气参数	C_s (fF)	L_s (mH)	C_0 (pF)
晶体 a	4.5886	8.170	1.4212
晶体 b	4.5618	8.218	1.4329

表 3 电压对 VCXO 的影响

VC(V)	$C_{var1,2}$ (PF)	Δppm_a (ppm)	Δppm_b (ppm)
0	5.2	-32	-27
0.5	4.2	-17	-15
1	3.2	0	0
1.5	2.2	15	13
2	1.45	20	19

表 4 适用晶体的参数范围

晶体参 数范围	A_5 nppm/ $^{\circ}\text{C}^5$	A_3 $\mu\text{ppm}/^{\circ}\text{C}^3$	A_1 ppm/ $^{\circ}\text{C}$
最大值	3.6	80	-0.05
最小值	-3.6	120	0.55

5 结束语

文中设计了一款高精度、宽温度范围的 TCXO 芯片,整个设计过程使用 SMIC 0.35 μm 标准 CMOS 工艺.电路结构简单,参数可调且调节方法

简单便捷,补偿效果好,在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 105^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内补偿后的频率稳定性可达 $\pm 0.6\text{ppm}$,优于一般模拟 TCXO 芯片所能达到的 $\pm 1.5\text{ppm}$ 的频率稳定度.本设计可应用于在宽温度范围内对频率温度特性要求较高的 TCXO 芯片。

参考文献:

[1] Jaehyun Lim, Insoo Kim, Kyusun Choi, et al. A CMOS cubic voltage generator for a temperature compensated crystal oscillator(TCXO) [C]//IEEE International Frequency Control Symposium. Hawaii, USA, 2008: 550-553.

[2] Takehiko Adachi, Shoji Izumiya. A MOS temperature compensation function generator for TCXO using differential MOS multipliers [C]// IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. Besancon, France, 2009: 990-993.

[3] Kenji Nemoto, Kerrichi Sato. A 2.5ppm fully integrated CMOS analog TCXO [C]//IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition. Seattle,USA, 2001:740-743.

[4] Achenbach R, Feuerstack Raible M, Hiller F, et al. A digitally temperature-compensated crystal oscillator [J]. IEEE Journal of Solid State Circuits, 2000, 35 (10):1502-1506.

[5] 陈红梅,徐静平,钟德刚.一种低功耗高稳定性晶体振荡器芯片的设计. [J]. 微电子学与计算机,2010,27 (12):105-108.

[6] Kurogo S, Matsumoto Y, Ohshima T. Analog TCXO using cubic functional voltage generator [C]// IEEE International Frequency Control Symposium. Hawaii, Honolulu, 1996:484-492.

[7] 肖鹏,徐静平,陈亮亮,等.一种用于 TCXO 的三次函数电路设计[J]. 微电子学与计算机,2009,26(11):74-77.

作者简介:

李晓宇 男,(1986—),硕士研究生.研究方向为模拟 CMOS 集成电路设计.

徐静平 男,(1958—),教授,博士生导师.研究方向为集成电路设计与器件工艺.