

改进型恒温晶振三次方补偿电路的研究与设计*

谭传武, 刘红梅

(湖南铁道职业技术学院 电务技术学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 通信系统中收发同步离不开精确的时钟频率源, 时钟频率源的精确与否直接影响系统的可靠性, 而 AT 切晶体是频率源的重要组成部分, 其频率与温度呈现三次函数的变化关系, 导致其不适应较宽温度范围的应用场景。为克服温度对频率的直接影响, 设计了一种用于温度补偿的三次函数发生电路, 包括基准源、一次方电压产生电路、三次方产生电路及相加电路, 在工作时能与 AT 切晶体产生的负温度系数相抵消。仿真结果表明, 基准源电路恒定输出 1.8 V, 三次方电路输出波峰 1.65 V、波谷 0.85 V, 加和后经调整的补偿电路产生波形波峰 2.04 V、波谷 1.74 V, 很好地抑制了来自温度变化引起的频率误差, 解决了振荡器输出频率随温度变化的问题。

关键词: 温度补偿; 压控振荡器; 三次方函数; 带隙基准; 频率源

中图分类号: TN433

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200258

中文引用格式: 谭传武, 刘红梅. 改进型恒温晶振三次方补偿电路的研究与设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 51-56.

英文引用格式: Tan Chuanwu, Liu Hongmei. Design of cubic compensation circuit for constant temperature crystal oscillator[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 51-56.

Design of cubic compensation circuit for constant temperature crystal oscillator

Tan Chuanwu, Liu Hongmei

(Department of Communication and Signal, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In the communication system, the receiving and transmitting synchronization can not be separated from the accurate clock frequency source. The accuracy of the clock frequency source directly affects the reliability of the system. AT cut crystal is an important part of the frequency source. Its frequency and temperature show a cubic function relationship, which makes it not suitable for a wide range of temperature application scenarios. In order to overcome the direct influence of temperature on frequency, this paper designs a kind of cubic function generating circuit for temperature compensation, including reference source, primary voltage generating circuit, cubic generating circuit and adding circuit, which can cancel the negative temperature coefficient produced by AT cut crystal in operation. The simulation results show that the reference circuit has a constant output of 1.856 V, the third-order circuit has a peak of 1.65 V and a trough of 0.85 V, and the added compensation circuit has a peak of 2.04 V and a trough of 1.74 V. The frequency error caused by the temperature change is well suppressed, and the problem that the output frequency of the oscillator changes with the temperature is solved.

Key words: temperature compensation; VCO; cubic function; band gap reference; frequency source

0 引言

随着 5G 及物联网技术的飞速发展, 智能终端体积越来越小且数量越来越多^[1-2], 终端与基站之间通过无线电波完成信息交互, 而精准的时钟频率源是通信的必要条件^[3-4]。石英晶体振荡器的频率准确度会受温度等因素的影响, 市场上主流的振荡器选用的是 AT 切型^[5], 其随温度变化频率漂移可达 10 ppm 到 50 ppm, AT 切在室温存在零漂移点^[6]。南开大学吴佳等采用 7 组差分设计设计了高精度的三次方函数发生器^[7], 在 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 且补偿温度范围扩大至 $-40 \sim +85$ °C, 此方法提高了精度但

是功耗增加, 不利于小型化的物联网场景; 西安电子科技大学的刘宇设计了一种超高频稳定度的模拟温度补偿晶体(ATCXO)振荡器电路^[8], 可提供高精度的频率源, 但是温度范围受限, 不适应温度极端的物联网场景; 华中科技大学肖鹏采用 MOS 可变电容设计了一款温度补偿晶体振荡器(TCXO)芯片^[9], 压控范围可达 ± 180 ppm, 但频率调整范围受限。

本文综合以上设计的优缺点, 改进了可变电容设计的补偿电路, 利用 CMOS 工艺设计了一种用于 TCXO 振荡器中的功耗低、温度范围 $-40 \sim +120$ °C 的补偿电路, 能抵消 AT 切晶体中随温度引起的频率变化, 可用在恒温晶振中进行频率补偿。

* 基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ7052); 湖南省教育厅科学研究项目(19B380); 湖南铁道职业技术学院青年科研骨干培养项目

1 温度补偿原理

AT 切型晶体在温度变化时呈现三次方的函数曲线^[10],如图 1 所示。

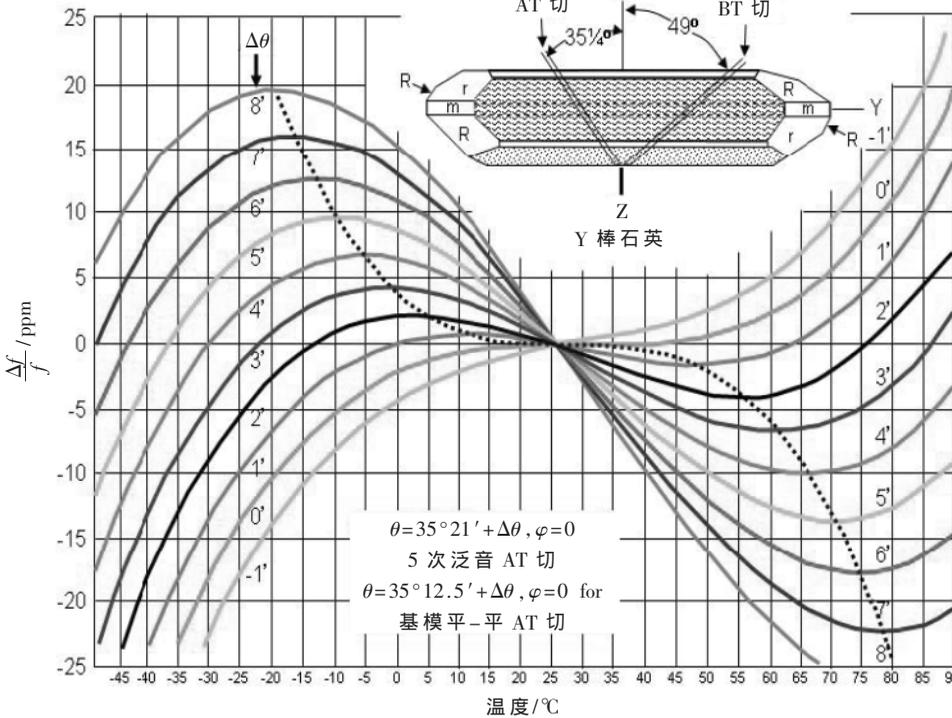


图 1 晶体不同切角 f-T 曲线

AT 切型晶体中切割角度不同,使得频率与温度的对应关系也不一样,但遵循以下规律^[11],如式(1)所示:

$$f(T) = a_3(T - T_0)^3 + a_1(T - T_0) + a_0 \quad (1)$$

其中 a_3, a_1, a_0 是各次项系数, T_0 是 AT 切晶体振荡器的拐点温度(约 25 °C)^[12]。

由此可知输出频率与电压呈线性关系,增益特性如式(2)所示:

$$f(V_C) = -G(V_C - V_{CO}) + f_0 \quad (2)$$

其中 V_{CO} 是振荡器的中心电压, G 代表增益, f_0 是中心电压下的输出频率, V_C 为外部控制电压。如需保证频率对温度没有影响,需满足 $\Delta f(V_C) + \Delta f(T) = 0$ ^[13],可得 V_C 与 T 的关系:

$$V_C(T) = A_3(T - T_0)^3 + A_1(T - T_0) + A_0 \quad (3)$$

式中 A_0 为常数, $A_1 = a_1/G, A_3 = a_3/G$ ^[14]。TCXO 对晶体的频率补偿效果如图 2 所示^[15-16]。

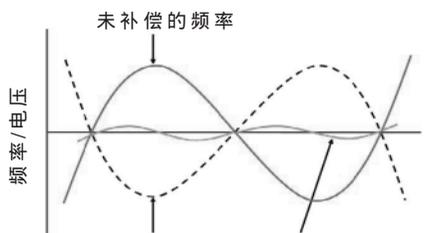


图 2 TCXO 的频率-温度补偿特性

本文从以上的分析出发,改进了一次函数、三次函数产生电路、相加电路,改进的电路能实现正温度系数与负温度系数相互抵消,从而解决温度对频率影响。

2 电路设计

2.1 基准源电路设计

带隙基准为一次方电压产生和三次方电压产生电路提供用于比较的参考压值,改进的电路如图 3 所示,多个同阻值的电阻实现串联或并联,可调整带隙输出范围,精简结构的同时,能实现多个带隙值输出。

DPNP1B 为偏置电压,由带隙产生,由于 DPNP15B 与 DPNP-14B 的电压被强制相等,因此流过 DPNP1 和 DPNP4 的电流之比为 10:13,而 DPNP1 和 DPNP4 的个数比为 8:2,可得得计算如式(4)所示。

$$\begin{aligned} \Delta V_{BE} &= V_T (\ln \frac{13}{2} - \ln \frac{10}{8}) \\ &= V_T \ln \frac{26}{5} \end{aligned} \quad (4)$$

设流过 DPNP1 的电流为 $10I$,则流过 DPNP4 的电流为 $13I$,设 DPNP1 上方电阻为 R ,则 I117 处电阻为 $3R$,可得 $\Delta V_{BE}, V_{REF}$ 的推导如式(5)-式(7)所示。

$$\Delta V_{BE} = 10I \times R = V_T \ln \frac{26}{5} \quad (5)$$

$$V_{BE1} = 10I \times R + 23I \times 3R = V_{REF} \times \frac{5}{8} \quad (6)$$

$$V_{REF} = (V_{BE1} + \frac{79}{10} V_T \ln \frac{26}{5}) \times \frac{8}{5} \quad (7)$$

式中 V_T 为热电压,调整后热电压与具有负温度系数的 V_{BE1} 相抵消,产生与温度无关的基准电压。

2.2 一次方电压产生电路

一次方电压产生电路主要体现电压随温度变化的特性,依据 PN 结电压 V_{BE} 的负温度特性,改进的一次方电压产生电路如图 4 所示。

图 4 中 EPNP5 与 EPNP6 的基极与发射极电压 V_{EB} 叠加,产生了 -4 mV/K 的温度系数,为普通 PN 结负温度系数的两倍。

EM6D 处是镜像电流下来,流过 EPNP5 和 EPNP6 的电流是一定的,这样 EM6D 的电压随着温度的升高而降低,再通过缓冲器的升压输出,BP19D 的电压与温度成一次线性关系。

2.3 三次方电压产生电路

三次方电压产生电路将产生一个电压随温度变化的幂次关系,改进的电路结构如图 5 所示,将多个差分

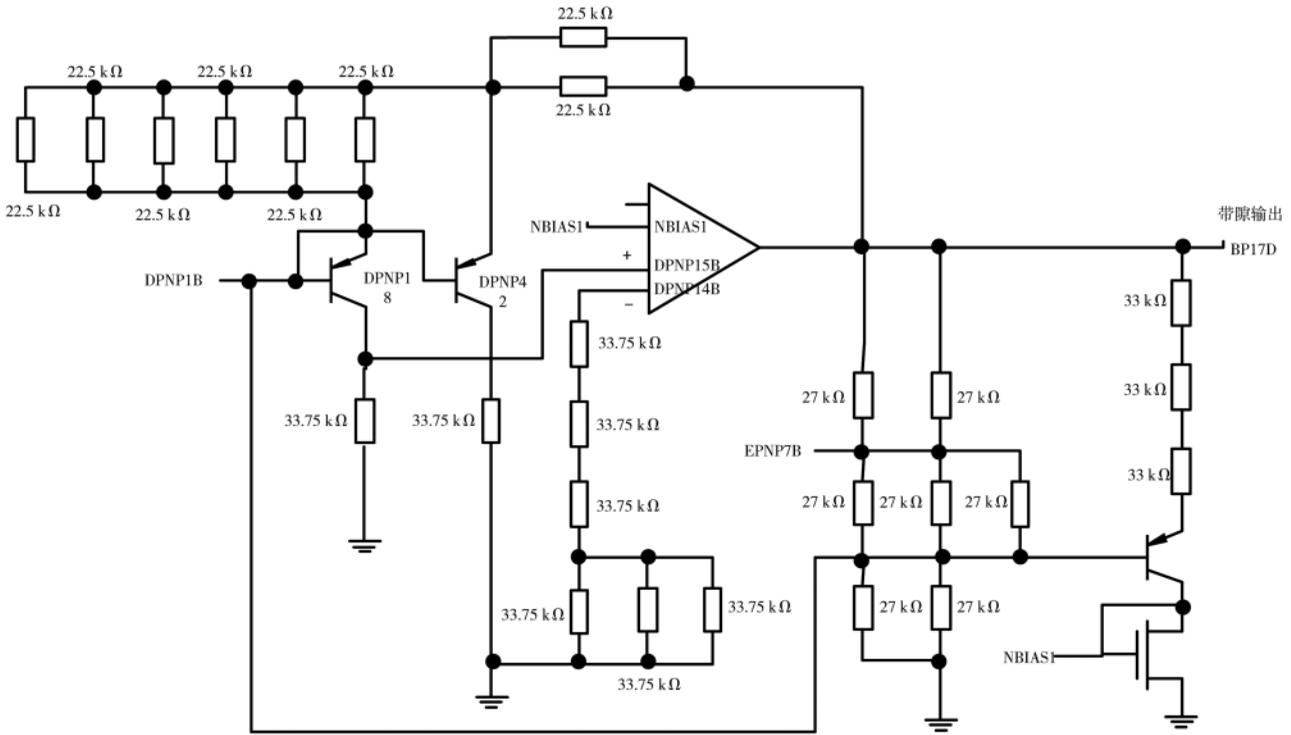


图3 带隙基准电路设计

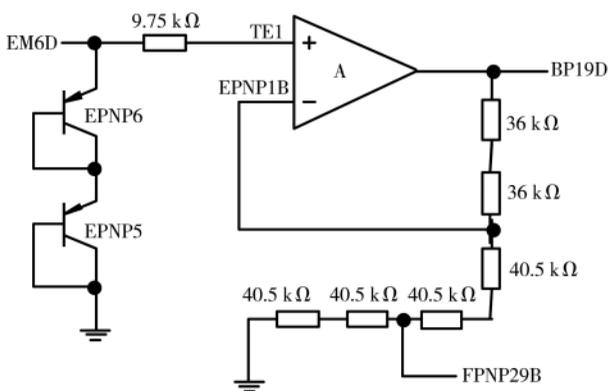


图4 一次电压产生电路

运放级联,从带隙基准引入参考压值,实现电压三次幂的关系。

FPNP30B 为定值,FPNP29B 为与温度成一次线性关系,随着 FPNP29B 减小,FPNP28 电流增大,FPNP25 电流减小,使得 FPNP25B 增大,FPNP28B 减小。流过 FPNP28 的电流与随温度线性增大,FPNP25 的电流随温度线性减小,FPNP27 与 FPNP28,FPNP25 与 FPNP26 电流一样,都是与温度呈线性关系。

FPNP19 与 FPNP20 的发射极的电压差为 $2\Delta V$,则 FPNP18 与 FPNP17 的发射极电压差为 ΔV ,EM11D 与 EM14D 连接的是电流镜,流过的电流之比为 2:3,设流过 EM11D 的电流为 $2I$,则流过 EM14D 的电流为 $3I$ 。

FPNP11 的电流为 $(2I \times e^{2\frac{\Delta V}{V_T}})/(e^{2\frac{\Delta V}{V_T}} + 1)$,FPNP12 的电

流为 $2I/(e^{2\frac{\Delta V}{V_T}} + 1)$,FPNP9 电流为 $(3I \times e^{\frac{\Delta V}{V_T}})/(e^{\frac{\Delta V}{V_T}} + 1)$, FPNP10 的电流为 $3I/(e^{\frac{\Delta V}{V_T}} + 1)$ 。

因 FPNP1B 与 FPNP2B 电压相当(通过 FM1D 反馈),则流过 FR12 和 FR13 的电流相等,由此推导三次方电压输出如式(8)~式(13)所示。

$$i_{FPNP5} + i_{FPNP10} + i_{FPNP11} = i_{FPNP6} + i_{FPNP9} + i_{FPNP12} \quad (8)$$

$$i_{FPNP5} - i_{FPNP6} = i_{FPNP9} + i_{FPNP12} - i_{FPNP10} - i_{FPNP11} \quad (9)$$

$$V_{FPNP5B} + V_{BE5} + i_{FPNP5} \times R_{FR10} = V_{FPNP6B} + V_{BE6} + i_{FPNP6} \times R_{FR8} \quad (10)$$

$$V_{FPNP5B} - V_{FPNP6B} = i_{FPNP6} - i_{FPNP5} \times R_{FR10} \quad (11)$$

$$V_{FPNP5B} - V_{FPNP6B} \approx (i_{FPNP6} - i_{FPNP5}) \times (R_{FR10} + R_{FR11}) \quad (12)$$

$$V_{FM1D} = \frac{R - R_1}{R_1} (V_{FPNP5B} - V_{FPNP6B}) \quad (13)$$

三次函数发生电路利用差分对的线性项抵消流过 PNP 管电流中的一次项分量,从而得到输出随输入的变化呈三次函数关系。

2.4 相加电路

一次方电压调整电路如图 6 所示,相加电路设计如图 7 所示,主要负责把一次方电压和三次方电压相加,得到适应 AT 切晶体温度变化的电压信号。

BP17D 为带隙输出, BP19D 为温度一次线性电压,通过调整 A12~A19 的寄存器值可以调整 BM92G 电压的一次项成分。

FM1D 为三次电压产生项, BP19D 为一次项, BP17D 为常数项,电路正常工作时, CM26D 与 BM90G 是直接连通,输出为 BM121D,它的电压与 VC 加和,输出点为 CPNP3B。

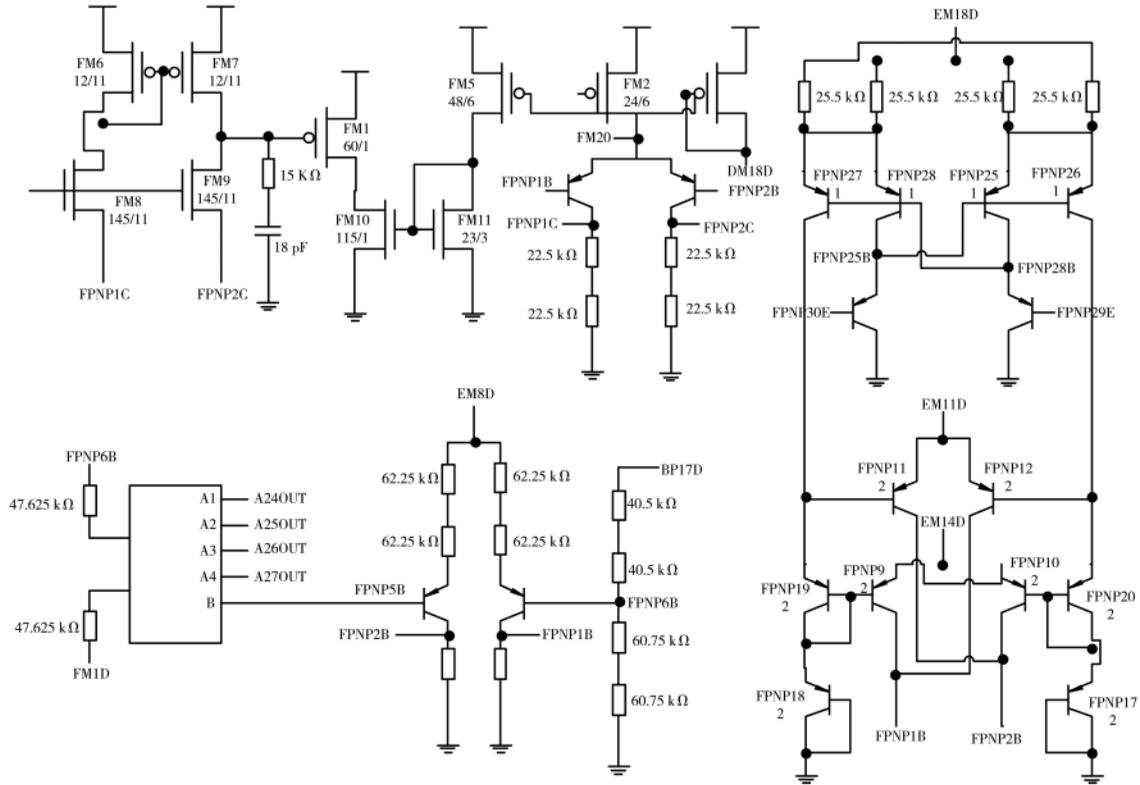


图 5 三项产生电路

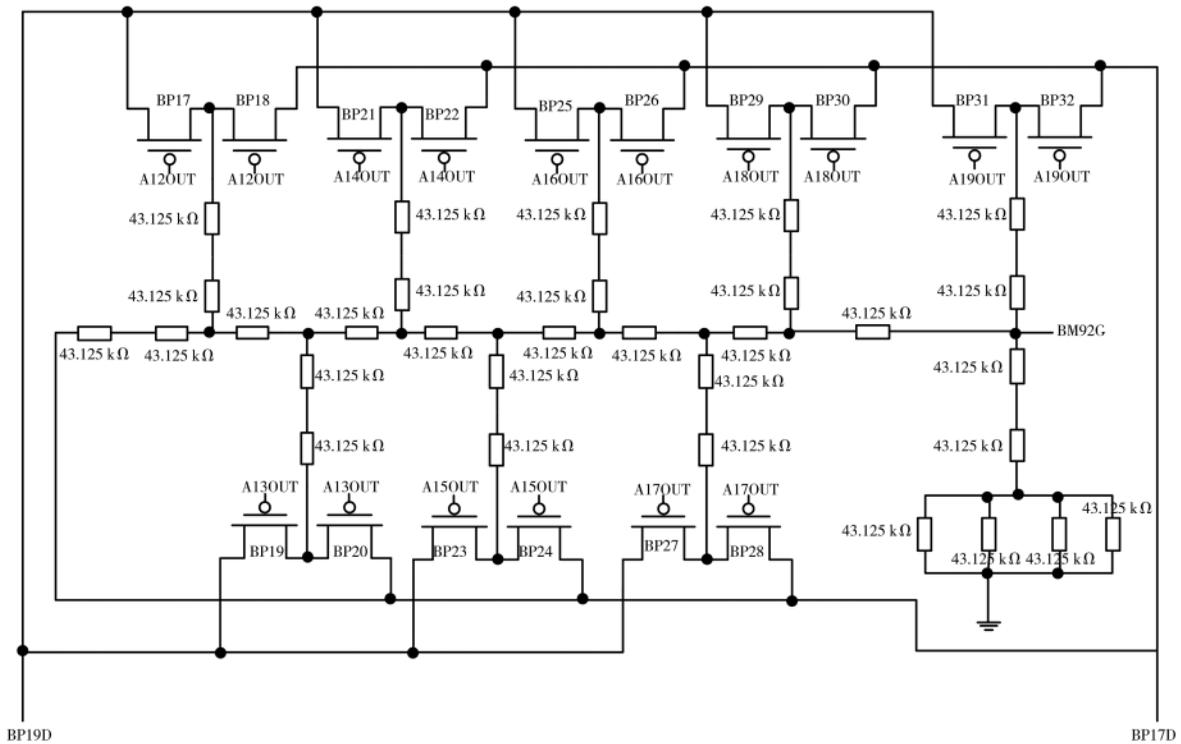


图 6 一次方电压调整电路

3 电路仿真

带隙基准仿真输出 BP17D(VREF)波形如图 8 所示, 稳定输出 1.8 V 的基准电压。

一次函数产生电路温度系数约为 -4.0 mV/°C。对三

次方电压产生电路仿真, V(FM1D)的波形如图 9 所示。相加后仿真 CPNP3B 的电压输出波形如图 10 所示。升压后仿真 x2 点的电压如图 11 所示。

从图 11 中的输出波形可以看出, 输出电压与温度呈

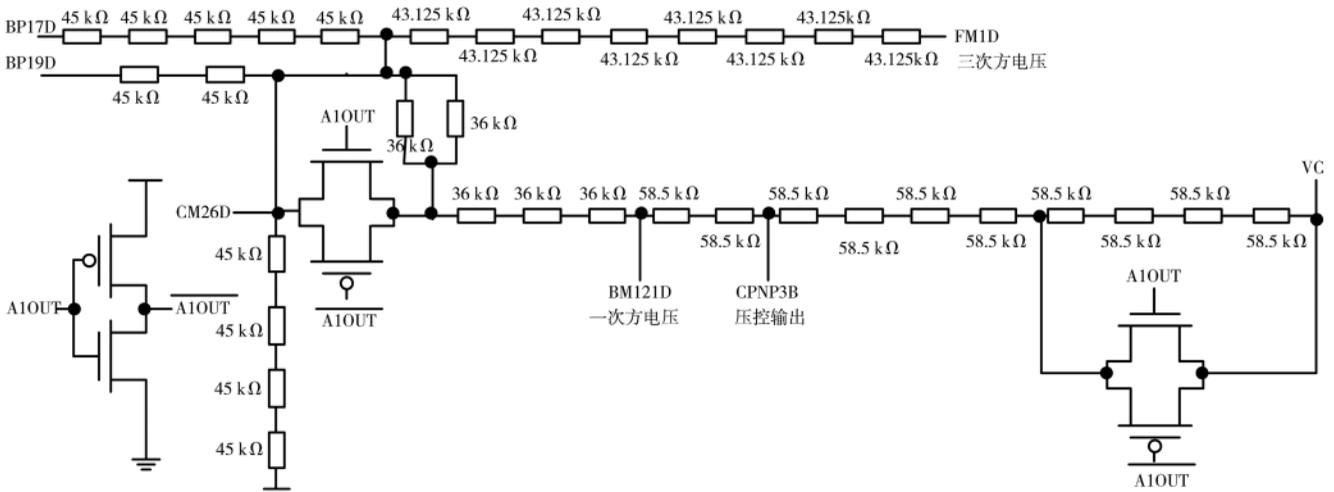


图7 相加电路

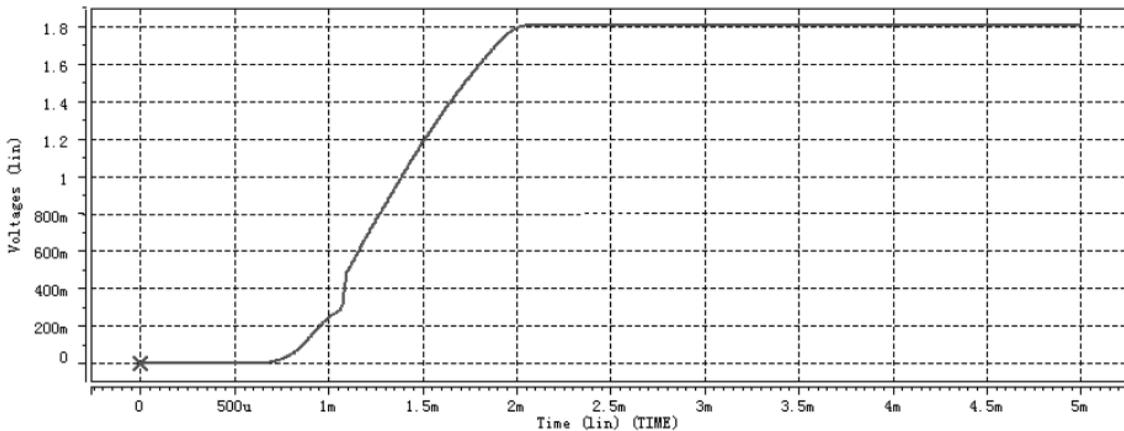


图8 带隙基准仿真

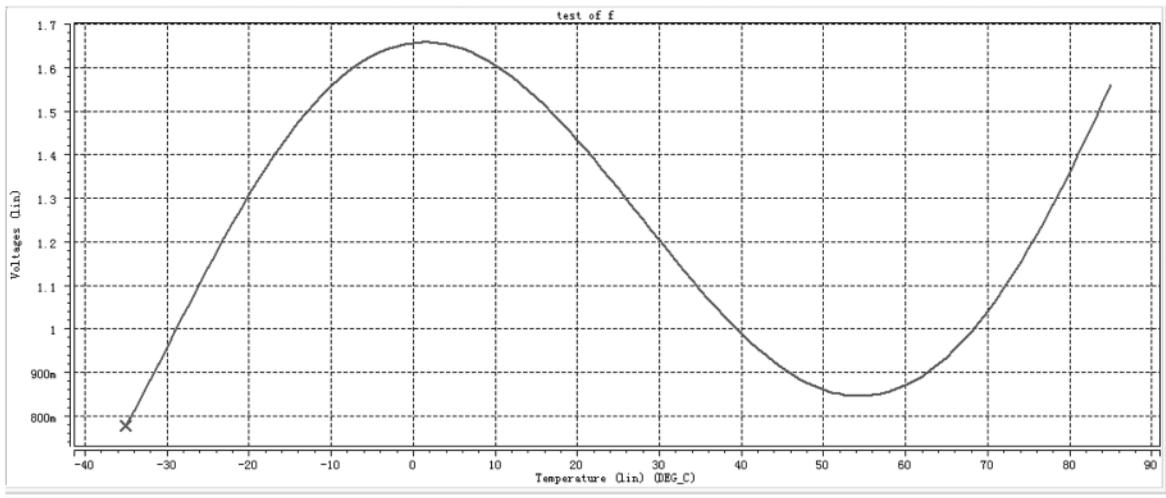


图9 三次方电压产生电路输出波形

三次函数关系。

4 结论

本文在分析现有电路存在的结构复杂、功耗较高等问题的基础上,改进了一种用于恒温晶振芯片中的三次方温度补偿电路,完成了带隙基准、一次方电压产生、三次方电压产生、相加电路等的改进设计,并对各个模块

电路进行 HSPICE 仿真,一次方和三次方电压产生电路相加后,能很好地匹配 AT 切晶体的温度特性,能很好地解决频率随温度变化的问题。

参考文献

- [1] 刘全旺,张波,甄少伟,等.一种低功耗低温漂振荡器的设计[J].微电子学,2020,50(1):46-49.

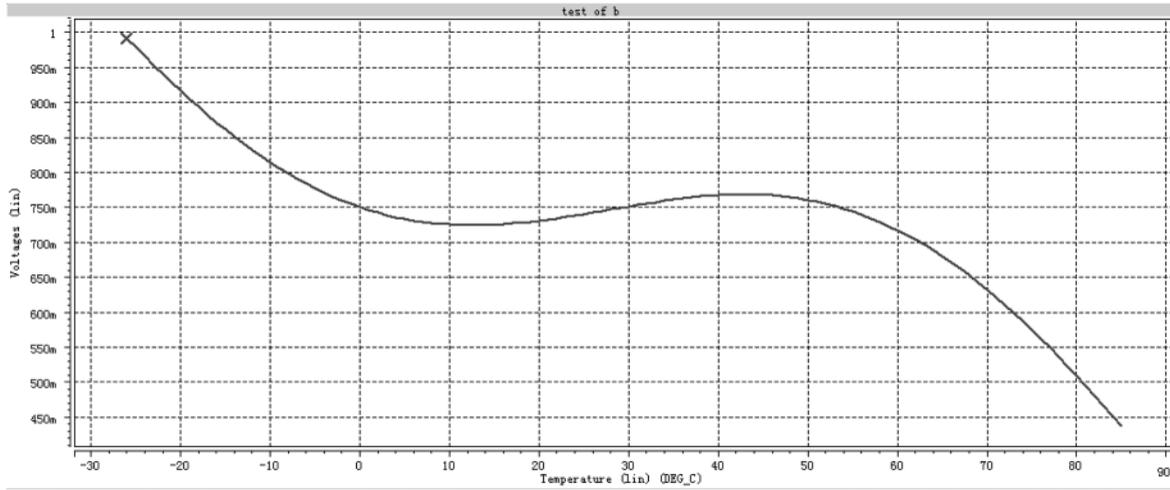


图 10 相加后输出波形

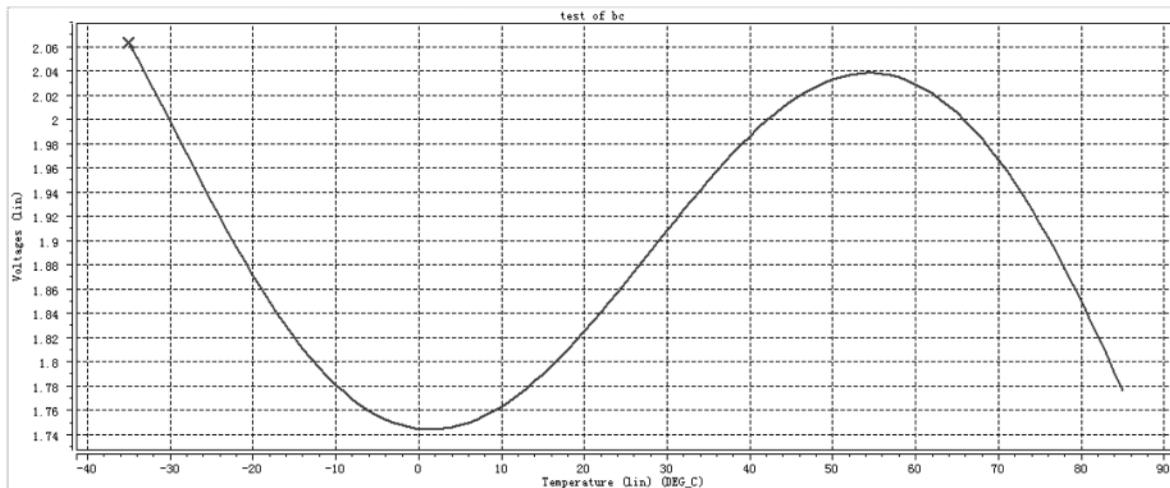


图 11 升压输出仿真

- [2] 林雨佳, 范超. 一种新型可修调高精度低功耗 RC 振荡器设计[J]. 微处理机, 2020, 41(1): 10-13.
- [3] 王东星. 基于 PLL 技术的低频稳相传输主动补偿方案[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [4] 黄李贝. 温度补偿晶体振荡器广泛补偿方法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [5] 马政达. 基于锁相环的精密时间频率传输技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [6] 朱明旺. 低压低功耗 CMOS 振荡器的研究与设计[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [7] 吴佳, 林长龙, 郭振义, 等. 一款用于 TCXO 的三次方函数补偿电路[J]. 半导体技术, 2016, 41(5): 357-361.
- [8] 刘宇. 一种超高频稳定度的 ATCXO 电路的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [9] 肖鹏. 一种用于温度补偿晶体振荡器的芯片设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [10] 曹艳芳. 二极管泵浦的高功率掺镱全固态飞秒振荡器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] 刘艳红. 用于洛伦兹对称性检验的双模式振荡器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [12] 牛占鲁. 新型恒温晶振原理及实现[J]. 电子世界, 2019(7): 92-93.
- [13] 孙晓化, 王宏兴, 张启东. 用于晶体振荡器温度补偿的次方电压产生方法[J]. 电子科技, 2019, 32(12): 22-26.
- [14] 邓玉清, 葛兴杰, 宣志斌. 一种高精度 RC 振荡器的设计[J]. 电子与封装, 2019, 19(1): 28-31.
- [15] 骆川. 一种高精度环形振荡器的设计[J]. 中国集成电路, 2018, 27(9): 48-53.
- [16] 荣家敬, 辛晓宁, 任建, 等. 一种高精度振荡器设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(17): 1-5.

(收稿日期: 2020-04-02)

作者简介:

谭传武(1984-), 副教授, 主要研究方向: 集成电路设计、移动通信技术。

刘红梅(1980-), 通信作者, 讲师, 主要研究方向: 电子技术、物联网技术, E-mail: 29081169@qq.com。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所