

五十年來石英晶体频率标准的发展过程*

TCXO

Frer., ME

Marvin E Frerking

石英晶体频率标准

李密哲^① 王莉^② 译

石英晶体频标

石英钟

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710000)

摘要 晶体频标的发展进程历经了近半个世纪。本文强调了其中的技术变化和革新。本文论述了恒温型晶体频标从最初的真空管时代到晶体管、大规模集成电路(LSI)、以及混合结构使用的进程。

TCXO(石英晶体频率标准)的发展过程也包括模拟热敏电阻温度补偿、数字补偿、使用微机技术及自激振荡器。

审视过去半个世纪中晶体频标的发展过程实在是一件令人兴奋的事情,这不仅揭示了性能和规模上的戏剧性改进,而且由于元器件和制造业的进步,使得先前已知技术和革新、改进的技术在实施中融合成为可能。

让我们注视发展的结果,开始阶段用大支架安装的频标可达到的性能在目前仅仅 1 立方英寸体积的恒温频标就可实现。用最先进的温度补偿晶体振荡器也可以实现这些结果,该振荡器体积小于 1/2 立方英寸,功耗低于早期两个数量级。

1 恒温频率标准

显而易见,恒温控制的频标在性能和尺寸大小上都有很大的进步。然而,由于晶体管、集成电路、以及混合结构的使用,最富戏剧性的改进是尺寸。尺寸缩小的结果是可以生产出 1 立方英寸体积的精密元件。今天使用的许多恒温元件提供的精度在 10^8 分之几左右,用 SC 切割晶体可达 10^9 分之几。撰写本文时,最典型的体积是 1-4 立方英寸,与 50 年代末期超过 100 立方英寸的体积相比,确实有了非同凡响的进步。

在这个进程中,一系列革新给人留下了深刻的印象,其中最有意义的罗列如下:

1. 频标和振荡器中晶体管的使用。
2. 精确的泛音谐振腔(能量抑制)。
3. 采用变抗器牵引晶体频率,特别是 TCXO 中。
4. 在温度补偿晶体振荡器中采用变抗器热敏电阻温度补偿。
5. 数字技术在温度补偿中的应用。
6. 外界温度补偿晶体振荡器的应用。

Fifty Years of Progress in Quartz Crystal Frequency Standards. 1996 IEEE International Frequency Control Symposium, P33

①② 助理工程师

收稿日期:1999-12-08

7. SC 切割晶体的发现。
8. 将微处理器用于温度补偿及输出信号的合成。
9. 自敏晶体振荡器(双模式)的应用。
10. 恒温标准中直流控制电路和晶体管电热器的运用。
11. 混合电路和微电子包技术的应用。
12. 采用真空管隔热(尽管半世纪前的早期标准常采用杜瓦瓶带有讽刺性)。
13. 用于 UHF 和微波振荡器的表面声波谐振腔和滤波器的发明。
14. 蚀刻技术在 VHF 波基型晶体中的使用。

令人惊讶的是,我们今天仍在使用的许多技术,在半世纪前开始或之后不久就已为人们所知晓^[1]。1947年,在这一阶段的开始,Cady 教授的书出版,Raymond Heising 也于二战期间出版了他在理论、设计和生产方面的先见之作。同样,通过 Galvin Mfg 公司和西方电子公司等组织,许多制造工艺也被有效地产业化。

那时,开发出在严格的摆动和振动条件下都很稳定的高频晶体。三个月后每天的老化率在 1×10^{-9} 的 100kHz GT 切割晶体也被研制出。甚高频晶体(VHF)和密封金属晶体容器被研制出,但是与今天的标准相比,容器泄漏和晶体元件漂移很严重。

到 1956 年,2.5MHz 和 5MHz 的高频精确 AT 切割五次泛音设计已趋于完善。同时,有关适合于温度补偿晶体振荡器的热敏电阻的工作也取得进展。关于这一产品的最早报道是 1995 年有关采用热敏电阻并联电容器的热敏电阻补偿的内容。

晶体振荡器的发展过程是令人着迷的,最早用于频率控制的石英晶体振荡器在 1921 年由 W. G. Cady 制成。它包括一个将输出通过晶体耦合到输入的放大器。X 切割晶体和两副电极一起使用,一端联到输出管的阳极电路,另一端联到放大器输入端的栅极电路。

最早的晶体时钟,是 Horton 和 Marrison 于 1927 年制造的。该晶体时钟使用一个用两片重金属磁极片支撑的 50kHz X 切割矩形石英块。这已被石英环所取代,该环形晶体一直被使用,直到 1937 年在贝尔实验室被 GT 切割晶体所取代。由于两种模式的对肖作用,GT 切割晶体具有在相当大的温度范围内保持本零的温度系数。

图 1a 所示为上述早期晶体钟所用的 50kHz 的晶体安装方式。图 1b 为环形晶体。图 1c 为压点装式 GT 切割晶体。

在这一阶段的开始及随后的几年中,所执行的恒温频率标准使用将晶体置于恒温箱中的真空管,通常使用杜瓦瓶以将热量损失减到最小。该标准尺寸大,常被设计安装在一个 19 英寸的继架上。尽管早期的标准使用 100kHz GT 切割晶体,但使用一个 1MHz 基本模式的 AT 切割晶体也不是一件不同凡响的事情。100kHz GT 切割晶体每天的老化率可低至 2×10^{-9} 。

早在 1946 年,国家标准署(NBS)就对 100kHz GT 石英晶体进行了电桥测量。高精度石



图 1a 1927 年的早期石英钟的
50KC 晶体安装方式

英晶体谐振腔 1951 年被作为频率基本标准的一部分。NBS 的温度控制可以通过使用精确度控制在 0.001°C 范围内的一个双恒温箱晶体谐振腔来实现,每天的老化率可低达 1×10^{-10} 。

在这些形成时期,生产中采用频率标准的是常规广播公司(General Radio),即 1100-A 型支架安装元件。

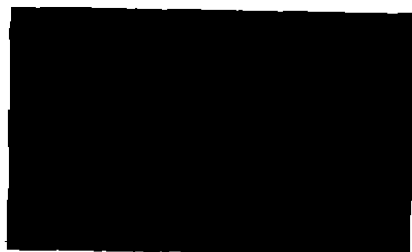


图 1b 1937 年贝尔系统频标所用的环形晶体

这一标准从 1948 年到 1960 年发展起来,它使用一个 100-kHz 次谐振扩展模式石英条。图 2 所示是这个谐振腔。

几个月前已经公布出来的这些频率标准的精度为 10^7 分之一,晶体的温度由补偿热敏电路控制到 0.01°C 的通常环境温度。这个标准也包括一个同步驱动时钟,以便根据时间直接评测频率。该时钟被一个来自晶体频率为 1000Hz 的信号所驱动。图 3 是这一标准的照片。

1955 年,公布了利用 1MHz GT-切割晶体

的电桥平衡振荡器的结果。使用自动频率控制电路电桥联接为减弱不在恒温箱中的真空管振荡器的影响,其每天的老化率可以达到 10^{10} 分之几。图 4 是电桥振荡器。

1958 年,贝尔实验室报告了他们在 4.2°K 温度的液态氮环境中,对 10MHz AT 切割泛音晶体进行低温冷却实验的结果。采用了两个杜瓦瓶,外层瓶装有 77°K 的液氮,以将内层瓶中氮的损失减到最小。晶体的 Q 值可达 500000 ,每月的老化率小于 1×10^{-10} 。图 5 是这一标准的照片。

为了给商业和军用市场设计和生产频标,也做了大量工作,这些标准与今天相比规模巨大,但比起那些用于实验室环境的要简单得多,因为在实验室有可能为了获得最佳性能而做每一件事。本文后续部分所提到的大部分晶体频率标准,讲述了用于通讯和导航设备中工业化生产的元件。



图 1c GT 切割晶体的压点或安装方式



图 2 石英条谐振腔

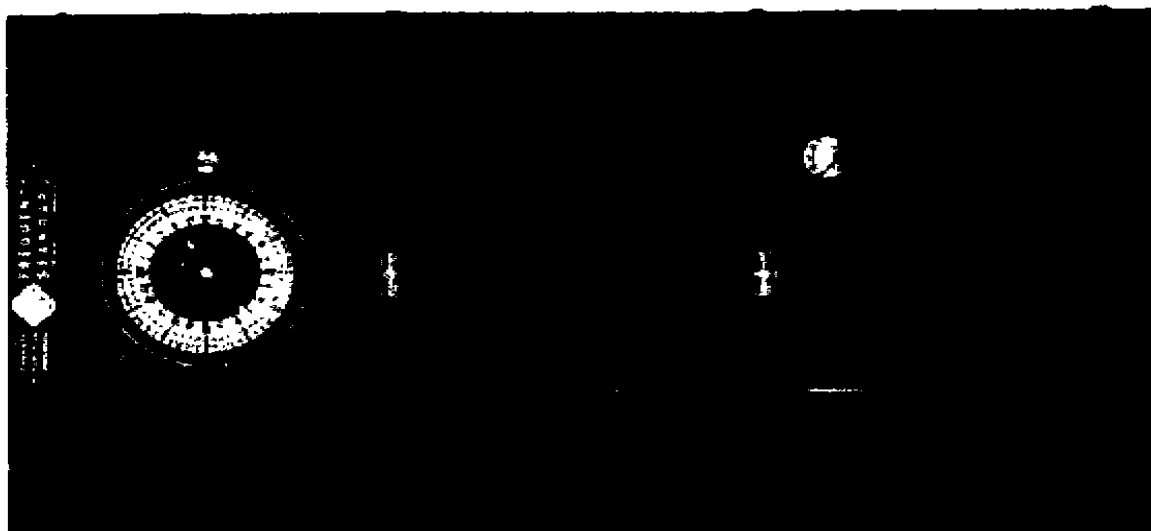


图3 General Radio 1100-A型频标

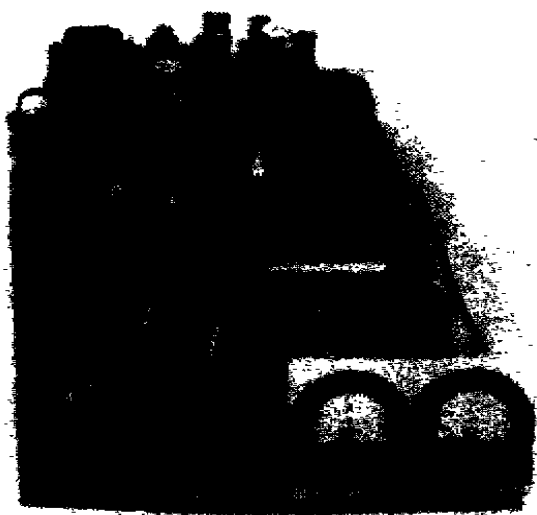


图4 试验性电桥平衡振荡器

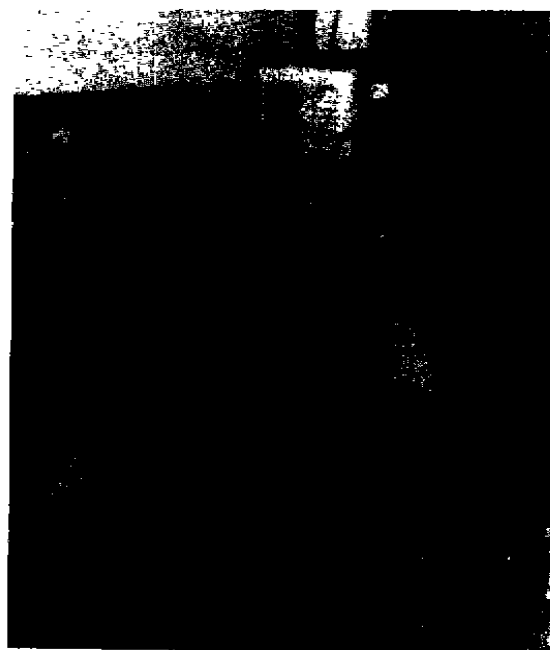


图5 采用液态氮控制晶体元件环境的晶体振荡器

在半世纪初及随后的几年,晶体管还未能加以利用。因为采用真空管的有效电路规模大,通常只将晶体封在恒温箱中,由于真空管的限制电平相当高,需要采用 ZGC 电路来限制晶体驱动电平。为了避免控制放大器操作点的漂移,常采用 AC 恒温控制电路。两个十分精巧的恒温控制电路在电桥电路中使用两个温度系数不同的电热丝线圈,一个音频功率放大器与线圈相连。当恒温箱温度低于工作温度时,恒温线圈将不平衡,以给放大器输入端提供正反馈,使放大器振荡。其产生的信号加热了恒温箱。当接近所需温度时,两恒温线圈几乎相同,实现电桥平衡,这减弱了正反馈,从而使振荡电平正好提供使恒温温度保持稳定的功率。这些以及其它一些聪明的技巧,应归功于那些有创造性的科学家、工程师、技师们,他们有效地利用当时的元器件取得了十分令人敬佩的成果。

20 世纪 50 年代,所确立的标准之一是柯林斯(Collins)广播公司的 40K-1 型振荡器(参考图 6)。该振荡器大小为 $187 \times 8 \times 83/4 \times 7$ 立方英寸,并且在用一个杜瓦瓶的恒温箱中,使用频率为 1MHz 的基模晶体。持续工作一个月后,表明其每天的老化率要优于 10^{-8} ,然而,有些元件每天的老化率接近于 1×10^{-11} 。1000 多个这样的元件被用于美国国防系统。

随着晶体管的使用,为恒温频标结构实施改进提供了丰富的机会。使在恒温箱中包含隔离放大器、振荡器部件和 AGC 电路突然变得可能和实际。具有讽刺意义的是,晶体管部分的温漂移严重,因而只是被人们强行地置人在恒温箱。

60 年代早期的精密标准通常使用一个 5MHz 的五次泛音晶体,它由 Warner 有贝尔通信实验室研制成功,并由 Bliley 电子公司生产。其驱动电平受 AGC 电路的限制,以最大限度地降低其老化率。晶体的每天老化特性通常为 3×10^{-10} ,有很多晶体可达到每天 1×10^{-11} 。这一温度稳定性标准非常好,每摄氏度可达约 5×10^{-11} 。其所需功率比今天的标准大,大约为 25 瓦特,使用泡沫塑料绝缘,加热时间 30 分钟被认为是合理的。海军战术数据系统中使用的一种典型元件的尺寸为宽 $4 \frac{7}{8}$ 英寸、长 19 英寸、高 $8 \frac{3}{4}$ 英寸($12 \times 48 \times 22 \text{cm}^3$)。

最有意义的事情发生在 20 世纪 50 年代末,即开发导弹上应用的一些坚固频标。一种导弹载频标采用频率为 5MHz 的晶体元件,振动频率在 10Hz~2000Hz 范围内使加速灵敏度保持 1×10^{-9} 。另一种导弹载频标在柯林斯广播公司(Collins Radio)研制出,它采用频率为 11MHz 全固体设计基晶。AT 切割晶体的加速灵敏度约为每 $G1 \times 10^{-9}$ 。

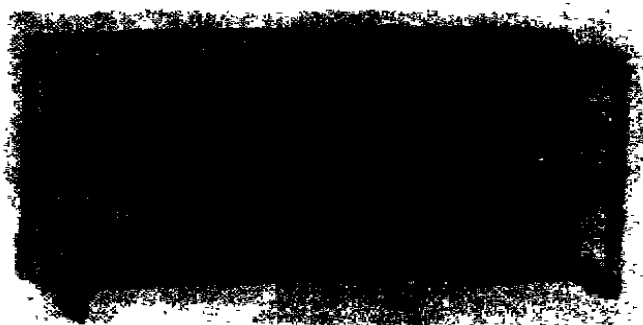


图 6 柯林斯无线 4K-1 频调



图 7 摩托罗拉 1011 频标

在50年代由美陆军发起也做了些实验,以研究恒温状态的变化,该恒温箱采用了70.47℃时,具有三态点的聚二氧化苯。该技术中的各种问题妨碍标准商业化。

60年代初,摩托罗拉公司研制出精确的双恒温箱频标,该元件采用Q值为4百万、频率为2.5MHz的五次泛音AT切谐振腔。图7所示为该元件1011型频标。该元件在温度从0至35℃变化时其恒温性为 $+1.5 \times 10^{-10}$,四周后每天的老化率为 5×10^{-11} ,许多晶体的每天老化率优于 1×10^{-11} 。

60年代研制出的另一个恒温成果是直流恒温控制电路的使用。如前所提,交流恒温控制电流的一个优点是与声频振荡相连的边带,产生信号射频输出频谱。直流恒温控制电解取消边带,然而,固态直流放大器的工作点漂移严重且至少在放大器的初始阶段需置于恒温箱中。此时,绝大多数的恒温箱仍采用由缠绕在恒温箱的电阻丝做成的电热元件。当选用了温度敏感器,热敏电阻取代了电阻丝。

在70年代,电阻元件的使用给电热元件采用功率晶体管提供了方法。这有多种益处,例如制造容易、功率与电流而不是电流的平方成正比,因而使控制环路的增益线性化。同时,几乎所有的功率都在电热器中耗散,而不是在控制放大器中,其结果是大大提高了效率。此外,采用晶体管电热器实际上取消了对快速加热线圈的需要。

不幸的是,功率晶体管电热器有时会产生近热源点,使得恒温箱温差明显。幸运的是,1974年由EerNisse发现的SC切割晶体的出现,使温差标准灵敏度大大降低。当采用AT切割晶体时,在大的温度范围内频率稳定性约为 $+1 \times 10^{-8}$,而采用SC切割晶体时要提高到 10^9 分之几。1978年,Hewlett Packard设计了一种直流恒温控制电路振荡器,该振荡器装有晶体电热器和SC晶体,如图8所示。

该振荡器采有了精度适中的AGC电路,逐渐变化,这是因为晶体振荡器器件比起真空管限制在较低的电平,且SC切割晶体的驱动电平灵敏性更低。AGC电路的消失明显简单一些标准,且取消

了将所有放大器器件放入到恒温箱的需要。运算放大器的有效性导致恒温控制电路的进一步发展,也使一些半精度应用中将控制放大器完全置于恒温箱外成为可能。

将一些技术给工艺带来圆满的过程记录下来是很有意思的。例如,在半个世纪前,在恒温箱中通常只是晶体。然而,随着时间的推移,恒温箱中有了振荡器/放大器器件及恒温控制器件。更多的先进技术重新导致恒温箱中的电路数量的减少。

70年代,采用SC切割晶体,也允许加热时间明显减短。在很谨慎的情况下,全球定位系统(GPS)中从-55℃接通的加热时间可达3分钟(最终频率约为 3×10^{-8})。对许多生产元件

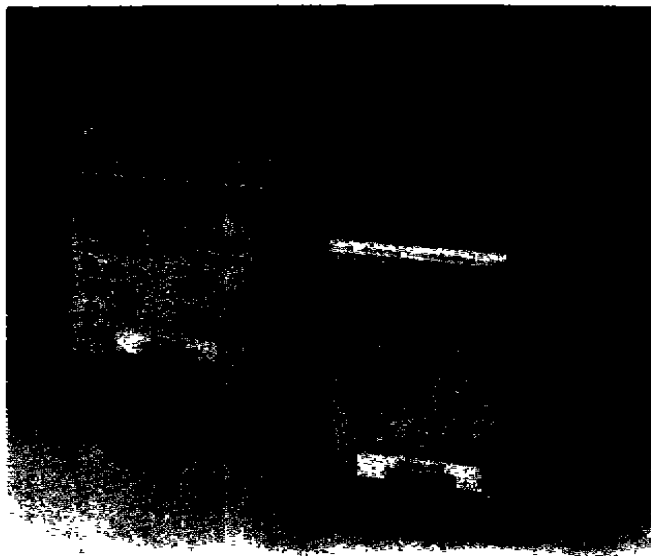


图8 Hewlett Packard 10811型振荡器

来说,现在的工艺状态是十分重要的。

选择的晶体从 100KHz 的 GT 切割发展到 1MHz 基 AT 切割,这种谐振腔很快被 5MHz 五次泛音 AT 切割晶体取代,然后,在许多应用中,这种五次泛音 AT 晶体又被 10MHz 三次泛音 SC 切割晶体取代。当然,另外的一些谐振腔也被采用(如 5MHz 三次泛音 SC 切),但提到的这些元件还是经常被采用。军用频率范围两低温端的功耗通常大于 1.5W。表面安装谐振腔架也得以发展,这对于持续小型化的需要来说可能会越来越重要。

在此阶段末,采用混合结构技术可减小恒温标准的尺寸,且在恒温组装中常使用混合电路。由美陆军负责的战术微型晶体振荡器(TM XO)的一个明显进步是功率和尺寸的减小,其中的许多工作是在 70 年代中期至 80 年代完成的。TM XO 在恒温组装中使用了混合结构技术,该恒温组装被置于一直空盒内,总体积约为 1 立方英寸,功耗仅为 250 毫瓦,温度从 -40°C 至 $+75^{\circ}\text{C}$ 时其温度稳定度为 $\pm 1 \times 10^{-8}$ 。图中所示的是 TM XO 较新的一种。如果没有舶来品,TM XO 的结构包含许多相当严密的技术,但由于经济原因,许多应用既采用了普通恒温电路,也采用了精确 TC XO 电路,那就接近恒温精度。



图 9 由 Piezo 技术公司生产的 TM XO

此时,恒温频标应用广泛。它们采用常规绝缘,如塑料泡沫,利用小芯片器件及表面安装。AT 和 SC 切割晶体均根据稳定性的需要而用,晶体管通常用在恒温电热器中,其温度稳定度从 10^9 分之几变化至 10^7 分之几,老化率通常为每天约 5×10^{-11} 至 10^9 分之几,能买到的最小尺寸为 1/2 立方英寸。高精度应用中的一些 OC XO 能达到高得多的性能,如一航天器中应用的 BVA 谐振腔,表明其老化率每天为 10^{12} 分之几。

对于大规模生产来说,石英晶体的加速灵敏度很难提高。60 年代 AT 切割晶体典型的加速灵敏度约为 $1 \times 10^{-9}/\text{G}$,对于许多晶体来说,这仍然是现在的性能水平。一些设备需要更好的性能,就通过不同的安装技术得以提高,一般都选用低 G 敏感元件来达到更好的性能。据报道,有些可达到 $1 \times 10^{-10}/\text{G}$ 或更好,例如,采用 BVA 谐振腔。已做了些工作来补偿晶体的 G 灵敏度,即采用电子设备与加速器连接。至今,这些结果刚开始用于静态加速和低振范围部分。

2 温度补偿晶体振荡器(TC XO)

如同恒温频标,TC XO 近 50 年来的研究和发展过程确实是一件令人激动的事。不幸的是,由于考虑到专利因素,TC XO 的许多成果没有公开。作者从柯林斯广播公司中得到了很多有关早期 TC XO 发展的资料并在本文中大量引用。同上述一样,TC XO 的许多成果也出现在其它设备中,但不幸的是,这些成果公开的也不多,本文可能仅仅是作肤浅的讨论。

50 年代末期,TC XO 的两个关键元件聚集在一起,即变容二极管和热敏电阻。此前,通常采用电抗调制器来牵引晶体以达到大的牵引距离,这些调制器温度漂移严重。另一方面,变容二极管相对稳定,其电容值能很方便地达到,且其形状小。此外,控制电压范围与晶体管振荡器所需的相对低电压补偿电路相兼容。

一些温度补偿的实现,是在用热敏电阻与电容器或电感器平等的变抗器的实用之前,但是,当涉及到大的温度范围时,则采用变抗器。有一项成果报道了采用热敏电阻与电感器平行的温度补偿,该平行电路与晶体串联以获得 ± 0.1 的温度系数,从 59°F 至 113°F 时,每度的变化率为百万分之几。图 10 所示的就是这种振荡器。

各种热敏电阻的值也可从几 $\text{k}\Omega$ 到几 $\text{m}\Omega$ 。也实现 β 值的多种选择,特别是数值为数千的广泛应用于覆盖温度范围宽的实用 TCXO 中。也制造出最初设想的温度补偿振荡器,该振荡器采用双金属弹簧对晶体施加机械力并以此补偿其温度系数。这些技术远远不知电子补偿,并被变抗器取代。

TCXO 发展初期,补偿任务的最大困难是发现一个热敏电阻电路,当变抗器的电容与电压比的非线性曲线变化时,该电路将与晶体温度系数匹配。

最初的一些工作是设法使该曲线尽可能线性化。采用宽距转向点,这样的晶体可使它在工作温度范围内完全线性化。不幸的是,这也需要将晶体的频率范围牵引得相当宽。使用十进多电阻箱来模拟预计温度范围的热敏电阻,以设计出一个合适的线性热敏电阻电路。由于热敏电阻相当非线性,所以这是一项很艰难的任务。

研制线性宽温度范围的热敏——变抗器 TCXO 电路的设想基本上没有成功。然而,作为大量独出心裁的结果,电阻基本不同的三个热敏电阻的唯一组合及 β 值的发现,该值将与 AT 切割晶体的立方曲线匹配。此外,该电路的特点是,在所给的任何温度范围内只有一个热敏电阻和一个电阻器对此曲线有主要影响。因此,三个分离电阻能够调节低温、室温和高稳区的温度补偿,而对曲线的其他影响相对较小。一种重复测试方法被研究出,以致经过几次温度循环后,可在 -55°C 至 $+75^{\circ}\text{C}$ 的所有温度范围内获得 $\pm 0.5\text{ppm}$ 至 $\pm 1\text{ppm}$ 的精度。所有频率牵引性的附加调节是通过将测试选择电容器跨过变抗器而制成的。制成的热敏电阻电路如图 11 所示,在括号内标出的温度区内,每一元件达到最佳效用。采用该电路,可用一套固定的热敏电阻,仅当电阻器调节到适合于特别晶体时才被采用。

TCXO 覆盖宽温范围的一项首次应用是 Marine 公司使用的一种元件,在 60 年代刚开始就被研制出,PRC-47 单边带后装式收音机,图 12 所示的就是这种 TCXO,其精度为 $+0.$



图 10 1959 年采用热敏电阻温度补偿的便携频标

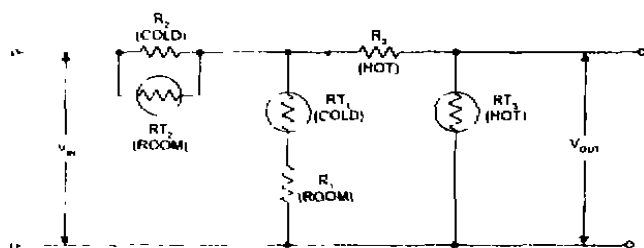


图 11 三个热敏电阻温度补偿电路

5ppm。该元件用柯林斯广播公司生产的如图 11 所示的这种三热敏电阻补偿电路。

也设计出了其他的方法和电路使热敏电阻的个体特征明显,并在所给的 TCXO 中选择最佳匹配。例如,在一些需要较小温度范围的 TCXO 中,采用了两个热敏电阻的电路。用热敏电阻穿过电容器的方法已幸存下来,现在许多 TCXO 采用这种技术,在限制的温度范围内进行补偿,特别是其所需费用低。

图 11 所示的三热敏电阻电路的局限之一是,在晶体高转换点上不能很好地跟踪,因此,设计出四个和五个电热敏电阻的电路,以用于所需温度高于 80℃ 的仪器。五个热敏电阻的电路其补偿温度可高达 120℃。当所需的热敏电阻超过三个小时,通常采用与初始温度测量相联的计算机来常规设计每一 TCXO 电路。

另一种温度补偿方法是,主要采用与非线性电阻器热敏电路平行的手段,使用“逐段线性补偿”,其中的晶体管被用来产生较小的隔离温度区,从而使单热敏电阻和电阻器能用来跟踪晶体曲线,1968 年报道了这项科研成果。这些设想被用来研制伺服系统,该系统采用电动电位器来实现自动校正。这种分段方法在提供独立段时非常成功,但不好是需大量的器件。也研制出这样一些温度补偿技术,即采用单温度传感器来产生晶体的立方曲线。由该电压产生的冥级数可由确定膨胀系数的调节电阻器计算出。研制出的传统集成电路是为了使这种方法需要的器件减到最小。

在 70 年代中后期,数字补偿电路也实用化。其中的温度传感器以数字化方式对存储器编址。存储器的存储信息根据所需补偿电压编程,存储器的输出端与馈送给变抗器的 D/A 转换器连接,这种方案实现了真正的分段补偿方法。然而,由于经济的原因,大家还是喜欢用模拟补偿电路。目前,许多 TCXO 继续使用模拟电路。

一种改善的数字方法是利用微机来完成数字补偿。这种方法最早是于 1978 年公开出现的,但那时的微机技术还处于萌芽阶段,而且由于经济原因和尺寸的限制,直到 80 年代中期微机还不能广泛用于产品中。

微机的应用给经典数字补偿提供了许多利益。它使在已存入到存储器的语句中插入字句变得容易,这就减少了存储器的大小,并由限制存储器导致跳频。

另一个利益是,微机能够成为 D/A 和 A/D 转换器的一部分。对于 A/D 转换器来说,它允许诸如热敏控制多谐振荡器或二元斜率积分器这样的温度敏感电路和微机一起被用来确定周期。

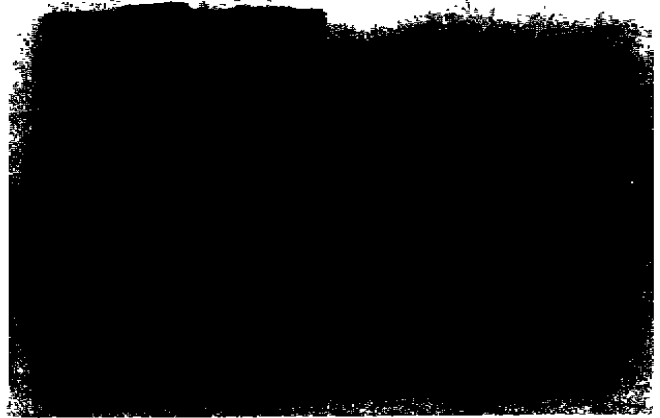


图 12 PRC-47 单边带收音机采用的 TCXO



图 13 1984 年采用微处理器补偿的 TCXO

对于 D/A 转换器来说,微机可用来产生一个可变频宽比的方波,其 DC 值通过电阻器和电容器组成的简单低通滤波器得到。图 13 所示的是一种早期微处理器补偿晶体振荡器。由 Rockwell 国际公司于 1984 年制成。

研制出的另一种温度补偿电路是用于大规模产品的,包括每个部件覆盖 20 至 30 度温度范围的多模拟部件。在这种产品中,采用了线性温度传感器,数字存储器对每一温度部件保持增益和偏置恒定,几乎所有的 TCXO 都以这种方式集成,从而产生了小型廉价的振荡器。

奇怪的是,在开始的三十年内,TCXO 的精度相对来说几乎没什么提高,采用直接温度补偿的方法将晶体牵引至正确的标称频率。60 年代初生产的许多 TCXO 在 -40°C 至 $+75^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内的精度为 $\pm 0.5\text{ppm}$ 。柯林斯广播公司生产了 50000 多个这种元件,它们是单边带在全球范围内被接受的一个重要因素,这种单边带在高频无线电频段达到 30MHz 所需的精度约为 $\pm 30\text{Hz}$ 。

更多精度为 $+1\text{ppm}$ 的 TCXO 被产生出, $+1\text{ppm}$ 似乎成了界线,超出这一精度难度格外大。该问题的一点是,刚适合晶体的模拟电路微调很难达到。另一个更严重的限制是,由于滞后作用,不论如何谨慎地调节补偿电路,似乎都不可能使精度补偿到优于 10^7 分之几。

在 1968 年的频率控制会议上,发表了与石英温度计研究相关的石英滞后作用综合研究成果,其结果为:“集电器在没有真宽管烘或缺少晶体装的洁净,其滞后影响将恶化。然而,在预先对晶体处理关注的两个实验已十分明确地表明,保持的滞后影响与污染无关”。

保持的滞后使用是石英的一个固有特征,还是归因于缺陷结构,这还不能确定。清楚的是,滞后作用受切角影响。直到目前,几乎过去了 30 年,滞后效应的潜在原因还没搞清。

1970 年前后,美国陆军负责研制出了一种有意思的方法,即模拟热敏电路产生的误差可通过精细数字补偿电路来校正。精度为 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 的一些元件被生产出,但是完全依靠选用滞后效应非常低的晶体。

数字补偿电路的出现使曲线误差减小,但在大规模产品中,在宽的温度范围内还是很难使补偿优于 2 至 3×10^{-7} 。庆幸的是,1978 年报道了一项重要突破,其输出频率不是通过牵引振荡器至标称频率得到的。这就可以在振荡器中使用 SC 切晶体,这种晶体太刚而不能牵引频率。晶体的 B 模,即次模,具有很大的温度系数,用于双模振荡器中作温度传感。假定该设备的精度在 10^{-9} 这一范围,根据计算机模拟显示,对于每分钟 3°C 的扫描率,可望达 10^8 。

双模振荡器和 B 模的性能在温度方面都遇上了实际难题。美国陆军的研究结果是,在 SC 切割晶体的基本和三次泛音 C 模间集中开发不同温度系数的变化,以制成自敏温度补偿晶体振荡器。其中许多成果都保密,直到 1989 年才被公开。尽管一些元件达到的精度为 $\pm 1 \times 10^{-8}$,但在军用温度范围内,已研制出用于温度补偿振荡器的电路精度为 $\pm 3 \times 10^{-8}$ 。

该元件在一个 HC-40/U 的容器内采用一个 10MHz 的三次泛音 SC 切割谐振腔。在基晶的三次泛音和二次泛音间的拍频用来提供一温度传感器。拍频的温度系数约为每摄氏度 100ppm。目前已经生产出数量有限的几个微机补偿晶体振荡器(MCXO),图 14 所示的就是这种振荡器的初始模型。

外界补偿的应用是 TCXO 精度限制突破的一个重要因素。因为这不需不牵引晶体频就绪,一个明显的不稳定源(即变抗电路)可被取消。许多不稳定性确实是从晶体和变抗器间的高阻抗点产生的,使得 TCXO 对诸如由湿气被吸收进印刷电路板引起的寄生电容变化的

敏感。

然而,更明显的是外界温度补偿允许使用除了 AT 之外的其他切割晶体。许多公开的成果是围绕采用外界温度补偿与双模振荡器联接的,其结果已在 MCXO 中谈到过。当今,一些较少公开的仍在使用的技术中。采用独立温度传感器,而不是双模振荡器。采用该技术与 SC 切割基准晶体,生产出 1000 多个温度从 -55°C 至 $+95^{\circ}\text{C}$ 时,精度为 $\pm 2.5 \times 10^{-8}$ 的元件,这些元件用于 1994 年至 1995 年期间 Rockwell 国际公司的 MILSTAR 项目中,有些工程模型的精度约达到 1×10^{-8} 。

采用 AT 切割基准晶体的设备其稳定度已证明优于 $\pm 1 \times 10^{-7}$,采用三次泛音谐振腔和基本元件的稳定度为 $1 \sim 3 \times 10^{-7}$ 。

TCXO 的输出信号已从脉冲删除至直接数字合成器(DDS)或与锁相环路组合的数字合成器的范围内以各种方法综合。

TCXO 精度在半个世纪内几乎提高了 2 个数量级,即从 1ppm 至 2×10^{-8} 。随着精度从几个 ppm 提高至 10^7 分之几,TCXO 的尺寸也戏剧性地变小,表面安装元件的尺寸可达到面积为 0.5 平方英寸,厚度为十分之几英寸。当前,正在大量生产精度为 10^8 分之一左右的元件,其体积约为 1 立方寸,采用工程模式生产的其体积约为这一数值的三分之一,图 15 所示为精度 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 的 TCXO。



图 14 由频率电子公司生产的 MCXO



图 15 由 Rockwell 国际公司制造的 $\pm 5 \times 10^{-8}$ TCXO

现在,晶体频标的性能主要受晶体限制。纵观历史,这是过去五十年经常出现的情况,当谐振腔技术和工艺方法改进时,我们期盼晶体频标持续发展。毫无疑问,集成电路技术和计算机对频标自身制造及测试方法的影响,对晶体频标的工艺发展将起到巨大的作用。

参考文献(略)

吴忠贤译校