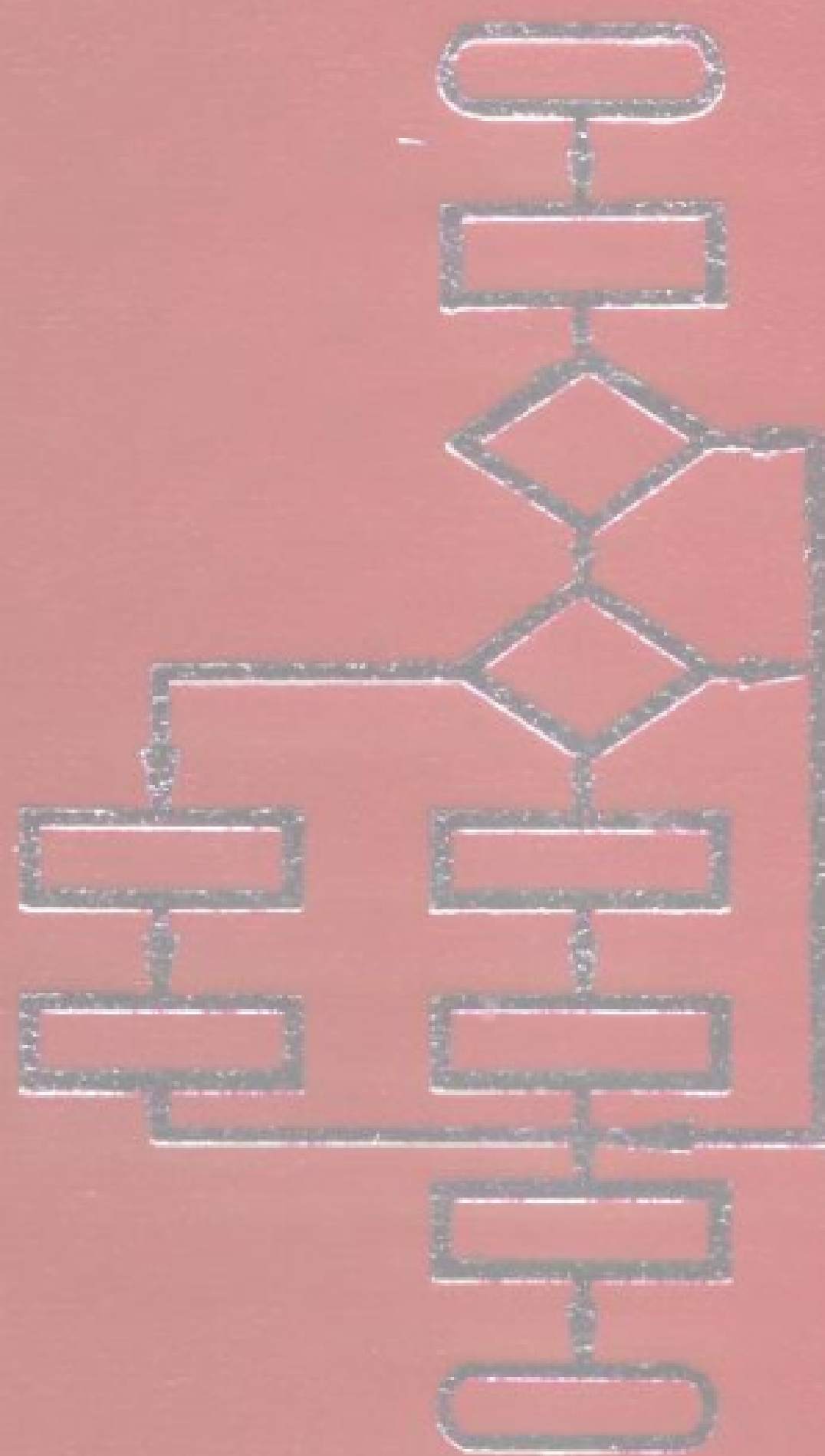


温度补偿晶体振荡器

吴培才 刘遵仁 胡国平 著



国防工业出版社

379921

温度补偿晶体振荡器

吴培才 刘进忙 胡国平 著



国防工业出版社

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

温度补偿晶体振荡器/吴培才等著. —北京:国防工业出版社, 1994

ISBN 7-118-01284-X

I. 温… I. 吴… II. 温度-补偿器-晶体振荡器
N. ①TK311②TN752.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 02544 号

温度补偿晶体振荡器

吴培才 刘进忙 胡国平 著

责任编辑 孙忠玉

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{7}{8}$ 228 千字

1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月北京第 1 次印刷 印数 1—2000 册

ISBN 7-118-01284-X/TN·202

定价:12.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘书长	刘琯德			
委员	尤子平	朱森元	朵英贤	
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟	
	何新贵	宋家树	张汝果	
	范学虹	胡万忱	柯有安	
	侯 迁	侯正明	莫梧生	
	崔尔杰			

前 言

温度补偿晶体振荡器广泛应用于通信、导航、雷达、移动通信、程控电话、测量仪表等电子设备中,作为其基准频率源。它是上述电子设备的关键部件,被称为此类电子设备的“心脏”。它的性能优劣对上述电子设备影响极大。因此国内、外对研制高性能的温度补偿晶体振荡器均十分重视。

随着现代科学技术的发展,对温度补偿晶体振荡器提出了越来越高的要求。为了提高温度补偿晶体振荡器的性能指标,科技工作者付出了巨大的心血,其研究成果在国内、外有关刊物上已作了大量报导,但出于各种原因,这些资料是很抽象、零碎的。国内尚未见到系统的论述温度补偿晶体振荡器的设计、装配、测试调整的专著出版。本书体现了作者多年的研究成果,系统地介绍了温度补偿晶体振荡器的原理、设计、测试调整方法。可供从事这方面工作的工程技术人员、工厂技术工作者、院校师生参考。

本书重点介绍 TCXO、MTCXO 温度补偿的原理、数学模型的建立、程序设计与测试调整方法。对其它温度补偿晶体振荡器也作了必要的介绍。第五章对温度补偿晶体振荡器的自动测量方法作了详细的叙述。

本书在著作过程中,得到领导和同志们的大力支持。中国科学院学部委员保铮教授、哈尔滨市副市长刘锡玉高级工程师、辽阳无线电厂宋文炳高级工程师对本书的著作给予热情的指导和帮助,提出了不少十分宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

本书由吴培才教授主著,并负责著第一章、第三章和对全书进行统修。本书第二章由胡国平著,第四、五章由刘进忙著。

由于作者水平有限,书中缺点和问题在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第一章 概述	1
§ 1.1 温度补偿晶体振荡器的技术指标	1
1.1.1 输出标称频率和频率精度	1
1.1.2 频率稳定度	2
1.1.3 温度频差	3
1.1.4 输出电压与电压幅度稳定度	3
1.1.5 二次谐波抑制	4
1.1.6 功耗	4
1.1.7 体积与重量	4
1.1.8 可靠性	4
§ 1.2 国内外晶体振荡器发展概况	5
1.2.1 石英谐振器及石英晶体振荡器发展简史	5
1.2.2 国内外高稳定度晶体振荡器的发展动态	7
1.2.3 国内外温度补偿晶体振荡器的发展动态	11
§ 1.3 石英晶体谐振器	16
1.3.1 晶体谐振器等效电路	16
1.3.2 温度补偿晶体振荡器对晶体谐振器的要求	20
§ 1.4 温度补偿晶体振荡器的基本原理	23
1.4.1 晶体振荡器的频率温度特性	23
1.4.2 补偿频率温度特性的基本原理	25
参考文献	28
第二章 模拟温度补偿晶体振荡器(TCXO)	29
§ 2.1 TCXO 的技术指标	29
§ 2.2 TCXO 的基本组成与原理	30

§ 2.3 TCXO 的设计	33
2.3.1 晶体振荡器电路设计	33
2.3.2 主要元件的设计	40
2.3.3 补偿网络型式的选定	56
§ 2.4 补偿网络参数的计算机优化计算	64
2.4.1 补偿网络参数计算的数学模型	64
2.4.2 补偿网络参数优化计算软件	70
§ 2.5 TCXO 的调试	98
第三章 数字温度补偿晶体振荡器	100
§ 3.1 数字式温度补偿晶体振荡器(DTCXO)	100
3.1.1 DTCXO 的基本原理	100
3.1.2 DTCXO 的设计	101
3.1.3 DTCXO 的设计举例	118
§ 3.2 微处理器温度补偿晶体振荡器(MTCXO)	138
3.2.1 MTCXO 的基本原理	138
3.2.2 MTCXO 的设计	139
第四章 其它型式的温度补偿晶体振荡器	190
§ 4.1 电容温度补偿晶体振荡器(CTCXO)	190
4.1.1 CTCXO 的工作原理	190
4.1.2 CTCXO 温度补偿数学模型的建立	191
4.1.3 实际电容参数的确定与实现	195
4.1.4 电容补偿的实现步骤	199
4.1.5 CTCXO 设计举例	199
§ 4.2 运放分段温度补偿晶体振荡器	201
4.2.1 运放分段温补的基本组成和原理	201
4.2.2 运放分段温度补偿电路的设计	203
4.2.3 运放分段温补的精度分析	204
4.2.4 分段温度补偿晶体振荡器的设计步骤	212
§ 4.3 SC 切晶体双模振荡型温补晶振	212
4.3.1 SC 切晶体谐振器	212

4.3.2	BC 双模振荡型温补晶振	214
4.3.3	双 C 模振荡型温度补偿晶体振荡器	216
	参考文献	218
第五章	温度补偿晶体振荡器的自动测量	219
§ 5.1	自动测量方法	219
5.1.1	影响快速测量 U_K-T 曲线的因素	219
5.1.2	各主要参数的测量与补偿	221
5.1.3	恒温点的选取	224
5.1.4	测量 U_K-T 和固定频率的方法	225
5.1.5	自动测量系统的主要功能	225
§ 5.2	锁相频率跟踪式自动测量方法	226
5.2.1	锁相式自动测量原理	226
5.2.2	锁相环路的设计	228
5.2.3	环路分析	234
5.2.4	精度分析	238
5.2.5	自动测量	238
§ 5.3	TCXO 自动测量系统的设计	238
5.3.1	温度补偿晶体振荡器测量系统的设计功能	239
5.3.2	温度补偿晶体振荡器测量系统的设计性能	239
5.3.3	设计温度补偿晶体振荡器测量系统需考虑的几个问题	239
5.3.4	总体结构设计	242
5.3.5	电路设计	243
5.3.6	程序设计	248
5.3.7	测量精度与测量时间分析	253
§ 5.4	数字温度补偿晶体振荡器自动测量系统的设计	254
5.4.1	频率数字跟踪式自动测量方法	254
5.4.2	DTCXO 自动测量系统的设计	260
5.4.3	MTCXO 自动测量系统的设计	265
	参考文献	270

第一章 概 述

§ 1.1 温度补偿晶体振荡器的技术指标

不同的工程使用,对晶体振荡频率源的技术性能要求不同。有的要求频率短期稳定度高;有的要求频率长期稳定度高;有的要求开机后在很短时间内即能稳定地工作;有的要求能抗很强的冲击与振动;有的要求压控频偏宽、压控线性好;有的要求体积小、耗电少。不言而喻,不同性能的晶体振荡频率源,满足着工程上不同的需要,都发挥着重要的作用。温度补偿晶体振荡器的频率短期稳定度与长期稳定度比恒温晶体振荡源低,但温度补偿晶体振荡器与恒温晶体振荡器相比,具有体积小、功耗低、价格廉、开机即可正常工作等优点,而温度频差比普通晶体振荡器要高1~3个数量级。因此,温度补偿晶体振荡器因能够满足很多电子设备对频率源的要求而得到广泛应用。温度补偿晶体振荡器的主要技术指标如下。

1.1.1 输出标称频率和频率精度

输出标称频率系指要求的标准频率。

频率精度是指晶振的实际工作频率与标称频率之间的偏差,其绝对频率精度与相对频率精度分别用式(1-1)、式(1-2)表达。

$$\Delta f = f - f_0 \quad (1-1)$$

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1-2)$$

式中 f 为实际工作频率; f_0 为标称频率。

晶体振荡器的频率精度主要取决于石英晶体谐振器的频率精度。例如某一100MHz的石英晶体谐振器的相对频率精度为 $\pm 20 \times 10^{-6}$,则绝对频率精度为 $\pm 2000\text{Hz}$ 。用这样的石英晶体谐振器制

作的温度补偿晶体振荡器其频率精度大约也为这一量级。若要求的频率精度较高,则应在石英晶体谐振器支路串接频率校正元件 L 、 C 或者 LC 串联谐振电路,将频率校准到要求的精度值。

1.1.2 频率稳定度

频率稳定度分为频率长期稳定度、频率短期稳定度与瞬时频率稳定度三种:

1. 频率长期稳定度。频率长期稳定度是指在一以上、一月、一年等时间间隔内频率准确度的最大变化值(亦即频率日波动、月波动、年波动等)。通常用相对频率稳定度 δ 表示

$$\delta = \frac{|f - f_0|_{\max}}{f_0} / \text{时间间隔} \quad (1-3)$$

例如某一标称频率为 5MHz 的温度补偿晶体振荡器,在一天之内测得的频率中,与标称频率偏离最大的一次为 4.999995MHz,则频率日最大变化值(日波动)为

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\Delta f_{\max}}{f_0} / d \\ &= \frac{|4.999995 - 5| \times 10^6}{5 \times 10^6} / d \\ &= 1 \times 10^{-6} / d \end{aligned}$$

用式(1-3)表示频率长期稳定度可信度低,因为任一突发干扰都会使这一数值变得较大。而用建立在大量观测基础上的统计值来表示频率长期稳定度比较合理。通常采用均方根值表示,即用在指定的时间间隔内测得的各频率准确度与其平均值之差的均方根值来表示^[1]:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\Delta f}{f_0} \right)_i - \left(\overline{\frac{\Delta f}{f_0}} \right) \right]^2} \quad (1-4)$$

式中 n 为测量次数; $\left(\overline{\frac{\Delta f}{f_0}} \right)$ 为 n 个测量数据的平均值。

2. 频率短期稳定度。频率短期稳定度是指时间间隔在一天之内的频率准确度的最大变化值(即波动值),此值可用式(1-3)计

算。同理,其统计值可用式(1-4)计算。

3. 频率瞬时稳定度。频率瞬时稳定度是指秒或毫秒内频率的随机变化,它是由晶体振荡器的“相位噪声”引起的。频率瞬时稳定度不能用式(1-3)计算,这是因为瞬时频率不能直接测定,只能测出频率在某一段时间内的平均值。也不能用式(1-4)计算,因为闪变噪声引起的频率不稳定其均方值可能是发散的。通常用阿仑方差来计算秒级频率瞬时稳定度,其计算式为

$$\sigma_y^2(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2n} \cdot \frac{1}{f_0^2} \sum_{i=1}^n (\Delta f_{i+1} - \Delta f_i)^2 \quad (1-5)$$

式中 τ 为每次测量的取样时间; n 为测量组数。

1.1.3 温度频差

温度频差是指在给定的温度变化范围内频率准确度的最大变化值(即频率波动),通常用相对温度频差 δ_T 表示

$$\delta_T = \frac{|f - f_0|_{\max}}{f_0} / \text{温度变化范围} \quad (1-6)$$

式(1-6)表征的是最坏情况下的温度频差,因为任何一个突发干扰都会使这一指标变得很差,显然这一温度的短暂反映是不能代表全貌的。故也应用建立在大量观测基础上的统计值来表征温度频差,即用在指定的温度变化范围内、按指定的温度间隔测得的各项频率准确度与频率准确度的平均值之差的均方根值来表示,其计算式与式(1-4)相同,区别在于将时间间隔换为温度间隔。

温度补偿晶体振荡器的温度频差当前在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 量级,人们正在向 10^{-9} 量级努力。

1.1.4 输出电压与电压幅度稳定度

输出电压:

$$\dot{U} = iZ \quad (1-7)$$

在调谐与匹配情况下,阻抗 Z 为纯电阻,流过 Z 的电流 i 与 $\dot{U}$ 同相,此时 $U = IR$ 。温度补偿晶体振荡器输出电压的有效值一般为 $0.3V \sim 2.5V$ 。

输出电压幅度稳定度与电源电压稳定度、温度变化范围等有

关。温度补偿晶体振荡器更关心温度变化对输出电压幅度的影响。在给定的温度变化范围内输出电压幅度相对稳定度 δ_U 为

$$\delta_U = \frac{\Delta U_{\max}}{U_0} / \text{温度变化范围} \quad (1-8)$$

式中 U_0 为室温(25℃)时的输出电压值。

一般要求在给定的温度变化范围内 δ_U 在 10% 左右。

1.1.5 二次谐波抑制

二次谐波抑制可用下式表示

$$L_F(\text{dB}) = 20 \lg \frac{U_{02}}{U_{01}} \quad (1-9)$$

式中 U_{02} 为输出之二次谐波电压; U_{01} 为输出之基波电压。

一般要求二次谐波抑制大于 30dB。当要求输出为良好之正弦波时,应尽可能提高电路的二次谐波抑制能力,这当然表明对三次以上的谐波分量具有更强的抑制能力。

1.1.6 功耗

温度补偿晶体振荡器的总功耗:

$$P = IE \quad (1-10)$$

式中 I 为直流电源供给的总电流,单位为安; E 为直流电源端电压,单位为伏。

温度补偿晶体振荡器的功耗在 $500 \times 10^{-3} \text{W} \sim 25 \times 10^{-3} \text{W}$ 左右,依温度补偿方式、电路类型及选用器件的不同差别很大。随着集成电路材料与技术的改进,功耗将会更小。

1.1.7 体积与重量

希望体积越小、重量越轻越好。

温度补偿晶体振荡器的体积在 $40 \times 40 \times 20 \text{mm}^3 \sim 25 \times 15 \times 10 \text{mm}^3$ 左右。重量在 140g ~ 40g 左右。

1.1.8 可靠性

可靠性是温度补偿晶体振荡器一个十分重要的指标。因为温度补偿晶体振荡器一旦发生故障,用户很难维修,即使排除了故障,一般是难以满足技术指标要求的,通常需送生产厂维修校准。

因此温度补偿晶体振荡器一般应按不可修部件计算无故障工作概率^[2],具体算法这里不再赘述。为了提高工作可靠性,除提高电路设计、装配工艺、调试质量外,可采用双工热备份方法来确保晶体振荡源 100%的处于可靠、稳定的工作状态。

§ 1.2 国内外晶体振荡器发展概况^[3,4]

1.2.1 石英谐振器及石英晶体振荡器发展简史

石英谐振器问世之前,电子产品主要用 LC 制作振荡器,其频率稳定度只能达到 10^{-4} 量级,远不能满足人们的需要。自 1880 年居里夫妇发现“压电效应”起,揭开了人类利用“石英稳频”的序幕。41 年后(1921 年)英国人 Cady 用 X 切 50kHz 晶体制成了世界上第一台晶体振荡器,频率稳定度为 10^{-5} 量级,比 LC 振荡器提高了一个数量级,将其用于无线电广播,播出了当时稳定度最高的无线电信号,引起了强烈反响。1927 年石英钟问世,当时把它作为“一级频率标准”,科学家依此发现了地球自转的不均匀性,结束了以地球自转为基础的“地球时钟”之历史使命。

石英谐振器的技术水平决定了石英晶体振荡器的水平。科技工作者为提高石英谐振器的技术性能付出了辛勤的劳动。1934 年德国的 Bechman、英国的 Lack 和日本的古贺几乎同时发现了具有优良温度频率特性的 AT 、 BT 切石英谐振器。1937 年后又相继研制出了 CT 、 DT 、 ET 、 FT 切石英谐振器。1940 年 Mason 发现了 GT 切小温度系数谐振器,这就为研制高稳定度的晶体振荡器打下了基础,用它制作的晶体振荡器其频率稳定度达 10^{-8} 量级而成为第二代“一级时间频率标准”。

1952 年英国贝尔实验室 Warner 研制成功 AT 切五次泛音的 5MHz、2.5MHz 高精密石英谐振器,其 Q 值达 $(2.5 \sim 5) \times 10^6$,用它制作的高稳晶体振荡器频率日稳定度达 10^{-10} 以上,这是晶体振荡器发展史上的又一个里程碑。

1961 年至 1974 年, Lagosec、Holland 等研制出了双转角 IT 、

RT、FC、SC 切谐振器。SC 切谐振器具有应力、温度双重补偿的优良性能,为研制高稳定度的晶体振荡器提供了可靠的物质保障。

近年来法国 Besancon 利用严密的工艺制成了无电极式谐振器(BVA 石英谐振器),它不存在电极膜应力老化影响,降低了表面损耗,故使 Q 值更高,用 AT 切 BVA 制作的高稳晶体振荡器其频率稳定度达 $5.4 \times 10^{-14}/128s$ 、老化率为 $5 \times 10^{-12}/d$ 。用 SC 切 BVA 制作的高稳晶体振荡器其频率稳定度会更高,估计 90 年代这类晶振的频率秒级稳定度可达 $10^{-14}/s$ 、老化率达 $5 \times 10^{-12}/d$,这个指标已达到当前原子钟的水平。可以说 SC 切 BVA 石英谐振器是当今世界上最优良的石英谐振器,它标志着晶体振荡器发展史上的第三个里程碑。

考查晶体振荡器的发展历史可以看出:

1. 石英谐振器的技术水平和性能指标决定着晶体振荡器的技术水平和性能指标,前者的设计水平与制造工艺技术的每一突破都为后者的性能指标带来一次飞跃。

2. 晶体振荡器的频率准确度大约每 20 年提高一个数量级。例如 1940 年为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$,1980 年为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$,估计 2000 年为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。晶体振荡器的频率稳定度大约每 10 年提高一个数量级,例如 1960 年研制水平为 $10^{-10}/(0.1 \sim 10)s$,少量产品为 $10^{-8}/(0.1 \sim 10)s$,大量产品为 $10^{-6}/(0.1 \sim 10)s$,1980 年在相同抽样时间内分别为 10^{-12} 、 10^{-10} 、 10^{-8} ,预计 2000 年分别达到 10^{-14} 、 10^{-12} 、 10^{-10} 。

3. 电子技术的发展,促进了晶体振荡器的发展,反过来后者又推动了前者的进步。

4. 半导体技术的发展、电子元件性能的提高促进了晶体振荡器性能的提高,为减小晶体振荡器的体积、降低功耗提供了可靠的保证。

5. 随着晶体振荡器性能的提高,要求测试计量设备的性能必须更高,这必然会促进测试计量设备的研制与生产。反之,只有具备高性能的测试计量设备,才能研制、生产出高性能的晶体振

荡器。

6. 研制、生产晶体振荡器的自动化测试设备,是提高晶体振荡器生产效率,保证其质量的必由之路。

1.2.2 国内外高稳定度晶体振荡器的发展动态

衡量高稳晶体振荡器技术性能优劣的主要技术指标为老化率、时域频率稳定度、频域稳定度、开机特性、温度频差、功耗、体积、重量、价格等。

一、国外高稳晶体振荡器的发展动态

国外已经定型生产的 1120S 型低噪声 5MHz 晶体振荡器、采用 SC 切 TO 封装石英谐振器的 HP-10811A/B 小型 10MHz 高稳定度晶体振荡器、采用 5 次泛音 AT 切 BVA 石英谐振器的 3601 型超高稳定度晶体振荡器、采用 5 次泛音 SC 切石英谐振器的超级稳定度低噪声 100MHz 晶体振荡器、SC 切 500MHz 甚高频高稳定度晶体振荡器、BT 切 1.5GHz 晶体振荡器,均具有较高的性能指标。表 1-1 列出了国外 70 年代末到 80 年代中期高稳定度晶体振荡器的主要技术指标,表中给出的典型频率为 5、10、100、500、1500MHz 五种。

表 1-1 国外 70 年代末到 80 年代中期高稳定度晶体振荡器的主要指标水平

主要指标名称	主要指标达到的水平
典型频率(MHz)	5、10、100、500、1500
日老化率	$2 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-12}/d$
年漂移	$5 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-9}/y$
时域稳定度	$(1 \sim 0.35) \times 10^{-12}/(1 \sim 100)s$
	$(1 \sim 3) \times 10^{-12}/(1 \sim 100)ms$