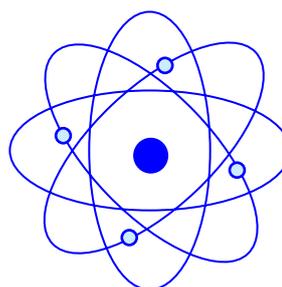
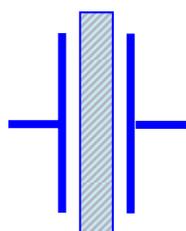


石英晶体谐振器和振荡器

用于频率控制和计时



(美) John R.Vig 著

王骥 胡文科 译

宁波大学压电器件技术实验室

原 序

为什么编这本教材

Einstein 曾说“凡事均应做得尽可能简单，而不只是比较简单”。本“教材”的主要目的是尽可能简单的介绍频率控制与计时中最常碰到的一些基本概念。

我经常被请求向精密振荡器的参观者、管理部门的领导和潜在用户作介绍，我也经常被邀请出席各种会议并参加对大学、电气与电子工程师协会和各种专业组的论文的评价工作。在开始时，我要花很多时间去准备材料，大多数时间均花在一些图表直观材料的准备上。随着积累的图表越来越多，材料的准备就变得越来越容易。

由于经常需要对这些图表进行“费力的复制”工作，我就开始编写和增加一些文字说明并填写在所收集图表的空白处。随着收集的图表逐渐增多，我开始接受建设性意见，同时需要进行更多的复制工作。显然，其他人员也发现这样的收集工作是有用的。最后我编写了这本“教材”。

这是一个不断发展的工作。我计划加入新材料，加入另外的发现。欢迎为将来的修订提出意见和建议。

目 录

第一章 应用和要求.....	4
第二章 石英晶体振荡器.....	12
第三章 石英晶体谐振器.....	23
第四章 振荡器的稳定度.....	41
第五章 石英材料的特性.....	89
第六章 原子频率标准.....	98
第七章 振荡器的比较和技术指标.....	111
第八章 时间和守时.....	117
第九章 相关器件和设备.....	128

第一章 应用和要求

石英晶体在电子学上的应用

军用和航天应用	工业应用	民用
通讯 导航 敌我识别系统 雷达 传感器 制导系统 引信 电子战 声纳浮标 研究和工艺 原子钟 仪器 天文学和大地测量 空间跟踪 天体导航	通讯 电视通讯 轻便式、分区式、手提式 无线电设备和电话 航空, 航海 导航 仪器 计算机 数字系统 阴极射线显示器 软盘 调制解调器 标签/标志 公用事业 传感器	手表和钟 无线电话 家用电话 无线电设备和高频设备 彩电 便携电视系统 家用计算机 VCR 和电视摄像机 业余无线电台 玩具和游戏机 起搏器 其他医用设备 自动化 引擎控制, 收音机, 钟 Trip 计算机, GPS

石英晶体器件市场

工艺	年产量	单价	全世界年交易额
石英晶体	~200 亿	~\$1 (\$0.1—3000)	~\$12 亿
原子频率标准			
氢钟	~10	\$200000	\$2 百万
铯射束的频率标准	~500	\$50000	\$2 千 5 百万
铷电池的频率标准	~60000	\$2000	\$1 亿 2 千万

导航

对于精确导航来说, 精确时间是最重要的。在历史上, 导航曾是人类研究更好时钟的主要动力。甚至在远古时代, 人们已能够通过观测星球的位置来测量纬度, 但是, 要确定经度, 这个问题就变成了计时问题了。由于地球旋转一周要花 24 小时, 所以人们能够根据当地的时间 (由太阳位置确定) 和格林威治子午圈的时间 (由某一时钟确定) 的时间差来确定经度。

$$\text{经度 } (^{\circ}) = (360^{\circ} / 24h) \times \Delta t(h)$$

在 1714 年,英国政府对第一个生产出能够测定 6 个星期航海 30 海哩的航船经度的时钟 (即准确度为每年 3 秒的时钟) 赏以 20000 英镑的奖金。英国人 John Harrison 于 1735 年成功的发明了天文钟而得到了这笔钱。

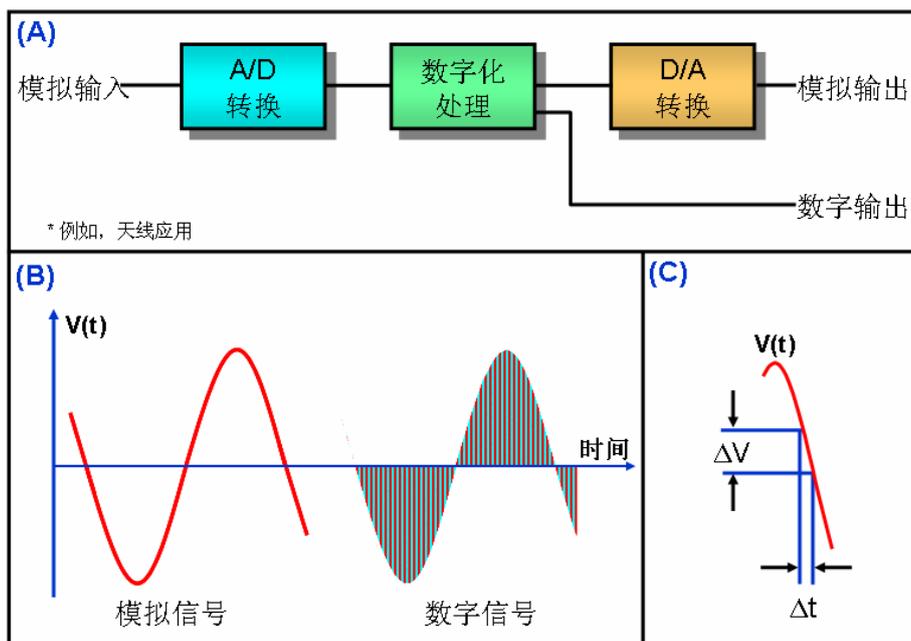
今天的电子导航系统还要求更高的精确度。由于光 (无线电波) 每微秒传播 300 米, 比如, 航船的计时误差为 1ms, 则导航误差为 300km。在全球定位系统中, 卫星中的原子钟和接收机中的石英晶体振荡提供纳秒级的精确度。最后的 (全球) 导航精确度大约为 10m (见第 8 章关于 GPS 的详细介绍)。

商用双路无线电台

过去, 由于商用双路无线电台用户数目的增长, 信道间隔已经变窄, 较高频率的频谱必须分配来适应这种需要, 由于发射机和接收机来说, 较窄的信道间隔和较高的工作频率均要求严格的频率容限。1940 年只有几千台商用广播电台的发射机投入使用, 500ppm 的容限就足够了。今天, 工作在 800MHz 以上的步话机, 必须保持 2.5ppm 的频率容限或更高。896~961MHz 和 935~940MHz 移动式无线电频带要求主站的频率容限为 0.1ppm, 而要求移动站的频率容限为 1.5ppm。

为了适应更多用户的需要, 对频率准确度的要求会越来越高。例如, NASA 正在研制使用步话机手持终端的个人卫星通讯系统, 该系统的上限频率为 30GHz, 下限频率为 20GHz, 信道间隔为 10KHz, 对终端频率的准确度的要求为 10^{-8} 。

模拟信号的数字处理



数字式网络同步

同步在数字式无线电中起着决定性作用。它能够保证以最小的缓冲上溢或下溢，即以允许的“滑动”电平进行信息传输。滑动产生的问题：在 FAX 传输中漏行，在声音传输和数据传输中丢失加密钥码。

在存取时间和定时（AT 和 T）网络中，均按节点层次进行定时分配。定时源与接收机之间的关系是建立在装有钟的数对节点之间。钟有四种类型和四个“等级”。

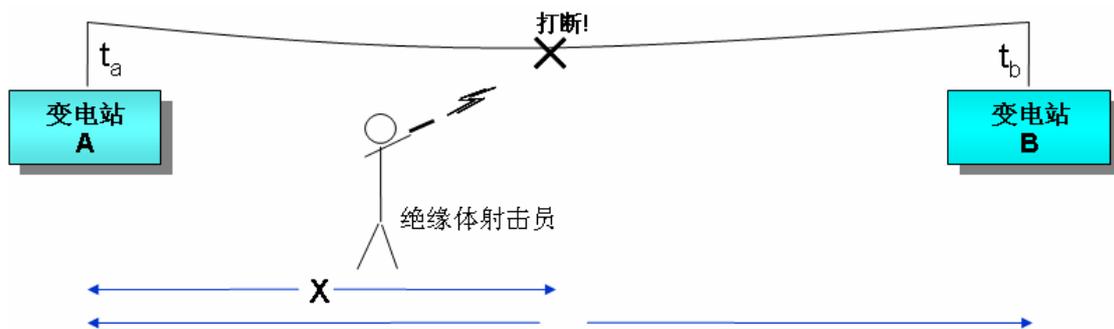
等级	准确度（自由振荡）		钟类型	使用数目
	长期	每第一天		
1	1×10^{-11}	N.A.	GPS 两台铷钟	16
2	1.6×10^{-8}	1×10^{-10}	铷钟或 OCXO	~200
3	4.6×10^{-6}	3.7×10^{-7}	OCXO 或 TCXO	1000
4	3.2×10^{-5}	N.A.	XO	~1 百万

锁相环（PLL）和相移键控（PSK）系统的相位噪声

振荡器的相位噪声有可能导致相位变换的错误检测，即在用相位键控法进行数字调制时产生误码。例如，在采用 8 相相移键控法进行数字通讯中，最大相位容限为 $\pm 22.5^\circ$ ，其中 $\pm 7.5^\circ$ 是可允许的典型载波噪声的贡献。例如，根据相位偏移的统计特性，如果均方相位偏移为 1.5° ，则超过 $\pm 7.5^\circ$ 的相位偏移的概率为 6×10^{-7} ，这在某些应用中能够引起很大的误码率。

冲击和振动甚至在“低噪声”振荡器中也能产生大的相位偏移。同时，振荡器的频率经 n 次倍频后，相位噪声也增大 n 倍。例如，在 10MHz 时， 10^{-3} rad 的相位偏移变成了在 10GHz 时的 1rad。这样大的相位偏差可能使依靠锁相环或相移键控法的系统完全失效。在上诉应用中，对加速度不敏感的低噪声振荡器是至关重要的。

利用故障定位



发生故障，即“运动员”射出一个绝缘体时，就会在线路下产生干扰。故障的位置就可

以根据到达的时间差来确定

$$X = 1/2[L - c(t_b - t_a)] = 1/2[L - c\Delta t]$$

式中：X—故障距 A 台的距离

L—A 台和 B 台之间的线路长度

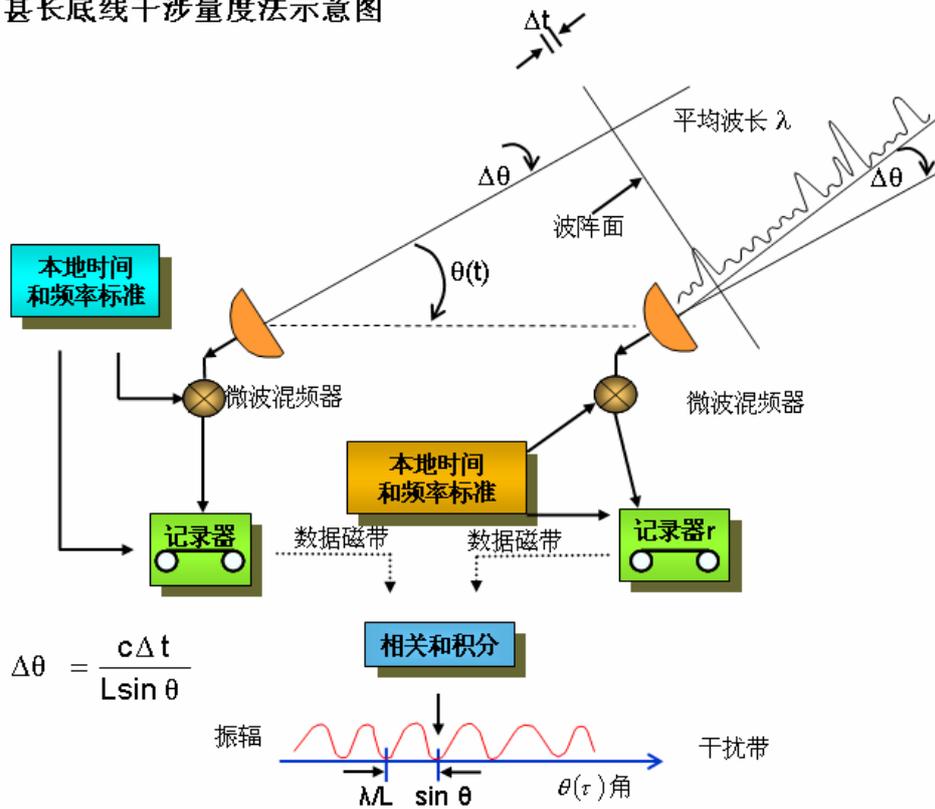
c—光速

t_a 和 t_b —干扰分别到达 A 和 B 的时间

故障定位者误差 X 误差=1/2(cΔt 误差)；如果 Δt 误差 ≤ 1ms，则 X 误差 ≤ 150m ≤ 高压电线支架间隔的 1/2。则公司可以把维修队直接送到离故障最近的支架上。

宇宙空间探索

甚长底线干涉量度法示意图



军用要求

军用要求是频率控制技术的主要动力。现代军用系统要求振荡器\钟具有以下的性能：

- 在多参数（时间，温度，加速度，辐射等）范围内能保持稳定
- 噪声低
- 功耗小
- 体积小

- 预热快
- 使用期消耗低

振荡器技术改进的效果

- 抗干扰能力较强和提高了隐藏信号能力；
- 提高了电子战能力（通过 TOA 测定发射机位置）；
- 提高对未被授权者拒绝其使用系统；
- 在数字通讯中误码率较低；
- 自主期（无线电静寂时间）较长；
- 提高了导航能力；
- 信号探测较快；
- 改善了在辐射环境中的生存能力和性能；
- 功耗底，以减小电池消耗；
- 改善了在高冲击应用中的生存能力和性能；
- 改善了频谱利用率；
- 寿命长，体积小，重量轻，价格低；
- 提高了监视（低移动目标检测）能力；
- 重新校准的时间间隔较长（后勤价格较低）。
- 改善了导弹的制导（舰载雷达与地面雷达）；
- 提高了敌我识别（IFF）能力；

频谱展宽系统

在频谱展宽系统中，发射信号是在比正在被发送的信息所要求带宽宽得多的带宽内加以展宽的（例如数千赫带宽的音频电路扩展到数兆赫）。这是用被发送的信息和用多种频率伪噪声编码信号对载波加以调制来实现的。具有相应伪噪声码的频谱展宽接收机能够调解并取出所发送的信息，没有伪噪声码的接收机也许完全漏掉信号，或者如果这些接收机检测出信号，则他们是以噪声形式出现的。

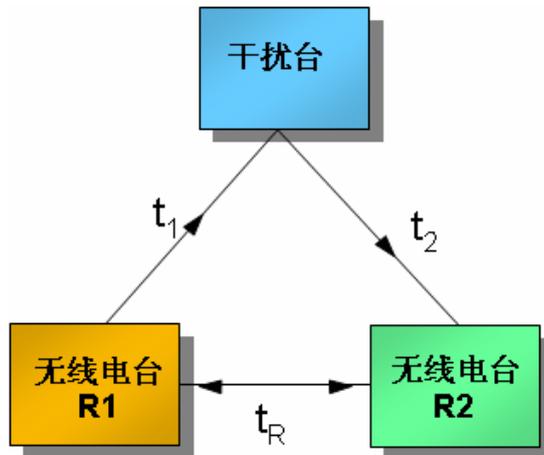
频谱展宽调制的类型有两种：1.用数字码序列调制载波的直接序列型。2.载波频率来回跳动的频率跳变型。在某一预定接收机中，频率顺序是通过编码程序来确定的。

发射机和接收机中的钟必须同步，即在频率跳变系统中，发射机和接收机在同一时间跳同一频率上。跳变的速率越快，抗干扰能力越强，钟就越准确。

频谱展宽系统的优点：

- 以致有意和无意的干扰；
- 窃听概率低；
- 可选择地址；
- 多路存取；
- 高准确度导航和测距。

快速跳频无线电台用时钟



要使“极好”的跟踪干扰台失去作用，要求跳频速率为

$$t_m < (t_1 + t_2) - t_R$$

式中： $t_m \approx$ 信息持续时间/跳变 $\approx 1/\text{跳变速率}$

例如：令 R1 至 R2=1km，R1 到 J=5km，J 到 R2=5km，则

传播延迟=3.3 $\mu\text{s}/\text{km}$

$t_1 = t_2 = 16.5 \mu\text{s}$

$t_R = 3.3 \mu\text{s}$ ，和 $t_m < 30 \mu\text{s}$

允许的钟误差 $\approx 0.2 t_m \approx 6\mu\text{s}$

对于 4 小时的同步时间，钟的准备度要求为 4×10^{-10} 。

钟和 C3 频率跳变系统

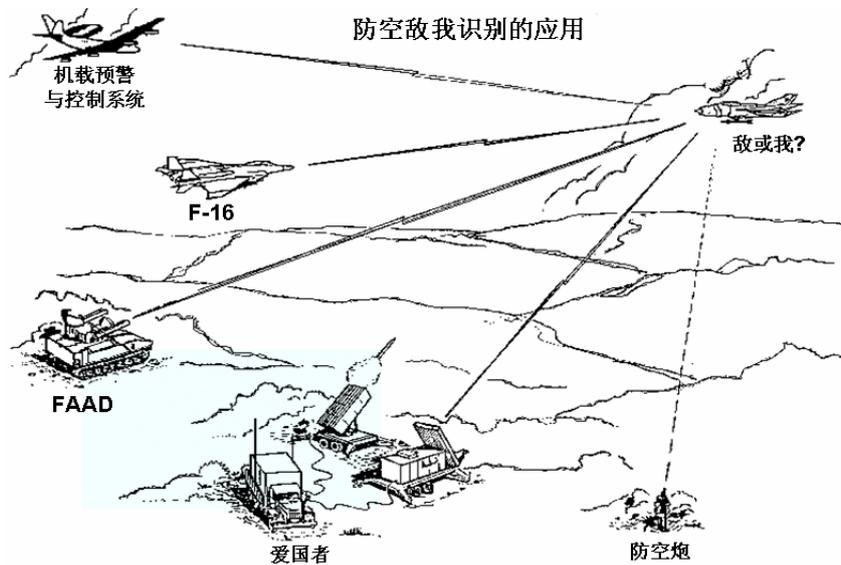
慢跳变	←-----→	好钟
快跳变	←-----→	较好的钟
延长无线电静寂时间	←-----→	较好的钟
延长校准间隔时间	←-----→	较好的钟
正交性	←-----→	较好的钟
互用性	←-----→	较好的钟

敌我识别 (IFF)

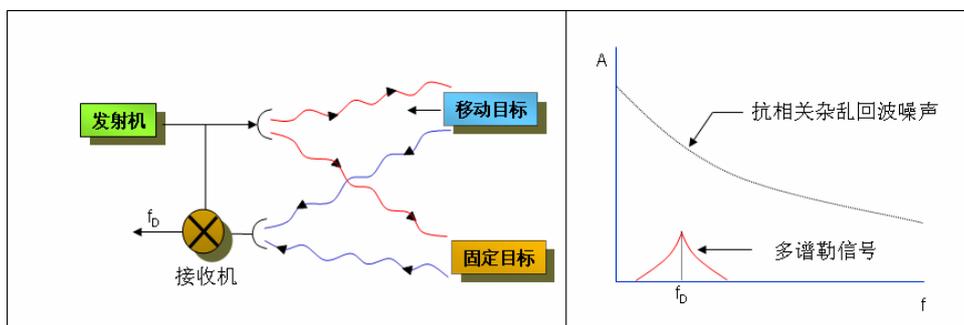
在现代化作战中，空中充满着敌我飞机和各种从地面和机载平台上发射的先进武器，所以可靠的敌我识别是极其重要的。例如，在 20 世纪所有战争中，由于识别错误所引起的自相残杀行为成了重要问题。

目前的敌我识别系统采用询问/应答的方法，这种方法使用编密码的展宽频谱信号。友方接受到的询问信号被认为是通过我方平台询问机自动送回“修正”码。此“修正”码必须经常改变，以防止敌方记录和发射作为我方的修正码（“重复干扰”），此编码的改变是在该编码真实间隔的末端。

钟的准确度越好，该码的有效间隔就可能越短，对重复干扰的抗干扰能力就越强，因此，对于不能在战斗钟使他们的钟重新同步的用户来说，自主的时间也就越长。



多谱勒雷达系统中噪声的影响



- 回波=移动目标的多谱勒频移回波+强的“杂乱回波”信号
- (回波信号) - (参考信号) --> 目标的多谱勒频移信号
- 本地振荡器的相位噪声调制 (抗调制) 回波信号，产生频率较高的回波分量，因此降低了雷达把目标信号和回波信号分开的能力。

收发分置雷达

照射机和接收机在同一平台的普通（比如收发合置）雷达容易受到各种反雷达装置的攻击，照射器和接收机相距很远的收发分置雷达能够大大降低反雷达装置，比如干扰和反辐射武器的攻击，因而能够通过“回波调谐”（利用接收器的移动来补偿照射器的移动，使得所探测区域产生的多谱勒频移为零）来提高对慢速移动目标的探测能力和识别能力。发射机可以设在距战场很远的掩体里，因此，接收机能够很“安静”。

关于定时和相位相干性绝对值大小的问题，收发分置雷达可能比收发合置雷达要求更严格，特别是在平台移动时。两参考振荡器必须保持同步，同时在飞行中要调谐来使得接收机知道发射机发射的每一个脉冲，并且相位变化要小到能够形成清楚的图象。因此对低噪声振荡器的短期稳定度有要求，而对原子频率标准通常是对长期稳定度有要求。

照射器



接收器



目标

多谱勒频移

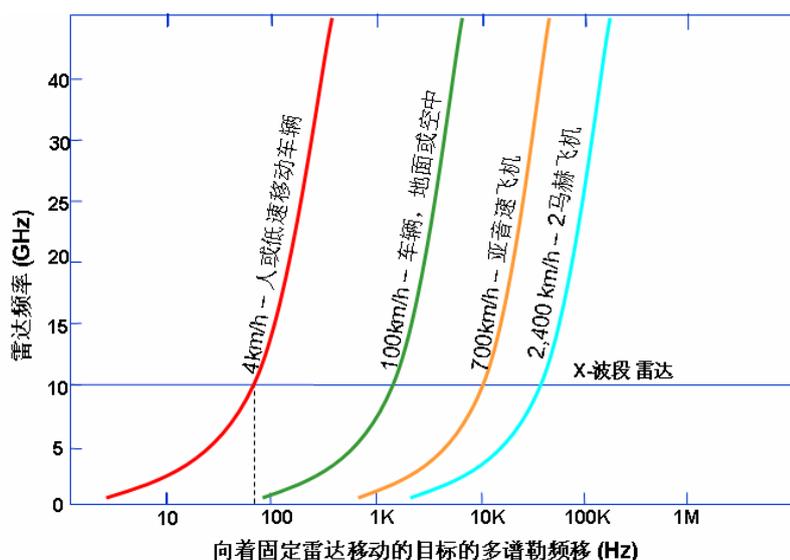
多谱勒雷达要求相位噪声低得振荡器。目标的速度和雷达的频率是决定振荡器要求的主要因素。例如，要能探测低速移动目标，靠近载波的噪声必须低。

一个物体的相对与观者的移动的多谱勒频移为 $\Delta f/f = 2v/c$ ， Δf 是多谱勒频移， v 是物体的速度， c 是光速。

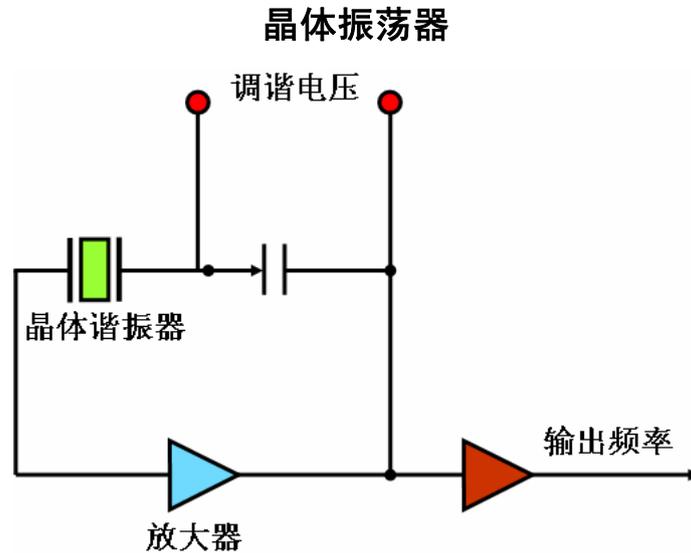
多谱勒频移例子

如果 $v = 4 \text{ km/h}$ 和 $f = 10 \text{ GHz}$ （即一个低速移动车辆通过一个 X 波段带宽的雷达）， $\Delta f = 74 \text{ Hz}$ ，即低相位噪声振荡器为了能够在雷达系统

上连贯的“看到”车辆载波在 74Hz 是必须的。



第二章 石英晶体振荡器



上图是经过简化的电路图并表明了石英晶体振荡器的基本组成元件。石英晶体振荡器中的放大器由至少一个驱动设备，偏压电阻并且可能包含其他用来限制带宽，阻抗匹配和增益控制的元件组成。反馈网络由石英晶体谐振器，和其他元件比如用来协调的可变电容等组成。

晶体振荡器特点

- 在振荡频率上，闭合回路的相移为 $2n\pi$ 。
- 当开始加电时，电路中唯一的信号是噪声。满足振荡相位条件的频率噪声分量以增大的幅度在回路中传输，增大的速率由附加分量，即小信号，回路增益和晶体网络的带宽决定。
- 幅度继续增大，直到放大器增益因有源器件（自限幅）的非线性而减小或者由于某一自动电平控制而被减小。
- 在稳定状态下，闭合回路的增益为 1。

振荡与稳定度

- 如果产生相位波动 $\Delta\varphi$ ，频率必然产生偏移 Δf ，以维持 $2n\pi$ 的相位条件。对于串联谐振振荡器， $\Delta f / f = -\Delta\varphi / 2Q_L$ ， Q_L 是网络中晶体的负载值 Q 值。“相位斜率” $d\varphi / df$ 是与靠近串联谐振频率的 Q_L 成正比的（见第三部分“等效电路”和“频

率与电抗的关系”。

- 大多数振荡器均工作在“并联谐振”上，电抗与频率斜率的关系 dx/df ，即“逆电容”是与晶体器件的动态电容 C_1 成反比的。
- 相对于振荡回路中的相位（电抗）波动的最高频率稳定度来说，相位斜率（或电抗斜率）必须最大，即 C_1 应当最小，而 Q_L 应当最大。石英晶体器件的高 Q 值和高逆电容，决定振荡器元件的基本频率（或频率稳定度）。

可调性和稳定度

要使振荡器谐调在宽的频率范围内，就会降低其稳定度，因为要使振荡器按要求进行调谐，同时也会使振荡器容易受不合要求的调谐因素影响。调谐范围越宽，就越难以保持高的稳定度。例如，如果设计 OCXO 的短期稳定度在某一平均时间为 1×10^{-12} ，而可调性为 1×10^{-7} ，则晶体的负载电抗在上述平均时间必须稳定在上 1×10^{-5} 。要获得这样的稳定度使困难的，因为影响负载电抗的因素有：寄生电容和电感、变容二极管的电容与电压特性的稳定度，以及加在变容二极管上的电压的稳定度。此外， 1×10^{-5} 的负载电抗稳定度不仅必须在开始条件下保持，而且在环境条件（温度、振动、辐射等）变化时，也必须保持。

同时，高稳定度 10 MHz 的恒温压控晶振的频率调整范围为 5×10^{-7} ，老化率为 $2 \times 10^{-8}/y$ ，而宽调谐范围的 10 MHz 压控晶振的调谐范围为 50 ppm，老化率为 2 ppm/y。

振荡器的缩写

经常使用的	其他
XO…………… 晶体振荡器	TCVCXO……………温度补偿压控晶体振荡器
VCXO……………压控晶体振荡器	OCVCXO……………恒温控制压控晶体振荡器
OCXO……………恒温控制晶体振荡器	MCXO……………微机补偿晶体振荡器
TCXO……………温度压控晶体振荡器	RbXO……………铷晶体振荡器

从历史上来说，在美国，军事上的需求已成为研究石英振荡器的主要推动力。特别是在早期美国军方资助大部分的研究。按照民间说法，缩写 XO 代替 CO 的主要原因是，在美国军队里，CO 是“指挥官”的缩写而且由于“crystal”听起来有点象“xtal”。（随后，有人指出，XO 是在军队中是“执行官”的缩写，但这以后，XO 是“石英振荡器”的缩写就逐渐被人接受）。

石英晶体振荡器的分类

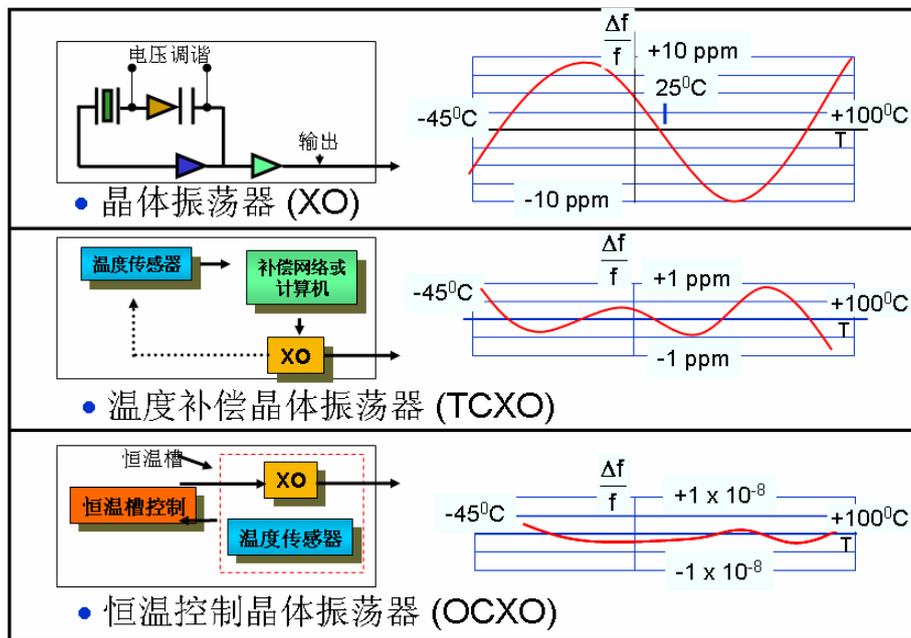
以晶体器件的频率温度特性来分类的三种晶体振荡器是：

- XO，晶体振荡器，这种振荡器没有能够降低晶体频率温度特性的器件（也称为密

封式晶体振荡器 PXO)。

- TCXO, 温度补偿晶体振荡器, 在这种振荡器中, 来自温度传感器 (热敏电阻) 的输出信号被用来产生校正电压, 加在晶体网络中的变容二极管上。电抗的变化用以补偿晶体的频率温度特性。模拟的 TCXO 在晶体的频率随温度变化的范围内能够提供大概 20 倍的改善。
- OCXO, 恒温控制晶体振荡器, 在这种振荡器中, 晶体和其他温度敏感元件均装在稳定的恒温槽中, 而恒温槽被调整到频率随温度的变化斜率为零的温度上。OCXO 能够在晶体频率随温度变化的范围内提供 1000 倍以上的改善。

晶体振荡器的分类



振荡器的等级

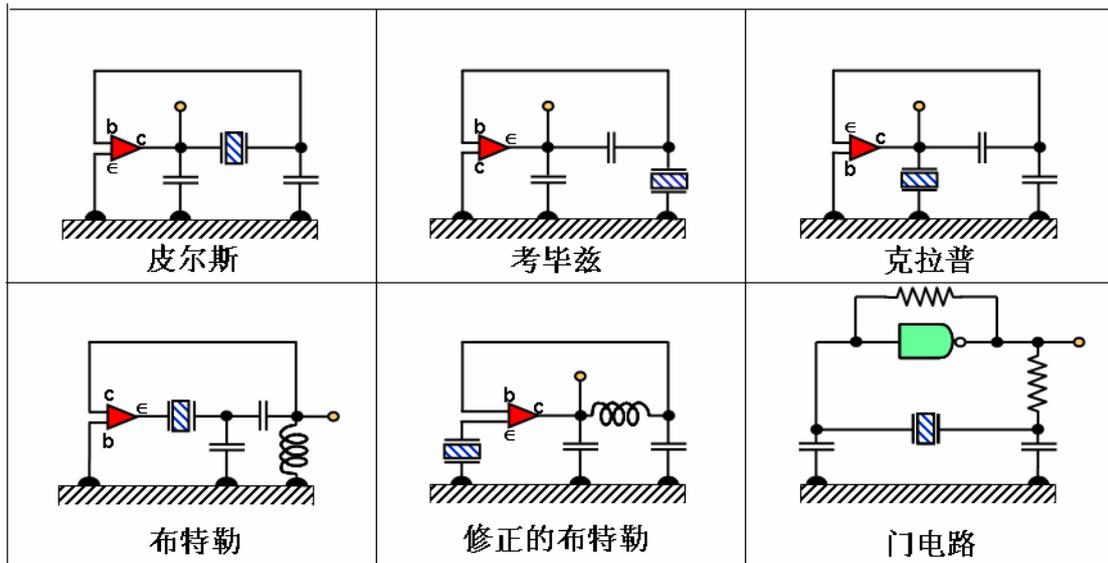
振荡器类型*	准确度**	典型应用
晶体振荡器(XO)	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁴	计算机定时
温度补偿晶体振荡器(TCXO)	10 ⁻⁶	在战术无线电传送中作频率控制
微机补偿晶体振荡器(MCXO)	10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁷	频谱展宽系统的时钟
恒温控制晶体振荡器(OCXO)	10 ⁻⁸	导航系统时钟和频率标准, MTI 雷达
小型原子频率标准(Rb, RbXO)	10 ⁻⁹	C ³ 卫星终端, 收发分置和多收发分置雷达
高性能原子频率标准(Cs)	10 ⁻¹² ~10 ⁻¹¹	战略 C ³ 、电子战

* 尺寸比时钟振荡小 5cm³, 比铯频率标准小 30L, 价格比时钟振荡器低\$5, 比铯频率标准高\$40,000

**包括周围环境的影响 (-40°C 到 75°C) 和一年的老化。

振荡器电路类型

在许多振荡器电路中，有三种常用的振荡器电路，它们是皮尔斯振荡电路，考毕兹振荡电路和克拉普振荡电路。这些振荡电路除了频射接地点位置不同外，电路的构成都是相同的。布特勒和修正的布特勒振荡电路也是彼此相似的，每一种电路中的发射极电流就是晶体的电流。门电路振荡器是皮尔斯型的，它使用了一个逻辑门并在皮尔斯振荡器的晶体管位置加了一个电阻。（某些门电路振荡器使用一个以上的门电路。）



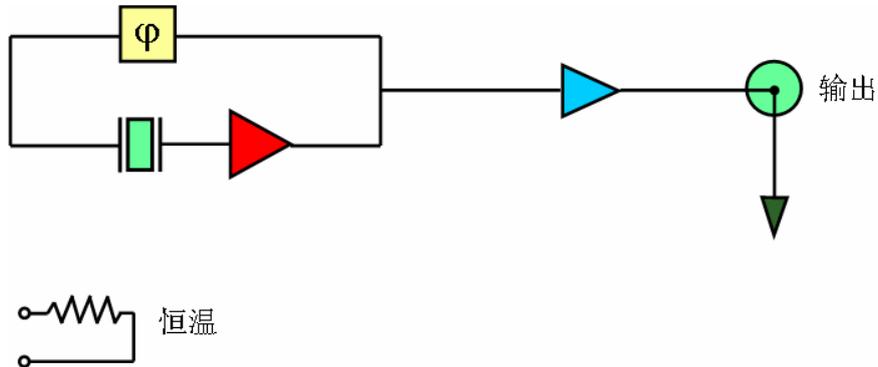
振荡器电路类型的选择取决于以下因素：所要求的频率、稳定度、输入电压和功率，输出功率和波形、可调性、设计的复杂性、成本和晶体器件的特性。

在皮尔斯系列中，接地点位置对性能有很大的影响。皮尔斯电路的接法相对于寄生电抗和偏置电阻来说，一般要好于其他几种电路，因为它们多半是跨接在电路的电容器上，而不是跨接在晶体器件上。它是高稳定度振荡器应用最广泛的电路之一。在考毕兹电路的接法中，较大部分寄生电容出现在晶体的两端，同时偏置电阻也跨接在晶体上，这就会降低性能。克拉普电路的接法很少使用，因为集电极直接于晶体连接，这就很难将直流电压加在集电极上而不引入损耗或寄生振荡（更详细的内容，见参考文献）。

虽然皮尔斯系列可以通过把电感与晶体串联起来使它工作在串联谐振上，但是它一般还是工作在“并联谐振”上（参见第3部分电阻频率与电抗的关系）。布特勒系列通常工作在（或接近）串联谐振上，皮尔斯系列可以被设计用来使晶体电流高于或低于发射极电流情况下进行工作。

当高稳定性不是主要考虑的问题时，门电路振荡器是数字系统的常用电路。

OCXO 型简要示意图



每一种 OCXO 都主要由三部分组成，即石英晶体，持续电路和恒温，他们都会引起不稳定。不同情况下的不稳定将会在第 3 章余下的部分和第 4 章中讨论

振荡器的不稳定性——通常表达式

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{oscillator}}} \approx \frac{\Delta f}{f_{\text{resonator}}} + \frac{1}{2Q_L} \left[1 + \left(\frac{2f_f Q_L}{f} \right)^2 \right]^{-1/2} d\phi(f_f)$$

这里的 Q_L 是谐振器受到的载荷 Q ， $d\phi(f_f)$ 是在闭合电路发生小变化后，远离信号频率 f 的偏移频率 f_f 相位。系统的相位变化和闭合电路中的相位噪声来自于谐振器或持续电路。取 Q_L 的最大值能有效减小噪声的影响和由于环境引起的持续电子装置的改变。在一个实际的振荡器设计中，谐振器在偏移频率影响下的短期不稳定性比谐振器的半带宽要小，且由于持续电路和从闭合电路中大量能量的的传送会引起更大的偏移。

持续电路引起的不稳定性

负载电抗变化—增加一个负载电容到晶体上来改变频率，设

$$\mathcal{F} \equiv \frac{\Delta f}{f} \cong \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

则

$$\frac{\Delta(\mathcal{F})}{\Delta C_L} \cong -\frac{C_1}{2(C_0 + C_L)^2}$$

例如：如果 $C_0=5\text{pF}$ ， $C_1=14\text{pF}$ ， $C_L=20\text{pF}$ ，则 $\Delta C_L=10\text{pF}(=5 \times 10^{-4})$ 引起约 1×10^{-7} 频率变化，而 C_L 老化率是每天 10ppm 使得振荡器的老化率为每天 2×10^{-9}

激励电平变化：对于 10MHz 的 3 次泛音 SC 切，一般每毫安平方 10^{-8} 。

晶体的直流偏压也能引起振荡器的老化。

调谐电路引起的不稳定性

许多振荡器包含调谐电路比如匹配电路和滤波器，为了防止不必要的模式。在调谐电路里的感应系数和电容量在小变化后的影响由下给出

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{oscillator}}} \approx \frac{d\phi(f_f)}{2Q_L} \approx \left(\frac{1}{1 + \frac{2f_f}{\text{BW}}} \right) \left(\frac{Q_C}{Q} \right) \left(\frac{dC_C}{C_C} + \frac{dL_C}{L_C} \right)$$

这里的 BW 式滤波器的带宽， f_f 是滤波器相对于中心频率的偏移频率， Q_L 是谐振器上的载荷 Q， Q_C ， L_C 和 C_C 分别是调谐电路的 Q 值，感应系数和电容量。

电路噪声引起的不稳定性

由持续电路中闪变 PM 噪声 引起的闪变 FM，对振荡器的输出频率有着一定的影响

$$L_{\text{osc}}(f_f) = L_{\text{ckt}}(1\text{Hz}) \frac{f^2}{4f_f^3 Q_L^2} \quad \text{和} \quad \sigma_y(\tau) = \frac{1}{Q_L} \sqrt{\ln 2 L_{\text{ckt}}(1\text{Hz})}$$

这里的 f_f 是载波频率 f 的偏移频率， Q_L 是振荡器电路上的载荷 Q， $L_{\text{ckt}}(1\text{Hz})$ 是 $f=1\text{Hz}$ 时的闪变 PM 噪声， τ 时任意测量时间内的闪变基底范围。对于 $Q_L=10^6$ 和 $L_{\text{ckt}}(1\text{Hz}) = -140\text{dBc/Hz}$ ， $\sigma_y(\tau) = 8.3 \times 10^{-14}$ 。（ $L_{\text{ckt}}(1\text{Hz}) = -155\text{dBc/Hz}$ 已经能够实现。）

外载荷引起的不稳定性

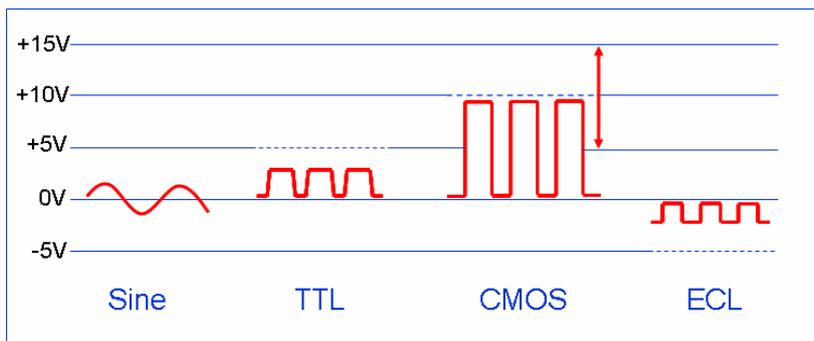
如果外载荷发生变化，反馈到振荡器的振幅或相位也会随着改变。到达振荡回路的一部分信号改变了振荡器的相位，因此频率变成：

$$\frac{\Delta f}{f_{\text{oscillator}}} \approx \frac{d\phi(f_f)}{2Q} \approx \left(\frac{1}{2Q} \right) \left(\frac{\Gamma - 1}{\Gamma + 1} \right) (\sin\theta) \sqrt{\text{isolation}}$$

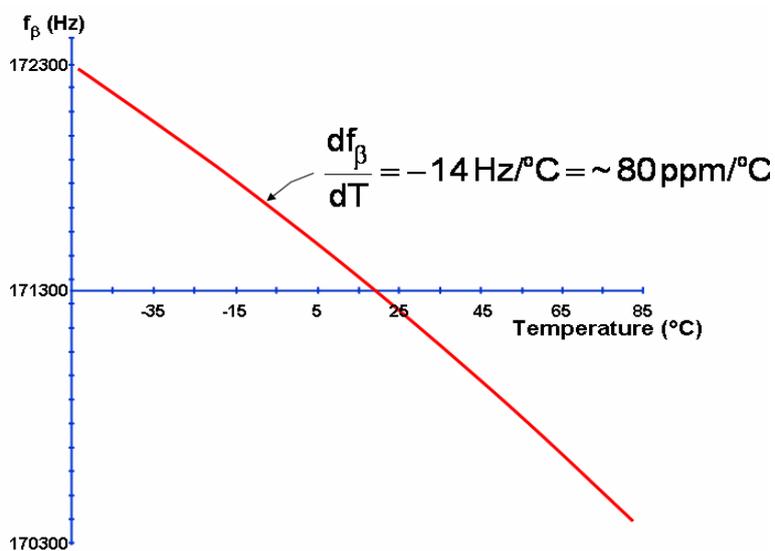
这里 Γ 是载荷的电压驻波， θ 是反射波的相位角。

振荡器的输出

大多数用户要求正弦波输出，或者 TTL 兼容，或者 CMOS 兼容，或者 ECL 兼容输出。后三种输出都可以正弦波产生。现在对 4 中输出类型说明如下。虚线表示输入电压，实线表示输出。对于正弦波振荡器来说，对于正弦波振荡器没有“标准的”输入电压。CMOS 的输入电压一般为 1~10V。

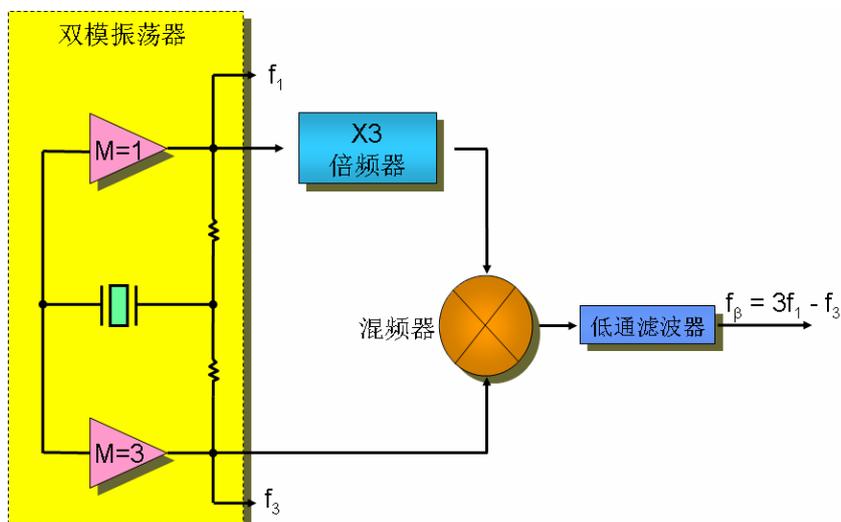


振荡器的温度自测



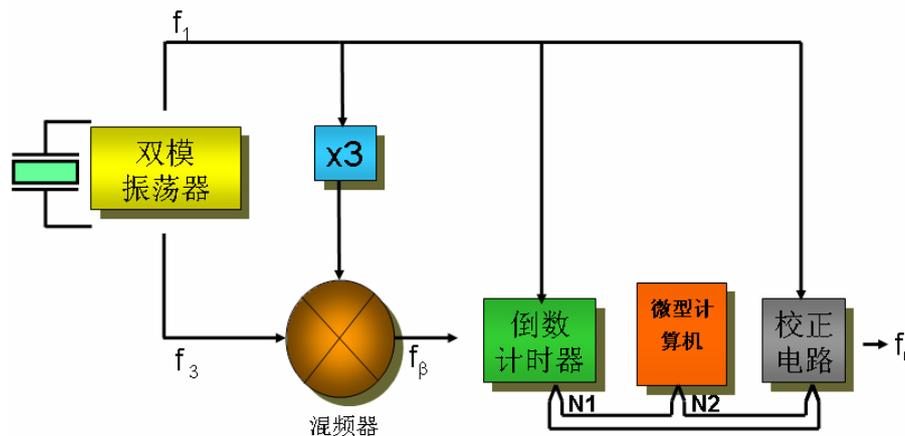
f_β 是振荡器正在振荡时的振荡器温度，因此除了振荡还要消除温度计的需要。因为 SC 切型的热瞬时补偿，热瞬时效应也被消除，就象温度计和谐振器之间的温度梯度的效应。

热拍频率的产生



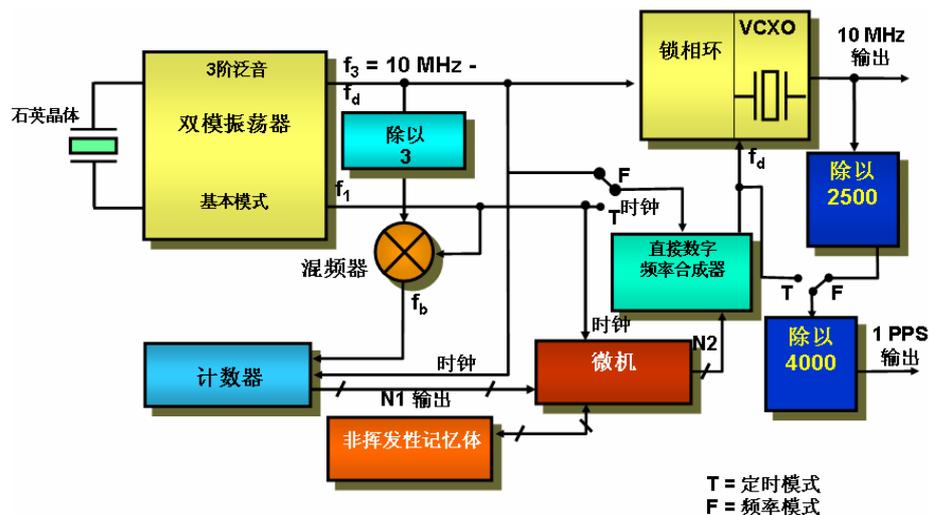
微机补偿石英振荡器使用高稳定性的 10MHz Sc 切型石英晶体谐振器和双模振荡器，这能同时激发谐振器的和 3 次泛音模式。拍频率可以是基频模式乘 3 然后减去 3 次泛音频率，如图所显，或者 3 次泛音频率除 3，这样得到拍频率 $f_{\beta} = f_1 - f_3/3$ 。如前图所式，拍频率是单调的并且几乎是温度的线性函数。它提供了一个高精度，数字显示的振动范围的温度，因此就不需要外加的温度计。

微机补偿晶体振荡器



微机补偿晶体振荡器频率相加方法

结构图

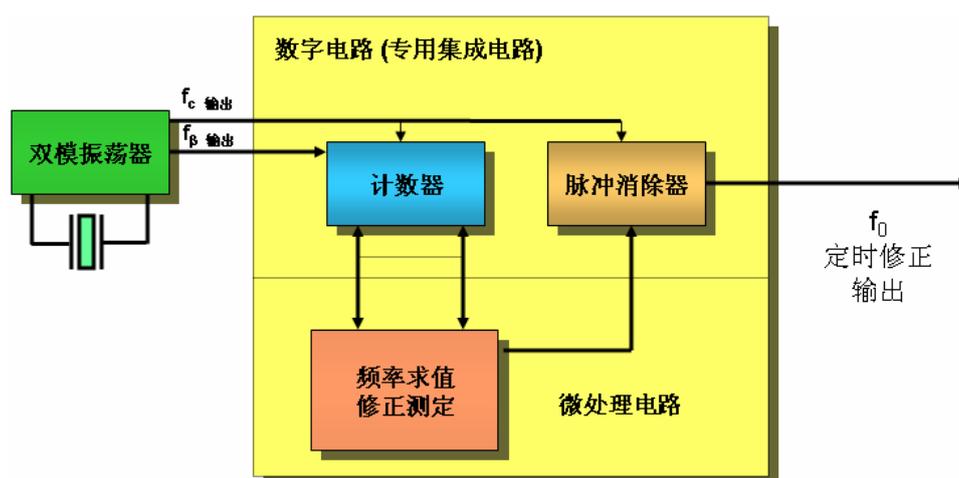


在频率叠加方法中，直接数字频率合成器（DDS）基于 N2 产生一个校正频率 f_d ，从而在所有温度情况下 $f_3 + f_d = 10\text{MHz}$ 。相位锁定回路把电压控制晶体振荡器的频率精确的控制 在 10MHz。

在“频率模式”中，1PPS 的输出是从 10MHz 除以一些数得到的。在能量守恒的“调速

方式”中，1PPS 是直接由 f_3 驱动直接数字频率合成器，并通过使用不同的校正公式产生的。锁相环和一部分数字电路被关闭。在校正的同时，微处理器准备“休眠”，并且定时被延长来减少能量的需求。

微机补偿晶体振荡器——脉冲消除方法

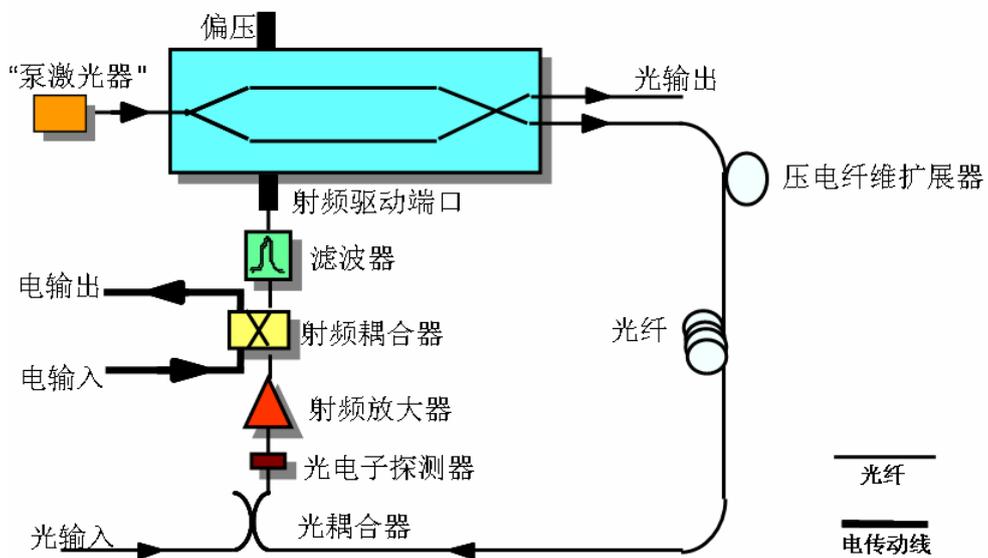


在脉冲消除方法中，SC 切型的谐振器频率要稍微高于输出频率 f_0 。比如，如果 f_0 为 10MHz，则 SC 切型谐振器的频率在设计的温度范围内都要略高于 10MHz。双模振荡器提供两种输出信号，其中之一 f_β 为谐振器的温度指标。信号均由微机进行处理，它根据 f_β 来确定对 f_c 的必要修正，然后从 f_c 中减去所需要的脉冲数，以得到校正输出 f_0 。在适时修正间隔 (~ 1 s) 内不能减去的小部分脉冲被用作进位脉冲，所以长期平均值在 $\pm 2 \times 10^{-8}$ 设计准确度内。PROM 中的校正数据对每个晶体来说都是唯一的，并且根据 f_c 和 f_β 输出信号的精密温度特性获得的。已校正的输出信号 f_0 能够再分频，来产生 1pps 的时间参考或能够直接用来驱动时钟。由于在脉冲消除过程中产生了有害的噪声，必须对附加信号进行处理，以提供用于频率控制的有用射频输出。例如，可以通过锁定 VCXO 的频率 f_0 把 MCXO 的频率准确度传递给另一个低噪声低成本压控晶体振荡器 (VCXO) 来完成这项工作。

微机补偿晶体振荡器——温度补偿晶体振荡器比较

参数	微机补偿晶体振荡器	温度补偿晶体振荡器
切型及泛音	SC 切型 3 阶	AT 切型 1 阶
允许切角误差	大	小
金属封装误差	大	小
入射倾角	次要	重要
滞后现象(-55 ⁰ C 到 +85 ⁰ C)	10^{-9} 到 10^{-8}	10^{-7} 到 10^{-6}
年老化率	10^{-8} 到 10^{-7}	10^{-7} 到 10^{-6}

光电子振荡器



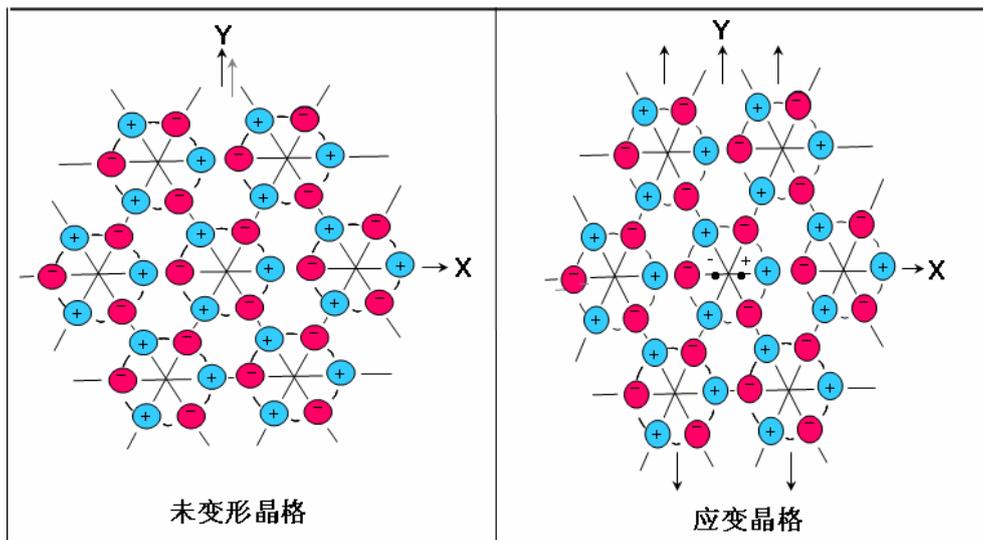
第三章 石英晶体谐振器

为什么叫石英？

石英是具有以下一系列特性的唯一材料：

- 压电特性（“压力—电的特性”）
- 具有零温度系数切型
- 具有应力补偿切型
- 低损耗（即高 Q 值）
- 容易加工。在任何物质中的可溶性低，除了氟化物的腐蚀外，在“正常”条件下，坚硬而不易碎
- 在自然界中很丰富，易于大量生长，成本低，纯度和完整性均较高。在人工生长的单晶石英中，年产量在 3000 吨以上，生长数量仅次于硅（到 1997 年为止，年增长是硅的 3 到 4 倍）。

压电效应



压电效应表明了石英晶体的力学性质和电学的耦合。

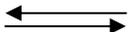
直接压电效应由居里兄弟在 1880 年发现的。他们指出，当把一重物放在一石英晶体上时，在晶体表面上出现了电荷，电荷量和重物的质量成正比。1881 年，用图解说明了反压电效应；当把电压加到晶体上时，由于压电效应引起的晶格应变而使晶体产生变形。当把电压反向时，应变也反向。因此，压电效应起到了电路与晶体机械特性之间的耦合作用。在适当条件下，“良好”的压电谐振器能够对振荡器电路起稳频的作用

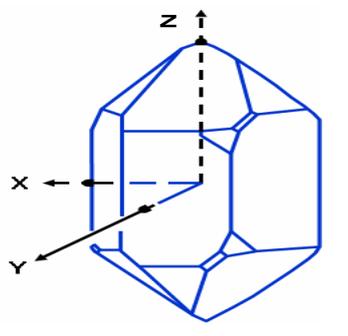
在 32 种晶体中，有 20 种具有压电效应（但在 20 种中，只有很少几种有用）。压电晶体

没有对称中心，当力使晶格形变时，晶体中正负电荷的重心可能被分开而产生表面电荷。图中所示为晶体压电效应的一个例子（根据 Kelvin 的定性模型）。每个硅原子用+号表示，每个氧原子用-号表示。当受到应变而使晶体沿 Y 方向伸长时，负电荷就向左移动，而正电荷就向右（沿 X 轴）移动

当石英晶体有对称中心，即石英晶体时各向同性时，就不会产生压电效应。然而电致伸缩存在于所有的电介质固体中。在应用电场中的二次变形（尽管压电效应是线性的；随着电场的反转，变形也会反转）偏电致伸缩，弱电场的变化重叠于恒定分量，这个现象与线性压电等价；这个技术能被用于非压电石英晶体，例如硅，但耦合依赖于偏轴。

压电效应

应变		沿场方向		
		X	Y	Z
 延伸方向	X	√		
	Y	√		
	Z			
 切变	X	√		
	Y		√	
	Z		√	

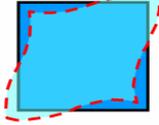
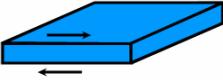
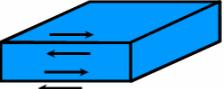


在石英中，五种应变分量均由电场产生。下面所示模型可以由适当位置和形状的电极所激励。由场 Y 分量产生的相对与 Z 轴的切应变可应用与 AT、BT 和 SC 切的旋转 Y 切系列。

压电效应是线性的。电场的反转引起应变的反转，例如机械变形。

机电（也叫压电）耦合系数 k 是压电材料的一个重要特性； k 的范围在 0 和 1 之间，并且是无量纲的，即对于 AT 切石英晶体 $k=8.8\%$ ，而 SC 切石英晶体 $k = 4.99\%$ 。这个系数能确定压电转换功效，并且是重要设备的决定性因素，比如滤波器带宽，介入损失，定位和谐振器临界频率的间隙（即连续谐振到反共振频率间隙）。

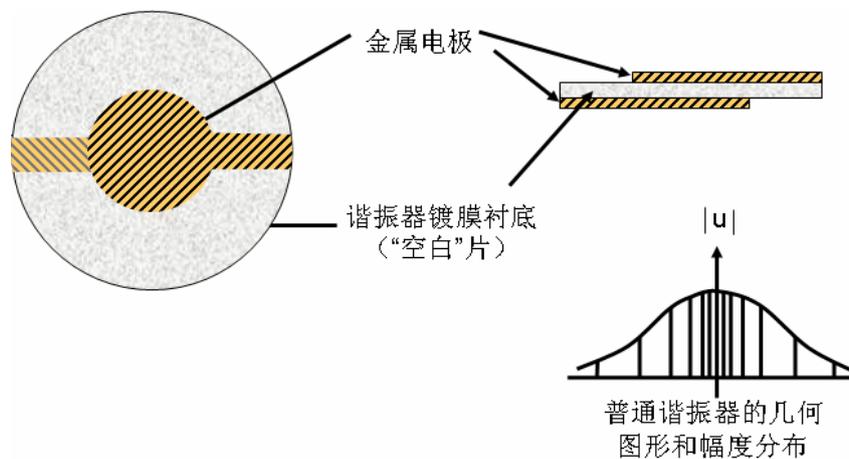
运动模式

 弯曲模式	 延伸模式	 面切变模式
 厚度剪切模式	 基模厚度切变	 三次泛音厚度切变

上图是体波（BAW）的运动模式。例如，AT 切和 SC 切谐振器是厚度剪切振动模式。在高于 100MHz 时，泛音部件经常被用于有选择的谐波振动模式（比如三阶泛音或五阶泛音）。高于 100MHz 的基谐波部件可以由化学抛光（扩散控制湿法腐蚀），等离子腐蚀和离子研磨技术。在低于 1MHz，可以用来做音叉，X-Y 和 NT 删（弯曲模式），X 切（延伸模式），CT 切和 DT 切模式（面切变模式）部件。由于音叉尺寸小和便宜，使其在低频部件中占有优势。

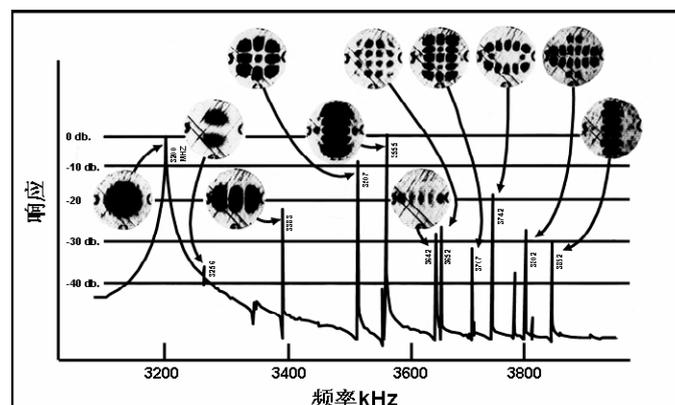
声波在固体中传播的速度一般为 3000m/s（光速的 10^{-5} 倍）。比如，在 AT 切石英晶体中剪切波在沿剪切方向传播的速度为 3320m/s；基谐波频率为 $v/2h$ ，其中 v 是声波的速度， h 是板的厚度。（板的厚度为半波长。）

谐振器振动幅度的分析



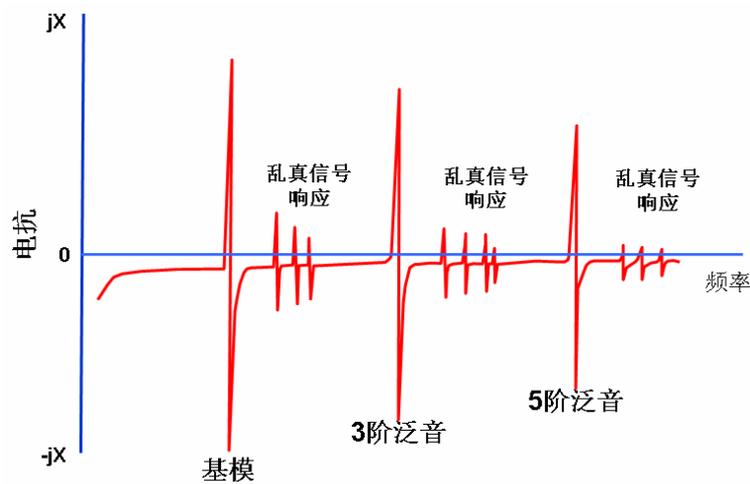
在理想的谐振器中，振动幅度在电极表面呈指数衰减。在经过适当设计的谐振器中，振动能量可以忽略不计，不再受装架和焊接结构的影响，即边缘必须固定不动，以便谐振器能够具有高 Q 值。谐振器表面点的位移是与激励电流成正比的。在厚度剪切谐振器中(10MHz)所使用的典型激励电流，最大位移只有几个原子的间距。

石英片的谐振振动



基模圆形 AT 切谐振器频率扫描中被激励的各种模式的 X 射线光谱形貌图 (2I. 0 面)。3.2MHz 处的第 1 个峰值是主模，所有其他模均为寄生模。黑色面积相当于位移大小。

石英谐振器的泛音响应

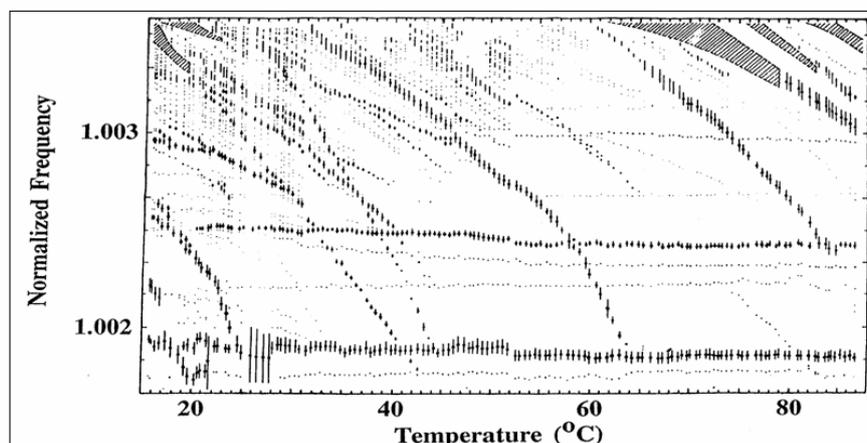


上图显示了石英谐振器的模式谱，包括基模，三阶泛音，5 阶泛音和一些乱真信号响应，即寄生模。在振荡器应用上，振荡器总是选择最强的模式工作。一些干扰模式有急剧升降的频率-温度特性。有时候，当温度发生改变，在一定温度下，寄生模的频率与振荡频率一致，这导致了“活动性下降”。在活动性下降时，寄生模的激励引起谐振器的额外能量的消耗，导致 Q 值的减小，等效串联电阻增大及振荡器频率的改变。当阻抗增加到相当大的时候，振荡器就会停止，即振荡器失效。当温度改变远离活动性下降的温度时，振荡器又会重新工作。

寄生模能有适当的设计和封装方法控制。不断修正电极与晶片的尺寸关系（即应用能陷原则），并保持晶片主平面平行，这样就能把寄生模最小化。

寄生模与温度的关系

(3MHz 矩形 AT 切谐振器， $22 \times 27 \times 0.552\text{mm}$)



寄生模的频率温度曲线与主模的频率温度曲线相交处产生活动性下降。这样的活动性下降对于激励电平和负载阻抗很敏感。

这个图表显示了 AT 切石英晶体谐振器寄生模的频率—温度特性。温度系数范围上限为 -91ppm/°C。适当的设计能够把寄生模最小化。

石英谐振器的数学描述

在压电材料中，电流和电压与弹性位移和应力的耦合

$$\{T\} = [c] \{S\} - [e] \{E\}$$

$$\{D\} = [e] \{S\} + [\epsilon] \{E\}$$

式中：

$\{T\}$ = 应力张量， $[c]$ = 弹性刚度矩阵， $\{S\}$ = 应变张量， $[e]$ = 压电矩阵

$\{E\}$ = 电场矢量， $\{D\}$ = 电位移矢量， $[\epsilon]$ = 介电矩阵

对于线性压电材料

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & -e_{11} & -e_{21} & -e_{31} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & -e_{12} & -e_{22} & -e_{32} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} & -e_{13} & -e_{23} & -e_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} & -e_{14} & -e_{24} & -e_{34} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} & -e_{15} & -e_{25} & -e_{35} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} & -e_{16} & -e_{26} & -e_{36} \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} & \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} & \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} & \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}$$

式中：

$$\begin{array}{ll} T_1 = T_{11} & S_1 = S_{11} \\ T_2 = T_{22} & S_2 = S_{22} \\ T_3 = T_{33} & S_3 = S_{33} \\ T_4 = T_{23} & S_4 = 2S_{23} \\ T_5 = T_{13} & S_5 = 2S_{13} \\ T_6 = T_{12} & S_6 = 2S_{12} \end{array}$$

石英的电弹性矩阵

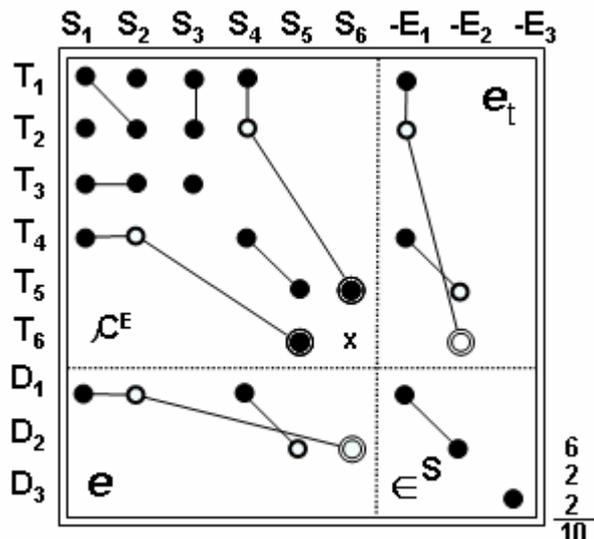
除了各主斜线完全相易，其它各线连接数值方程。

○表示●的负值

◎表示数值方程的两倍

×表示 1/2 (C₁₁ - C₁₂)

独立的非零常数的数量取决于晶体的对称性。对于石英(三角晶系, 32 中晶类),



有 10 个独立的线性常数：6 个弹性常数，2 个压电常数和 2 个介电常数。这些“常数”均与温度、应力、坐标系有关。

为了描述谐振器的性能，必须在晶片表面相当的电和机械边界条件下连续求解牛顿运动定律和麦克斯韦微分方程*

$$F = ma \Rightarrow \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} = \rho \ddot{u}_i; \quad \nabla \cdot \bar{D} = 0 \Rightarrow \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$E_i = -\frac{\partial \phi}{\partial x_i}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \text{等}$$

这些方程很“凌乱”，对实际上可以实现的三维谐振器，决不能以闭合形式求解。几乎所有的理论文章均采用近似值。

某些最重要的谐振器现象（如加速度灵敏度）是由于非线性效应引起的。石英具有许多高阶常数，例如 14 个三阶弹性常数和 23 个四阶弹性常数，以及 16 个三阶压电系数；非线性方程很“凌乱”。

*磁场效应一般可以忽略不计；石英是非磁性的，但磁场能够影响安装结构和电极。

无限大晶片厚度切变谐振器

$$f_n = \frac{n}{2h} \sqrt{\frac{c_{ij}}{\rho}}, \quad n=1, 3, 5 \dots$$

式中： f_n — n 次谐波谐振频率； h —晶片厚度； ρ —比重； c_{ij} —与所传播弹性波有关的弹性模数。

$$T_f = \frac{d(\log f_n)}{dT} = \frac{1}{f_n} \frac{df_n}{dT} = \frac{-1}{h} \frac{dh}{dT} - \frac{1}{2\rho} \frac{d\rho}{dT} + \frac{1}{2c_{ij}} \frac{dc_{ij}}{dT}$$

T_f （频率的线性温度系数）对于大多数材料均为负（即随着 T 的增高，“弹簧”变得“较软”）。石英的系数可以为+或-或为零。

石英是完全各向异性的

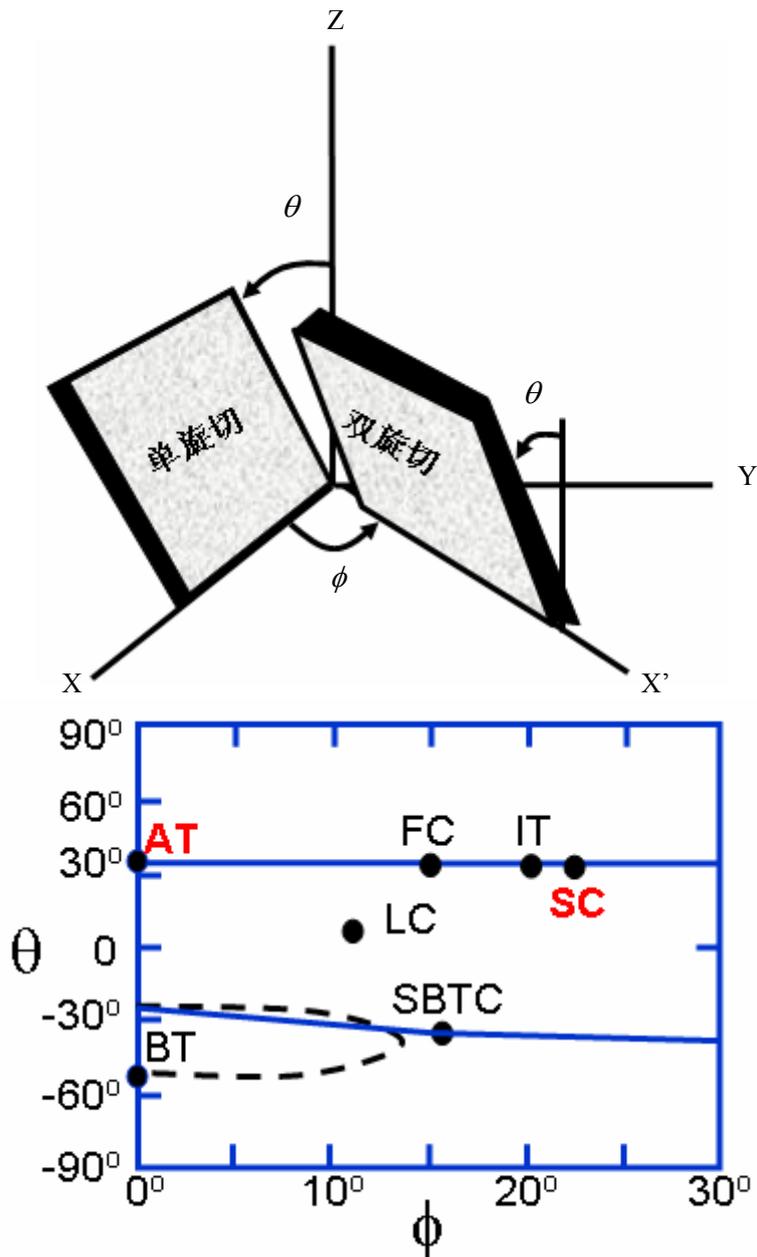
石英的特性随结晶方向有很大变化。例如，石英球在氟化氢中进行强腐蚀时，沿 Z 轴方向看，球体呈三角形，而沿 Y 轴看，则呈双凸形。沿最快腐蚀速率方向（ Z 方向）的腐蚀速率比沿最慢腐蚀速率方向（慢 X 方向）快 100 倍。

在 Z 方向的热膨胀系数为 $7.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，而在与 Z 方向正交的方向为 $14.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ；因此，密度温度系数为 $-36.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

弹性常数的温度系数为 $-3300 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ （对 C_{12} ）到 $164 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ （对 C_{66} ）。

当切角合适时， T_f 中的前两项之和被第 3 项消去，即在石英中存在温度补偿切型。

零温度系数的石英切



AT、FC、IT、SC、BT 和 RT 切型均在零温度切型的轨迹图上。LC 是温度计中所使用的“线性系数”切型。

Y 切： $\approx +90\text{ppm}/^\circ\text{C}$ （厚度剪切模） X 切： $\approx -20\text{ppm}/^\circ\text{C}$ （延伸模）

SC 切与 AT 切的比较

SC 切的优点：

- 瞬时热补偿（可以使 OCXO 预热较快）
- 静态和动态的频率温度特性使 OCXO 和 MCXO 的稳定度较高
- 活动性下降要小得多

- 激励电平灵敏度较低
- 平面应力补偿；棱边应力和弯曲引起的 Δf 较低。
- 对辐射的灵敏度较低
- 电容比较高（对振荡器电抗变化引起的 Δf 较小）
- 形状相似的基模谐振器的 Q 值较高
- 对片子形状的灵敏度较小，这就能够使用宽范围的曲面外形

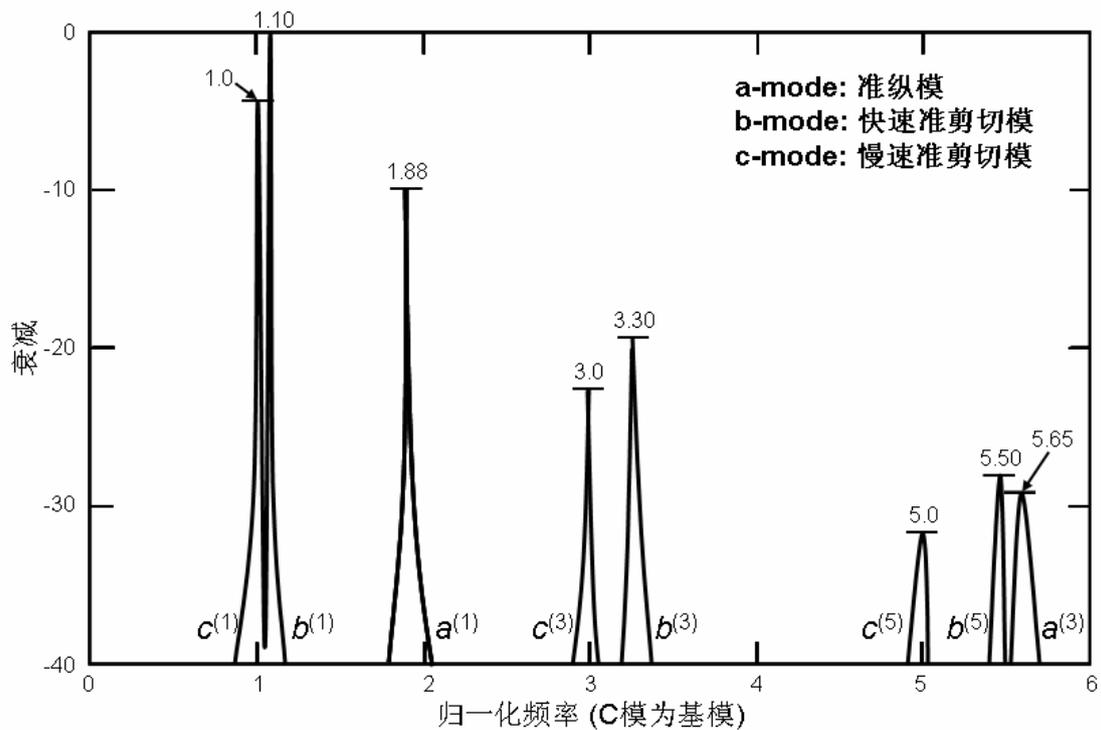
SC 切的缺点：

- 较难用于 OCXO 的制作(但是与精密 TCXO 用 AT 切相比其更易于用于 MCXO 的制作)

其它的明显不同点

- 在 SC 切中的 B 模被激励，尽管在横场谐振器中不一定被激励。
- SC 切对电场敏感（能够用于补偿）

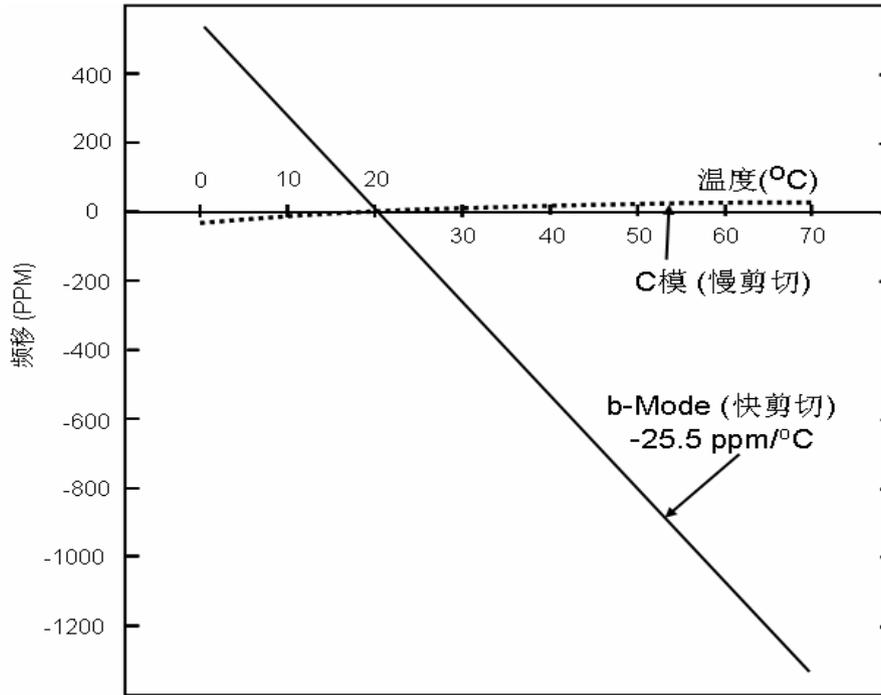
SC 切的模谱图



上图中的 SC 切谐振器的模谱图，其 N 阶泛音的模 m 标注为 m(N)。每个谐振频率都归一为基本 c 模。不同的模式的衰减可以用于不同的谐振器的设计。图中示例，b 模的强度要好于 c 模。

因此，振荡器必须有模式选择线路来保证振荡器工作在期望的 c 模状态下。

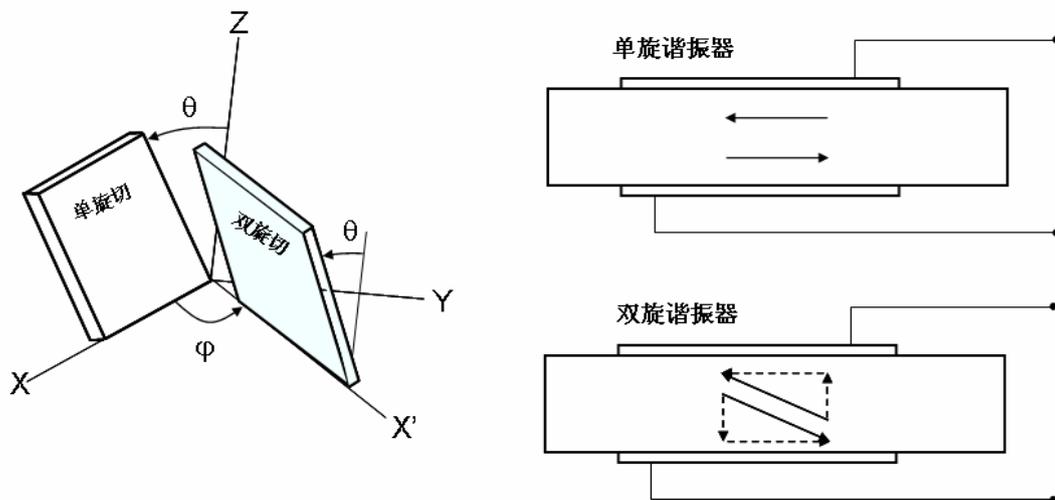
SC 切 b 模和 c 模的温度—频率特性



上图是 10MHz 的 3 阶泛音 SC 切谐振器 b 模和 c 模的频率—温度特性。B 模的温度—频率曲线是单调的，倾角为 $-25.5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。c 模是温度补偿的。温度—频率特性依赖于切角，泛音，形状等。b 模的频率比 c 模的频率高大约 9.4%。

这两种模式能同时存在，并且不相互影响。b 模频率能被用来即时显示谐振器的有效体积的温度。由 b 模和 c 模频率激励的双模已经被用来温度补偿。然而，在最新的工作中，由 c 模的基模和三阶泛音激励的双模显示了其优越性。

振动位移



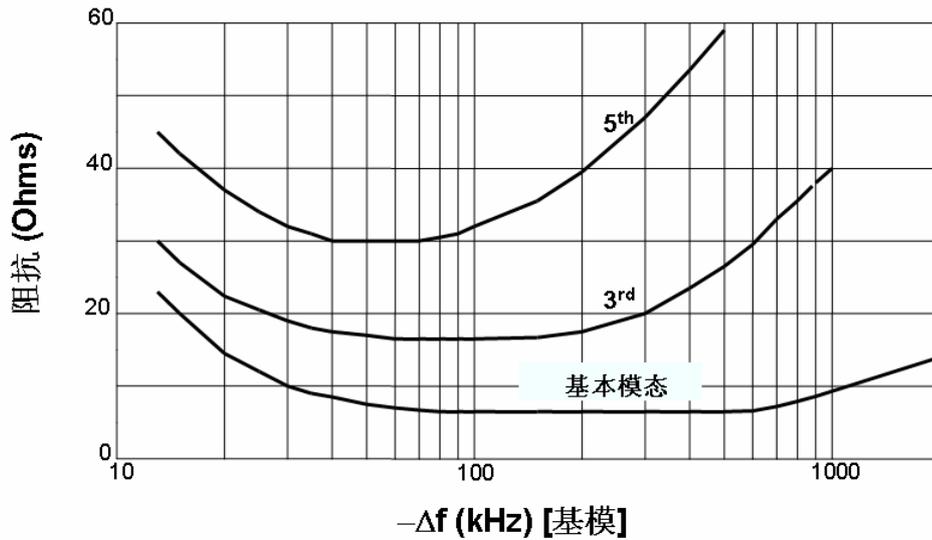
在双旋谐振器 ($\theta \approx 35^\circ$ 和 $\phi > 0^\circ$) 的振动中，一部分位移垂直板平面。通过控制 ϕ

角，我们就能控制平行于板平面与垂直板平面的位移比。

用于判断液体的性质的传感器就基于这个。在液体中，垂直板平面的那部分位移传播衰减压缩波，同时平行板平面的那部分传播衰减剪切波。通过双旋谐振器的频率改变能确定甘油溶液的浓度变化。对于每一个浓度，通过逐渐增大的 φ 角能够觉察到频率改变。

阻抗与电极层厚度

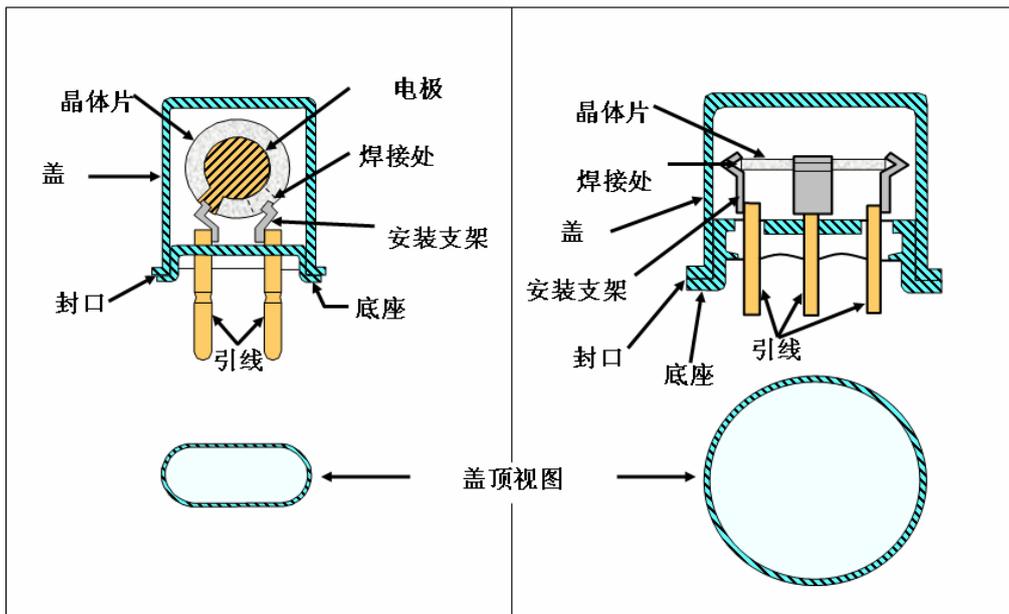
AT 切, $f_1=12\text{MHz}$, 光滑表面, 直径为 1.2cm ($0.490''$) 的银电极



谐振器的封装

两点装架封装

三点和四点装架封装



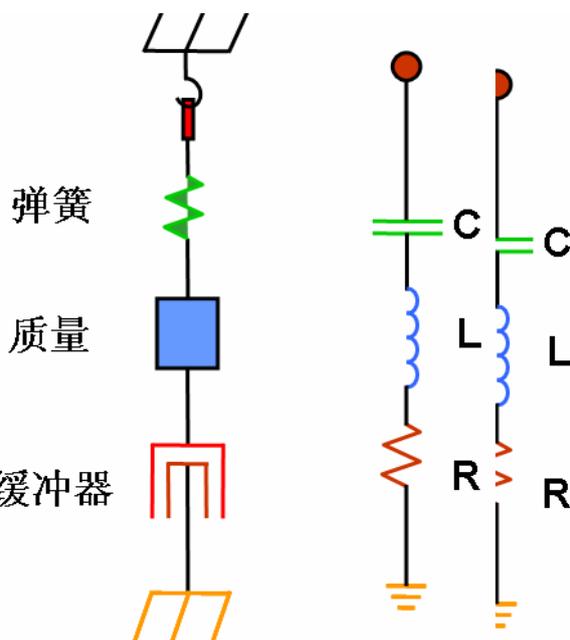
等效电路

由图所示机械振动系统和电路可以用同一微分方程来描述，所以他们是等效的。质量、弹簧和减振元件（即缓冲器）相当于电感器、电容器和电阻器，驱动力相当于电压。质量位移相当于电容充电，而速度相当于电流。

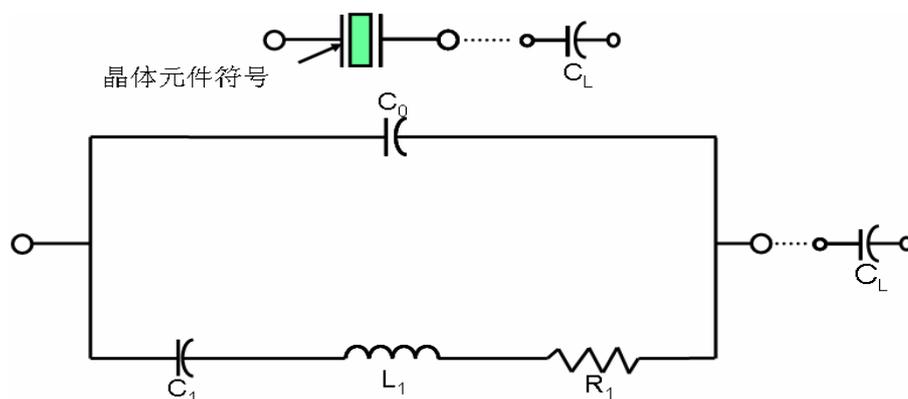
晶体谐振器是一种通过压电效应把电世界联系起来的机械振动系统，在下一节的谐振器（简化）等效电路（振动模式之一）中， C_0 称为“分路”电容，它是由晶片上的电极引起的（加上晶体壳产生的寄生电容）。电路中的 R_1 、 L_1 和 C_1 是由晶体机械振动产生的“动态臂”。

C_0 与 C_1 之比是衡量晶体中贮存的电能和机械能之间相互转换，即压电耦合系数 K 的度量，而 C_1 是衡量晶体“稳定性”，即它的可调性的度量，见下一页等效电路方程。当把直流电压加在谐振器电极上时， C_0/C_1 也是衡量电极形成的电容器中所贮存电能和压电效应晶格应变产生的晶体弹性应变贮存能之比的度量（令 $\gamma = C_0/C_1$ ，于是 $f_A - f_B \approx f_R/2\gamma$ ， $2\gamma = (\pi n/2K)^2$ ，式中 $N=1,2,3\dots$ 为泛音次数）。

石英晶体谐振器与分立元件 R, L, C 形成的槽路相比，其优点是，晶体比用一般分立元件构成的电路稳定的多， Q 值也高得多。例如，一个 5MHz 基模 AT 切晶体可以为 $C_1 = 0.01 \text{ pF}$ ， $L_1 = 0.1 \text{ H}$ ， $R_1 = 5 \Omega$ ， $Q = 10^6$ 。由于接在该电容器上得引线的贡献大约仅稍大于 0.01pF，因此，就不使用 0.01pF 的电容器。同样，0.1H 电感器实际应当是大的，它必然包括大量的匝数，应当是超导的，使其电阻小于 5Ω 。



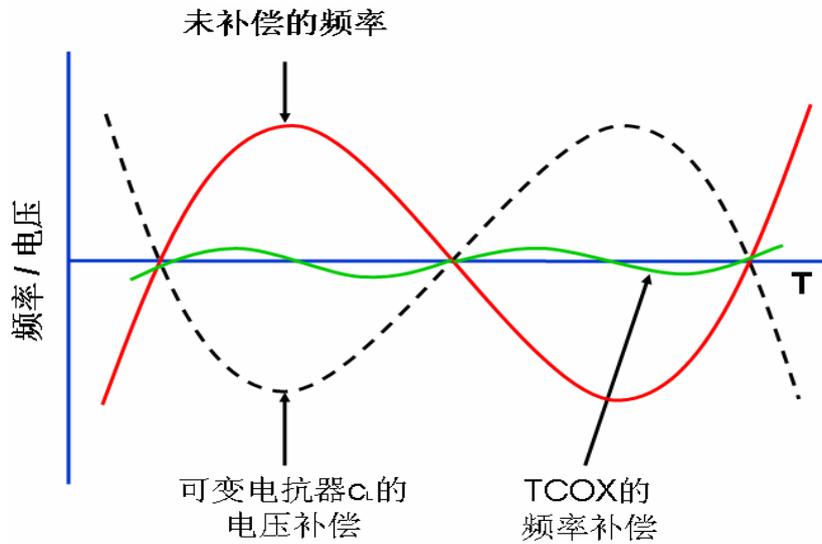
谐振器等效电路



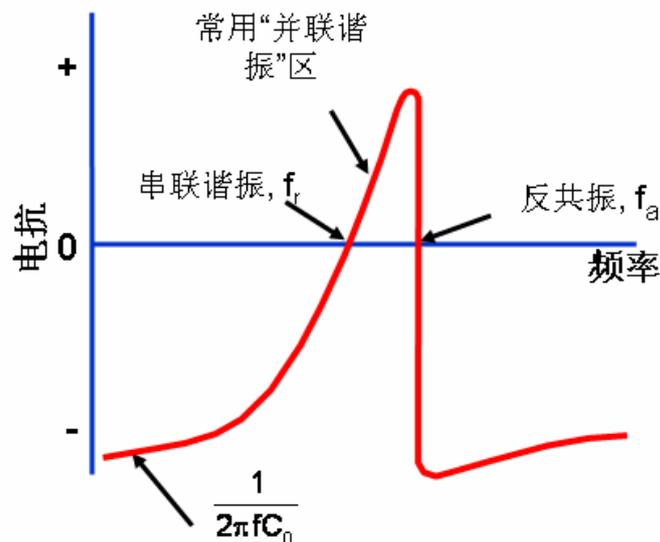
$$\frac{\Delta f}{f_s} \approx \frac{C_1}{2(C_0 + C_L)} \rightarrow \begin{cases} 1. \text{ 电压控制 (VCXO)} \\ 2. \text{ 温度补偿 (TCXO)} \end{cases}$$

振荡器的设计者把晶体元件当作电路，并且把晶体元件当作等效电路来处理。上图就是一个单模石英谐振器的等效电路。谐振器是一个机械振动系统通过压电效应来连接电的世界。一个负载电容 C_L 想当于晶体元件。 C_0 称为“分路”电容，是晶片上的电极产生的电容加上晶体包裹物引起的偏电容。电路中的 R_1, L_1, C_1 部分相当于晶体机械振动引起的“运动臂”。

石英振荡器的频率—温度补偿特性



谐振器的电抗—频率特性



等效电路参数关系

$$C_0 \cong \varepsilon \frac{A}{t} \quad r \cong \frac{C_0}{C_1}$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad f_a - f_s \cong \frac{f_s}{2r}$$

$$Q = \frac{1}{2\pi f_s R_1 C_1} \quad \varphi = \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}}{R_1}$$

$$\tau_1 = R_1 C_1 \cong 10^{-14} \text{ s} \quad \frac{d\varphi}{df} \cong \frac{360 Q}{\pi f_s}$$

$$C_{1n} \approx \frac{r' C_{11}}{n^3} \quad L_{1n} \approx \frac{n^3 L_{11}}{r'^3}$$

$$R_{1n} \approx \frac{n^3 R_{11}}{r'} \quad 2r = \left(\frac{\pi n}{2k} \right)^2$$

式中：n—泛音数；C₀—静态电容；C₁—动态电容；C_{1n}—n阶泛音动态电容；L₁—动态电感；L_{1n}—n阶泛音动态电感；R₁—动态电阻；R_{1n}—n阶泛音动态电阻；ε—石英的介电常数≈40pF/m(平均)；A—电极面积；t—晶片厚度；r—电容比；r'—f₁/f_n；f_s—串联谐振频率=f_R；f_a—并联谐振频率；f_a—反共振频率；Q—品质因数；τ₁—动态时间常数；ω—角频率=2πf；φ—阻抗相角；k—压电耦合系数（AT切为8.8%，SC切为4.99%）

Q值是什么意思，它为什么重要？

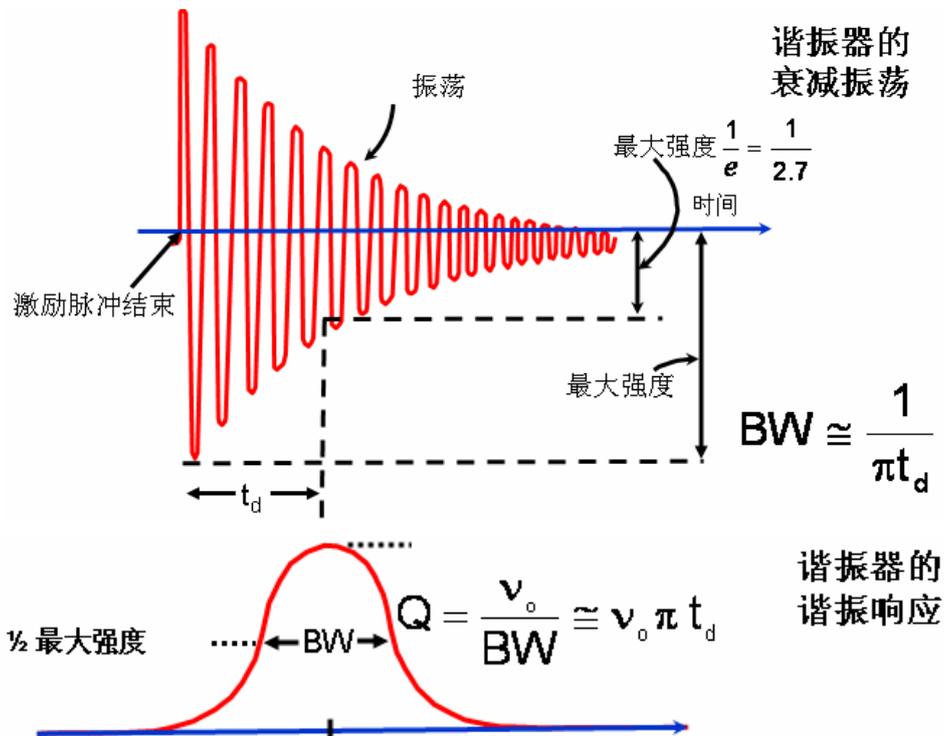
$$Q \equiv 2\pi \frac{\text{一个周期贮存的能量}}{\text{一个周期损失的能量}}$$

Q值与谐振的衰减时间成正比，而与线宽成反比。

Q值越高，谐振器的频率稳定度就越高，因此，能够更准确。例如，如果Q=10⁶，则10⁻¹⁰的准确度要求谐振曲线的确定中心达到线宽的0.01%，而10⁻¹²的稳定度（取某一平均时间）要求能够稳定在谐振曲线的同一点上达到线宽的10⁻⁶。

靠近载频的相位噪声随Q值的变化特别大（对于石英振荡器L(f) ∝ 1/Q⁴）

衰减时间、线宽和 Q 值



决定谐振器 Q 值的因素

石英晶体谐振器的最大 Q 值表示为

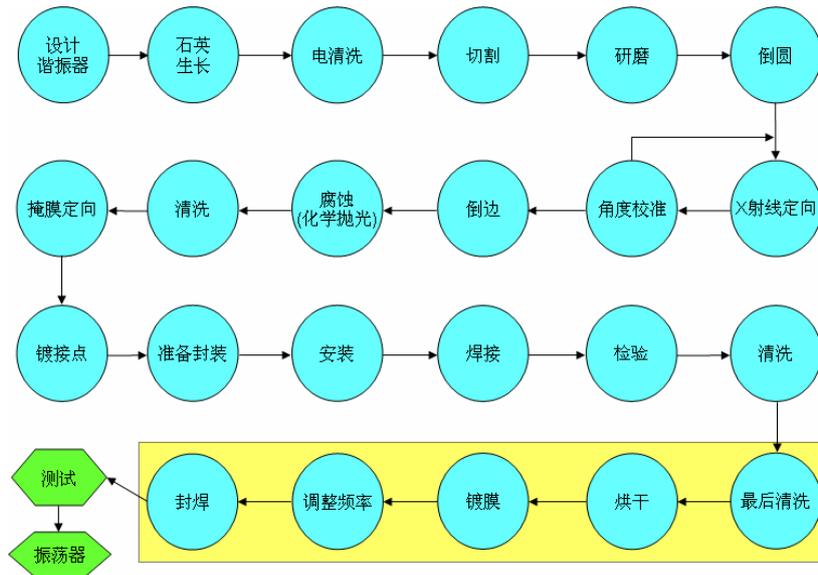
$$Q_{\max} = \frac{1}{2\pi f\tau}$$

式中：f—频率，Hz； τ —凭经验确定的时间常数，它是随切型和振动模式而变化。例如，对于 AT 切 C 模， $\tau=1 \times 10^{-14}$ s（在 5MHz 时的 Q 最大= 3.2×10^6 ，对于 SC 切 C 模， $\tau=9.9 \times 10^{-16}$ s，而对于 BT 切 b 模， $\tau=4.9 \times 10^{-15}$ s）

影响谐振器 Q 值的其它因素：

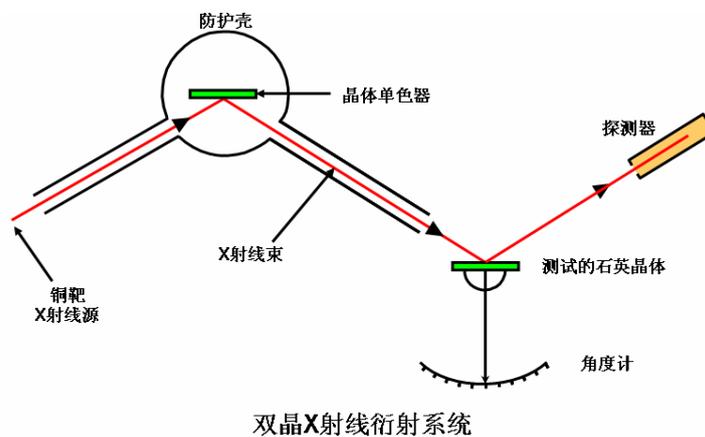
- 泛音次数
- 表面抛光
- 材料的杂质和缺陷
- 安装应力
- 焊接应力
- 温度
- 电极几何形状和类型
- 片子的几何形状（外形、尺寸比）
- 激励电平
- 外壳中的气体（压力、气体种类）
- 干扰模
- 离子辐射

谐振器的制造工序



如上的流程图表明了制造谐振器的主要工序。尽管所有的步骤都能影响谐振器稳定度，但在方框内显示的步骤通常与石英谐振器的长期稳定度有着重要的影响。在理想状况下，这些最后的工序需要在超真空的条件下完成。为了制造出低老化率，尤其是在频率调整后暴露在空气中，则在封焊前的超真空烘干变的非常重要。

晶体板的 X 射线定向



污染控制

污染控制在石英谐振器制造过程中非常重要，因为污染能影响：

- 稳定度
- 老化
- 磁滞现象
- 膨胀
- 噪音
- 非线性和阻抗异常
- 频率突跃
- 制造率

- 可靠性

石英技术的重大事件

- 1880 P 和 J.居里发现压电效应
- 1905 G.Spezia 在实验室中首次实现石英的水热生长
- 1917 压电效应首次应用在声纳中
- 1918 压电晶体首次用于振荡器
- 1926 石英晶体控制的第 1 个广播电台
- 1927 第一台石英晶体钟制成
- 1934 首次研究出 AT 切温度补偿切型
- 1949 研制出曲面高 Q 值，高稳定度 AT 切型
- 1956 首次长成在商业可用的石英晶体
- 1956 首次介绍 TCOX
- 1972 研制出小型石英音叉；可买到石英表
- 1974 研制 SC 切（和 TS/TTC 切），1976 年鉴定
- 1982 首次出现具有双 C 模自动温度敏感元件的 MCXO

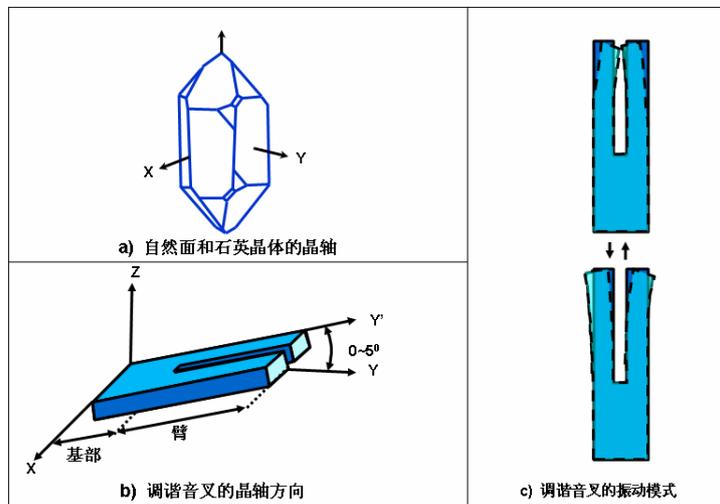
手表中的石英谐振器

要求：

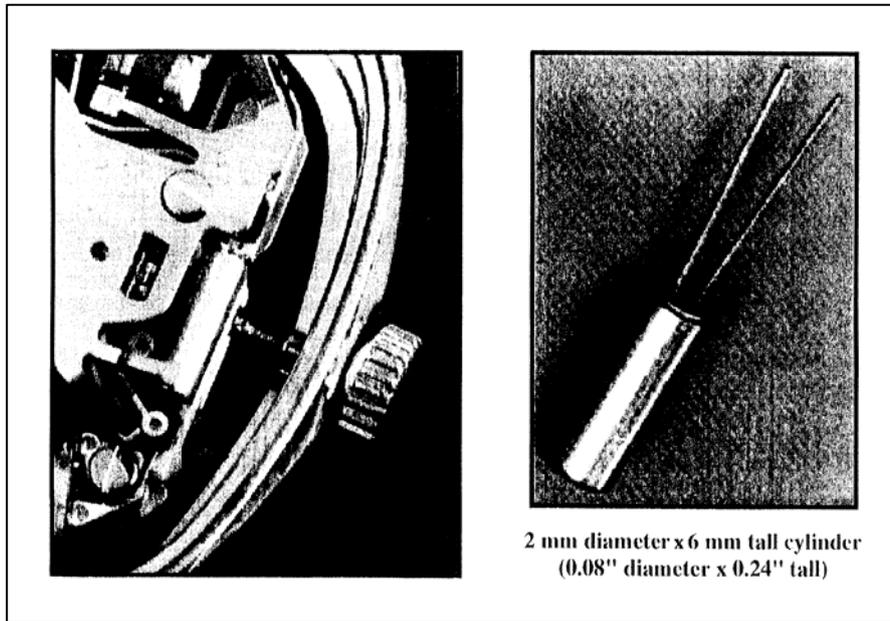
- 尺寸小
- 低成本
- 低能量耗散（包括振荡器）
- 高稳定度（温度、老化、振动、位置）

这些要求与 32,768 Hz 石英调谐音叉的要求一致

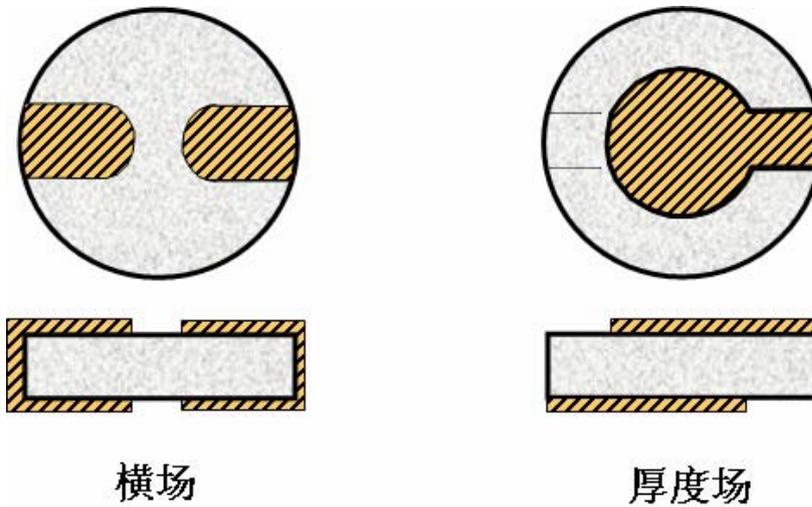
石英调谐音叉



石英手表



横场谐振器



在横场谐振器中：

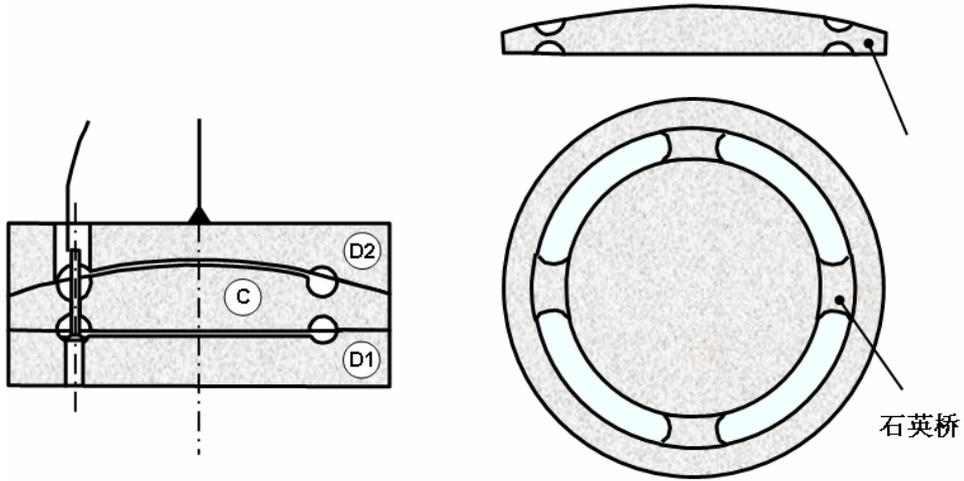
电极不在最大运动范围内；改变电极之间间隙方向可以改变谐振器的某些重要特性。横场也能用来做只在一个主平面上的电极。横场谐振器的优点是：

能够消除不需要的模，即 SC 切中的 B 模

Q 值可能较高（因电极和模捕获引起的衰减较小）

稳定性可能较高（电极和模捕获的影响较小， C_1 较小）

无电极式 (BVA) 谐振器



无电极式谐振器
侧视结构图

中心平面C的
侧视和俯视图

第四章 振荡器的稳定度

稳定度的设想

1×10^{-10} 意味着什么？

不到地球周长的 1/2cm。

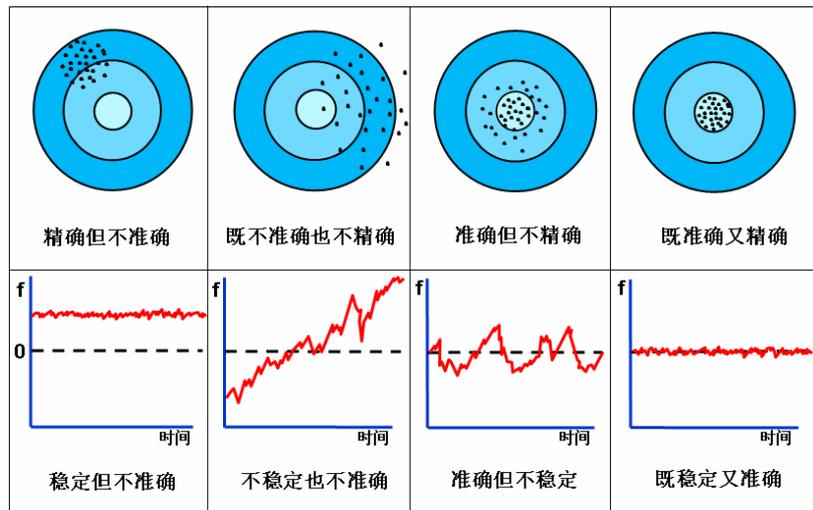
约为人类生命（约 80 年）的四分之一秒钟。

地面从 GPS 卫星上收到的功率约为 -160dBW ，相当与从洛杉矶发出的灯光能在 5000 公里外的纽约看到（忽略地平线的曲率）。

-170dB 意味着什么？

$-170\text{dB} = 1 \times 10^{-17} \approx$ 一张薄纸的厚度除以世界上所有的车辆一天内的总行驶距离。

准确度、精密度和稳定度

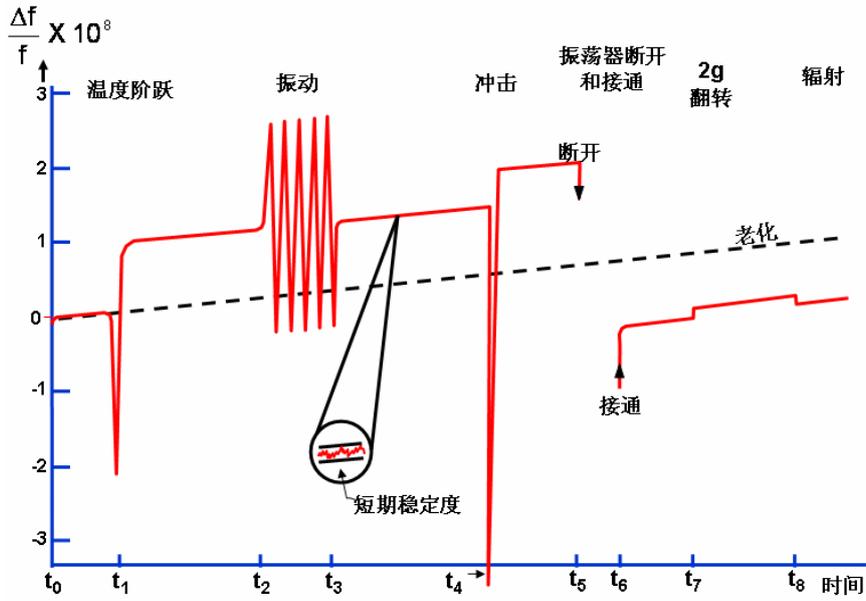


对振荡器频率的影响

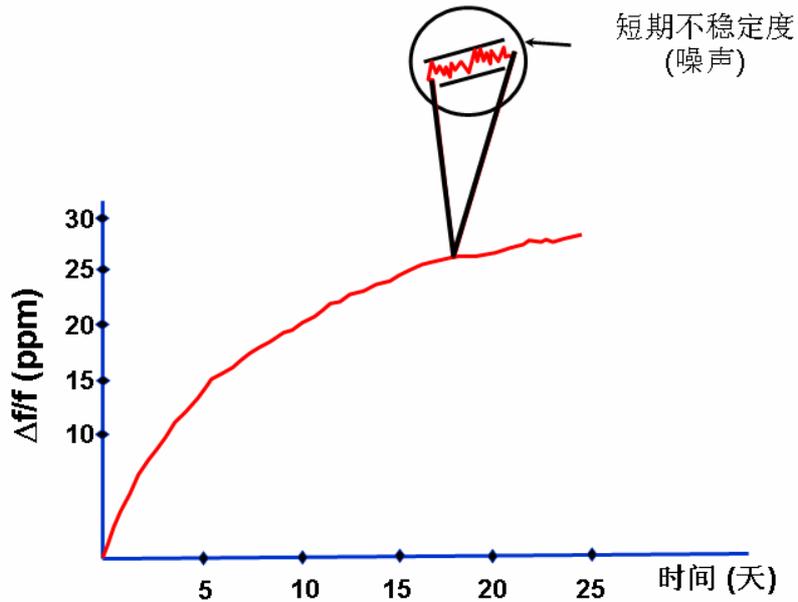
- 时间
- 短期（噪声）
- 中期（即因恒温变化引起）
- 长期（老化）
- 温度
- 静态频率与温度的关系
- 动态频率与温度的关系
- 温度与时间的关系（“热滞后”、“恒温开关特性”）
- 加速度
- 重力（2g 翻转）
- 声音噪音
- 振动
- 冲击
- 电离辐射
- 稳态

- 光子 (X 射线、 γ 射线)
- 脉冲
- 粒子 (中子、质子、电子)
- 其它
- 电源电压
- 温度
- 磁场
- 气压 (海拔)
- 负载阻抗

理想的频率时间响应特性



老化和短期稳定度

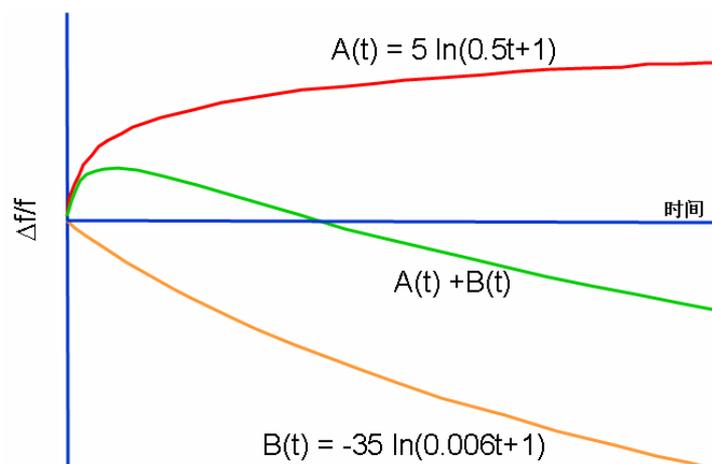


老化机理

- 杂质引起的物质运动
- 扩散效应
- 由于 $f \propto 1/t$, $\Delta f/f = -\Delta t/t$, 即 $f=5\text{MHz}$
 $\approx 10^6$ 分子层, 因此, 1 等效的单
层石英 $\Rightarrow \Delta f/f \approx 1 \text{ ppm}$ 。
- 化学反应
- 谐振器密封盒中压力变化 (漏气和
除气)
- 谐振器中应力的消除: 安装和焊接
结构、电极和石英中的 (?)。
- 振荡器电路老化 (负载电抗和激励
电平变化)
- 其它影响
- 电场变化 (仅双旋晶体)
- 石英除气
- 恒温控制电路老化

典型老化性能

老化可能是正的或者负的。有时, 能观察到老化方向的改变。上面右给出的曲线表明, 有三种类型的老化特性。表示反向的曲线是其它两条曲线之和。最简单的老化模型显示, 不同的方向和衰减时间有至少两种老化机理存在



石英谐振器晶体板上的应力

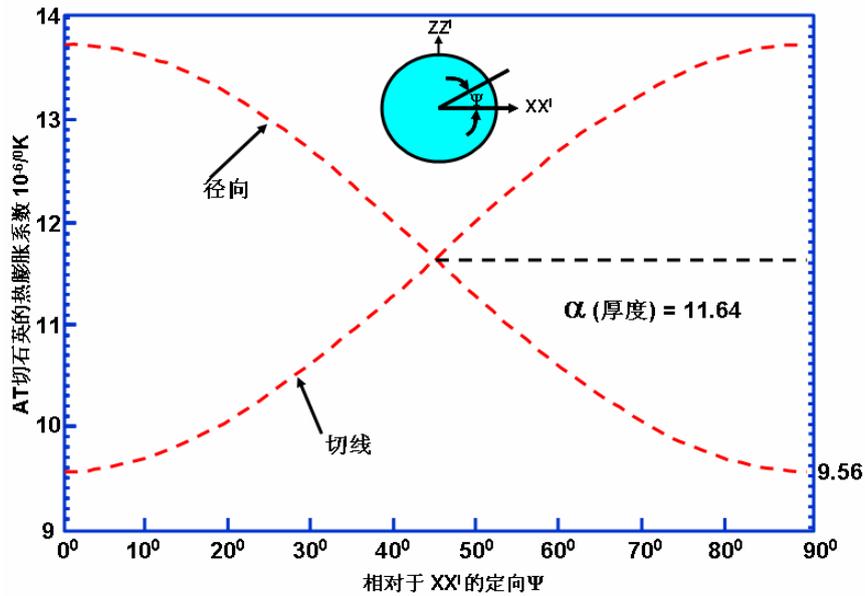
原因:

- 不同热膨胀系数
- 焊接材料在凝固/加工时尺寸的改变
- 由于成形, 焊接和封焊时的残余应力
- 电极的内应力
- 在石英生长过程中的不均匀, 杂质和其它缺陷
- 由于切割, 电清洗和腐蚀引起的表面破坏

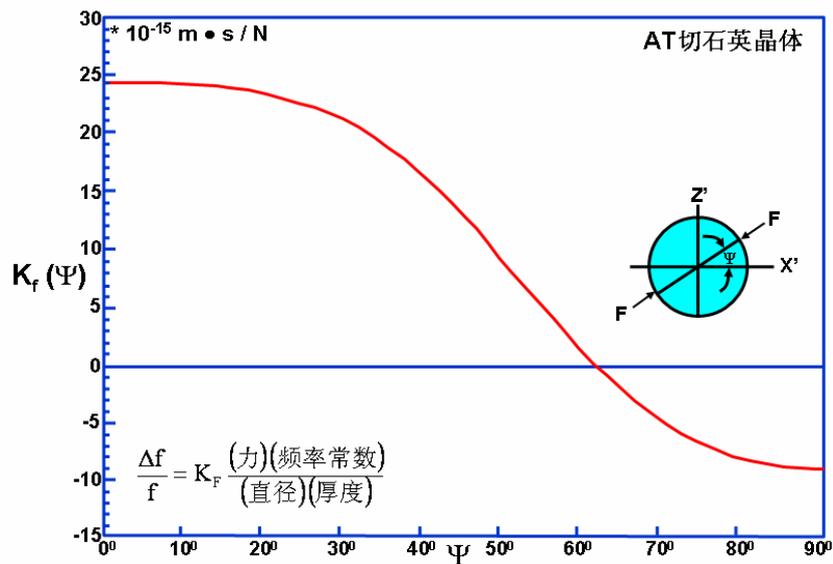
影响:

- 内平面径向力
- 切（扭转）力，特别是在3点和4点封装
- 弯（弯曲）矩，即由于电极应力 and 支架未对准
- 在晶格内产生局部化应力由于位错，内含物，其它杂质和表面破坏。

石英的热膨胀系数



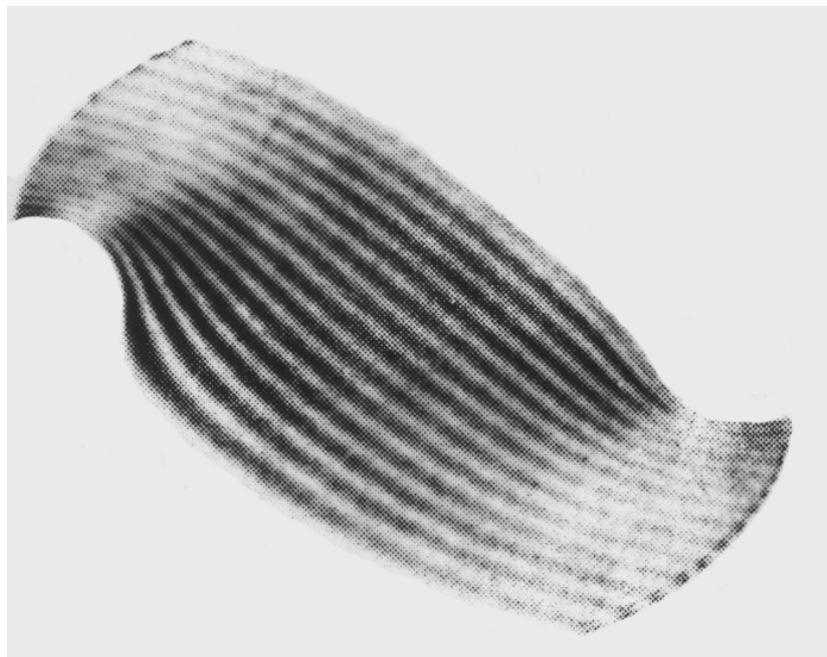
力频系数



力作用在谐振器上引起晶格变形从而导致频率的改变。上面的曲线图表明了力频系数 K_F 是作用力方向的函数。如图所示，通过径向力的作用使 AT 石英晶体板受到挤压。频率的改变是有规律的，是相对于 x' 轴的力的方向的函数，并且 K_F 能由上面的表达式来计算。在

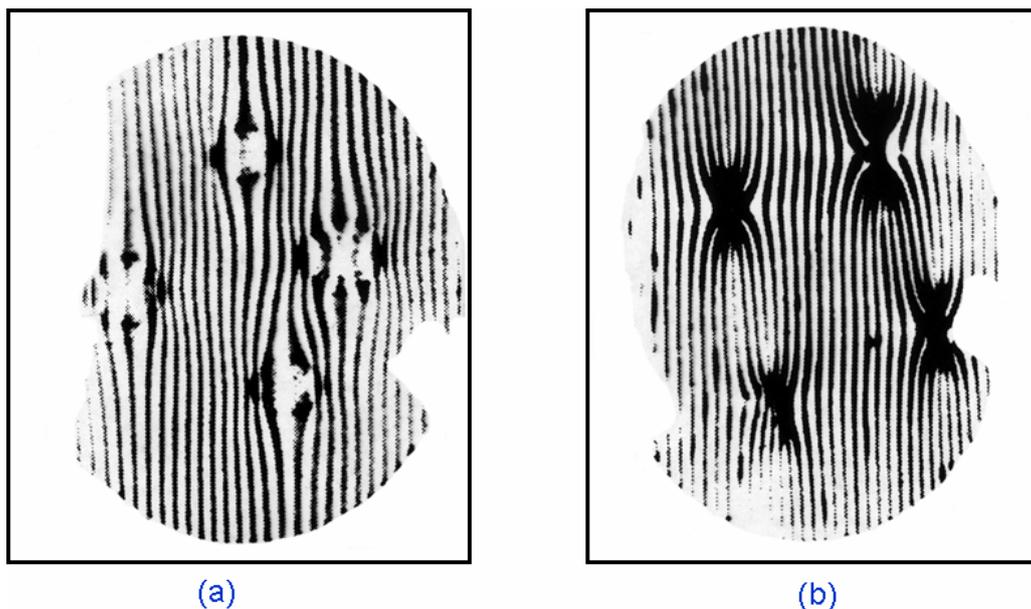
$\Psi = 61^\circ$ 时力频系数为零。然而，力频系数也与温度有关。对于 AT 切和 SC 切，当温度在 80°C 时零点所对应的 Ψ 角小于 25°C 时零点所对应的 Ψ 角。

安装支架引起的应变



直径为 1cm 的 AT 切两点封装谐振器的 X 射线形貌图。此图表明，安装应力使晶格产生失真。

粘合剂引起的应变



X 射线形貌图显示了粘合剂引起的晶格失真：(a) 酚醛树脂粘合剂膨胀固化；(b) Dupont5504 粘合剂收缩固化。

安装力引起的频率变化

力频系数 $K_F(\psi)$ ，定义为

$$\frac{\Delta f}{f} = K_F \frac{(\text{力频常数})}{(\text{直径})(\text{厚度})}$$

$\psi=0^\circ$ 时，最大的 K_F (AT 切) $=24.5 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s/N}$

$\psi=44^\circ$ 时，最大的 K_F (SC 切) $=14.7 \times 10^{-15} \text{ m} \cdot \text{s/N}$

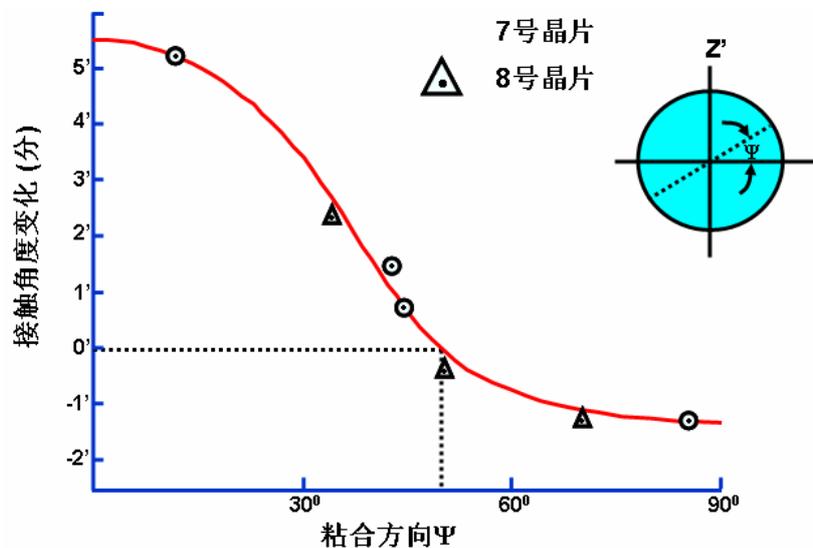
假如，有一直径为 14mm 的 5MHz 3 次泛音谐振器。由于 $1g=9.8 \times 10^{-3} \text{ N}$ ，并假设只有径向力存在，于是

$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\text{Max}} = \begin{cases} 2.9 \times 10^{-8}/g & (\text{AT 切谐振器}) \\ 1.7 \times 10^{-8}/g & (\text{SC 切谐振器}) \end{cases}$$

AT 切谐振器的 $\psi=61^\circ$ 和 SC 切谐振器的 $\psi=82^\circ$ 时均为

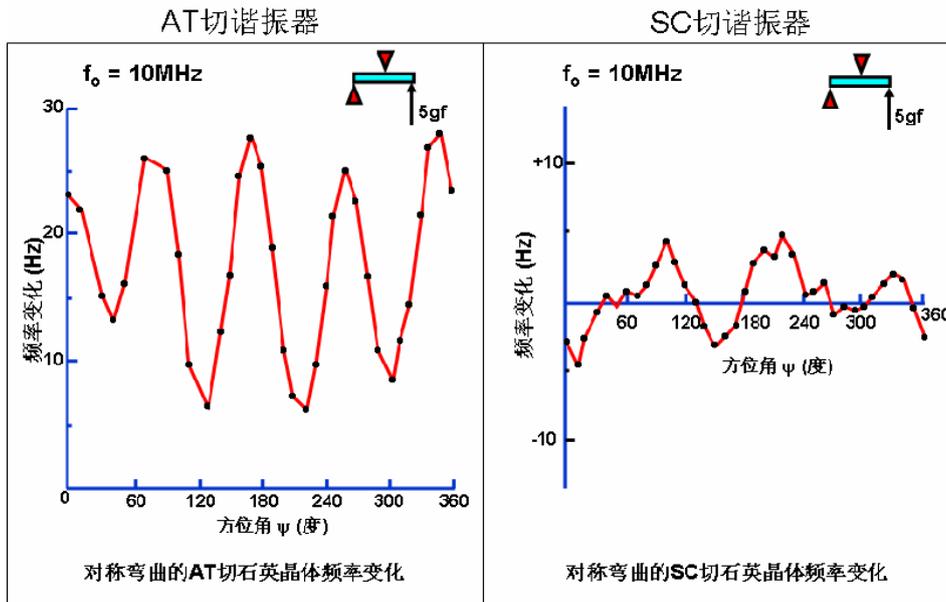
$$\left(\frac{\Delta f}{f}\right)_{\text{Min}} = 0$$

粘合应变引起的频率变化



在重新加工 22MHz 基模 AT 切谐振器，以改变粘合取向时谐振器的频率温度特性随着切角的变化而变化。谐振器的晶片为直径 6.4mm 的片子，用镍导电胶粘合在低应力安装架上。

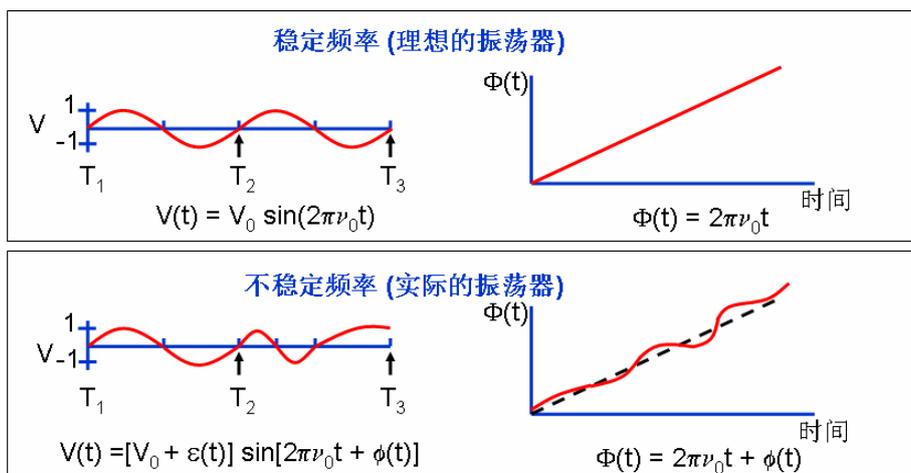
弯曲力与频率变化



上图显示了直径为 12mm 的 AT 切和 SC 切片子在对称弯曲下的频率变化与相位角的实验结果。在 5 克的常力作用下，重复测量显示谐振器是旋转的并且绘图显示频率变化是相位角 Ψ 的函数。

在所有的相位角测试中，当施加一个常力于谐振器上，SC 切对弯曲的敏感性比 AT 切差。对于 AT 切，频率变化与角度在 X 轴上没有交点。当角度从 0° 变化到 360° ，SC 切的频率变化幅度要远小于 AT 切（即使对 SC 切的有效测量结果并不确定）。另外，当作用力从 0 到 15 克变化时，相对于 AT 切，SC 切频率变化与作用力的关系更加线性化。

短期稳定度（噪声）



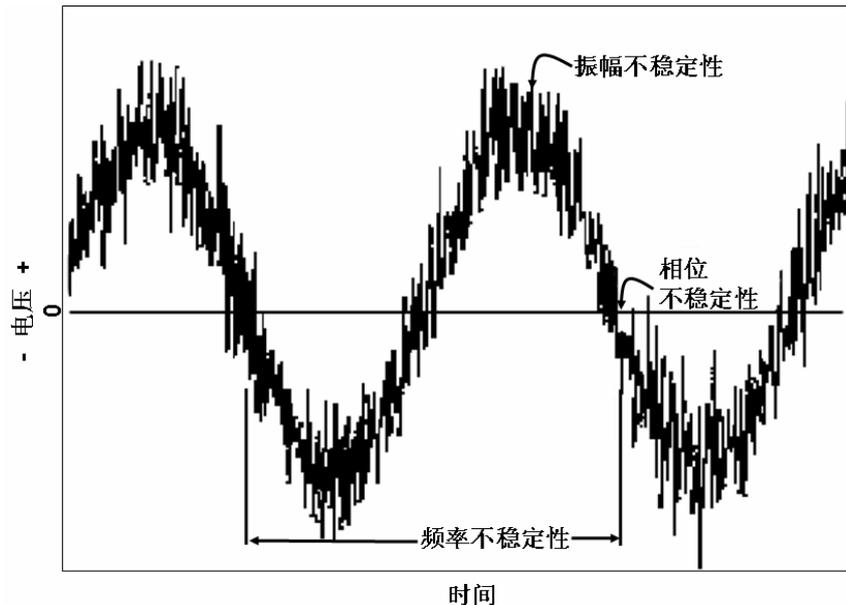
$$\text{瞬时频率 } \nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \nu_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

其中： $\nu(t)$ —振荡器输出电压； V_0 —标称峰值电压幅度； $\varepsilon(t)$ —噪声幅度； ν_0 —标称

(或载波) 频率; $\Phi(t)$ —瞬时相位; $\phi(t)$ —偏离标称值 (即理想值) 的相位偏移。

理想的振荡器的输出电压为正弦曲线。实际的振荡器输出电压由于噪声的影响是偏移的正弦曲线。放大偏移表示为 $e(t)$, 且相位偏移为 $f(t)$ 。由于频率与相位改变率有关, 则频率偏移为 $v(t) - v_0 = [1/(2\pi)][d\phi(t)/dt]$ 。

振荡器的瞬时输出电压



前一小节中, 一个精密振荡器的瞬时输出电压可以表达成,

$$V(t) = (V_0 + \varepsilon(t))\sin(2v_0\pi t + \phi(t))$$

其中: V_0 是标称峰值电压幅度; $\varepsilon(t)$ 是标称振幅的偏移; v_0 是标称频率; $\phi(t)$ 是偏离标称值 $2v_0\pi t$ 的相位偏移。图上显示了一个信号的振幅, 相位和频率的不稳定性。信号峰值的波动表明了振幅的不稳定性。电压在零点的波动表明了相位的不稳定性。电压周期的变化表明了频率的不稳定性。

在信号中显示, 噪声的频率分量要高于载波频率。这仅仅是一个说明。通常情况下, 稳定性量度应用于由振幅, 相位和频率不稳定性组成的频率分量要低于载波频率

振荡器噪声的影响

- 限制确定精密振荡器的现行工作状态并对其预测的能力
- 限制谐振和同步的精确度
- 限制接收机的有效动态范围、信道间隔和选择性; 能够限制干扰电阻
- 限制雷达的性能 (特别是多普勒雷达)
- 引起定时误差 $[-\tau\sigma_y(\tau)]$

- 在数字通信系统中引起比特误差
- 限制通信系统的使用数，如传送者的噪声能干扰附近频道的接受者
- 限制导航精确度
- 限制锁定在窄线宽谐振上的能力
- 能引起失锁，能限制锁相环系统的俘获—反俘获能力

时域—频域

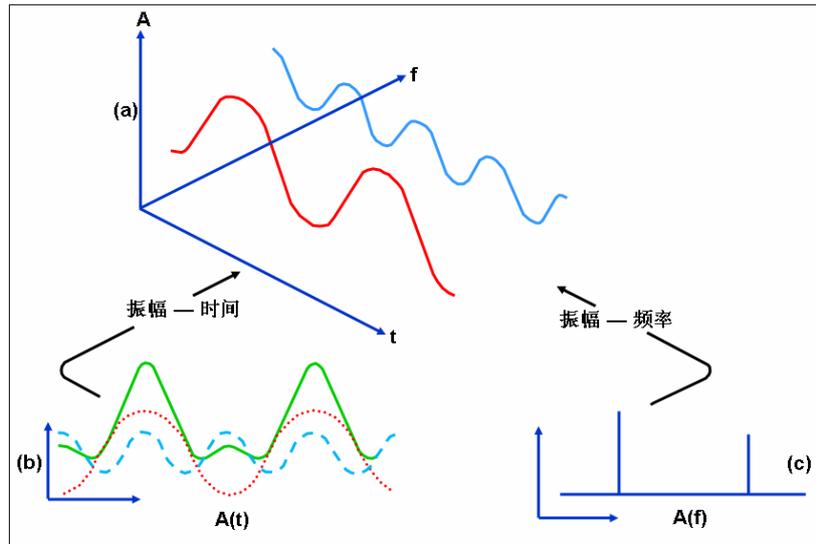


图 (a) 表示两条正弦曲线。示波镜能在时域中显示这类信号，例如输出电压与时间的两条正弦波，并且它们之和如上 (b) 图所示。频谱分析仪能证明电压或功率是频率的函数，例如，如 (c) 图所示在频域中它能用来分解信号。用频域表示时，信号被分成其频率分量和在每一频率上显示的功率电平。

在频域中，理想的正弦曲线是一条零的带宽的光谱线。实际的正弦曲线由于噪声的影响，是一条有限带宽的光谱线。

通常，噪声通过宽带宽的频率来表示。依靠分解带宽的频谱分析仪来测量总功率（或电压）。相位噪声是 dBc/Hz 。相位噪声测量结果必须包括带宽和载波频率。

短期不稳定的原因

- Johnson 噪声*（热引起的电荷波动，例如，阻抗元件中的“热电势”）
- 缺陷和量子波动引起的声子散射（与 Q 相关）
- 振荡器电路（有源和无源元件）引起的噪声
- 温度波动—热瞬变效应
 - 在恒温槽设置点上活动性下降
- 随机振动

- 吸附的分子数的变化
- 连接面（石英、电极、装架、粘合剂）应力的消除、波动
- 原子频率标准中的散粒噪声
- ???

*Johnson 噪声，即热噪声，由于谐振器等效串联电阻和持续电路中的其他元件的电阻引起的，弱信号的基本放大极限和石英晶体振荡器的噪声极限。通过麦克斯韦-玻尔兹曼分布法则，在热平衡下，能量与系统的自由度相联系，即每个自由度为 $kT/2 = 2 \times 10^{-21} \text{ J}$ 。纯阻抗 R 是白热噪声并伴随着有效功率 $kT = 4 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -204 \text{ dBW/Hz} = -174 \text{ dBm/Hz}$ （dBm 是对于 1mW 的 dB）

短期稳定度的量度

量度方法	符号
双采样方差（阿仑方差的平方根）	$\sigma_y(\tau)^*$
相对偏移的谱密度	$S_\phi(f)$
相对频率偏移的谱密度	$S_y(f)$
相位噪声	$L(f)^*$
* 在振荡器技术指标上最常出现	

$f^2 S_\phi(f) = v^2 S_y(f)$; $L(f) \equiv 1/2 [S_F(f)]$ (IEEE 标准中的 1139)

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{2}{(\pi v \tau)^2} \int_0^\infty S_\phi(f) \sin^4(\pi f \tau) df$$

式中： τ —平均时间； f —傅里叶频率或偏离载波的频率； v —载波频率。

阿仑方差

双采样方差或阿仑方差的平方根，是用时域法描述振荡器短期稳定度的标准方法。一般用 $\sigma_y(\tau)$ 来表示。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (y_{k+1} - y_k)^2 \rangle$$

相对频率 $y = \Delta f / f$ 是在时间间隔 τ 内进行测量； $(y_{k+1} - y_k)$ 为对 y 的 2 次有效测量之差，因此，是很理想的。 $\langle \rangle$ 表示对 $(y_{k+1} - y_k)^2$ 的无限次数的时间平均。有限测量次数 $m(m \geq 100)$ ，能够得到好的估值。

$$\sigma_y(\tau) \text{ 一般表示 } \sqrt{\sigma_y^2(\tau, m)}, \text{ 即 } \sigma_y^2(\tau) = \sigma_y^2(\tau, m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} (y_{k+1} - y_k)_j^2$$

为什么是 $\sigma_y(\tau)$

- 经典方差: $\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum (y_i - \bar{y})^2$

通常所观察到的噪声过程，例如随即游动，都是发散的，即方差随数据点数的增加而增加。

- 阿仑方差

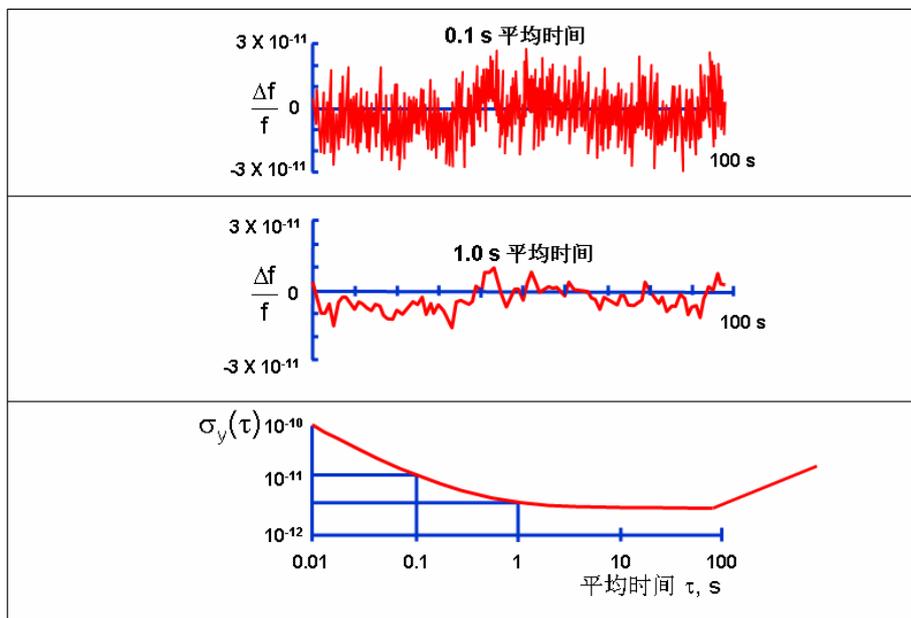
在精密振荡器中所观察到的所有噪声过程都是收敛的；

与幂律谱密度类型有直接关系；

容易计算；

比用傅里叶变换估算噪声过程更快更准确。

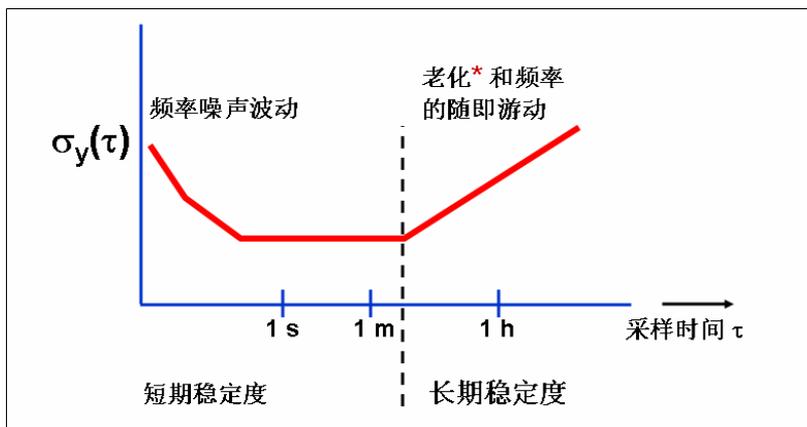
频率噪声和 $\sigma_y(\tau)$



如上图所示，“噪声”是平均时间的函数（也称“度量时间”或“ τ ”）。对于相同的振荡器，平均时间为 0.1 秒的在时频坐标上点的波动要大于 1s 的平均时间。也同样显示在相应的阿仑方差中。

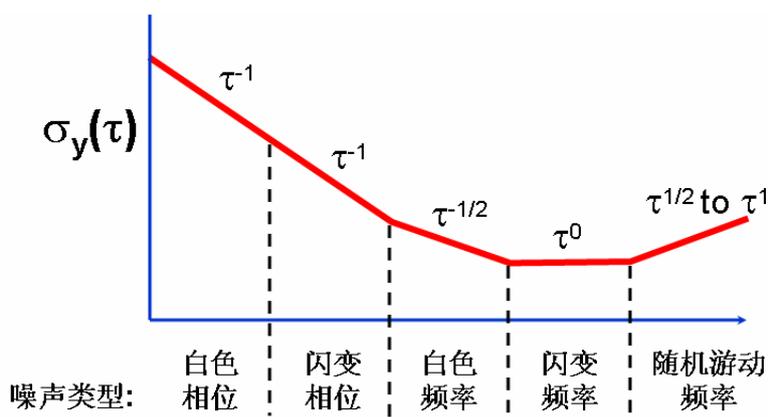
在短平均时间，较长的平均时间，噪声逐渐下降，直到“闪变本底”，即对于某些噪声过程，峰值和谷值在时频数据中为平均数。较长的平均时间对于主要噪声过程中闪变频率并没有帮助。当平均时间较长时，由于主要噪声过程中频率是随机游动，阿仑方差会增加，并且平均时间越长，阿仑方差也就越大。

时域稳定度



*由于 $\sigma_y(\tau)$ 适合作为随机频率起伏的量度单位，所以必须从长的采样时间数据中扣除老化。

$\sigma_y(\tau)$ 的幂律关系

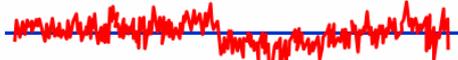


低于频率噪声的闪变范围（即“闪变本底”）时，晶体振荡器一般呈 τ^{-1} （白色相位噪声）关系。原子频率标准直到伺服回路的时间常数均呈 $\tau^{-1/2}$ 关系（白色频率噪声），而在低于时间常数时则呈 τ^{-1} 关系。在闪变本底开始时的典型采样时间 τ ：对于晶体振荡器为 1s；Rb 频率标准为 10^3 s，而 Cs 频率标准为 10^5 s。在时间 τ 长时，主要因素是随机游动频率和老化。

噪声的图形

曲线图表示计数器（ Δf 与 t ）或者检相器（ $\phi(t)$ 与 t ）输出参数 $Z(t)$ 的波动情况。这些曲线表示是模拟的时域特性，它相当于最普通的（幂律）谱密度； h_α 为幅度系数。注意：

由于 $S_{\Delta f} = f^2 S_{\phi}$ ，白色频率和相位的随机游动是等效的。

$z(t)$ 与 t 的曲线图	$S_z(f) = h_{\alpha} f^{\alpha}$	噪声名称
	$\alpha = 0$	白色
	$\alpha = -1$	闪变
	$\alpha = -2$	随机游动
	$\alpha = -3$	

谱密度

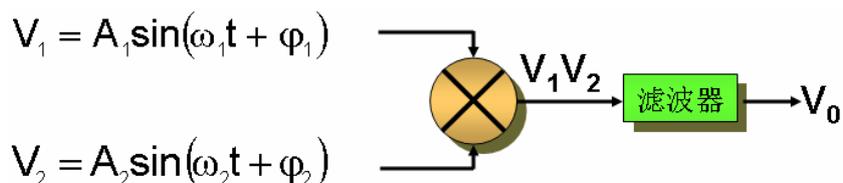
$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin(2\pi\nu_0 t + \varphi(t))$$

在频率中，由于“相位噪声” $\varphi(t)$ 的存在，某些幂往往不在 ν_0 上。稳定度用“谱密度”来表征。谱密度 $S_{\nu}(f)$ 是中心在 f 的每单位带宽的均方电压 $\langle V^2(t) \rangle$ ，它并不是频率稳定度的一种好的量度单位，因为 $\varepsilon(t)$ 和 $\varphi(t)$ 对它贡献，同时与频率的波动并没有唯一的相关性（在精密频率源中 $\varepsilon(t)$ 通常可以忽略不计）。

相位谱密度和分数频率波动 $S_{\phi}(f)$ 和 $S_y(f)$ 被分别用来表示频域稳定度。参数 $g(t)$ 的谱密度 $S_g(f)$ 是中心在 f 的每单位带宽的 $g(t)$ 均方值。因此，在带宽 g^2 的均方值表示为

$$g_{rms}^2(t) = \int_{BW} S_g(f) dt$$

混频器的功能



用三角法表示为：

$$\sin(x)\sin(y) = \frac{1}{2}\cos(x-y) - \frac{1}{2}\cos(x+y)$$

$$\cos(x \pm \pi/2) = \sin x$$

令 $\omega_1 = \omega_2$; $\varphi_1 \equiv \omega_1 t + \varphi_1$, $\varphi_2 \equiv \omega_2 t + \varphi_2$, 于是, 混频器可以变为:

- 检相器, 当 $\varphi_1 = \varphi_2 + \pi/2$ 和 $A_1 = A_2 = 1$ 时,

$$V_0 = \frac{1}{2}\sin(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{1}{2}(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (\varphi \text{ 取最小值})$$

- 调幅检波器, 当 $A_2 = 1$ 且滤波器为低通滤波器时,

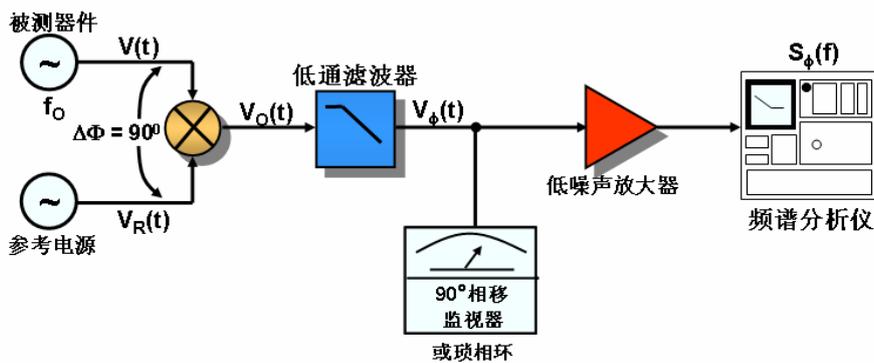
$$V_0 = \frac{1}{2}A_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2); \quad \varphi_1 = \varphi_2, \text{ 则 } V_0 = \frac{1}{2}A_1$$

- 倍频器, 当 $V_1 = V_2$ 和滤波器在 $2\omega_1$ 为带通滤波器时,

$$V_0 = \frac{1}{2}A_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\varphi_1) \Rightarrow \text{将频率和相位误差增加一倍。}$$

在频率叠加中混频器是一个通用的设备。在图中可以看到, 混频器的输入端是两个电压, 这两个电压的乘积则由输出端输出。通过基本的三角法, 混频器能制造出检相器, 调幅检波器和倍频器。

检相器



将频率相同、相位差 90° (即 90° 相移) 的被测器件 (DUT) 接在双平衡混频器的输入端, 于是

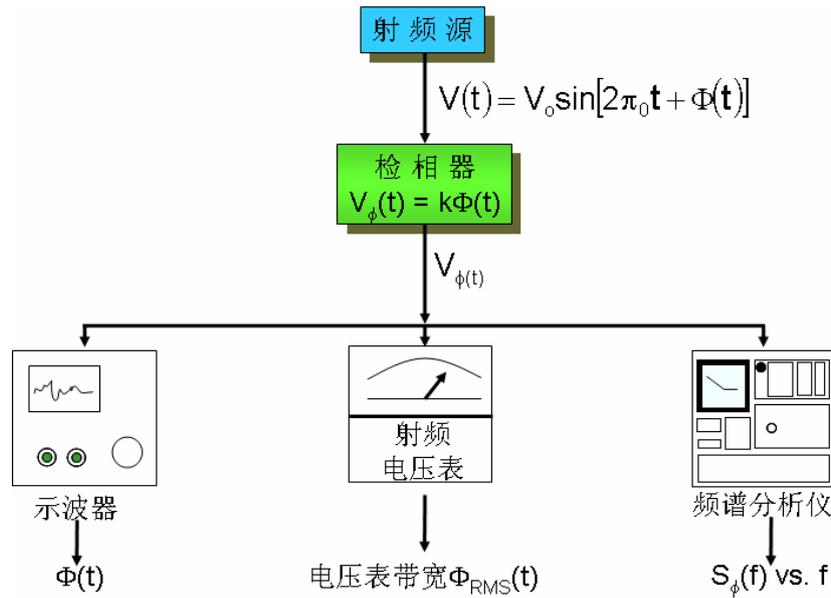
$$V_0(t) = V(t)V_R(t) = K \cos[\varphi(t) - \varphi_R(t) + \pi/2] + K \cos[2\pi(\nu + \nu_R)t + \dots]$$

低通滤波器 (LPF) 消除了第二余弦项, 于是

$$\varphi_R(t) \ll \varphi(t) \ll \pi/2 \text{ 时, } V_\varphi(t) = K\varphi(t)$$

即检相器将相位起伏转变为电压起伏。

相位噪声的测量



示波器能显示相位与时间信号。通过射频源电压表带宽可以测量 RMS 相位起伏。频谱分析仪能确定相位噪声即相对于载波频率的偏移频率。

频率—相位—时间的关系

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \text{“瞬时”频率}$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \int 2\pi[v(t') - v_0] dt'$$

$$y(t) \equiv \frac{v(t) - v_0}{v_0} = \frac{\varphi(t)}{2\pi v_0} = \text{归一化频率}$$

$$\varphi_{RMS}^2 = \int S_\varphi(f) df$$

$$S_\varphi(f) = \frac{\varphi_{RMS}^2}{BW} = \left(\frac{v_0}{f}\right)^2 S_y(f)$$

$$L(f) \equiv \frac{1}{2} S_\varphi(f) \quad \text{IEEE 标准 1139-1988}$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \rangle = \frac{2}{(\pi v_0 \tau)^2} = \int_0^\infty S_\varphi(f) \sin^4(\pi f \tau) df$$

精密振荡器的 5 种常用幂律噪声过程为

$$S_y(f) = h_2 f^2 + h_1 f + h_0 + h_{-1} f^{-1} + h_{-2} f^{-2}$$

$$\text{时间偏移} = x(t) = \int_0^t y(t') dt' = \frac{\varphi(t)}{2\pi v}$$

$S_\phi(f)$ 与单边带功率比的关系

假定在频率 f_m 上的正弦调相的“简单”情况。于是

$$\varphi(t) = \varphi_0(t) \sin(2\pi f_m t)$$

$$V(t) = V_0 \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)] = V_0 \cos[2\pi f_c t + \varphi_0(t) \sin(\pi f_m t)]$$

式中： φ_0 — 最大相位偏移； f_c — 载波频率

正弦函数的余弦通过以下恒等式将 $V(t)$ 的贝塞尔函数展开式假定为其在各频率上的分量

$$\cos(x + y) = \cos x \cos y - \sin x \sin y$$

$$\cos x \cos y = 1/2[\cos(x + y) + \cos(x - y)]$$

$$-\sin x \sin y = [\cos(x + y) - \cos(x - y)]$$

$$\cos(B \sin x) = J_0(B) + 2 \sum J_{2n}(B) \cos(2nx)$$

$$\sin(B \sin x) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(B) \sin[(2n+1)x]$$

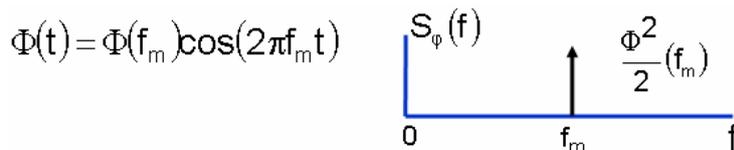
经过一些复杂的代数运算后，将在下一页证明 $S_V(f)$ 和 $S_\phi(f)$ 。于是

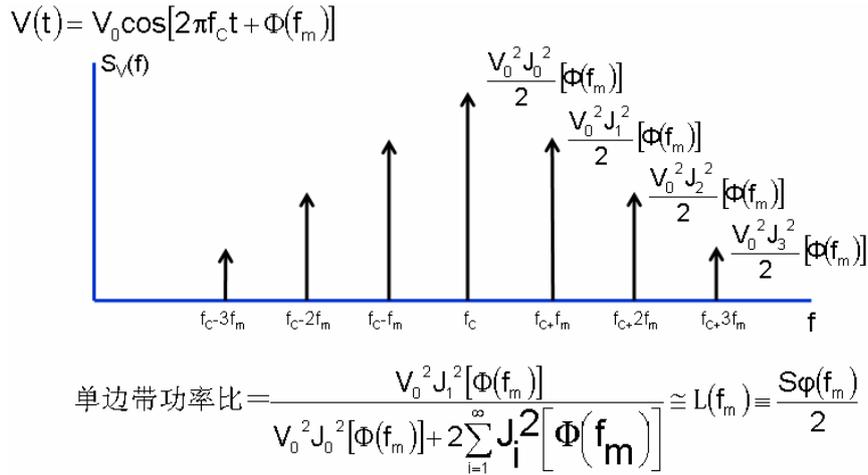
$$\text{在 } f_m \text{ 时的单边带功率比} = \frac{V_0^2 J_1^2[\Phi(f_m)]}{V_0^2 J_0^2[\Phi(f_m)] + 2 \sum_{i=1}^{\infty} J_i^2[\Phi(f_m)]}$$

若 $\Phi(f_m) \ll 1$ ，则 $J_0 = 1$ ， $J_1 = 1/2\Phi(f_m)$ ， $J_n = 0$ ($n > 1$ 时)，则

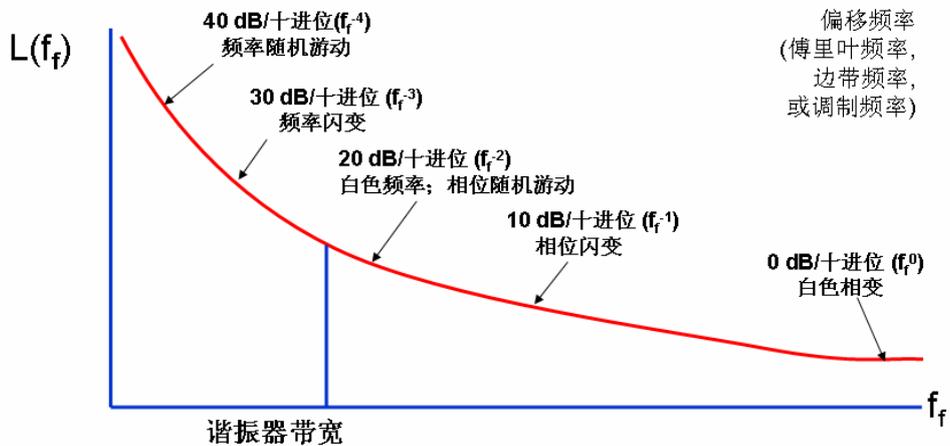
$$\text{单边带功率比} = L(f_m) = \frac{\Phi^2(f_m)}{4} = \frac{S_\phi(f_m)}{2}$$

$S_\phi(f)$ 、 $S_V(f)$ 和 $L(f)$





相位噪声类型



晶体振荡器的噪声

谐振器是靠近载频的主要噪声源；振荡器电路是远离载频的主要噪声源

N 次倍频使相位噪声增大 N^2 (即 $20 \log N$, dB)

在许多应用中，振荡引起的“噪声”比所有其他噪声都强（见后面的加速度效应部分）

靠近载波（在谐振器带宽内）时， $S_y(f)$ 呈 $1/f$ 变化， $S_\Phi(f)$ 呈 $1/f^3$ 变化，其中 f 为偏离载波频率 ν 。

$S_\Phi(f)$ 也呈 $1/Q^4$ 变化，其中 Q 为无载 Q 值。由于 $Q_{\max} \nu = \text{常数}$ ，故 $S_\Phi(f) \propto \nu^4$ 。

$$(Q_{\max} \nu)_{BAW} = 1.6 \times 10^{13} \text{ Hz}; (Q_{\max} \nu)_{SAW} = 1.05 \times 10^{13} \text{ Hz}$$

在时域中，噪声本底为 $\sigma_y(\tau) \geq (2.0 \times 10^{-7}) Q^{-1} \approx 1.2 \times 10^{20} \nu$ (ν 的单位为 Hz)。在

$\sigma_y(\tau)$ 呈 τ^{-1} 和 $\tau^{-1/2}$ 变化 ($\tau^{-1/2}$) 时，

$$\sigma_y(\tau) \propto (QS_R)^{-1}$$

式中： S_R 为信噪比，即 Q 值和信噪比越高，短期稳定度越好（而在频域时，相位噪声远离载频）。

当振荡器电路时重要的噪声源时，振荡器的 Q 值对噪声有影响。

噪声本底受热噪声影响，在 290° K 时，噪声功率 $kT = -178\text{dBm} / \text{Hz}$ 。

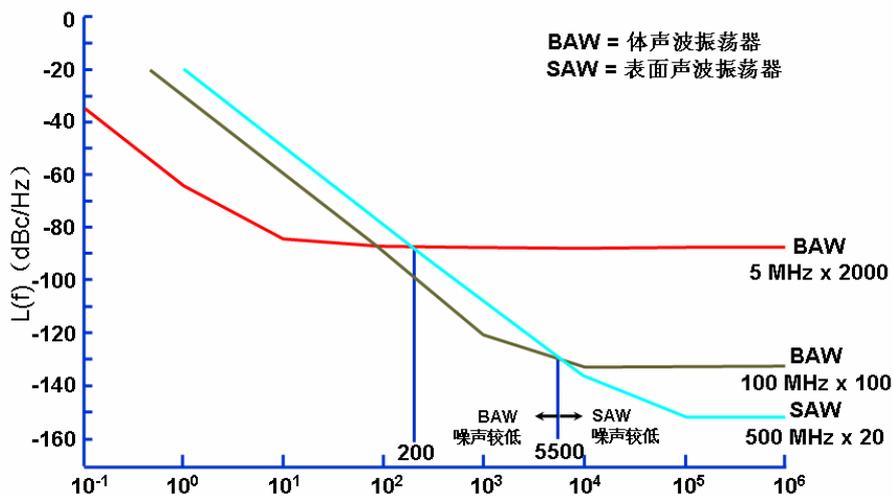
较高的信号电平将改善噪声本底，但不是近载频噪声。（实际上，高的激励电平一般都能降低近载频噪声）。

低噪声 SAW 与低噪声 BAW 用于倍频比较：

在 $f < 1\text{kHz}$ 时，BAW 噪声较小，在 $f > 1\text{kHz}$ 时，SAW 的噪声较小；两者均可用于锁相，以获得最佳性能。

低噪声 SAW 和 BAW 用于 10GHz 倍频

（在无振动环境中）

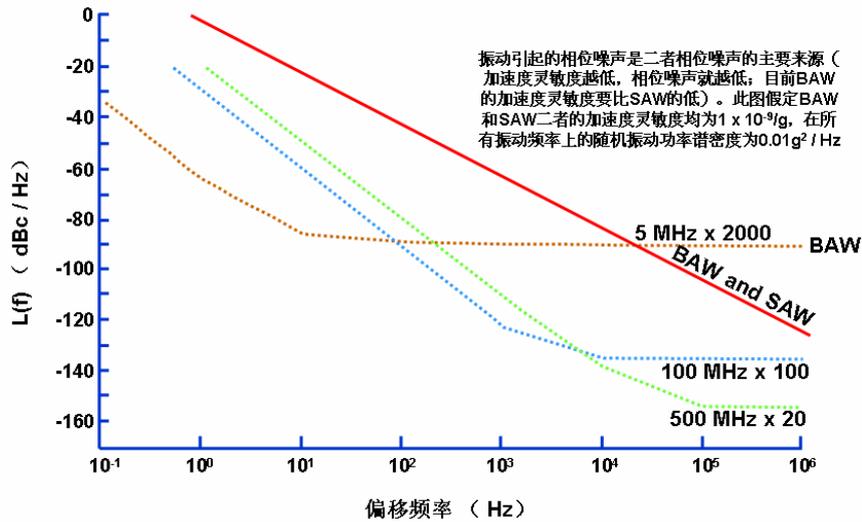


当需要微波（或更高）频率范围的低噪声时，有时可以使用 SAW 振荡器和电介质谐振振荡器。与放大（体声波）石英振荡器相比，这些振荡器能在减弱接近于载波、弱老化和弱温度稳定性的弱噪声的情况下提供远离载波的更低的噪声。由于这些设备能被用于更高的驱动力，因此能提供更高的信噪比并且由于能被用于更高的频率，因此由于频率增大 N 次则会至少损失“ $20\log N$ ”。 $L(f) = -185\text{dBc/Hz}$ 噪声本底（载波为 400KHz）在 400MHz SAW 振荡器中实现。当然，假如这种情况用于高频体波振荡器时，这种噪声本底只能在自由振动环境的偏移频率影响下实现。

上图显示的是三种 10GHz 倍频低噪声振荡器的相位噪声（没有振动）：5MHz 体声波振荡器，100MHz 体声波振荡器和 500MHz 声表面波振荡器。SAW 振荡器更好远离载波。BAW 振荡器更好的接近于载波。

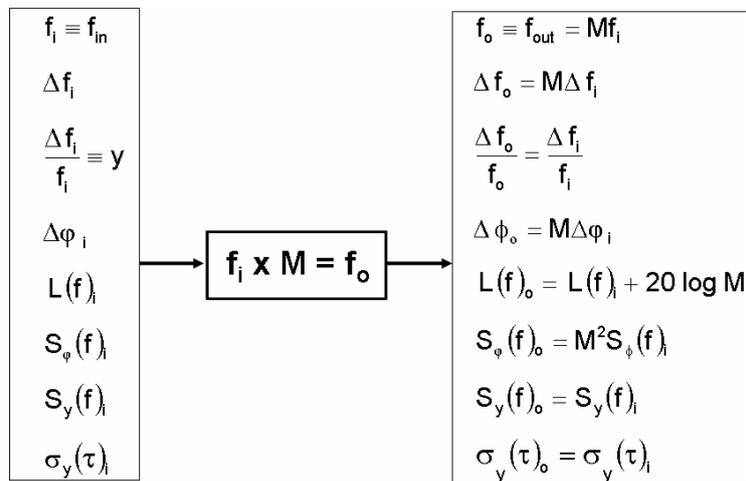
低噪声 SAW 和 BAW 用于 10GHz 倍频

(在振动环境中)



图中的实线表示 BAW 和 SAW 振荡器在振动环境中的相位噪声。点线表示不在振动环境下的相位噪声。在振动环境下，加速度敏感性决定了相位噪声。如上图所示，如果 BAW 和 SAW 振荡器具有相同的加速度敏感性，则在 10GHz 后，它们的相位噪声水平也相同。

倍频效应



注意： $y = \frac{\Delta f}{f}$ ， $S_y(f)$ 和 $\sigma_y(\tau)$ 均不受倍频影响。

TCXO 噪声

TCXO 的短期稳定性主要依靠温度，并且通常要比 OCXO 差，原因如下：

TCXO 晶体的频率与温度中斜率是随着温度的变化而变化。例如，斜率在约 20°C 时为

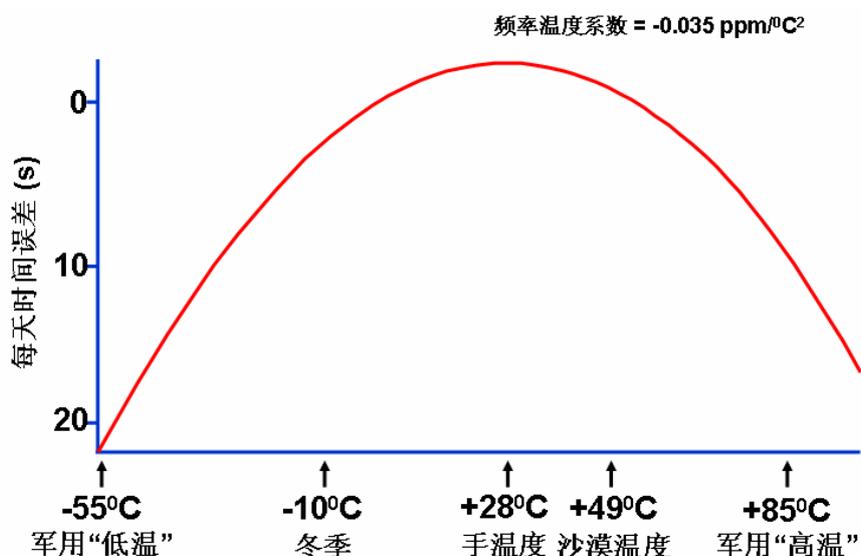
零，但在温度很高时为约 1ppm/°C。在实验室温度下，温度变化对频率的变化影响比较小，因此会有很好的稳定性，但是温度很高时，每 1 毫度 (=1/1000 度) 将会引起约 10^{-9} 频率变化。

AT 切石英晶体热瞬时敏感性使其不仅受温度起伏的影响还受温度变化率的影响（反之 SC 切石英晶体由于对热瞬时不敏感而用于制造精密的 OCXO）。在温度交替改变时，温度变化梯度将使会温度传感器（电热调节器）和石英晶体的问题变的更加严重。

典型的 TCXO 使用基模 AT 切石英晶体，即比使用在 OCXO 上有更低的 Q 值和更大的 C1。低的 Q 值使石英晶体的固有噪声更大，且大的 C1 会使振荡器更容易的受到电路噪声的影响。

AT 切石英晶体经常出现活动性下降（具体看本章后面的“活动性下降”）。在下降发生的那个温度，频率与温度的斜率会非常高，因此由于温度起伏引起的噪声也会非常大，例如， $\sigma_y(\tau)$ 下降 100x，则相位噪声有可能下降 30dB。而且在任何温度下都有可能出现活动性下降。

石英手表的准确度与温度的关系

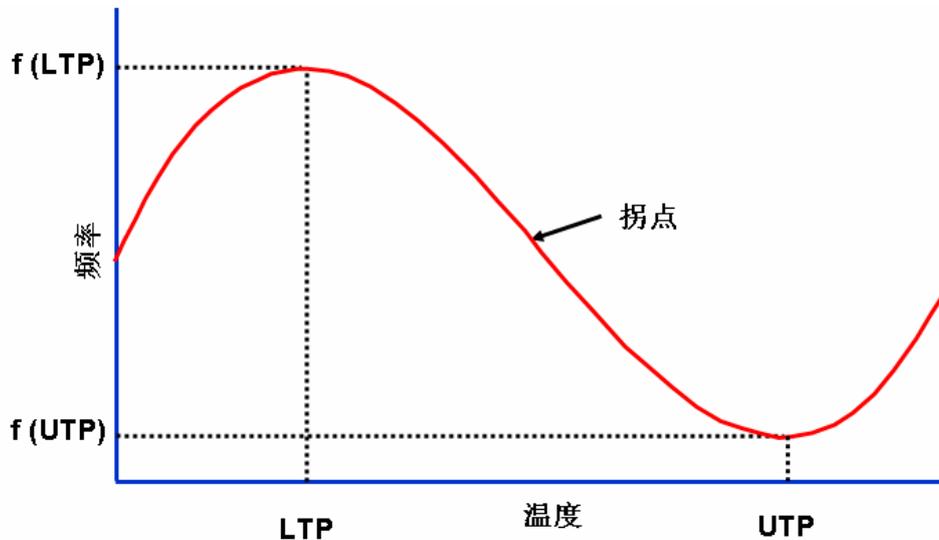


石英晶体（所有其他）振荡器的温度灵敏性。上图是石英手表中的温度对振荡器的影响。

通常即使是有意用旧的石英手表仍然相当精确，即每天带 16 个小时，不带 8 个小时。当手表不使用很长的一段时间则精确度会下降。使用温度离最佳温度越远，则误差时间会越大。在极端的温度下，如在 -55°C 的冷藏室或者在沸水的温度下，手表的误差时间会是每天 20s。

手表中的石英晶体的角度是按照零温度系数越 25°C 来切的。这已经被证明在通常的持续时间和温度下，当手表在手腕和离开手腕时都具有可能是最高的精确度。

频率温度特性



此频率温度特性是 AT 切和 SC 切谐振器的典型特性。上下翻转点 (LTP 和 UTP) 为

$\frac{df(T)}{dT} = 0$ 。拐点为 $\frac{d^2f(T)}{dT^2} = 0$ 。AT 切拐点温度约为 26°C，而 SC 切约为 96°C。

拐点的温度不仅由切角决定，同时谐振器的设计也是重要的因素。例如，SC 切基模拐点温度约为 105°C，而 SC 切 3 次泛音拐点温度约为 96°C。

谐振器频率与时间的决定因素

主要因素：

- 切角

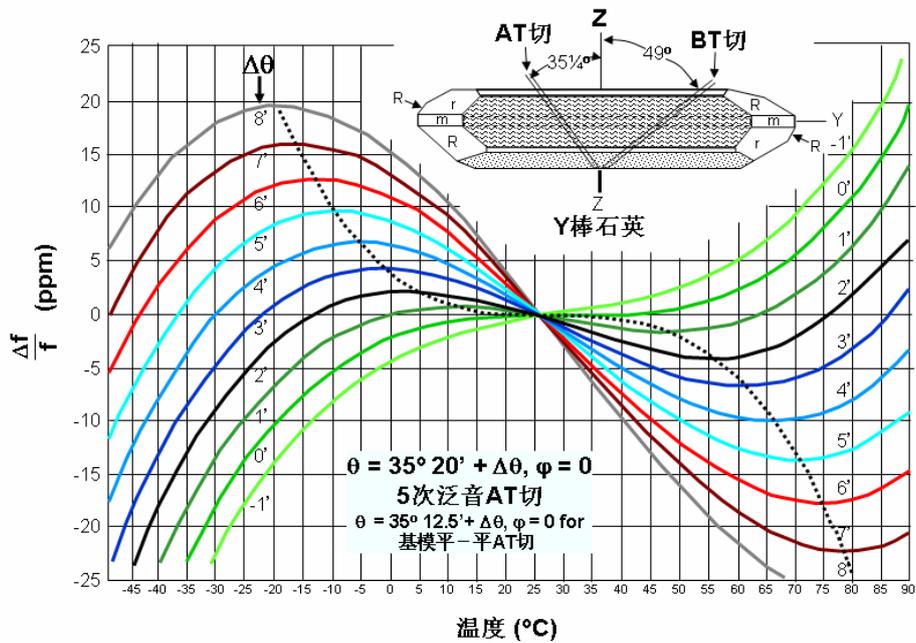
次要因素：

- 泛音
- 片子尺寸（外形、尺寸比）
- 材料杂质和应变
- 安装和焊接应力（大小和方向）
- 电极（尺寸、形状、厚度、密度、应力）
- 激励电平
- 干扰模
- 负载电抗（大小和温度系数）
- 温度和时间的关系
- 电离辐射

频率温度与切角的关系（AT 切）

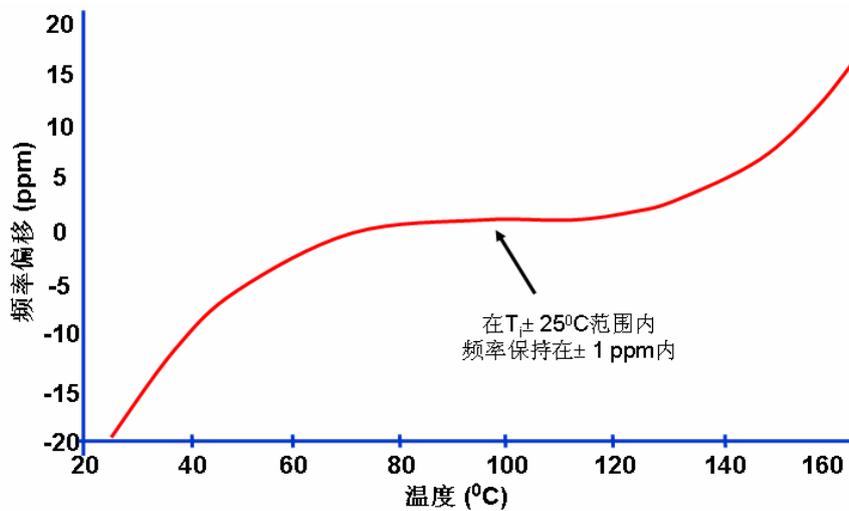
图表中的插图说明了石英棒的方向与 AT 切面和 BT 切面的关系。图表说明了当切角 θ 每增加 1 分，AT 切频率温度特性如何改变。

$\Delta\theta = 0$ 曲线描述了“参考角度”的频率温度特性，对于基模 AT 切谐振器切角为 35° 12.5'。在参考角度下，翻转点与拐点一致。参考角度随设计而变化，如泛音，平面倒圆等。



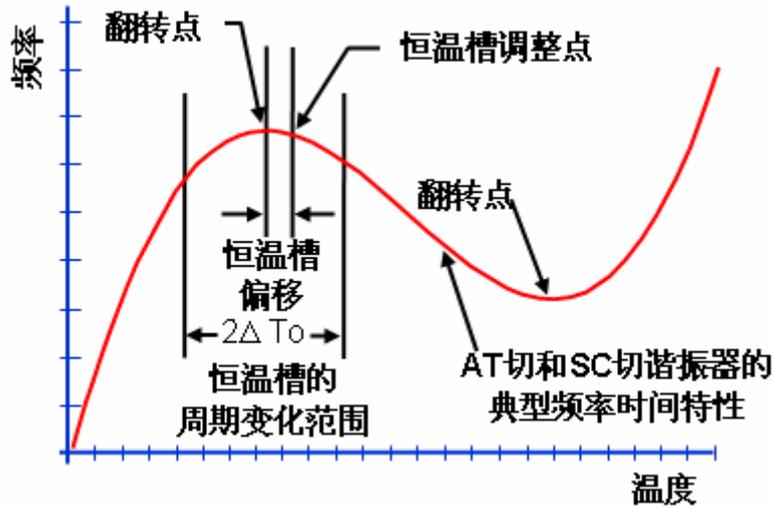
SC 切谐振器所要求频率与温度的关系

(OCXO 的应用)



如图所示，当 SC 切谐振器翻转温度与拐点温度一致时，在大的温度范围内频率温度斜率仍然较小。对于 OCXO 的应用来说这种频率温度特性较理想化，而且这种谐振器也很难制造。然而，使用角度修正或者重新造型法，制造出谐振器使其频率温度特性能接近与理想。

OCXO 恒温槽对稳定度的影响



恒温槽参数与 SC 切振荡器稳定度的关系 (假定 $T_i - T_{LTP} = 10^\circ\text{C}$)

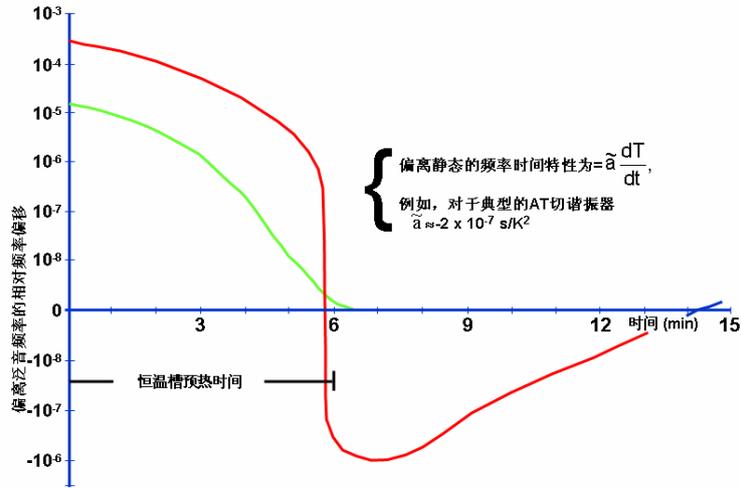
$T_i - T_{LTP} = 10^\circ\text{C}$		恒温槽温度循环变化范围 (毫度)			
		10	1	0.1	0.01
恒温槽偏移 (毫度)		4×10^{-12}	4×10^{-13}	4×10^{-14}	4×10^{-15}
		6×10^{-13}	4×10^{-14}	4×10^{-15}	4×10^{-16}
		2×10^{-13}	6×10^{-15}	4×10^{-16}	4×10^{-17}
		2×10^{-13}	2×10^{-15}	6×10^{-17}	4×10^{-18}
		2×10^{-13}	2×10^{-15}	2×10^{-17}	2×10^{-19}

由于经常考虑的是动态的频率温度效应，而不是静态温度效应。因此，列出振荡器的 AT 切和其它非热能瞬时补偿切型的比较表是无意义的。

恒温槽的稳定极限

- 已经能通过前馈补偿技术(测量外面实际温度和把电热调节器的极限点调整到预期和补偿)和双恒温槽实现使热量增加 105。比如，如果外面温度 $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ ，通过热能增加 105，则内部温度 $\Delta T = 1\text{mK}$ 。
- 放大器良好的稳定性约 $1 \mu\text{K/K}$
- 电热调节器的稳定性约 1mK/year 到 100mK/year
- 噪声低于 $1 \mu\text{K}$ (电热调节器的热噪声、放大器噪声和电桥电流的使用噪声)
- 温度起伏的量子极限约 1nK
- 好恒温槽的设计能够提供非常高的频率温度稳定性。

AT 切和 SC 切谐振器的预热

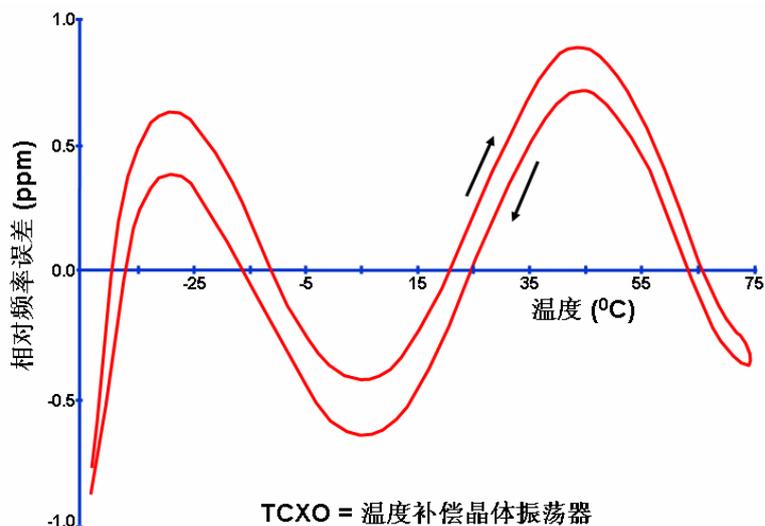


当晶体器件周围的温度交替变化时能引起热梯度, 例如, 通过封装处热能够流进或流出谐振器晶片的有效面积。静态频率温度特性通过由热梯度应力引起的热瞬时效应来修正。当打开一个 OCXO 时, 就会出现一定的热瞬时效应。上图就是显示了两个 OCXO 的频率输出情况, 每个 OCXO 都由一个恒温槽使其温度能在 6 分钟左右达到平衡。AT 切和 SC 切晶体各有一个恒温槽。AT 切的热梯度在恒温槽达到热平衡后的几分钟内出现大的负频率脉冲。SC 切晶体由于“应力补偿”, 因此对热瞬时应力并不敏感, 恒温槽稳定的同时频率达到平衡。

除增加 OCXO 的预热时间和使用 SC 切外, 热瞬时效应使调整 OCXO 恒温槽到预期的翻转点温度变的更加困难, 同时 OCXO 频率对恒温槽温度起伏更加敏感。

测试表明 TCXO 的补偿精确度也受到热瞬时效应的影响。当温度改变是, 热瞬时效应能时晶体频率温度特性失真, 导致出现表面滞后。温度变化的越快, 热瞬时效应对频率温度的影响就越大。

TCXO 的热滞后

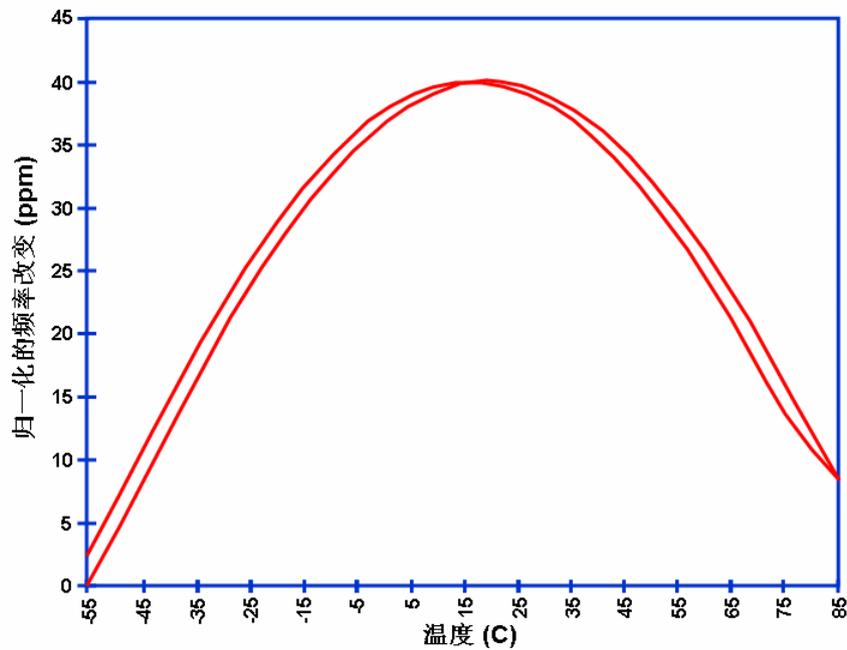


晶体振荡器的频率温度特性并不能随温度周期变化而重复精确描述。这种温度补偿晶体振荡器（TCXO）缺乏的可重复性，就称为“热滞后”，如图中所示，温度增加时的频率温度特性与温度下降时的频率温度特性不同。

频率温度特性在上升循环和下降循环的不同定义为滞后，并且通过在不同温度下不同的最大值来进行量化。通过在特定温度极限下的至少一个完整的准静态温度周期变化来确定滞后。滞后对 TCXO 的稳定性实现时一个主要的限制因素。

当温度周期变化范围在 $0^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 和 $-55^{\circ}\text{C}\sim +85^{\circ}\text{C}$ 时，典型 TCXO 的热滞后值范围在 1 ppm 到 0.1 ppm。已经在一些 SC 切（MCXO）谐振器中观察到热滞后小于 1×10^{-8} ，但典型 MCXO 谐振器热滞后在局部地方为 10^8 。

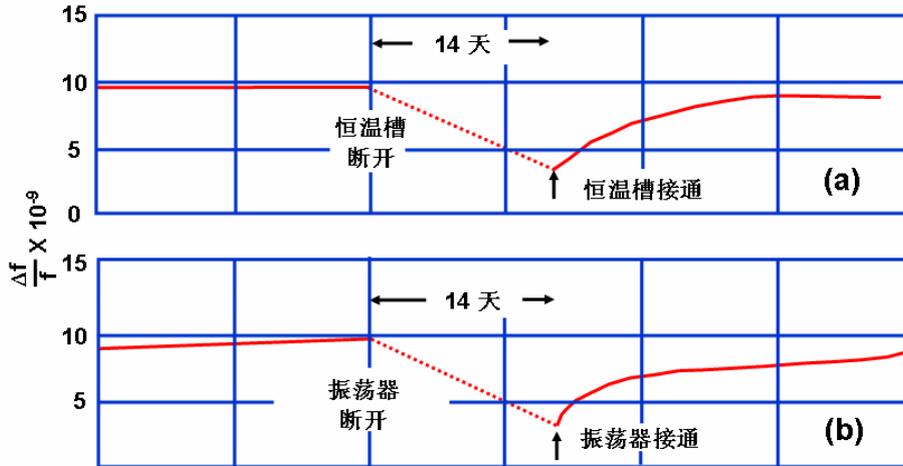
表面滞后



上图是一个温度循环为 -55°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 再到 -55°C 的 SC 切谐振器的频率温度特性，温度由外加在谐振器上的石英温度计来测量。当在相同的温度循环中，温度通过温度自测方法来确定，所以没有迟滞现象出现。

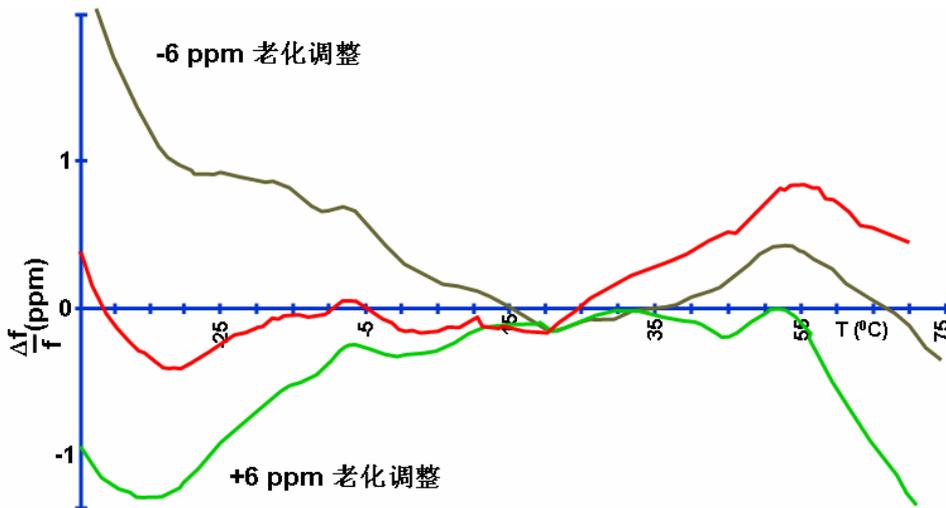
由于在温度循环中谐振器和温度计热滞后引起表面滞后现象（温度的变化率约 $0.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ）。指示器从左到右移动得到两条曲线，一条是观察表面，另一条是真实滞后。真实的滞后通常是曲线垂直移动，比如，在相同的温度下，两条曲线之间的频率是不同的。在表面滞后中，热梯度在频率温度变化中占了主要地位。

OCXO 的恒温开关特性



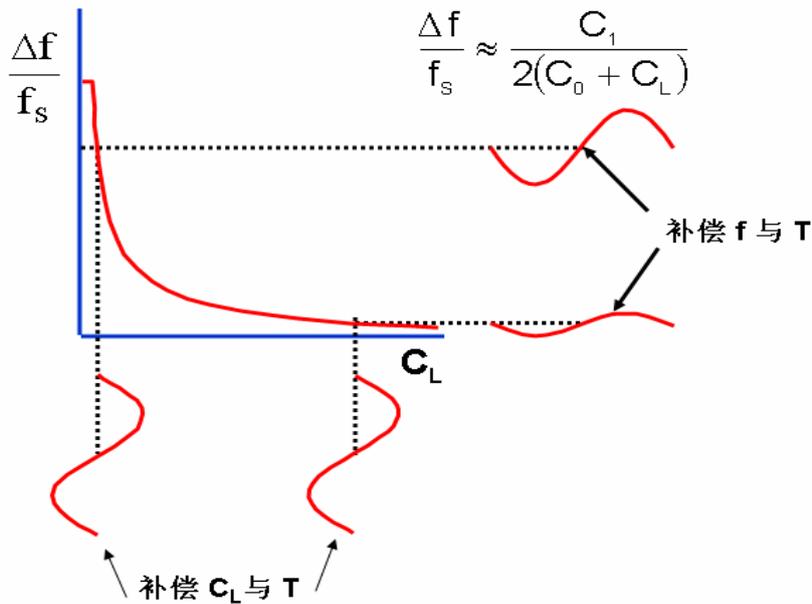
在图 (a) 中，振荡器连续工作，而恒温槽周期地通断电。在图 (b) 中，恒温槽连续工作，而振荡器周期地通断电。

TCXO 的微调效应



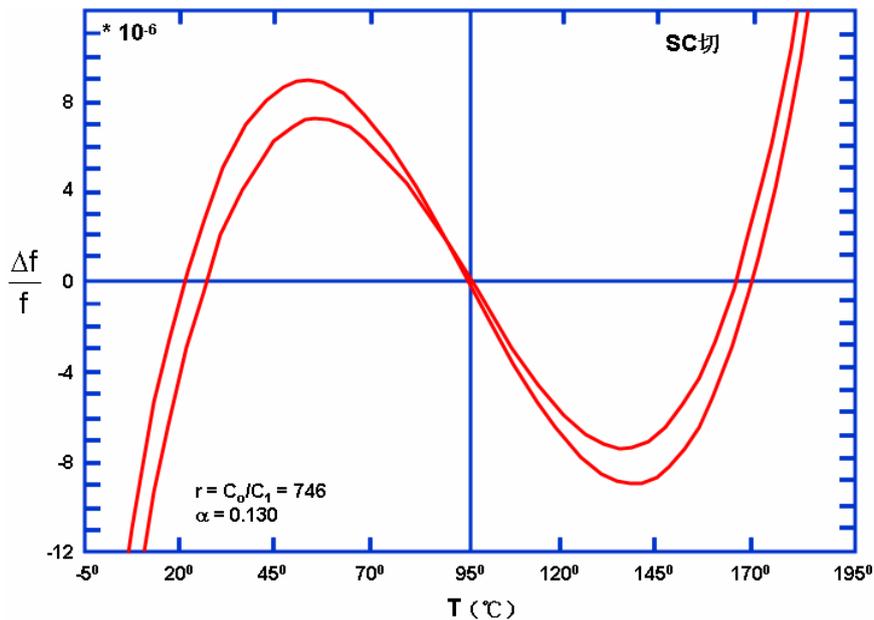
在 TCXO 中，利用对温度不灵敏的特性来补偿频率温度的变化，利用可变电抗来补偿 TCXO 的变化，调整老化对频率温度稳定度的效应就是“微调效应”。图中曲线所示为微调为零和微调为 ± 6 时频率温度稳定度为 0.5ppm 的 TCXO。(为了清楚起见，直接用曲线代替)。

为什么叫微调效应



C_L 与 T 变化相同，但 C_L 的值变化时，频率温度补偿会不同。

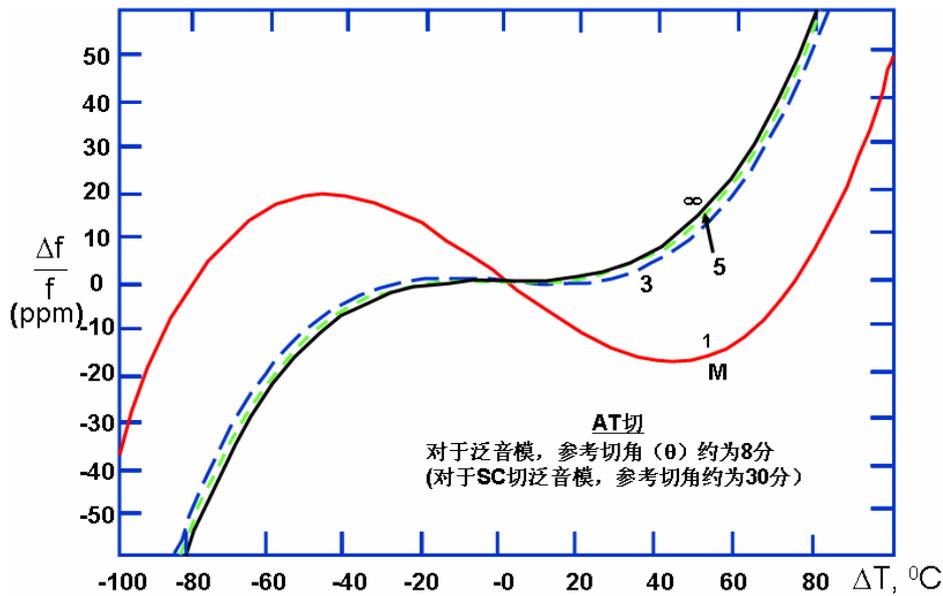
负载电容对频率温度特性的影响



负载电容 C_L 不仅改变了频率，同时改变了频率温度特性。图示两条曲线分别是有负载电容和无负载电容的相同谐振器的频率温度特性。 C_L 使频率温度旋转与减小切角相似（由于结合了谐振器和 C_L 的弱压电效应）。因此 C_L 在所有温度下都使频率上升（为了清楚起见， f_L 用曲线代替），也使频率温度又了更小的旋转切角，即，它减小了转折点到转折点的频率和温度。

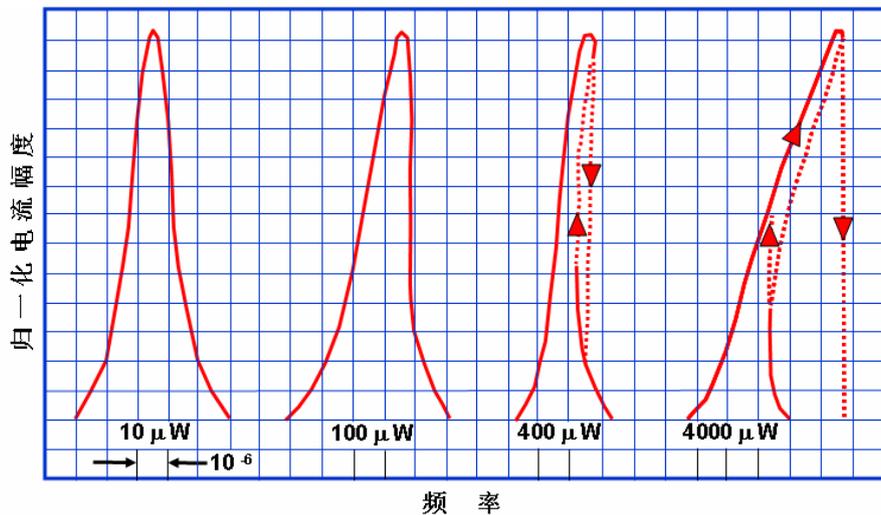
C_L 的温度系数能极大的放大频率温度转度。

谐波对频率温度特性的影响



图示关于谐振器在基模，3次泛音和5次泛音下的频率温度特性。基模与3次或更高泛音的频率温度特性不同。3次泛音下的频率温度特性与5次泛音仅有微小的差别（由于泛音次数越高，压电效应越弱）。泛音下的频率温度与减小切角相似。比如，对于AT切来说，3次泛音下的频率温度特性与将基模下的谐振器的切角减小8分是相同的。

幅频效应

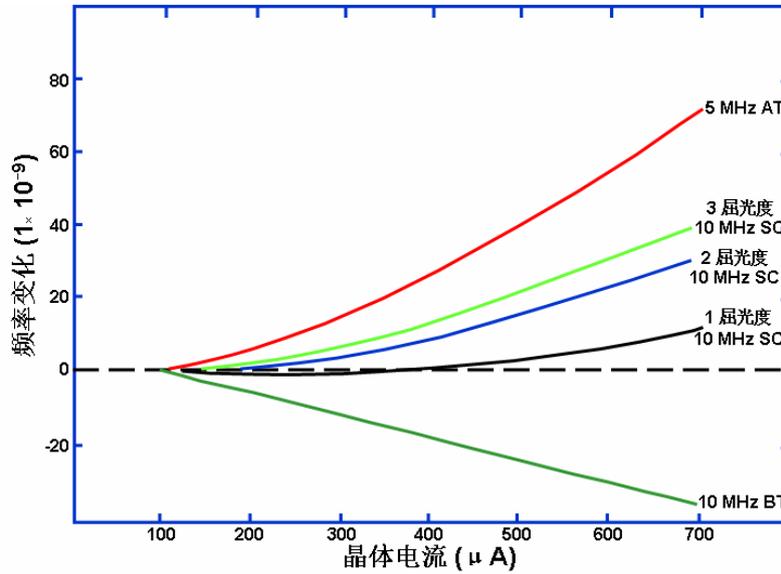


在高激励电平下，由于石英的非线性使谐振曲线不对称。

当驱动电压增大时，通过扫频，在石英的非线性常数的影响下使谐振曲线屈服。每条曲线的顶峰是谐振频率。图示AT切对于更高频率下的屈服，即它的行为像硬弹簧（硬弹簧的随着唯一的增加，刚度也增大）。其它切型的行为像软弹簧；在低频下屈服。 $\Delta f/f = aI^2$ ，其中a的通常范围 $0.02/A^2$ 到 $0.2/A^2$ ；a与谐振器的设计相关一切角、泛音和板厚等。

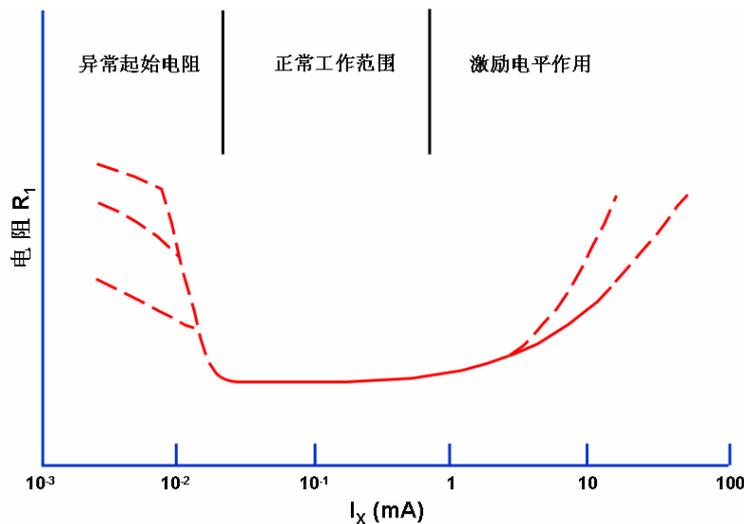
在高激励电平下，幅频曲线是函数值的三倍，但通过实验方法只能得到最高和最低的值（分别是增大电压和减小电压）。当前幅频曲线中，在谐振峰周围，如果增大或减小驱动电压（或频率）会出现中断。

频率与激励电平的关系



频率正比与电流幅度的两倍； $f = f_0 (1 + aI^2)$ ，这里 a 是设计常数，即根据谐振器类型选择适当的非线性弹性常数， I 是电流。

激励电平与电阻的关系

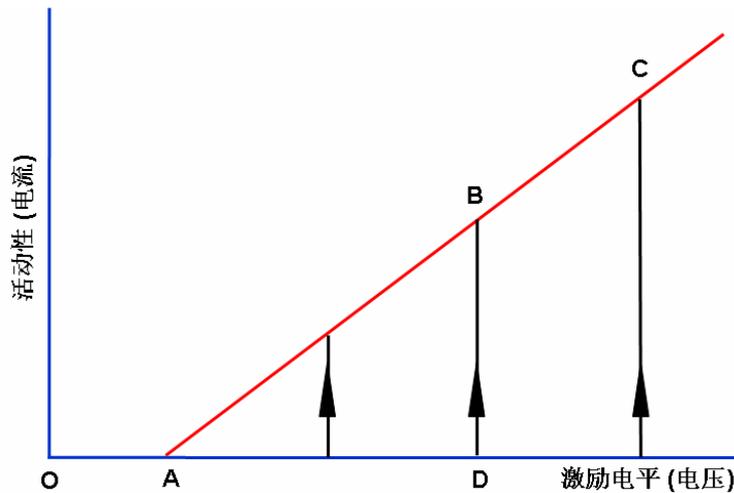


在低激励电流高电阻和下节的“辅助电平”效应，由于都是在谐振器通过最后的加工测试后才出现和引起故障而棘手。当振荡器电路的增益不足时这种效应能阻碍振荡器启动。在一些谐振器中，这种效应能通过应用高激励电平来“解决”，然而，这并不是长久的办法。在长时间应用高激励电平后这种效应还是会再出现。（增大激励电平能增大谐振器表面振动

幅度，清除表面污染。然而，当高激励应用与密封焊接的谐振器时，污染物仍然在周围而且一段时间后沉积)。

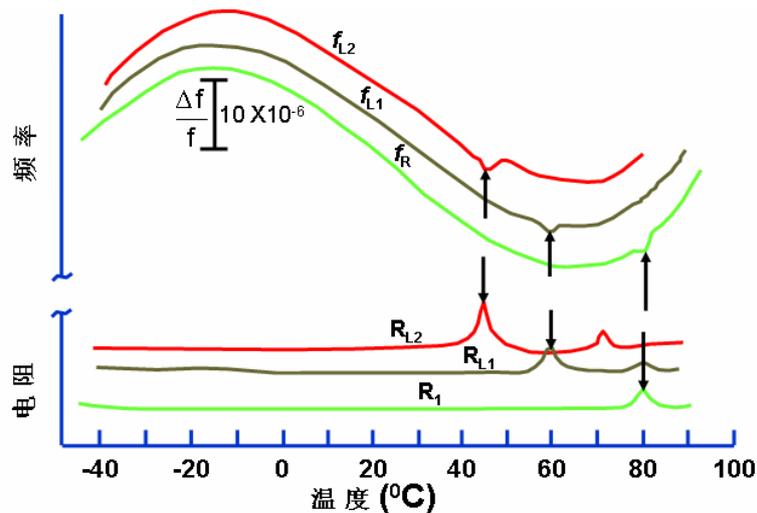
在谐振器焊接密封前，清除小微粒和处理其它表面污染，即通过恰当的刻蚀和清洗谐振器能有效的减弱这种效应的影响。电极的不完整性，如擦痕，突起和不规则形状也都能产生这种效应。

激励效应的辅助电平



一个“良好”的石英在没有滞后的情况下会沿着路径 OABCBAO 走。而一个“差”的石英会沿着路径 OADBCBAO 走：因此称为“辅助驱动电平”。通过再次增加激励，这种巨大的效应有减弱的趋势，但是一种非常不规则和不可逆的方式。这种效应通常由微粒污染、电极不牢固或其它平面缺陷引起。

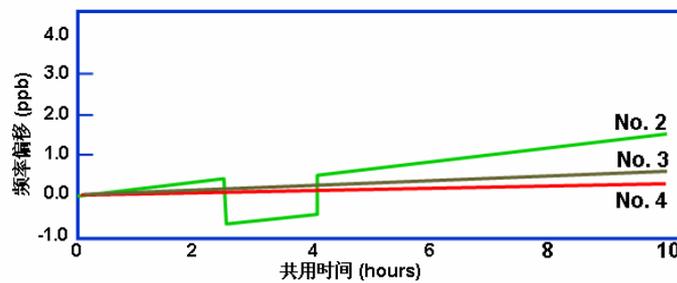
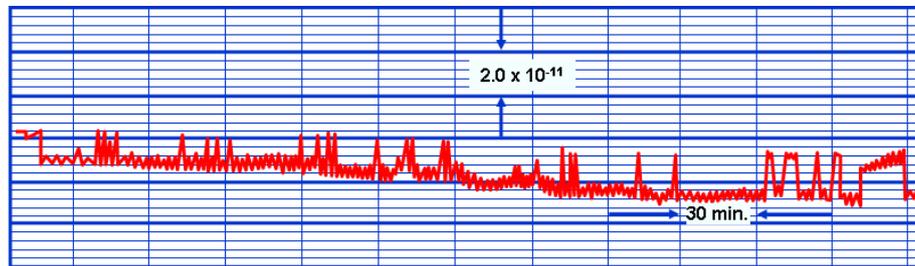
活动性下降



有负载电容和无负载电容工作时频率温度特性的活动性下降。(为了清楚起见，直接用曲线代替)。下降温度时 C_L 的函数，这表明下降是由负温度系数大的模(多半是扭曲模)引

起的。也可以参看第 3 部分中“寄生模与温度的关系”。

频率跃变



当长时间留心观察振荡器频率时，偶尔能发现频率跃变。在精确的振荡器中，跃变的通常范围是 10^{-11} 到 10^{-9} 。跃变在通常用途的更大。在相同的振荡器中跃变一天能出现很多次，而有些这少于一天一次。频移能正能负。机理（和方法）都没有很好的了解。

引起的原因被认为有，包括谐振器（寄生谐振，应力消除，表面和电极形状的变化）；噪声影响和无源电路元件，就像在固态元件和电阻器中观察到的双稳态的“脉冲噪声”。这种效应依赖于谐振器激励电平。在一些元件中，频率跃变能在一定激励电平中产生。也受到老化的影响。一定的老化元件的跃变角度要小于新元件。最小平面和电极的不完整也能使跃变角度减小（例如，石英通过不蚀刻或蚀刻很小时的跃变比深度蚀刻的大；分两个步骤进行电镀和频率调整引起的跃变比“一次完成”的电镀要大）。

环境效应也产生跃变。磁场、压力、温度和瞬时功率能产生突然频移，就像打击和振动。这并不是不常见，例如，在卡车经过建筑物、重型仪器搬动、箱子掉落等时引起的振动水平大于 $0.01g$ 。[注意，例如 $0.02g \times 10^{-9}/g = 2 \times 10^{-11}$]

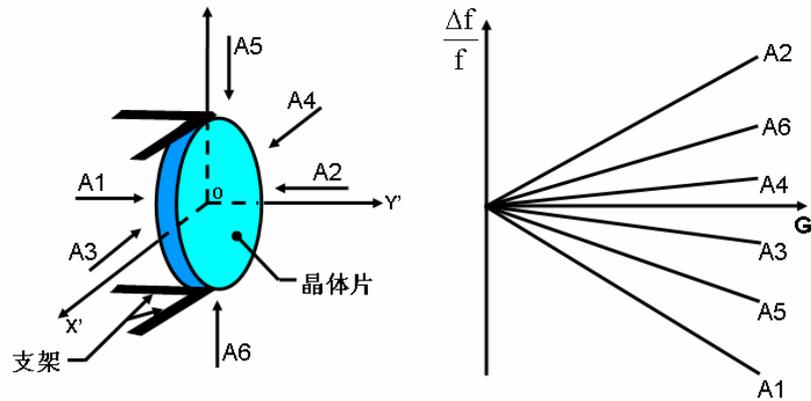
加速度与频率变化的关系

频率漂移是与加速度的大小和方向成函数关系的，并且在至少 $50g$ 以下是与加速度的大小成线性关系的。

当谐振器在有加速度的情况下，应变由于加速度作用能引起频率变化。在振动情况下，随时间变化的应变引起随时间变化的频率变化，即振动引起频率调节。

在高加速度下由于封装结构变形影响下频率和加速度具有非线性的关系。温度与加速度

敏感性也成函数关系。



加速度等级和效果

环境	加速度 标准级* (g's)	$\Delta f/f \times 10^{-11}$ 对于 $1 \times 10^{-9}g$ 振荡器
建筑物**, 静止不动	0.02 rms	2
拖拉机、拖车 (3-80 Hz)	0.2 最大	20
装甲车	0.5 ~ 3 rms	50 ~ 300
海上静稳的船	0.02 ~ 0.1 最大	2 ~ 10
激浪中的船	0.8 最大	80
螺旋桨飞机	0.3 ~ 5 rms	30 ~ 500
直升机	0.1 ~ 7 rms	10 ~ 700
喷气机	0.02 ~ 2 rms	2 ~ 200
导弹 (助推段)	15 最大	1,500
铁路	0.1 ~ 1 最大	10 ~ 100
太空船	~ 0.2 最大	~ 20

*振荡器受到的加速度等级取决于振荡器的安装方法和安装位置。平台谐振能够大大地增大加速度等级。

**建筑物振动对噪声测量有很大影响。

加速度影响“一切”

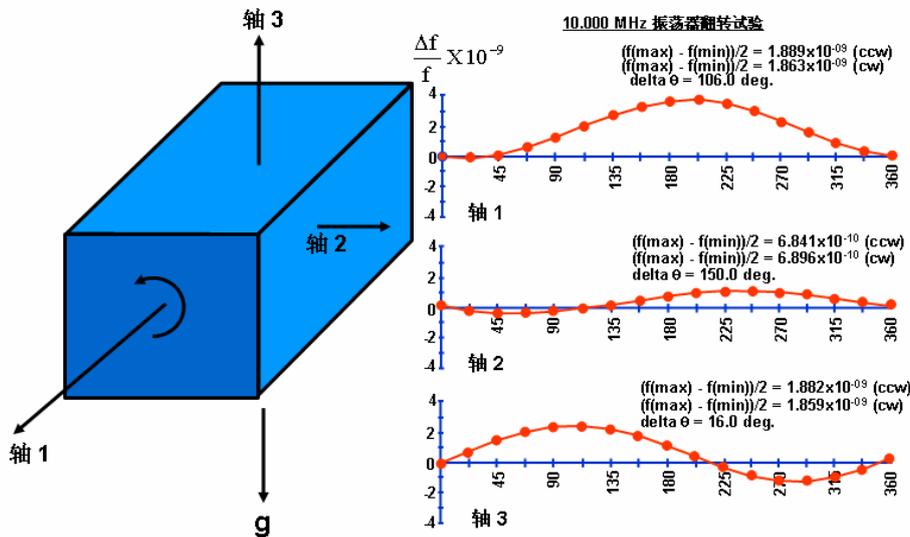
加速度 \Rightarrow 力 \Rightarrow 变形 (应变) \Rightarrow 材料和仪器性质变化

例子:

- 石英晶体谐振器频率;
- 放大增益 (应变改变半导体带宽结构);
- 激光二极管发射频率;
- 光学性质—光纤折射率 (声光学);
- 空腔谐振器频率;
- 双谐振振荡器频率 (应变改变介电常数);
- 原子钟频率;
- 漂移电抗;

- 时钟速度（相对论效应）。

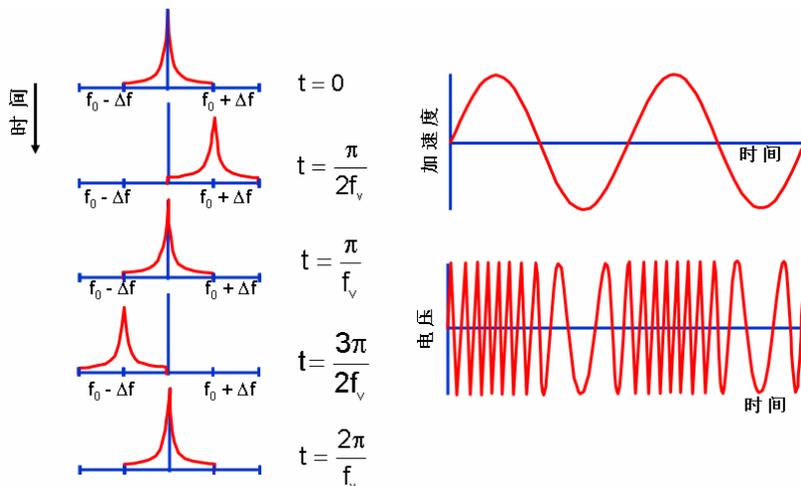
2g 翻转试验



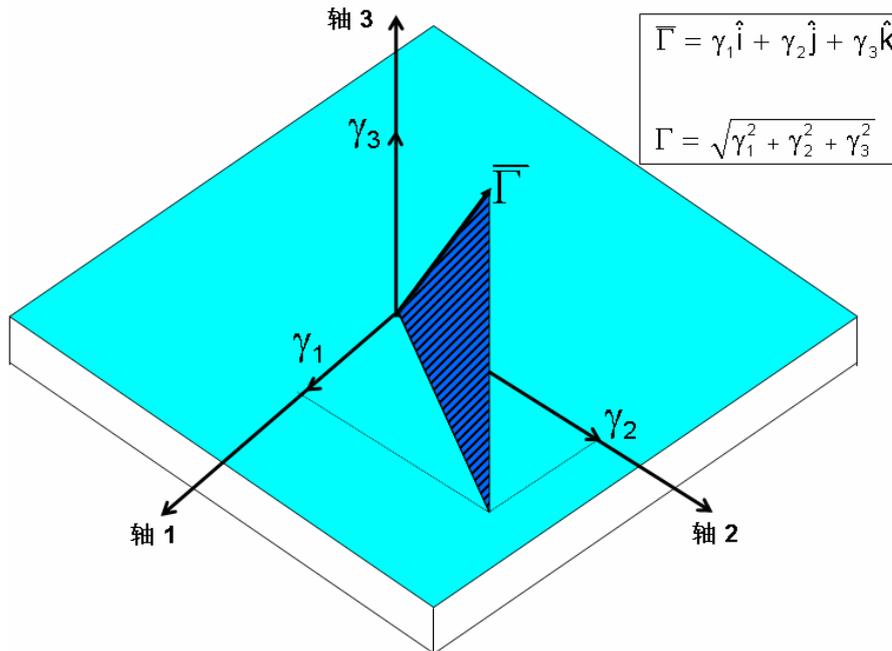
当振荡器相对与水平轴旋转 180° 时，重力场和单位矢法线的向量积使振荡器的最初“顶端”从 $-1g$ 变化到 $+1g$ ，即 $2g$ 。一个简单的“ $2g$ 翻转”实验有时用来测试振荡器的加速度敏感性。当振荡器在地球重力场下绕三个正交轴进行旋转时，能得到振荡器频移的真实数据。对于每一条曲线，旋转轴都是水平的。每条正弦形状的曲线都是加速度敏感性向量和重力加速度向量间的余弦角按比例相乘的结果。

当测试小角度增量而不是简单的 180° 旋转时，由于许多振荡器随偏位角的不同出现不同的频率，就不能不加选择的就使用 $2g$ 翻转实验。例如，不规则可以由振荡器内部空气对流引起的温度变化，元件的微小移动，电路板和电线。当频率与偏位角关系是非正弦时，简单的 $2g$ 翻转实验会产生巨大的误导结果。

正弦振动调制频率



加速度灵敏度矢量

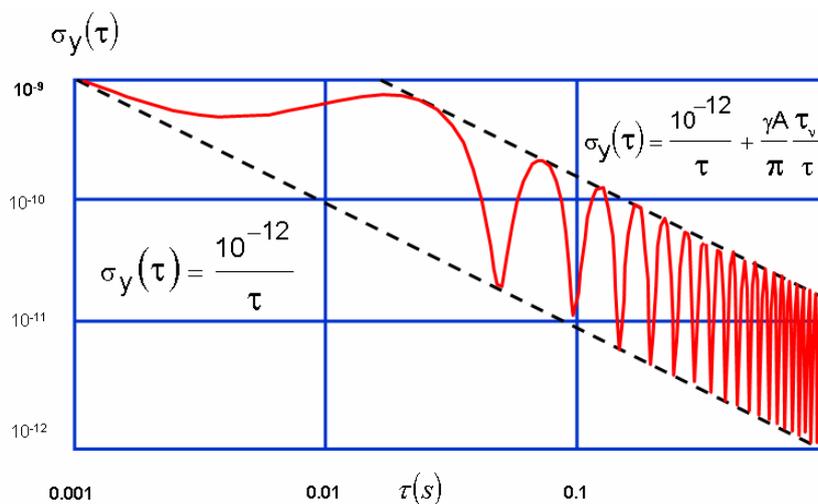


加速度灵敏度是一种矢量，即当加速度是沿着加速度矢量方向时，加速度引起的频率偏移最大。

以经验上来说，石英晶体振荡器的加速度敏感性是一种矢量。当加速度与加速度灵敏度矢量平行时，加速度振荡器的频率最大。对于加速度灵敏度矢量的法平面上的任意加速度引起的频率偏移为零，当加速度反平行于加速度矢量方向是，频率偏移为负。

对于精密石英振荡器的通常|G|值的范围 $10^{-9} / g$ 到 $10^{-10} / g$ 。对于通常的加速度情况下|G|与加速度幅度无关（即最小到 20g）；然而，在高加速度的情况下能引起变化，如在支架结构中，G 是加速度的函数。G 也是温度的函数。

振动引起的阿仑方差递减



振动会调制频率，使短期稳定度下降。正弦振动引起的减小，是随着图中所示平均时间变化的。由于一个完整的正弦波的平均数为零，所以平均时间为振动周期的整数倍并递减为零。振动最大值出现在平均时间是振动半周期的奇数倍。单振动频率引起的 $\sigma_y(\tau)$:

$$\sigma_y(\tau) = (\Gamma \cdot \mathbf{A} / \pi) (\tau_v / \tau) \sin^2[\pi(\tau / \tau_v)]$$

其中 τ_v 是振动周期， τ 是测量的平均时间， Γ 是加速度灵敏度向量， \mathbf{A} 是加速度。

振动引起的相位偏移

振动调制信号的相位为

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + \left(\frac{\Delta f}{f_v} \right) \sin(2\pi f_v t)$$

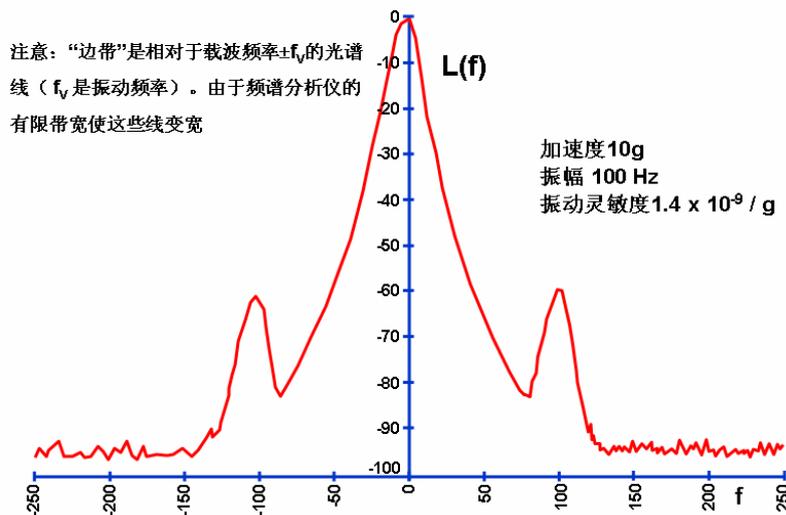
当振荡器受到正弦振动时，最大相位偏移为

$$\Delta\varphi_{peak} = \frac{\Delta f}{f_v} = \frac{(\bar{\Gamma} \cdot \bar{A}) f_0}{f_v}$$

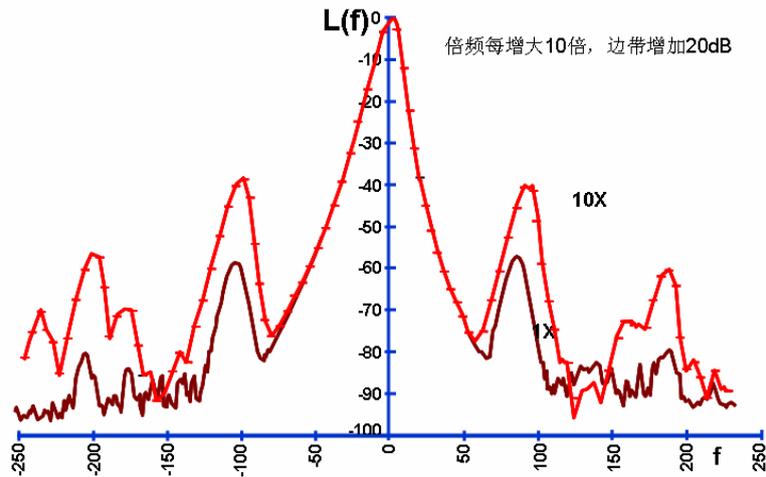
示例：如果 $f_0=10\text{MHz}$ ， $1 \times 10^{-9}/\text{g}$ 的振荡器受到 10Hz 幅度为 1g 的正弦振动，则振动引起的最大相位偏移为 $1 \times 10^{-3}\text{rad}$ 。如果这种振荡器作为 10GHz 雷达系统的振荡器，则最大相位偏移在 10GHz 时为 1rad 。对于许多系统来说，这样大的相位偏移可能是灾难性的，这样的情况下就要使用锁相环（PPL）或移相键控（PSK）。

振动引起的边带

对于小的调谐指数 β ，即 $\beta \equiv \Delta f/f_v = (\Gamma \cdot \mathbf{A}) f_0/f_v < 0.1$ ，正弦振动产生光谱线相对与载波为 $\pm f_v$ ，这 f_v 是振动频率。对于理想的正弦波，“边带”是光谱线（即 Δ 函数）而不是谱线密度。



倍频后



正弦振动引起的相位噪声

正弦振动在距载荷 $\pm f_v$ 处产生谱线，其中 $\pm f_v$ 为振动频率。

$$L(f_v) = 20 \log \left(\frac{\bar{\Gamma} \cdot \bar{A} f_0}{2 f_v} \right)$$

即若 $|\bar{\Gamma}| = 1 \times 10^{-9} / g$ ， $f_0 = 10 \text{MHz}$ ，则即使振荡器工作在静态而完全无噪声，仅1g的正弦振动频率引起的相位“噪声”（即谱线）将为

振动频率 (Hz)	$L'(f_v)$ (dBc)
1	-46
10	-66
100	-86
1,000	-106
10,000	-126

随机振动引起的相位噪声

随机振动对相位噪声的贡献为

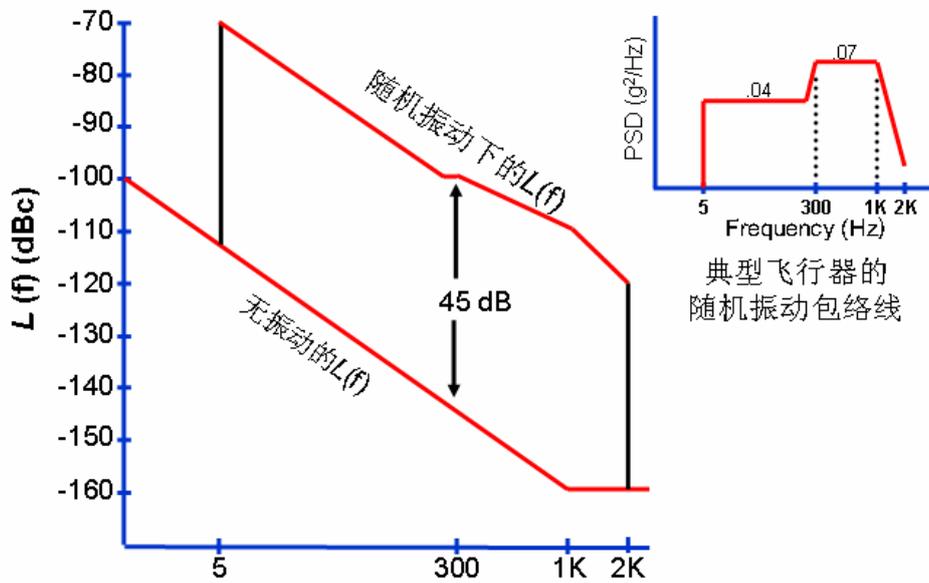
$$L(f) = 20 \log \left(\frac{\bar{\Gamma} \cdot \bar{A} f_0}{2 f_v} \right)$$

式中： $|\bar{A}| = [(2)(PSD)]^{1/2}$ ，即若 $|\bar{\Gamma}| = 1 \times 10^{-9} / g$ ， $f_0 = 10 \text{MHz}$ ，则即使振荡器工作在静态而完全无噪声，仅振动 $PSD = 0.1 g^2 / \text{Hz}$ 为

偏移频率 (Hz)	L'(f) (dBc/Hz)
1	-53
10	-73
100	-93
1,000	-113
10,000	-133

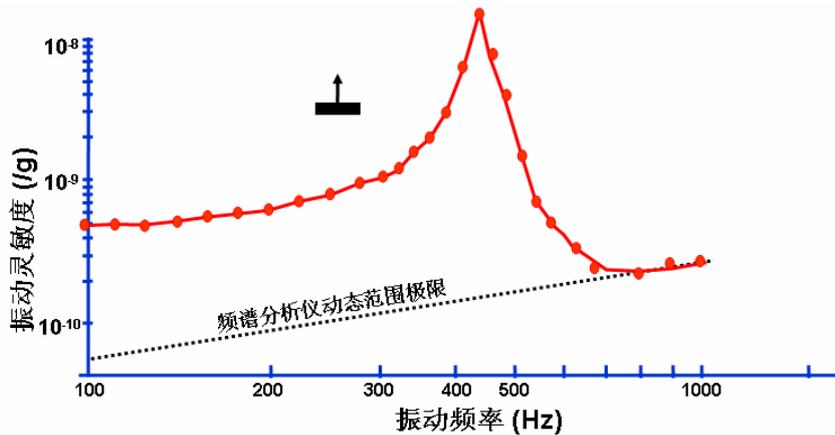
随机振动引起的相位噪声

振动下的相位噪声为 $\bar{\Gamma} = 1 \times 10^{-9} / g$, $f = 10\text{MHz}$



加速度灵敏度与振动频率的关系

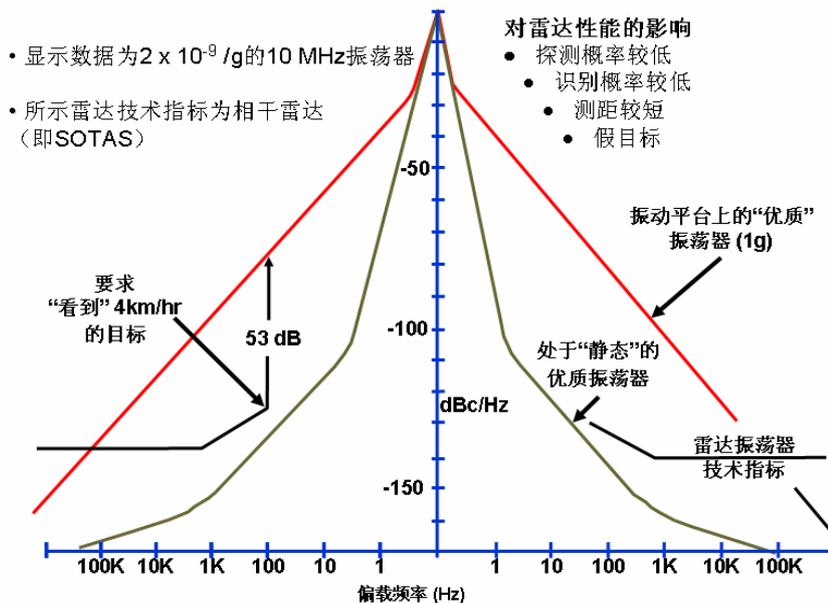
加速度灵敏度 Γ 可以根据振动引起的边带进行计算。在理想的振荡器中，灵敏度与振动频率是一个常数，但实际振荡器会出现谐振。在 424Hz 处的谐振将灵敏度增大了 17 倍。最好的办法是测量在多种振动频率下的 Γ 来显示谐振。



石英谐振器的加速度灵敏度

谐振器的加速度灵敏度从最好的商用 SC 切晶体的 $10^{-10}/g$ 到音叉型手表晶体的 $10^{-7}/g$ 。曾对一宽范围谐振器进行实验，包括 AT、BT、FC、IF、SC、AK 和 GT 切型；5MHz 次泛音到 500MHz 基模倒台型谐振器；用天然石英、人造石英和电清洗人造石英制作的谐振器；各种形状和装架（包括矩形 AT 切）；所有谐振器的测试结果均接近 $3 \times 10^{-10}/g$ 。另一方面，很少发现谐振器的灵敏度低于 $1 \times 10^{-10}/g$ ，这表明观察到的加速度灵敏度并不是由于任何固有缺点引起的。目前的理论和试验数据表明，至今能够适当加以控制的主要变量是模的形状和位置（即振动分布的幅度）以及与振动模相关的应变分布。理论上，当支架完全对称时考虑模，加速度敏感度为零，但是这种理想情况有一点小的变化，则会引起一定的敏感度。在解决加速度灵敏度问题以前，对于有限的频率范围来说，加速度的补偿和振动不可能达到 $1 \times 10^{-10}/g$ ，并且要付出一些代价。

振动引起的相位噪声减小



振动隔离

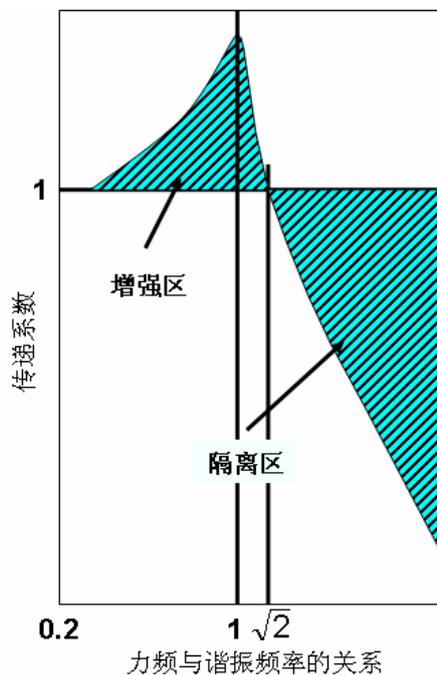
一个简单的振动隔离系统自我调节结构。能有效的隔离高频（沿着一个方向），但在小于其谐振频率时增强振动。而且，隔离系统在低频和高加速度是必须有大的位移。

对于正弦振动，振动位移 $d = d_0 \sin(2\pi ft)$ ，加速度为 $a = -d_0(2\pi f)^2 \sin(2\pi ft)$ ，其中 d_0 是最大位移， f 是振动频率。因此 $d_0 = 0.50 G/f^2m$ ，为峰峰值，这里加速度 G 的单位是 g 。

例如峰峰值位移在 1Hz 和 1g 下是 0.5m。

在某些应用上，噪声会带来特别的麻烦。例如，在飞机雷达应用上需要相当低噪声振荡器，

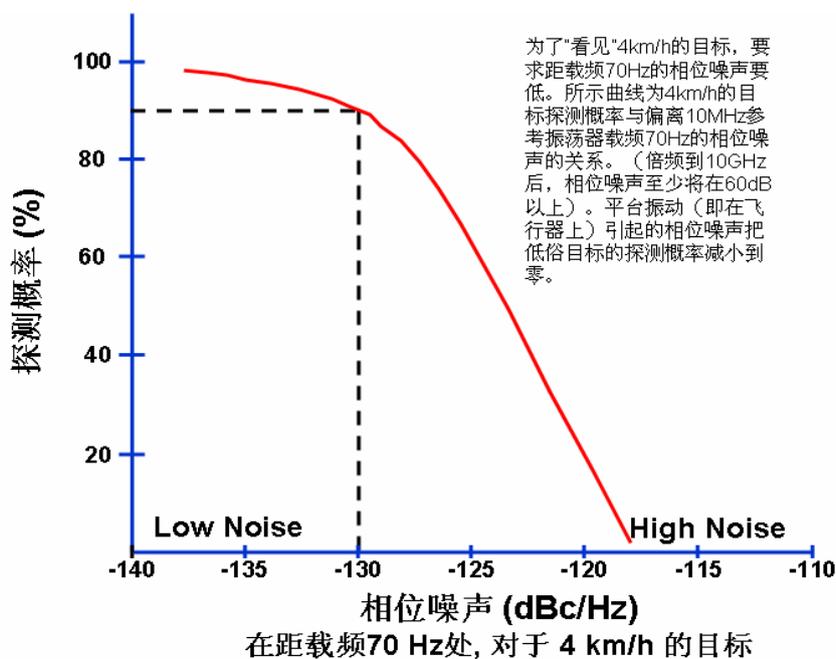
当系统设计者制造了一个三级振动隔离系统来隔离飞机振动对振荡器的影响时，他们发现由于隔离系统对无法处理飞机噪声使隔离系统无法提供振荡器的预期相位噪声；即隔离系统能有效的隔离机身的振动，但它对隔离声波对振荡器的影响却无效。



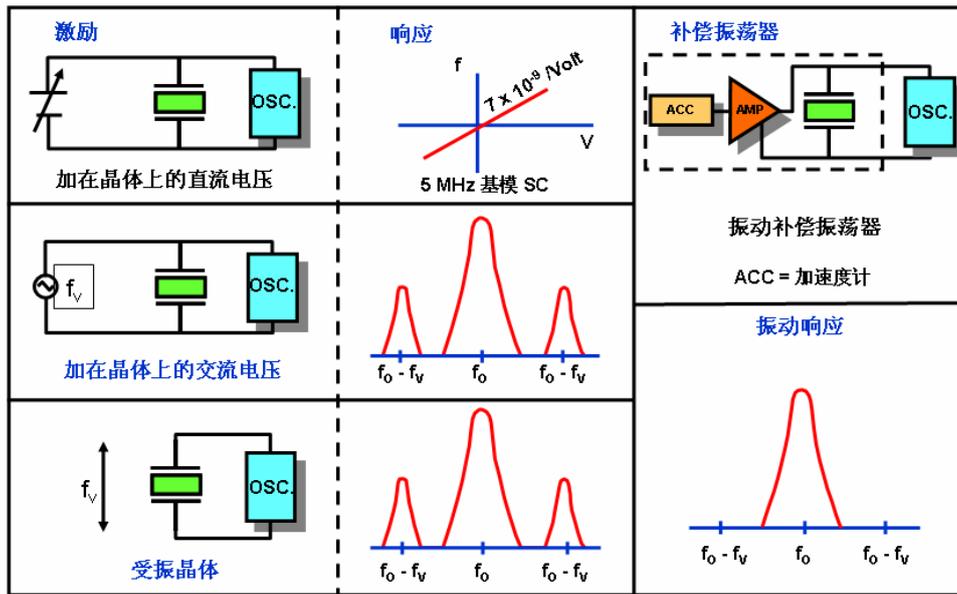
局限性

- 在低频时效果不佳
- 增加尺寸、重量和成本
- 对声音噪声无效

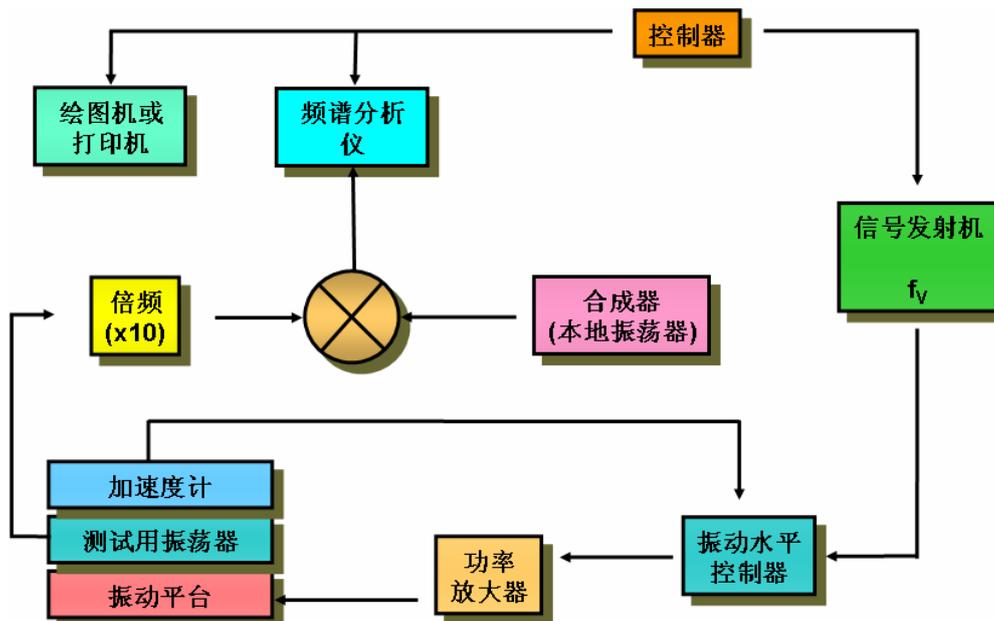
相关雷达的探测概率



振动补偿



振动敏感度测试系统



上面就是一种测量 Γ 的方法。振动引起的边带后，通过下面的方程计算出 Γ 。

$$L(f) = 20 \log(\Gamma \cdot A f_0 / 2 f_v)$$

由此可得

$$\Gamma_i = (2 f_v / A_i f_0) 10^B \quad (B = L_i(f_v) / 20)$$

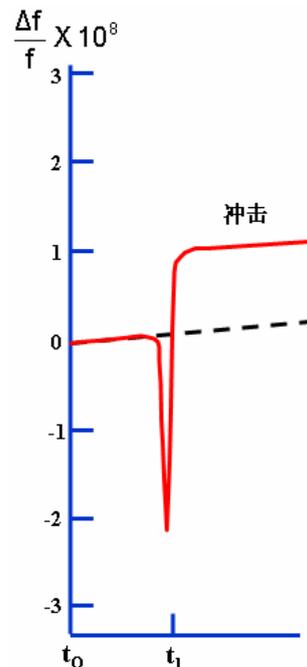
其中 Γ_i 和 A_i 分别是单位向量 i 方向上的加速度敏感度向分量和加速度向分量。测试沿

者三个正交轴就能得到 $\Gamma = \Gamma_i \mathbf{i} + \Gamma_j \mathbf{j} + \Gamma_k \mathbf{k}$ 。

本地振荡器是用来把混合的载波频率降到频谱分析仪的频率范围。如果本底振荡器没有被调制，则通过混合后相应的边带水平也不会变化。倍频器是用来克服频谱分析仪的动态范围限制。

冲击

冲击时产生的频率偏移是由于谐振器的应力灵敏度引起的。偏移的大小是与谐振器的设计和冲击在谐振器上产生的应力相关。装架谐振器使应力增强，永久性频率偏移可能是由于冲击引起的应力变化、从谐振器表面消除（颗粒）污染以及振荡器电路变化所引起的。冲击后的完好率是随谐振器表面缺陷而变化的。用化学抛光法生产的无痕谐振器在气枪试验中经受住了高达 36000g 的试验，并且经受住了 155mm 榴弹炮射击产生的冲击试验（在 12ms 持续时间达 16000g）。

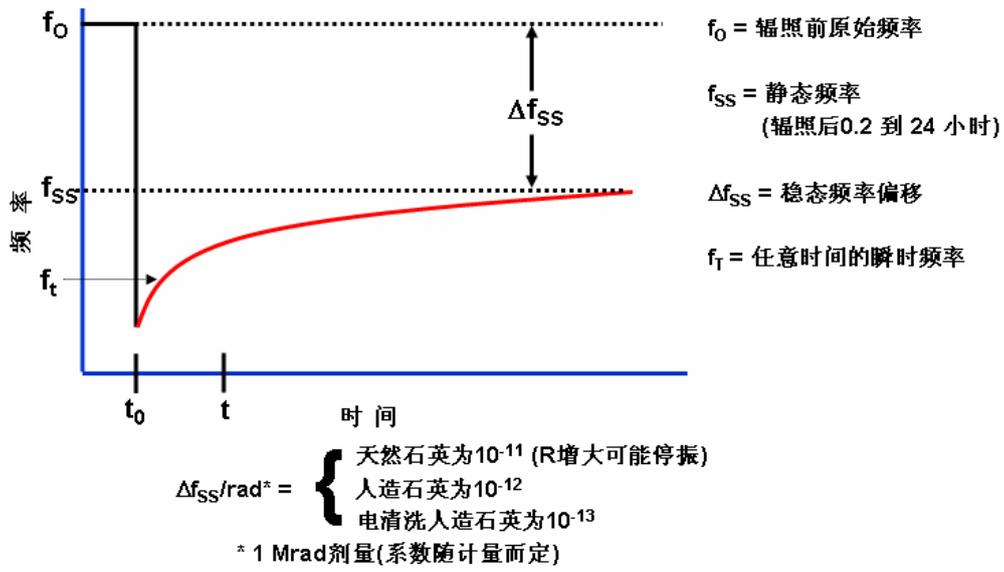


辐射引起的频率偏移

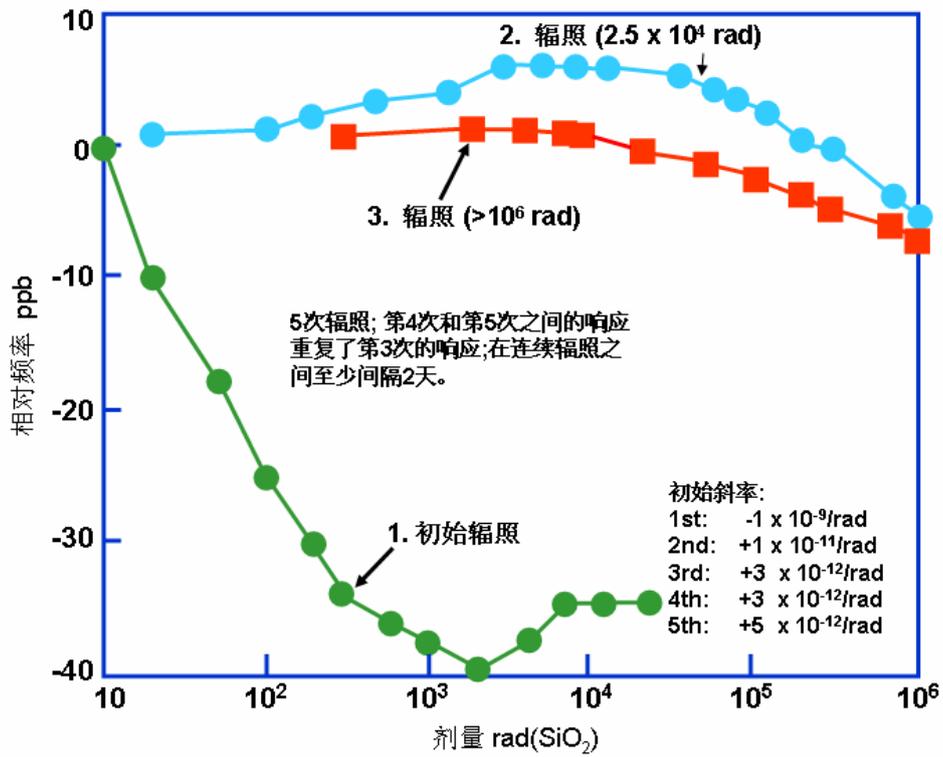
下图为在电离辐射脉冲下石英振荡器理想化的频率响应。这个响应分为两个部分。一是由于谐振器中主要由于能量的突然沉积引起热瞬时效应，使瞬时频率发生变化。在前面我们已经讨论过这种效应表现为动态的频率温度效应。用高纯度石英制造的 SC 切谐振器中不会出现瞬时效应。

响应的另外一部分，达到稳定的工作状态后，由于辐射剂量作用和石英体的自然特性使其会产生永久的频率偏移。频率变化量与辐射剂量是非线性的，在低剂量时，频率变化越大。

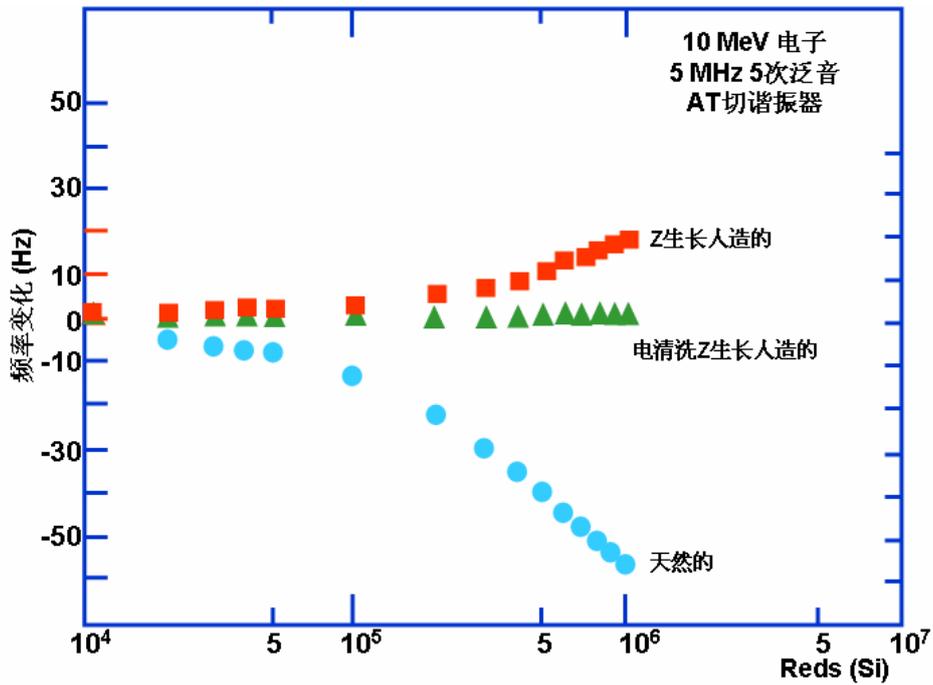
在剂量高于 1 千拉德 (SiO₂), 一定频率变化与剂量之比与石英杂质缺陷有关。



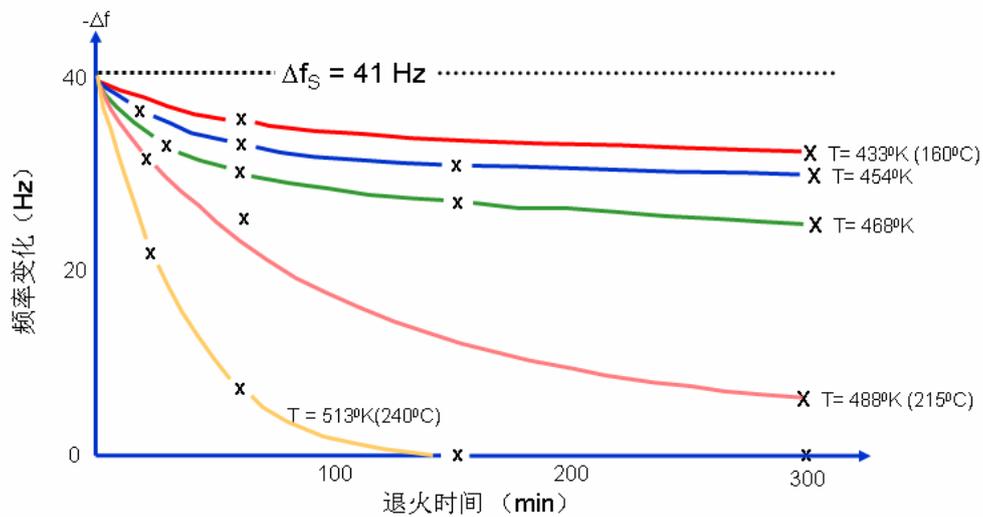
重复辐照效应



辐射引起的 Δf 与剂量和石英类型的关系



辐射引起的频率变化的退火

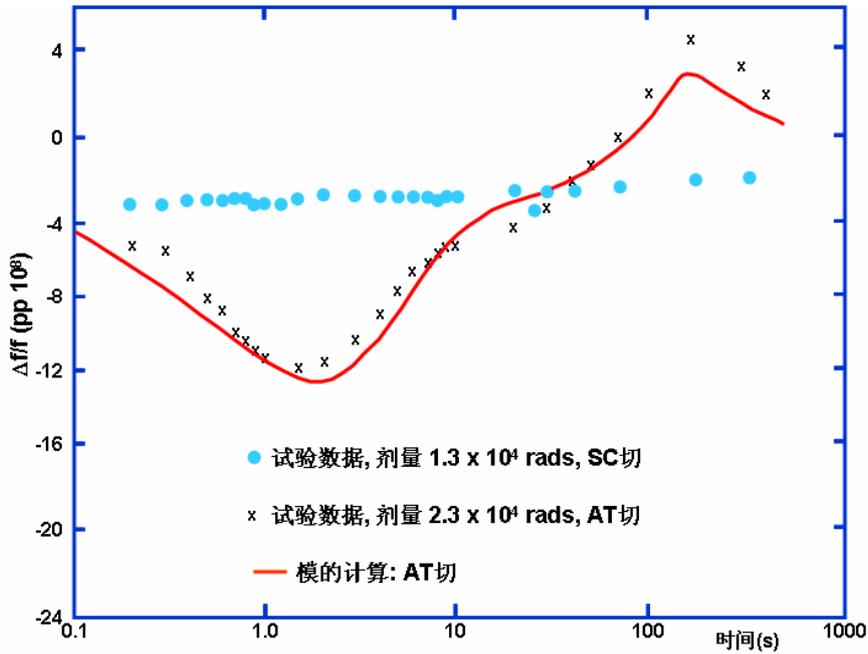


对于 4MHz AT 切谐振器，X 射线剂量为 $6 \times 10^6 \text{ rads}$ 所产生的 $\Delta f = 41 \text{ Hz}$ 。

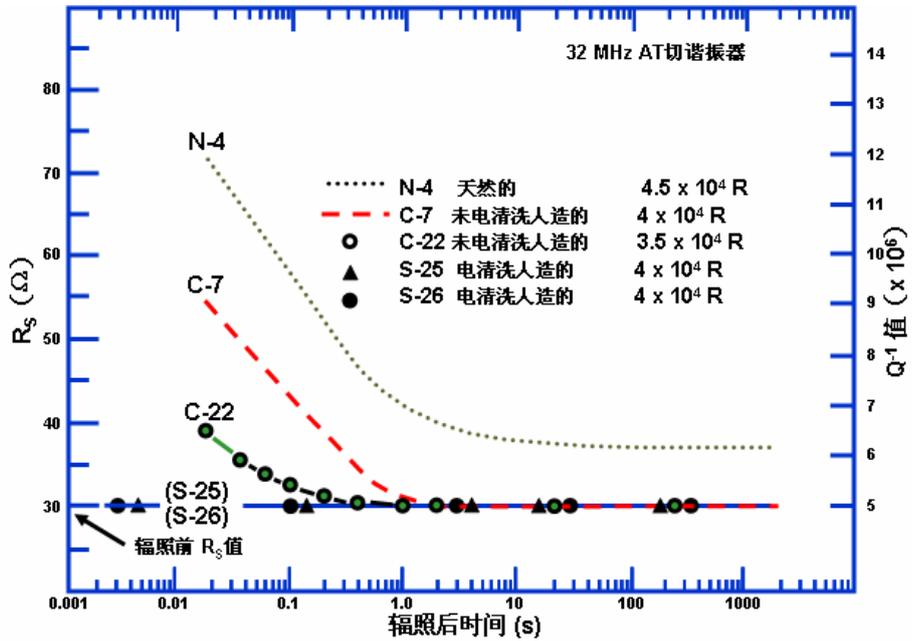
激活能是根据退火曲线的时间关系进行计算的。可以用 $E_1 = 0.3 \pm 0.1 \text{ eV}$ 和 $E_2 = 1.3 \pm 0.3 \text{ eV}$ 两种方法进行重现试验结果。

在 $T > 240^\circ \text{C}$ 时，退火在 3 小时内完成。

在 1 个 γ 辐射脉冲后的瞬时 Δf



瞬时 X 射线对 R_s 的影响



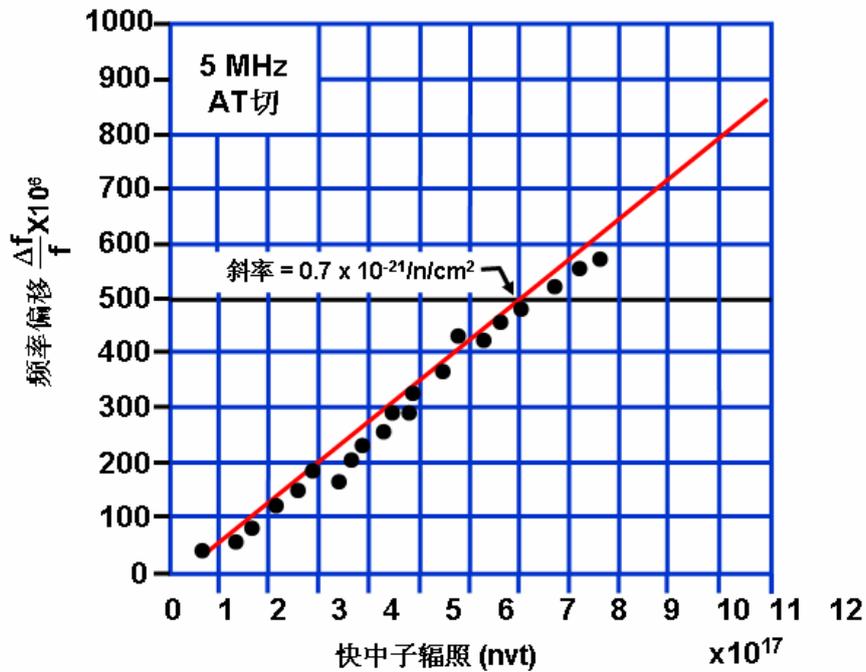
以曲线图表示串联谐振电阻经过 4×10^4 rad 的脉冲辐照后与时间的关系。用电清洗石英制作的谐振器在室温下辐照后， R_s 与最初的测量时间（1ms）无变化。 R_s 增大（即 Q 值降低）将引起停振。

电离辐射使石英振荡器频率发生变化主要由于辐射使石英元件发生变化。在特定条件下，辐射也会使石英元件的等效串联电阻增大。当电阻增大到一定程度会引起停振。

在电离辐射强脉冲期间，由于石英和振荡器电路中的晶体管立即产生大的光导而使晶体

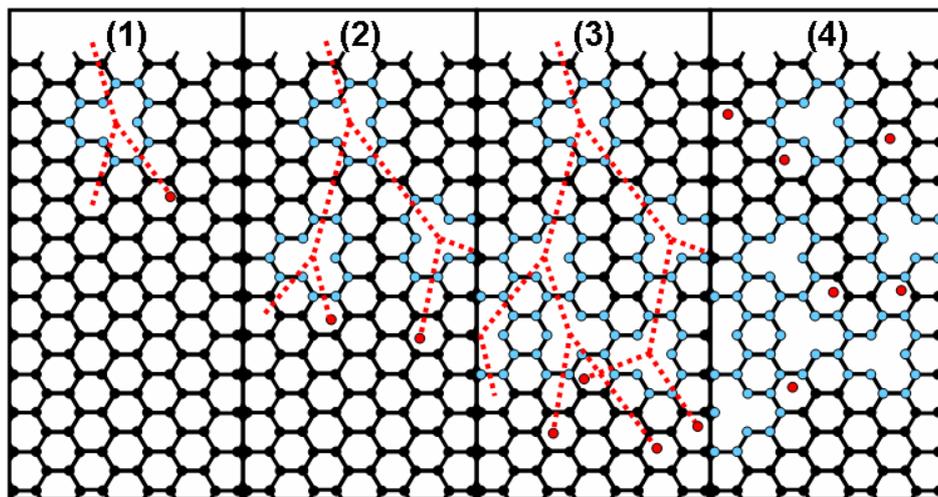
振荡器瞬时停振。谐振器中采用电清洗石英和严格地设计振荡器电路，能使振荡器在辐照后 15 μ s 内恢复。

中子引起的频率变化



此曲线图表明，晶体片的谐振频率是随反应堆的辐照而近似成线性变化的。例如，在 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ n/cm}^2$ 时，斜率为 $8 \times 10^{-21} \text{ n/cm}^2$ ，在 $10^{12} \sim 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 时，斜率为 $5 \times 10^{-21} \text{ n/cm}^2$ ，而在 $10^{17} \sim 10^{18}$ 时，斜率为 $7 \times 10^{-21} \text{ n/cm}^2$ 。

中子损伤



快中子在到达静止之前，能够置换大约 50~100 个原子。大部分损伤是反冲原子造成的。最后结果是每个中子能够造成许多空穴和填隙。

稳态辐射的结果

辐射剂量与频率变化的关系是非线性的；在低剂量时，频率变化较大。

剂量大于 1krad 时，频率变化随晶体杂质而变化。电离辐射产生电子空穴对；空穴被杂质铝晶格位置捕获而释放出补偿正离子（即 Li 和 Na）。自由正离子被宽松地捕获在沿光轴方向上。改变弹性常数，靠近铝的晶格也变化，因此，频率产生偏移。锗杂质也会引起频率变化。

在 1Mrad 剂量时，对于天然石英，频率变化为 $10^{11} \sim 10^{14}$ pp/rad；对于高质量电清洗石英为 10^{14} pp/rad。

对于天然石英，频率变化是负的；对于人造石英和电清洗人造石英，频率变化可能为正，也可能为负。

在剂量大于 10^6 rad 时，频率变化达到饱和。

如果石英中碱性杂质浓度高，则 Q 值降低；用经过适当处理的电清洗人造石英制作的谐振器的 Q 值不受影响。

高剂量辐射也能使频率温度特性产生变化。

在 $T > 240^\circ\text{C}$ 、时间在 3 小时内时，频率变化退火。

预先处理（即剂量大于 10^5 rad）可减小因连续辐照而产生的高剂量辐射灵敏度。

辐射剂量小于 100rad 时，频率变化尚不清楚。辐射导致应力消除，但表面效应（表面吸附、清除吸附气体、离解、聚合和带电）也许很大。

脉冲辐照结果的总结

对于要求电路具有耐脉冲辐照的应用来说，石英谐振器是设计合适的振荡器电路中容差要求最小的元件。

用来进行电清洗的石英和天然石英制作的谐振器能够经受住脉冲辐照后的 RS 大大增加。辐射脉冲能够引起停振。

天然、人造和电清洗人 AT 切石英谐振器在受到 X 射线脉冲辐照后（即 $10^4 \sim 10^5$ 的瞬时 X 射线）就立刻产生负的频率偏移，经 1012rad/s 的短脉冲辐照后 $\Delta f / f$ 在 0.02s 内高达 -3ppm。

瞬时频率偏移呈 $t^{-1/2}$ 逐渐减小；频率偏移的非热能所致瞬变部分可能是由于在 Al^{3+} 陷阱处氢的扩散和再捕获所致。

在受到脉冲电离辐射时，用经过适当处理的电清洗石英制作的谐振器的 RS 变化极小（振荡器电路不要求大的增益富余量）。

用经过适当处理的电清洗高 Q 值石英制作的 SC 切石英谐振器在经过电离辐射后不呈现瞬时频率偏移。

在电离辐射强脉冲期间，由于石英和振荡器电路中的晶体管立即产生大的光导而使晶体

振荡器停振。如果谐振器中采用电清洗石英和严格地设计振荡器电路以适应辐射环境，则在电离辐射短脉冲后 15 μ s 后开始振荡。

中子辐照的结果

当快中子（—MeV 级能量）进入晶体并与原子相撞时，就像台球要散开。反冲原子具有 $10^4\sim 10^6$ MeV 能量，这个能量比晶格中的结合能要大的多，因而反冲原子在晶格空位后面。由于它穿过晶格，所以置换和电离出其它原子。因此，单个的快中子能够产生许多空位、填隙和破坏原子间的结合。中子损伤能够改变石英的弹性常数和密度。在碰撞谐振器的快中子中心，大部分通过而不产生任何碰撞，即对谐振器无任何影响。一小部分中子与晶格中的原子结合而引起损伤。

频率是随辐射的影响接近于呈线性增高的。对于 AT 切和 SC 切谐振器来说，影响很大时 ($10^{17}\sim 10^{18}$ n/cm²) 为 0.7×10^{-21} n/cm²；在 $10^{12}\sim 10^{13}$ n/cm² 为 5×10^{-21} n/cm²；在 $10^{10}\sim 10^{12}$ n/cm² 为 8×10^{-21} n/cm²。其灵敏度大多取决于石英中缺陷的密度和中子能量的分布。（热核中子引起的损伤比反应堆中子更大。）

中子辐照也会使频率温度特性产生变化。

当把 1 个经过大量中子辐照的样品在 500 $^{\circ}$ C 下烘烤 6 天，90% 的中子引起的频率偏移被消除了（但是其余的 10% 任有 93ppm）。

影响稳定度的其它因素

电场对双旋谐振器有影响，即加在 5MHz 基模 SC 切谐振器电极上的电压为 $\Delta f / f = 7 \times 10^{-9}/V$ 。电压也可以引起电清洗，从而影响频率（对所有切型），甚至在正常工作温度下。

磁场。石英是抗磁性体，但是磁场能够引起涡流，并影响谐振器壳内的磁性材料和振荡器电路。感应的交流电压能够影响变容二极管、AGC 电路和电源。“优质”石英振荡器的典型频率变化远小于 $10^{-10}/Gs$ 。

环境压力（海拔高度）。谐振器和振荡器外壳的变形和散热条件的变化都会影响频率。

湿度能够影响振荡器电路和振荡器的热性能，即元件吸收湿气从而影响介电常数。

电源电压和负载阻抗影响振荡器电路，从而直接影响振荡器的激励电平和负载阻抗。负载阻抗的变化可以改变反射回振荡器回路的信号幅度或相位，从而改变振荡的相位（和频率）。这些影响可以通过稳压、缓冲放大等办法减至最小。

渗气稳定度受到大气中的氢和氦扩入“密封”金属和玻璃壳的过量程度的影响，即氢通过谐振器的镍壳扩散，而氦通过 Rb 标准的玻璃气泡扩散。

各种影响之间的相互影响

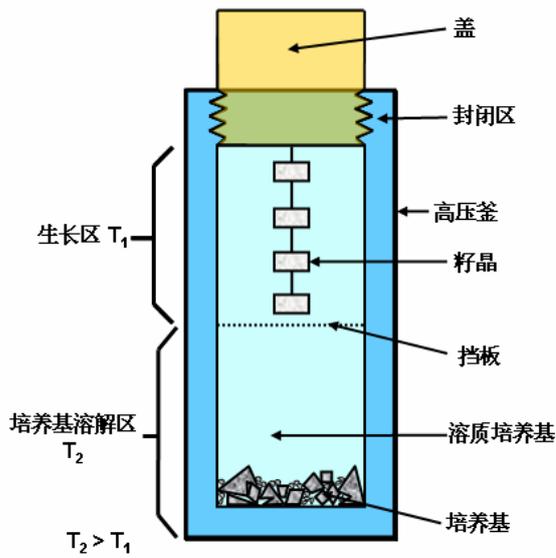
在试图测量单个影响的作用时，人们经常会碰到相互影响， 这种情况也许明显或不一定明显	
测 量	相 互 影 响
谐振器老化	由恒温槽的T（即热敏电阻）老化引起的 ΔT ；由振荡电路老化引起的激励电平
短期稳定度	振动
振动稳定度	由磁场引起的感应电流
2-g 翻转灵敏度	由恒温器内的对流引起的 ΔT
谐振器频率温度特性 (静态)	热瞬时效应, 湿度 负载阻抗的温度系数
辐射灵敏度	ΔT 、热瞬时效应、老化

对频率稳定度的不同影响又能以一定的方式相互影响，在测试过程中，如果对这些相互影响因素没有很好的认识，则会导致测试结果错误。例如，建筑物的振动能影响短期稳定度的测试。目前建筑物的通常振动在 $10^{-3}g \sim 10^{-2}g$ 。因此，如果振荡器的加速度敏感度为 $1 \times 10^{-9}/g$ ，则建筑物的振动对短期不稳定性的单独影响为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 。

2g 翻转试验通常用来测试石英振荡器的加速度灵敏度。由于当振荡器完全翻转时，在恒温槽内的热梯度由于对流的影响而变化，因此热效应能影响这个实验。其它例如温度和激励电平变化影响老化实验；磁场引起的感应电流影响振动灵敏度实验；热瞬时效应，湿度变化和负载电抗温度系数影响石英器件的静态频率温度特性。

第五章 石英材料的特性

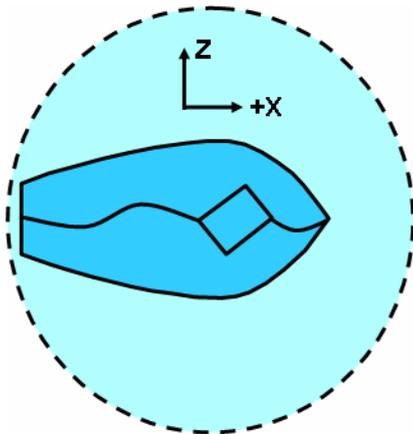
石英的水热生长



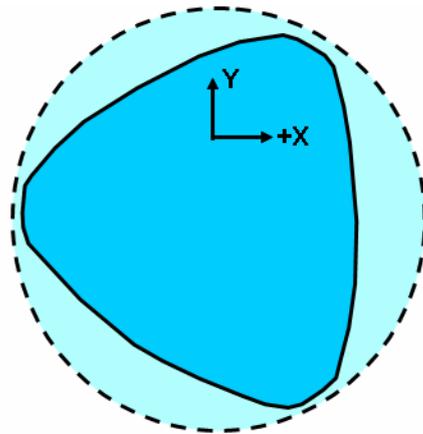
- 用水和矿化剂 (NaOH 或 Na_2CO_3) 把高压釜装到某一预定指标。
- 用挡板确定温度梯度, 使每个区域接近于等温。
- 籽晶通常是Z切单晶薄片。
- 培养基通常由小的片状单晶石英组成(约 $2\frac{1}{2} \sim 4 \text{ cm}$)。
- 温度和压力一般为 350°C 和 $800 \sim 2,000$ 大气压; $T_2 - T_1$ 通常为 $4^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 。
- 培养基缓慢溶解 ($30 \sim 260$ 天/批次), 扩散到生长区并沉积在籽晶上。

石英体的深度溶解

各向异性蚀刻

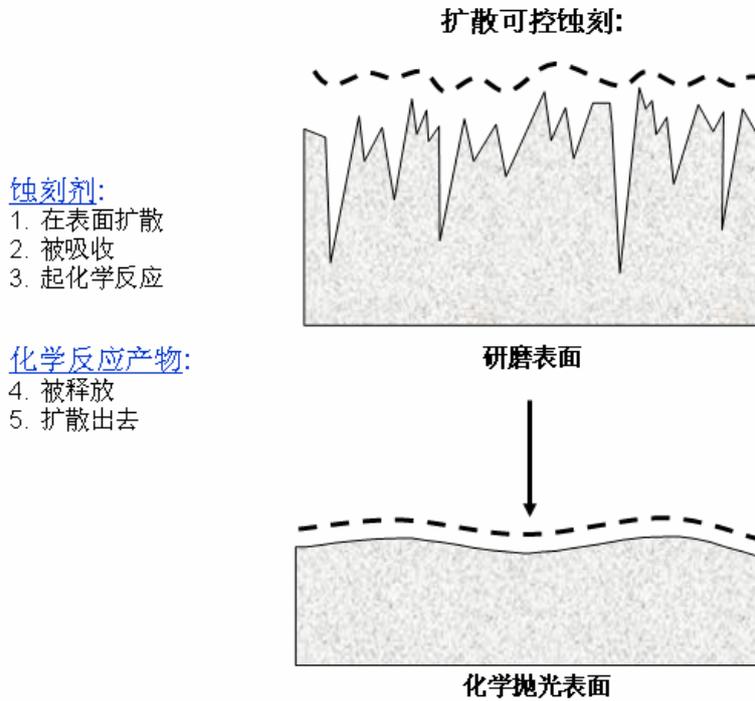


沿 Y-轴观察

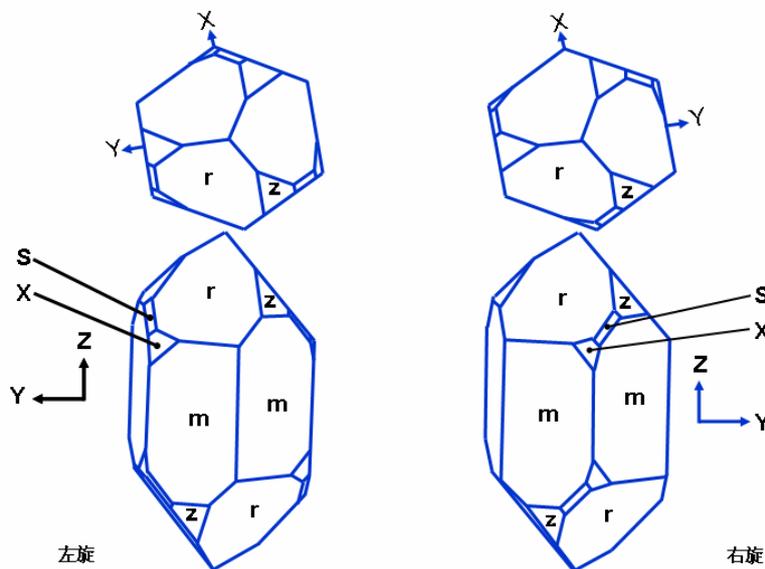


沿 Z-轴观察

蚀刻和化学抛光



左旋和右旋石英

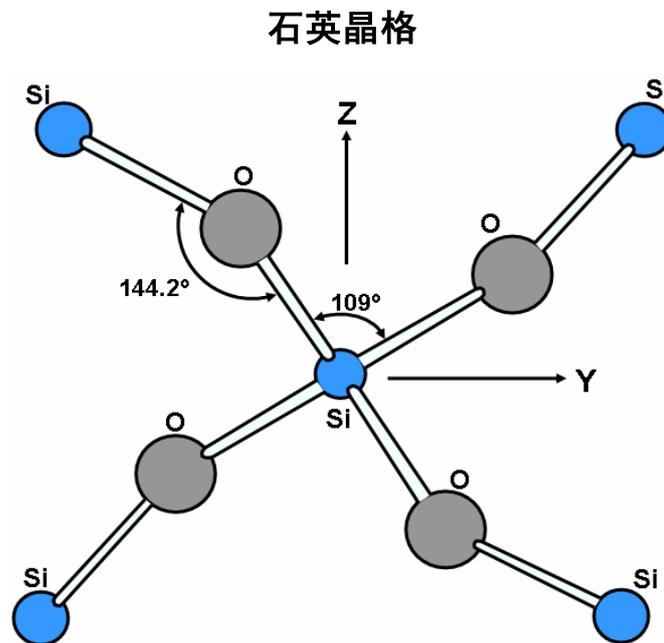


石英是对映结构晶体，即都存在右旋和左旋。且这两种形式的晶体结构是镜像的。这两种形式都非常有用，但是，在谐振器制造过程中采用的标准化的右旋石英晶体。

石英是三角晶系结构。理想的石英是六角棱柱体。m 面称为棱柱面，r 面称为大棱面，也称为主菱形面，z 面称为小棱面。

石英中的 Z 轴（也称为光轴或 C 轴）是一种三角对称轴，即当晶体绕 Z 轴旋转时，每

转过 120 度，全部物理特性就重复一次。一束平面偏振光在 Z 轴方向通过晶体时，偏振平面就会旋转。如果观察者通过石英向着光源看，偏振面是顺时针旋转时，则石英是右旋的。如果是反向旋转，则是左旋的。这种“光旋”效应被用于一些光学仪器（在频率控制领域中并无特定的意义）。



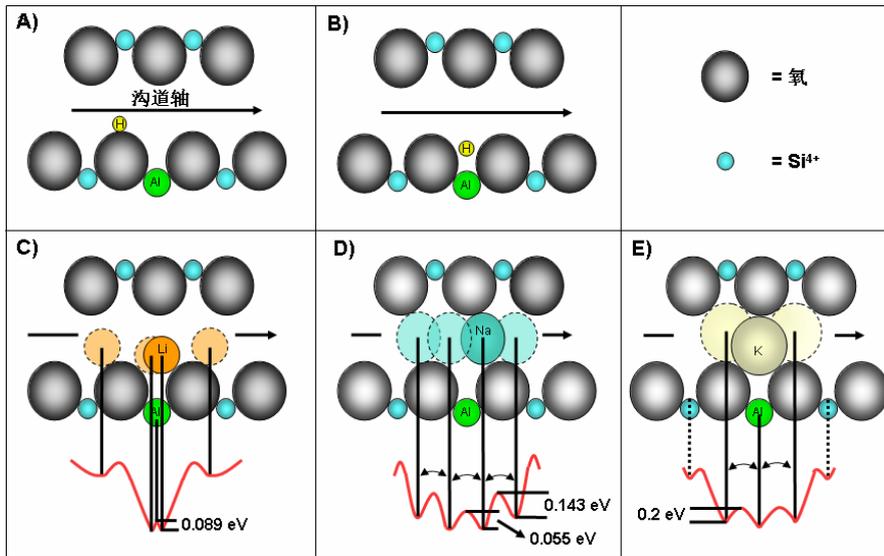
对于纯 α 石英，晶格常数为 $a = 0.4913 \text{ nm}$ 和 $c/a = 1.10013$ 。不纯的晶体会使 a 晶格常数增加，且轴向比 c/a 减小。天然晶体和人造晶体，人造晶体和电清洗人造晶体直接的细小差别已经被测量出来。同时压力也影响晶格常数。

Si-O 的键长为 0.1607 nm ，O-Si-O 的键角从 $108.3^\circ \sim 110.7^\circ$ 变化且 Si-O-Si 键角为 144.2° 。

石英特性对器件特性的影响

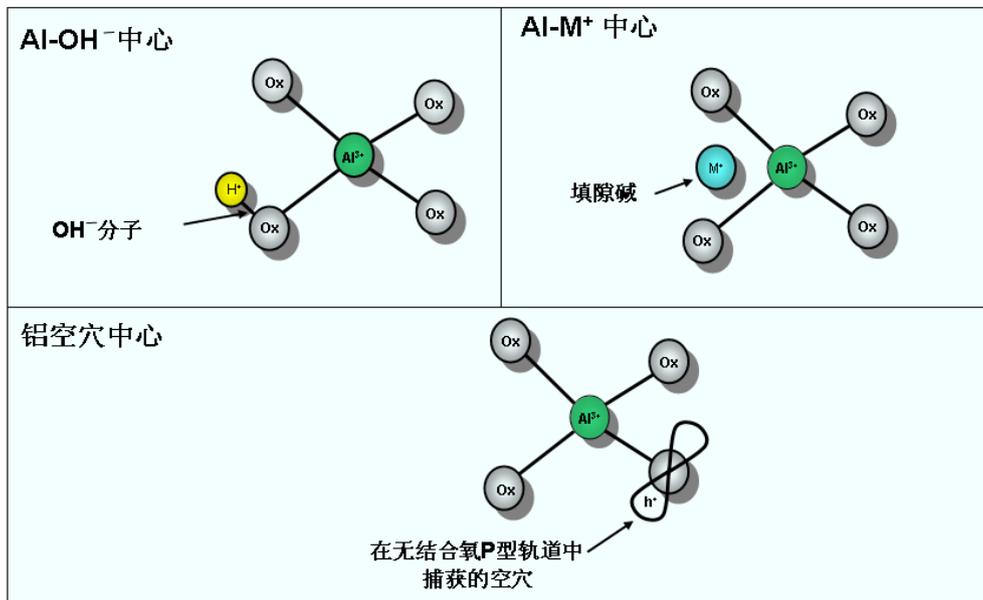
石英特性	器件和器件制造特性
Q	振荡器的短期稳定度、靠近载频的相位噪声、长期稳定度、滤波器损耗
纯度 (Al, Fe, Li, Na, K, -OH, H ₂ O)	耐辐射性、形成双晶的敏感度、光学特性
水晶的完整性、应变	可电清洗性、对化学抛光和光刻工艺的可蚀刻性、光学特性、强度、老化(?)、滞后(?)
包裹体	高温处理和应用、谐振器Q值、光学特性、可蚀刻性

石英中离子的简化模型

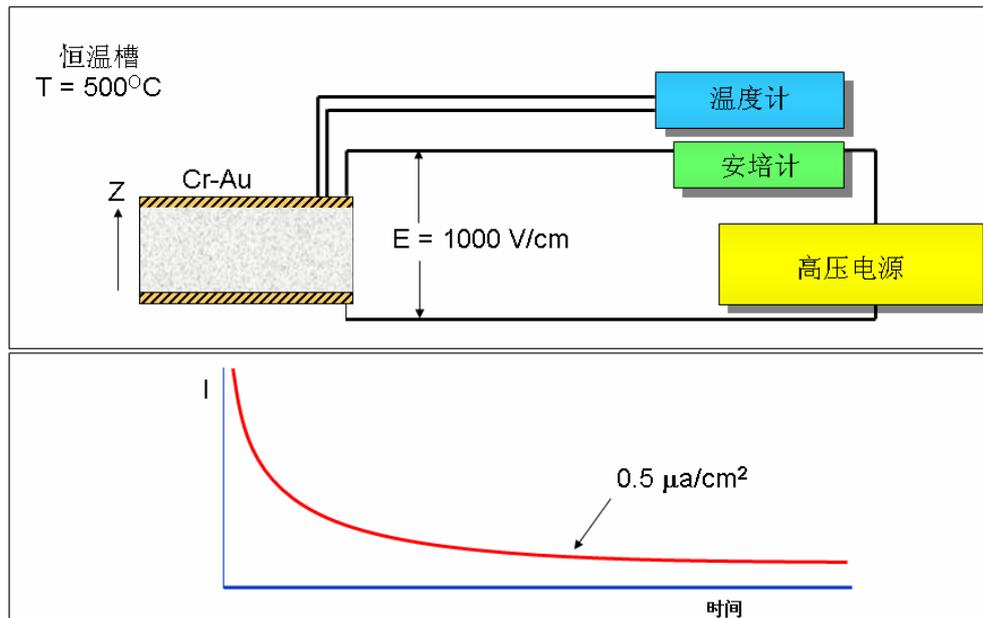


模型图示出了 H⁺的位置和晶格各沟道中的碱离子，以及各位能曲线的相位趋势。箭头表示了晶格中沿 Z 轴的主要沟道。

共生铝的缺陷



电清洗



电清洗是一种从石英中消除某些杂质的提纯加工过程,因此能够改善石英晶体的辐射性和蚀刻特性。它是一种在高温下完成的电场激励的固态扩散过程。典型电清洗过程的主要步骤是:把电极加在石英棒上,缓慢将棒加热到 500°C,再将电压加在电极上,使其沿 Z 方向的电场约为 1kV/cm,监测流过石英棒的电流(随电清洗的进行,电流下降),并在电流下降到某一恒定值后,缓慢将石英棒冷却到室温,最后去掉电压。

在高电场高温情况下,正的杂质离子(如 Li^+ 和 Na^+) 扩散到阴极,并在随后的加工过程中去掉电极时被消除。在改善耐辐射性方面,电清洗还大大地减少了蚀刻石英时所产生地许多蚀刻沟道。

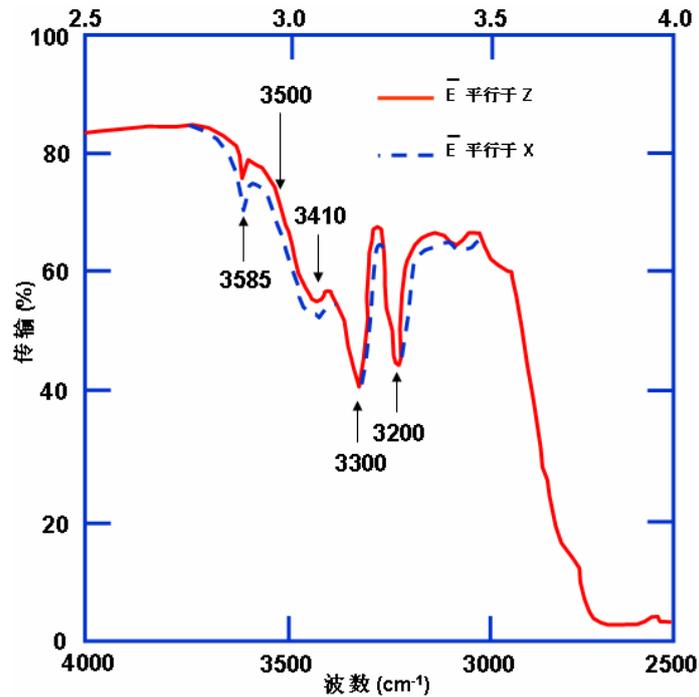
石英在光轴方向有许多沟道(也称 Z 轴)。填隙离子能很容易的沿着这些沟道移动。当电场作用于其它方向时,电清洗率将大大降低。

石英的质量标志

- 红外线吸收系数
- 蚀刻沟道密度
- 蚀刻坑密度
- 包裹体密度
- 杂质分析
- X 射线形貌
- UV 吸收
- 沿光轴方向的双折射
- 热冲击引起的破裂
- 电子自旋谐振
- ???

EIA 标准 477—1 包括对这一参数的标准测试方法。

红外线吸收



能够确定获得谐振器最大 Q 值的因素之一，是石英的 OH 含量。红外线吸收测量方法常常用来测量扩大温度的 OH 缺陷带。EIA 标准 477—1 将红外线吸收系数 α 定义为

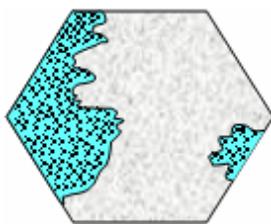
$$\alpha = \frac{A(3500\text{cm}^{-1}) - A(3800\text{cm}^{-1})}{Y\text{切厚度}(\text{cm})}$$

式中：A—在括号中波数处吸收的部分入射波束以 10 为底的对数。

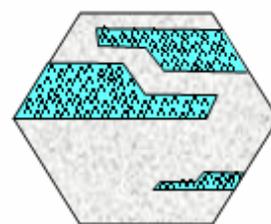
等级	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	近似最大 Q*
A	0.03	3.0
B	0.045	2.2
C	0.060	1.8
D	0.12	1.0
E	0.25	0.5

*百分数，5MHz (α 为未进行电清洗的石英的唯一质量指标)。

石英的双晶



电学双晶



光学双晶

石英的 X 轴（电轴）是与两种相邻棱面的平分线平行的；根据张力产生的延伸，+X 方向为正。

电学双晶（也叫做芬（Dauphine）双晶）包括 X 轴的局部反向。它通常由不规则的碎片组成，并且外形也不规则。这可能是人为产生的，其原因是高质量石英的逆变、热冲击、局部高压（甚至在高温下）以及强电场。

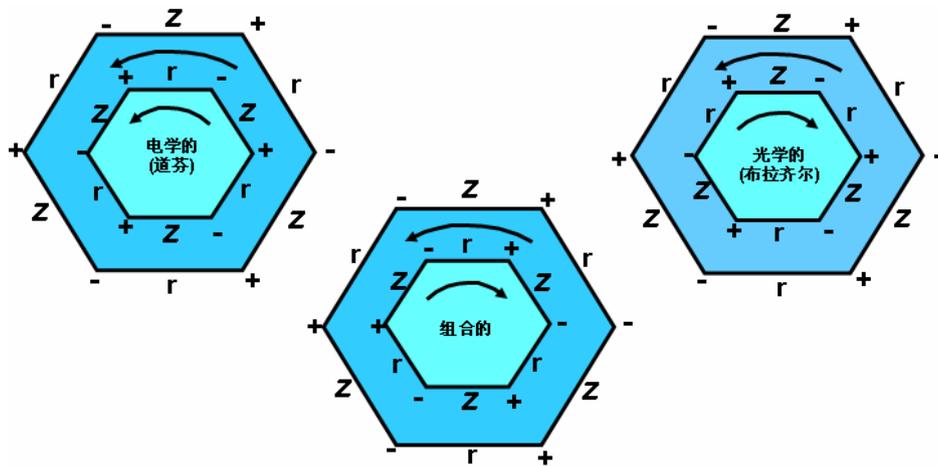
在右旋石英中，极化面是按照向着光源方向看去的顺时针方向旋转的。在左旋石英中，则是以反时针方向旋转的。光学双晶石英（也叫布拉齐尔（Brazil）双晶，包括左旋和右旋石英两种。光学双晶之间的晶界通常是直的。

蚀刻能够显示出两种双晶。

天然石英通常由部分右旋和部分左旋晶体组成。此类石英称为光学双晶。光学双晶是生长双晶，即当石英生长时出现缺陷，会引起双晶并随后的硅氧碱的破坏。另一方面，电学双晶通过使用机械和热应力来生长在石英中。温度越高，生长这种类型的双晶所需的应力越低。产生电学双晶的原子移动要小于十分之一的晶格间距；不会出现键的破坏。

频率控制应用方面，双晶是不需要的。因此，在制造过程中必须避免出现高应力，特别是在提高温度时。制造过程中像采用热压缩把支架粘合在石英片的边缘时，如果不仔细操作，很容易出现双晶。在高压和高温下使用的石英压力传感器的失效后也会出现双晶，如油井。

双晶与轴的关系



此图说明了双晶轴系和方向之间的关系，箭头表示旋转方向。

石英的转变

在 573℃ 时，石英产生高低质量的转变（ $\alpha - \beta$ 蜕变）。（在升温时 1 个大气压下为 573℃，在降温时，有可能低于 1℃~2℃）。

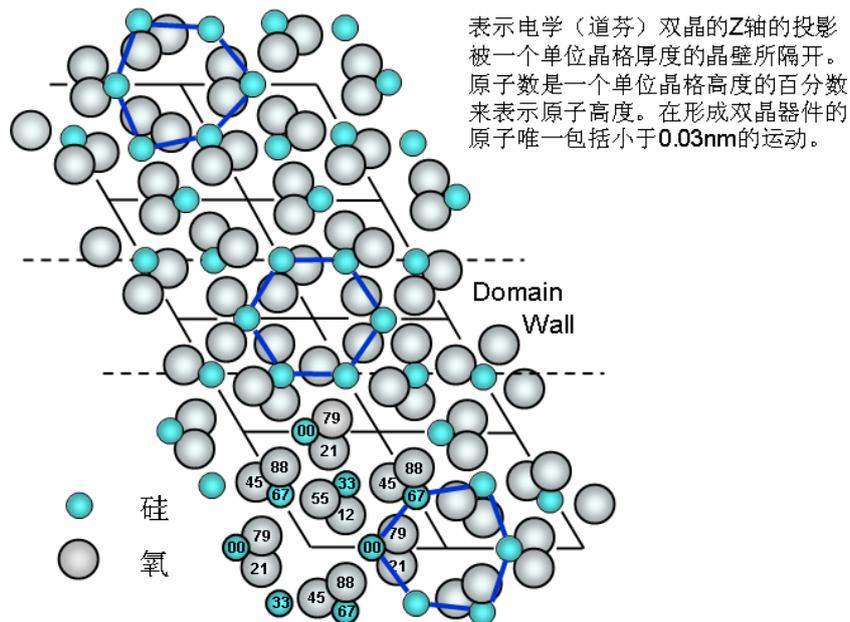
邻接（ SiO_4 ）四面体之间的结合角在转变时发生变化。低质量石英（ α 石英）属于三角

晶系，高质量石英（β石英）属于六方晶系。两种形式均为压电形式。

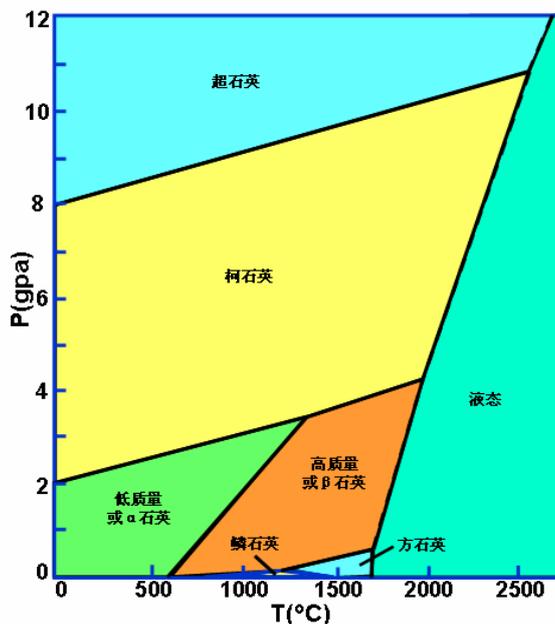
在转变点几乎所有的物理特性都发生突变。从低质量转变为高质量石英时，体积增大0.86%，虽然经过转变点冷却时，通常可得到道芬双晶，但是这种变化是可逆的。

转变温度随着铝、碱的含量升高而降低，同时在静压下，每增加40个大气压，温度升高1℃。

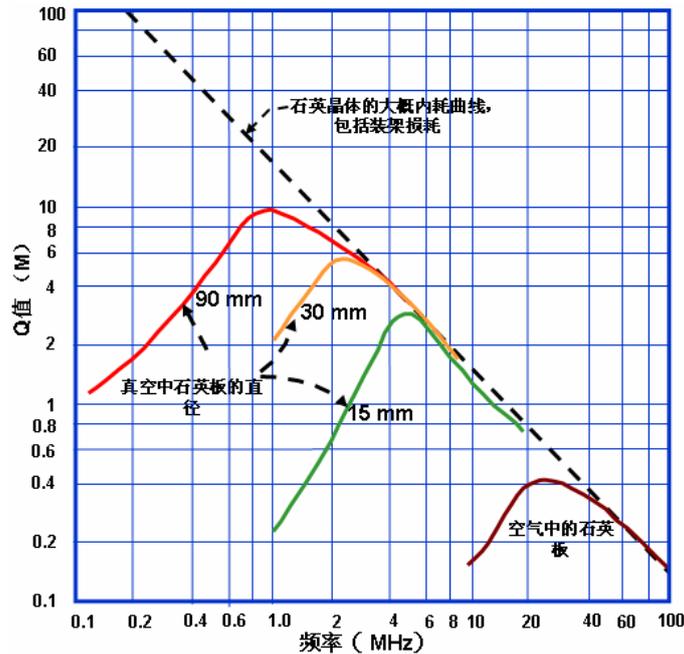
石英的晶格和双晶



二氧化硅（SiO₂）的相位图



石英晶体的内耗



硅酸锰锶铁矿和其同晶型体

自从在 1920 年石英晶体被选择作为石英振荡器的材料后, 许多研究者一直都在寻找一种比石英还好的材料。许多材料看起来很有希望, 如块磷铝矿、焦硼酸锂和磷化镓, 但是都无法与石英相比。

硅酸锰锶铁矿 ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ 也称 LGS) 和其同晶型体 LGN ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Nb}_{0.5}\text{O}_{14}$), LGT ($\text{La}_3\text{Ga}_{5.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_{14}$) 等, 看起来有很大的希望。LGT 谐振器的 Q 值与频率的乘积是石英晶体的两倍。这些材料可能改进特性的如下:

- 相对于石英, 声衰减更低 (比 AT 切或 ST 切石英的 Q 值高)。
- 没有相变 (熔点大约为 1400°C , 石英的相移温度 573°C)。
- 压电耦合高于石英。这可以得到更高的泛音; 在高泛音下可能降低滞后; 使 VCXO 的可调能力更强; 在滤波器应用中, 得到宽带宽, 低阻抗和高频工作能力。
- 相同频率下比石英厚。这使其同一加速度下, 变形小, 因此可能降低加速度灵敏度。温度补偿。

第六章 原子频率标准

这一部分阐述两个重要理由：①原子频率标准是精密石英振荡器最重要的用途之一；②研究或使用晶体振荡器的人应该知道他们是否能够买到长期稳定度比所能提供的更好的晶体振荡器。

精密频率标准

基于石英晶体谐振器的 ($f \sim 5\text{MHz}$, $Q \sim 10^6$)

基于原子谐振器的有：

- 铷 87 频率标准 ($f_0 = 6.8\text{GHz}$, $Q \sim 10^7$)
- 铯 133 频率标准 ($f_0 = 9.2\text{GHz}$, $Q \sim 10^8$)
- 氢频率标准 ($f_0 = 1.4\text{GHz}$, $Q \sim 10^9$)
- 俘获粒子频率标准 ($f_0 > 1.4\text{GHz}$, $Q \sim 10^{11}$)

原子频率标准基本工作原理

为了了解原子频率标准，需要一些基本量子力学方面的知识。将原子处于束缚态的原子能加以抑制，使其各能级的数值是离散的。当原子系统使能量从受激态变为较低的能级时，放出光子，此光子的能量是两态的能量之差。

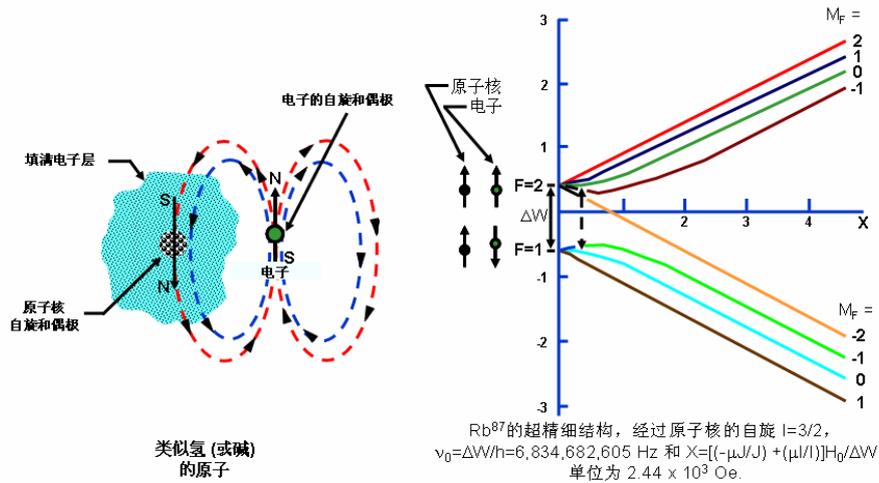
根据普朗克定律，光子频率 ν 为：

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

式中： E_2 和 E_1 分别为高态能和低态能； h 为普朗克常数。原子频率标准产生一输出信号，其频率决定于非包装材料的固有频率而不是某种特性（如在石英振荡器中那样）。

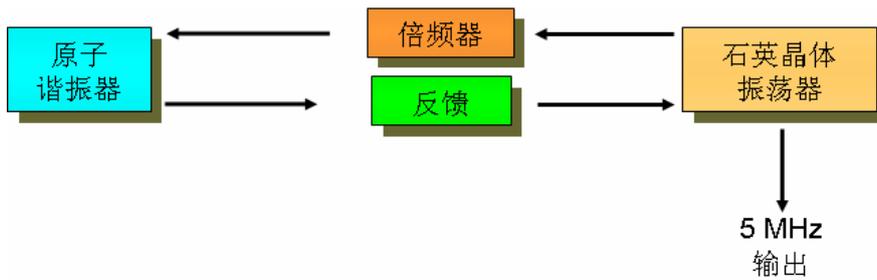
在自由空间处于静态的游离原子的特性不随空间和时间而变化。因此，理想的原子频率标准的频率不应随时间和环境变化。遗憾的是，在实际的原子频率标准中，往往不能达到理想的条件。特别是在实际的频率标准中：①原子以热速度移动着；②原子不是游离的一原子受到碰撞和激励；③产生和观察原子跃迁对不稳定性的贡献，需要某些元件。

类似氢的原子



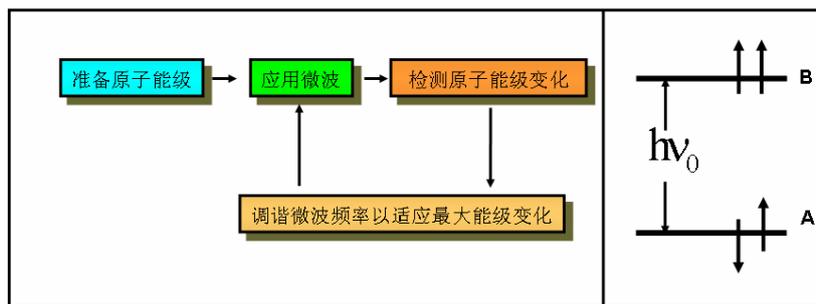
原子频率标准*

结构图



*被动微波原子标准 (如商用的铷和铯标准)

一般的微波原子谐振器



令 A 和 B 为两种可能的能量级, 分别用 $h\nu_0$ 表示。于是 ν_0 为把原子从 A 变为 B 或者从 B 变为 A 所需要的电磁辐射频率; 就目前的制造的所有原子频率标准来说, ν_0 均在微波范围内。

当 $h\nu_0 \ll kT$ 时, 能级个数之差近似为零。因此, 当加上 ν_0 时, 原子的自然系中大约

一半原子吸收 $h\nu_0$ ，而另一半放出 $h\nu_0$ ，净效应为零。

准备好非热能分布，即用光激励法或用原子束磁偏转法在某一能级和第三能级之间“选择”其中一个能态。

微波能量是在把所选择的原子转变为另一种能态，即从 A 转变为 B 的过程中被吸收的。因此，所加的微波频率能够被“锁定”在与原子跃迁相应的频率上。

原子谐振器工作原理

被使用的能级是由于原子基态 ($^2S_{1/2}$) 的原子核和外层电子之间自旋与自旋相互作用的结果，即是由于基态超精细跃迁的结果。

几乎所有的原子频率标准均采用铷或铯原子；原子核自旋分别为 $I=3/2$ 和 $7/2$ 。

在磁场中，能级分成 $2(I \pm 1/2) + 1$ 个次能级。“同步跃迁”是最低磁场灵敏度的次能级之间的跃迁。加上恒定磁场 (C 场) 可以把对磁场更敏感的跃迁概率减到最小。

用磁屏蔽至少可以把外部磁场 (即地球的) 降低 100 倍。

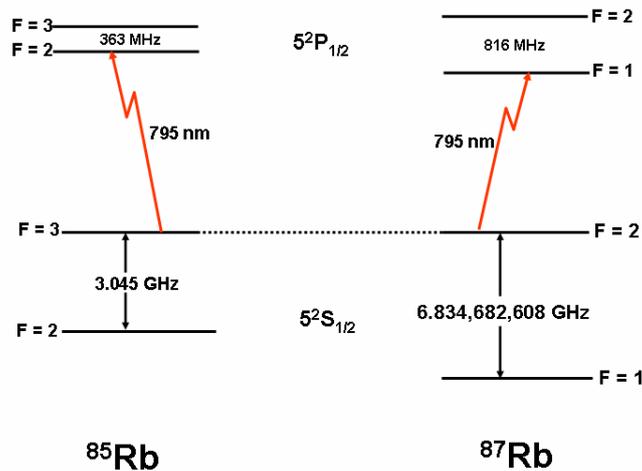
Heisenberg 不确定性原理限制了可以达到的准确度： $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$ ， $E = h\nu$ ，因此， $\Delta \nu \Delta t \geq 1$ ，所以观察时间长，频率不确定性就小。

谐振线宽 (即 $1/Q$) 是与相对观察时间成反比的。 Δt 限制因素：①当原子进入和存在于设备中时；②当原子与其它原子碰撞或与容器壁碰撞而停振时 (碰撞破坏原子的电子结构)。

由于原子相对于微波源移动，故谐振器频率因多普勒效应产生偏移 ($k \cdot V$)；速度分布造成“多普勒加宽”；二阶多普勒频移 ($1/2V^2/C^2$) 是由于相对论时间的扩大而造成的。

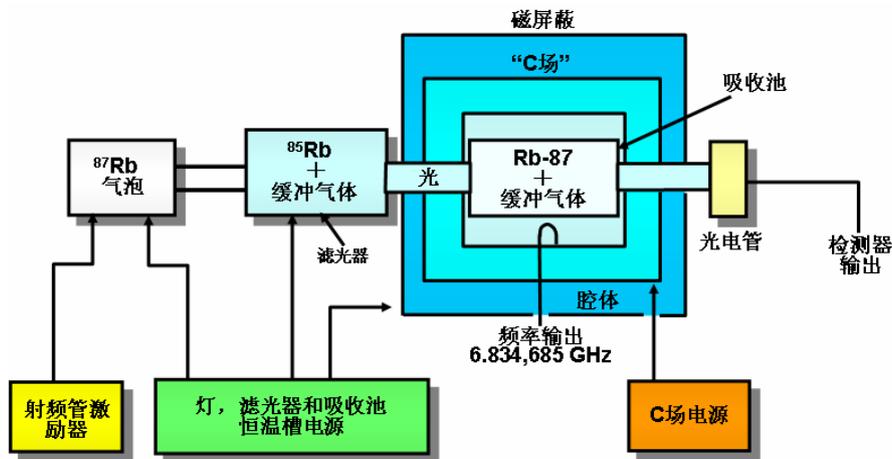
铷原子频率标准

Rb⁸⁵ 和 Rb⁸⁷ 能级图



铷原子频率标准

原子谐振器原理图



所使用的原子谐振频率为 6,834,682,608Hz。

Rb^{87} 灯发出与 $F=1$ 和 $F=2$ 跃迁相一致的波长； Rb^{85} 滤光泡吸收 $F=2$ 跃迁光的多余部份。通过滤光泡的光 $\text{Rb}^{87} F=1$ 态所吸收；激励的原子弛豫为 $F=1$ 态和 $F=2$ 态，但是 $F=1$ 态被再次激励； $F=2$ 态过密；6.8GHz 使 $F=2$ 反变为 $F=1$ ，从而给吸收光提供更多的原子。微波谐振使光的吸收增强，即光电管所检测的光变暗 ($<1\%$)，微波频率被锁在光电管检测变弱的光上，因此原子跃迁频率控制微波频率，即控制晶体振荡器频率。

吸收气泡充铷气约 10^{-6} 托和充惰性缓冲你气体约 1 托。铷原子振荡的寿命因碰撞而被限制在约 10^{-2} s；原子谐振线宽约 100Hz；Q 值约 5×10^7 。缓冲气体正（即 N_2 ）和负（即 Ar ）压流气体的混和物，在某一时间提供零温度系数，将铷原子限制在一小范围内，以产生壁碰撞和一阶多普勒效应。

铯的超精细能级

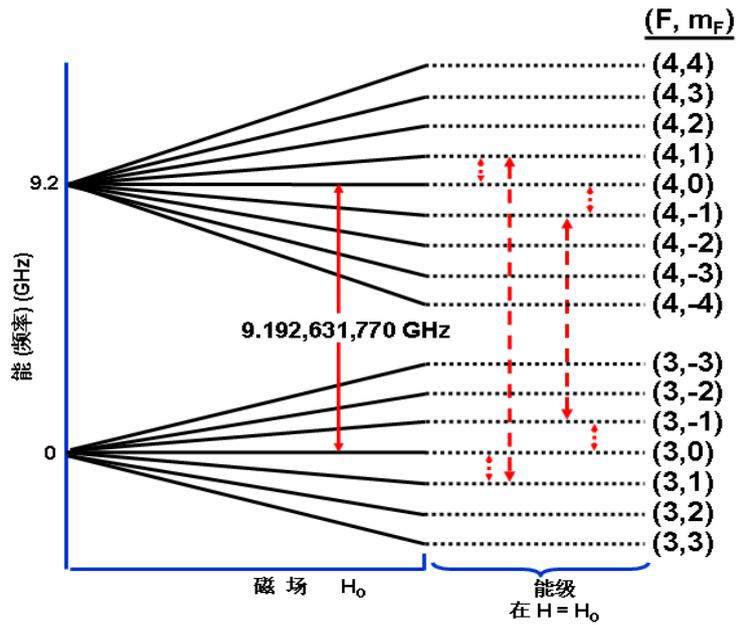
铯原子基态中的超精细能级的磁场关系（高能态为 9 个，低能态为 7 个）。图中划出的磁场最大到 H_0 值。实线箭头代表“同步”跃迁；虚线箭头表示对磁场敏感的跃迁。F 是超精细量子数，mf 为原子的磁场量子数。

所使用的原子谐振器的频率为 9,192,631,770 Hz/s。与 (3,0) 到 (4,0) 的超精细跃迁相对应，称为时钟跃迁。

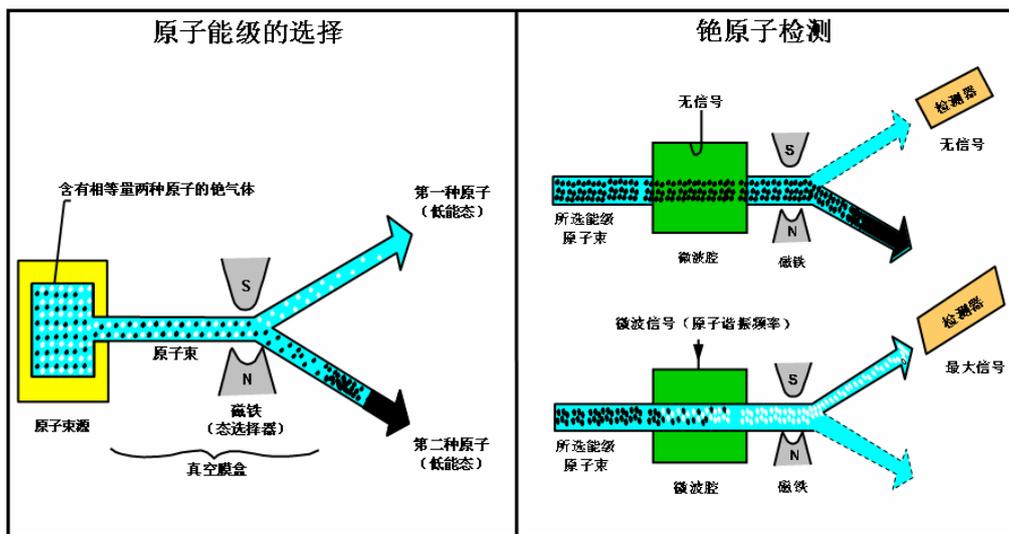
(3,0) 到 (4,0) 的同步跃迁对磁场具有很小的二次关系。C 场必须稳定且均匀。要求严格的屏蔽为 $\pm 1 \times 10^{-13}$ /Gs（即实验的 Cs 标准采用多层磁屏蔽）。

要求工作在零磁场，所有跃迁都应具有和单一跃迁一样的性能，信号应增大 7 倍，但在误差小于 1×10^{12} 时，跃迁要小于 10^{-8} Gs。做不到就必须加 C 场。0.06Gs 的 C 场，使次能级相差 40KHz。

下面将通过示意图介绍使用这些能级的方法。



铯束频率标准



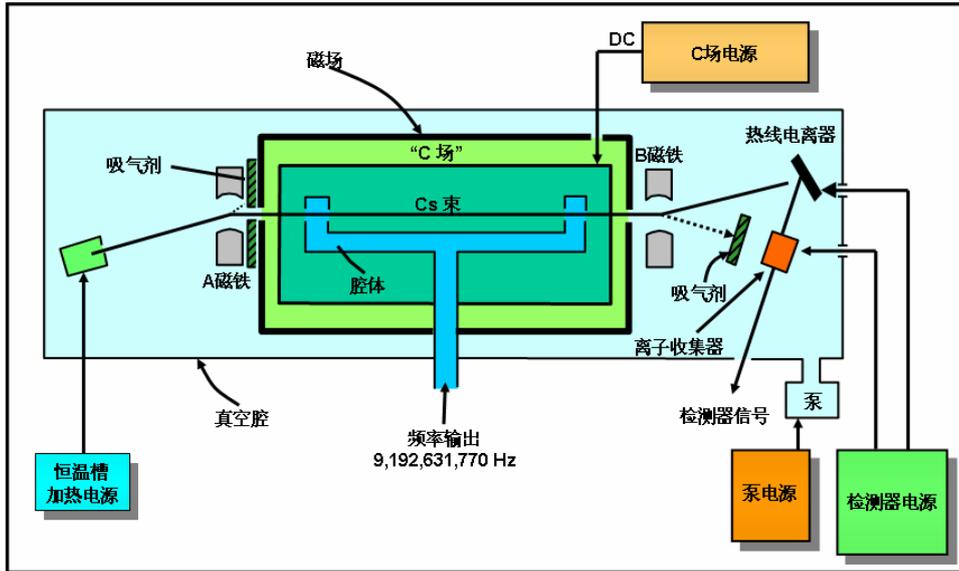
态选择磁铁“选择”其中一个两个原子能级。使用的微波能使态发生变化；另一磁铁使能态已经变化的原子向检测器偏转。磁场最高约为 10kGs。

原子检测器是能够工作在 900℃ 的金属带或金属丝（即钨或铂）；铯原子被电离，离子被集中，电流经过放大后，反馈入反馈网络。通过这个方法，微波频率被锁定在最大离子电流的频率上，因此，原子跃迁频率控制微波频率，即控制晶体振荡器频率。

在普通的铯标准中，到达检测器的铯原子远小于 1%（即光泵的优点）。

铯束频率标准

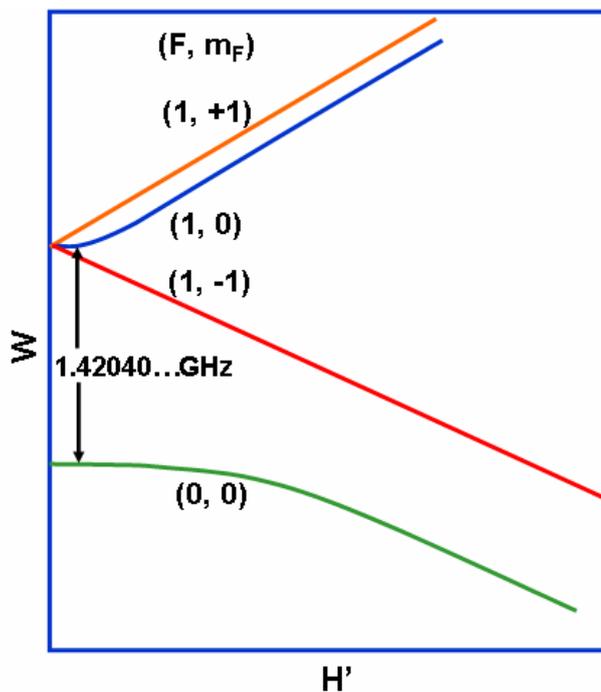
铯原子谐振器原理图



恒温槽温度为 100°C ，恒温槽中 Cs 的压力为 10^{-3} 托，腔体为 10^{-9} 托；典型的原子速度为 100m/s ；商用频率标准的典型腔体长度为 $10\sim 20\text{cm}$ ；相互作用时间为 $1\sim 2\times 10^{-3}\text{s}$ ；线宽为 $0.5\sim 1\text{kHz}$ ；Q 值为 10^7 ；在标准实验中，长为 4m ，Q 值为 10^8 。

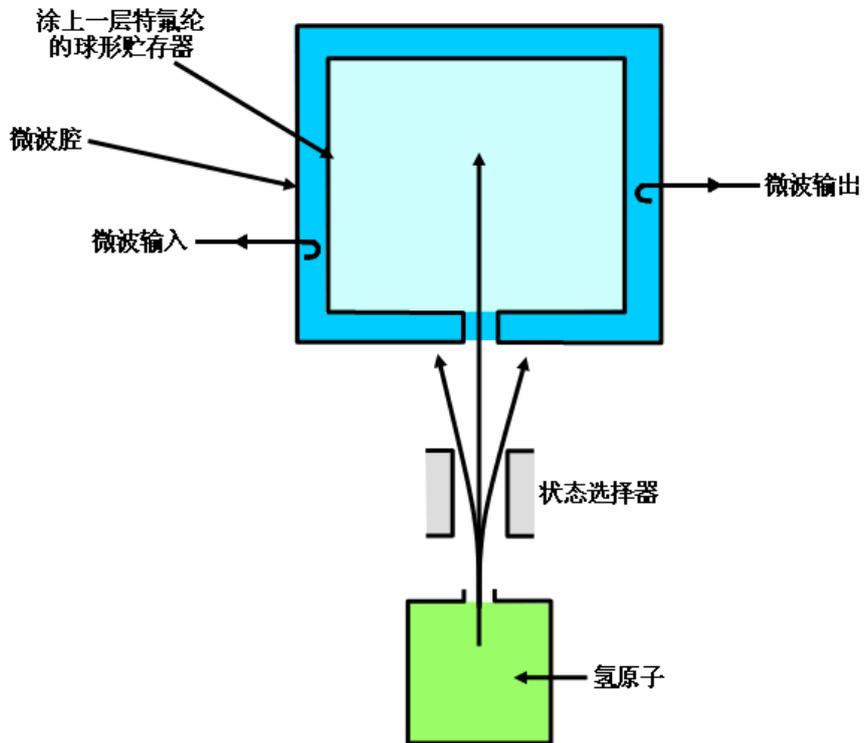
铯标准由于铯原子在通过高真空区域时不会与缓冲气体相冲击（会引起铷标准频率不稳定性）精确度要高与铷标准。铯标准使用拉姆齐分离场方法使原子谐振线宽进一步变窄。

氢原子能级

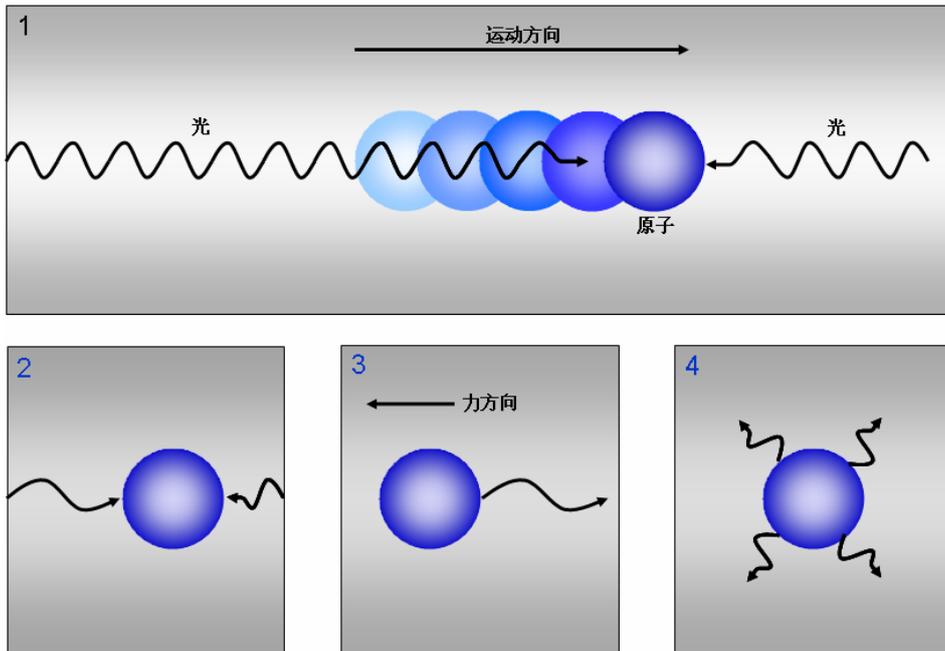


图示了氢原子在磁场下的相关能级。

中性氢微波激射原理图

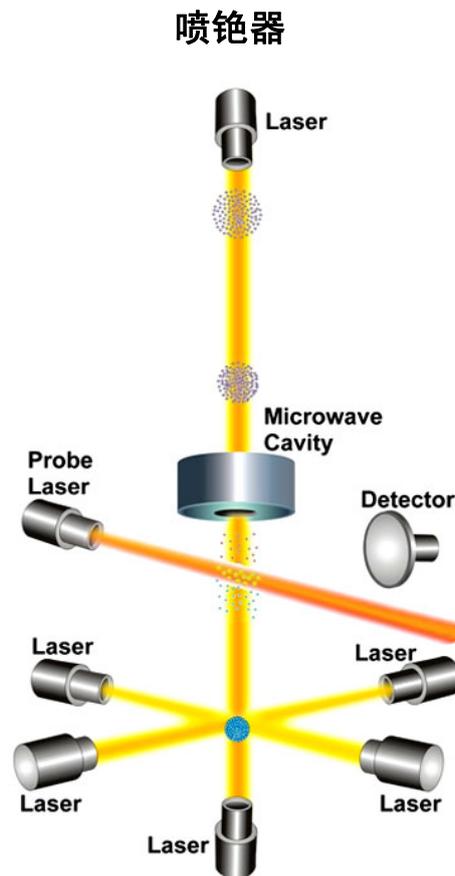


原子的激光冷却



原子激光冷却能使原子的移动相当缓慢。这可以使观察时间加长。事实上慢速能消除多普勒偏移，并且根据海森堡测不准原理，观察时间变长能使原子跃迁频率具有更高精确度，即 $\Delta E \Delta t \sim h$ ， $E = h\nu$ ，因此 $\Delta \nu \sim 1/\Delta t$ 。对于激光冷却的解释如下：

- 考虑轰击原子后的两条射线。一条与原子同方向运动；另一条运动方向则相反。光的频率要比原子容易吸收的频率低。
- 原子可能会吸收高频光但不会吸收低频光。这就是把光推向相反的方向和减速的原因。
- 被吸收光的发射能增加原子的随机方向。



精确度约为 1×10^{-15} 或 3 千万年误差 1s。
能达到 1×10^{-16} 。

原子谐振器的不稳定性

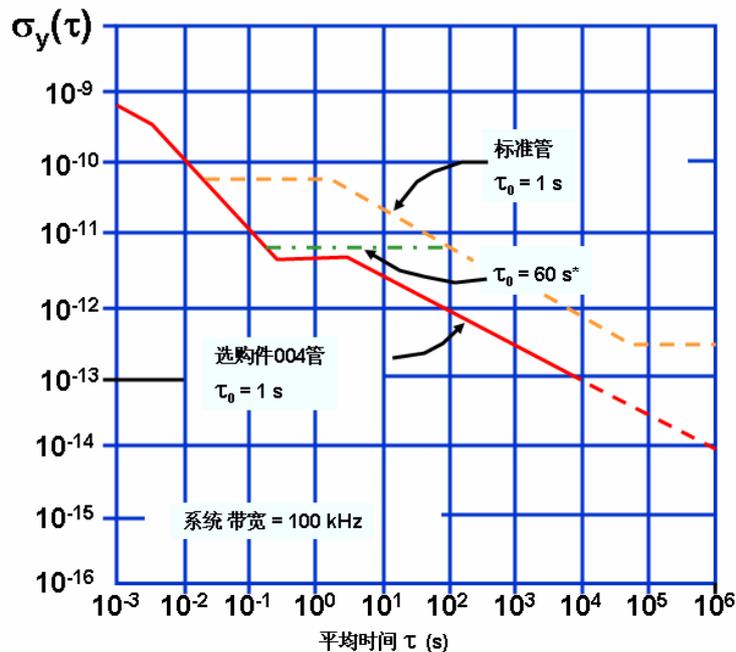
- 噪声——由于电路、晶体谐振器和原子谐振器引起的。
- 腔牵引——微波腔也是一种谐振器；原子和腔体相当于两个耦合振荡器；通过调谐腔体到原子谐振频率，同时把原子谐振 Q 值比增至最大，可以使这种效应减至最小。
- 碰撞——引起频率偏移并缩短振荡持续时间。
- 多普勒效应——一阶多普勒效应是传统的，可以通过设计来减至最小；二阶多普勒效应是相对论性的。

- 磁场——它是直接影响原子谐振器频率的唯一效应。
- 微波频谱——不对称的频率分布引起频率牵引；可以通过适当的设计而减至最小。
- 环境影响——磁场变化、温度变化、振动、冲击、辐射、大气压力变化和氦气渗入铷气泡。

原子频率中的噪声

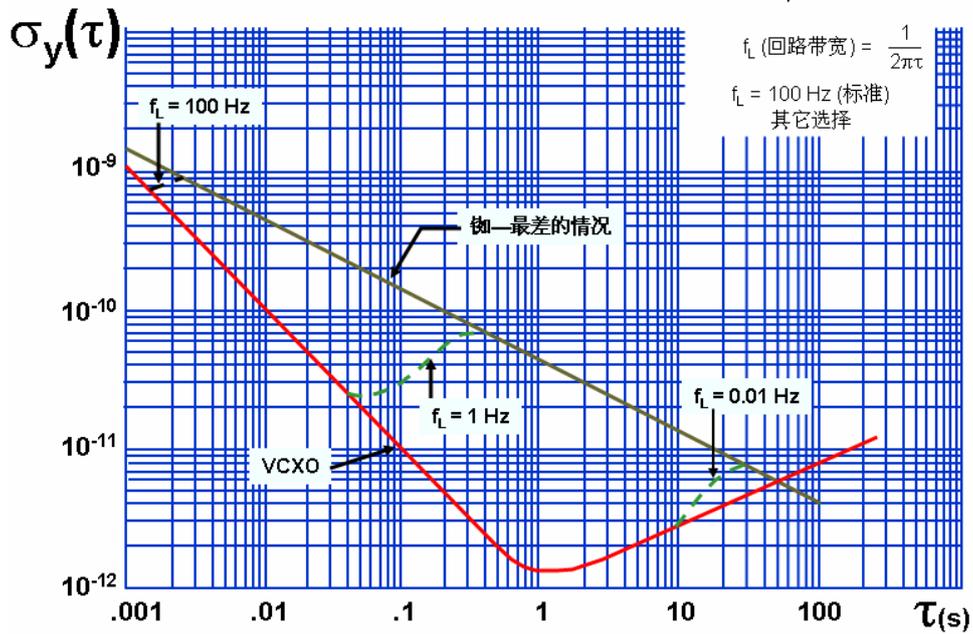
如果原子—晶体伺服回路的时间常数为 t_0 ，那么在 $\tau < t_0$ 时，晶体振荡器决定 $\sigma_y(\tau)$ ，即 $\sigma_y(\tau) \sim \tau$ 。从 $t_0 > \tau$ 到“闪变本底”开始的 τ ，原子束强度（散粒效应噪声）的变化决定 $\sigma_y(\tau)$ 和 $\sigma_y(\tau) \sim (i\tau)^{-1/2}$ ，其中 i 为每秒钟的信号数。反馈回路中的散粒效应噪声表现为白色频率噪声（相位的随机游动）。散粒效应噪声在任何电子器件（真空管、晶体管、光电二极管等）中都会出现。在这些器件中离散的离子（电子、原子）以随机的方式移过势垒。在商用频率标准中， t_0 的范围为从小型铷频率标准的 0.01s 到高性能铯频率标准的 60s。在 $\sigma_y(\tau)$ 的变化为 τ^{-1} 和 $\tau^{-1/2}$ 范围内， $\sigma_y(\tau) \propto (QS_R)^{-1}$ ，其中 S_R 为信噪比，即 Q 值和信噪比越高，短期稳定度越好（在频域中，相位噪声远离频载）。

铯频率标准的短期稳定度

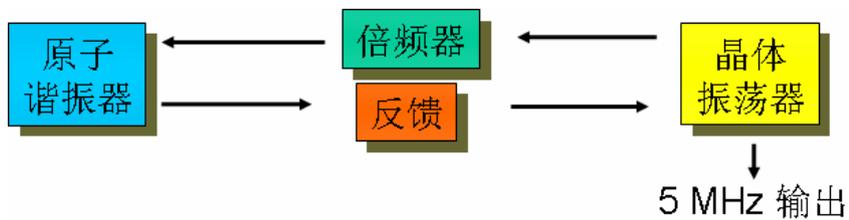


*60s 时间常量能提供更好的短期稳定度，但是只能载良好的环境中使用。

铷标准的短期稳定性



原子标准的加速度灵敏度



设伺服回路时间常量为 t_0 ，原子标准 $\Gamma = \Gamma_A$ ，石英振荡器 (VCXO) $\Gamma = \Gamma_0$ ，则

加速度变化较快 ($f_{vib} \gg 1/2\pi t_0$)， $\Gamma_A = \Gamma_0$

加速度变化较慢 ($f_{vib} \ll 1/2\pi t_0$)， $\Gamma_A \ll \Gamma_0$

对于 $f_{vib} \approx f_{mod}, 2f_{mod}$ ，伺服被干扰， $\Gamma_A \approx \Gamma_0$ ，加上频率偏移。

对于小的 f_{vib} ，(在贝塞尔函数为零处)，失锁， $\Gamma_A \approx \Gamma_0$ 。

原子标准的加速度效应

铷原子标准，高加速度由于光移，功率变化和伺服效应引起频率变化：

- 铷气泡内铷融化位置变化
- 机械变化能引起光束的偏转
- 机械变化引起射频功率的变化
- 铯束标准，高加速度由于电子管和微波腔结构使原子轨道变化引起频率变化。
- 振动调制探测信号的幅度，当 $f_{vib} = f_{mod}$ 时最差。
- 铯束到腔位置的改变引起腔相位偏移效应
- 铯原子的速度分布变化
- 振荡效应能引起频率变化甚至当 $f_{vib} < f_{mod}$
- 在氢微波激光器，由于腔牵引效应使腔变形引起频率变化。

原子时钟的磁场敏感度

时钟跃迁频率 $\nu = \nu_0 + C_H H_0^2$ ，其中 C_H 与塞曼效应系数具有二次关系(随 $1/\nu_0$ 变化)。

原子	跃迁频率	C场* (MGs)**	屏蔽系数*	敏感度 /Gs**
铷	$\nu=6.8 \text{ GHz} + (574 \text{ Hz/G}^2) B_0^2$	250	5k	10^{-11}
铯	$\nu=9.2 \text{ GHz} + (427 \text{ Hz/G}^2) B_0^2$	60	50k	10^{-13}
氢	$\nu=1.4 \text{ GHz} + (2750 \text{ Hz/G}^2) B_0^2$	0.5	50k	10^{-13}

* 标准值

** $1 \text{ Gs} = 10^{-4}$ 特斯拉; 特斯拉是磁通密度的国际单位

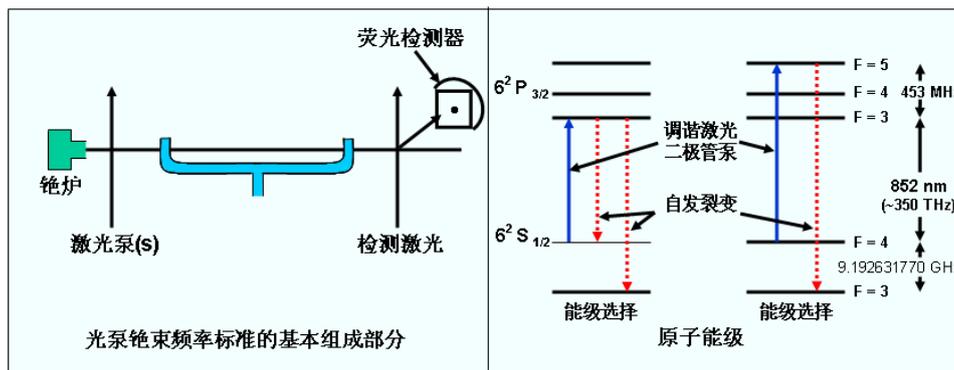
晶体对原子频率标准的影响

- 短期稳定度——平均时间低于原子—晶体伺服回路时间常数 τ_L 时，晶体振荡器决定 $\sigma_y(\tau)$ 。
- 失锁——是在 $t < t_L$ 时由大的相位偏移引起的（冲击、位置变化、振动、热瞬变、辐射脉冲）。在小型铷频率标准的 0.8GHz 频率上， $\Delta f = 1 \times 10^{-9} / s$ ，而在 2g 翻转

试验 (1s) 时, $\Delta\varphi \sim 7\pi$ 。在试验中, 控制扫描电压, 可以时相位和频率在宽范围内变化。

- 维修或使用期结束——晶体振荡器老化达到 EFC 范围 (一般约为 $1\sim 2\times 10^{-7}$)。
- 长期稳定度——调频二次谐波的噪声引起时间变化 $\Delta f'$, 这种效应只有在最高稳定度 (即 H 和 Hg) 频率标准中才是明显的。

光泵铯标准频率



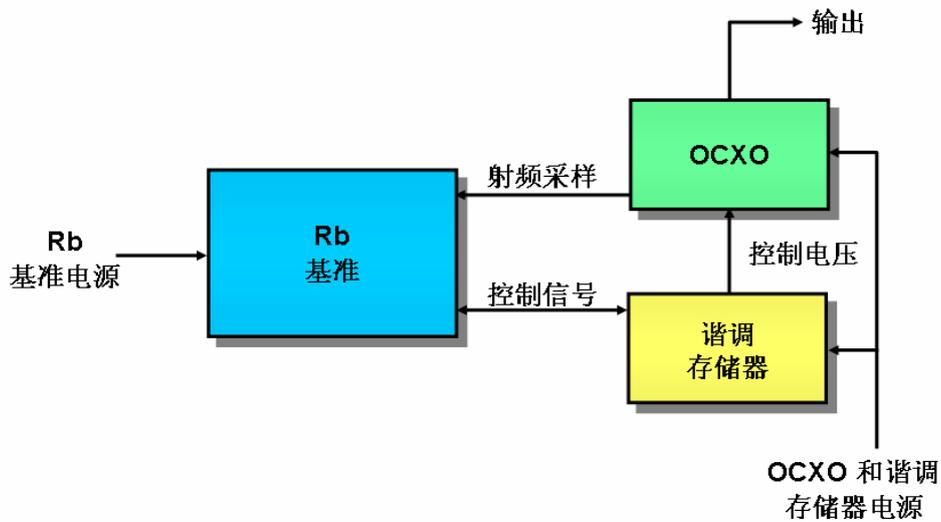
可以充分利用铯原子激光二极管的光泵作用来提供固有的原子能级。这种方法能提供较好的可利用的铯原子并且可能具有的优点包括: 信噪比较高、寿命较长、重量较轻以及可以协调尺寸以满足准确度的要求。小型铯频率标准研制计划的目的是达到 1×10^{-11} 的准确度, 体积为 1L, 即在体积相同 (但波形因数不一定相同) 的情况下, 比铷频率标准的准确度大约高 100 倍。

铷晶体振荡器

铷频率标准 ≈25W @ -55°C	RbXO 接口 ≈80mW	低功率晶体振荡器 ≈300mW @ -55°C
-------------------------------------	--------------------------------	--

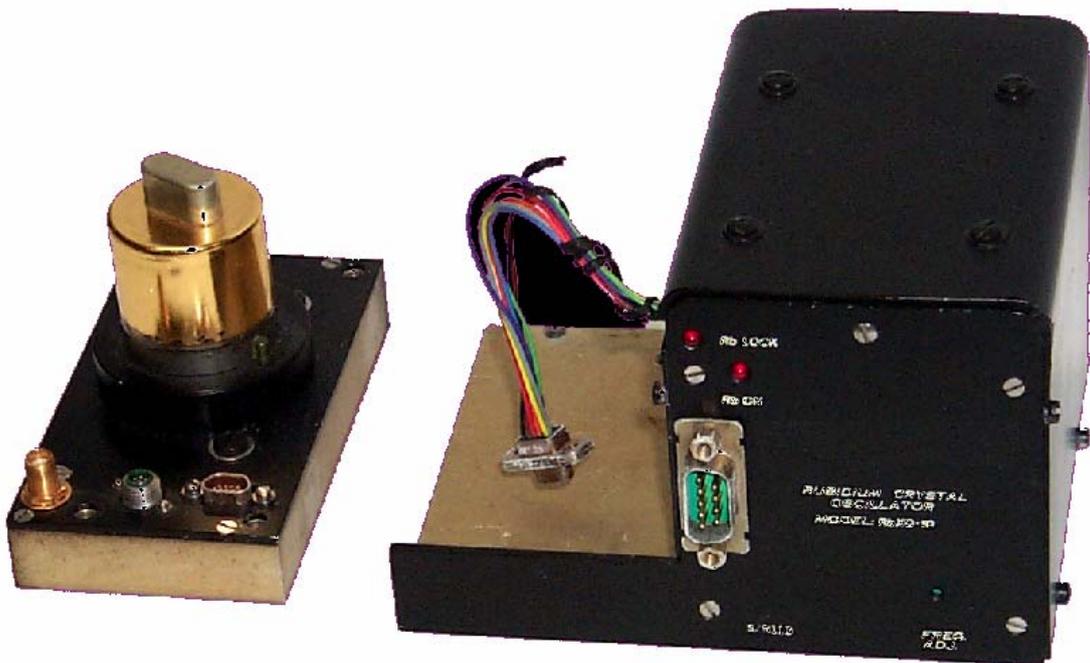
铷晶体振荡器在提供铷标准的长期稳定度和晶体振荡器的低功耗要求方面是最好的。往往只给铷频率标准加电几分钟。根据铷频率标准预热时间, RbXO 的结构晶体振荡器进行调谐并断开铷频率标准电源。当晶体振荡器是 MCXO 时, MCXO 数字线路能提供 RbXO 接口, 且平均 RbXO 功率消耗少于 100mW。

RbXO 工作原理



铷基准是一种经过改进用以控制外部晶体振荡器的小型铷频率标准（RFS）。OCXO 包括一个数字式调谐存储器，用来在铷基准断电时维持频率的控制电压。OCXO 是连续通电的。用户系统定期地将电源加到铷频率标准上。铷频率标准经过几分钟预热后，接口电路把 OCXO 频率调整到铷频率标准的参考频率上，然后切断 RbXO 电源。对于便携式应用，OCXO 将与 RbXO 有所不同，所以便携式应用能够用最小的尺寸、重量和电源消耗进行工作，而铷频率标准的准确度近似于飞行任务所要求的铷频率标准的准确度。

铷晶体振荡器



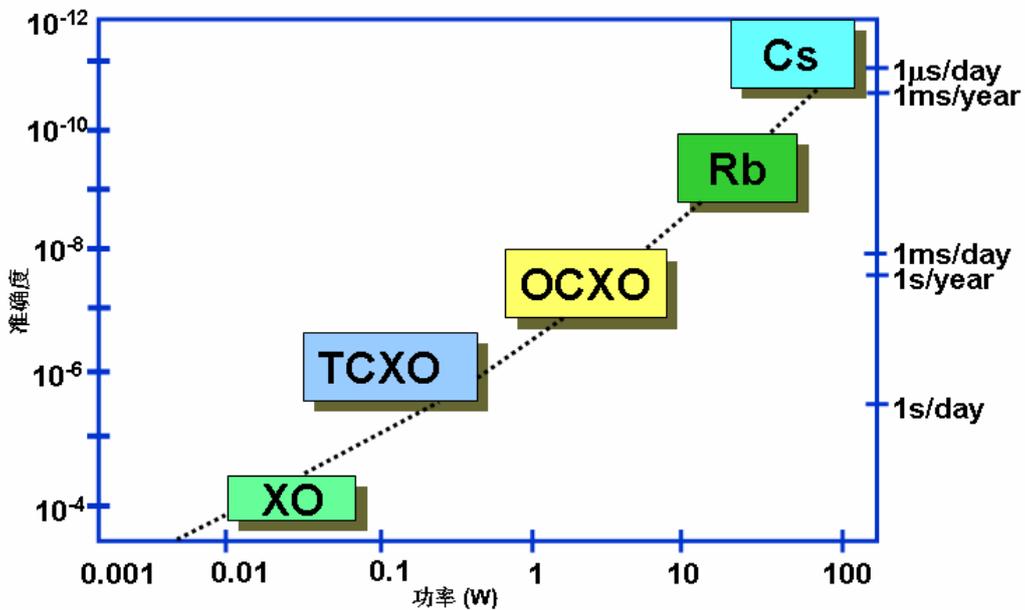
第七章 振荡器的比较和技术指标

振荡器的比较

	石英振荡器			原子振荡器		
	TCXO	MCXO	OCXO	铷	RbXO	铯
准确度* (年)	2×10^{-6}	5×10^{-8}	1×10^{-8}	5×10^{-10}	7×10^{-10}	2×10^{-11}
老化年	5×10^{-7}	2×10^{-8}	5×10^{-9}	2×10^{-10}	2×10^{-10}	0
温度稳定度 (°C)	5×10^{-7} (-55 to +85)	3×10^{-8} (-55 to +85)	1×10^{-9} (-55 to +85)	3×10^{-10} (-55 to +68)	5×10^{-10} (-55 to +85)	2×10^{-11} (-28 to +65)
稳定度 $\sigma_y(\tau)$ ($\tau = 1s$)	1×10^{-9}	3×10^{-10}	1×10^{-12}	3×10^{-12}	5×10^{-12}	5×10^{-11}
尺寸 (cm ³)	10	30	20-200	200-800	1,000	6,000
预热时间 (min)	0.03 (to 1×10^{-5})	0.03 (to 2×10^{-5})	4 (to 1×10^{-5})	3 (to 5×10^{-10})	3 (to 5×10^{-10})	20 (to 2×10^{-11})
功率 (W) (在最佳温度)	0.04	0.04	0.6	20	0.65	30
价格 (~\$)	10 - 100	<1,000	200-2,000	2,000-8,000	<10,000	50,000

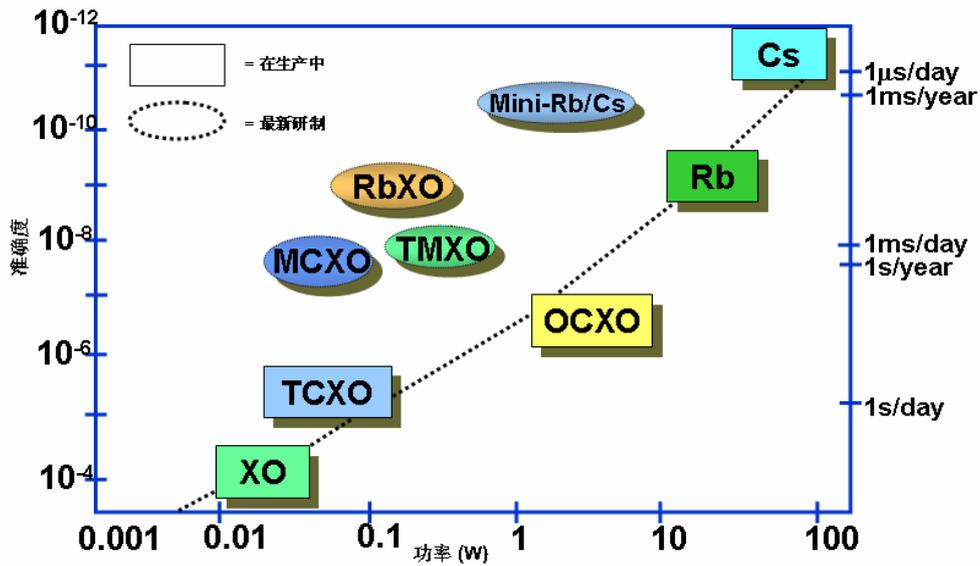
*包括环境影响（注意：铷和铯的温度范围比石英的窄一些）

时间准确度与功率要求的关系



商用频率源覆盖于几个数量级的精确范围—从简单振荡器到铯束频率标准。当精确度增大，则功率要求、尺寸和价格都会提高。图中显示了精确度与功率要求的关系。（注意是重对数关系）。精确度对于价格也有类似的关系，范围从简单振荡器的\$1 到铯标准的\$40,000（1997 年的价格）。

时间准确度与功率要求的关系

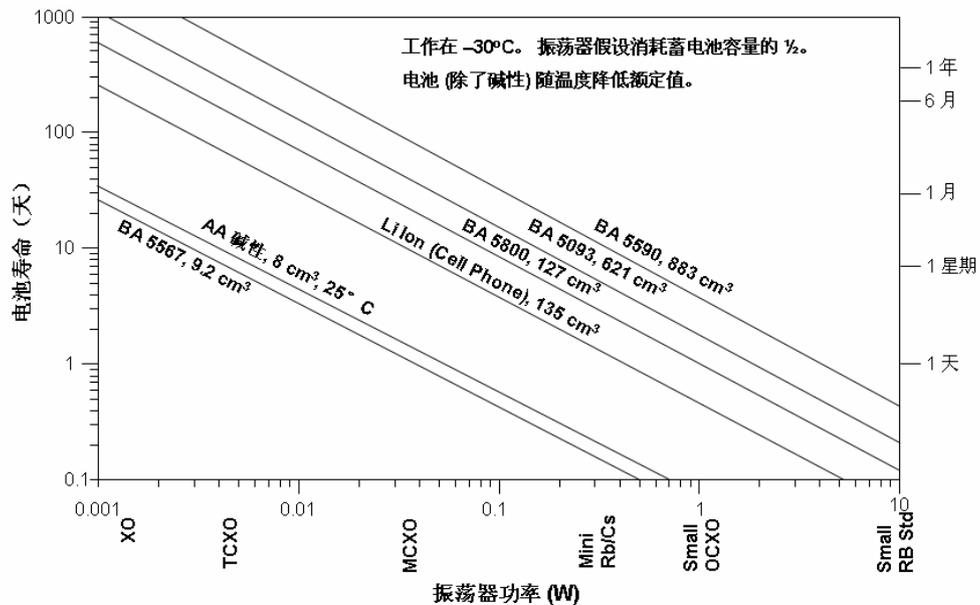


*准确度与尺寸和准确度与价格之间具有相似的关系。

此图为几种最主要的频率标准和一些最新研制的频率标准的准确度与功率要求之间的关系。实验室标准具有更高的准确度（最好使用铯标准）。

可用选择性经常受到可用功率的限制。例如，小的，便携的仪器被限制在 XO，TCXO 或 MCXO。

电池寿命与振荡器功率



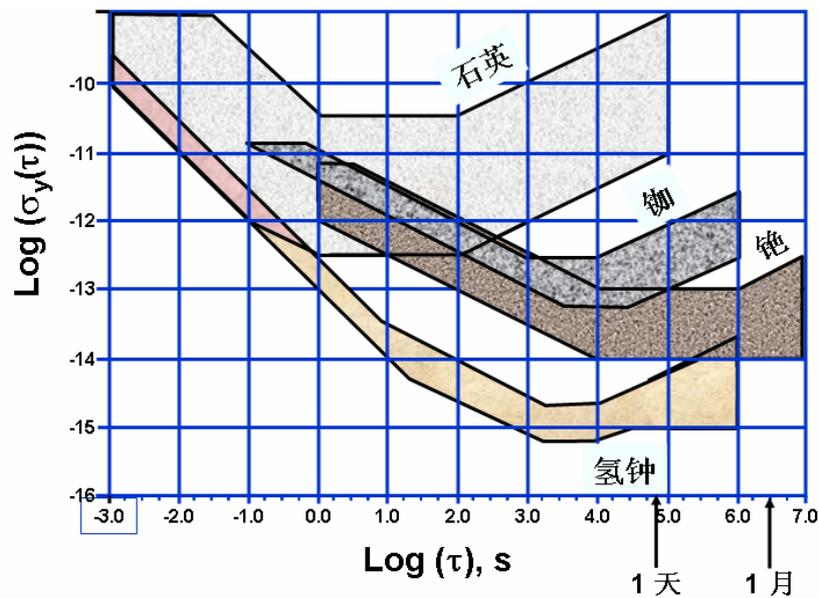
时钟假设不间断。在大多数情况下，即使当设备关掉后，时钟仍然持续工作。

这些曲线是近似值，并且不能作为设计参考。尽管曲线显示了电池寿命随温度而下降，但在相当低的耗用电流下，电池的大部分能量能够恢复。例如，在 -40°C 下，一个 D 尺寸的

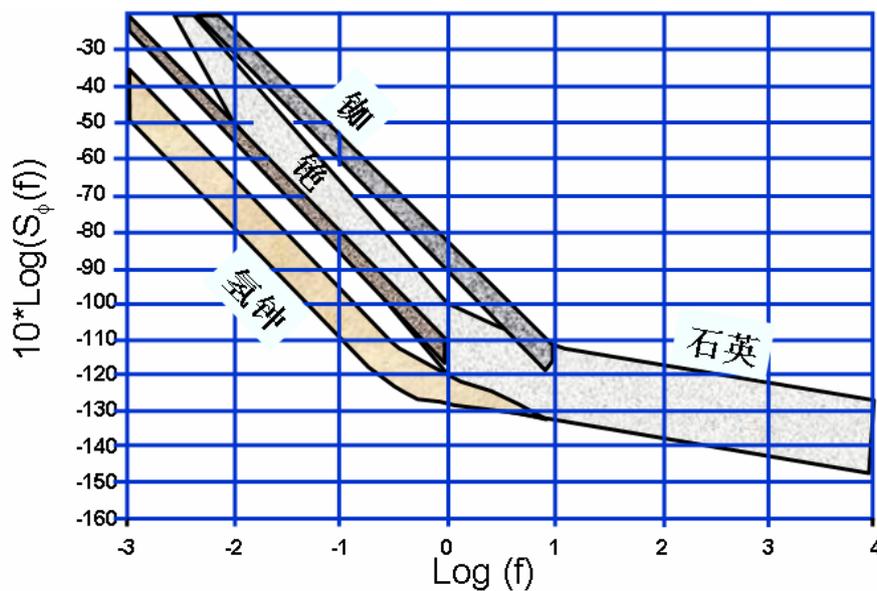
Li SO₂ 电池，当提供 0.5A (1.5 W) 电流时仍然保留最大容量的 50%；当提供 0.1A (300 mW) 时有 65%；当提供 0.01A (30 mW) 时有 85%。当把这些因素考虑以后，曲线在左端上升（即低耗用电流）并在右端下降。

AA 碱性电池没有随温度而降低额定值，是由于在 -30° C 下这种电池事实上无用。

各种频率标准的短期稳定度范围



各种频率标准的相位不稳定性



在 5MHz 计算出的各种频率标准的相位偏移与偏移频率之间的典型单边带频谱。

$$L(f) = 1/2S_\phi$$

弱点和磨损机构

	弱点	磨损机构
石英	老化 耐辐射性	无
铷	寿命 功率 重量	铷减少 缓冲气体减少 玻璃污染
铯	寿命 功率 重量 成本 温度范围	铯供给减少 废铯的吸收 离子泵流量 电子增倍器

晶体振荡器为什么会失效？

晶体振荡器并没有内在的失效机理。一些已经工作了数十年而没有失效。振荡器偶尔失效的理由如下：

工艺和质量控制较差——例如，由于焊接点连接较差使电线松掉，渗入密封壳，元件的偶然故障。

由于高老化和调谐范围不足使频率稳定性超出标准范围。

由于老化和“微调效应”使 TCXO 的频率温度特性下降。

由于恒温槽调整点的偏移使 OCXO 的频率温度特性下降。

由于活动性下降，在一定温度下振荡器停振，或频率偏移出标准范围或出现噪声。

由于使用为电清洗的石英或没有选择好电路元件，当受到离子辐射时，振荡器停振，频率偏移出标准范围。

由于振动引起的噪声使振荡器造成超出规定。

由于表明抛光不够在冲击下引起石英板破裂。

选择振荡器的考虑

- 频率准确度或重复性要求
- 重新校准周期
- 环境极限值
- 功率利用率——必须用电池供电吗？
- 容许预热时间
- 短期稳定度（相位噪声）要求
- 尺寸和重要限制
- 获得的最低成本或寿命周期

晶体振荡技术条件：MIL—PRF—55310

MIL—O—55310C

1994.3.15

更改为

MIL—O—55310D

1998.3.15

振荡器晶体的一般技术条件和规范

此技术条件被批准用于国防部所有部门和机构

1. 范围

1. 1 范围的说明

此技术条件包括对武装部队电子设备中石英晶体振荡器的一般要求。

第八章 时间和守时

时间是什么？

“如果没有任何人问我，我知道时间是什么吗？我不知我是否给发问人作解释。”——Saint, Augustine, 约公元 400 年。

无论是哲学问题，还是科学问题均无法给出完全满意的答复。“时间是用时钟来确定的”。“它确定事件在时间内的次数”。“它是时空四维几何学的一个元素”。“它是确信一切事物都不可能同时发生的一种本质方法”。

为什么时间有“箭头”？箭头是表示熵、电磁波、浩瀚的宇宙、K 介子衰变以及心理学上的东西。时间有开始和结束吗？（开始大的冲击；最后没有“事件”）。

时间的单位（s）是国际单位制（SI 单位）中 7 个基本单位之一。由于时间是能够以最高精确度量度的单位，所以它在计量中起着重要作用。

秒

时间的 SI 单位是秒（符号为 s）。

秒是在 1967 年 10 月的第 13 届计量大会的国际决议定义的。

秒是铯原子 133 基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9,192,631,770 个周期的持续时间。

在 1967 年以前，时间的单位是以天文观测为基础的；秒是用星历表时间来定义的，即定义为回归年的 $1/31,556,925,9747$ 。

频率的单位定义为赫兹（符号为 Hz）。1 赫兹等于每秒钟 1 个“事件”的重复发生。

频率和时间

$$f = \frac{1}{\tau}$$

式中： f ——频率（等于每单位时间的“事件”数）； τ ——周期（等于两事件之间的时间）。

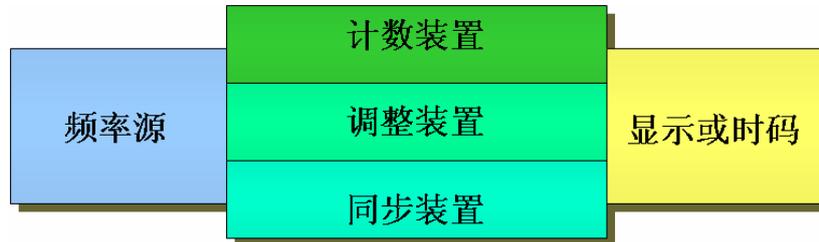
$$\text{累积的时钟时间} = \frac{\text{事件总数}}{\text{每单位时间的事件数}}$$

例如： $\frac{\text{地球转3圈}}{1\text{转/天}} = 3\text{天}$

频率源 + 计数机构 → 时钟

频率源的例子：旋转的地球、摆锤、石英晶体振荡器和原子频率标准。

典型的时钟系统



$$t = t_0 + \sum \Delta t$$

式中： t ——时间输出； t_0 ——初调； $\Delta\tau$ ——计数时间间隔。

时钟技术的发展

- 日规和连续的水流（铜壶滴漏）、沙流（沙漏）和落锤（速率的相对控制）。
- 振动，但非谐振运动——摆轮机构：落锤通过轮系施加转矩；速度的控制决定于惯性矩、摩擦和转矩；周期是从一个角度位置移到另一个角度位置花去的时间。
- 谐振控制
- 机械的：摆锤、发条和平衡轮
- 机械电驱动：音叉、石英谐振器
- 原子钟和分子钟

计时的进展

时间周期	时钟/里程碑	每天的精确度
公元前4000年 直到公元1280年 公元1280年	白天和黑夜都分为12个相等的小时 日规，水钟（铜壶滴漏） 发明祈求已久的机械钟首次使用	~1 h ~30 ~ 60 min
14世纪	发明摆轮；钟的制造成了主要工业	~15 ~ 30 min
~1345年	时间刻度分为分钟和秒钟	
15世纪	时钟时间用来管理人们的生活（工作小时）	~2 min
16世纪	时间对科学的影响变得很明显 (伽利略用来确定物理事件的时间，即自由落体)	~1 min
1656年	第一架摆轮钟（惠耿斯）	~100 s
18世纪	温度补偿的摆轮钟	1 ~ 10 s
19世纪	电驱动无摆轮钟	$10^{-2} \sim 10^{-1}$ s
1910~1920年	手表被广泛应用	
1920~1934年	电驱动音叉	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ s
1921至今	石英晶体钟（和表，自1971年）	$10^{-5} \sim 10^{-1}$ s
1949至今	原子钟	$10^{-9} \sim 10^{-4}$ s

钟的误差

$$T(t) = T_0 + \int_0^t R(t) dt + \varepsilon(t)$$

$$= T_0 + (R_0 t + 1/2 A t^2 + \dots) + \int_0^t E_i(t) dt + \varepsilon(t)$$

式中： $T(t)$ ——同步后两种时钟在时间 t 的时间差；

T_0 ——在 $t=0$ 时的同步误差；

$R(t)$ ——两个比对时钟之间的速度（即相对频率）之差； $R(t) = R_0 + At + \dots E_i(t)$ ；

$\varepsilon(t)$ ——随机波动引起的误差 = $\tau\sigma_y(\tau)$ ；

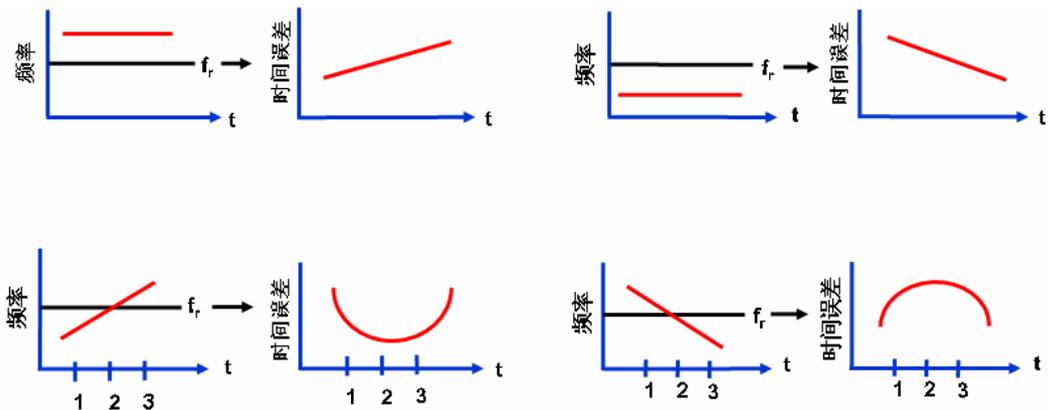
在 $t=0$ 时， $R_0 = R(t)$ ；

A ——线性老化项（如果老化是非线性的，则包括高阶项）；

$E_i(t)$ ——环境效应（温度等）引起的速度差。

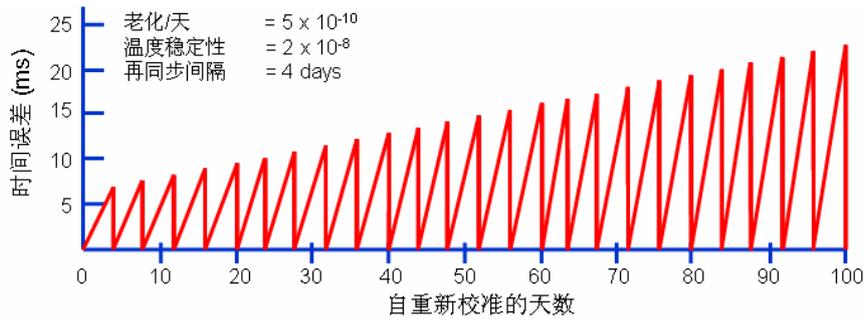
例如，如果把一块手表调到报时音($T=0.5s$)的 $0.5s$ 内，并将手表调快 $2s/W$ ($R_0=2s/W$)，同时手表的老化速度为 $-0.1s/W^2$ ($A=-0.1s/W^2$)，于是，10 周后（假设 $E_i(t)=0$ ）：
 $T(10 \text{ 周}) = 0.5 + (2 \times 10) + 1/2(-0.1 \times (10)^2) = 15.5 s$

频率误差与时间误差



f_r = 参考（即“校正”）频率

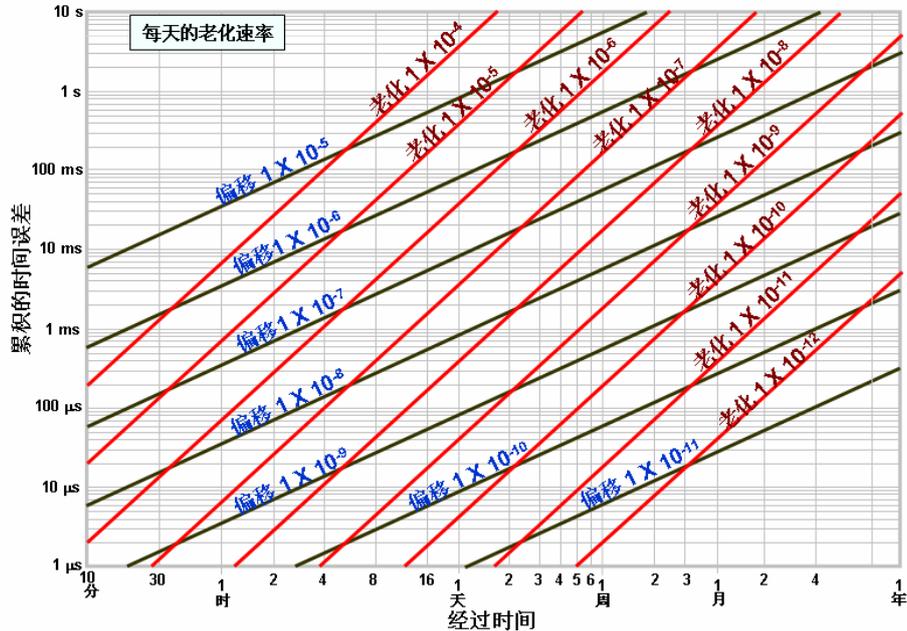
时钟误差与再同步间隔的关系



	TCXO		OCXO		MCXO		RbXO	
平均温度稳定度	1×10^{-6}		2×10^{-8}		2×10^{-8}		2×10^{-8}	
老化/天	1×10^{-8}		1×10^{-10}		5×10^{-11}		5×10^{-13}	
再同步间隔* (抗干扰和保密)	10 min	4 hrs	6 hours	4 days	6 hours	4 days	6 hours	4 days
再校准时间* (维修价格)	10 yrs	80 days	50 years	1.5 yrs	94 yrs	3 yrs	无人需要	300 yrs

*是按 25ms 的准确度要求计算的。许多先进系统所要求的还要好得多。

时间误差与经过时间的关系



为了估算累积的时间误差：

1. 估算起始频率偏移加上温度和其环境影响所引起的平均预计偏移；
2. 确定偏移之和引起的时间误差
3. 确定振荡器规定老化所引起的时间误差
4. 把 2 和 3 两项结果相加来估算总的时间误差。

同步、调谐

时钟是同步的：

- 时钟与时间一致
- 输出信号或数据流协调一致
- 同步模式调整。

时钟/振荡器是调谐的：

- 振荡器有“相同的”频率（输出信号并不需要协调）
- 时钟在同一速率下行走（内部振荡器并不需要有相同的频率）

关于用时间进行时钟速度的校准

测量两钟之间钟速之差（即频率）是需要花费时间的。被校准的钟和参考钟之间的速度差越小，测量时差（ $\Delta t/t = \Delta f/f$ ）的时间就越长。

例如，假定一个时间不确定度为 100ns 的参考计时源（即罗兰 C 或 GPS）被用来把一个时钟的速度校准到 1×10^{-11} 准确度。 1×10^{-11} 的频率偏移将产生 $1 \times 10^{-11} \times 3600s/h = 36ns$ 时间误差/h。因此，为了得到因频率偏移而不是因参考时钟的不确定性所引起测时误差具有高的可靠性，人们必须累积足够的时间误差两（ $\geq 100ns$ ）。可以花几小时进行校准。（见下一页的另一举例）。如果人们希望知道频率偏移的精确度为 $\pm 1 \times 10^{-12}$ ，则校准需要花一天以上的时间。

当然，如果具有作为参考频率的铯频率标准，例如具有一台高分辨率的频率计数器，则能够以快得多得速度进行同一精确度的频率比对。

用 1pps 的基准进行校准

设 A —— 校准后所要求钟的速率准确度；

A' —— 实际钟的速率准确度；

$\Delta\tau$ —— 参考钟 1pps 的速度偏差，rms；

$\Delta\tau'$ —— 被校准钟 1pps 的速度偏差，rms；

t —— 校准持续时间；

Δt —— 校准钟累积时间误差，

那么，对于 A 、 $\Delta\tau$ 和 $\Delta\tau'$ 的某一给定位置时的 t 应该是什么呢？

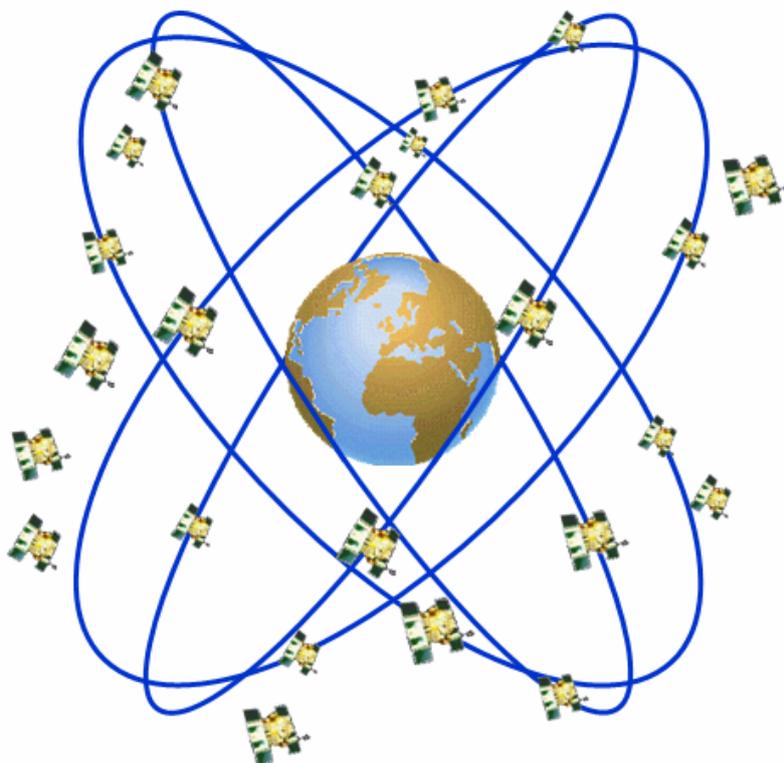
例如，我们把时钟的 1pps 输出与一个标准的 1pps 输出加以比较来校准某一时钟的晶体振荡器。如果 $A=1 \times 10^{-9}$ ， $\Delta\tau=0.1\mu s$ 和 $\Delta\tau'=1.2\mu s$ ，则 $[(\Delta\tau)^2 + (\Delta\tau')^2]^{1/2} 1.2\mu s$ ；而当 $A=A'$ ， $\Delta\tau=(1 \times 10^{-9})t = (1.2\mu s)N$ ， $t = (1200N)s$ ，所选择的 N 直取决于噪声过程的统计量和 $A \leq A'$ 时所要求的置信度，以及人们是否每秒钟或者仅在最后几点进行测量。如果只在最后几点进行测量，且噪声是白色相位噪声，测量误差为正态分布，则在 $N=1$ 时，68% 的校准将在 A 以内； $N=2$ 和 3 时，分别有 95% 和 99.7% 将在 A 以内。通过每秒钟进行测

量，人们能够把 t 减少大约 $2/N^{3/2}$ ，即从 1200s 减小到 $2 \times (1200)^{3/2} = 225s$ 。

时间传递方法

方法	准确度	价格 ('95年)
便携式铯钟	10 - 100 ns	\$45K - 70K
GPS 时间散播 GPS 通常图象	20 - 100 ns 5 - 20 ns	\$100 - 5K
双向卫星	~1 ns	\$60k
罗兰C	100 ns	\$1K - 5K
HF (WWW)	2 ms	\$100 - 5K
便携式石英钟和铷钟	随校准间隔而变化	\$200 - 2K

全球定位系统 (GPS)



GPS 的通常卫星分布：

24 颗卫星在 6 个轨道平面内；

每个轨道有 4 颗卫星。

全球定位系统 (GPS) 是目前最精确的导航系统。由于它能够提供纳秒级计时准确度，

所以它也是最准确的时间源之一。

GPS 是以卫星为基础的无线电导航定位系统，设计该系统的目的是要给无限的用户提供全球、全天候 24 小时的准确导航。各卫星某一导航信息，提供卫星的位置、时间和大气传播校正数据。装有石英钟的 GPS 接收机测量卫星信号的传输时间并将该时间乘以光速来计算卫星距离。卫星钟的准确度均高于接收机钟的准确度。因此，三颗卫星能够提供纬度、经度和高度，来自第四颗卫星的信号被用来校正接收机时钟不准确引起的导航误差，即接收机根据接受 x、y、z 和 t 四颗卫星中的每一颗的信号来计算 x、y、z 和 t。速度是根据发射的载波频率的多普勒频移来确定的。

GPS

GPS 能给无限的用户提供全球全天候 24 时，实时精确的导航和计时。

GPS 精确度 (2σ)

位置：120m（标准定位服务，SPS）；40m（精确定位服务，PPS）；1cm+1ppm 局部的、静态陆地测量。

速度：0.3m/s（SPS），0.1m/s（PPS）。

时间：350ns~<10ns。

24 颗卫星在 6 个轨道平面内；在任何时间均可看到 6~10 颗；周期为 12h，轨道为 20,200km。

伪随机信号 (PRN) 导航信号的广播频率为 $L_1=1.575$ GHz (19 cm) 和 $L_2=1.228$ GHz (24 cm)；用 C/A 码和 P 码进行传递；信息提供卫星的位置、时间和大气传播数据；用户可选择 4 颗最佳的卫星进行跟踪。PPS（对于 DoD 用户）使用 L_1 和 L_2 ，SPS 用户只使用 L_1 。

振荡器对 GPS 的影响

卫星用振荡器（钟）的不准确度和噪声是导航不准确的主要原因。

接收机振荡器影响 GPS 性能如下：

振荡器参数	GPS性能参数
预热时间	首次定位时间
电源	使用时间、后勤费用（电池）
尺寸和重量	便携式的尺寸和重量
短期稳定度 (0.1 s ~ 100 s)	距离测量准确度、加速度性能、抗干扰
短期稳定度 (~15 minute)	下次定位时间
相位噪声	干扰极限、数据解调、跟踪
加速度敏感度	参见短期稳定度和相位噪声的影响

时标

时标是一种规定日期的制式，即规定某些事件的一种“时间”系统，例如 1989.1.6, 13h, 32min, 46.382912s (UTC) 就是一种日期。

时间间隔是两事件之间的时间“长度”，如 5 秒。

国际标准时刻 UT0、UT1 和 UT2 是以绕地球轴自转并不断进行校正为基础的。

天体导航：时钟 (UT1) 和 16 分仪 → 定位。

国际原子时 (TAI) 由国际计量局 (BIPM, 在法国) 保持，并且是由世界上 60 多个实验室的 200 多台原子钟导出的。

协调世界时 (UTC) 就是今天的时标，全世界都是一致的。UTC 的速度由 TAI 确定，但是为了在长时间内不让时间随着地球位置而变化，用闰秒的方法来调整 UTC，以保持 UTC 在 UT1 的 0.9s 以内。

时钟组和时标

时钟组是一群时钟，每个时钟能输出一个时间，通过“时标法则”把这些时间组合起来形成时标。

时钟组通常用于关键任务应用，当一个时钟失效 (或性能下降) 而出现无法接受的风险。

时钟组的优点：

- 即使组中的一个时钟失效，系统时间和频率仍然能够维持。
- 总体平均能够用来估计每个时钟的特性；在外部随时检测。
- 组的性能 (有时) 要比任何一个钟要好。
- 合适的法则通过一个优化的方式，能把不同特性和不同工作循环的钟结合。

相对论时间

时间不是绝对的。事件相距很远发生的“时间”是由观测者来决定的。例如，如果 A 和 B 两事件在时间上很接近。而在空间上相隔很远，以致于以光速传播的信号能够在后者发生之前，从一方到达另一方，因此，甚至在对传播延迟进行校准后，第一位观测者可能发现 A 发生在 B 之前，另一位观测者发现 B 发生在 A 之前，而第三位观测者发现 A 和 B 是同时发生的。虽然看起来很奇怪，但是三者可那全是对的。

迅速移动的目标具有“时间延长”效应。(以 0.87 光速运动的航天飞船上的双晶老化期为 6 个月，而地球上的老化期为 1 年)。由于飞船上的双晶必然受到加速度的作用，所以是无可非议的，即该问题是没有对称性的。

钟的速度还决定于其在重力场的位置。位置高的钟比位置低的钟走得更快。

相对论时间效应

缓慢沿地球赤道平面走得“准确”得钟，向东的 $\Delta t = -207 \text{ ns}$ ，而向西 $\Delta t = +207 \text{ ns}$ （最新的便携式钟是向东的）。由于地球的自转引起的这种效应。

例如，在经度 40 度处，钟的速率在海平面上每公里的变化为 $1.091 \times 10^{-13}/\text{km}$ 。把钟从海平面搬到一公里的海拔高地上，在该经度上将增加 9.4ns/d 。

在 1971 年，原子钟先向东然后向西的地球飞行说明了相对论时间效应；向东 $\Delta t = -59 \text{ ns}$ ，向西 $\Delta t = +273 \text{ ns}$ ；在试验的不确定度范围内，这两个数值与预期值是一致的。

飞行器试验：

- 对于在 325km 轨道上在航天飞机， $\Delta t = t_{\text{空间}} - t_{\text{地面}} = -25 \mu\text{sec/d}$
- 对于 GPS 卫星（圆形轨道周期为 12h）， $\Delta t = +38.5 \mu\text{sec/d}$

在精密时间和频率比较方面，必须把相对论效应包括在比较步骤中。

相对论时间校正

以下表达式考虑到了相对论效应，提供的钟的速率准确度优于 1×10^{-14} ，并且通过卫星可以进行纳秒级准确度的全球规模的时钟比对：

$$\Delta t = -\frac{1}{c^2} \int_0^T \left[\frac{1}{2} (V_s^2 - V_g^2) - (\Phi_s - \Phi_g) \right] dt + \frac{2\omega}{c^2} A_E$$

式中： Δt ——航天飞机上的钟和地面上的钟的时差， $t_s - T_g$

V_s ——航天飞机速度 ($\ll c$)； V_g ——地面站的速度

Φ_s ——航天飞机的重力势； Φ_g ——地面站的重力势

ω ——地球旋转角速度；

A_E ——由矢量尾部在地球中心而首部在便携式钟位置的矢量或电磁信号脉冲扫出的地球赤道平面上的投影面积。如面矢量首部在向西方向，则 A_E 为正。

在海平面 24km 以内， $\Phi = gh$ 的准确度为 1×10^{-14} ，其中 $g = (9.780 + 0.052 \sin^2 \Psi) \text{ m/s}^2$ ， Ψ 为纬度， h 为高出海平面的距离， $\sin^2 \Psi$ 考虑了地球旋转引起的离心势能。“Sangac 效应”
 $(2\omega/c^2)A_E = (1.6227 \times 10^{-21} \text{ s/m}^2)A_E$ 考虑到了固定的地球坐标系旋转的非惯性参考坐标系。

一些有用的关系式

传输延迟 = $1\text{ns}/30\text{cm} = 1\text{ns}/\text{ft} = 3.3\mu\text{s}/\text{km} \approx 5 \mu\text{s}/\text{英里}$

1 天 = 86400s ；1 年 = $31.5 \times 10^7 \text{ s}$

钟的准确度： $1\text{ms}/\text{天} \approx 1 \times 10^{-8}$

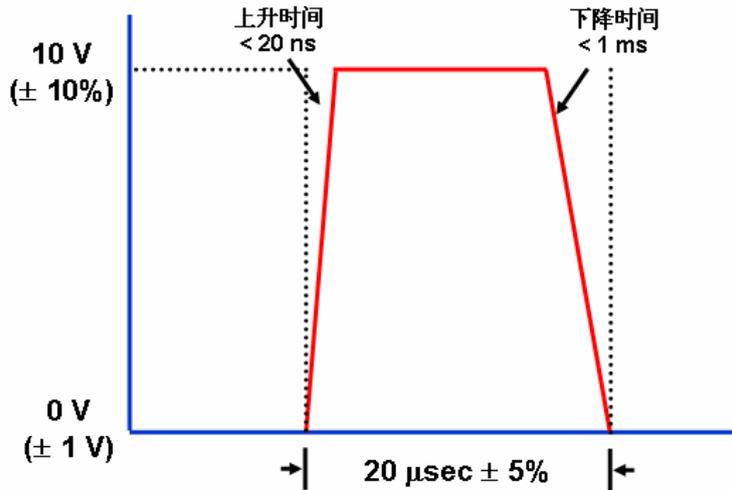
在 10MHz 时，周期=100ns；1 度的相位偏移=0.3ns 的时间偏移

多普勒频移*= $\Delta f/f = 2v/c$

*多普勒频移举例：如果 $V=4\text{km/h}$ ， $F=10\text{GHz}$ （即慢速行使的坦克，接近于 X 波段雷达），则 $\Delta f=74\text{Hz}$ ，即必须有偏离载荷 74Hz 的低相位噪声才能“看到”坦克。

每秒一个脉冲的计时信号

(MIL—STD—188—115)



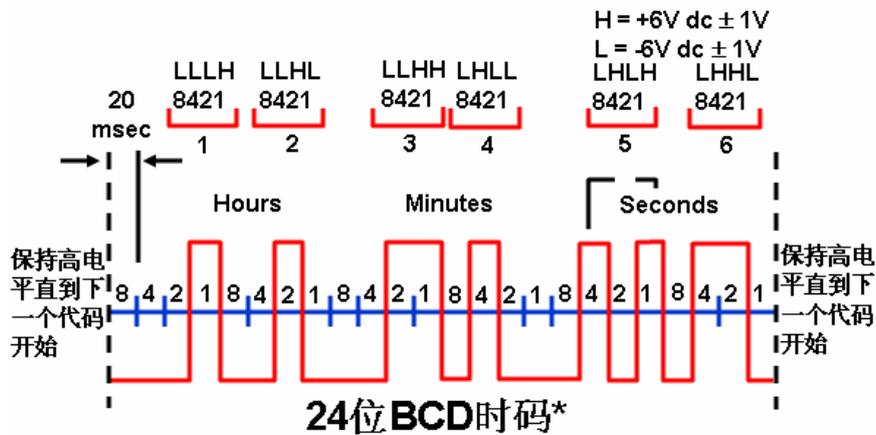
“BCD 码的前沿（持续高电平的负跳变）将在 $\pm 1\text{ ms}$ 内与每秒 1 个脉冲信号的工作时间（正跳变）相重合。”参见下面的 MIL—STD BCD 码。

BCD 时码

(MIL—STD—188—115)

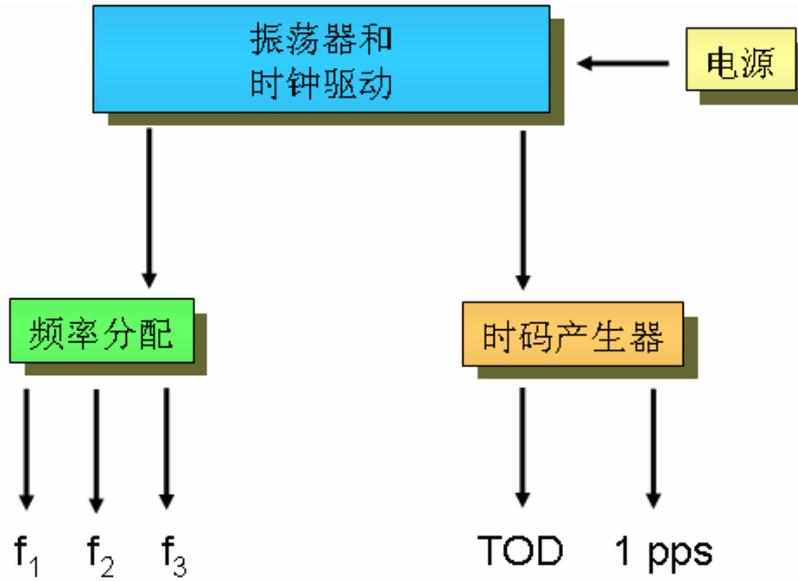
例如：选择时间为 12:34:56

速率：50 比特/s
二进制脉冲宽度：20 ms

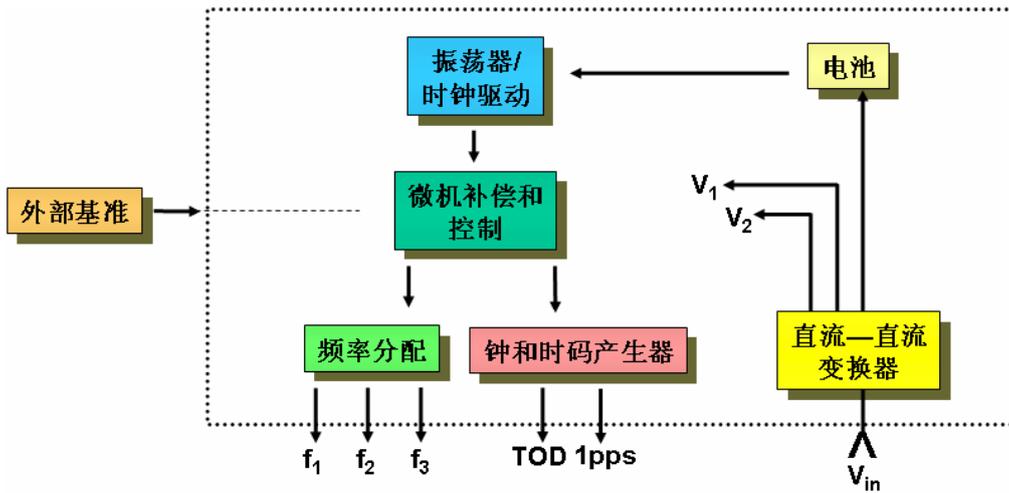


*可以再加上年日的 12 位和（或）质量因数（FOM）的 4 位。质量因数的范围从 $>1\text{ns}$ （BCD 的号码 1）到 $>10\text{ms}$ （BCD 的号码 9）。

时间和频率分系统



组合式智能频率，时间与时间间隔分系统

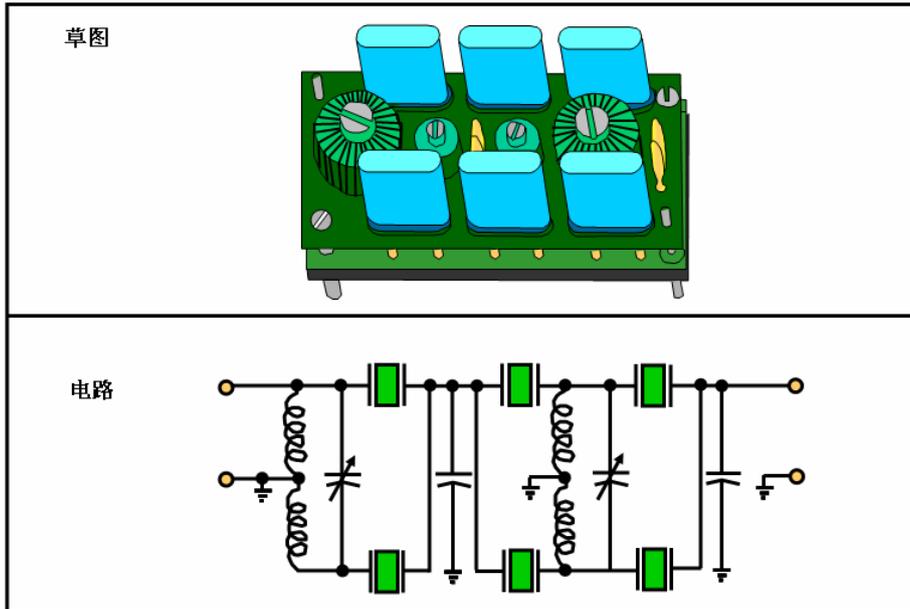


*微机补偿系统效应（再滤除随机效应后）和性能：能在有外部基准时进行自动同步和校准，并能进行机内测试。

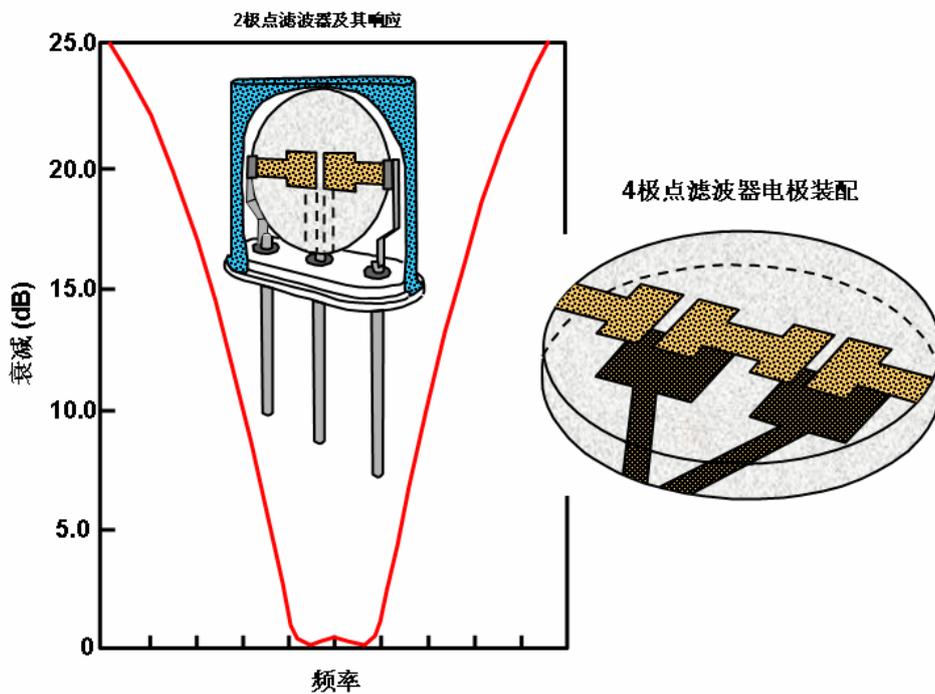
第九章 相关器件和设备

分布式谐振器晶体滤波器

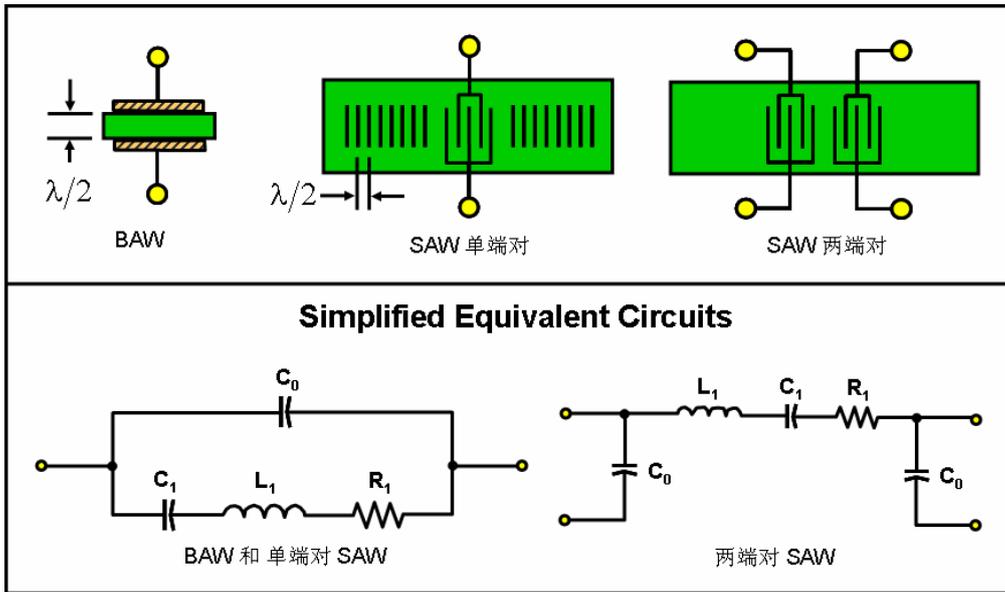
(一种典型的 6 极点窄带滤波器)



单片晶体滤波器



声表面波（SAW）器件



SAW 器件的主要用途是在滤波器中。由于最好的体声波（BAW）器件的长期稳定性和温度稳定性大大优于最好的 SAW 器件的长期稳定性和温度稳定性，所以在精密频率控制和计时方面的应用受到限制。

对于 BAW 谐振器，晶片厚度决定基膜频率。对于 SAW 谐振器，叉指换能器（IDT）的间距决定频率。对于石英，300MHz 的 BAW 谐振器晶片厚度为 $5\mu\text{m}$ 。2.6GHz 的 SAW 谐振器的叉指换能器的间距为 $0.3\mu\text{m}$ ，并可用电子束平版印刷术进行生产。

在 SAW 谐振器中，波的运动集中在晶体表明；运动随表明距离呈指数衰减；90~95% 的能量是在表明一个声波长以内

在单端对 SAW 和 BAW 谐振器中，静电容 C_0 提供低阻抗通路，该通路能够防止高频谐振。外部指示器通常与 C_0 并联，使 C_0 “谐振”。在双端对 SAW 谐振器中， C_0 不与等效电路的动态臂并联。因此，在许多应用中最好用双端对 SAW 谐振器。

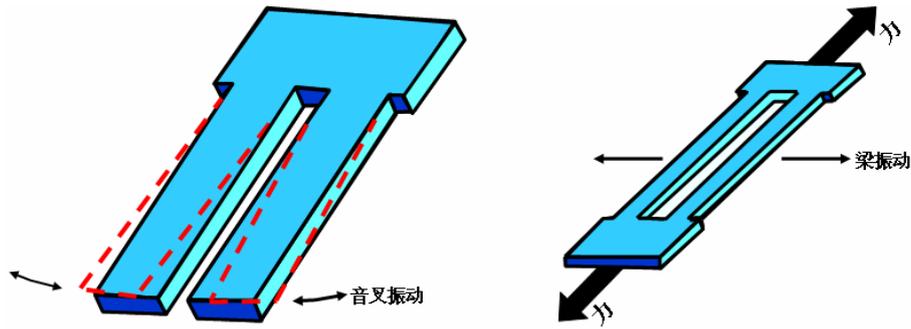
石英体波谐振传感器

在频率控制和守时应用中，谐振器被设计成对环境参数敏感度最小。在传感器应用中，谐振器被设计成对环境参数例如温度、吸附质量、力、压力和加速度具有很高的敏感度。

石英谐振器比其它传感器技术更好的优点为：

- 分辨率高，动态范围广（由于短期稳定性极好）；现在有 1×10^{-7} (20g 以上为 10^{-6}g) 的加速度计，而石英吸附检测器能够检测除 10^{-12}g 。
- 长期准确度和稳定性高。
- 频率计数是机内数字式的。

音叉谐振器传感器



用光刻技术生产的单端和双端（弯曲模和扭曲模）音叉能够用来提供测量温度、压力、力和加速度的低价高分辨率传感器。

SC 切双模传感器

优点：

- 通过双模工作，温度自敏感允许隔离/补偿温度效应。
- 热瞬时补偿
- 各向同性应力补偿
- 比 AT 切的活动性下降小
- 对电路阻抗变化的敏感度小
- 对驱动电平变化的敏感度小

缺点

- 在液体中衰减的很快
- SC 切的供应商比 AT 切的供应商少。

质量和温度效应的分离

频率变化

$$\frac{\Delta f(m, T, x)}{f_0} = \frac{\Delta f(m)}{f_0} + \frac{\Delta f(T)}{f_0} + \frac{\Delta f(x)}{f_0}$$

总 质量 温度 其它效应

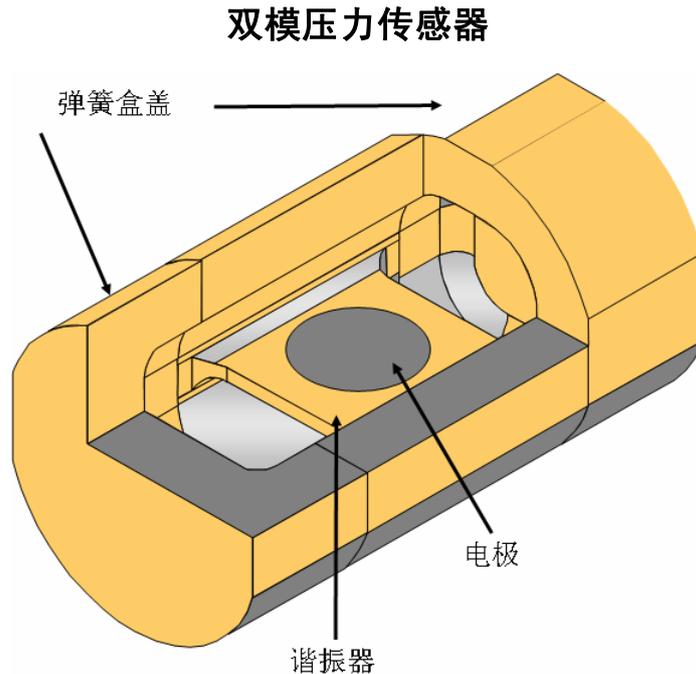
质量：吸附和沉积

$$\frac{\Delta f(m)}{f_0} \cong -\frac{\Delta m}{m_0}$$

温度/差频

$$\frac{\Delta f(T)}{f_o} = \frac{\sum_i c_i \cdot \Delta f_{\beta}^i}{f_o} \quad f_{\beta} \equiv 3f_{c1}(T) - f_{c3}(T)$$

例如，当质量吸附在谐振器（如石英晶体微量天平）上时，温度伴随着质量的变化而变化。温度变化由热吸收和热发散引起的，如蒸发源。由于质量沉积，质量变化和温度变化的组合效应会引起的频率变化。双模技术形成两个方程，使得质量变化引起的频率变化与温度引起的频率变化分开。



高精度压力传感器采用石英厚度剪切谐振器。频率不仅会随着压力，也会随着温度而变化。温度控制或补偿用来把温度效应引起误差最小化。一些压力传感器使用温度传感器，即温度传感器在压力传感谐振器的外部，并屏蔽大气压力。然而，当温度梯度存在于压力和温度传感器时，这种可能出现的压力和温度瞬时效应会使压力测量的精确度下降。

双模压力传感器已经被建议成 b 模为应力补偿，c 模为温度补偿。在这种传感器中，b 模主要需要温度敏感谐振器，并且 c 模需要压力应用。当 b 模的频率依赖于谐振器振动体温度时，温度梯度效应会大大削减。特别是在瞬时压力下，双模压力传感器允许较好的温度敏感和补偿精度，并有较好的压力敏感精确度。上图就是显示了这种双模压力传感器。

传感器偏差（“检测极限”）

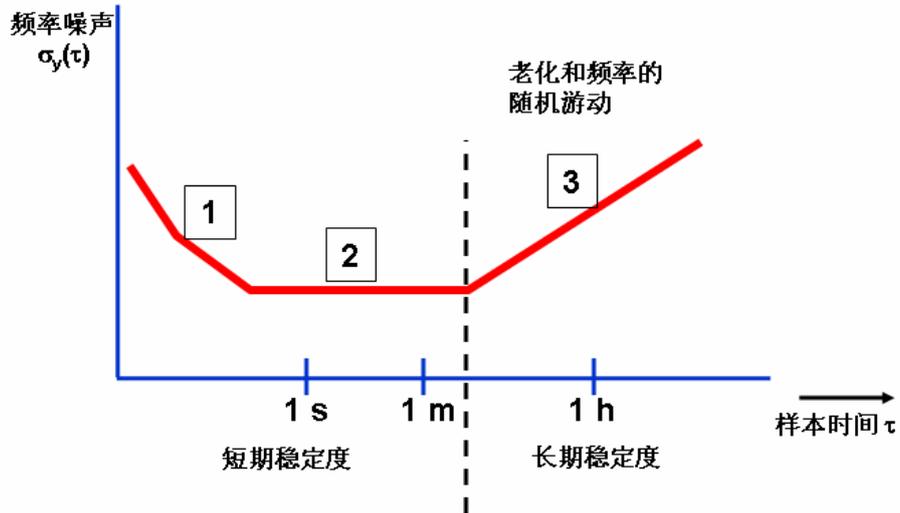
$$\text{测量值}_2 - \text{测量值}_1 = (X_2^{\text{true}} - X_1^{\text{true}}) + (\partial x_2 - \partial x_1)$$

预期值

$$\langle M_2 - M_1 \rangle^2 = \langle X_2^{\text{true}} - X_1^{\text{true}} \rangle^2 + \langle \partial x_2 - \partial x_1 \rangle^2$$

$$"SNR" \equiv \frac{(X_2^{true} - X_1^{true})}{\langle \hat{x}_2 - \hat{x}_1 \rangle}$$

时域内的传感器稳定度



在区域 1 内，白色噪声区域，补充平均值（更多的数据）提高检测极限。在区域 2 内，闪变噪声区域，不会提高。在区域 3 内，会更糟。在长的样本时间测量合适随机频率起伏 $\sigma_y(\tau)$ ，同时老化必须从适当的数据中去除。