

石英晶体谐振器的主要参数

目录

- 1、晶体元件的主要参数
 - 1.1 等效电路
 - 1.2 晶体元件的频率
 - 1.3 频差
 - 1.4 频率温度特性
 - 1.5 激励电平的影响
 - 1.6 老化
 - 1.7 寄生响应
 - 1.8 负载电容和频率牵引
- 2、术语

1、晶体元件参数

1.1 等效电路

作为一个电气元件，晶体是由一选定的晶片，连同在石英上形成电场能够导电的电极、防护壳罩和内部支架装置所组成。

晶体谐振器的等效电路图见图 1。

等效电路由动态参数 L_1 、 C_1 、 R_1 和并电容 C_0 组成。这些参数之间都是有联系的，一个参数变化时可能会引起其他参数变化。而这些等效电路的参数值跟晶体的切型、振动模式、工作频率及制造商实施的具体设计方案关系极大。

下面的两个等式是工程上常用的近似式：

$$\text{角频率 } \omega = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$$

$$\text{品质因数 } Q = \omega L_1 / R_1$$

其中 L_1 为等效动电感，单位 mH

C_1 为等效电容，也叫动态电容，单位 fF

R_1 为等效电阻，一般叫谐振电阻，单位 Ω

图 2、图 3、图 4 给出了各种频率范围和各种切型实现参数 L_1 、 C_1 、 R_1 的范围。

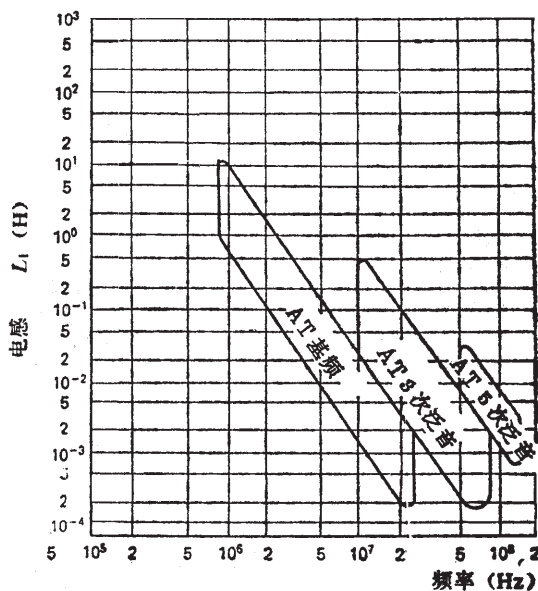


图 2 常用切型晶体的电感范围

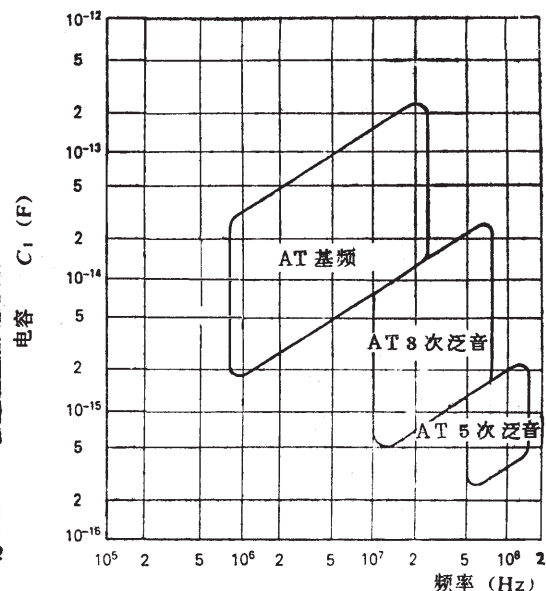


图 3 常用切型的电容范围

对谐振电阻来说，供应商对同一型号的任何一批中可以有 3: 1 的差别，批和批之间的差别可能会更大。对于一给定的频率，采用的晶体盒越小，则 R_1 和 L_1 的平均值可能越高。

1.2 晶体元件的频率,

晶体元件的频率通常与晶体盒尺寸和振动模式有关。一般晶体尺寸越小可获得的最低频率越高。晶体盒的尺寸确定了所容纳的振子的最大尺寸,在选择产品时应充分考虑可实现的可能性,超出这个可能范围,成本会急剧增加或成为不可能,当频率接近晶体盒下限时,应与供应商沟通。下表是不同晶体盒可实现的频率范围。

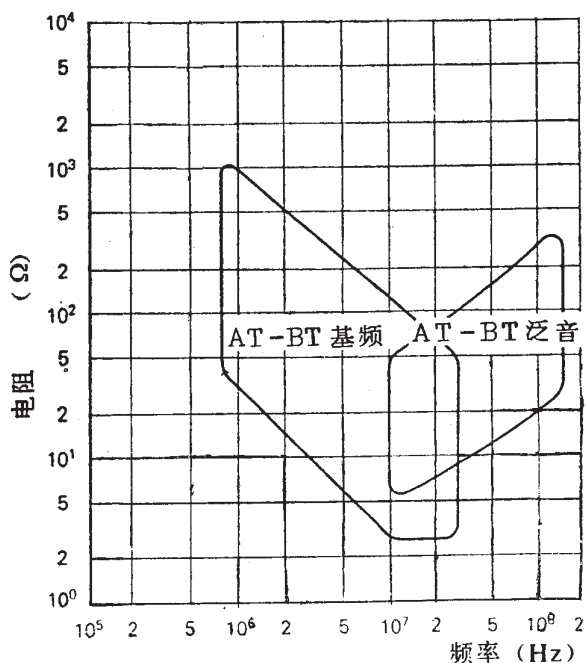


图 4 充有一个大气压力气体
(90%氮、10%氦)

的气密晶体元件的频率、切型和电阻范围

晶体盒型号	振动模式	频段 (MHz)
HC-49U	AT 基频	1.8432-30
	BT 基频	20-40
	AT 三次泛音	20-85
	AT 五次泛音	50-180
HC-49S	AT 基频	3.579-30
	AT 三次泛音	20-65
	AT 五次泛音	50-150
SMD7×5	AT 基频	6-40
	AT 三次泛音	33-100
	AT 五次泛音	50-180
SMD6×3.5	AT 基频	8-40
	AT 三次泛音	35-100
	AT 五次泛音	50-180
SMD5×3.2	AT 基频	12-45
	AT 三次泛音	35-100
	AT 五次泛音	60-180

1.3 频差

规定工作温度范围及频率允许偏差。

电路设计人员可能只规定室温频差,但对于在整个工作温度范围内要求给定频差的应用,除了给定室温下的频差还应给出整个工作温度范围内的频差。给定这个频差时,应充分考虑设备引起温升的容限。

通常有两种方法规定整个工作温度范围的频差。

1) 规定总频差

如从 -10°C — $+85^{\circ}\text{C}$ ，总频差为 $\pm 50 \times 10^{-6}$ ，通常这种方法一般用于具有较宽频差而不采用频率微调的应用场合。

2) 规定下列部分频差

基准温度下的频差为 $\pm 10 \times 10^{-6}$

在 -30°C — $+60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，相对于基准温度实际频率的频差 $\pm 20 \times 10^{-6}$ ，这种方法常用于较严频差，靠频率牵引来消除基准温度下的频差的场合。

对于温度曲线为抛物线的 BT 切晶体，可以规定基准温度下的频差为正公差，如 $+20 \times 10^{-6}$ 。

一般来讲，应该根据系统的要求来确定晶体元件的工作范围及频率允许偏差。

1.4 频率温度特性

频率温度特性随所用的振动模式不同其变化相当大，图5给出了常用切型的频率温度特性关系的理论曲线。常用的晶体谐振器主要是AT切的BT切型，由于AT切的温度频差更容易控制，因此温度频差要求较严的晶体多选用AT切晶体，图6给出了比较完整的一系列AT切晶体的频率温度特性的理论曲线。这些曲线表明，可以选定特定的角度范围来保证在规定的温度范围内得到规定的性能。实际上由于设计制造的多种限制，这些理论曲线仅供做为指导性资料。应当说明的是在选择较小的温度频差时需要付出较高的代价。对于一般用作数字电路（如PC）时钟的应用场合， $\pm 30 \times 10^{-6}$ 、 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 的温度频差已经足够了，只有在通信系统和精确计时基准的应用时才会考虑更严的温度频差。

图7表明了AT切晶体当规定特别小温度频差时所花费的代价。过严的频差会导致制造成本的增加，设计人员应充分评估所需的频差范围。

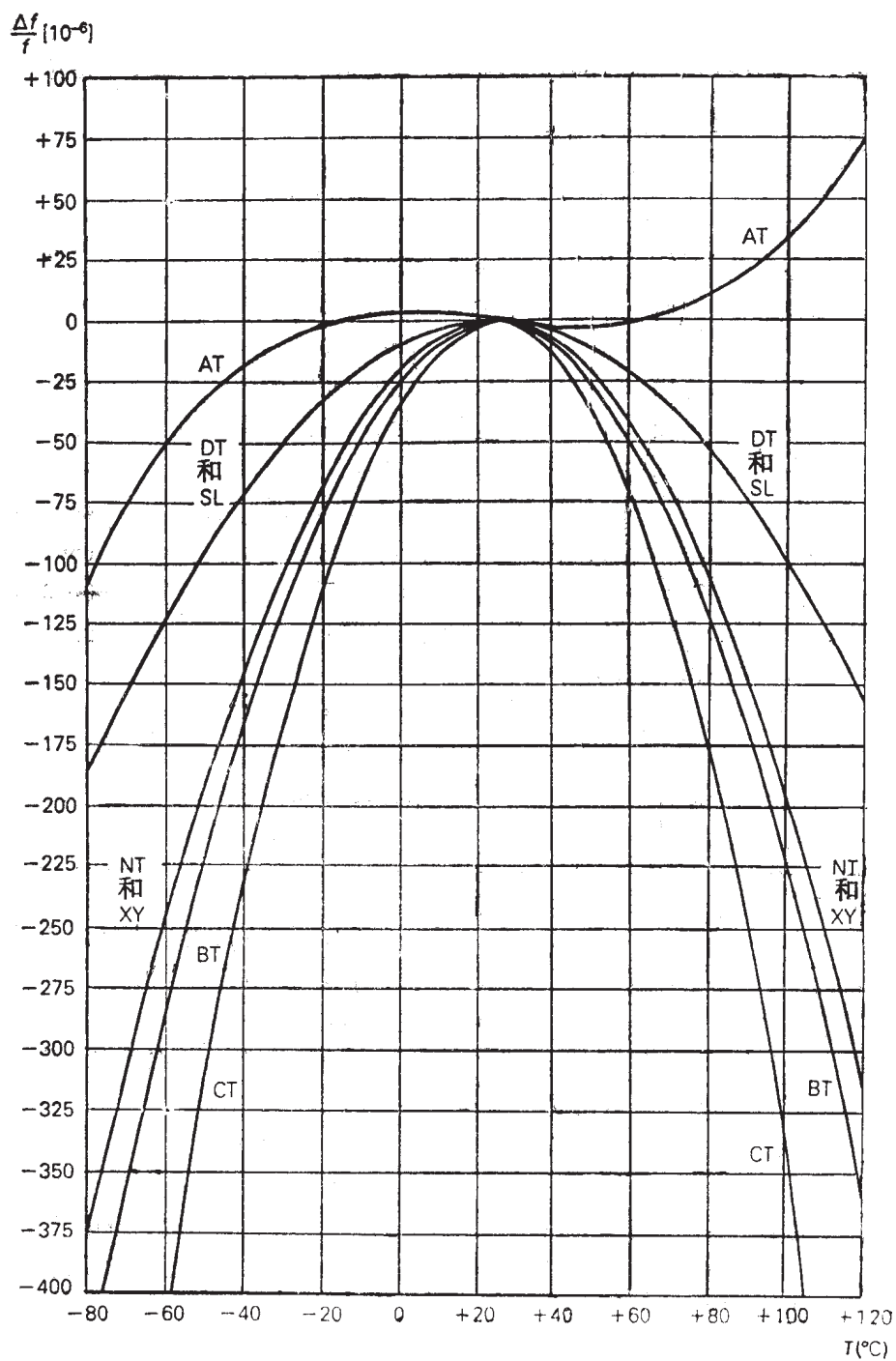
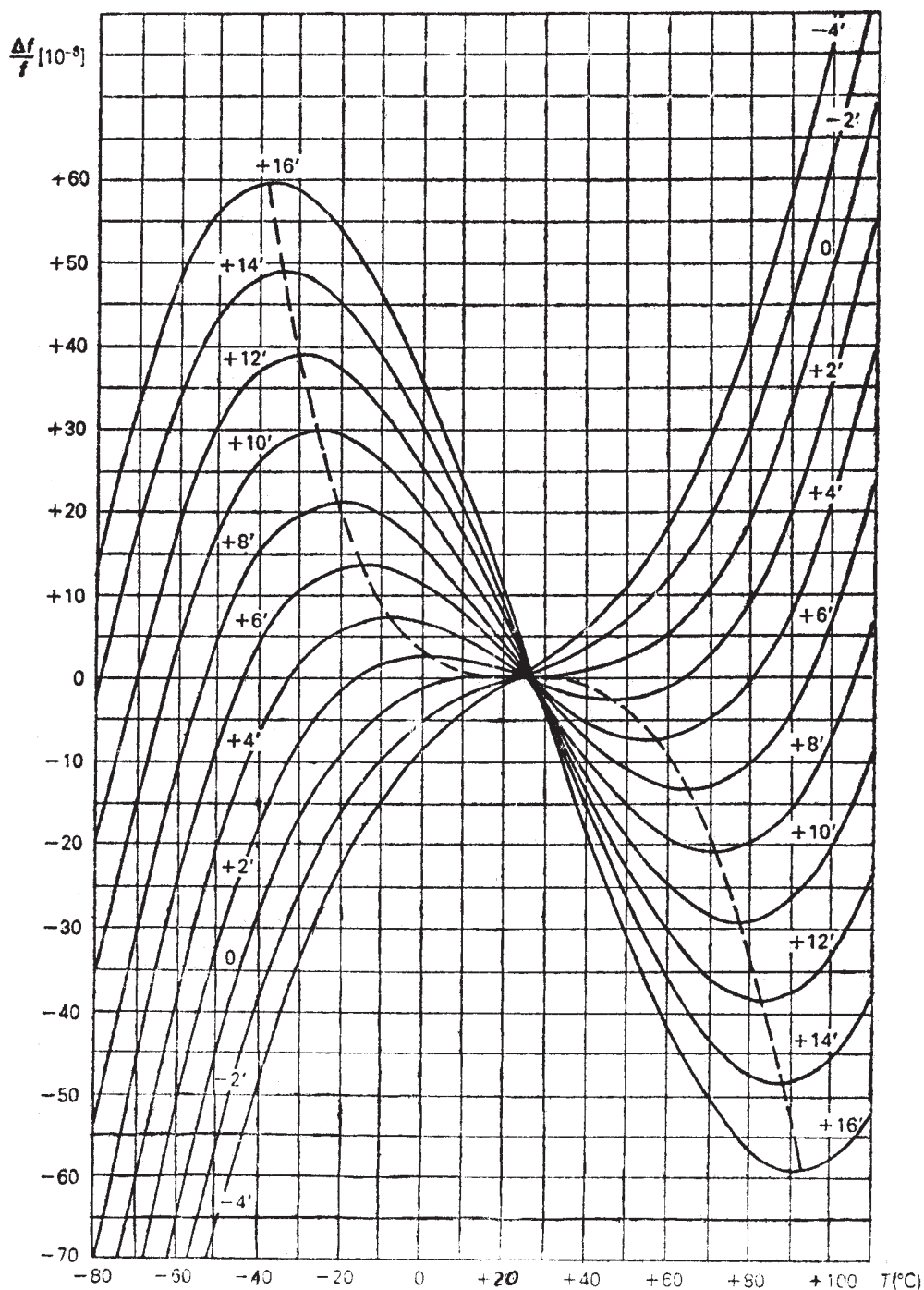


图5 某些常用晶体切型频率温度关系的理论曲线



虚线表示 $\frac{\Delta f}{f} = 0$ 的温度的轨迹

图 6 综合的频率温度曲线 (AT切)

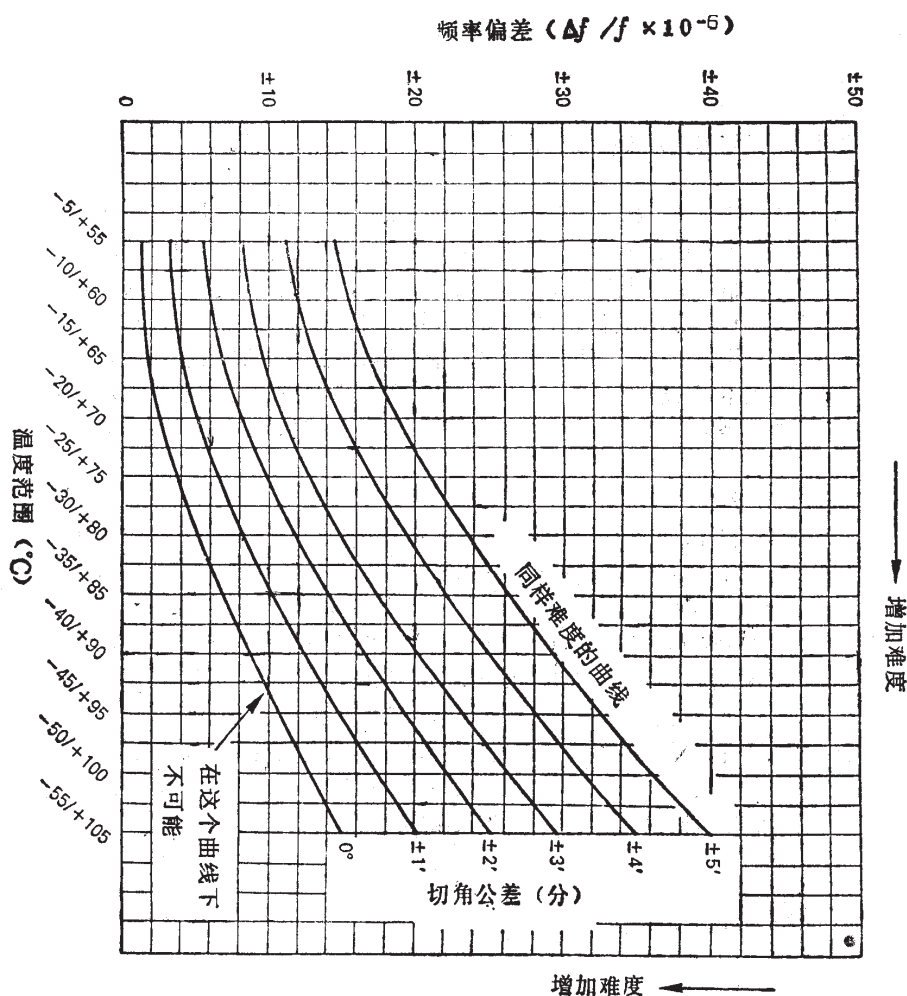


图7 AT切晶体元件频率允许偏差/温度范围的难度情况

1.5 激励电平的影响

实际上，所有晶体元件的频率都在一定程度上随激励电平变化而变化(微量变化)，一般来说，AT切晶体的频率会随激励电平增大而略有升高。过高的激励电平会导致谐振器温度特性的畸变，并激活寄生模。过高的激励使晶体发热和应力过大，从而产生不可逆的频率漂移。

非常低的激励电平(数微瓦或更低)下，晶体元件的谐振电阻可能比在额定激励电平电阻值高很多，以致使振荡器越振越困难。这种效应经过一段非工作状态的贮存后会加剧，这就是激励电平相关性(DLD)。因此，晶体在电路中实际使用的激励电平不应过大和过小。

下面是IEC推荐的激励功率的常用值。

2mw、1mw、0.1mw (100 μw)、0.05mw (50 μw)、0.02mw (20 μw)、0.01mw (10 μw)、0.001mw (1 μw)

优选值 5MHz 以下 500 μw，以上一般 100 μw。

1.6 老化

晶体谐振频率和谐振电阻都随时间的延续而变化，这就是所说的老化，人们最关注的是谐振频率随时间的变化。

对 AT 切晶体来说，在晶体使用初期，老化主要受元件内部应力释放影响，频率向升高方向变化，而后期受电极膜吸附的影响，其频率按对数关系向降低方向变化，随时间增加变化量逐渐降低，见图 4。为减小出厂时的老化率，生产商大都对产品进行了预老化。

对老化指标，一般都规定产品的老化水平，而它并非明确的试验条件，这种“水平”，是通过生产有计划的抽检而获得的。可能某些个别晶体元件比规定水平会差，这是允许的。

目前电阻焊密封的石英晶体元件的老化率水平可以控制 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 以下，对于普通精度产品（频差大于 $\pm 30 \times 10^{-6}$ ）的应用来说，老化指标对元件工作影响并不是很重要，对于小公差（ $\pm 0 \times 10^{-6}$ 以下）的晶体元器件来说老化是需要关注的指标。

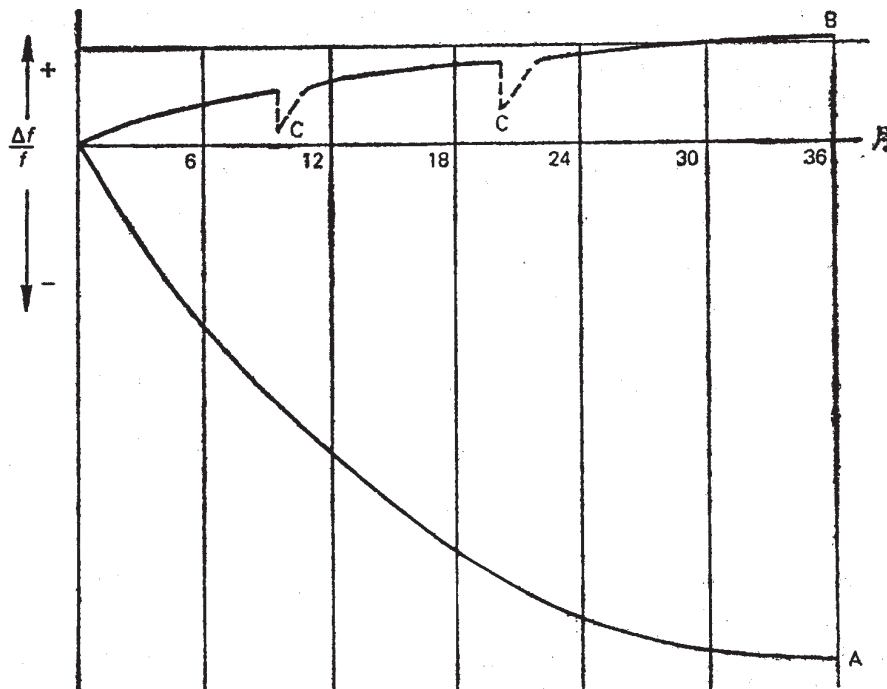


图 4 典型老化曲线

1.7 寄生响应

晶体元件除了主响应（主频率）外还有其它频率响应，比较明显的是主响应的泛音，工作在泛音模的晶体元件，就是基频率和其它的泛音。

对寄生响应来说，要离开主响应一段距离，以便在设计电路中将其滤除，另一方面，寄生响应幅值应小于主响应。

一般规定主响应附近某频率范围的下述比值。

$$\frac{\text{寄生响应谐振电阻}}{\text{主响应的谐振电阻}}$$

制造商在进行标准产品设计时已把这种影响减小到最低程度，再加上振荡器的合理设计极少出现问题。但是为了要求有一个较大的频率牵引能力，或一个较大的 C_L 时，或高激励情况下都会使寄生响应变坏。如果认为振荡器有可能在寄生响应处起振，那么应进行寄生响应的试验。AT 切泛音晶体的寄生响应无疑是比较接近主响应而且幅度较大，规范中需要有寄生响应试验。

1.8 负载电容和频率牵引

在许多情况下，都有用负载电容来牵引晶体频率的要求。这对于调整制造公差，在锁相回路中以及调频应用中可能是必要的。

图 8a、是不带负载电容的晶体元件，晶体元件跟负载并联。

图 8b 是晶体元件跟负载电容 C_L 串联，串联负载电容主要用在振荡器电路中，

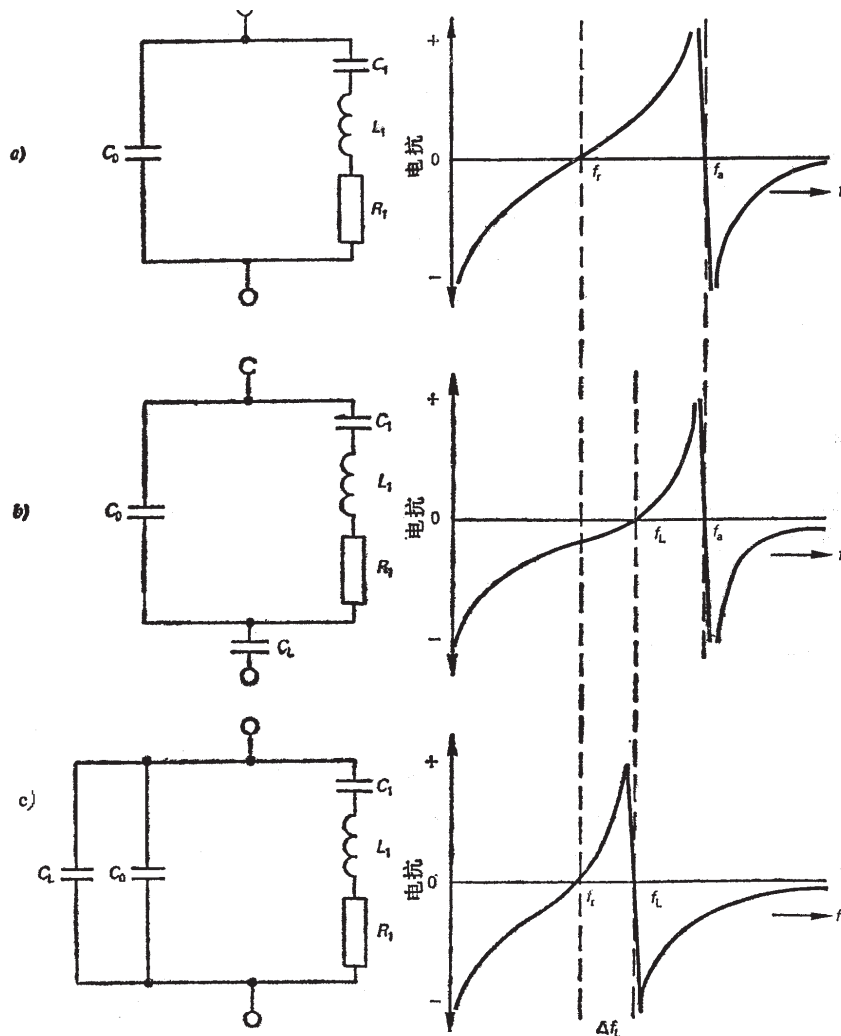


图 8

a) 单独的晶体元件 b) 晶体元件和负载电容 C_L 串联 c) 晶体元件与负载电容 C_L 并联

晶体和电容器组合相当于一个在负载谐振器频率 f_L 处具有图 12a 相类似的低阻抗状态的晶体元件。

图 8c C_L 与晶体元件并联的，网络在谐振频率上呈高阻抗，这种组合主要用在滤波器电路中，其 Q 值会大大降低。

无论是负载电容与晶体元件串联还是并联，负载电容对负载谐振频率的影响都是相同的，下式能算出相对负载谐振频率偏移

$$D_L = \frac{f_L - f_r}{f_r} \approx \frac{C_1}{2(C_0 - C_L)}$$

有时用牵引灵敏度表示负载电容对频率的调节能力

$$S = -\frac{C_1}{2(C_0 - C_L)^2}$$

下表是典型条件的牵引灵敏度

切型	在标称负载电容值时的典型牵引灵敏度 $10^{-6}/\text{pp}$					
	20PF		30PF		50PF	
	Min	max	Min	max	Min	max
AT 切基频	10	20	4	12	5	
AT 切三次泛音	1.5	2.5	1	1.5	0.3	0.6
AT 切五次泛音	0.2	1	0.1	0.5	0.04	0.2
AT 切七次泛音	$\Delta f/\text{PF}$ 太小，以致没有什么用处					
BT 切	6	14	3	8	1	3

通常负载电容的值越大对频率所产生的牵引越小，负载电容的优选值见 3.1. 需要注意的是如果负载电容过小则可能造成振荡电路起振困难，同时使有用小的负载电容时，电容值稍有变化时会造成频率产生较大的漂移。如 10pF 的负载电容每 pF 牵引 50×10^{-6} 的频率变化，频率测量的准确度会比较难以控制。如果确有需要应与供应商进行频率的比对，确保满足使用要求。

下面的标准值是 IEC 的推荐值，建议选用。当特殊需要时应与供应商沟通。在负载电容小于 10pF 时频率测量精度会受到不利影响

振动模式	电容值 (pF)				
基频		20	30	50	100
泛音	8	12	15	20	30

2、术语

2.1 振动模式

一般有弯曲、伸缩、面切变、厚度切变，对于1MHz 以上的小型晶体主要是厚度切变，又分为 AT 切和 BT 切两种。

2.2 基频晶体元件

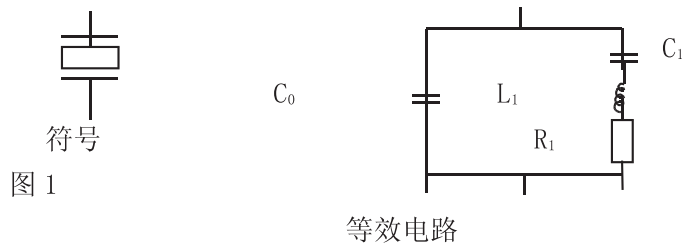
振子设计工作在给定振动模式的最低阶次上的晶体元件。

2.3 泛音晶体元件

振子设计工作在比给定模式最低阶次要高的阶次上的晶体元件，一般有3 次、5 次和 7 次泛音。

2.4 晶体的等效电路

是一个和谐振频率附近具有与晶体元件相同阻抗的电路。如下图（图 1）



2.5 谐振频率 f_r

在规定的工作条件下，晶体元件电气阻抗为电阻性的两个频率中较低的一个频率。

2.6 反谐振频率 f_a

在规定条件下，晶体元件电气阻抗为电阻性的两个频率中较高的一个频率。

2.7 负载谐振频率 f_L

在规定条件下，晶体元件与一负载电容串联或并联，其组合阻抗为电阻性的两个频率中的一个频率。

2.8 标称频率

晶体元件规范（或合同）指定的频率。

2.9 工作频率

晶体元件与其配合的电路一起工作的频率。

2.10 总频差

由于指定或多种原因引起的工作频率相对于标称频率的最大允许偏差。主要由调整频差和温度频差构成。

2.11 调整频差

在规定条件下，基准温度时工作频率相对标称频率的允许偏离。

2.12 温度频差

在整个工作温度范围内，相对于基准温度时，工作频率的允许偏离。

2.13 基准温度

一般指 $\pm 25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，对温控晶体元件是指控温范围的中点。

2.14 谐振电阻

晶体元件在谐振频率 f_r 时的电阻值。

2.15 负载谐振电阻 R_L

晶体元件与一指定的外部电容相串联，在负载谐振频率 f_L 时的电阻值。

2.16 激励电平

是一种用耗散功率表示的施加于晶体元件的激励状态的度量。

2.17 负载电容 C_L

与晶体元件一起决定负载谐振频率的外置有效外界电容。

2.18 动态电容 C_1

等效电路中动态（串联）臂中的电容。

2.19 动态电感 L

等效电路中动态臂里电感。

2.20 负载谐振频率偏置

$$\Delta f_L = f_L - f_r$$

$$\Delta f_L = \frac{f_L C_1}{2(C_0 + C_L)}$$

选 择	型 号	品 牌	替代型号	封 装	单 价
	32.768KHZ	ESEC	MC-146	EC140	1.20
	10.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.351
	32.000-MHZ	ECEC	12PF/10PPM	XS-3225	0.882
	27.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	26.000-MHZ	ECEC	8.5PF/10PPM	XS-3225	0.864
	25.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	24.576-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	24.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	20.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	16.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	12.000-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.342
	11.0592-MHZ	ECEC	20PF/20PPM	HC-49/S	0.351