

将晶体振荡器用于 MSC12xx MicroSystem 产品

Johnnie Molina

数据采集产品

摘要

德州仪器 (TI) 的 MSC12xx 数据采集产品线包含一个增强型 8051 微控制器、一个高精度 24 位 Δ - Σ ($\Delta\Sigma$) 模数转换器 (ADC) 和数模转换器 (DAC)。同时还包含一个板载反向放大器, 它可以与石英谐振器和其它组件相连接, 以产生时钟信号。本应用报告包含晶体振荡器的一般信息, 以及由于组件容差、温度和电压变化所导致的限制信息。同时还包含了增强性能和可靠性的方法, 以及将晶体振荡器与 MSC12xx 系列一起使用时需遵守的特定指南。

内容

1	介绍	2
2	石英晶体等效电路	2
3	振荡	3
4	放大器	4
5	负载电容器 C_{x1} 和 C_{x2}	5
6	反馈电阻 R_{FB}	5
7	石英谐振器	5
8	MSC1210、MSC1211 和 MSC1200 的时钟电路	8
9	参考	11

附图目录

1	并联谐振振荡器电路	2
2	晶体等效电路	2
3	2MHz 晶体等效电路 阻抗-频率关系图	2
4	2MHz 晶体等效电路相位响应与频率关系图	3
5	开环皮尔斯振荡器电路	4
6	开环皮尔斯振荡器电路的增益和相位响应	4
7	2MHz 晶体振荡器电路的启动	5
8	晶体刚玉	5
9	A-T 切割石英谐振器稳定性与温度关系图	6
10	音叉切割石英谐振器稳定性与温度关系图	6
11	32.768kHz 晶振的功率测量	7
12	泛音和寄生响应电路	8
13	MSC1200 32.768kHz 振荡器	8
14	MSC1200、MSC1210 和 MSC1211 的晶体振荡器电路	9
15	负电阻测量电路	10

附表目录

1	典型活动组件值	3
2	MSC1200 的典型组件值	8
3	MSC1200、MSC1210 和 MSC1211 的典型组件值	9
4	安全因子与鉴定	10
5	3.3V 电源电压	10
6	5V 电源电压	10

1 介绍

晶体振荡器用于各种要求时钟信号的应用中。在指定频率范围内工作的微控制器和数据转换器电路会利用这些简单但有时却无效的单元。只需要很少组件时，了解温度、电源电压、组件容差和寄生印刷电路板 (PCB) 效应对性能的影响是很重要的。图 1 显示了使用这类振荡器的电路实例。

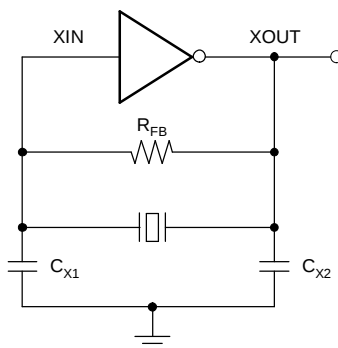


图 1. 并联谐振振荡器电路

2 石英晶体等效电路

石英晶体是一个压电器件，如果将其放入电场中，会产生物理位移或振动。此振动转换成电子特性，可以使用图 2 中所示的电路进行模拟。

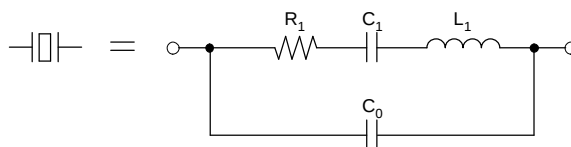


图 2. 晶体等效电路

C_1 、 R_1 和 L_1 为晶振或谐振器的活动臂。电容器 C_0 为封装件，是与活动组件并联的其它寄生电容。图 3 显示了 2MHz 晶振时的阻抗-频率关系图。

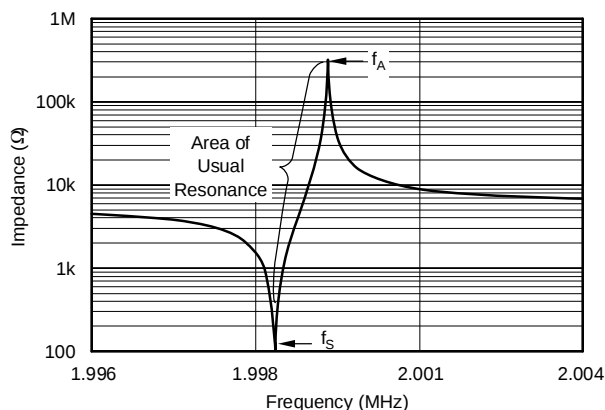


图 3. 2MHz 晶体等效电路
阻抗-频率关系图

2.1 串联和并联谐振

串联谐振 f_S 在所描述的条件下发生。

$$f = f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (1)$$

在 L_1 的感抗与 C_1 的容抗相等时，会发生串联谐振。由于这些阻抗为 180° 反相，因此它们互相抵消，仅剩 R_1 作为晶振终端间的阻抗。

并联谐振的发生频率为 f_A 。电感器 L_1 与其终端间的总阻抗互相作用时会发生并联谐振。这也被称为反谐振频率，由与。

$$f = f_A = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left[L_1 \frac{(C_1 \cdot (C_{LOAD} + C_0))}{(C_1 + C_{LOAD} + C_0)}\right]}} \quad (2)$$

$$C_{LOAD} = \frac{[C_{X1} \cdot C_{X2}]}{[C_{X1} + C_{X2}]} \quad (3)$$

2.2 一般并联谐振的区域

图 4 显示在低于 f_S 和高于 f_A 的频率时，阻抗通常为电容性的。而频率介于 f_S 和 f_A 之间的信号通常为电感性的。

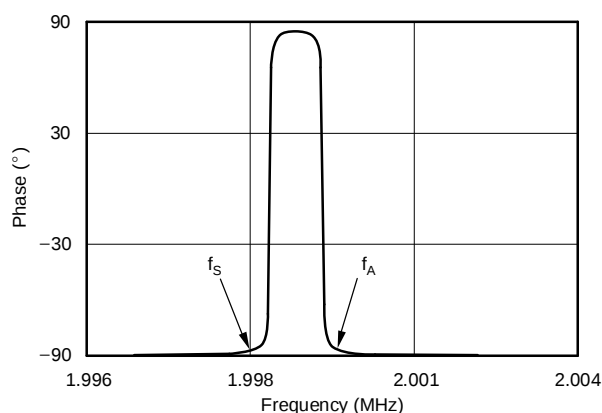


图 4. 2MHz 晶体等效电路相位响应与频率关系图

振荡通常发生在频率为 f_{OSC} 时，其中：

$$f_S \leq f_{OSC} \leq f_A \quad (4)$$

这种频率间隔被称为一般并联谐振的区域。此处阻抗中 180° 的相移允许振荡要求的信号延迟。表 1 中显示了一些典型的组件值。

表 1. 典型活动组件值

频率 (MHz)	R_1 (Ω)	L_1 (mH)	C_1 (pF)	C_0 (pF)
2	100	520	012	4
4.608	36	117	.01	2.9
11.25	19	8.38	.024	5.4

3 振荡

在向如 Fig.1 中所示的振荡器电路中输入信号时，反向器会放大噪声和瞬态信号。反馈网络（如图 5 所示）就如同一个带通滤波器，仅允许 f_A 与 f_S 之间的信号通过放大器输入端，且具有最大增益。此网络也提供振荡所需的延迟。

图 5 显示了一个用于获得图 6 所示的增益和相位响应的开环路皮尔斯振荡器电路。

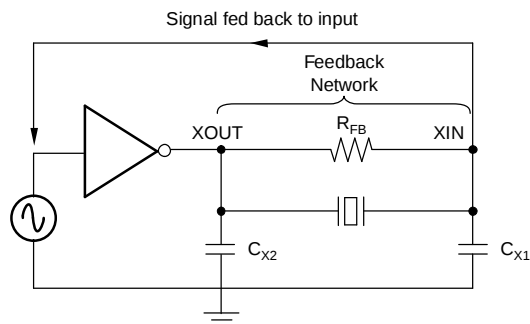


图 5. 开环皮尔斯振荡器电路

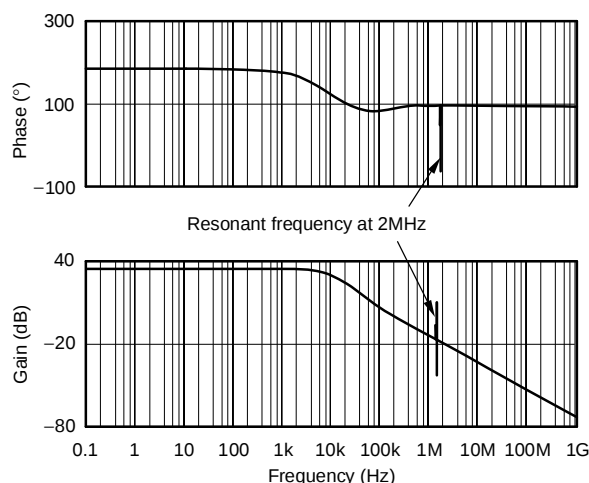


图 6. 开环皮尔斯振荡器电路的增益和相位响应

将谐振器的谐振频率调节为 2MHz。请注意，相位下降和增益上升发生在 2MHz。因为此相位低于 0° 而增益高于一个单位，此小信号分析表明电路将要振荡。

在通过反向器和反馈电路的总相移为 $N \cdot 360^\circ$ ，且环路增益大于一个单位（ N 为一个整数且通常等于 1）时，开始振荡。反向器在所需频率提供增益，以放大信号。信号振幅会一直增加，直到放大器的非线性响应将环路增益限制至一个单位。如果放大器的增益过大，可能会导致削波。如果通过压电器件的功耗超过指定器件的额定值，则会损坏该器件。避免此类过度功耗的技术将在本报告后面部分论述。

影响振荡器启动以及性能的组件和参数包括晶体谐振器、反向器增益和相位、外部电容器 C_{X1} 和 C_{X2} 、寄生 PCB 电容、温度以及电源电压。各个因子讨论如下。

4 放大器

放大器为振荡器提供所需的增益，且作为反向器（如图 1 所示）使用时，它也提供 180° 的相位延迟。振荡器在所需的频率增益过大，会导致额外功耗，而且如果未保护晶体，可能会损坏晶体。然而，增益不足也会导致启动问题。请记住增益会随着温度和电源电压的变化而变化。放大器设计应该是强大而可靠的，以确保振荡器在所有指定条件下启动。

通常，高温和高电源电压会减小双晶体管反向器的增益。因此应始终确保在满足所有条件后才开始振荡。

增益和相位分析假设一个小信号响应——就是说，信号电平的振幅很小。虽然实际上，振荡器的输入为大信号并且在一个供电轨（或两个）上出现削波的现象很正常。但大信号效应（例如转换率）会产生传播延迟，而在小信号增益/相位分析中则无需考虑此点。振荡通常是以小信号开始，并成指数增加，如图 7 与。

$$V(t) \approx e^{\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \Phi) \quad (5)$$

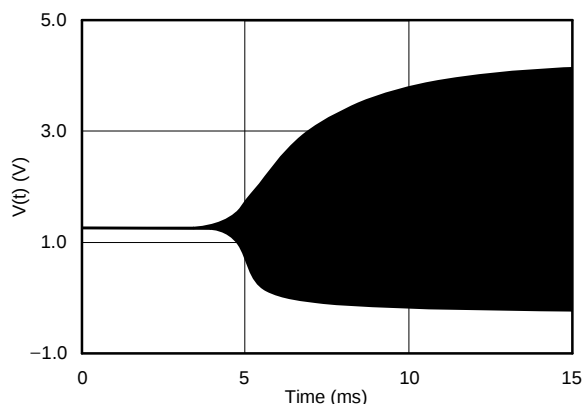


图 7. 2MHz 晶体振荡器电路的启动

随着振荡振幅的增加，放大器进入非线性工作区域，增益减小。一旦总环路增益为一个单位，振荡信号会达到其稳定的振幅和频率状态。

5 负载电容器 C_{X1} 和 C_{X2}

这些组件在所要求的 360° 的相移中承担 90° 的相移。正常并联谐振区域中的操作受到这些组件的影响，其总值还包括 PCB 和放大器寄生电容。从串联谐振频率 f_s 牵引的频率由 定义。

$$\Delta \frac{f}{f_s} = \frac{C_1}{2 \cdot (C_{LOAD} + C_0)} \quad (6)$$

晶体的高 Q 值限制了由此发生的频率牵引次数，但 f_s 的变化可以达到 $.01\%$ 。这些电容器也会极大地影响振荡器启动次数，甚至会影响到振荡器能否启动。

晶体制造商通常会按照指定负载电容加工石英。因此，加工了额定负载电容为 12.5pF 的晶体后，会出现与此负载相应的指定振荡频率。请注意，这不是 C_{X1} 、 C_{X2} 电容器耦合接地的值，而是两个 C_x 组件的串联电容。因此，如果 C_{X1} 与 C_{X2} 相等，它们每一个都应为 25pF 以满足 12.5pF 的指定负载。

6 反馈电阻 R_{FB}

此电阻用于在放大器输入端设置 DC 偏置点。在某些情况下，此放大器为施密特触发器，会开始松弛模式振荡。通常，此电阻是按 $1\text{M}\Omega$ 递增或递减的。如果此值太小，闭环环路增益减小，电路可能不会开始振荡。

7 石英谐振器

石英晶体谐振器是一个压电器件，它可以在高达几百兆赫兹的频率下工作。基于其本身的机械性能，谐振时的高 Q 值可转换成所需的电子特性，用于设置基于时间、电压和温度的精确性和稳定性的时钟频率。

石英由硅和氧气组成，是二氧化硅的晶状体。合成时，其是在高压和高温下产生的。石英晶体成形时呈六面体棱柱，且两端成锥形。未加工时，被称为刚玉。请参阅图 8。

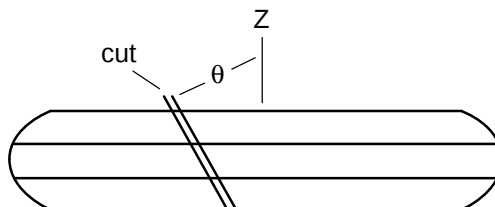


图 8. 晶体刚玉

刚玉被切割成薄板状，称为坯。切割的角度和厚度决定了器件的电子特性。然后通过电镀或蒸气电镀为坯装上电极。最常用的切割方法是 A-T 切割。这种类型的切割方法常用于制造谐振频率大于等于 1MHz 的晶体。它的稳定性与温度的关系呈 S 形，如图 9 中所示。

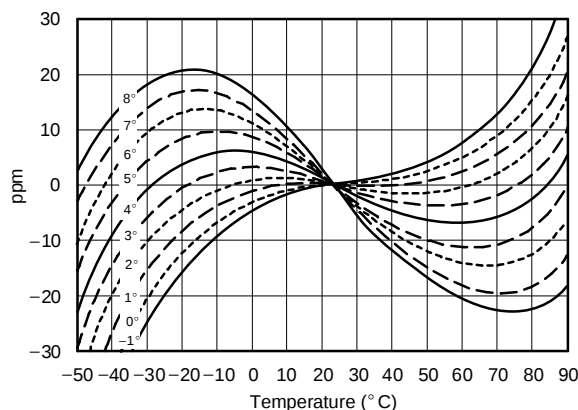


图 9. A-T 切割石英谐振器稳定性与温度关系图

7.1 32.768kHz 石英谐振器

N-T 切割类型（或称为音叉切割）用于制造在较低频率（例如 32.768kHz 时钟晶体）谐振的晶体。此种表面形状允许低谐振频率，且产生的结晶状物更少。如图 10 所示，温度稳定性为抛物线形状，斜率为 $- .04\text{ppm}/\text{Å}^\circ\text{C}^2$ 。

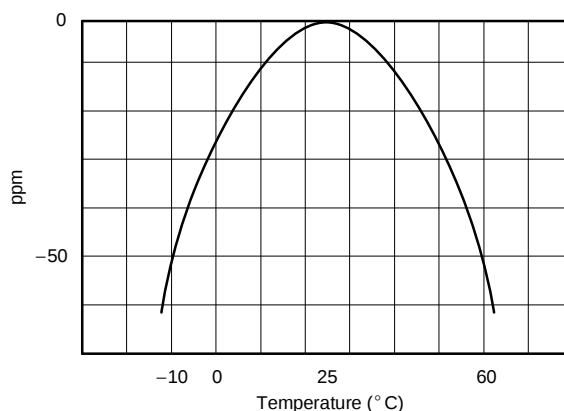


图 10. 音叉切割石英谐振器稳定性与温度关系图

作为随时间老化的一个因子，石英晶体的频率稳定性通常小于 3ppm。频率精确度通常校准在指定标称频率的 $\text{Å} \pm 20\text{ppm}$ 内。这是外部负载电容器 C_{X1} 和 C_{X2} 的功能。晶体的高 Q 值可以最小化可能发生的频率牵引数量，如所示。它可以最小化标称或理想时钟频率的变化，以作为组件容差结果。

7.2 指定负载电容

此指定负载电容很重要，因为石英将被切割和调谐至符合电路中此电容的指定标称频率。当在皮尔斯振荡器配置中（请参阅图 1）使用此晶体时， C_{X1} 和 C_{X2} 的值应满足下述要求：它们的串联值再加上估计的寄生 PCB 电容，应与指定负载电容相等。

7.3 等效串联电阻 (ESR)

等效串联电阻 (ESR) 为在谐振频率驱动时的晶体谐振器的电阻。这不一定是图 2 中所示的 R_1 。振荡器电路的 ESR 可以使用图 1、图 2 与算法如下：

$$R_{\text{ESR}} = R_1 \cdot \left(1 + \frac{C_0}{C_{\text{LOAD}}} \right)^2 \quad (7)$$

在将石英晶体调谐至指定谐振频率时，通常对此值进行监控。 R_{ESR} 有时指定为最大电阻，且应在确定振荡器的驱动电平时使用（将在下一章中讨论）。

7.4 驱动电平

最大驱动电平是一个重要规范，因为晶体可能由于承受的电流过高而被损坏。标称频率大于 600kHz 的大多数晶体的额定功率为 1mW 或 2 mW。这通常不是问题。低频率 N-T 或音叉晶振，例如 32.768kHz 时钟谐振器，容限都很小。因此其最大额定功耗为 1 μ W 或更低。但是，过度振动可能会损坏晶体，因此器件可能会因为质量损失而不会发挥功效或按频率上移。图 11 显示了 32.768kHz 晶振的功率测量。

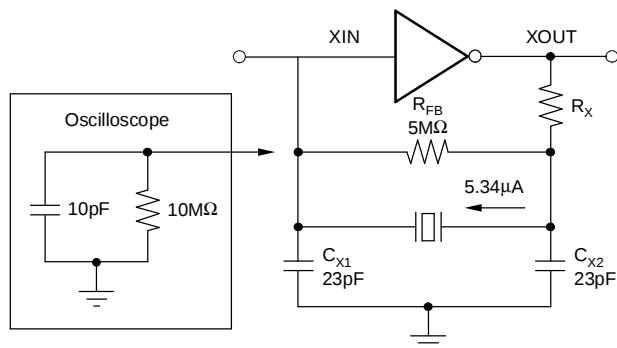


图 11. 32.768kHz 晶振的功率测量

驱动电平可以通过与。

$$P = I^2 \cdot R_{\text{ESR}} \quad (8)$$

其中， $P = 1\mu\text{W}$ 而 $R_{\text{ESR}} = 35\text{k}\Omega$ （最大值），通过晶体的 I_{RMS} 电流应限制为 5.34 μA

监视此电路的最佳方法是在晶体旁钳紧电流探针。如果无法实施，可以使用图 11 中显示的另一个替换解决方案。谐振时，大多数流入节点 XIN 的电流会通过晶体。此电流通过电容器 C_{X1} 和示波器输入电容耦合接地。通过示波器观察此处的信号，并使用至，即可估计出晶体的功耗。

节点 XIN 的容抗如所示所示：

$$X_C = \frac{1}{2\pi[23\text{pF} + 10\text{pF}] \cdot 32,768\text{kHz}} = 147,257\Omega \quad (9)$$

为 C_{X1} 添加一个 10pF 输入范围的电容，以确定输入容抗 X_C 。由于 10M Ω 范围的电阻是一个非常大的电阻，因此可忽略输入容抗。最大正弦电压可使用由得出的 X_C ，以及从中得出的 I_{RMS} （如所示）进行计算。

$$\begin{aligned} V_{\text{MAX}} &= I_{\text{RMS}}(\text{crystal}) \cdot X_C \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \\ V_{\text{MAX}} &= 5.34\mu\text{A} \cdot 147,257 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 2.2\text{V}_{\text{PP}} \end{aligned} \quad (10)$$

在此计算中忽略了通过 5M Ω 电阻的电流，但此电流在某些应用中可能很重要。在这种情况下，算出的 V_{MAX} 为一个悲观值，可以被当作保护频带。

可以调整 R_X ，以达到所需的 V_{MAX} 。一般为 200k Ω 左右。

7.5 泛音和寄生模式

石英谐振器的振动特性为它们会在非指定标称频率时谐振。单数序列的机械泛音总是与寄生响应一起出现，而寄生响应通常比每个主响应高 1kHz 或 2kHz。请注意，这不是谐波，而是不同的振动模式。此效应可如图 12 所示模拟。

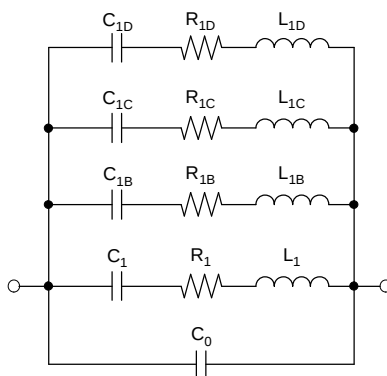


图 12. 泛音和寄生响应电路

放大器的高增益和带宽允许电路在这些意外频率中的某一频率开始振荡。减小放大器带宽通常会消除此效应。增加负载电容器的值也可以消除此效应。

8 MSC1210、MSC1211 和 MSC1200 的时钟电路

数据采集产品的 MSC12xx 系列包含一个板级反向放大器，它可以与外部组件连接。此特性允许根据特定需求和性能目标设置各种优化选项。

电容器材质应为 NPO 陶瓷、聚酯薄膜和其它类似类型。许多制造商都可提供石英晶体。但需确保其温度规范、负载电容、驱动电平和标称频率与您指定的应用相符合。

8.1 32.768kHz 晶振的 MSC1200

MSC1200 支持 32.768kHz 钟表晶振，如图 13 所示。为确保通过晶体的功率不超过最大指定电平，应对驱动电平进行监控。对于大多数制造商来说，此值通常为 $1\text{A}\mu\text{W}$ 可以调节 R_{X1} 以满足此限制。 R_{FB} 应为 $5\text{M}\Omega$ 。

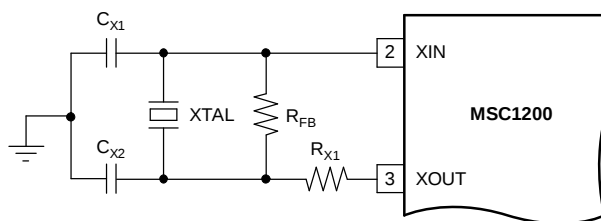


图 13. MSC1200 32.768kHz 振荡器

请注意，为用于此电路，MSC1200 的硬件配置寄存器 2 (HCR2) 应设置为“PLL 高频”或“PLL 低频”模式。请参阅 [MSC1200](http://www.ti.com) 产品数据表（www.ti.com 上提供下载）以了解更多信息。

表 2. MSC1200 的典型组件值

C_{X1} 、 C_{X2}	使用制造商指定的电容。
R_{FB}	$5\text{M}\Omega$ 。MSC1200 中未包括内部 R_{FB} 电阻。
R_{X1}	驱动限制电阻。一般值为 $200\text{k}\Omega$ 。

8.2 MSC1200、MSC1210 和 MSC1211

对于频率 $\geq 1\text{MHz}$ ，可以使用图 14 中所示的电路。请注意，对于 MSC1200，硬件配置寄存器 2 (HCR2) 应设置为“外部晶振”模式。请参阅 MSC1200 产品数据表以了解更多信息。

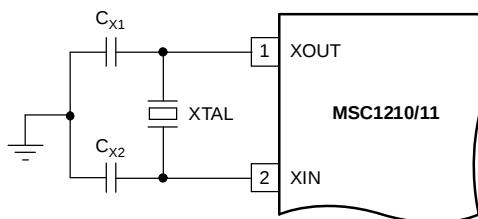


图 14. MSC1200、MSC1210 和 MSC1211 的晶体振荡器电路

表 3. MSC1200、MSC1210 和 MSC1211 的典型组件值

C_{X1} 、 C_{X2}	使用制造商指定的负载电容，表 5 与表 6。
---------------------	------------------------

8.3 启动问题

在谐振频率晶振 $> 4\text{MHz}$ 时，可能会产生启动问题，因为寄生和 C_X 负载电容限制了内部反向放大器的带宽。移除或减少 $C_{X1、2}$ 负载电容器可以解决这些问题。

MSC1210、MSC1211 和 MSC1200 的时钟电路

其它潜在的启动问题可以通过为测试振荡器电路而使用的负电阻方法⁽¹⁾来避免。此技术如图 15 中描述。。

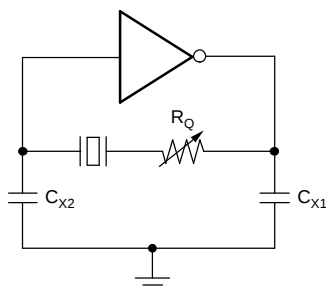


图 15. 负电阻测量电路

电阻 R_Q 与谐振器串联。 R_Q 的值增量递增时，对启动进行监控。在使电路启动时，能获得的最大 R_Q 值为 R_{QMAX} 。该值将与谐振器的指定 R_{ESR} 相比较。通过 计算安全因子。。

$$\text{Safety factor} = \frac{R_{QMAX}}{R_{ESR}} \quad (11)$$

安全因子应比最小值大，以确保在大规模生产和考虑器件寿命时振荡器电路具有可靠的启动操作。鉴定结果如表 4 中所述。

表 4. 安全因子与鉴定

安全因子	鉴定
$SF < 1.5$	不适用
$1.5 \leq SF \leq 2$	危险
$2.0 \leq SF \leq 3$	可能适用
$3.0 \leq SF \leq 5$	安全
$SF > 5$	非常安全

表 5 与表 6 显示了由 Fox Electronics 公司提供的数据，显示他们的一些石英谐振器产品和 MSC1210 的安全因子。他们的测量包括在指定负载电容和电源电压时的 R_{ESR} 和负电阻 R_{QMAX} 测量值。请注意负载电容器的减小是如何增加安全因子的。制造商为所有这些谐振器指定的负载电容为 20pF。

表 5. 3.3V 电源电压

晶体	C_{X1} (pF)	C_{X2} (pF)	R_{ESR} (Ω)	板级频率 (MHz)	R_{QMAX}	安全因子
HC49S-11.0592	18	18	17.2	11.060372	106	6.2
	10	10	17.2	11.061994	180	10.5
HC49S-4.000	10	10	67	4.000533	1000	14.9
HC49S-8.000	10	10	19	8.001152	600	31.6
HC49S-12.000	10	10	15.2	12.002240	163	10.7
HC49S-11.0592	10	10	14.8	11.061541	167	11.3
HC49U-1.8432	10	10	188.1	1.843308	1000	5.3

表 6. 5V 电源电压

晶体	C_{X1} (pF)	C_{X2} (pF)	ESR (Ω)	板级频率 (MHz)	R_{QMAX}	安全因子
HC49S-32.768	10	10	10.5	32.776717	27	2.6
	无	无	10.5	32.789178	308	29.3
HC49S-16.000	10	10	8.5	16.004292	200	23.5
HC49S-25.000	10	10	11	25.006347	66	6
HC49S-11.0592	10	10	14.8	11.061873	397	26.8

表 6. 5V 电源电压(接上表)

晶体	C _{x1} (pF)	C _{x2} (pF)	ESR (Ω)	板级频率 (MHz)	R _{QMAX}	安全因子
HC49U-1.8432	10	10	188.1	1.843308	1000	5.3

8.4 泛音频率

使用 32.768kHz 晶振时，振荡器有时会在一些更高泛音频率下启动。增加 C_{x1} 的值或增加 R_{FB} 可以限制电路的带宽，使得振荡器在基本 32.768kHz 频率启动。

9 参考

1. Mariutti, P. (1999)。C500 和 C166 微控制器系列晶体振荡器。Infineon Technologies 应用报告 No. AP242005。 www.infineon.com 上提供下载。
2. Frerking, M.E. (1978)。Crystal Oscillator Design and Temperature Compensation. New York: Van Nostrand Reinhold.
3. Matthys, R.J. (1983)。Crystal Oscillator Circuits. New York: Wiley.
4. Parzen, B. (1983)。Design of Crystal and Other Harmonic Oscillators. New York: Wiley.

重要声明

德州仪器 (TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合 TI 标准保修的适用规范。仅在 TI 保修的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的数据手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售 TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关 TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

可访问以下 URL 地址以获取有关其它 TI 产品和应用解决方案的信息:

产品

放大器	http://www.ti.com.cn/amplifiers
数据转换器	http://www.ti.com.cn/dataconverters
DSP	http://www.ti.com.cn/dsp
接口	http://www.ti.com.cn/interface
逻辑	http://www.ti.com.cn/logic
电源管理	http://www.ti.com.cn/power
微控制器	http://www.ti.com.cn/microcontrollers

应用

音频	http://www.ti.com.cn/audio
汽车	http://www.ti.com.cn/automotive
宽带	http://www.ti.com.cn/broadband
数字控制	http://www.ti.com.cn/control
光纤网络	http://www.ti.com.cn/opticalnetwork
安全	http://www.ti.com.cn/security
电话	http://www.ti.com.cn/telecom
视频与成像	http://www.ti.com.cn/video
无线	http://www.ti.com.cn/wireless

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated