

针对物联网（IoT）和可穿戴设备应用的石英晶体 可延长电池寿命和提高设计可靠性的时钟优化方案

Warren Guthrie
MSEE



此应用笔记讨论了如何通过石英晶体与节能低功耗片上系统 (SoC) 的配合设计, 以降低振荡器功耗并实现最佳振荡裕量。同时, 本文通过测试结果展示了设计一个可靠, 低功耗振荡电路所需要考量的关键因素。

晶体振荡器的低功耗, 可靠性需求

市场对电池长寿命供电的无线设备需求正在增加。高能效的处理器和无线设备也在驱动这种需求的增长。开发人员通常选用超低功耗 SoC 或处理器, 以延长产品的电池寿命。在一个产品中, 电池是产品成本和尺寸的主导因素, 而电池尺寸由待机电流决定, 待机电流又由低频时钟振荡器决定, 所以时钟振荡器的低功耗设计对产品使用寿命至关重要。

众所周知, 超低功率振荡器可能会出现因增益不足或晶体负载过大导致的启动问题。为了避免在省电设计中出现启动问题, 开发人员需要在待机电流和振荡器可靠性的关键决定因素中做出明智的设计决策。换句话说, 振荡器需要同时满足低功耗, 并能保证产品在生产过程变化和温度范围内可靠地启动。

由于时钟能效的重要性, SoC 采用了多种时钟管理方法。本应用笔记考察了两种最常见的时钟管理方法, 自动增益控制 (AGC) 和增益可配置管理。理解了这两种方法与石英晶体特性的相关性, 将帮助开发者对石英晶体的选择, 处理器/MCU 的设置做出明智决策。

背景: 振荡器基础

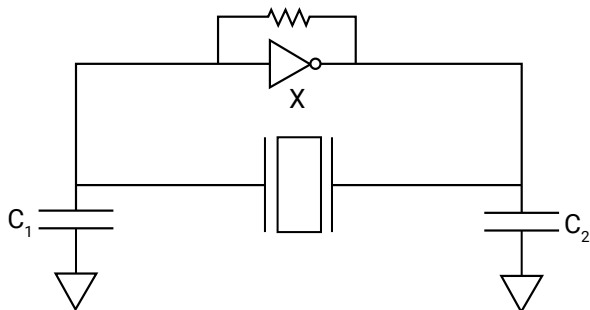


图 1-皮尔斯 (Pierce) 振荡器框图

图 1 显示了大多数 SoC 中使用的皮尔斯振荡器。振荡器环路由反相放大器和反馈电阻器（一般在芯片内部）以及由晶体 (X) 和外部负载电容 (C_1 和 C_2) 组成的精密相移电路组成。当放大器的输出反馈到输入时, 它产生负性阻抗, 并在合适的条件下振荡。

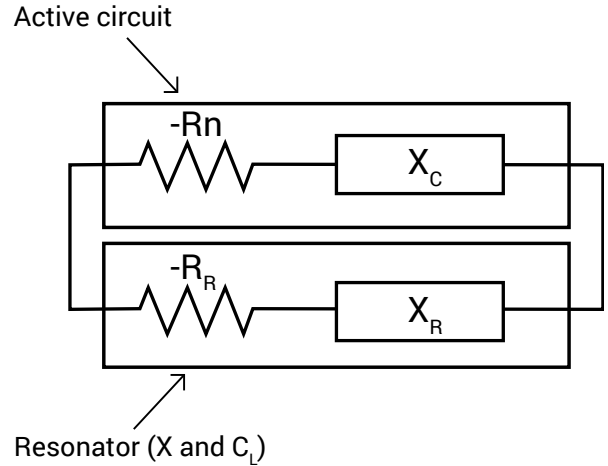


图 2 - 负性电阻振荡器模型

为了进一步深入了解, 图 2 将振荡器描述为负性电阻 (R_n)、电路电抗 (X_c)、谐振器电抗 (X_r) 和谐振器电阻 (R_r) 的组合。当 $R_n > R_r$ 时, 电路将以使 $X_c = -X_r$ 的频率振荡。

图 3 描述了带有晶体等效电路的振荡器环路。

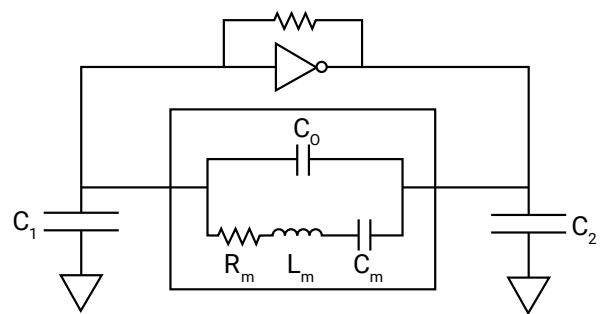


图 3 - 带晶体等效电路模型的振荡器环路

- R_m : 晶体动态电阻
- C_0 : 晶体的寄生电容
- C_1 和 C_2 : 振荡电路外部电容。与其它板级寄生电容和反相器管脚电容共同代表了负载电容 C_L 。
- L_m : 晶体动态电感
- C_m : 晶体动态电容

振荡裕量

振荡裕量 (Oscillation Allowance/OA) 也可称为闭环增益裕量 (Gain Margin/ G_M)，是用于描述振荡器可靠性的专业术语，是振荡器对增加损耗容忍度的参数。众所周知，振荡裕量OA小于5是不可接受的，低OA会导致生产良率和与温度相关的启动问题。考虑到最终产品的板级杂散，以及在晶体层面和SoC层面上器件与器件之间，批量与批量之间的一些微差异，理想和稳健的OA应该大于20。

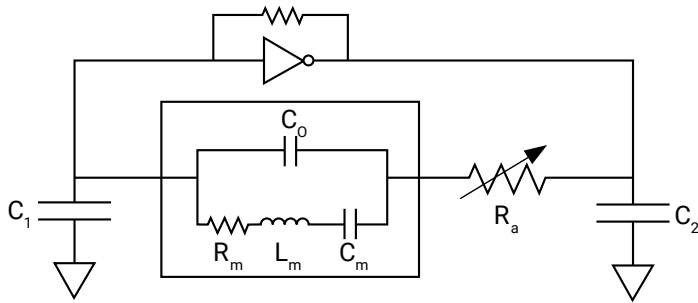


图 4 - 振荡裕量 (OA) 的测量

图 4 描述了实验中如何测量振荡裕量OA的值，并深入了解了术语"OA"的实用性。在这里，振荡回路包括了一个附加电阻 R_a 。通过增加 R_a 的值直到振荡器不再工作，此时来算出OA的值。

振荡裕量OA计算公式为：

$$OA = R_n / R_e$$

R_n 是负电阻
 $R_n = R_e + R_a$
 R_e 是等效串联电阻 (通常称为 ESR)
 ESR = 等效串联电阻 (R_e) = $R_m \times (1 + C_0/C_L)^2$

从计算公式来看，OA对石英晶体参数有显著的依赖性，并且随着 R_m 和 C_0/C_L 的增加而减少。对于振幅相对较小的极低功率振荡器，这种依赖性显著增加。在开发过程中OA值的测量经常被忽视，这可能导致以后批量生产良率问题。

影响功耗的因素

现代SoC设计中特别注重在振荡器电路中实现低电流。它们利用自动增益控制 (AGC) 或增益可配置设置将振荡器的振幅设置为尽可能低，同时保持可靠的振荡 (高OA)。公平地说，电路效率通过这种方式得到很好的优化。然而，晶体本身造成的功率损失通常被忽视。这个因素可能很重要。参考图 3，当电流通过动态电阻 R_m 时会产生功耗，而当 C_L 较大时，电流增加。因此只有当 R_m 和 C_L 同时降低时，功耗最低。

晶体示例

为了展示 Abracon 在业界领先的低 C_L 石英晶体的优势，我们选择了6片32.768kHz石英晶体与两种不同的SoC (基于AGC和增益可配置的方式) 配合工作进行分析比较。表1总结了晶体特性。应该注意的是，所有晶体制造商提供的都是计算出的ESR而不是 R_m 值。

此外，振荡裕量OA (或 G_M) 与晶体动态参数的相关性通过如下等式描述：

$$OA (G_M) = \frac{gm}{4 \times ESR \times (2\pi F)^2 \times (C_0 + C_L)^2} \dots (1)$$

(方程式 1)

其中， gm = 振荡器中放大器的跨导
 ESR = 等效串联电阻
 $(ESR = R_m \times (1 + C_0/C_L)^2)$
 F = 振荡频率
 C_0 = 石英晶体静态寄生电容
 C_L = 石英晶体负载电容

从方程 (1) 中可以明显看出， C_L 对OA有深远的影响。此外，ESR值极大地影响了振荡的可持续性。为了实现卓越的振荡裕量OA，目标是同时减少所有三个动态参数 (C_0 、 C_L 和 ESR)。

XTAL	Part Number	Package	C_L	C_o	ESR
		mm	pF	pF	KΩ
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	1.2	37.5
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	0.9	61.6
M2a	Manufacturer #2	3.2x1.2x0.6	6	1.0	48.5
M2b	Manufacturer #2	2.0x1.2x0.6	6	1.3	59.5
M3a	Manufacturer #3	2.0x1.3x0.6	4	1.3	62.6
M3b	Manufacturer #3	3.2x1.5x0.9	6	1.1	31.3

表 1 用于评估的32.768KHz石英晶体属性

以下各节将评估这六片石英晶体的振荡裕量 (OA) 和电流需求。

增益可配置振荡器

图 5 显示了增益可配置振荡器电路。在这里，通过软件设置将放大器偏置电流配置为四个级别之一以实现增益选择。

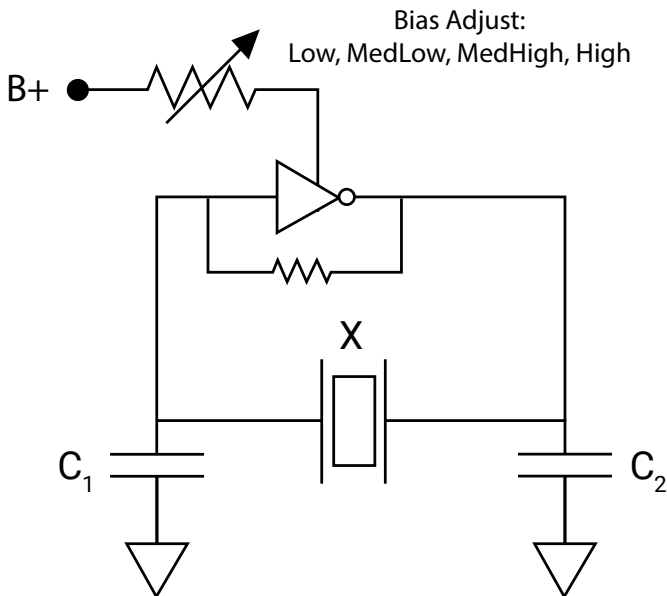


图 5 - 基于偏置调整的增益可配置振荡器

图 6 所示图片是在增益可配置振荡电路测试中所使用的 STM320F 开发评估板。图 7 是测试中得到的典型启动瞬态波形。

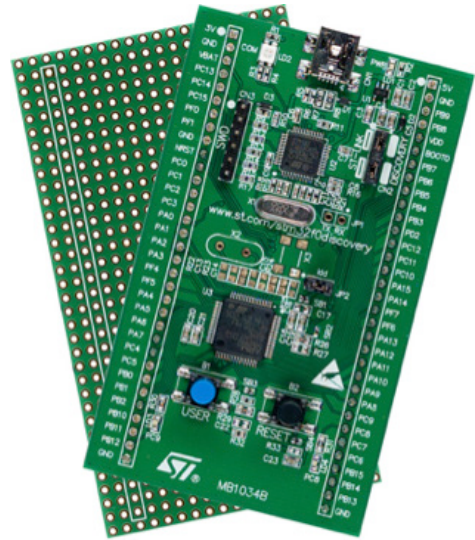


图 6 - 增益可配置测试的评估板

此 SoC 可输出一个用于测量启动时间的“时钟就绪”信号 (绿色波形)，总结于表 2。

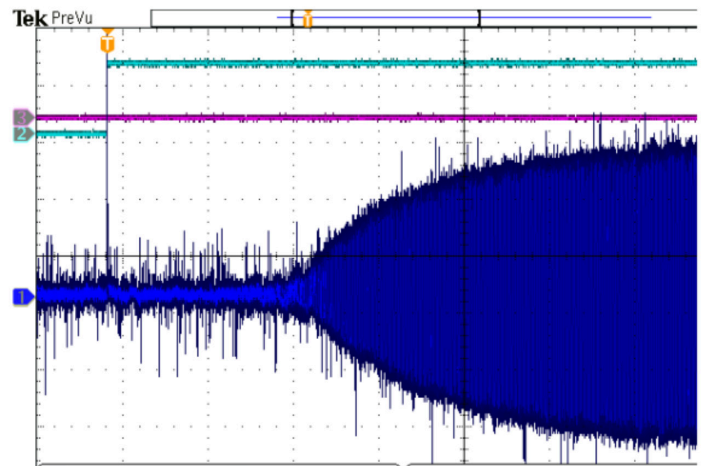


图 7 - 增益可配置振荡器启动瞬态波形

XTAL	Part Number	Package	C_L	C_o	ESR	Start-up Time
		mm	pF	pF	KΩ	ms
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	1.2	37.5	172
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	0.9	61.6	156
M2a	Manufacturer #2	3.2x1.2x0.6	6	1.0	48.5	186
M2b	Manufacturer #2	2.0x1.2x0.6	6	1.3	59.5	151
M3a	Manufacturer #3	2.0x1.3x0.6	4	1.3	62.6	143
M3b	Manufacturer #3	3.2x1.5x0.9	6	1.1	31.3	192

表 2 - 增益可配置电路中 32.768kHz 晶体的启动时间

表 2 说明了所有晶体的启动时间相当一致。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA	Crystal Drive Current
		mm	pF		nA
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	78	458
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	52	499
M2a	Manufacturer #2	3.2x1.2x0.6	6	24	508
M2b	Manufacturer #2	2.0x1.2x0.6	6	6.5	457
M3a	Manufacturer #3	2.0x1.3x0.6	4	19	485
M3b	Manufacturer #3	3.2x1.5x0.9	6	15	496

表 3 - 32.768 kHz 时钟在增益可配置电路中的振荡裕量和驱动电流

数据显示，基于 Abracon 低负载电容 C_L 设计的 W 系列石英晶体振荡器是最可靠的。晶体 M2b 的 OA 只有 6.5，这是设计裕量比较临界的情况。制造商 3# 的晶体也显示低于理想的 OA，需要评估温度以及器件之间差异对振荡电路的影响。

将增益设置得更高可以改善 OA，但它需要更大的电流。表 4 显示了调整低 OA 晶体 "M2b" 增益的效果。显而易见，增益设置会影响 OA 和消耗电流。增益选择应基于两个因素的测量结果进行决策，尤其是电池供电的设计。

XTAL	Part Number	Gain Setting	OA	Crystal Drive Current nA
M2b	Manufacturer #2	Low	6.5	457
M2b	Manufacturer #2	Medium Low	13	637
M2b	Manufacturer #2	Medium High	22	679
M2b	Manufacturer #2	High	23	757

表 4 - 增益设置对低 OA 32.768 kHz 晶体的振荡裕量和驱动电流的影响

数据显示，在电流增加约 40% 的情况下，可以达到足够的振荡裕量，但振荡器仍不像低 C_L 的 Abracon W 系列石英晶体那样稳健。

Abracon 晶体的高温性能

此节内容进一步评估了在高温条件下 (85°C) Abracon 晶体在增益可配置电路中的性能。将增益设置为“低”，预计这将是使用中最糟糕的情况。表 5 中的结果显示 振荡裕量 OA 在高温时有所上升，可以在最小消耗电流下实现稳健的持续振荡。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA	Crystal Drive Current
		mm	pF		nA
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	80	199
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	96	228

表 5 - Abracon 32.768 kHz 晶体在 85°C 时的振荡裕量表现

基于自动增益控制 (AGC) 的振荡器-振荡裕量和电流需求分析

图 8 显示了基于 AGC 的低功耗振荡器。在这里，通过自动调整放大器的增益以保持振荡的振幅恒定。

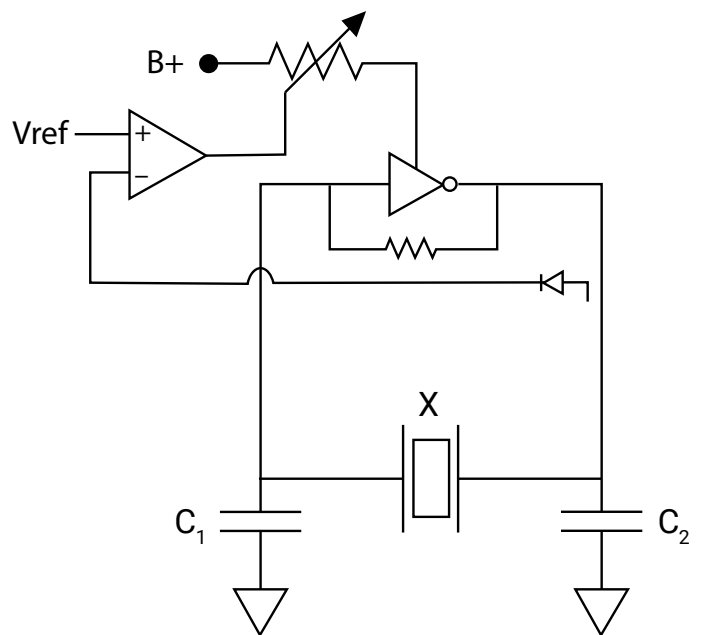


图 8 - 基于 AGC 的振荡器

图 9 的图片是基于 AGC 的振荡器测试中使用的带 Nordic N52810 蓝牙芯片的定制电路板。

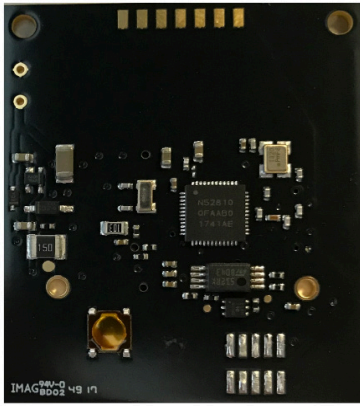


图 9 - 基于 AGC 的振荡器测试中使用的电路板

基于 AGC 的振荡器根据振荡幅度调整放大器的偏置。因此可以预期，低损耗晶体（低 C_L 和ESR）将需要更少的电流，也具有更高的OA。表6中的数据证实了这一假设。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA
		mm	pF	
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	121
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	67

表 6 - 基于AGC振荡器的振荡裕量

图 10 显示了典型的 AGC 启动瞬态。此示例用于 32.768 kHz 振荡器。请注意，在启动瞬态后，信号包络保持恒定。

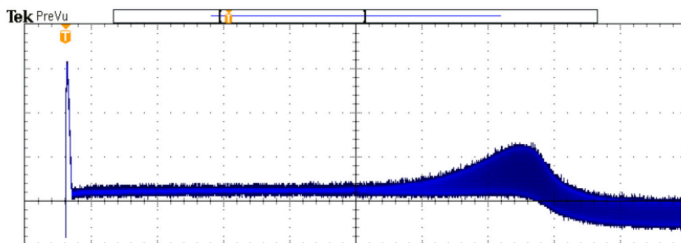


图 10 - 基于 AGC 的振荡器启动瞬态波形

该芯片包括一个"时钟就绪"信号，用于测量启动时间，总结于表 7。

XTAL	Part Number	Package	C_L	C_o	ESR	Start-up Time
		mm	pF	pF	kΩ	ms
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	1.2	37.5	313.8
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	0.9	61.6	335.7
M2a	Manufacturer #2	3.2x1.2x0.6	6	1.0	48.5	356.7
M2b	Manufacturer #2	2.0x1.2x0.6	6	1.3	59.5	317.2
M3a	Manufacturer #3	2.0x1.3x0.6	4	1.3	62.6	303.3
M3b	Manufacturer #3	3.2x1.5x0.9	6	1.1	31.3	376.2

表 7 - AGC振荡电路中 32.768kHz 晶体的启动时间

表 7 表明使用时钟就绪信号进行评估时，所测量到的启动时间相当一致。

人们可能会预计，恒定振幅会产生恒定消耗功率。但是从表 8 中可以明显看出，消耗的功率实际上随着 ESR 和 C_L 的增加而增加。此外，OA 随 ESR 和 C_L 的增加而减少。当基于AGC的SoC与未经优化的石英晶体一起使用时，最后的结果就是功耗会随着OA的降低而增加。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA	Crystal Drive Current
		mm	pF		nA
A1	ABS07W-32.768KHZ-D-1-T	3.2x1.5x0.9	3	80	199
A2	ABS06W-32.768KHZ-D-2-T	2.0x1.2x0.6	3	96	228
M2a	Manufacturer #2	3.2x1.2x0.6	6	28	268
M2b	Manufacturer #2	2.0x1.2x0.6	6	18	267
M3a	Manufacturer #3	2.0x1.3x0.6	4	33	251
M3b	Manufacturer #3	3.2x1.5x0.9	6	44	241

表 8 - 基于 AGC 的32.768KHz振荡电路的振荡裕量和电流表现

表 8 的数据清楚地描述了 Abracon 低 C_L 、ESR 的 W 系列石英晶体在采用基于 AGC 的 SoC 设计中的显著优势。

32 MHz的高频石英晶体

我们在此项研究中所使用的评估板上也测试了高频石英晶体的性能。两个测试电路板上除了 32.768 kHz 振荡器外，都包括一个独立的高频振荡器。高频振荡器使用与低频时钟相同的时钟管理方式-增益可配置或自动增益控制 (AGC)。我们对表9中列出的5个32.00MHz晶体在振荡裕量 (OA)、电流消耗和启动时间上进行了评估。

XTAL	Part Number	Package	C_L	C_o	ESR
		mm	pF	pF	Ω
A3	ABM11W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	2.0x1.6x0.5	4	0.8	30.79
A4	ABM11W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	1.6x1.2x0.4	4	0.5	28.66
M2c	Manufacturer #2	1.6x1.2x0.4	8	0.5	25.13
M2d	Manufacturer #2	2.0x1.6x0.5 5	8	0.4	28.31
M3c	Manufacturer #3	2.0x1.5x0.5	8	0.7	27.39

表 9 - 32 MHz石英晶体参数

表 10 显示了32MHz石英晶体在增益可配置振荡电路中的振荡裕量，电流和启动时间表现。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA	Current	Start-up Time
		mm	pF		nA	ms
A3	ABM11W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	2.0x1.6x0.5	4	56	51.53	147.9
A4	ABM12W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	1.6x1.2x0.4	4	64	51.56	188.9
M2c	Manufacturer #2	1.6x1.2x0.4	8	47	51.5	459.1
M2d	Manufacturer #2	2.0x1.6x0.5 5	8	52	51.53	328
M3c	Manufacturer #3	2.0x1.5x0.5	8	23	51.54	194.4

表 10 - 32MHz石英晶体在增益可配置振荡器中表现

我们在基于AGC的振荡器电路也使用了同样的晶体来分析整体性能。基于AGC的振荡器环路测试结果见表 11。

XTAL	Part Number	Package	C_L	OA	Current	Start-up Time
		mm	pF		nA	ms
A3	ABM11W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	2.0x1.6x0.5	4	61	163.6	296.5
A4	ABM12W-32.0000MHZ-4-D1X-T3	1.6x1.2x0.4	4	62	164.9	333.5
M2c	Manufacturer #2	1.6x1.2x0.4	8	29	163.6	452.5
M2d	Manufacturer #2	2.0x1.6x0.5 5	8	36	163.5	470.5
M3c	Manufacturer #3	2.0x1.6x0.5	8	23	163.8	346.5

表11 - 32MHz石英晶体在基于 AGC的 振荡器中表现

从表10和表11的测试数据可以看出，对于高频振荡器而言，具有较低 C_L 的Abracon的W系列石英晶体在不同振荡器电路中的振荡裕量，启动时间表现都是最优的。

总结

开发者对SoC中可变增益振荡器如何与晶体特性相互理解，对于实现最低功耗，优化振荡裕量和启动时间至关重要。

测量结果显示，在基于AGC的SoC振荡环路中，Abracon针对IoT应用所推出W系列2016封装 (2.00 x 1.60 x 0.50mm) 的32.000MHz晶体，在振荡裕量方面表现优于主要竞争对手69%~165%，同时启动时间减少了14%~37%。同样的，在该系列1612封装 (1.60 x 1.20 x 0.4mm) 的石英晶体方面，振荡裕量比竞争对手提高了114%，启动时间缩短了26%。在基于增益可配置的振荡环路中，当将增益设置为“低”时，此系列2016封装32.000MHz石英晶体启动时间上比主要竞争对手缩短了24%到55%。此系列1612封装石英晶体启动时间比主要竞争对手的设备缩短了59%。

Abracon针对IoT应用所推出W系列32.768KHz石英晶体，无论在室温还是高温 (85° C) 条件下，振荡裕量均得到大幅提升。其中3215封装 (3.2 x 1.5 x 0.9mm) 的石英晶体电流消耗减少了17%~26%，而振荡裕量 (OA) 提升了82%~186%。同样的，在该系列2012封装 (2.0 x 1.2 x 0.6mm) 的石英晶体方面，电流消耗减少9%~15%，而振荡裕量比竞争对手提高了191%~433%。

Abracon 针对IoT应用的W系列石英晶体具有更快的启动速度，更高的振荡裕量，更低的功耗，无论是物联网还是可穿戴设备的功耗优化解决方案都可以从中获益匪浅。

另外，为解决设计可靠性问题，Abracon为客户提供皮尔斯振荡电路板级分析 (PAS)，欢迎访问 Abracon官方网站 (www.abracon.com) 或联系我们以获取更多相关资讯。

作者信息:

沃伦·古斯里

Warren 是一位拥有 35 年射频和信号处理经验的专业顾问。他拥有电路和系统设计等各方面50项专利。