

使用 32 KHz 晶振的典型温度特性补偿
M41T83 和 M41T93 串行实时时钟

前言

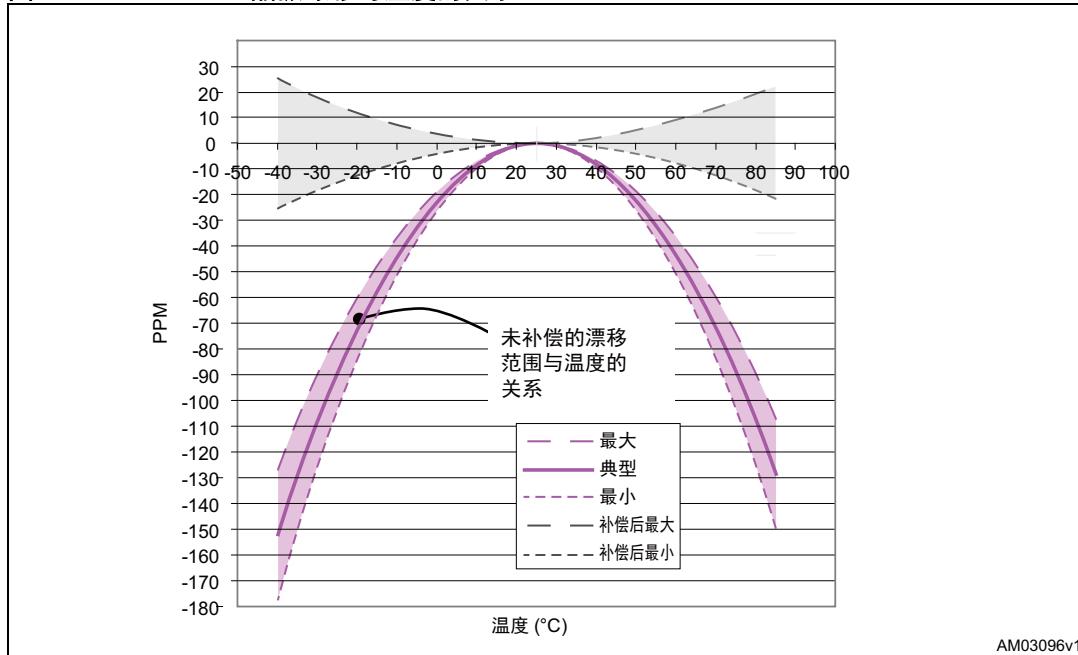
典型的实时时钟采用 32 KHz 音叉晶振。虽然非常适合于电池供电应用的低功耗需求，但这些晶振会在 -40 至 +85°C 的整个工业温度范围内显著漂移。在极端温度下，漂移有时可达到 -108 到 -177 的百万分率 (ppm)，每月损失约 5 至 8 分钟。可以实现全温度补偿，但成本较高。然而，通过简单的技术即可大大改善漂移，从而在不显著增加成本的同时提高 RTC 的计时精度。

我们已经知道了音叉晶振温度曲线的一般形状，所以可以在使用温度传感器的应用中制定这样的补偿方案。

如图 1 下图所示，在接近底部的阴影部分，当温度接近极限时，32 KHz 晶振的精度明显降低。该区域中间的粉色线被认为是典型的行为。如果振荡器按照预期或典型曲线进行调整，精度接近该图顶部示出的阴影区域，接近 $\pm 25\text{ppm}$ 的范围，每月 1 分钟左右，达到更合适的精度范围。从本质上讲，这种技术将底部阴影区域移动，并将其沿温度轴拉直。

在许多应用中，这种级别的精度即可满足要求。本文介绍了如何实施这样的补偿方案。

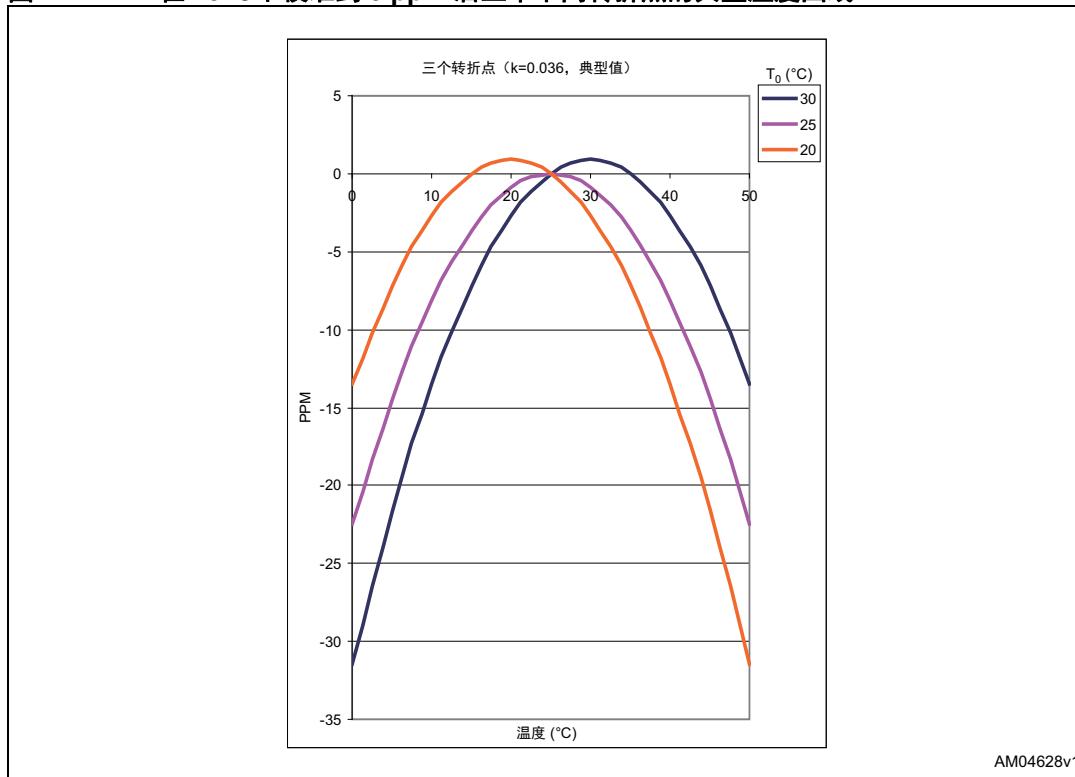
图 1. 32 kHz 晶振漂移与温度的关系



1 其他注意事项

转折点是晶振处于最高频率的温度。这是温度抛物线的最大值或最高点，称为 T_0 。在图 1 中，假定转折点为 25 °C。实际上对于大多数 32 KHz 晶振，范围在 20 到 30 °C 之间。

图 2. 在 25 °C 下校准到 0 ppm 后三个不同转折点的典型温度曲线



在 M41T83 和 M41T93 的工厂校准中，振荡器频率被调整，直到器件在 25 °C 下非常接近 0 PPM。这会导致温度曲线上下移动。

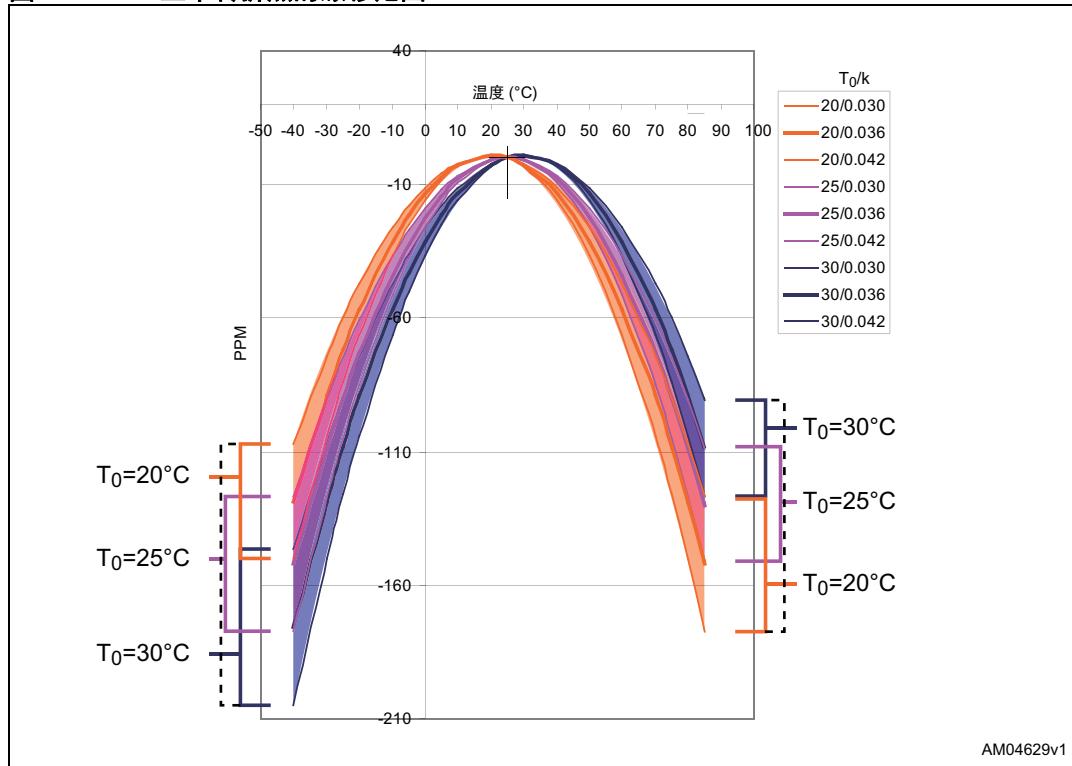
如果转折点是 20 °C，工厂校准之后，器件将在 25 °C 下将达到 0 PPM，但在 20 °C 下运行速度最快。这由橙色曲线显示。

类似地，如果转折点是 30 °C，工厂校准之后，器件将在 25 °C 下达到 0 PPM，但在 30 °C 下运行速度最快。这由蓝色曲线显示。

因此，温度转折点会随着校准上下移动，但仍保持在相同的温度。

当最大值和最小值都包含在所有三个转折点中时，即可获得 [图 3](#) 曲线。粉红色区域与以前 [图 1](#) 中相同，代表 25°C 转折的最小和最大情况。在 [图 3](#) 两边的粉红色括号有助于说明这一点。

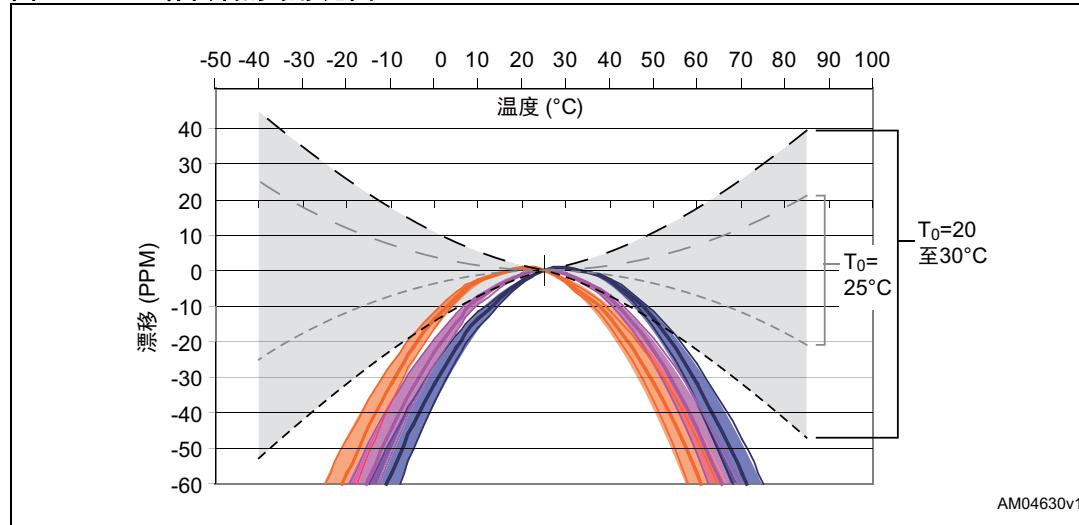
图 3. 三个转折点的漂移范围



蓝色阴影区域涵盖了 30°C 转折点的最小和最大情况，橙色阴影区域涵盖了 20°C 转折的最小和最大情况。漂移的整个范围由黑色虚线指示，并且是这三种情况的总和。

为了本应用笔记的目的，考虑转折点的最终结果是极端温度下漂移的不确定性增加。不确定性增加后，[图 1](#) 顶部显示的拉直的不确定区域成为下方的[图 4](#)。

图 4. 补偿后的漂移范围



在 [图 4](#) 中，黑色虚线表示补偿后漂移的整个范围。如前所述，在 [图 1](#) 中，灰色区域表示沿着温度轴线拉直后的抛物线。

补偿后，在 -10 至 +50 °C 的范围内，漂移应不低于 ±20ppm，对于以下温度，在灰色虚线所示范围内一般小于 ±10ppm $T_0 = 25^\circ\text{C}$

晶振公式

音叉晶振的漂移通过下面的公式说明。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -k \cdot (T - T_0)^2$$

这里，漂移被表示为标称频率 f_0 的分数。工厂校准会调整 f_0 到 32768Hz 之间的误差。 T_0 是转折点，而 T 是温度，单位为摄氏度。 k 是在 0.030 到 0.042 范围内的一个常量，典型值为 0.036。在绘制后，该公式的曲线如 [图 1](#) 到 [图 4](#) 所示。[图 1](#) 中的典型情况是 $k = 0.036$ 。 k 的其他值给出了最小和最大值（虚线）曲线。

2 应用理论

如图 5 所示，32 KHz 晶振的典型温度特性由抛物线说明。远离中心点，在高于和低于 25 °C 的温度下，晶振倾向于以更低的频率运行。从曲线可以得出一个表，通过该表，用户可以查找给定温度下时钟的近似漂移（百万分率或 PPM）。因此，如果应用可以测量温度，它就可以预测实时时钟的漂移，并通过调整 RTC 的校准电路相应地进行补偿。

M41T83 和 M41T93 采用模拟校准电路，该电路可通过添加或移除电容来调整振荡器的频率。负载电容与频率之间的非线性关系如图 7 的曲线所示。

需要注意的是，由于曲线是非线性的，振荡器 PPM 中的增量变化随着曲线上位置而变化。也就是说，电容的小变化在曲线上一个点对 PPM 的影响与另一个点不同。因此，为了确定要添加或去除多少增量电容才能获得需要的 PPM 移位，用户必须首先确定器件运行在曲线上所处的点。

在 M41T83 和 M41T93 的情况下，在内嵌晶振封装中，一个工厂校准值被编程到一个可以由应用读取的永久（一次性可编程）寄存器。这提供了校准流程的起点。它指示了器件在室温下运行在曲线上所处的点。

总之，图 5（在图 6 中列为表格）告知用户给定温度所需的校准 PPM。图 7 和图 8 允许用户确定实现所需的 PPM 偏移必要的负载电容设置。

3 示例

第一步是确定温度。这反过来又被用于查找预期漂移量，如步骤 2 所示。要做到这一点，最简单的方法是使用如图 6 所示的表，显示在 58 °C 下的预期漂移为 -43 ppm。因此，振荡器应在相反的方向上调整 43 ppm。

在步骤 3 中，工厂校准值被用作图 7 中电容 ppm 曲线上的起始点。0x14 的出厂校准值对应于一个 +5 pF 的电容（在标称 12.5 pF 以上）。这对应于 -7.78 ppm，如图 8 所示。增加 43 ppm，达到 +35.22 ppm。因此，电容必须被除去，以加快振荡器速度。

在步骤 4 中，用户在图 8 的列表中找到最接近 35.22 的 ppm 值。在这种情况下，即 34.97 ppm，需要 0xA9 的模拟校准值（对应于 -10.25 pF）。然后该值被放入用户模拟校准寄存器的地址 0x12，由于 OTP 位已被清零（地址 0x13），因此器件将被强制采用用户模拟校准值代替工厂校准值。

这导致振荡器以稍微不同的速度运行，反过来这又有助于其在环境温度下保持时间更准确。

通过周期性地执行此流程，应用可以将计时精度保持在可接受的水平上。

使用这几个简单的步骤，用户可以大大提高其 M41T83 和 M41T93 实时时钟器件的计时性能。

图 5. 32 kHz 晶振曲线，PPM 与温度的关系

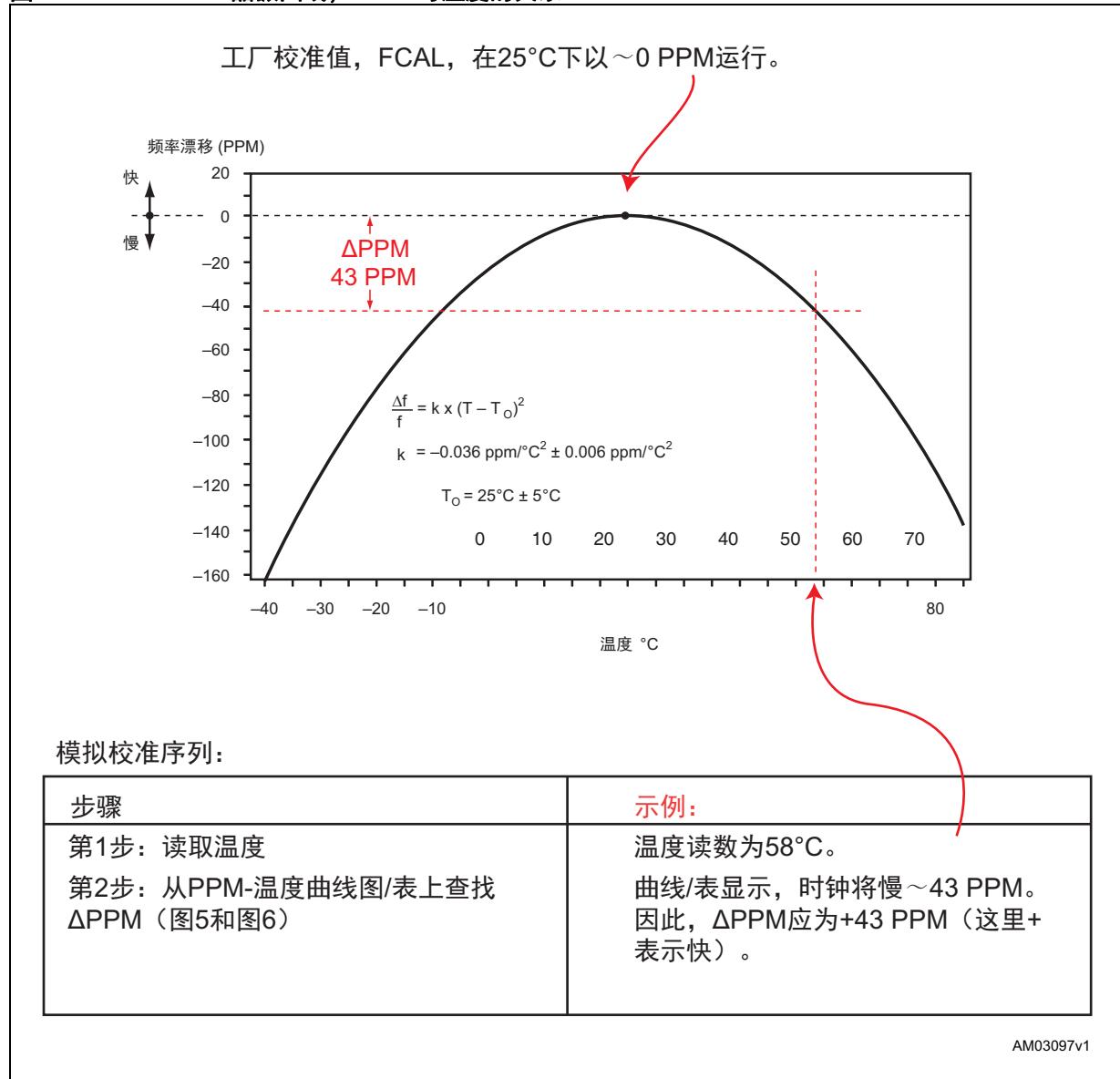


图 6. 漂移与温度的关系

温度 (°C)	偏移 (PPM)
-30	-116.5
-29	-112.3
-28	-108.2
-27	-104.1
-26	-100.2
-25	-96.3
-24	-92.4
-23	-88.7
-22	-85.0
-21	-81.4
-20	-77.9
-19	-74.5
-18	-71.1
-17	-67.8
-16	-64.6
-15	-61.5
-14	-58.5
-13	-55.5
-12	-52.6
-11	-49.8
-10	-47.0
-9	-44.4
-8	-41.8
-7	-39.3
-6	-36.9
-5	-34.5
-4	-32.2
-3	-30.0
-2	-27.9
-1	-25.9
0	-23.9
1	-22.0
2	-20.2
3	-18.5
4	-16.8
5	-15.3
6	-13.8
7	-12.3
8	-11.0
9	-9.7
10	-8.5
11	-7.4
12	-6.4
13	-5.4
14	-4.6
15	-3.8
16	-3.0
17	-2.4
18	-1.8
19	-1.3
20	-0.9
21	-0.6
22	-0.3
23	-0.1
24	0.0
25	0.0
温度 (°C)	偏移 (PPM)
25	0.0
26	-0.1
27	-0.2
28	-0.4
29	-0.7
30	-1.0
31	-1.5
32	-2.0
33	-2.6
34	-3.3
35	-4.0
36	-4.8
37	-5.7
38	-6.7
39	-7.8
40	-8.9
41	-10.1
42	-11.4
43	-12.8
44	-14.2
45	-15.8
46	-17.4
47	-19.0
48	-20.8
49	-22.6
50	-24.5
51	-26.5
52	-28.6
53	-30.7
54	-33.0
55	-35.3
56	-37.6
57	-40.1
58	-42.6
59	-45.2
60	-47.9
61	-50.7
62	-53.5
63	-56.4
64	-59.4
65	-62.5
66	-65.7
67	-68.9
68	-72.2
69	-75.6
70	-79.0
71	-82.6
72	-86.2
73	-89.9
74	-93.7
75	-97.5

测得温度

AM03098v1

图 7. 典型振荡器精度与负载电容的关系

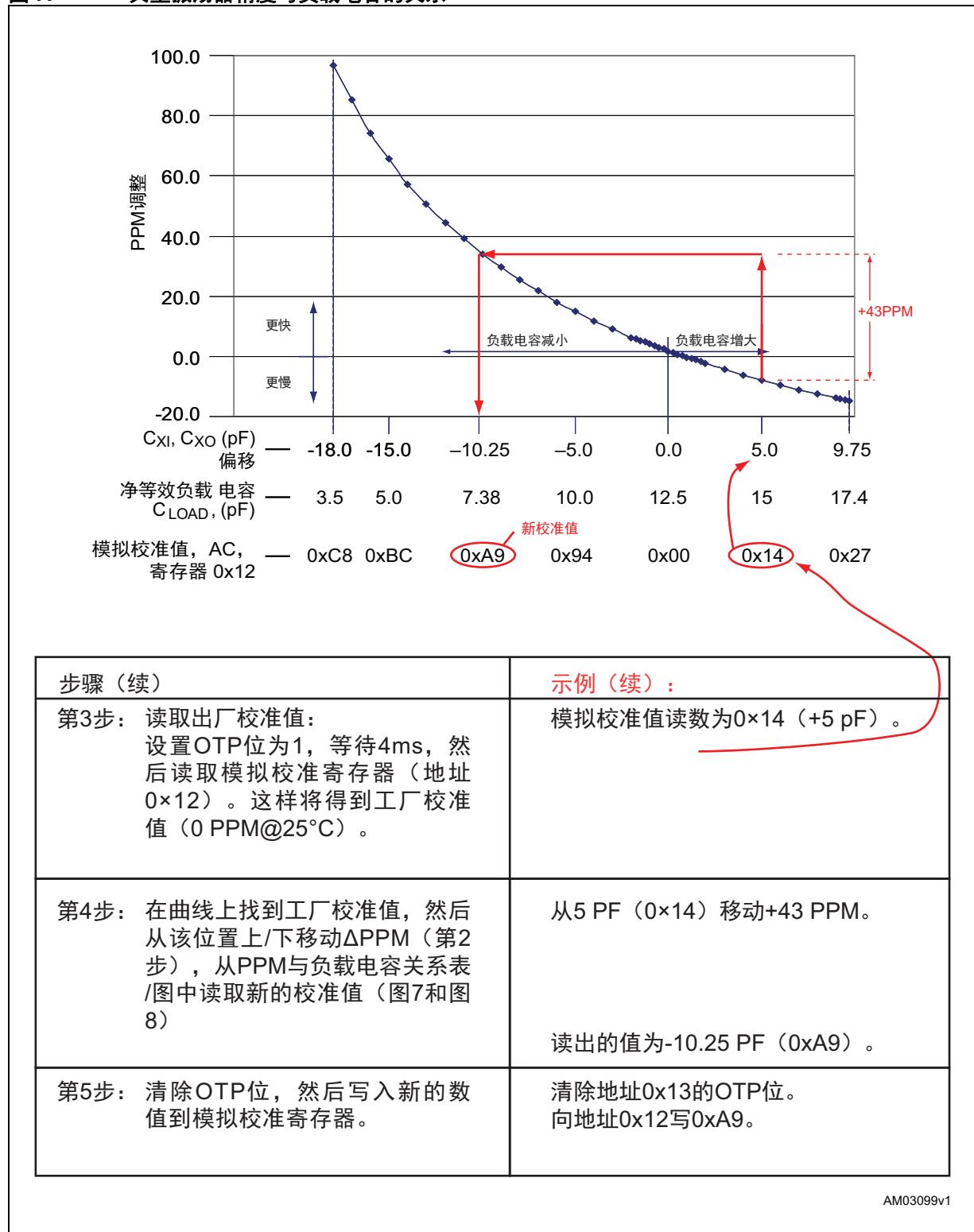


图 8. 负载电容与 PPM 的关系

模拟计算与PPM的关系

Δcap	模拟校准	PPM	CLOAD
9.75	0x27	-14.83	17.37
9.50	0x26	-14.56	17.25
9.25	0x25	-14.25	17.12
9.00	0x24	-13.95	17.00
8.75	0x23	-12.17	16.88
8.50	0x22	-11.92	16.75
8.25	0x21	-11.67	16.63
8.00	0x20	-12.63	16.50
7.75	0x1F	-11.11	16.38
7.50	0x1E	-10.81	16.25
7.25	0x1D	-10.50	16.13
7.00	0x1C	-11.08	16.00
6.75	0x1B	-9.84	15.88
6.50	0x1A	-9.49	15.75
6.25	0x19	-9.13	15.63
6.00	0x18	-9.64	15.50
5.75	0x17	-8.38	15.38
5.50	0x16	-8.00	15.25
5.25	0x15	-7.60	15.13
5.00	0x14	-7.78	15.00
4.75	0x13	-6.78	14.88
4.50	0x12	-6.36	14.75
4.25	0x11	-5.93	14.63
4.00	0x10	-6.20	14.50
3.75	0x0F	-5.04	14.38
3.50	0x0E	-4.59	14.25
3.25	0x0D	-4.13	14.13
3.00	0x0C	-4.27	14.00
2.75	0x0B	-3.20	13.88
2.50	0x0A	-2.72	13.75
2.25	0x09	-2.23	13.63
2.00	0x08	-2.50	13.50
1.75	0x07	-1.56	13.37
1.50	0x06	-1.19	13.25
1.25	0x05	-0.70	13.12
1.00	0x04	-0.27	13.00
0.75	0x03	0.31	12.87
0.50	0x02	0.70	12.75
0.25	0x01	1.25	12.62
0.00	0x00	1.71	12.50
-0.25	0x81	2.66	12.37
-0.50	0x82	3.05	12.25
-0.75	0x83	3.60	12.12
-1.00	0x84	4.09	12.00
-1.25	0x85	4.76	11.87
-1.50	0x86	5.22	11.75
-1.75	0x87	5.80	11.62
-2.00	0x88	6.32	11.50
-2.25	0x89	7.59	11.38
-2.50	0x8A	8.20	11.25
-2.75	0x8B	8.83	11.13
-3.00	0x8C	9.22	11.00
-3.25	0x8D	10.11	10.88
-3.50	0x8E	10.77	10.75
-3.75	0x8F	11.44	10.63
-4.00	0x90	11.78	10.50

模拟计算与PPM的关系

Δcap	模拟校准	PPM	CLOAD
-4.25	0x91	12.81	10.38
-4.50	0x92	13.52	10.25
-4.75	0x93	14.24	10.13
-5.00	0x94	14.89	10.00
-5.25	0x95	15.72	9.88
-5.50	0x96	16.48	9.75
-5.75	0x97	17.26	9.63
-6.00	0x98	17.85	9.50
-6.25	0x99	18.87	9.38
-6.50	0x9A	19.70	9.25
-6.75	0x9B	20.55	9.13
-7.00	0x9C	21.85	9.00
-7.25	0x9D	22.32	8.88
-7.50	0x9E	23.23	8.75
-7.75	0x9F	24.17	8.63
-8.00	0xA0	25.36	8.50
-8.25	0xA1	26.11	8.38
-8.50	0xA2	27.12	8.25
-8.75	0xA3	28.15	8.13
-9.00	0xA4	29.69	8.00
-9.25	0xA5	30.31	7.88
-9.50	0xA6	31.43	7.75
-9.75	0xA7	32.58	7.63
-10.00	0xA8	33.87	7.50
-10.25	0xA9	34.97	7.38
-10.50	0xAA	36.22	7.25
-10.75	0xAB	37.51	7.13
-11.00	0xAC	39.22	7.00
-11.25	0xAD	40.18	6.88
-11.50	0xAE	41.58	6.75
-11.75	0xAF	43.01	6.63
-12.00	0xB0	44.34	6.50
-12.25	0xB1	46.01	6.38
-12.50	0xB2	47.58	6.25
-12.75	0xB3	49.18	6.13
-13.00	0xB4	50.72	6.00
-13.25	0xB5	52.54	5.88
-13.50	0xB6	54.30	5.75
-13.75	0xB7	56.10	5.63
-14.00	0xB8	57.13	5.50
-14.25	0xB9	59.87	5.38
-14.50	0xBA	61.84	5.25
-14.75	0xBB	63.86	5.13
-15.00	0xBC	65.80	5.00
-15.25	0xBD	68.09	4.88
-15.50	0xBE	70.30	4.75
-15.75	0xBF	72.57	4.63
-16.00	0xC0	74.19	4.50
-16.25	0xC1	77.31	4.38
-16.50	0xC2	79.78	4.25
-16.75	0xC3	82.32	4.13
-17.00	0xC4	85.17	4.00
-17.25	0xC5	87.62	3.88
-17.50	0xC6	90.39	3.75
-17.75	0xC7	93.23	3.63
-18.00	0xC8	96.68	3.50

AM03100v1

4 版本历史

表 1. 文档版本历史

日期	版本	变更
2009 年 7 月 23 日	1	初始版本。

表 2. 中文文档版本历史

日期	版本	变更
2016 年 6 月 23 日	1	中文初始版本。

重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和 / 或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用， ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 徽标是 ST 的商标。所有其他产品或服务名称均为其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2016 STMicroelectronics - 保留所有权利 2016