

使用指南

LSE晶体使用指南

简介

本文档为设计者提供有关 LSE 及其晶振（32.768KHz 晶振）电路的设计指导。

帮助设计者了解晶振的工作原理，晶振参数的意义，以及如何合理的选择外围器件，让 LSE 电路更加合理的驱动晶振。

目录

1. 晶振电路工作原理.....	2
1.1 晶振介绍.....	2
1.2 串/并联谐振介绍.....	2
1.3 晶振的起振条件.....	3
2. LSE 低功耗晶振电路设计	5
2.1 负载电容计算.....	5
2.2 驱动选择.....	5
2.3 过驱动防护.....	6
2.4 自适应方案.....	7
3. PCB 设计.....	9
4. 晶体兼容列表.....	10
5. 历史版本.....	13
6. 声 明.....	14

1. 晶振电路工作原理

本章节主要介绍晶振的工作原理。

1.1 晶振介绍

构成通常指石英晶体材料，按其晶格方向以一定的角度切割成薄片，并在薄片对立面敷上电极层。晶振有明显的压电效应，在受到机械应力后，产生与压力相关的电场。利用该特性，在外部电场的驱动下，可形成一定的共振频率。

由于晶格特性，晶振呈现串联谐振特性，且谐振范围很窄，具有非常好的品质因数（Q 值高），因此适合做为稳定的时钟源。

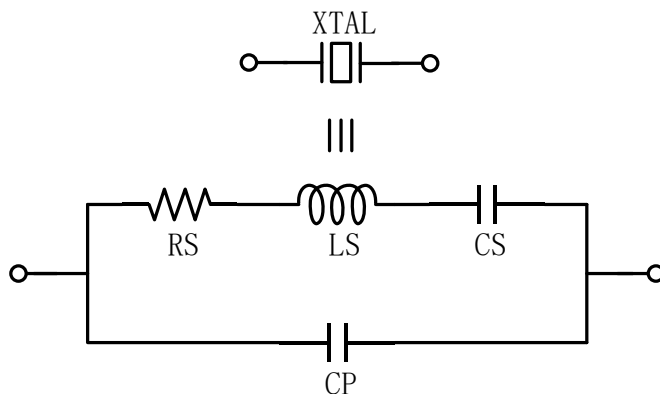


图 1-1 晶振的等效模型

上图为晶振的等效模型，其中：

RS 为谐振电阻，体现了晶振的热损耗；

LS 为谐振电感，CS 为谐振电容，共同体现了晶振的机械振动特性；

CP 为晶振两端的寄生电容；

小信号分析可得晶振具有串联谐振和并联谐振特性。LS 值很大，因此晶振的 Q 值很高，带宽很窄。

1.2 串/并联谐振介绍

上一节说到晶振的模型有串联谐振特性，经典的串联谐振电路如图所示。

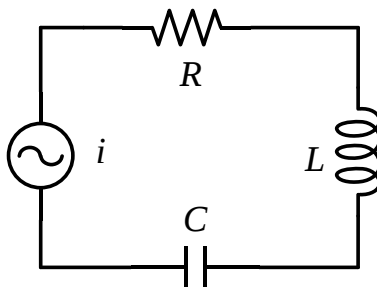


图 1-2 串联谐振电路

该电路总阻抗为 $Z_{total} = R + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) \cdot j$ ，其复面平如下图。

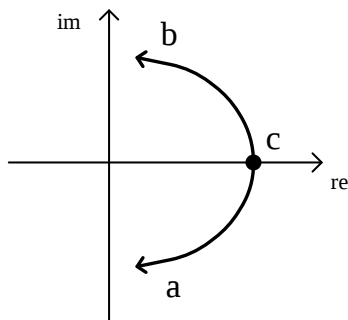


图 1-3 串联谐振复平面

当轨迹由 c 向 b 移动, $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, 电路呈感抗, 输出超前输入一个向量角; 当轨迹由 c 向 a 移动, $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, 电路呈容抗, 输出滞后输入一个向量角; 当轨迹在 c 点, $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, 电路呈阻抗, 输出相位和输入相位相同, 此时角速度 $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, 该角速度称为串联谐振频率。若 L 值很大, 其能量频谱图如下图 1-4 (a), 呈现 Q 值很高的带通滤波器特性。在谐振频率点 Fs, 会有最大的通过能力。

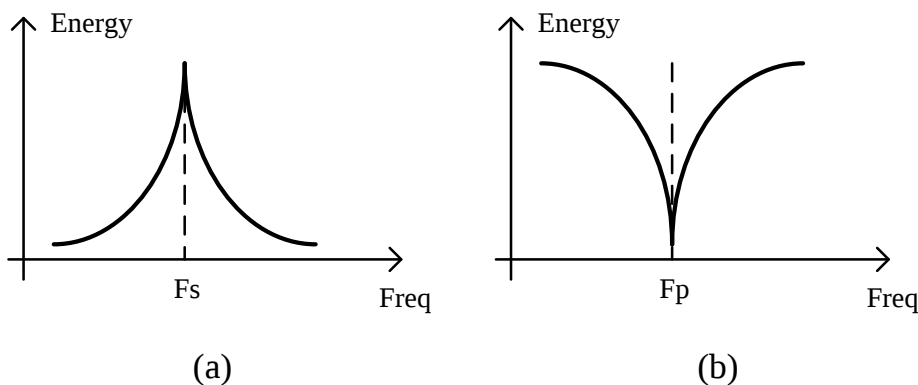


图 1-4 串联谐振频谱特性 (a), 并联谐振频谱特性 (b)

并联谐振的分析方法类似, 其能量频率特性如图 1-4 (b)。

1.3 晶振的起振条件

晶振的阻抗和相位频谱特性如图所示。

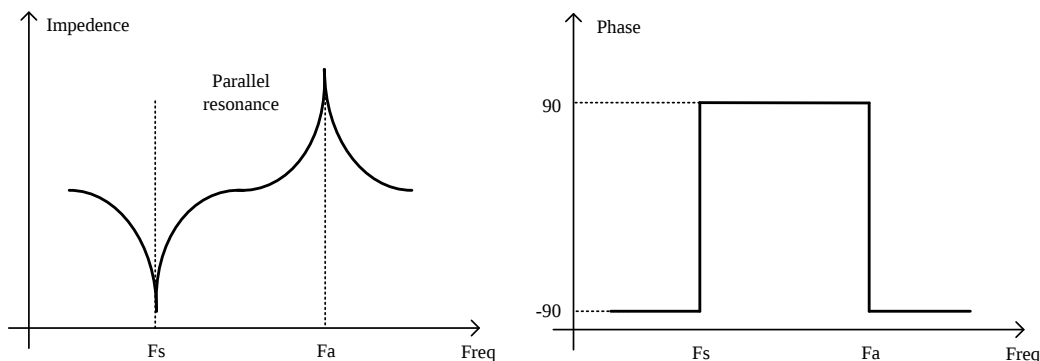


图 1-5 晶振的能量和相位频谱特性

F_s 是串联谐振频率，为一般晶振的标称频率。 F_s 到 F_a 的区间为并联谐振区域，在此区域信号的通过晶振相位余度增加 180° 。晶振起振满足 Barkhausen 判据，如下图：

- 开环增益 $|A| \times |F|$ 必须大于 0dB；
- 信号反馈回到输入端，必须转过 360° ， $\angle A + \angle F = 360^\circ$ 。

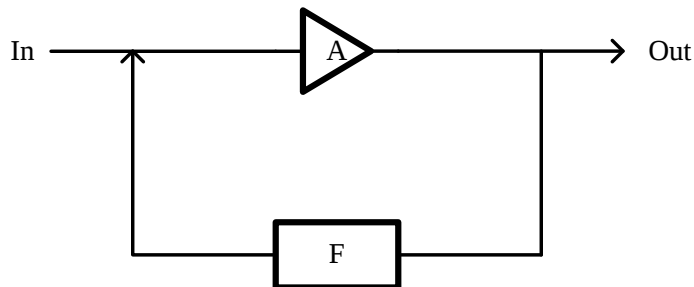


图 1-6 晶振的能量和相位频谱特性

由于晶振在 F_s 处呈现阻抗特性，该等效电阻称为 ESR:

$$ESR = R_s \times \left(1 + \frac{CP}{CL}\right)^2$$

为满足 Barkhausen 判据，则需要晶振驱动电路满足以下两个条件：

- 提供 -180° 的相位；
- 等效电阻小于 $Z_{LSE} < -ESR$

2. LSE 低功耗晶振电路设计

本章节介绍如何基于 N32H47x、N32H48x 芯片 LSE，设计出可靠的低功耗晶振电路。

LSE 和晶振的工作电路图如下图所示。Cstray 为 PCB 上，输入和输出管脚之间的寄生电容；Rext 为输出通路上的防过驱动电阻，如果 LSE 的驱动和晶振合理匹配，则 Rext 可为 0。

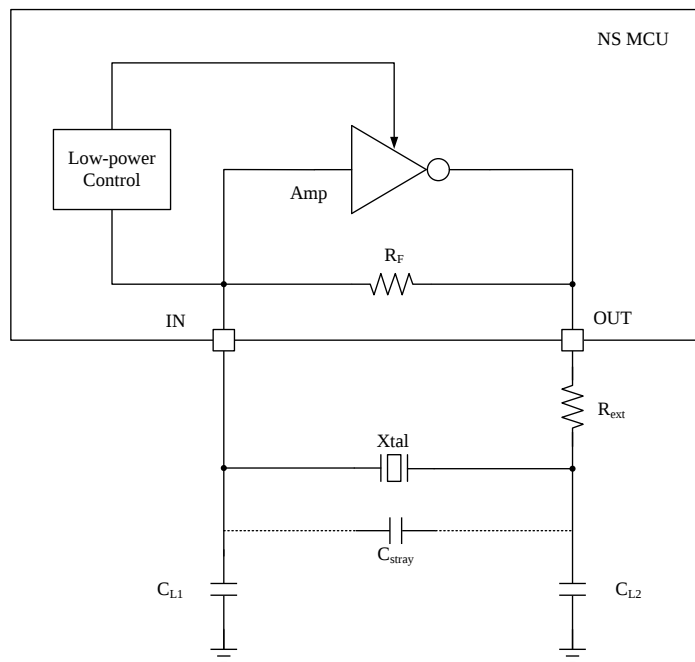


图 2-1 LSE 晶振电路示意图

2.1 负载电容计算

如图 1-5，晶振期望工作在 F_s 到 F_a 之间的并联谐振区域，合理的负载电容选择可以使晶振的工作频率稳定在期望区间。负载电容 C_L 的值，受到 C_{stray} 和匹配电容 C_{L1} 、 C_{L2} 的影响，值为：

$$C_L = C_{stray} + (C_{L1} || C_{L2})$$

C_L 的期望值有晶振说明书提供， C_{stray} 可通过对 PCB 的测试得到，一般 $C_{L1}=C_{L2}$ ，因此：

$$C_{L1} = C_{L2} = 2 \times (C_L - C_{stray})$$

需要注意的是，由于负载电容的存在，晶振实际工作在并联谐振区域，因此晶振的实际工作频率会和理想值略有差异，偏大的负载电容会导致工作频率偏低。如果负载电容过大，则晶振所需的驱动功耗会过大，导致无法起振。如果负载电容过小，则晶振偏出并联谐振区域，晶振无法起振。

2.2 驱动选择

● 负阻评估方法

章节 1.3 说到，LSE 电路需要为晶振提供足够的驱动能力，满足 $Z_{LSE} < -ESR$ 的起振要求。 Z_{LSE} 称为 LSE 电路的负阻抗，其在复平面上的轨迹如下图所示。ESR 为晶振的等效电阻， gm 为 LSE 电路的跨导，单位为 $\mu A/V$ 。

若要满足起振调慢，需要调整 LSE 的 gm ，使得 LSE 负阻的实部小于 $-ESR$ ，可见过大或者过小 gm 值，都会使负阻的实部大于 $-ESR$ ，从而导致晶振无法起振。我们定义 Z_{LSE} 的实部为 R_N ，则有

$$|R_N| \geq ESR$$

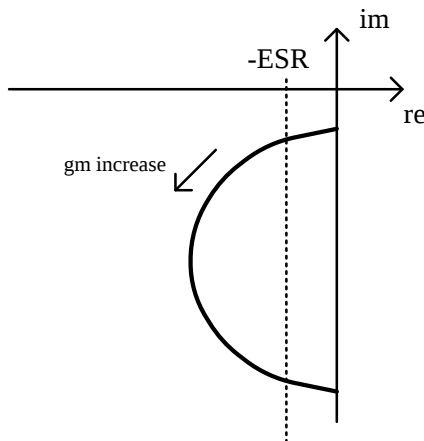


图 2-2 负阻特性的复平面

$|R_N|$ 的计算方法为，参数 ω 是 LSE 工作的角速度。

$$|R_N| = \frac{g_m}{\omega^2 \times C_{L1} \times C_{L2}}$$

为了保证有足够的冗余度，

$$|R_N| \geq 5 \times ESR$$

● 跨导评估方法

另一种评估方法，是对晶振所需要的跨导进行计算，然后对比 LSE 所提供的跨导，是否能满足需求。晶振所需要的跨导值为

$$g_{xtal} = 4 \times \omega^2 \times ESR \times (C_p + C_L)^2$$

需要满足 LSE 的跨导

$$g_m \geq 5 \times g_{xtal}$$

● 跨导配置

芯片提供了 3 种档位的跨导选择，如下表所述：

档位	LSEDRVIM[1:0]配置	跨导 gm(μA/V)		
		Min	Typ	Max
低	00	-	13	-
中低	01	-	20	-
高	11	-	40	-

使用者可根据上述计算方法，通过配置 PWR_CTRL4.LSEDRVIM[1:0]选择合理的驱动档位。

注：配置前需要先通过对 PWR_CTRL4 写 0x55AA 解锁寄存器

2.3 过驱动防护

如图 2-2 所示，过大的 gm 也会导致 R_N 无法小于 -ESR，称之为过驱动。过驱动会导致晶振无法正常工作、缩短晶振寿命、甚至损坏晶振。

一般晶振说明书会提供最大驱动功率值，如果 LSE 的驱动功率大于 DL，则有可能导致过驱动。LSE 的驱动功率可用电流法测量：使用电流探头测量流入晶振的电流的 RMS 值 I_{RMS} ，则晶振的驱动功率为 DL

$$DL = ESR \times I_{RMS}^2$$

如果 DL 超过晶振说明书会提供最大驱动功率值，则需要选择 LSE 驱动功率更小的档位，并重复上诉验证。也可在图 2-1 中增加 Rext，Rext 的值为

$$R_{ext} = \frac{1}{\omega \times C_{L2}}$$

2.4 自适应方案

由于不同的晶振参数偏差较大，且晶振性能易受到温度、湿度、使用寿命等环境的影响。因此，我们提供了自适应配置方案，帮助设计者应对偏差较大的晶振和极端使用环境。

自适应方案原理如下：

- (1) 设计者通过章节 2.2 获取合理的驱动档位，并配置给芯片的 LSE 模块。
- (2) LSE 使能，芯片检测 LSE RDY 信号，如果超过 1 秒未置起，则 LSE 除能，LSE 驱动档位从（1）中的配置档位自动切换到相邻档位，然后再使能 LSE。
- (3) 档位切换顺序为：默认档位 → 相邻档位 → 另一个相邻档位 → 最后一个档位。

实现过程流程图如下：

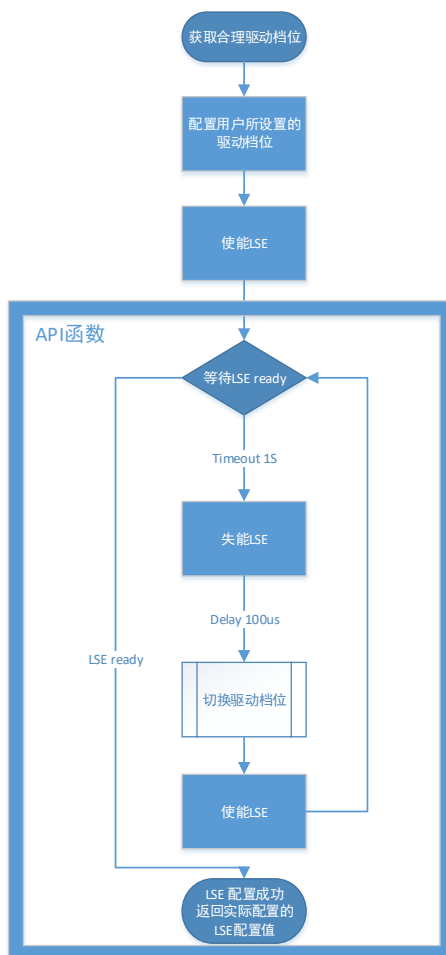


图 2-3 API 实现

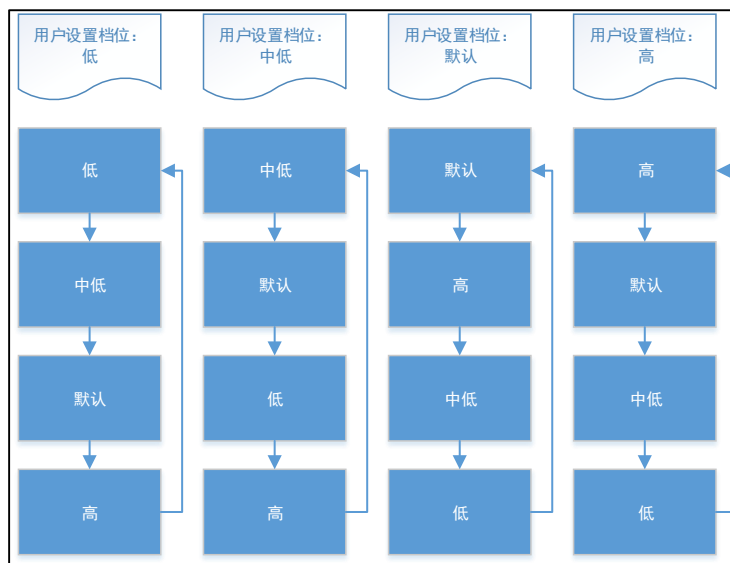


图 2-4 切换驱动档位

● 异常停振处理

如果在极端环境下，LSE 出现了中途停振现象，设计者可以使用 CSS 中断，重新配置 LSE。

3. PCB 设计

1. 晶振两端的 PCB 寄生电容要避免过大，否则会导致起振问题，并且无法找到合理的 C_{L1} 和 C_{L2} 值。
2. MCU 管脚到晶振的走线距离尽可能缩短。
3. 晶振走线需要做屏蔽，避免干扰信号。
4. 避免其它信号线穿越晶振及其走线所在区域。
5. 尽量避免 LSE 管脚隔壁的 GPIO 高速翻转。
6. 晶振两端节点，避免有额外的延伸走线，否则会形成天线效应，引入干扰。

4. 晶体兼容列表

在选择外接 32.768KHz 晶体时，需要注意所选晶体在全温度范围都可正常工作。

芯片晶体配置参数不同，可适配的晶体型号也不同，如下表所示：

晶体型号	封装	厂商	CL (pF)	C0 (pF)	ESR (max)	DL (max)	温度范围 (°C)
ABS06-32.768KHZ-T	2012	ABRACON	12.5		90	0.5	-40~85
SEIKO SC- 20S(SMD2012-2P) 32.768kHz 7pF 20ppm	2012	SEIKO	7	1.3	90	0.5	-40~85
FC-12M 32.768000 kHz 7.0+20.0- 20.0/X1A0000610006	2012	EPSON	7	1.3	90	0.5	-40~85
TJXM32768K2TGDCNT2 T	2012	TAE(雅晶鑫)	12.5		70	10	-40~85
FC-135R 32.768KHz 7PF 20PPM/ X1A000141000100	3215	EPSON	7	1.1	50	1	-40~85
FC-135R 32.768KHz 9PF 20PPM X1A0001410002	3215	EPSON	9	1.1	50		-40~85
FC-135 32.768KHz 9PF 20PPM/Q13FC13500003	3215	EPSON	9	1	70	1	-40~85
FC-135 32.768KHz 7PF 20PPM/Q13FC13500002	3215	EPSON	7	1	70	1	-40~85
FC-135 32.768kHz 6PF 20PPM/Q13FC135000490 0	3215	EPSON	6	1	70	1	-40~85
FC-135 32.768KHz 12.5PF 20PPM/Q13FC13500004	3215	EPSON	12.5	1.2	70	0.5	-40~85
SEIKO SC-32S (SMD3215-2P) 32.768kHz 7pF 20ppm 编 带	3215	SEIKO	7	1	70	1	-40~85
SEIKO SC-32S (SMD3215-2P) 32.768kHz 12.5pF 20ppm	3215	SEIKO	12.5	1	70	1	-40~85
SEIKO SC-32S (SMD3215-2P) 32.768kHz 9pF 20ppm 编 带	3215	SEIKO	9	1	70	1	-40~85
SC- 32S32.768kHz20PPM6pF	3215	SEIKO	6	1	70	1	-40~85

S3132768092070	3215	JGHC(晶光华)	9	1	65	1	-10~60
SMD31327681252090	3215	JGHC(晶光华)	12.5	1	65	1	-10~60
S3132768072070	3215	JGHC(晶光华)	7	1	65	1	-10~60
DST310S 1TJF125DP1A000A	3215	KDS 大真空	12.5	1.3	80	1	-40~85
NX3215SA-32.768kHz- EXS00A-MU00202	3215	NDK	7	1	70	0.5	-40~85
7LC32768F12UC	3215	SJK(晶科鑫)	12.5	1.2	70	1	-40~85
7LC32768F07UC	3215	SJK(晶科鑫)	7	1.2	70	1	-40~85
SF32WK32768D71T005	3215	TKD(泰晶)	7	1.1	70	0.5	-40~85
SF32WK32768D61T002	3215	TKD(泰晶)	6	1.1	70	0.5	-40~85
FC31M2-32.768- NTLLDT	3215	HCI(杭晶)	12.5	1.5	70	0.5	-40~85
FC31M2-32.768- N09LLDT	3215	HCI(杭晶)	9	1.5	70	0.5	-40~85
X321532768KGD2SI	3215	YXC 扬兴科技	12.5	1.2	70	1	-40~85
ETST00327000JE	3215	HOSONIC(台湾鸿星)	12.5	2	70	1	-40~85
TCXM32768K2NGDCZT 2T	3215	TAE(雅晶鑫)	12.5	2	80	1	-40~85
XDMCZLNDDF- 0.032768MHZ	3215	TAITIEN(泰艺电子)	12.5			0.5	-40~85
KFC3276812520	3215	(KYX)凯越翔电子	12.5	1.2	70	0.5	-40~85
F3K232768PWQAC	3215	JYJE(晶友嘉)	12.5		70	0.5	-40~85
CD01K032768FEPBAEA E	DT26	TKD(泰晶)	8	1.4	40		-20~70
CD01K032768ACNBAE AE	DT26	TKD(泰晶)	12.5	1.4	40		-20~70
CD01K032768DGRBAE AE	DT26	TKD(泰晶)	6	1.4	40		-20~70
Y26003271C2040DYJY	DT26	JGHC(晶光华)	12.5		40		-20~70
DT-26-32.768K 6pF 20PPM	DT26	KDS 大真空	6	1.1	40	2	-10~60
DT-26 32.768KHz	DT26	KDS 大真空	12.5	1.1	40	2	-10~60
X206032768KGB2SC	DT26	YXC 扬兴科技	12.5		40		-20~70
26S-32.768-12.5-10-10/B	DT26	LIMING(利明)	12.5		90	0.5	-40~85
WTL2T45292LZ	DT26	维拓(WTL)	12.5	1.5	40	1	-20~70
MC-146 32.768KHz 9PF 20PPM LF/Q13MC14610004	MC-146	EPSON(爱普生)	9	0.8	65	0.5	-40~85
Q13MC1462000200	MC-146	EPSON(爱普生)	12.5	0.8	65	1	-40~85
SSP-T7-F 32.768kHz 20PPM12.5pF	MC-146	SEIKO	12.5	0.8	65	1	-40~85
SSP-T7-F 32.768kHz 20PPM7pF	MC-146	SEIKO	7	0.8	65	1	-40~85

FR07S4-32.768-N07LLDT	MC-146	HCI(杭晶)	7	0.8	65	1	-40~85
FR07S4-32.768-NTLLDT	MC-146	HCI(杭晶)	12.5	0.8	65	1	-40~85
146-32.768-12.5-20-20/A	MC-146	LIMING(利明)	12.5				-20~70
7MC32768F12UC	MC-146	SJK(晶科鑫)	12.5	1.2	70	1	-40~85
M132768PWPAC	MC-146	JYJE(晶友嘉)	12.5		65	1	-40~85
7L032768NW2	MC-146	HD(海德频率)	12.5	0.8	65	1	-20~70
X308032768KGB2SC	DT38	YXC 扬兴科技	12.5		40		-20~+70
CD02K032768AEPBAEA E	DT38	TKD(泰晶)	12.5	1.8	30		-20~+70
DT-38 32.768KHz	DT38	KDS 大真空	12.5	1.3	30	2	-10~60
38-32.768-12.5-10/A	DT38	LIMING(利明)	12.5				-20~+70
Y308327681252075	DT38	JGHC(晶光华)	12.5	1.1	40	1	-10~60
WTL3T45322LZ	DT38	维拓(WTL)	12.5	1.5	40	1	-20~+70
XNLCZLNDED- 0.032768MHZ	MC-306	TAITIEN(泰艺电子)	6				-40~85
XNMCZLNDED- 32.768KHZ	MC-306	TAITIEN(泰艺电子)	12.5		65~90	0.5	-40~85
6LC32768F12UC	MC-306	SJK(晶科鑫)	12.5	1.2	50	1	-40~85
6LC32768F06UC	MC-306	SJK(晶科鑫)	6	1.2	50	1	-40~85
Q13MC3062000600	MC-306	EPSON(爱普生)	6	0.9	50	1	-40~85
X803832768KID4GI	MC-306	YXC 扬兴科技	6		70		-40~85
FR08S4-32.768-N06LLDT	MC-306	HCI(杭晶)	6	0.9	50	1	-40~85

5. 历史版本

版本	日期	备注
V1.0.0	2025-5-28	初版发布

6. 声 明

国民技术股份有限公司（下称“国民技术”）对此文档拥有专属产权。依据中华人民共和国的法律、条约以及世界其他法域相适用的管辖，此文档及其中描述的国民技术产品（下称“产品”）为公司所有。国民技术在此并未授予专利权、著作权、商标权或其他任何知识产权许可。所提到或引用的第三方名称或品牌（如有）仅用作区别之目的。

国民技术保留随时变更、订正、增强、修改和改良此文档的权利，恕不另行通知。请使用人在下单购买前联系国民技术获取此文档的最新版本。

国民技术竭力提供准确可信的资讯，但即便如此，并不推定国民技术对此文档准确性和可靠性承担责任。

使用此文档信息以及生成产品时，使用者应当进行合理的设计、编程并测试其功能性和安全性，国民技术不对任何因使用此文档或本产品而产生的任何直接、间接、意外、特殊、惩罚性或衍生性损害结果承担责任。

国民技术对于产品在系统或设备中的应用效果没有任何故意或保证，如有任何应用在其发生操作不当或故障情况下，有可能致使人员伤亡、人身伤害或严重财产损失，则此类应用被视为“不安全使用”。

不安全使用包括但不限于：外科手术设备、原子能控制仪器、飞机或宇宙飞船仪器、所有类型的安全装置以及其他旨在支持或维持生命的应用。

所有不安全使用的风险应由使用人承担，同时使用人应使国民技术免于因为这类不安全使用而导致被诉、支付费用、发生损害或承担责任时的赔偿。

对于此文档和产品的任何明示、默示之保证，包括但不限于适销性、特定用途适用性和不侵权的保证，国民技术可在法律允许范围内进行免责。

未经明确许可，任何人不得以任何理由对此文档的全部或部分进行使用、复制、修改、抄录和传播。