MLC12G

双通道、宽频、自感式数字电感电容传感芯片

1. 概述

MLC12G 是一款高集成度双通道电感电容传感芯片。当用作金属接近检测时，直接与电感线圈相连，测量线圈的电感值(自电感)，同时对人体和非导电物质不敏感；当用作电容接近检测时，芯片直接与被测电极相连，测量单端对地的电容值(自电容)。通过谐振激励方法，解算测量出微小电感值或电容值的变化，进而测算出位置信息。

相较于搭配铁氧体线圈的传统方法，MLC12G 可以适配更小的 PCB 线圈，是一种低功耗、低成本且分辨率高的非接触式金属检测解决方案。相较于传统触控型 RC 振荡类检测结构，MLC12G 采用甚高频谐振方法，通过和检测电极配合，实现对物质的介电检测，电场强度穿透性更好。

MLC12G 振荡频率在 10KHz~100MHz 范围内可任意配置，频率测量输出值为 16bit 数字信号，功能配置及数据读写支持最高 1MHz 的 I2C 通信速率，内置低噪声电源管理模块 LDO，适配 2.0V~5.5V 较宽电源电压范围。芯片还集成了温度传感电路，可用于进行温度补偿及其他温度传感场景；频率计算通过内部数字信号处理单元全数字化输出，多种工作模式可灵活配置。

和国内外同类产品相比，MLC12G 具有更宽的激励频率范围，更远的非接触测量性能，更宽的工作电压范围，更灵活的参考频率及工作模式配置。芯片兼具温度传感信号用于温度补偿，独立的双通道测量方式可以相互补偿参考，还可配置自动报警逻辑，可广泛用于金属接近、人体接近、位置传感等工业和专用检测场景。

2. 特性

- 电感测量范围：100nH~200uH
- 电容测量范围：0~100nF
- 温度范围：-55℃~+125℃
- 频率范围：10KHz~100MHz
- 频率分辨率：16bit
- 供电电压范围：2.0V~5.5V
- 转换时间：0.5ms~100ms（可配置）
- 平均功耗：7.5μA@1Hz
- 睡眠模式电流：50nA
- 停机模式电流：40nA
- QFN16 封装

3. 应用

- 金属接近检测
- 金属按键触控
- 人体接近检测
- 手势识别
- 位置传感

产品信息

型号	封装	尺寸
MLC12G	QFN16	3.0*3.0*0.75mm

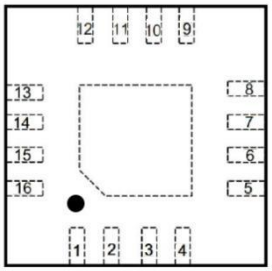
目 录

1. 概述 1
2. 特性 1
3. 应用 1
4. 封装管脚描述 4
5. 电气规格 5
5.1. 绝对最大额定值 5
5.2. ESD 等级 5
5.3. 电气特性 5
5.4. I2C 接口时序 6
6. 详细说明 7
6.1. 概述 7
6.2. 系统框图 7
6.3. 特征描述 8
6.3.1. 时钟系统 8
6.3.2. 通道转换 8
6.3.2.1 转换模式 8
6.3.2.2 数据格式与读取 9
6.3.2.3 转换时间 10
6.3.3. 电感和电容计算 12
6.3.4. 振荡幅度和驱动电流 13
6.3.5. 报警功能和 INTB 14
6.3.6. 参考电压 15
6.3.7. 状态寄存器 15
6.3.8. 温度测量 16
6.4. 功能模式 16
6.4.1. 上电启动 16
6.4.2. 转换模式 16
6.4.3. 睡眠模式 16
6.4.4. 停机模式 16
6.4.5. 常开模式 16
6.4.6. 软件复位 17
6.5. I2C 编程 17
6.5.1. I2C 地址选择 17
6.5.2. I2C 接口数据格式 17
6.6. 寄存器说明 19

6.6.1. 寄存器列表 19
6.6.2. DATA_CH0_MSB、DATA_CH0_LSB 20
6.6.3. DATA_CH1_MSB、DATA_CH1_LSB 20
6.6.4. RCNT_CH0_MSB、RCNT_CH0_LSB 21
6.6.5. RCNT_CH1_MSB、RCNT_CH1_LSB 21
6.6.6. SCNT_CH0 21
6.6.7. SCNT_CH1 22
6.6.8. FIN_DIV_CH0 22
6.6.9. FREF_DIV_CH0 22
6.6.10. FIN_DIV_CH1 23
6.6.11. FREF_DIV_CH1 23
6.6.12. STATUS 23
6.6.13. TH_MSB、TH_LSB 24
6.6.14. TL_MSB、TL_LSB 24
6.6.15. CFG 25
6.6.16. CH_EN 25
6.6.17. RESET 26
6.6.18. DRIVE_I_CH0 26
6.6.19. DRIVE_I_CH1 27
6.6.20. VC_SEL 27
6.6.21. AON_CFG 28
6.6.22. GLITCH_FILTER_EN 28
6.6.23. CHIP_ID_MSB、CHIP_ID_LSB 29
7. 应用与实现 29
7.1 典型应用电路 29
7.2 典型应用举例 31
7.2.1 电感检测 31
7.2.2 电容检测 32
7.3 电感自谐振频率 33
8. 封装 34
9. 订购须知 35
10. 修订历史 36

4. 封装管脚描述

MLC12G（QFN16 封装）



正面透视图

管脚编号	管脚名称	类型	说明
1	SCL	I	I2C 时钟线
2	SDA	I/O	I2C 数据线
3	CLKIN	I	外部计数时钟 (当选择内部计数时钟时需要接 GND)
4	ADDR	I	I2C 地址线
5	INTB	O	中断信号输出，低电平有效
6	SD	I	停机模式使能信号
7	VDD	P	电源
8	GND	G	地
9	IN0A	A	通道 0 输入 A 端
10	IN0B	A	通道 0 输入 B 端
11	IN1A	A	通道 1 输入 A 端
12	IN1B	A	通道 1 输入 B 端
13	VC	A	内部参考电压
14	VT	A	负温度系数电压
15	NC	-	悬空
16	NC	-	悬空

备注 1：I 表示输入，O 表示输出，P 表示电源，G 表示地，A 表示模拟信号。
备注 2：电路设计时，导热焊盘可以悬空或接地。

5. 电气规格

5.1. 绝对最大额定值

项目		最小值	最大值	单位
VDD	电源电压范围	-0.3	6.0	V
Vi	管脚电压	-0.3	VDD	V
T_J	结温	-55	125	℃
T_{stg}	存储温度	-55	125	℃

备注：以上为极限参数，对于器件在超出此极限条件的环境中的功能运行，本规格书并不适用。长期暴露于此极限环境会影响器件的可靠性。

5.2. ESD 等级

项目		数值	单位
V_{ESD} 静电放电	Human-body model（HBM）	±8000	V
	Charged-device model（CDM）	±2000	V

5.3. 电气特性

除非特殊说明，表中数据条件为 T=25℃，VDD=5V。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
功耗						
V_{DD}	电源电压	T = -55℃ to 125℃	2.0		5.5	V
I_{DD}	测量峰值电流(1)		1.3	3.7	8.3	mA
I_{DDCST}	连续转换待机电流(2)			75		uA
I_{DDSL}	睡眠模式电流(3)			0.05		uA
I_{SD}	停机模式电流(3)			0.04		uA
I_{DDAVG}	平均电流	1Hz, I_{DRIVE}=7mA, T_{CV}=1ms		7.5		uA
电感和电容检测						
$L_{SENSORMAX}$	最大被测电感			200		uH
$C_{SENSORMAX}$	最大被测电容			100		nF
$C_{IN0A/IN1A}$	管脚寄生电容			2		pF
ENOB	有效分辨率				15	Bit
T_{CONV}	单通道转换时间		0.5		100	ms
f_{SENSOR}	振荡频率范围	T = -55℃ to 125℃	0.01		100	MHz
$I_{SENSORMAX}$	振荡驱动电流		0.5	3.0	8.0	mA
内部时钟						
f_{INTCLK}	内部时钟频率		2.3	2.4	2.5	MHz
$T_{CF_INT_U}$	内部时钟温漂系数	T = 20℃ to 125℃		-700		ppm/℃
		T = -55℃ to 20℃		800		ppm/℃

外部时钟						
f_{CLKIN}	外部时钟频率	T = -55℃ to 125℃	0.1		50	MHz
$CLKIN_{DUTY}$	外部时钟占空比		40%		60%	
V_{CLKIN_HI}	外部时钟高阈值		0.7*VDD			V
V_{CLKIN_LO}	外部时钟低阈值				0.3*VDD	V

备注 1：测量峰值电流，表示当配置为单次转换和连续转换模式时转换期间的电流。

备注 2：连续转换待机电流，表示当配置为连续转换模式时非转换期间的电流。

备注 3：I2C 读写期间流入 SDA、SCL 管脚的电流不计入。

5.4. I2C 接口时序

表 5.4 I2C 总线时序特性 (1)

参数	符号	标准模式		快速模式		单位
		最小值	最大值	最小值	最大值	
SCL 频率	f_{SCL}	0	400	0	1000	kHz
SCL 低电平时间	t_{LOW}	1300	—	620	—	ns
SCL 高电平时间	t_{HIGH}	600	—	220	—	ns
start(restart)时 SDA 拉低后 SCL 高电平的持续时间	$t_{HD;STA}$	400	—	260	—	ns
从 SCL 拉低开始到 SDA 数据发生变化的时间间隔	$t_{HD;DAT}$	0	0.9	0	—	μs
从 SDA 数据稳定开始到 SCL 拉高的时间间隔	$t_{SU;DAT}$	100	—	150	—	ns
restart 时 SDA 拉低前 SCL 的高电平保持时间	$t_{SU;STA}$	400	—	260	—	ns
stop 时从 SCL 拉高到 SDA 拉高的时间间隔	$t_{SU;STO}$	400	—	260	—	ns
stop 与 start 的间隔时间	t_{BUF}	1300	—	500	—	ns
SCL/SDA 上升沿所需时间	t_{RC}	20+ 0.1Cb(2)	1000	20+ 0.1Cb(2)	120	ns
SCL/SDA 下降沿所需时间	t_{FC}	20+ 0.1Cb(2)	300	20+ 0.1Cb(2)	120	ns

备注 1：所有数值都是以 VIHmin 和 VILmax 为参考。

备注 2：Cb=I2C 总线的总电容。

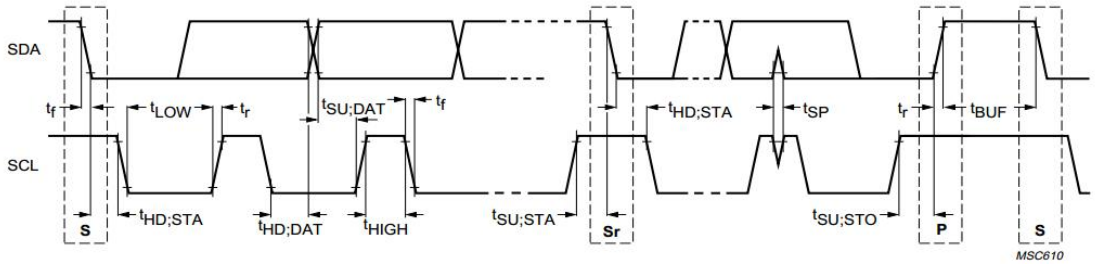


图 5.4 I2C 时序参数

6. 详细说明

6.1. 概述

MLC12G 是高精度、双通道的电感电容传感芯片，采用 LC 谐振的方法，通过测量振荡频率，输出一个正比于频率的数据，通过此数据可以计算出被测电感值或电容值。LC 振荡器的窄带特性，使得芯片具备更低的噪声水平，同时不易受到外界干扰。

6.2. 系统框图

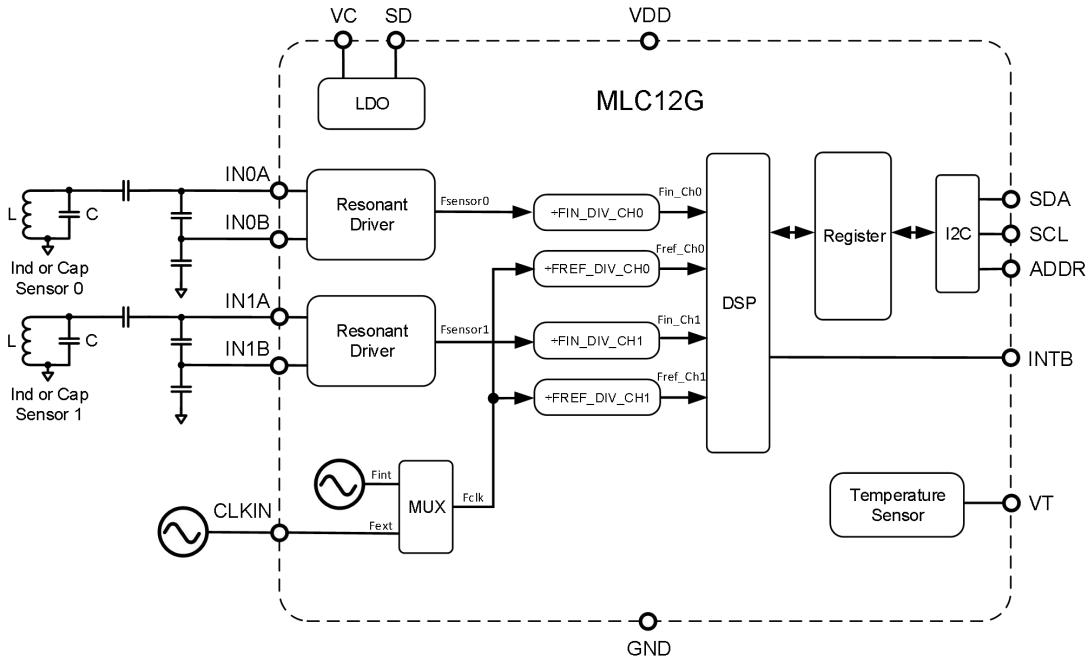


图 6.2-1　MLC12G 系统框图

MLC12G 芯片内部包括电源管理模块、谐振驱动电路（Resonant Driver）、分频器（Divider）、内部时钟（Internal Oscillator）、数字频率计算（DSP）、寄存器（Register）、温度传感（Temperature Sensor）、I2C 接口等功能模块。MLC12G 的谐振驱动电路和外部 LC 构成有源振荡器，将输出信号送至数字逻辑电路，测量并数字化传感器的信号频率（f_{SENSOR}）。数字逻辑使用参考频率（f_{CLK}）来测量传感器的信号频率 f_{SENSOR}。f_{CLK} 来自芯片时钟或者外部时钟。I2C 接口用于芯片与 MCU 进行通讯。通过 MCU 端测量 VT 管脚电压，可以间接测量环境温度，用于温度补偿。通过控制 SD 管脚，可以将芯片停机关断，以降低系统功耗；同时，INTB 管脚可以根据配置，输出报警状态位或者转换完成标志位信号。

6.3. 特征描述

6.3.1. 时钟系统

根据 MLC12G 系统框图，Fclk、Fin 和 Fref 是三个重要的时钟信号。根据寄存器配置，Fclk 可以选择内部时钟或者外部时钟。参考时钟 Fref 由 Fclk 分频后得到。对于高精度应用，建议选择具备高精度和高稳定度的外部时钟，内部时钟更适用于低成本和精度要求适中的应用。选用外部时钟时，其幅值需满足 0V~VDD。被测信号时钟 Fin 由传感器谐振信号 Fsensor 经过分频后得到。为了确保测量结果正确，Fref 和 Fin 的时钟频率需要满足以下条件：

$$f_{INx} < \frac{f_{REFx}}{2.5}$$

在实际应用时，f_{REFx}/f_{Inx} 的比例值越接近 2.5，测量的有效分辨率越大，最高有效位数为 15bit。下表是时钟配置相关寄存器定义。

表 6.3.1　时钟配置寄存器定义

通道	时钟	寄存器及地址	位	说明
0,1	Fclk	CFG, 0x1F	REF_CLK_SEL	b0：选择内部时钟 b1：选择外部时钟
0	Fref0	FREF_DIV_CH0, 0x12	CH0_FREF_DIV[7:0]	b00000000-b11111111： 对应数值 0 到 255 $f_{REF0} = f_{CLK} / (CH0_FREF_DIV+1)$
1	Fref1	FREF_DIV_CH1, 0x14	CH1_FREF_DIV[7:0]	b00000000-b11111111： 对应数值 0 到 255 $f_{REF1} = f_{CLK} / (CH1_FREF_DIV+1)$
0	Fin0	FIN_DIV_CH0, 0x11	CH0_FIN_DIV[3:0]	b0000-b0111：对应数值 0 到 7 b1000-b1111：对应数值 8 $f_{IN0} = f_{SENSOR0} / 2^{CH0_FIN_DIV}$
1	Fin1	FIN_DIV_CH1, 0x13	CH1_FIN_DIV[3:0]	b0000-b0111：对应数值 0 到 7 b1000-b1111：对应数值 8 $f_{IN1} = f_{SENSOR1} / 2^{CH1_FIN_DIV}$

6.3.2. 通道转换

6.3.2.1 转换模式

通过设置通道使能位，可以选择开启单通道或者多通道转换。当选择为多通道转换时，先启动通道 0，后启动通道 1，双通道之间的切换时间≤10us。下表是配置通道相关寄存器定义。

表 6.3.2-1　通道配置寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	CH_EN, 0x20	CH0_EN	b0：关闭通道 0 b1：开启通道 0
1	CH_EN, 0x20	CH1_EN	b0：关闭通道 1 b1：开启通道 1

通过设置 CFG 寄存器，可以配置传感器的工作模式，包括单次转换、连续转换、停止转换，以及连续转换模式的测量时间间隔。下表是工作模式配置相关寄存器定义。

表 6.3.2-2　工作模式配置寄存器定义

模式	寄存器及地址	位	说明
单次/连续	CFG, 0x1F	OS,SD	b00：连续转换模式，时间间隔由 CR[2:0]的数值决定。 当要改变连续转换模式时，必须先停止转换。 b01：停止转换。 b10：同 b00。 b11：单次转换模式。设置标志后，芯片进行一次转换后，自动停止。转换完成，OS,SD 自动变为 b01。
每秒采样次数(MPS)	CFG, 0x1F	CR[2:0]	b000：60s 转换一次 b001：30s 转换一次 b010：10s 转换一次 b011：5s 转换一次 b100：2s 转换一次 b101：1s 转换一次 b110：0.5s 转换一次 b111：0.25s 转换一次

需要注意的是，为了保证转换数据的正确性，修改寄存器配置必须遵循以下两点：

i. 从连续转换模式切换至单次转换模式，必须先发送停止转换，再发送单次转换命令。

ii. 传感器在测量转换过程中，不要修改任何与转换有关的寄存器配置。如果需要修改配置参数，需要先停止转换，确保转换停止后，再修改配置参数，重新启动转换。

6.3.2.2 数据格式与读取

传感器测量每个通道信号分频后的频率与参考时钟分频后的频率之间的比值，表示成 16-bit 的数据格式：

$$DATA_X = \frac{f_{INx}}{f_{REFx}} * 2^{16} = \frac{f_{SENSORx}}{f_{CLK}} * \frac{CHx_FREF_DIV + 1}{2^{CHx_FIN_DIV}} * 2^{16}$$

通道转换的数据结果会存入以下对应的寄存器：

表 6.3.2-3　转换数据寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	DATA_CH0_MSB, 0x00	DATA0[15:8]	通道 0 转换数据高 8 位
	DATA_CH0_LSB, 0x01	DATA0[7:0]	通道 0 转换数据低 8 位
1	DATA_CH1_MSB, 0x02	DATA1[15:8]	通道 1 转换数据高 8 位
	DATA_CH1_LSB, 0x03	DATA1[7:0]	通道 1 转换数据低 8 位

需要注意的是，为了保证转换数据的正确性，I2C 读取 DATAx 的操作必须在传感器的非转换期间进行，具体方式为：

i. 单次转换模式，I2C 读取 DATAx 需要在转换结束之后进行。

ii. 连续转换模式，需要先停止转换，执行 I2C 读取 DATAx，再重新启动连续转换。

6.3.2.3 转换时间

下图是选择单通道和双通道时，在单次转换模式下的时序图。其中，T_{CV} 是总的单通道单次转换时间, T_{SC} 是通道切换时间(<10us), T_{SVT} 是 V_T 电压的建立时间。

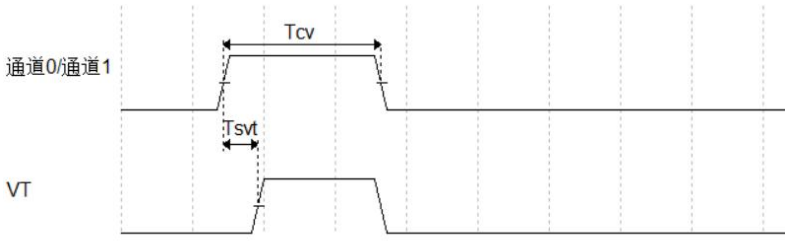


图 6.3.2-1 单通道单次转换模式工作时序图

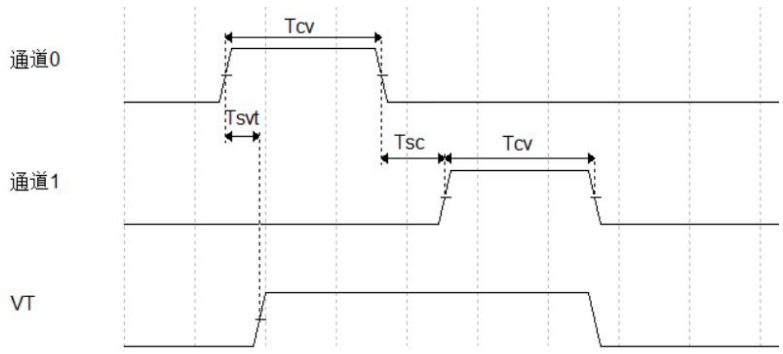


图 6.3.2-2 双通道单次转换模式工作时序图

下图是选择单通道和双通道时，在连续转换模式下的时序图。其中，T_{PER} 是连续转换模式的测量周期，T_{CV} 是总的单通道单次转换时间，T_{SC} 是通道切换时间(<10us), T_{SVT} 是 V_T 电压的建立时间。

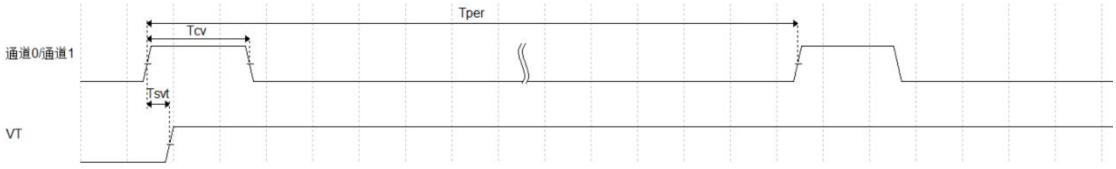


图 6.3.2-3 单通道连续转换模式工作时序图

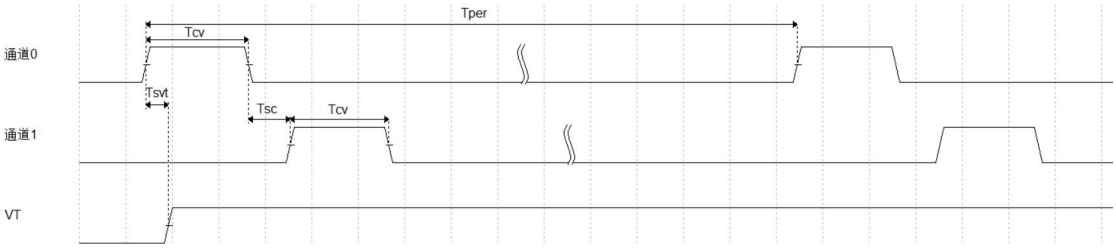


图 6.3.2-4 双通道连续转换模式工作时序图

为了确保连续转换模式能够正常工作，T_{PER} 和 T_{CV} 需要满足如下约束关系：

i. 单通道测量，$T_{PER} > T_{CV}$

ii. 双通道测量，$T_{PER} > 2 * T_{CV} + 10us$

T_{CV} 包括启动时间 T_{START}、建立时间 T_{SET}、计数时间 T_{CNT}、以及延迟时间 T_{DELAY} 四部分：

$$T_{CV} = T_{START} + T_{SET} + T_{CNT} + T_{DELAY}$$

通道的启动时间 T_{START} 表示内部参考电压的稳定时间，长度固定为 200us。

通道的建立时间 T_{SET} 表示振荡信号建立初期的稳定时间，由以下寄存器定义：

表 6.3.2-4 建立时间配置寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	SCNT_CH0, 0x0E	SCNT0[7:0]	通道 0 建立时间
1	SCNT_CH1, 0x0F	SCNT1[7:0]	通道 1 建立时间

备注：若无特殊标注，以下计算公式内变量均采用国际单位。

T_{SET} 的计算公式为：

$$T_{SET} = SCNTx * 16 / f_{REFx}$$

为保证足够的通道信号建立时间，建议配置 $T_{SET} \geqslant 30us$。

通道的计数时间 T_{CNT} 表示 F_{REFx} 对 F_{Inx} 进行脉冲计数的时间，由以下寄存器定义：

表 6.3.2-5 计数时间配置寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	RCNT_CH0_MSB, 0x08	RCNT0[15:8]	通道 0 计数时间高 8 位
	RCNT_CH0_LSB, 0x09	RCNT0[7:0]	通道 0 计数时间低 8 位
1	RCNT_CH1_MSB, 0x0A	RCNT1[15:8]	通道 1 计数时间高 8 位
	RCNT_CH1_LSB, 0x0B	RCNT1[7:0]	通道 1 计数时间低 8 位

T_{CNT} 的计算公式为：

$$T_{CNT} = RCNTx / f_{REFx}$$

RCNTx 的配置决定了传感器的有效分辨率(ENOB)，ENOB>n 意味着至少需要 RCNTx>2^{n+1}。例如，为了达到 14bit 的有效分辨率，需要 RCNTx>2^{15}=32768，对应 RCNTx[15:0]>0x8000。

RCNTx 可配置的最大值为 65535，对应最高 15bit 有效分辨率，和最长的计数时间。

通道的延迟时间 T_{DELAY} 为：

$$T_{DELAY} = 4 / f_{REFx}$$

由此，转换时间 T_{CV} 的计算公式为：

$$T_{CV} = 200us + (SCNTx * 16 + RCNTx + 4) / f_{REFx}$$

为了确保能够检测到正确的 V_T 电压，T_{CV} 和 T_{SVT} 需要满足如下约束关系：

$$T_{CV} > T_{SVT} + T_{ADC}$$

T_{SVT} 和 VT 管脚的对地电容值大小有关，对于 1nF 的电容，T_{SVT}=1ms。外部 ADC 需要在 V_T 电压稳定后对 VT 管脚进行采样，T_{ADC} 是外部 ADC 的测量时间。

6.3.3. 电感和电容计算

MLC12G 需要在片外构建 LC 谐振腔回路，其谐振网络如图所示：

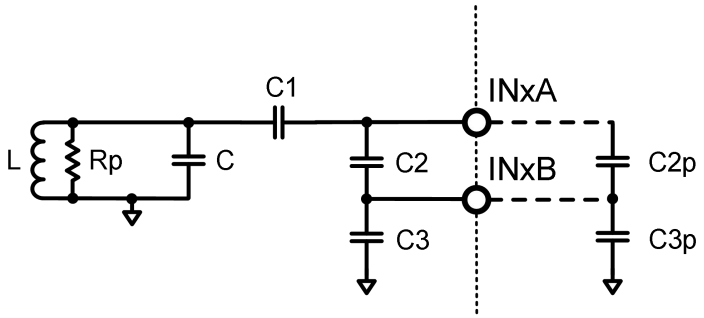


图 6.3.3 LC 谐振网络

其中，Rp 表示电感 L 的等效并联电阻，C1 为谐振点和 INxA 管脚之间的电容、C2 为 INxA 管脚和 INxB 管脚之间的电容、C3 为 INxB 管脚和地之间的电容，$C2_P$ 为芯片内部 INxA 管脚和 INxB 管脚之间的等效电容，$C3_P$ 为芯片内部 INxB 管脚和地之间的等效电容。

LC 谐振频率的计算公式为（若无特殊标注，计算公式内变量均采用国际单位）：

$$f_{SENSOR} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * (C + C_F)}}$$

C_F 表示与 C 并联的对地总电容之和，C_F 可以展开表示为：

$$C_F = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_{2P}} + \frac{1}{C_3 + C_{3P}}}$$

上式中，$C2_P$ 的典型数值为 115pF，$C3_P$ 的典型数值为 155pF。

根据数据 DATAx，可以计算出 $f_{SENSORx}$ 的数值，计算公式如下：

$$f_{SENSORx} = f_{CLK} * \frac{2^{CHx_FIN_DIV}}{CHx_FREF_DIV + 1} * \frac{DATA_X}{2^{16}}$$

当芯片用于电感检测时，被测电感 L 可通过如下计算得到：

$$L = \frac{1}{(C + C_F) * (2\pi \cdot f_{SENSOR})^2}$$

当芯片用于电容检测时，被测电容 C 可通过如下计算得到：

$$C = \frac{1}{L * (2\pi \cdot f_{SENSOR})^2} - C_F$$

6.3.4. 振荡幅度和驱动电流

测量通道的振荡信号幅度，与驱动电流 I_{DRIVE}，由 C2、C3、$C2_P$、$C3_P$ 组成的电容网络，以及电感 L 的等效并联电阻 R_P 有关，检测端的振荡幅度峰峰值可以通过以下方法进行估算：

$$V_{PEAK-TO-PEAK} \propto K * I_{DRIVE} * R_P$$

K 为比例系数，通过以下计算得到：

$$K = \frac{1}{\frac{C_2 + C_{2P}}{C_3 + C_{3P}} + 1}$$

R_P 与电感的串联电阻 R_S，以及在振荡频率下的 Q 值有关：

$$R_P = (1 + Q^2) * R_S$$

为了确保谐振腔能够成功起振，需要满足条件：

$$V_{PEAK-TO-PEAK} > 1.5\ V$$

可见，驱动电流越大，电感等效并联电阻越大，振荡幅度越大。对于 Q 和 R_S 数值较低的电感，需要适当增大驱动电流，保证正常起振。

两个测量通道的驱动电流 I_{DRIVE} 可以配置为不同的数值，由以下寄存器定义。

表 6.3.4　驱动电流配置寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	DRIVE_I_CH0, 0x23	I0[3:0]	设置单通道驱动电流值 b0000-b1111：0.5mA 到 8mA，LSB=0.5mA
1	DRIVE_I_CH1, 0x24	I1[3:0]	

6.3.5. 报警功能和 INTB

MLC12G 具备报警功能，报警门限包括触发门限 TH，和解除门限 TL，由以下寄存器定义。TH 和 TL 均为 16 位，与 DATA_CHx 的位数相同。

表 6.3.5-1　报警门限配置寄存器定义

门限	寄存器及地址	位	说明
报警触发	TH_MSB, 0x19	TH[15:8]	当 DATA_CHx>TH，STATUS 寄存器中的 ALERT_CHx 置位 1
	TH_LSB, 0x1A	TH[7:0]	
报警解除	TL_MSB, 0x1B	TL[15:8]	当 DATA_CHx<TL，STATUS 寄存器中的 ALERT_CHx 置位 0
	TL_LSB, 0x1C	TL[7:0]	

当转换完成，在满足以下条件时，触发报警状态：

$$DATA_CHx > TH$$

报警状态触发以后，状态寄存器中的 ALERT_CHx 置 1，同时 INTB 管脚输出电平由高变低。为了确保报警功能开启，设置 TH 和 TL 门限参数时，需要满足：

$$TH \geq TL$$

当报警状态触发后，为了清除报警状态，有 4 种实现方法：

i. 通过 I2C 读取通道转换数据$DATA_CHx$，此方法仅限单次转换模式和停止模式。

ii. 进行一次通道转换，且满足$DATA_CHx < TL$。

iii. 启动软件复位功能。

iv. 将 SD 管脚拉高。

对于 MLC12G，INTB 管脚可以输出通道 0 或者通道 1 的报警状态位，低电平有效。在报警状态被清除后，INTB 管脚会恢复到高电平。此外，INTB 管脚还可以配置为输出通道 0 或者通道 1 的转换完成标志位。INTB 功能由以下寄存器定义。

表 6.3.5-2　INTB 功能寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0,1	CFG, 0x1F	INTB_EN	b0：INTB 管脚输出不使能。 b1：INTB 管脚输出使能。
0,1	CFG, 0x1F	INTB_MODE	b0：INTB 管脚输出报警状态位，低电平有效。 b1：INTB 管脚输出转换完成标志位，低电平有效。
0,1	CH_EN, 0x20	INTB_CH	b0:INTB 管脚输出通道 0 的报警状态或转换完成标志位。 b1:INTB 管脚输出通道 1 的报警状态或转换完成标志位。

6.3.6. 参考电压

MLC12G 可以适应不同的 VDD 电压。根据不同的 VDD 电压条件，通过配置 VC_SEL 寄存器，改变内部参考电压数值（VC 管脚电压），从而让传感器达到最佳性能。

表 6.3.6　VC_SEL 寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0,1	VC_SEL, 0x30	VC	b00：参考电压 2.5V b01：参考电压 3.0V b10：参考电压 1.8V b11：参考电压 2.0V

实际应用时，推荐按照以下两点进行配置：

i. 当 2.5V<VDD<5.5V 时，配置参考电压为 2.5V（默认值）。

ii. 当 2V<VDD<2.5V 时，配置参考电压为 2.0V。

6.3.7. 状态寄存器

状态寄存器可以反映 MLC12G 的测量数据是否溢出、转换是否完成，以及报警状态。

表 6.3.7　状态寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	STATUS, 0x17	OF_CH0	b0：通道 0 数据未溢出 b1：通道 0 数据溢出
1	STATUS, 0x17	OF_CH1	b0：通道 1 数据未溢出 b1：通道 1 数据溢出
0	STATUS, 0x17	DRDY_CH0	b0：通道 0 转换未完成 b1：通道 0 转换完成
1	STATUS, 0x17	DRDY_CH1	b0：通道 1 转换未完成 b1：通道 1 转换完成
0	STATUS, 0x17	ALERT_CH0	b0：通道 0 未触发报警 b1：通道 0 触发报警

1	STATUS, 0x17	ALERT_CH1	b0：通道 1 未触发报警 b1：通道 1 触发报警

6.3.8. 温度测量

MLC12G 提供一个负温度系数的电压 V_T，输出到 VT 管脚，用于大致评估温度。VT 管脚电压的启动时序见 6.3.2.3 章节。V_T 电压的测量需要使用外部 ADC 进行采样，常规内置于 MCU 的 10-bit 精度 ADC 即可满足需要。按如下公式，通过 MCU 计算，得到温度值 T：

$$T = K \cdot V_T + T_C$$

其中 V_T 是 ADC 测到的电压值，单位为 V；K 是温度系数，默认数值为-507.8℃/V；T_C 是温度修正值，默认数值为 339.8℃。用户也可以选择自己校准 K 和 T_C。

6.4. 功能模式

6.4.1. 上电启动

芯片在上电启动以后，会自动进入连续转换模式。用户可以通过 I2C 发送停止转换指令，让芯片进入睡眠模式，之后再进行包括参数修改、单次转换、连续转换等操作。

6.4.2. 转换模式

芯片的转换模式分为单次转换模式和连续转换模式，通过 CFG 寄存器进行配置，详见 6.3.2 章节。

6.4.3. 睡眠模式

MLC12G 在每次执行完 I2C 指令操作后，将会自动进入睡眠模式（低功耗模式）。当主机发出有效的 I2C 指令时，芯片将会自动唤醒，并执行相应操作。需要注意的是，在连续转换模式下，芯片在每次转换完成后不会进入睡眠模式。

6.4.4. 停机模式

MLC12G 的外部 SD 管脚用于启动硬件停机（Shutdown）。当 SD 管脚拉高后，芯片功能完全关闭，I2C 无法访问。SD 管脚由高变低后，芯片恢复时间<20us。

6.4.5. 常开模式

MLC12G 还提供了常开模式（Always-On）选项，通过 AON_CFG 寄存器进行配置。在此模式下通道 0 或通道 1（2 选 1）的 LC 谐振网络一直处于开启状态，维持振荡信号。INTB 管脚可以同步配置为输出频率为 f_{INx}，幅度为 0~VDD 的方波，便于 MCU 对该信号进行更加灵活的数字处理。

6.4.6. 软件复位

MLC12G 提供软件复位功能（Softreset)。通过向复位寄存器写入 0x7A，软件复位功能启动，传感器恢复到上电初始状态，所有寄存器恢复到默认值，芯片恢复时间<20us。

表 6.4.5 复位寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0,1	RESET, 0x22	RESET[7:0]	b01111010： 启动软件复位，传感器恢复到上电初始状态，全部寄存器恢复到默认值

6.5. I2C 编程

MCU 通过 I2C 接口访问 MLC12G 的控制和数据寄存器。SDA 和 SCL 管脚集成了尖峰抑制电路，可以减小总线噪声的影响。芯片支持最高 1MHz 的 I2C 通信速率。I2C 接口的数据 SDA 和时钟 SCL 分别连接到上位机处理器的对应端口上，并分别通过上拉电阻 R_P 连到 VDD，通过上位机软件来实现各节点芯片的读写控制。根据实际应用，可以通过管脚 ADDR 的值来设定从设备的地址。

6.5.1. I2C 地址选择

MLC12G 可以通过 ADDR 管脚的不同连接方式，实现不同的 I2C 地址，具体对应关系为：

表 6.5-1 MLC12G I2C 地址真值表

ADDR 连接方式	I2C 地址
接 GND	0x68
接 VDD	0x69
接 SDA	0x6A
接 SCL	0x6B

6.5.2. I2C 接口数据格式

典型 I2C 总线操作定义如下：

总线空闲：SDA 和 SCL 都保持高电平。

开始数据传输：当 SCL 为高时，SDA 状态的变化（从高到低）表示开始条件。每个数据传输都以一个开始条件开始。

停止数据传输：当 SCL 为高电平时，SDA 状态的变化（从低电平到高电平）表示停止状态。每个数据传输都以重复的开始或停止条件终止。

数据传输：在开始和停止条件之间传输的数据字节数不受限制，并且是由主设备决定。接收器确认数据传输。

应答：每个接收从设备在被寻址时，必须产生应答信号。从设备应答必须在在确认时钟脉冲的高周期内将 SDA 稳定在低电平。在主设备端，数据传输终止由主设备在收到从设备传输的最后一个字节后不予应答来实现。

I2C 总线通信，主机先发送从机地址和写标志位（Slave Address + W），紧跟寄存器逻辑地址（Register Address）。对于读时序，主机随后再次发送从机地址和读标志位（Slave Address + R），然后从机向主机发送数据（Data from Register），当主机回复 ACK 时，可以连续读取下一个字节数据，当主机回复 NACK 时，从机停止向主机发送数据；对于写时序，主机随后直接向从机发送数据（Data to Register）。需要注意的是，从机地址宽度为 7bit，写标志位 W=0，读标志位 R=1。具体读写时序图如下图所示：

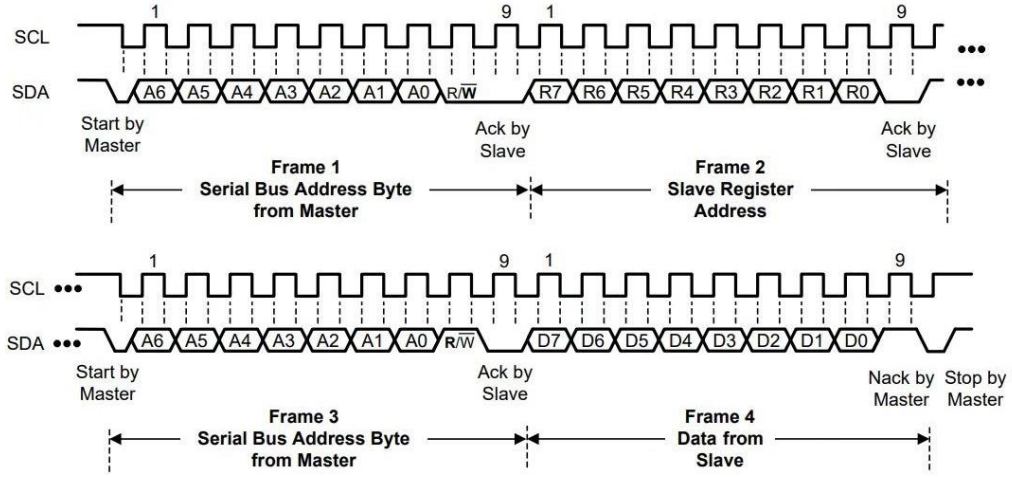


图 6.5.2-1　I2C 单字节读取时序

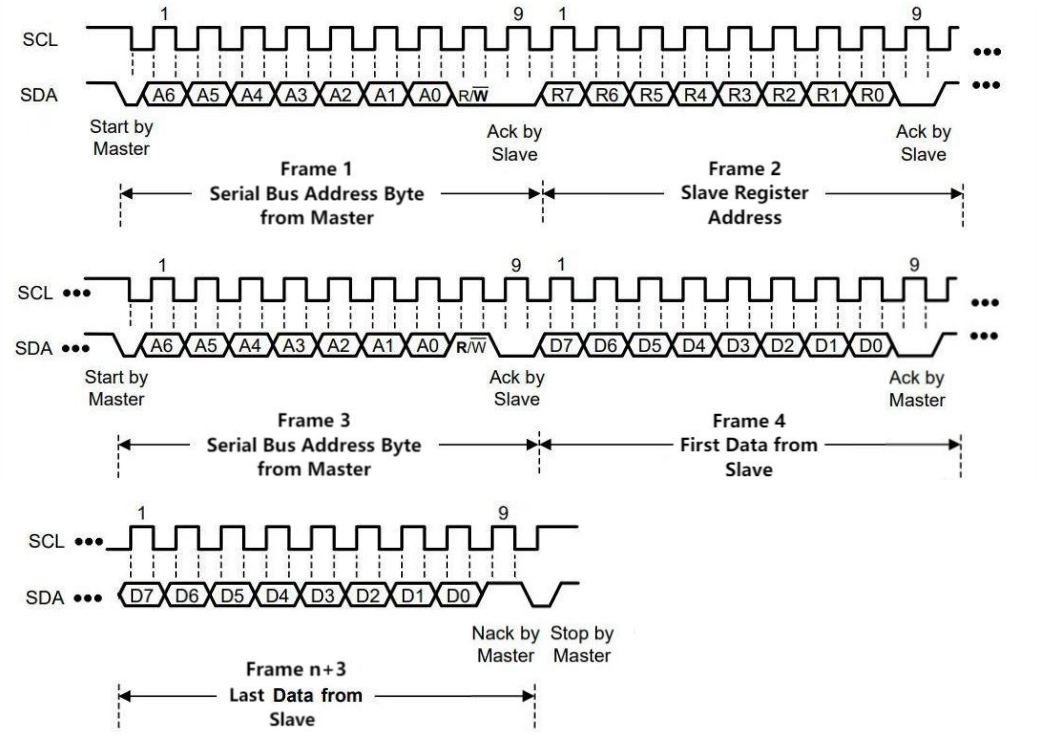


图 6.5.2-2　I2C 连续读取时序

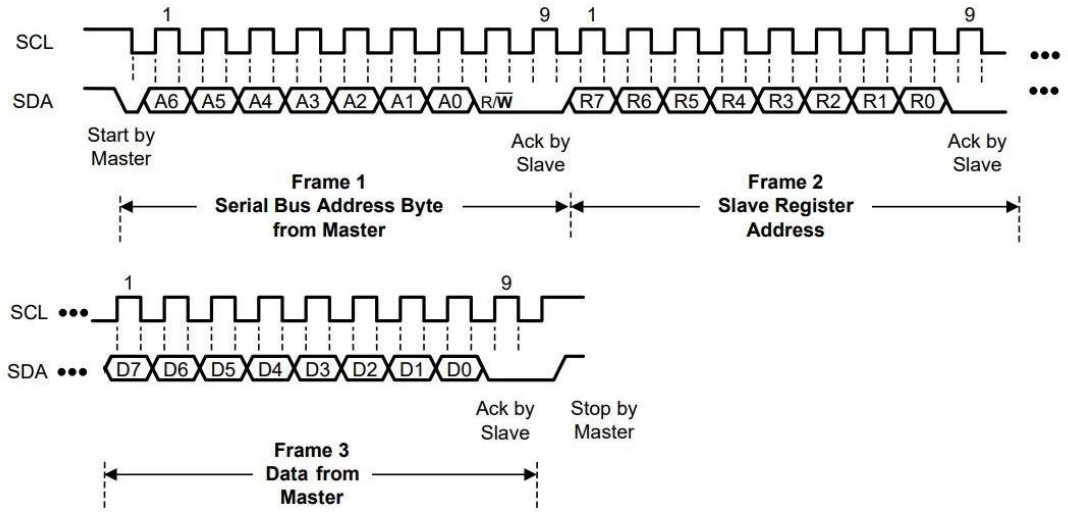


图 6.5.2-3　I2C 写时序

6.6. 寄存器说明

6.6.1. 寄存器列表

MLC12G 的寄存器包括三类，读写、只读、只写。默认值表示传感器上电初始状态下的数值。以下是全部寄存器列表。

表 6.6.1　寄存器列表

地 址	名 称	默认值	说 明
0x00	DATA_CH0_MSB	0x00	通道 0 转换数据，只读
0x01	DATA_CH0_LSB	0x00	
0x02	DATA_CH1_MSB	0x00	通道 1 转换数据，只读
0x03	DATA_CH1_LSB	0x00	
0x08	RCNT_CH0_MSB	0x40	通道 0 计数时间
0x09	RCNT_CH0_LSB	0x00	
0x0A	RCNT_CH1_MSB	0x40	通道 1 计数时间
0x0B	RCNT_CH1_LSB	0x00	
0x0E	SCNT_CH0	0x20	通道 0 建立时间
0x0F	SCNT_CH1	0x20	通道 1 建立时间
0x11	FIN_DIV_CH0	0x70	通道 0 振荡信号分频
0x12	FREF_DIV_CH0	0x00	通道 0 参考时钟分频
0x13	FIN_DIV_CH1	0x70	通道 1 振荡信号分频
0x14	FREF_DIV_CH1	0x00	通道 1 参考时钟分频
0x17	STATUS	0x00	状态位，只读
0x19	TH_MSB	0x20	单通道报警触发门限
0x1A	TH_LSB	0x00	
0x1B	TL_MSB	0x10	单通道报警解除门限
0x1C	TL_LSB	0x00	

0x1F	CFG	0x54	通道转换与 INTB 功能配置
0x20	CH_EN	0xC0	通道选择配置
0x22	RESET	0x00	复位功能，只写
0x23	DRIVE_I_CH0	0x50	通道 0 驱动电流
0x24	DRIVE_I_CH1	0x50	通道 1 驱动电流
0x30	VC_SEL	0x00	VC 电压配置
0x32	AON_CFG	0x00	常开模式与信号输出配置
0x33	GLITCH_FILTER_EN	0x01	抗尖峰滤波器
0x7E	CHIP_ID_MSB	0x01	芯片 ID，只读
0x7F	CHIP_ID_LSB	0x20	

6.6.2. DATA_CH0_MSB、DATA_CH0_LSB

地址 0x0，DATA_CH0_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA0							

地址 0x1，DATA_CH0_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA0							

DATA_CH0_MSB & DATA_CH0_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	DATA0[15:8]	只读	0000 0000	构成 16bit 数据，表示通道 0 的转换数据。
7:0	DATA0[7:0]	只读	0000 0000	

6.6.3. DATA_CH1_MSB、DATA_CH1_LSB

地址 0x2，DATA_CH1_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA1							

地址 0x3，DATA_CH1_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA1							

DATA_CH1_MSB & DATA_CH1_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	DATA1[15:8]	只读	0000 0000	构成 16bit 数据，表示通道 1 的转换数据。
7:0	DATA1[7:0]	只读	0000 0000	

6.6.4. RCNT_CH0_MSB、RCNT_CH0_LSB

地址 0x8，RCNT_CH0_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT0							

地址 0x9，RCNT_CH0_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT0							

RCNT_CH0_MSB & RCNT_CH0_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	RCNT0[15:8]	读写	0100 0000	构成 16bit 数据，用于设置通道 0 的计数时长。
7:0	RCNT0[7:0]	读写	0000 0000	

6.6.5. RCNT_CH1_MSB、RCNT_CH1_LSB

地址 0xA，RCNT_CH1_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT1							

地址 0xB，RCNT_CH1_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT1							

RCNT_CH1_MSB & RCNT_CH1_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	RCNT1[15:8]	读写	0100 0000	构成 16bit 数据，用于设置通道 1 的计数时长。
7:0	RCNT1[7:0]	读写	0000 0000	

6.6.6. SCNT_CH0

地址 0xE，SCNT_CH0

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
SCNT0							

SCNT_CH0 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	SCNT0[7:0]	读写	0010 0000	设置通道 0 的建立时间。

6.6.7. SCNT_CH1

地址 0xF，SCNT_CH1

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
SCNT1							

SCNT_CH1 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	SCNT1[7:0]	读写	0010 0000	设置通道 1 的建立时间。

6.6.8. FIN_DIV_CH0

地址 0x11，FIN_DIV_CH0

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH0_FIN_DIV				RSV			

FIN_DIV_CH0 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:4	CH0_FIN_DIV [3:0]	读写	0111	设置通道 0 的振荡信号分频比 0000：不分频，对应数值 0 0001：2 分频，对应数值 1 0010：4 分频，对应数值 2 0011：8 分频，对应数值 3 0100：16 分频，对应数值 4 0101：32 分频，对应数值 5 0110：64 分频，对应数值 6 0111：128 分频，对应数值 7 1xxx：256 分频，对应数值 8 $f_{IN0} = f_{SENSOR0} / 2^{CH0_FIN_DIV}$
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.9. FREF_DIV_CH0

地址 0x12，FREF_DIV_CH0

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH0_FREF_DIV							

FREF_DIV_CH0 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	CH0_FREF_DIV [7:0]	读写	0000 0000	设置通道 0 的参考时钟分频比 00000000 - 11111111：对应数值 0 到 255 $f_{REF0} = f_{CLK} / (CH0_FREF_DIV + 1)$

6.6.10. FIN_DIV_CH1

地址 0x13，FIN_DIV_CH1

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH1_FIN_DIV				RSV			

FIN_DIV_CH1 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:4	CH1_FIN_DIV [3:0]	读写	0111	设置通道 1 输出的分频值 0000：不分频，对应数值 0 0001：2 分频，对应数值 1 0010：4 分频，对应数值 2 0011：8 分频，对应数值 3 0100：16 分频，对应数值 4 0101：32 分频，对应数值 5 0110：64 分频，对应数值 6 0111：128 分频，对应数值 7 1xxx：256 分频，对应数值 8 $f_{IN1} = f_{SENSOR1} / 2^{CH1_FIN_DIV}$
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.11. FREF_DIV_CH1

地址 0x14，FREF_DIV_CH1

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH1_FREF_DIV							

FREF_DIV_CH1 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	CH1_FREF_DIV [7:0]	读写	0000 0000	设置通道 1 的参考时钟分频比 00000000 - 11111111：对应数值 0 到 255 $f_{REF1} = f_{CLK} / (CH1_FREF_DIV + 1)$

6.6.12. STATUS

地址 0x17，STATUS

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
OF_CH1	OF_CH0	DRDY_CH1	DRDY_CH0	RSV		ALERT_CH1	ALERT_CH0

STATUS 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7	OF_CH1	读	0	DATA_CH1 溢出标志位，读数据清除

6	OF_CH0	读	0	DATA_CH0 溢出标志位，读数据清除
5	DRDY_CH1	读	0	通道 1 转换完成，读数据清除
4	DRDY_CH0	读	0	通道 0 转换完成，读数据清除
3:2	RSV	读	00	保留位
1	ALERT_CH1	读	0	通道 1 报警触发状态位，读数据清除
0	ALERT_CH0	读	0	通道 0 报警触发状态位，读数据清除

6.6.13. TH_MSB、 TH_LSB

地址 0x19，TH_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TH							

地址 0x1A，TH_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TH							

TH_MSB & TH_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	TH[15:8]	读写	0010 0000	构成 16bit 数据，设置单通道报警触发门限 在通道转换完成后，当 DATA_CHx>TH，报警状态位 ALERT_CHx 置 1
7:0	TH[7:0]	读写	0000 0000	

6.6.14. TL_MSB、 TL_LSB

地址 0x1B，TL_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TL							

地址 0x1C，TL_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TL							

TL_MSB & TL_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	TL[15:8]	读写	0001 0000	构成 16bit 数据，设置单通道报警解除门限 在通道转换完成后，当 DATA_CHx<TL，报警状态位 ALERT_CHx 置 0
7:0	TL[7:0]	读写	0000 0000	

6.6.15. CFG

地址 0x1F，CFG

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
REF_CLK_SEL	INTB_EN	INTB_MODE	CR			OS	SD

CFG 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7	REF_CLK_SEL	读写	0	参考时钟选择 0：选择内部时钟 1：选择外部时钟
6	INTB_EN	读写	1	INTB 输出使能 0：INTB 不输出标志位 1：INTB 输出报警标志位或者转换完成标志位
5	INTB_MODE	读写	0	INTB 输出源选择 0：INTB 输出报警标志位 1：INTB 输出转换完成标志位
4:2	CR[2:0]	读写	101	连续转换模式的时间间隔 000：60s 转换一次 001：30s 转换一次 010：10s 转换一次 011：5s 转换一次 100：2s 转换一次 101：1s 转换一次 110：0.5s 转换一次 111：0.25s 转换一次
1:0	OS,SD	读写	00	设置通道转换模式 00：连续转换 01：停止转换 10：连续转换（回读时为 00） 11：单次转换

6.6.16. CH_EN

地址 0x20，CH_EN

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH1_EN	CH0_EN	RSV					INTB_CH

CH_EN 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7	CH1_EN	读写	1	通道 1 使能位控制 0：通道 1 关闭

				1：通道 1 开启
6	CH0_EN	读写	1	通道 0 使能位控制 0：通道 0 关闭 1：通道 0 开启
5:1	RSV	读写	00000	保留位，只能写 0
0	INTB_CH	读写	0	INTB 端口输出选择 0：输出通道 0 的状态信息 1：输出通道 1 的状态信息

6.6.17. RESET

地址 0x22，RESET

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RESET							

RESET 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	RESET[7:0]	读写	0000 0000	0111 1010：启动软件复位，芯片恢复到上电初始状态，全部寄存器恢复为默认值。 其他值：无效 （回读时为 0000 0000）

6.6.18. DRIVE_I_CH0

地址 0x23，DRIVE_I_CH0

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
I0				RSV			

DRIVE_I_CH0 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:4	I0[3:0]	读写	0101	设置通道 0 的驱动电流 0000：0.5mA 0001：1.0mA 0010：1.5mA 0011：2.0mA 0100：2.5mA 0101：3.0mA 0110：3.5mA 0111：4.0mA 1000：4.5mA 1001：5.0mA 1010：5.5mA

				1011：6.0mA 1100：6.5mA 1101：7.0mA 1110：7.5mA 1111：8.0mA
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.19. DRIVE_I_CH1

地址 0x24，DRIVE_I_CH1

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
I1				RSV			

DRIVE_I_CH1 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:4	I1[3:0]	读写	0101	设置通道 1 的驱动电流 0000：0.5mA 0001：1.0mA 0010：1.5mA 0011：2.0mA 0100：2.5mA 0101：3.0mA 0110：3.5mA 0111：4.0mA 1000：4.5mA 1001：5.0mA 1010：5.5mA 1011：6.0mA 1100：6.5mA 1101：7.0mA 1110：7.5mA 1111：8.0mA
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.20. VC_SEL

地址 0x30，VC_SEL

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RSV				VC		RSV	

VC_SEL 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:4	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0
3:2	VC[1:0]	读写	00	设置参考电压 00：2.5V 01：3.0V 10：1.8V 11：2.0V
1:0	RSV	读写	00	保留位，只能写 0

6.6.21. AON_CFG

地址 0x32，AON_CFG

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
AON_EN	AON_CH_SEL		INTB_FIN	RSV			

AON_CFG 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7	AON_EN	读写	0	通道常开模式(Always-On)使能： 0：关闭 1：开启
6:5	AON_CH[1:0]	读写	00	常开模式通道选择： 00：通道 0 01：通道 1 1x：禁用
4	INTB_FIN	读写	0	INTB 管脚输出频率为 f_{INx} 的方波： 0：关闭 1：开启，此时 INTB 管脚不再对应报警状态或转换完成标志位
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.22. GLITCH_FILTER_EN

地址 0x33，GLITCH_FILTER_EN

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RSV							FILTER_EN

GLITCH_FILTER_EN 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:1	RSV	读写	0000 000	保留位，只能写 0
0	FILTER_EN	读写	1	抗尖峰滤波器使能 0：关闭抗尖峰滤波器 1：开启抗尖峰滤波器

6.6.23. CHIP_ID_MSB、 CHIP_ID_LSB

地址 0x7E，CHIP_ID_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CHIP_ID							

地址 0x7F，CHIP_ID_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CHIP_ID							

CHIP_ID_MSB & CHIP_ID_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说　明
7:0	CHIP_ID[15:8]	只读	0000 0001	器件 ID 识别号 0x0120
7:0	CHIP_ID[7:0]	只读	0010 0000	

7. 应用与实现

7.1 典型应用电路

MLC12G 用于电感测量，常见应用为金属接近检测，电感线圈(PCB)和外部电容器件的接法如图 7.1-1 所示，其中电容 C、C1、C2、C3 一起组成电容网络，与等效被测电感 L 构成谐振腔回路。随着金属逐渐接近电感线圈，基于电涡流效应，线圈的等效电感值减小，振荡频率升高，DATA 值增大。通过 DATA 值的改变，可测算出金属与线圈之间的距离。

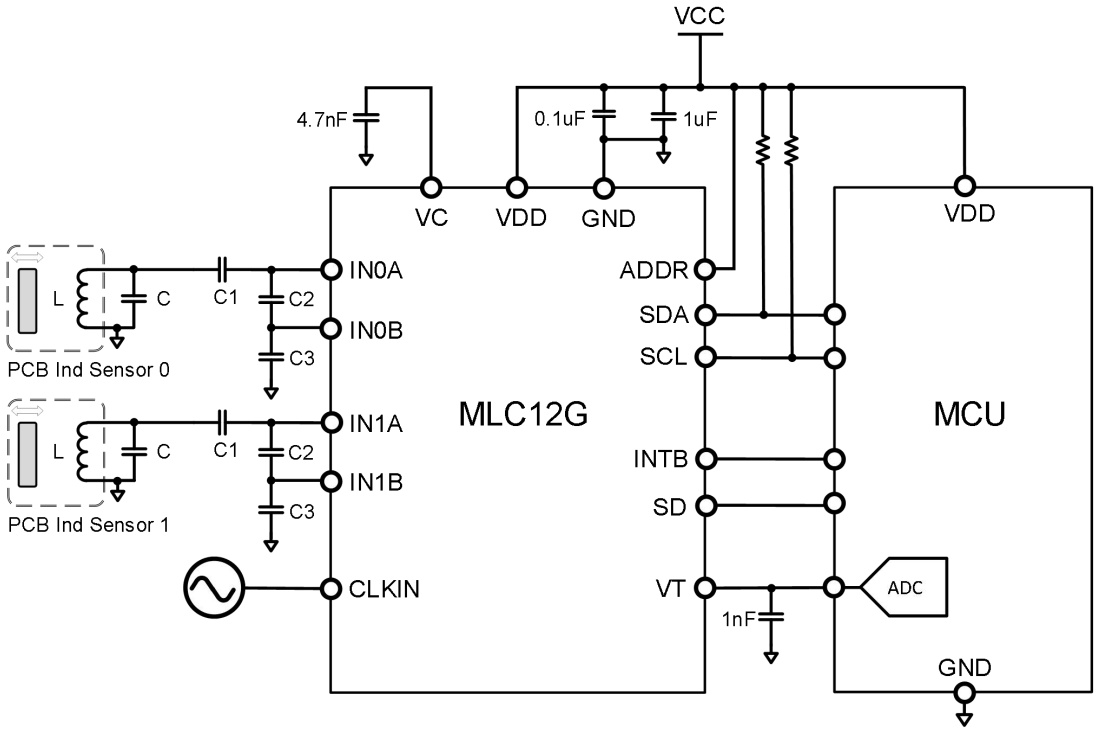


图 7.1-1　MLC12G 典型应用电路图：电感型金属接近检测

MLC12G 用于电容测量，常见应用为人体接近检测，被测电极和外部器件的接法如图 7.1-2 所示，其中等效被测电容 C 和电容 C1、C2、C3 一起组成电容网络，与电感 L 构成谐振腔回路。随着人手逐渐接近被测线圈，电极端的等效对地电容值增大，振荡频率降低，DATA 值减小。通过 DATA 值的改变，可测算出人手与电极之间的距离。

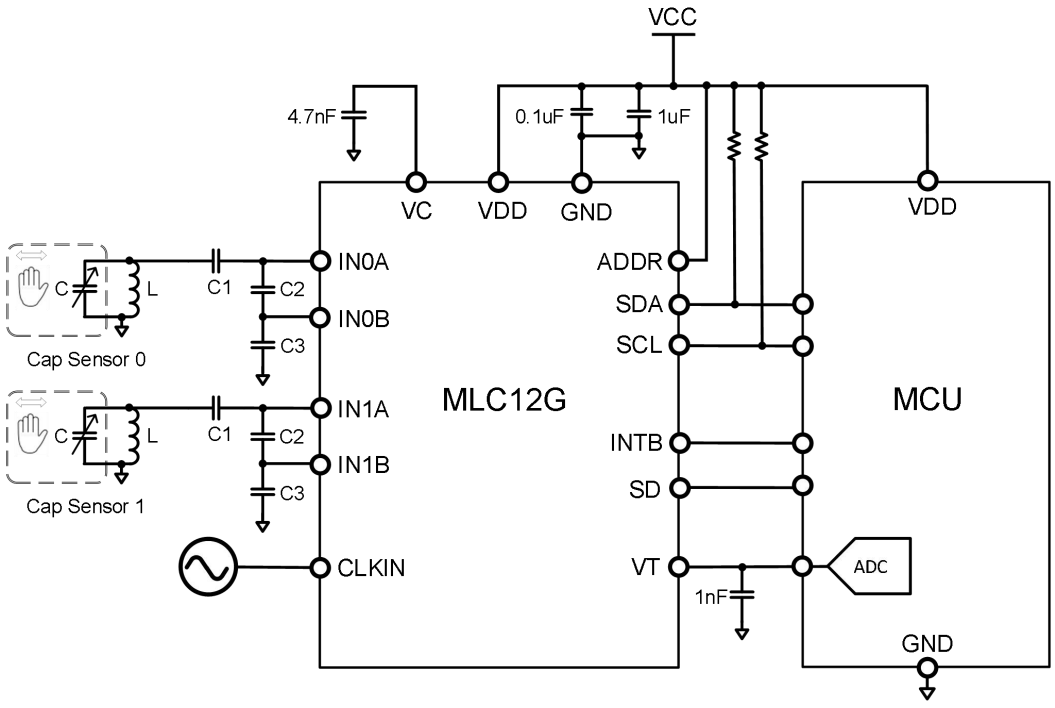


图 7.1-2　MLC12G 典型应用电路图：电容型人体接近检测

在转换完成后，MCU 读取芯片的数据 DATA_CHx，并根据 6.3.3 章节的公式，计算出 L 或 C 的数值。VT 信号与温度成反比，参照 6.3.8 章节的公式，可以用 MCU 采样计算出温度值。此外，为了确保 MLC12G 可以在非转换期间进入低功耗状态，需要满足条件：当选择使用内部时钟，将 CLKIN 管脚置为低电平；当选择使用外部时钟，在非转换期间，将 CLKIN 管脚置为低电平。

MLC12G 还可以作为检测开关使用。上电后，传感器会自动进入连续转换模式，1 秒钟测量 1 次。当 DATA_CH0>TH（地址 0x2000）时，INTB 管脚会置为低电平，输出报警标志位。当 DATA_CH0<TL（地址 0x1000）时，INTB 管脚会置为高电平，解除报警标志位。

7.2典型应用举例

7.2.1 电感检测

金属接近检测，等效电感值不超过 10uH，单通道转换时间 T_{CV}=1ms，电感采用 PCB 线圈，选取 C=22pF，C1=1nF，C2=1nF，C3=1nF，芯片内部 $C2_P$=115pF，$C3_P$=155pF，由此计算出与 C 并联的对地总电容之和 C_F 为：

$$C_F = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_{2P}} + \frac{1}{C_3 + C_{3P}}} = 362.0\ pF$$

当电感线圈远离金属，此时 L 对应最大值 L_{MAX}，表征线圈的自身固有电感值。假设 L_{MAX}=10uH，通过 LC 谐振频率公式计算得到最小振荡频率：

$$f_{SENSOR,MIN} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L_{MAX} * (C + C_F)}} = 2.645\ MHz$$

当金属接近电感线圈时，由于电涡流效应，振荡频率会升高。当金属距离线圈最近时，会出现最大振荡频率 $f_{SENSOR,MAX}$，此数值与线圈的形状、外径、匝数、金属类型、金属大小等因素有关，需要具体测试进行确定。选择芯片外部 16MHz 时钟进行计数，各相关寄存器配置流程如下：

i. 配置通道 0 转换，将 CH_EN 寄存器配置为 0x40。

ii. 配置为外部时钟进行计数，将 CFG 寄存器的 bit7 配置为 1。

iii. 为了保证测量的准确性，f_{REF} 需要满足条件：

$$f_{REF0} = f_{CLK} / (CH0_FREF_DIV+1) > 2.5 * f_{SENSOR,MAX} / 2^{CH0_FIN_DIV}$$

f_{CLK}=16MHz，选取 CH0_FREF_DIV=0，CH0_FIN_DIV=0，假设最大振荡频率时可以满足上述条件。将 FREF_CH0_DIV 寄存器配置为 0x00，将 FIN_CH0_DIV 寄存器配置为 0x00。

iv. 为保证振荡器能够在测量端等效电感值最小时起振，同时控制振荡幅度，驱动电流可以配置为 3mA，将 DRIVE_I_CH0 寄存器配置为 0x50。若此时仍然无法起振，可继续增大驱

动电流值，直到起振为止。

v. 为保证足够的建立时间，将 SCNT_CH0 寄存器配置为 0x1F，这样实际的 T_{SET0}=31us。

vi. 计算计数时间 T_{CNT}：

$$T_{CNT0} = T_{CV0} - T_{START} - T_{SET0} - T_{DELAY} = 1000 - 200 - 31 - 0.25\ (us) = 769\ (us)$$

$$T_{CNT0} = RCNT0 / f_{REF0}$$

根据前面步骤的配置，f_{REF0}=16MHz。因此，RCNT0=12304，有效分辨率>12bit。将 RCNT_CH0_MSB 寄存器配置为 0x30，将 RCNT_CH0_LSB 寄存器配置为 0x10。

vii. 如果想使用 INTB 管脚输出的中断信号，需要将 CFG 寄存器的 bit6 配置为 1，bit0 配置为 0，这样 INTB 能够输出转换数据的比较结果，比较阈值分别存放于 TH_MSB/TH_LSB 寄存器和 TL_MSB/TL_LSB 寄存器。

7.2.2 电容检测

人体接近检测，等效电容值不超过 100pF，单通道转换时间 T_{CV}=10ms，L=150nH (绕线电感)，C1=150pF，不焊接 C2 和 C3，芯片内部 $C2_P$=115pF，$C3_P$=155pF，由此计算出与 C 并联的对地总电容之和 C_F 为：

$$C_F = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 + C_{2P}} + \frac{1}{C_3 + C_{3P}}} = 46\ pF$$

当被测电极空载，此时 C 对应最小值 C_{MIN}，表征电极自身的寄生电容。假设 C_{MIN}=1pF，通过 LC 谐振频率公式计算得到最大振荡频率：

$$f_{SENSOR,MAX} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * (C_{MIN} + C_F)}} = 60.0\ MHz$$

当人体接近电极时，由于等效对地电容增大，振荡频率会降低。选择芯片内部 2.4MHz 时钟进行计数，各相关寄存器配置流程如下：

i. 配置通道 0 转换，将 CH_EN 寄存器配置为 0x40。

ii. 配置为内部时钟进行计数，将 CFG 寄存器的 bit7 配置为 0。

iii. 为了保证测量的准确性，f_{REF} 需要满足条件：

$$f_{REF0} = f_{CLK} / (CH0_FREF_DIV+1) > 2.5 * f_{SENSOR,MAX} / 2^{CH0_FIN_DIV}$$

f_{CLK}=2.4MHz，选取 CH0_FREF_DIV=0，CH0_FIN_DIV=7，可以满足上述条件。将 FREF_CH0_DIV 寄存器配置为 0x00，将 FIN_CH0_DIV 寄存器配置为 0x70。

iv. 为保证振荡器能够在测量端等效电容值最大时起振，同时控制振荡幅度，驱动电流可以配置为 3mA，将 DRIVE_I_CH0 寄存器配置为 0x50。若此时仍然无法起振，可继续增大驱动电流值，直到起振为止。

v. 为保证足够的建立时间，将 SCNT_CH0 寄存器配置为 0x05，这样实际的 T_{SET0}=33.3us。

vi. 计算计数时间 T_{CNT}：

$$T_{CNT0} = T_{CV0} - T_{START} - T_{SET0} - T_{DELAY} = 10000 - 200 - 33.3 - 1.7\ (us) = 9.765\ (ms)$$

$$T_{CNT0} = RCNT0 / f_{REF0}$$

根据前面步骤的配置，f_{REF0}=2.4MHz。因此，RCNT0=23436，有效分辨率>13bit。将 RCNT_CH0_MSB 寄存器配置为 0x5B，将 RCNT_CH0_LSB 寄存器配置为 0x8C。

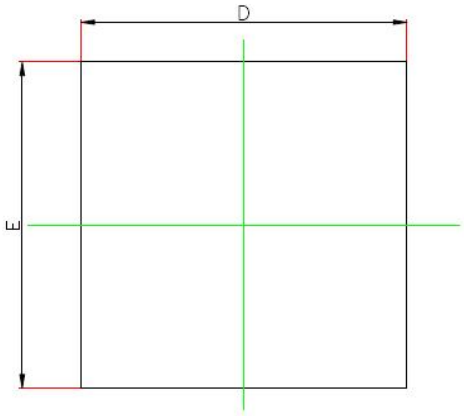
vii. 如果想使用 INTB 管脚输出的中断信号，需要将 CFG 寄存器的 bit6 配置为 1，bit0 配置为 0，这样 INTB 能够输出转换数据的比较结果，比较阈值分别存放于 TH_MSB/TH_LSB 寄存器和 TL_MSB/TL_LSB 寄存器。

7.3 电感自谐振频率

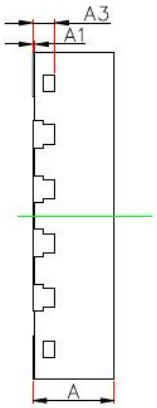
电感自身有寄生电容，对应特定的自谐振频率参数 f_{SR}。为了避免进入自谐振状态，建议在实际应用时，振荡信号频率 $f_{SENSOR} < 0.8*f_{SR}$。

8. 封装

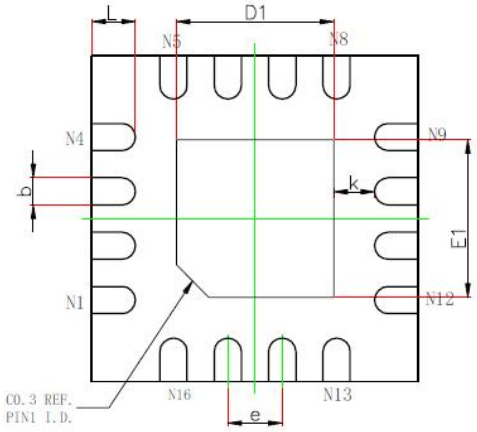
MLC12G QFN16 3.0*3.0*0.75mm 产品尺寸规格图如下。



TOP VIEW
[顶视图]



SIDE VIEW
[侧视图]



BOTTOM VIEW
[背视图]

Symbol	Dimensions In Millimeters		Dimensions In Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	0.700	0.800	0.028	0.031
A1	0.000	0.050	0.000	0.002
A3	0.203REF.		0.008REF.	
D	2.900	3.100	0.114	0.122
E	2.900	3.100	0.114	0.122
D1	1.350	1.550	0.053	0.061
E1	1.350	1.550	0.053	0.061
k	0.375REF.		0.015REF.	
b	0.200	0.300	0.008	0.012
e	0.500BSC.		0.020BSC.	
L	0.300	0.500	0.012	0.020

9. 订购须知

型号	封装	最小包装
MLC12G	QFN16	5K/盘

10. 修订历史

日期	版本	说明
20250723	V1.1	6.3.3 章节 修正 C_F 公式
20260304	V1.2	2 章节和 5.3 章节 修正电感测量范围最大值； 6.6.9 章节和 6.6.11 章节 修正 FREF_DIV 寄存器数值说明； 7.2.1 章节 修正 SCNT 和 RCNT 寄存器配置参数。
20261112	V1.3	2 章节和 5.3 章节 单通道转换时间最小值修正为 0.5ms； 5.3 章节 修改平均电流测试条件； 6.3.2.3 章节 通道信号建立时间建议最小值修正为 30us； 6.3.4 章节 修正振荡幅度峰峰值表达式和最小值要求； 6.4 章节 增加常开模式； 6.6 章节 增加 AON_CFG (0x32)寄存器定义与配置说明； 6.6.10 章节 修正 FIN_DIV_CH1 寄存器表达式说明； 6.6.23 章节 修正寄存器名称为 CHIP_ID； 7.2.1 章节 修正信号建立时间和有效分辨率数值； 7.2.2 章节 修正电容、振荡频率、信号建立时间和有效分辨率数值。
20261119	V1.4	5.2 章节 CDM 数值修订为±2000V

备注：本表仅添加指标性变更。

** 敏源传感保留以下权利，恕不另行通知：

(i) 更改本手册中的产品规格等信息；

(ii) 提高该产品的可靠性、功能和设计。