MC11S MC11T MC11L
大量程、双通道、差分式数字电容传感芯片

1. 概述

MC11 系列是高集成度双通道电容型传感芯片，芯片直接与被测物附近的差分电容极板相连，通过谐振激励并解算测量微小电容的变化。激励频率在 0.1~20MHz 范围内可配置，其频率测量输出为 16bit数字信号，对应的电容感知最高分辨率为 1fF。芯片采用全数字化设计，功能配置及数据读写支持最高 1MHz 的 I2C 通信速率。此外，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。

电容式传感通过和检测电极的配合实现对不同物质的介电检测，是一种低功耗、低成本且分辨率高的非接触式检测技术。相比于传统 RC 振荡类触控电容结构，MC11 系列工作稳定、电路简单，仅需一个参考电容，可配置的工作频率，适用于多种应用场景。芯片的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，MC11 系列具有低成本的外围电路、更宽的电容激励频率，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，独立的双通道测量电路可以相互补偿参考，也可配置自动报警逻辑。小尺寸、低成本的芯片可广泛用于液位测量、触控、水浸传感等检测场景。

2. 特性

- 电容测量范围：1~1000pF
- 温度范围：-55℃~+125℃
- 频率范围：0.1MHz~20MHz
- 频率分辨率：最高 15bit
- 供电电压范围：2.0V~5.5V
- 转换时间：1~100ms（可配置）
- 测量峰值电流：0.8mA（可配置）
- 睡眠模式电流：50nA
- 停机模式电流：40nA
- 平均功耗：2.6μA@1Hz
- QFN16/TSSOP16/SOP8 封装可选

3. 应用

- 智能家电液位
- 水箱液位
- 水浸传感
- 触控传感

产品信息

型号	封装	尺寸
MC11S	QFN16	3.0*3.0*0.75mm
MC11T	TSSOP16	5.0*4.4*1.2mm
MC11L	SOP8	4.9*3.9*1.6mm

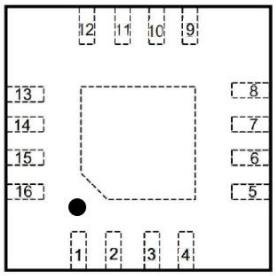
目 录

1. 概述 1
2. 特性 1
3. 应用 1
4. 封装管脚描述 4
4.1. MC11S 封装管脚图（QFN16） 4
4.2. MC11T 封装管脚图（TSSOP16） 5
4.3. MC11L 封装管脚图（SOP8） 6
5. 电气规格 6
5.1. 绝对最大额定值 6
5.2. ESD 等级 6
5.3. 电气特性 7
5.4. I2C 接口时序 7
6. 详细说明 8
6.1. 概述 8
6.2. 系统框图 8
6.3. 特征描述 9
6.3.1. 时钟系统 9
6.3.2. 通道转换 10
6.3.2.1 转换模式 10
6.3.2.2 数据格式与读取 11
6.3.2.3 转换时间 11
6.3.2.4 时钟配置 13
6.3.3. 电容计算 15
6.3.4. 频率计算 15
6.3.5. 驱动电流 16
6.3.6. 报警功能和 INTB 16
6.3.7. 低电压供电 17
6.3.8. 状态寄存器 17
6.3.9. 温度测量 18
6.4. 功能模式 18
6.4.1. 上电启动 18

6.4.2. 转换模式 18
6.4.3. 睡眠模式 18
6.4.4. 停机模式 18
6.4.5. 软件复位 19
6.5. I2C 编程 19
6.5.1. I2C 地址选择 19
6.5.2. I2C 接口数据格式 19
6.6. 寄存器说明 21
6.6.1. 寄存器列表 21
6.6.2. DATA_CH0_MSB、DATA_CH0_LSB 22
6.6.3. DATA_CH1_MSB、DATA_CH1_LSB 22
6.6.4. RCNT_MSB、RCNT_LSB 23
6.6.5. SCNT 23
6.6.6. FIN_DIV 23
6.6.7. FREF_DIV 24
6.6.8. STATUS 24
6.6.9. TRH 25
6.6.10. TRL 25
6.6.11. CFG 25
6.6.12. CH_EN 26
6.6.13. RESET 26
6.6.14. DRIVE_I 27
6.6.15. GLITCH_FILTER_EN 27
6.6.16. DEVICE_ID_MSB、DEVICE_ID_LSB 27
7. 典型应用电路图与注意事项 28
8. 封装 30
8.1. MC11S QFN16 3.0*3.0*0.75mm 产品尺寸规格图 30
8.2. MC11T TSSOP16 5.0*4.4*1.2mm 产品尺寸规格图 31
8.3. MC11L SOP8 4.9*3.9*1.6mm 产品尺寸规格图 32
9. 订购须知 33
10. 修订历史 34

4. 封装管脚描述

4.1. MC11S 封装管脚图（QFN16）

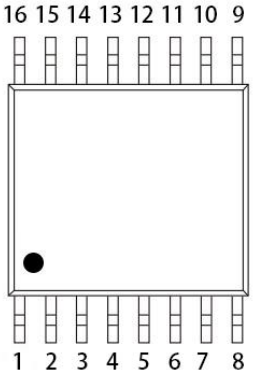


正面透视图

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，不使用需接地
7	VDD	P	电源
8	GND	G	地
9	NC	-	悬空
10	NC	-	悬空
11	NC	-	悬空
12	VT	A	负温度系数电压
13	C1N	A	通道 1 电容输入端
14	C1P	A	通道 1 电容输入端
15	C0P	A	通道 0 电容输入端
16	C0N	A	通道 0 电容输入端

备注：I 表示输入，O 表示输出，P 表示电源，G 表示地，A 表示模拟。

4.2. MC11T 封装管脚图（TSSOP16）

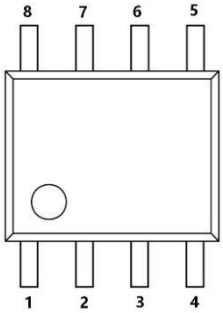


正视图

管脚编号	管脚名称	类型	说明
1	CLKIN	I	外部计数时钟 (当选择内部计数时钟时需要接 GND)
2	ADDR	I	I2C 地址线
3	INTB	O	中断信号输出，低电平有效
4	SD	I	停机模式使能信号，不使用需接地
5	VDD	P	电源
6	GND	G	地
7	NC	-	悬空
8	NC	-	悬空
9	NC	-	悬空
10	VT	A	负温度系数电压
11	C1N	A	通道 1 电容输入端
12	C1P	A	通道 1 电容输入端
13	C0P	A	通道 0 电容输入端
14	C0N	A	通道 0 电容输入端
15	SCL	I	I2C 时钟线
16	SDA	I/O	I2C 数据线

备注：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。

4.3. MC11L 封装管脚图（SOP8）



正视图

管脚编号	管脚名称	类型	说明
1	C0P	A	通道 0 电容输入端
2	C0N	A	通道 0 电容输入端
3	SCL	I	I2C 时钟线
4	SDA	I/O	I2C 数据线
5	VDD	P	电源
6	GND	G	地
7	C1N	A	通道 1 电容输入端
8	C1P	A	通道 1 电容输入端

备注：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。

5. 电气规格

5.1. 绝对最大额定值

		最小值	最大值	单位
VDD	电源电压范围	-0.3	5.5	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

		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]		0.8		3.8	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_{DRV}=200uA,T_{CV}=2ms		2.6		uA
电容传感						
$C_{sensormax}$	最大被测电容	最大驱动电流		1000		pF
C_{IN}	管脚寄生电容			1		pF
N_{BITS}	数据位数				15	Bit
f_{cs}	通道采样率		0.01		2	kSPS
振荡器						
f_{sensor}	振荡器频率范围	T = -55℃ to 125℃	0.1		20	MHz
I_{sensor}	振荡器电流(单通道)		0.2	0.8	3.2	mA
内部时钟						
f_{INTCLK}	内部时钟频率	T = -55℃ to 125℃	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 引脚的电流不计入。

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。

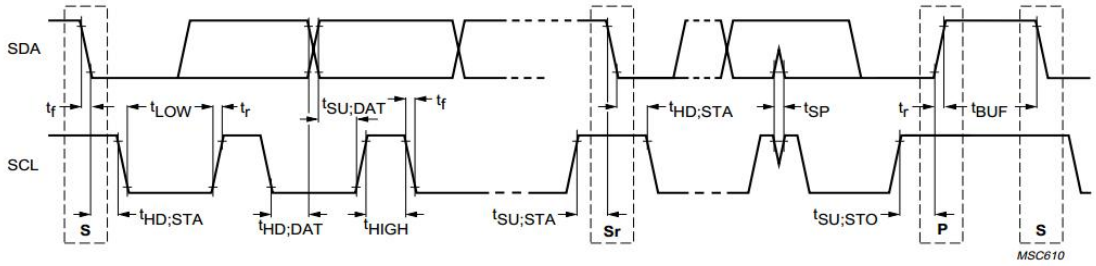


图 5.4 I2C 时序参数

6. 详细说明

6.1. 概述

MC11 系列（以下简称 MC11）是高集成度、低成本、双通道的电容调理芯片，适用于多种电容感测应用。相比于传统的开关结构，MC11 采用谐振的方法测量电容。由于采用浮空差分的结构，被测电容不易受到对地寄生电容的影响，抗干扰性能强。全集成设计，无需过多的外围器件。

当谐振回路的被测电容变化时，电路的谐振频率也会随之变化。基于此原理，MC11 通过测量频率计数值，就可以由此计算出电容值。

6.2. 系统框图

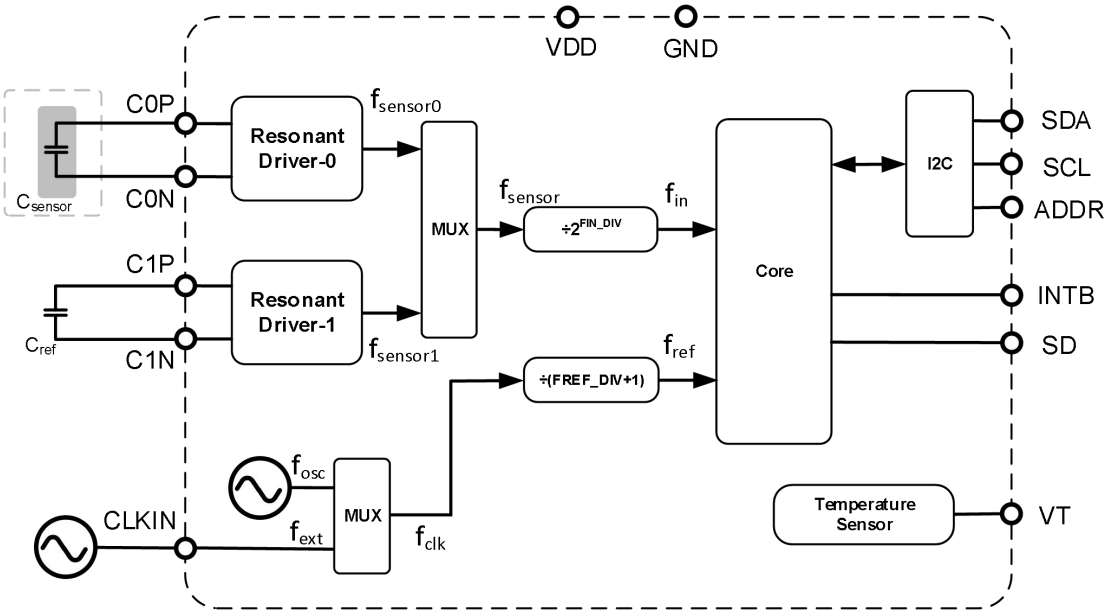


图 6.2 系统框图

上图是 MC11 的系统框图，包括谐振驱动电路（Resonant Driver）、分频器（Divider）、内部时钟（f_{osc}）、数字逻辑、I2C 接口等功能模块。MC11 的驱动电路和外部电容 C 构成电容传感电路，将输出信号送至数字逻辑电路，测量并数字化信号频率（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。通道 0 用于测量被测电容，通道 1 用于测量参考电容。I2C 接口用于芯片与 MCU 进行通讯。通过控制 SD 引脚，可以将 MC11 芯片停机关断，以降低系统功耗。通过 MCU 端测量 VT 引脚电压，可以间接测量环境温度，用于温度补偿。INTB 引脚可以根据配置，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

在 MC11 的系统框图中，f_{clk}、f_{sensor}、f_{ref} 和 f_{in} 是四个重要的时钟信号。根据寄存器配置，f_{clk} 可以选择内部时钟或者外部时钟。根据寄存器配置，f_{sensor} 是通道 0 或者通道 1 的振荡频率。参考时钟 f_{ref} 是由 f_{clk} 分频后得到的。被测时钟 f_{in} 是由 f_{sensor} 分频后得到的。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，内部时钟只适用于低成本低精度应用。电容测量的精度，和转换时间的长度有关，时间越长，精度越高。为了确保测量结果正确，f_{ref} 和 f_{in} 需要满足如下条件：

$$f_{in} < \frac{f_{ref}}{4} \quad (1)$$

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	f_{clk}	CFG, 0x1F	REF_CLK_SEL	b0：选择内部时钟 b1：选择外部时钟
0,1	f_{in}	FIN_DIV, 0x15	FIN_DIV[3:0]	b0000-b0111：对应数值 1 到 7 b1000-b1111：对应数值 8
0,1	f_{ref}	FREF_DIV, 0x16	FREF_DIV[7:0]	FREF_DIV 为 0-255 的数据。

时钟信号 f_{sensor} 与 f_{in}、f_{clk} 与 f_{ref} 的关系如下式所示：

$$f_{in} = \frac{f_{sensor}}{2^{FIN_DIV}} \quad (2)$$

$$f_{ref} = \frac{f_{clk}}{FREF_DIV+1} \quad (3)$$

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。对于 MC11 应用，最好同时启动双通道，通道 0 测量被测电容，通道 1 测量参考电容。

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, 0x21	CH0_EN	b0：关闭通道 0 b1：开启通道 1
1	CH_EN, 0x21	CH1_EN	b0：关闭通道 0 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。
测量间隔	CFG, 0x1F	CR[2:0]	b000：60s 测量一次 b001：30s 测量一次

			b010：10s 测量一次 b011：5s 测量一次 b100：2s 测量一次 b101：1s 测量一次 b110：0.5s 测量一次 b111：0.25s 测量一次

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计数值后，写入 DATA_CH0 或 DATA_CH1。

表 6.3.2-3 数据寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0	DATA_CH0_MSB, 0x04	DATA0[15:8]	通道 0 转换数据高 8 位
	DATA_CH0_LSB, 0x05	DATA0[7:0]	通道 0 转换数据低 8 位
1	DATA_CH1_MSB, 0x06	DATA1[15:8]	通道 1 转换数据高 8 位
	DATA_CH1_LSB, 0x07	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。

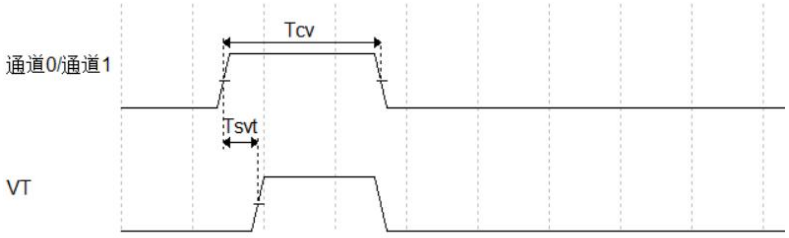


图 6.3.2-1 单通道单次转换模式工作时序图

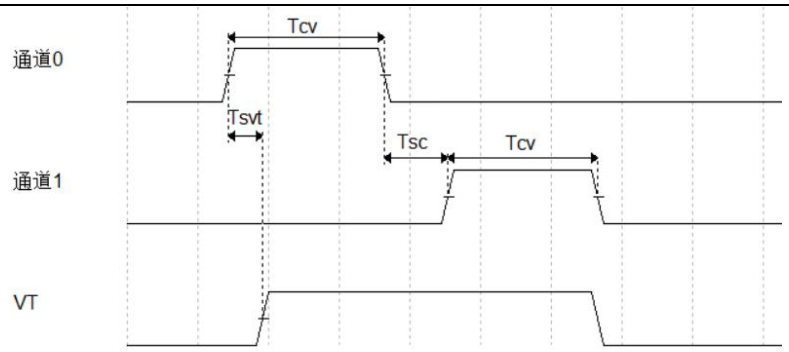


图 6.3.2-2 双通道单次转换模式工作时序图

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。

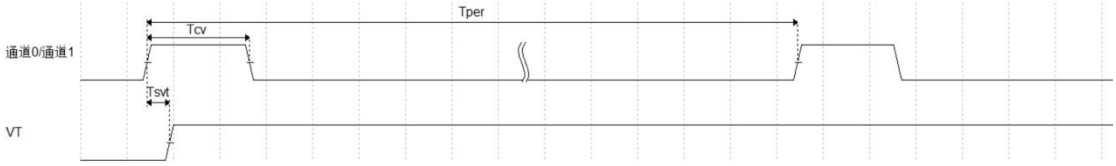


图 6.3.2-3 单通道连续转换模式工作时序图

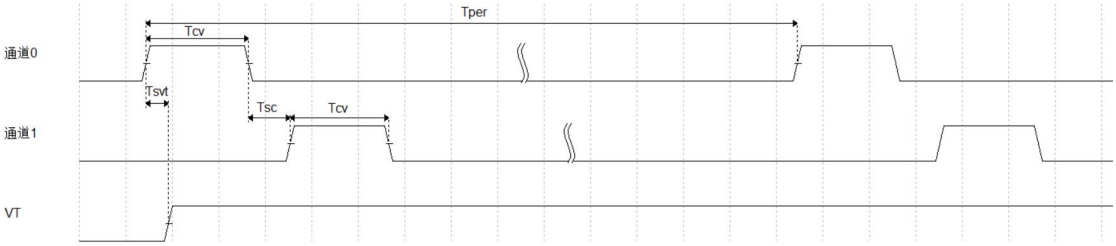


图 6.3.2-4 双通道连续转换模式工作时序图

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：

单通道测量：$T_{per} > T_{cv}$ (4)

双通道测量：$T_{per} > 2 * T_{cv} + 10us$ (5)

其中，T_{per} 是连续转换模式的测量周期，T_{sc} 是通道切换时间（<10us），T_{cv} 是单通道的转换时间。T_{cv} 包括建立时间 T_{set}、计数时间 T_{cnt} 和延时 T_{delay} 三部分。

通道的建立时间 T_{set} 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
0,1	SCNT, 0x10	SCNT0[7:0]	通道建立时间

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：

$$T_{set} = SCNT * 16 / f_{ref} \quad (6)$$

为保证足够的通道信号建立时间，建议配置 T_{set}≥100us。当选择内部时钟作为 f_{clk} 且 FREF_DIV=0 时，SCNT=0x0F 对应 T_{set}=100us，SCNT=0xFF 对应 T_{set}=1.7ms。

通道的计数时间 T_{cnt} 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
0,1	RCNT_MSB, 0x0C	RCNT0[15:8]	通道计数时间高 8 位
	RCNT_LSB, 0x0D	RCNT0[7:0]	通道计数时间低 8 位

T_{cnt}的计算公式为：

$$T_{cnt} = RCNT / f_{ref} \quad (7)$$

通道的延迟时间 T_{delay} 为：

$$T_{delay} = 4 / f_{ref} \quad (8)$$

由此，转换时间 T_{cv} 的计算公式为：

$$T_{cv} = T_{set} + T_{cnt} + T_{delay} = (SCNT * 16 + RCNT + 4) / f_{ref} \quad (9)$$

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：

$$T_{cv} > T_{svt} + T_{adc} \quad (10)$$

T_{svt} 和 VT 引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 引脚进行采样，T_{adc} 是外部 ADC 的测量时间。

6.3.2.4 时钟配置

MC11 时钟相关的寄存器包括 RCNT、SCNT、FIN_DIV 和 FREF_DIV，相关寄存器数值计算流程如下：

1、 根据应用需求，确认转换时间 T_{cv}。一般来说，转换时间越长，测量精度越高。

2、 SCNT 是振荡器的建立时间，其计算公式参考等式（6）。

3、 根据 T_{cv}，确定 RCNT。根据等式（3）、（6）、（7）和（9），可以得到 RCNT 的计算式如下：

$$RCNT = \frac{T_{cnt} \cdot f_{clk}}{FREF_DIV+1} = \frac{T_{cv} \cdot f_{clk}}{FREF_DIV+1} - 16 \cdot SCNT - 4 \quad (11)$$

RCNT 的数值决定了传感器的有效分辨率(ENOB)，RCNT 越大，精度越高。如果 ENOB>n，意味着至少需要 RCNT>2^(n+2)。RCNT 的可配置最大数值为 65535，对应 14bit 有效分辨率。在高精度测量中，建议 RCNT 的数值取 10000 以上。

当转换时间确定后，在选取 RCNT 时，只要 RCNT 不超过 65535，FREF_DIV 越小越好。例如单通道转换时间 1ms，f_{clk} 为 24MHz，如果 FREF_DIV=0，则 f_{ref} 为 24MHz，RCNT 为 23484。如果 FREF_DIV=1，则 f_{ref} 为 12MHz，RCNT 为 11484。如果 FREF_DIV=2，则 f_{ref} 为 8MHz，RCNT 为 7484。

虽然 RCNT 和 FREF_DIV 有多种组合，但从精度的角度，应该选择 FREF_DIV=0，RCNT=23484。

4、 估算 f_{sensor} 的最大频率

在计算 f_{in} 的分频比 FIN_DIV 之前，需要估算出测量通道 0 和通道 1 的最大频率值 f_{sensor_max}。首先确定通道 0 和通道 1 共同的最小电容值 C_{min}，然后按照下式估算：

$$f_{sensor_max} = (k \cdot I_{DRV}) / C_{min} \quad (12)$$

其中 k 为与电路有关参数，在常温条件下，约为 0.17 V^{-1}。I_{DRV} 为驱动电流，其可配置的数值参见表 6.3.4。只要确保 f_{sensor_max} 小于 20MHz， I_{DRV} 大小的数值可随意配置。

例如通道 0 和通道 1 的最小电容值为 13.6pF，驱动电流为 800uA，按照式（12）估算，最大频率值为 10MHz，满足约束条件，电流大小合适。如果驱动电流改为 2400uA，估算的最大频率值为 30MHz，不满足约束条件，此电流值不合适。

5、 确定 FIN_DIV

根据前面关系式（1）和（2），可以得到如下关系：

$$FIN_DIV \geq log_2^{\left(\frac{4 f_{sensor_max}}{f_{ref}}\right)} \quad (13)$$

根据前面的设计数值，f_{ref} 为 24MHz，f_{sensor_max} 为 10MHz。按关系式（13）计算，FIN_DIV 需要大于等于 0.74，即取大于等于 1 的整数。考虑计数值对精度影响，FIN_DIV 应该选取满足条件的最小整数。即此时，FIN_DIV 应选取数值 1。

根据前面的流程分析，给出一个设计实例。

已知的设计参数为：单个测量通道的转换时间为 1ms；f_{clk} 选择外部时钟，频率为 24MHz；

通道的最小电容值为 13.6pF。

- 首先确定 RCNT 值和 FREF_DIV。根据步骤 3，确定 RCNT 为 23484，FREF_DIV 为 0
- 其次估算最大工作频率以及确定驱动电流。根据步骤 4，可以确定 800uA 时，最大频率为 10MHz，满足设计约束。
- 确定 f_{in} 的分频比，FIN_DIV。

6.3.3. 电容计算

MC11 需要同时测量通道 0 的被测电容 C_{sensor} 和通道 1 的参考电容 C_{ref}。电容值与测出的频率计数值 DATA_CH0、DATA_CH1 有如下关系：

$$C_{sensor} = \frac{DATA_CH1}{DATA_CH0} \cdot C_{ref} \quad (14)$$

根据上式，就可以计算出 C_{sensor}。由于电路存在一定的非线性，当 C_{sensor} 与 C_{ref} 之间的差值较大时，上式存在一定的误差，需要进行修正，修正公式如下：

$$C_{sensor} = \frac{DATA_CH1}{DATA_CH0} \cdot C_{ref} \cdot Coef_{fix} \quad (15)$$

下表所示为上式中的修正系数 $Coef_{fix}$，对于表中没有的系数值，可以利用相邻两个数据点，进行数据拟合得到。

C_{sensor}/C_{ref}	DATA_CH1/DATA_CH0	Coef_fix	Result
0.5	0.529	0.946	0.5
0.6	0.623	0.963	0.6
0.7	0.717	0.976	0.7
0.8	0.812	0.985	0.8
0.9	0.906	0.993	0.9
1.0	1.000	1.000	1
1.1	1.094	1.005	1.1
1.2	1.187	1.011	1.2
1.3	1.281	1.015	1.3
1.4	1.373	1.019	1.4
1.5	1.466	1.023	1.5

6.3.4. 频率计算

根据数据 DATAx，可以计算出两个通道的振荡频率数值 $f_{channelx}$，计算公式如下：

$$f_{channelx} = f_{clk} * \frac{2^{FIN_DIV}}{FREF_DIV + 1} * \frac{DATAx}{RCNT}$$

6.3.5. 驱动电流

振荡器的驱动电流 I_{DRV} 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
0,1	DRIVE_I, 0x25	I[3:0]	设置驱动电流值 b0000：200uA b0001：400uA b0010：800uA b0011：1.6mA b0100：2.4mA b0101：3.2mA b0110：3.2mA b0111：3.2mA 其中 I[3]只能写 0

当振荡频率较高值，由于寄生的原因，会导致波形畸变，此时需要减小驱动电流。建议工作频率不要高于 20MHz。

6.3.6. 报警功能和 INTB

MC11 具备报警功能，报警门限包括触发门限 TRH 和解除门限 TRL，由以下寄存器定义。TRH 和 TRL 均为 8 位。

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	TRH, 0x1D	TRH[7:0]	当 0x40*DATA_CH0/DATA_CH1>TRH，STATUS 寄存器中的 ALERT 置 1。
报警解除	TRL, 0x1E	TRL[7:0]	当 0x40*DATA_CH0/DATA_CH1<TRL，STATUS 寄存器中的 ALERT 清 0。

当满足以下条件时，触发报警状态：

$$0x40 \cdot DATA_CH0/DATA_CH1 > TRH \quad (16)$$

报警状态触发以后，状态寄存器中的 ALERT 置 1，同时 INTB 引脚输出电平由高变低。

为了确保报警功能开启，设置 TRH 和 TRL 门限参数时，需要满足：

$$TRH \geq TRL \tag{17}$$

当报警状态触发后，为了清除报警状态，有四种实现方法：

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，且满足解除报警条件 $0x40 \cdot DATA_CH0/DATA_CH1 < TRL$。

iii. 启动软件复位功能。

iv. 将 SD 引脚拉高。

MC11 的 INTB 引脚可以输出报警状态位，低电平有效。在报警状态被清除后，INTB 引脚会恢复到高电平。此外，INTB 引脚还可以配置为输出转换完成标志位。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 引脚输出不使能。 b1：INTB 引脚输出使能。
0,1	CFG, 0x1F	INTB_MODE	b0：INTB 引脚输出报警状态位，低电平有效。 b1：INTB 引脚输出转换完成标志位，低电平有效。

6.3.7. 低电压供电

MC11 可以支持较低的工作电压。当 VDD 电压低于 2.5V 时，通过配置 VDD_SEL 为 1，从而让芯片在低电压的工作条件下达到最佳性能。

表 6.3.6 低电压寄存器定义

通道	寄存器及地址	位	说明
0,1	DRIVE_I, 0x25	VDD_SEL	b0：适应 2.5V<VDD<5.5V b1：适应 2.0V<VDD<2.5V

6.3.8. 状态寄存器

状态寄存器可以反映 MC11 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, 0x18	DRDY_CH0	b0：通道 0 转换未完成 b1：通道 0 转换完成
1	STATUS, 0x18	DRDY_CH1	b0：通道 1 转换未完成

			b1：通道 1 转换完成
0	STATUS, 0x18	ALERT	b0：未触发报警 b1：触发报警
1	STATUS, 0x18	TRH_OF_D	b0：未溢出 b1：DATA_D1*TRH 溢出

6.3.9. 温度测量

MC11 提供一个负温度系数的电压 V_T，输出到 VT 引脚，用于大致评估温度。VT 引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：

$$T = k \cdot V_t + T_c \quad (18)$$

其中 VT 是 ADC 测到的电压值，单位为 mV；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 TC 两个参数。

6.4. 功能模式

6.4.1. 上电启动

芯片在上电启动以后，会自动进入双通道连续转换模式（1 秒 1 次）。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

MC11 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

MC11 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，MC11 在每次转换完成后不会进入睡眠模式。

6.4.4. 停机模式

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

6.4.5. 软件复位

MC11 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。

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 MC11 的控制和数据寄存器。SDA 和 SCL 引脚集成了尖峰抑制电路，可以减小总线噪声的影响。MC11 支持 400KHz 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

MC11S 和 MC11T 通过 ADDR 引脚的不同连接方式，实现不同的 I2C 地址，具体对应关系见下表。

表 6.5.1 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

MC11L 的 I2C 地址固定为 0x69。

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：

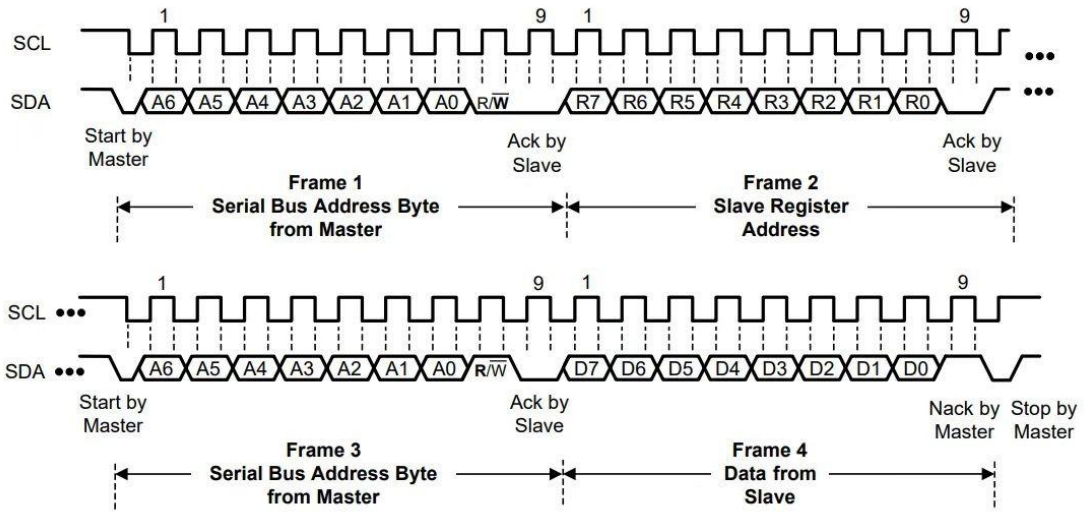


图 6.5.2-1 I2C 单字节读取时序

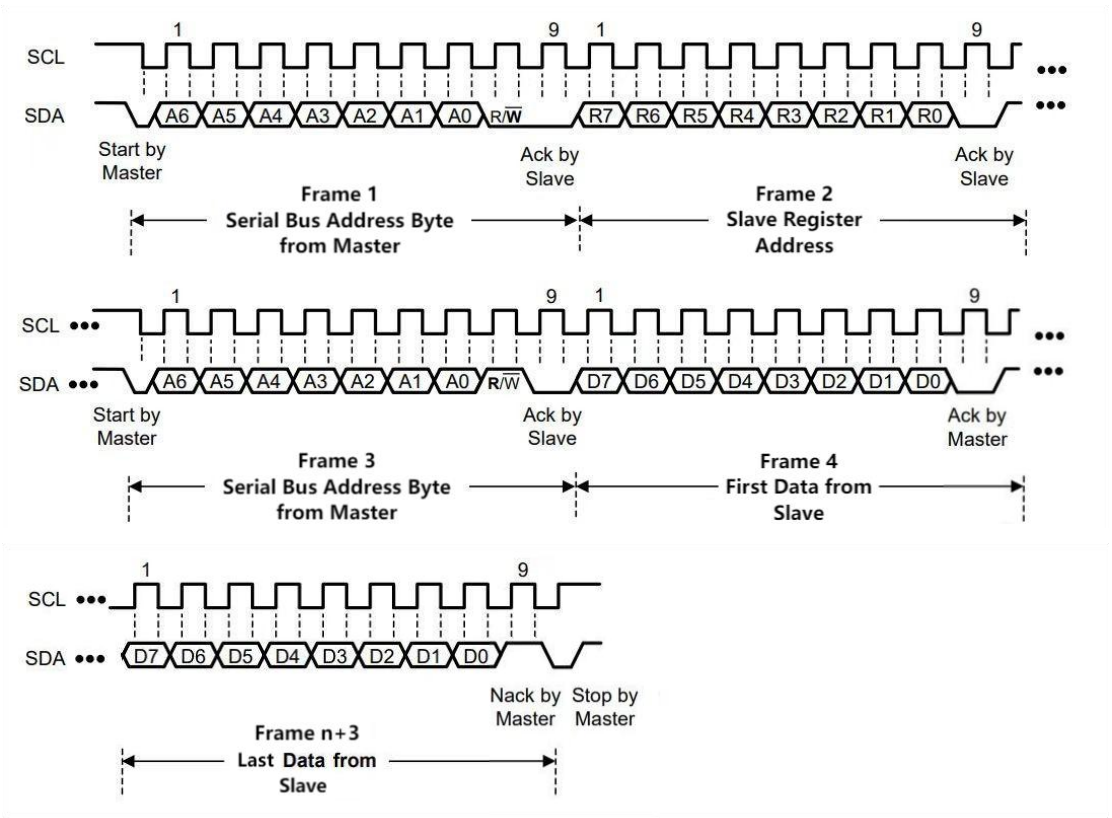


图 6.5.2-2 I2C 连续读取时序

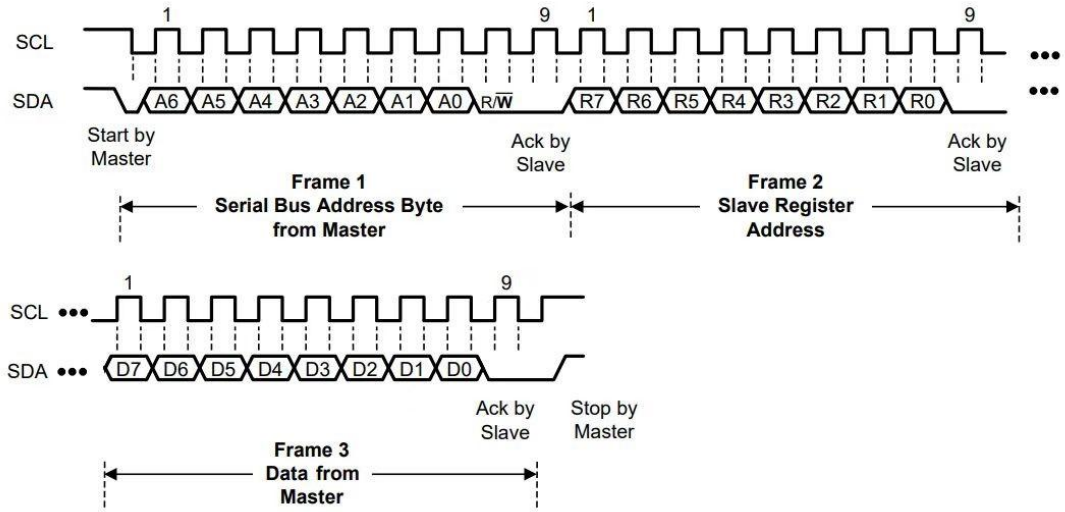


图 6.5.2-3 I2C 写时序

6.6. 寄存器说明

6.6.1. 寄存器列表

MC11 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
0x04	DATA_CH0_MSB	0x00	通道 0 频率计数值，只读
0x05	DATA_CH0_LSB	0x00	
0x06	DATA_CH1_MSB	0x00	通道 1 频率计数值，只读
0x07	DATA_CH1_LSB	0x00	
0x0C	RCNT_MSB	0x12	通道转换计数时间
0x0D	RCNT_LSB	0xC0	
0x10	SCNT	0x20	通道建立时间
0x15	FIN_DIV	0x30	通道振荡信号分频
0x16	FREF_DIV	0x00	通道参考时钟分频
0x18	STATUS	0x00	状态位，只读
0x1D	TRH	0x40	通道报警触发门限
0x1E	TRL	0x3A	通道报警解除门限
0x1F	CFG	0x54	通道转换与 INTB 功能配置
0x21	CH_EN	0xC0	通道选择配置
0x22	RESET	0x00	复位功能，只写
0x25	DRIVE_I	0x00	驱动电流和低电压配置
0x33	GLITCH_FILTER_EN	0x01	抗尖峰滤波器使能
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 0x4，DATA_CH0_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA0							

地址 0x5，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 的频率计数值。
7:0	DATA0[7:0]	只读	0000 0000	

6.6.3. DATA_CH1_MSB、DATA_CH1_LSB

地址 0x6，DATA_CH1_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DATA1							

地址 0x7，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 的频率计数值。
7:0	DATA1[7:0]	只读	0000 0000	

6.6.4. RCNT_MSB、 RCNT_LSB

地址 0xC，RCNT_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT							

地址 0xD，RCNT_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RCNT							

RCNT_MSB & RCNT_LSB 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:0	RCNT[15:8]	读写	0001 0010	构成 16bit 数据，用于设置通道 CH0 和 CH1 的转换的计数时长。
7:0	RCNT[7:0]	读写	1100 0000	

6.6.5. SCNT

地址 0x10，SCNT

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
SCNT							

SCNT 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:0	SCNT[7:0]	读写	0010 0000	设置通道 CH0 和 CH1 的建立时间。

6.6.6. FIN_DIV

地址 0x15，FIN_DIV

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
FIN_DIV				RSV			

FIN_DIV 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:4	FIN_DIV [3:0]	读写	0011	设置通道 CH0 和 CH1 的振荡信号分频比 0000：不分频 0001：2 分频 0010：4 分频 0011：8 分频 0100：16 分频 0101：32 分频 0110：64 分频 0111：128 分频 1xxx：256 分频 $f_{IN} = f_{sensor} / 2^{FIN_DIV}$
3:0	RSV	读写	0000	保留位，只能写 0

6.6.7. FREF_DIV

地址 0x16，FREF_DIV

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
FREF_DIV							

FREF_DIV 说明

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

6.6.8. STATUS

地址 0x18，STATUS

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
RSV	RSV	DRDY_CH1	DRDY_CH0	RSV		ALERT	TRH_OF_D

STATUS 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
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	读	0	报警触发状态位，读数据清除
0	TRH_OF_D	读	0	DATA_D1*TRH 溢出标志位

6.6.9. TRH

地址 0x1D，TRH

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TRH							

TRH 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:0	TRH[7:0]	读写	0100 0000	设置报警触发门限 当 0x40*DATA_D0/DATA_D1>TRH，报警状态位 ALERT 置 1。

6.6.10. TRL

地址 0x1E，TRL

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
TRL							

TRL 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:0	TRL[7:0]	读写	0011 1010	道报警解除门限 当 0x40*DATA_D0/DATA_D1<TRL，报警状态位 ALERT 清零。

6.6.11. 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

6.6.12. CH_EN

地址 0x21，CH_EN

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
CH1_EN	CH0_EN	RSV					

CH_EN 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7	CH1_EN	读写	1	通道 0 使能位控制 0：通道 0 关闭 1：通道 0 开启
6	CH0_EN	读写	1	通道 1 使能位控制 0：通道 1 关闭 1：通道 1 开启
5:0	RSV	读写	000000	保留位，只能写 0

6.6.13. 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）

6.6.14. DRIVE_I

地址 0x25，DRIVE_I

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
I0				RSV			VDD_SEL

DRIVE_I 说明

位	范围	操作	默认值	说 明
7:4	I[3:0]	读写	0000	设置驱动电流 0000：200uA 0001：400uA 0010：800uA 0011：1.6mA 0100：2.4mA 0101：3.2mA 0110：3.2mA 0111：3.2mA 其中 I[3]只能写 0
3:1	RSV	读写	000	保留位，只能写 0
0	VDD_SEL	读写	0	VDD 电压适配选择 0：适用于 2.5V<VDD<5.5V 的情况 1：适用于 2.0V<VDD<2.5V 的情况

6.6.15. 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

6.6.16. DEVICE_ID_MSB、 DEVICE_ID_LSB

地址 0x7E，DEVICE_ID_MSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DEVICE_ID							

地址 0x7F，DEVICE_ID_LSB

Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
DEVICE_ID							

DEVICE_ID_MSB & DEVICE_ID_LSB 说明

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

7. 典型应用电路图与注意事项

MC11 的典型应用电路如图 7-1、图 7-2 所示，其中 C_{sensor} 为被测电容或是测量电极，C_{ref} 为参比电容。转换完成后，MCU 读取芯片的数据 DATA_CH0 和 DATA_CH1，并根据 6.3.3 章节的公式，计算出 C_{sensor} 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。VT 引脚上的电容推荐 1nF。

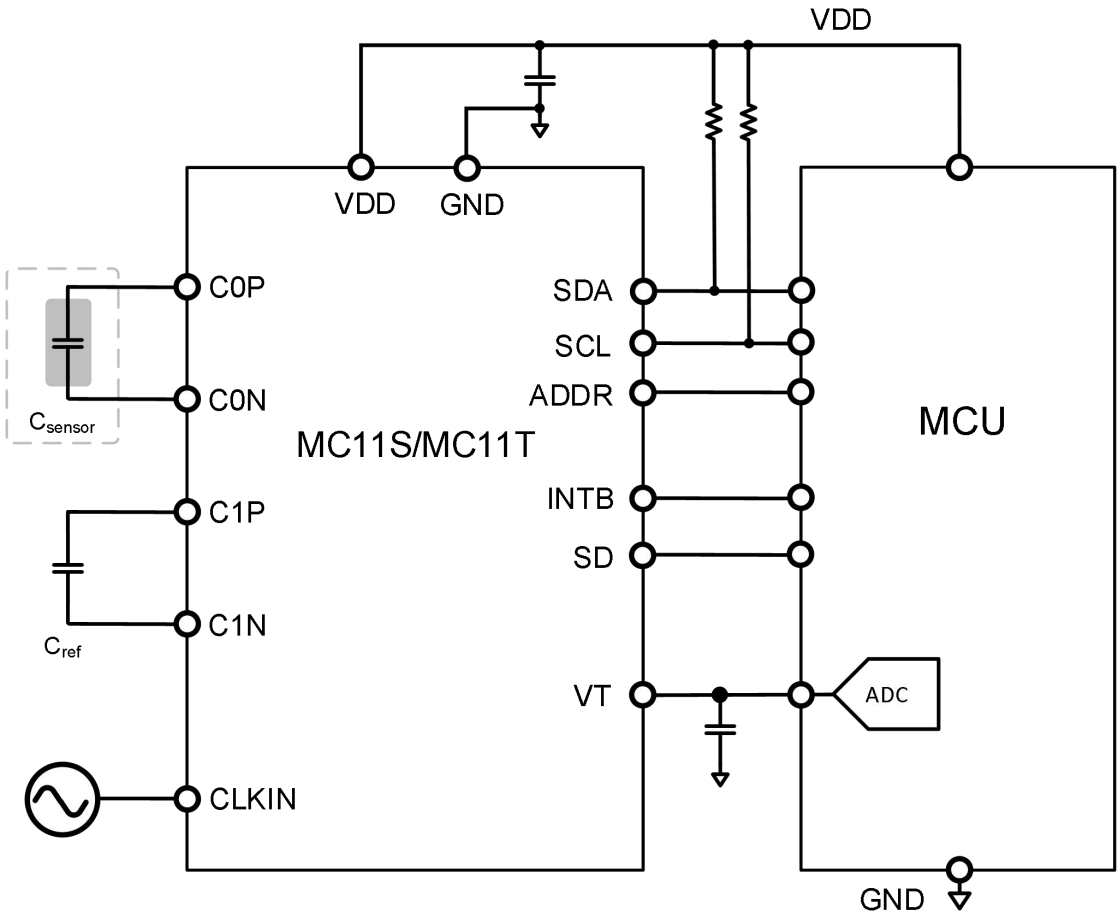


图 7-1 MC11S 和 MC11T 典型应用电路图

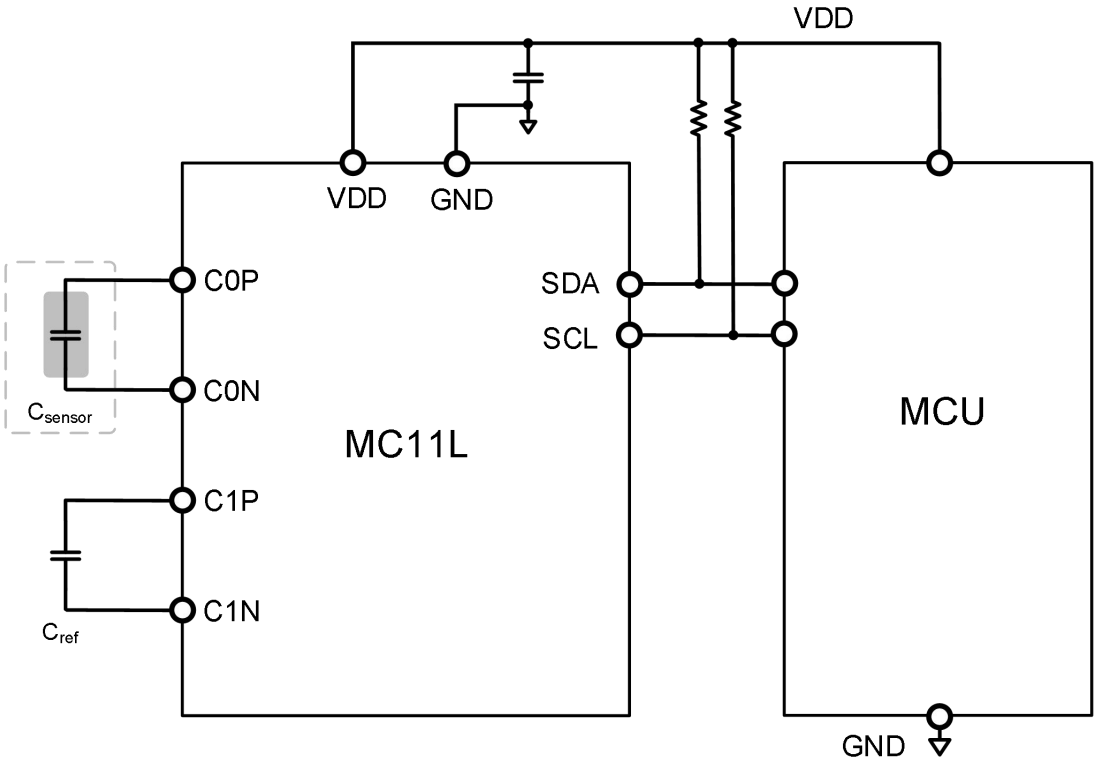
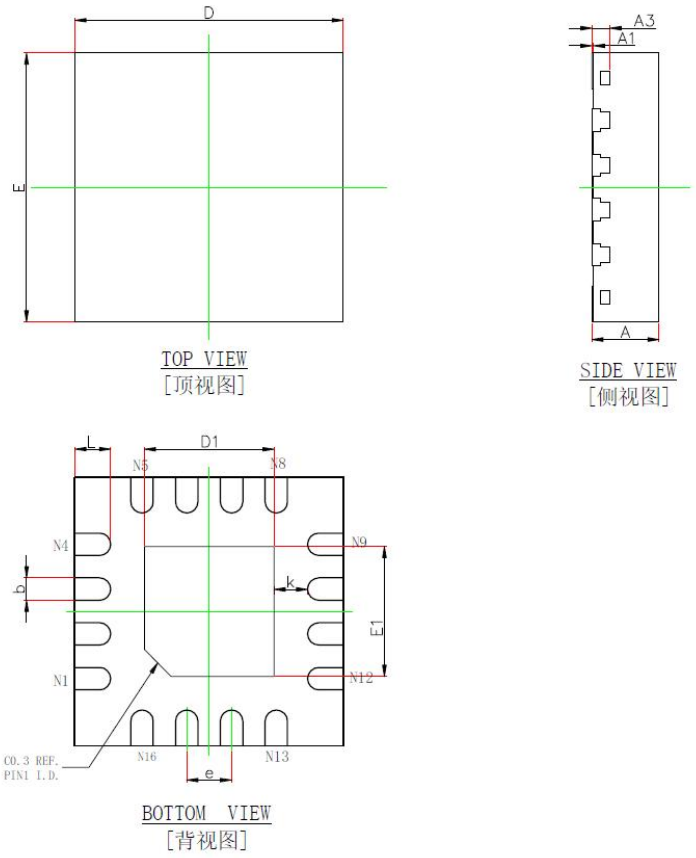


图 7-2 MC11L 典型应用电路图

除了上面的应用模式以外，MC11 还可以作为电容开关使用。上电后，芯片会自动进入连续转换模式，1 秒钟测量 1 次。当 0x40*DATA_CH0/DATA_CH1>TRH 时，INTB 会自动输出报警标志位。当 0x40*DATA_CH0/DATA_CH1>TRL 时，INTB 会自动解除报警标志位。

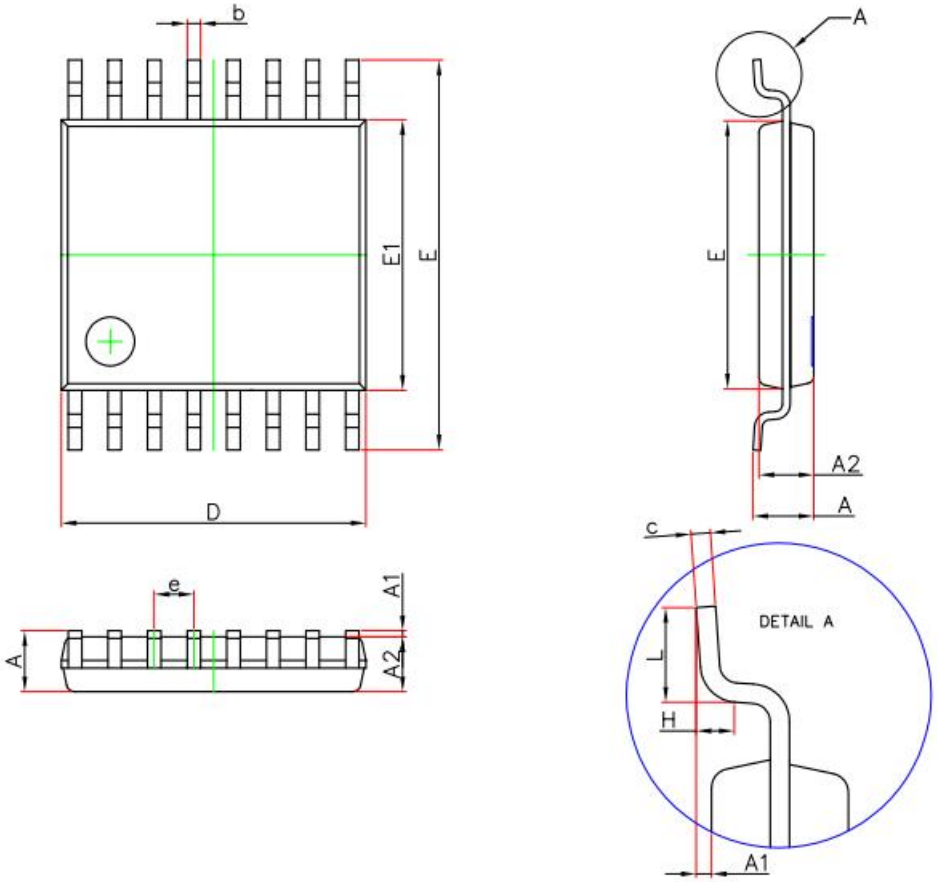
8. 封装

8.1. MC11S QFN16 3.0*3.0*0.75mm 产品尺寸规格图



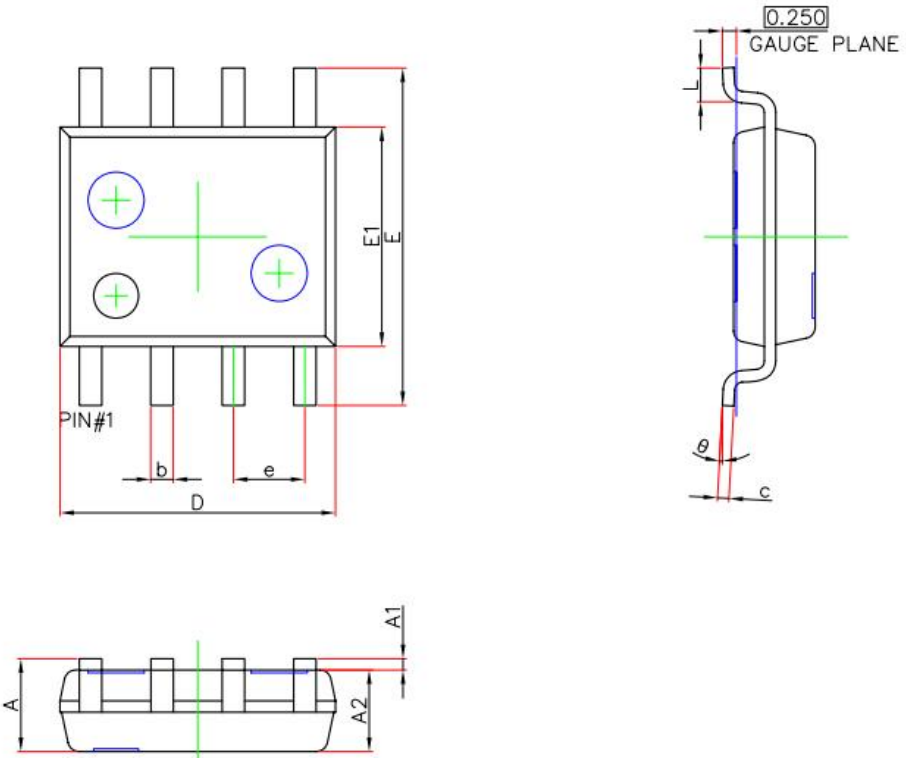
Symbol	Dimensions In Millimeters		Dimensions In Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	0.700	0.800	0.028	0.031
A1	0.000	0.050	0.000	0.002
A3	0.203REF.		0.008REF.	
D	2.900	3.100	0.114	0.122
E	2.900	3.100	0.114	0.122
D1	1.350	1.550	0.053	0.061
E1	1.350	1.550	0.053	0.061
k	0.375REF.		0.015REF.	
b	0.200	0.300	0.008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

8.2. MC11T TSSOP16 5.0*4.4*1.2mm 产品尺寸规格图



Symbol	Dimensions In Millimeters		Dimensions In Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	—	1.200	—	0.047
A1	0.050	0.150	0.002	0.006
A2	0.800	1.000	0.031	0.039
b	0.190	0.300	0.007	0.012
c	0.090	0.200	0.004	0.008
D	4.900	5.100	0.193	0.201
E	6.250	6.550	0.246	0.258
E1	4.300	4.500	0.169	0.177
e	0.650(BSC)		0.026(BSC)	
L	0.500	0.700	0.020	0.028
H	0.250(TYP)		0.010(TYP)	
θ	1°	7°	1°	7°

8.3. MC11L SOP8 4.9*3.9*1.6mm 产品尺寸规格图



Symbol	Dimensions In Millimeters		Dimensions In Inches	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	1.450	1.750	0.057	0.069
A1	0.100	0.250	0.004	0.010
A2	1.350	1.550	0.053	0.061
b	0.330	0.510	0.013	0.020
c	0.170	0.250	0.007	0.010
D	4.700	5.100	0.185	0.201
E	5.800	6.200	0.228	0.244
E1	3.800	4.000	0.150	0.157
e	1.270(BSC)		0.050(BSC)	
L	0.400	1.270	0.016	0.050
θ	0°	8°	0°	8°

9. 订购须知

型号	封装	最小包装
MC11S	QFN16	5K/盘
MC11T	TSSOP16	4K/盘
MC11L	SOP8	4K/盘

10. 修订历史

Date	Revision	Description
20260304	V1.5	6.6.7 章节 修正 FREF_DIV 寄存器数值说明
20261118	V1.6	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。