

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

1. 产品描述

LTD2113、LTD2114 和 LTD2115 器件(LTD211X)是兼容 I²C 的 16 位低功耗精密模数转换器(ADC)。LTD211X 器件采用了低漂移电压基准、振荡器和温度传感器。LTD2114 和 LTD2115 还包含一个可编程增益放大器(PGA)和一个数字比较器。LTD211X 具有宽工作电源电压范围,非常适用于功率受限型和空间受限型传感器测量应用。

LTD211X 器件的数据转换速率最高可达 4kSPS。PGA 可提供从 $\pm 256\text{mV}$ 到 $\pm 6.144\text{V}$ 的输入范围,从而实现精准的大小信号测量。LTD2115 具有一个输入多路复用器(MUX),可实现双路差分输入或四路单端输入测量。在 LTD2114 和 LTD2115 中使用数字比较器可进行欠压和过压检测。

LTD211X 系列采用 MSOP-10 封装,额定工作温度范围为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。

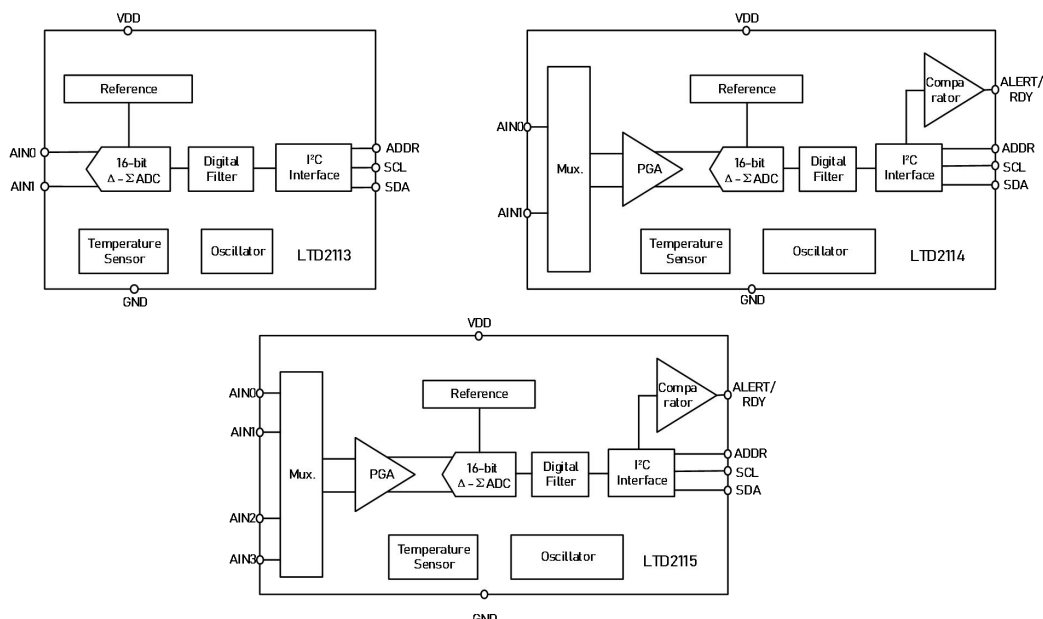
2. 特点与优势

- 宽电源电压: 1.8V 至 5.5V
- 低功耗: 150 μA (连续转换模式)
- 可编程数据传输速率: 8SPS 至 4kSPS
- 单周期稳定
- 内部低漂移电压基准
- 内部振荡器
- 内部温度传感器
- I²C 接口: 四个引脚可选地址
- 四个单端输入或两个差分输入 (LTD2115)
- 可编程比较器 (LTD2114 和 LTD2115)
- 工作温度范围: -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$

3. 应用场景

- 便携式仪表
- 电池电压和电流监控
- 温度测量系统
- 消费类电子产品
- 工厂自动化和过程控制

4. 器件框图



16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

Table of Contents

1. 产品描述.....	1	11.3.4. 连续转换模式.....	14
2. 特点与优势.....	1	11.3.5. 低功耗占空比.....	14
3. 应用场景.....	1	11.3.6. 校准.....	15
4. 器件框图.....	1	11.4. 编程.....	15
5. 器件比较.....	4	11.4.1. I ² C 接口.....	15
6. 订购信息.....	4	11.4.2. 从设备操作.....	16
7. 引脚定义.....	4	11.4.3. 接收模式.....	16
8. 性能.....	5	11.4.4. 发送模式.....	16
8.1. 极限值.....	5	11.4.5. 寄存器读写.....	16
8.2. ESD 等级.....	5	11.4.6. 数据格式.....	18
8.3. 推荐工作条件.....	5	11.5. 寄存器映射.....	18
8.4. 电性能.....	6	11.5.1. Address Pointer 寄存器.....	18
8.5. 时序要求.....	7	11.5.2. Conversion 寄存器.....	19
9. 典型特征.....	8	11.5.3. Config 寄存器.....	19
10. 噪声性能.....	9	11.5.4. Lo_thresh 与 Hi_thresh 寄存器.....	21
11. 特点描述.....	10	11.5.5. OFC 寄存器.....	21
11.1. 概述.....	10	11.5.6. FSC 寄存器.....	22
11.2. 功能描述.....	10	11.5.7. Config2 寄存器.....	22
11.2.1. 多路复用器.....	10	12. 应用与实现.....	23
11.2.2. 模拟输入.....	10	12.1. 应用信息.....	23
11.2.3. 满量程范围(FSR)与 LSB 大小.....	11	12.1.1. 基本连接.....	23
11.2.4. 基准电压.....	11	12.1.2. 单端输入.....	23
11.2.5. 振荡器.....	11	12.1.3. 输入保护.....	24
11.2.6. 输出数据速率与转换时间.....	12	12.1.4. 未用引脚处理.....	24
11.2.7. 数字比较器 (仅 LTD2114 与 LTD2115).....	12	12.1.5. 模拟输入滤波.....	24
11.2.8. 转换就绪引脚 (仅 LTD2114 与 LTD2115).....	12	12.1.6. 多器件连接.....	25
11.2.9. SMBusAlert 响应.....	13	12.1.7. 快速上手指南.....	26
11.2.10. 温度传感器.....	13	12.2. 典型应用.....	27
11.3. 器件功能模式.....	14	12.2.1. 设计需求.....	27
11.3.1. 复位与上电.....	14	12.2.2. 详细设计步骤.....	28
11.3.2. 工作模式.....	14	13. 编带和卷轴信息.....	30
11.3.3. 单次转换模式.....	14	14. 封装信息.....	31

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

List of Figures

图 1 引脚定义	4	图 13 连续转换模式下的转换就绪脉冲	13
图 2 I ² C 接口时序图	7	图 14 LTD211X 读时序	17
图 3 工作电流与温度的关系	8	图 15 LTD211X 写时序	17
图 4 待机电流与温度的关系	8	图 16 Alert 响应时序	17
图 5 INL 与输入信号的关系	8	图 17 输出码转换曲线	18
图 6 增益误差直方图(差分输入)	8	图 18 LTD2115 典型连接示例	23
图 7 偏移误差直方图(差分输入)	8	图 19 单端输入测量示例	24
图 8 数字滤波器频率响应	8	图 20 混叠效应示意图	25
图 9 模拟输入电路示意图	10	图 21 多颗 LTD211X 器件连接示例图	26
图 10 简化模拟输入电路	11	图 22 基本硬件配置示例图	27
图 11 S1 与 S2 开关时序	11	图 23 低侧电流分流监测电路图	27
图 12 ALERT 引脚时序图 (传统与窗口比较器模式)	12		

List of Table

表 1 不同 FSR 下的噪声 $\mu V_{RMS}(\mu V_{PP})$	9
表 2 有效分辨率(无噪声分辨率)	9
表 3 各 FSR 对应的 LSB	11
表 4 14 位温度数据格式	13
表 5 偏移校准寄存器	15
表 6 偏移校准寄存器值	15
表 7 满量程校准寄存器	15
表 8 满量程校准寄存器值	15
表 9 地址引脚与目标地址的对应关系	16
表 10 输入信号与理想输出码	18
表 11 Address Pointer 寄存器结构	18
表 12 Address Pointer 寄存器描述	19
表 13 Conversion 寄存器结构	19
表 14 Conversion 寄存器描述	19
表 15 Config 寄存器结构	19
表 16 Config 寄存器描述	20
表 17 Lo_thresh Register 寄存器结构	21
表 18 Hi_thresh Register 寄存器结构	21
表 19 Hi/Li_thresh Register 寄存器描述	21
表 20 OFC 寄存器结构	21
表 21 OFC 寄存器描述	21
表 22 FSC 寄存器结构	22
表 23 FSC 寄存器描述	22
表 24 Config2 寄存器结构	22
表 25 Config2 寄存器描述	22
表 26 设计参数	27
表 27 器件参数	29

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

5. 器件比较

型号	分辨率(Bits)	最大采样速率(SPS)	输入通道数 差分(单端)	增益	接口	特殊功能
LTD2115	16	4k	2(4)	Yes	I ² C	Comparator
LTD2114	16	4k	1(1)	Yes	I ² C	Comparator
LTD2113	16	4k	1(1)	No	I ² C	None

6. 订购信息

器件型号	封装	数量	丝印
LTD2113XV10/R6	MSOP-10	Tape and Reel,3000	D2113
LTD2114XV10/R6	MSOP-10	Tape and Reel,3000	D2114
LTD2115XV10/R6	MSOP-10	Tape and Reel,3000	D2115

7. 引脚定义

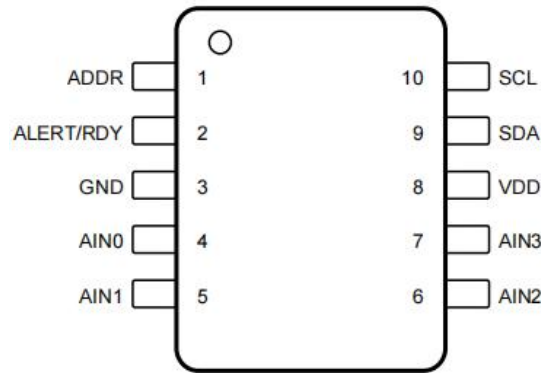


图1 引脚定义

名称	LTD2113	LTD2114	LTD2115	TYPE	类型/描述
ADDR	1	1	1	Digital input	数字输入: I ² C 从机地址选择
AIN0	4	4	4	Analog input	模拟输入 0
AIN1	5	5	5	Analog input	模拟输入 1
AIN2	—	—	6	Analog input	模拟输入 2 (仅 LTD2115)
AIN3	—	—	7	Analog input	模拟输入 3 (仅 LTD2115)
ALERT/RDY	—	2	2	Digital output	数字输出: 比较器输出或转换完成指示 (仅 LTD2114、LTD2115)
GND	3	3	3	Analog	模拟: 地
NC	2,6,7	6,7	—		未连接
SCL	10	10	10	Digital input	数字输入: 串行时钟输入, 锁存 SDA
SDA	9	9	9	Digital I/O	数字 I/O: 串行数据线, 发送与接收数据
VDD	8	8	8	Analog	模拟: 电源。VDD 与 GND 之间需并联 0.1 μF 去耦电容

8. 性能

8.1. 极限值

参数	最小值	最大值	单位
电源电压 VDD 与 GND 之间	-0.3	7	V
模拟输入电压(AIN0,AIN1,AIN2,AIN3)	GND - 0.3	VDD+0.3	V
数字输入电压(SDA,SCL,ADDR,ALERT/RDY)	GND - 0.3	5.5	V
任意引脚输入电流 (连续)	-10	10	mA
工作环境温度 T _A	-40	125	°C
结温 T _J	-40	150	°C
存储温度 T _{stg}	-60	150	°C

注：超过这些极限条件可能导致器件永久损坏。这些仅为压力限制，不代表推荐工作条件。

8.2. ESD 等级

Parameter	Level	UNIT
Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001,	±6000	V
Charged device model (CDM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-002	±1000	V

8.3. 推荐工作条件

类别/参数	说明	最小值	典型值	最大值	单位
电源	电源电压(VDD 到 GND)	2		5.5	V
模拟输入	满量程输入电压范围(VIN=V _{AINP} -V _{AINN})	±0.256		±6.144 ⁽¹⁾	V
模拟输入	绝对输入电压范围(AINx)	GND		VDD	V
数字输入	数字输入电压 V _{DIG}	GND		5.5	V
温度	工作环境温度 T _A	-40		125	°C

(1) 此参数表示 ADC 的满量程范围，模拟输入不应超过 VDD+0.3V。

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

8.4. 电性能

测试条件: VDD =3.3V、数据速率=8SPS、满量程输入电压范围(FSR) = $\pm 2.048V$ (除非另有说明)条件下;最大和最小工作温度范围为 $-40^{\circ}C$ 至 $+125^{\circ}C$;典型工作温度为 $25^{\circ}C$,电性能最大值和最小值在 $-40^{\circ}C$ 到 $+125^{\circ}C$ 温度范围内测得,典型值在室温下测得(除非另有说明)。

参数类别	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
模拟输入					
共模输入阻抗	FSR= $\pm 6.144V^{(1)}$		12.3		M Ω
	FSR= $\pm 4.096V^{(1)}$		7.0		
	FSR= $\pm 2.048V$		1.432		
	FSR= $\pm 1.024V$		1.02		
	FSR= $\pm 0.512V, \pm 0.256V$		0.69		
差分输入阻抗	FSR= $\pm 6.144V^{(1)}$		18.9		M Ω
	FSR= $\pm 4.096V^{(1)}$		11.9		
	FSR= $\pm 2.048V$		3.1		
	FSR= $\pm 1.024V$		1.6		
	FSR= $\pm 0.512V, \pm 0.256V$		892		
系统性能					
无遗漏码的分辨率		16			Bits
数据速率 DR		8,16,32,64,128,250,475,860,2k,4k			SPS
数据速率变化范围	所有速率	-10		10	%
积分非线性 INL	DR=8SPS,FSR= $\pm 2.048V^{(2)}$			1	LSB
偏移误差	FSR= $\pm 2.048V$, 差分输入			3	LSB
	FSR= $\pm 2.048V$, 单端输入		± 3		LSB
偏移随温度变化	FSR= $\pm 2.048V$		0.005		LSB/ $^{\circ}C$
电源变化引起的偏移	FSR= $\pm 2.048V$, 电源变化		1		LSB/V
通道匹配偏移	任意两个输入通道		3		LSB
增益误差	FSR= $\pm 2.048V$, $T_A=25^{\circ}C$		0.025%	0.41%	
	FSR= $\pm 0.256V$		8	30	ppm/ $^{\circ}C$
	FSR= $\pm 2.048V$		5	20	
FSR= $\pm 6.144V^{(1)}$		5	30		
电源变化引起的增益误差			80		ppm/V
增益匹配误差	任意两个增益设置		0.04%		%
通道增益匹配误差	任意两个通道		0.08%		%
共模抑制比	DC,FSR= $\pm 0.256V$		105		dB
	DC,FSR= $\pm 2.048V$		105		dB
	DC,FSR= $\pm 6.144V^{(1)}$		105		dB
	$f_{CM}=60Hz, DR=128SPS$		87		dB
	$f_{CM}=50Hz, DR=128SPS$		87		dB
温度传感器					
温度范围		-40		125	$^{\circ}C$
温度分辨率			0.03125		$^{\circ}C/LSB$
精度	$T_A=0^{\circ}C \sim 70^{\circ}C$		0.2		$^{\circ}C$
	$T_A=-40^{\circ}C \sim 125^{\circ}C$		0.4		
数字输入输出					

参数类别	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
高电平输入电压 V_{IH}		0.7VDD		5.5	V
低电平输入电压 V_{IL}		GND		0.3VDD	V
低电平输出电压 V_{OL}	IOL=3mA	GND	0.15	0.4	V
输入漏电流	GND< V_{DIG} <VDD	-10		10	μ A
电源					
电流	Power-down	$T_A=25^\circ\text{C}$	0.6	1.23	μ A
		ALL-temperature		17.2	
	工作模式	$T_A=25^\circ\text{C}$	150		
		ALL-temperature		189	
功耗	VDD=5.0V		0.88	mW	
	VDD=3.3V		0.48		
	VDD=2.0V		0.22		

(1) 输入信号幅度不能超过 $VDD+0.3V$ 。

(2) 采用 Best-fit INL。

8.5. 时序要求

适用于工作环境温度范围，且 VDD 在 2.0V 至 5.5V 之间 (除非另有说明)。

参数	说明	快速模式	快速模式	高速模式	高速模式	单位
		最小值	最大值	最小值	最大值	
f_{SCL}	SCL 时钟频率	0.01	0.4	0.01	3.4	MHz
t_{BUF}	START 与 STOP 之间的总线空闲时间	600		160		ns
t_{HDSTA}	重复 START 条件后的保持时间	600		160		ns
t_{SUSTA}	重复 START 条件的建立时间	600		160		ns
t_{SUSTO}	STOP 条件的建立时间	600		160		ns
t_{HDDAT}	数据保持时间	0		0		ns
t_{SUDAT}	数据建立时间	100		10		ns
t_{LOW}	SCL 时钟低电平时间	1300		160		ns
t_{HIGH}	SCL 时钟高电平时间	600		60		ns
t_F	SDA 与 SCL 信号的下降时间(1)		300		160	ns
t_R	SDA 与 SCL 信号的上升时间(1)		300		160	ns

(1) 对于高速模式最大值，要求总线上的负载电容不超过 400pF。

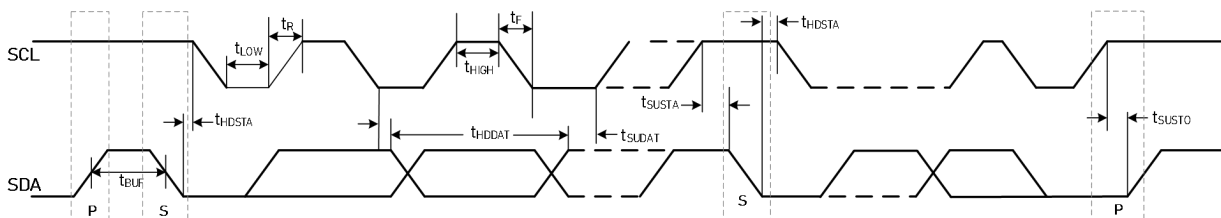


图 2 I²C 接口时序图

9. 典型特征

T_A=25°C, VDD=3.3V, FSR=±2.048V, DR=8SPS (除非另有说明)。

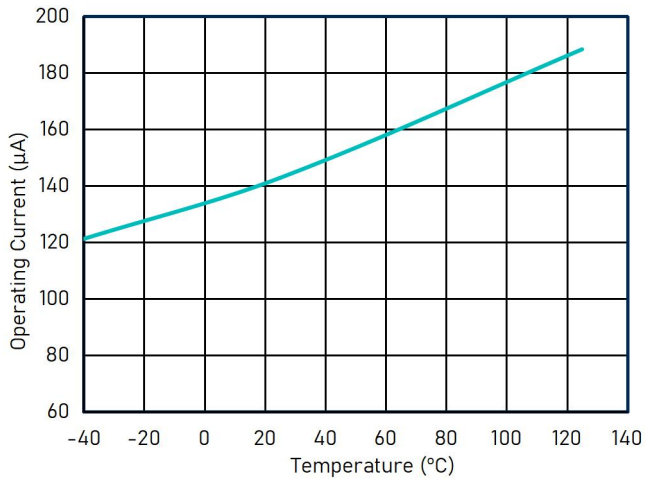


图 3 工作电流与温度的关系

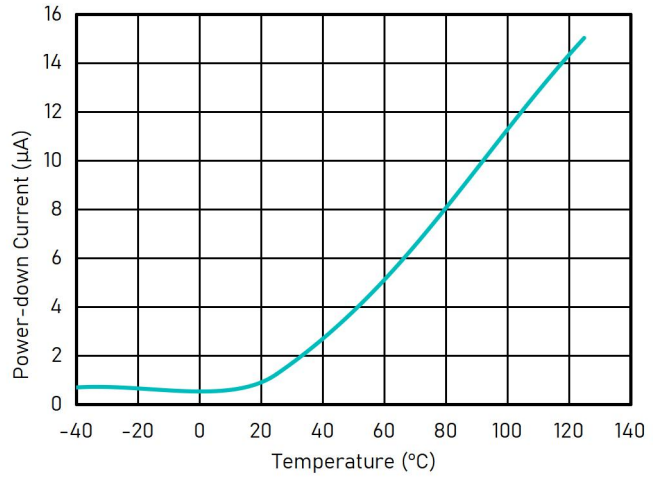


图 4 待机电流与温度的关系

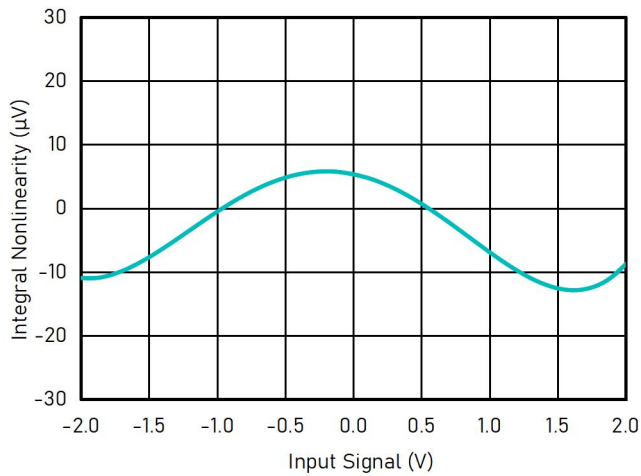


图 5 INL 与输入信号的关系

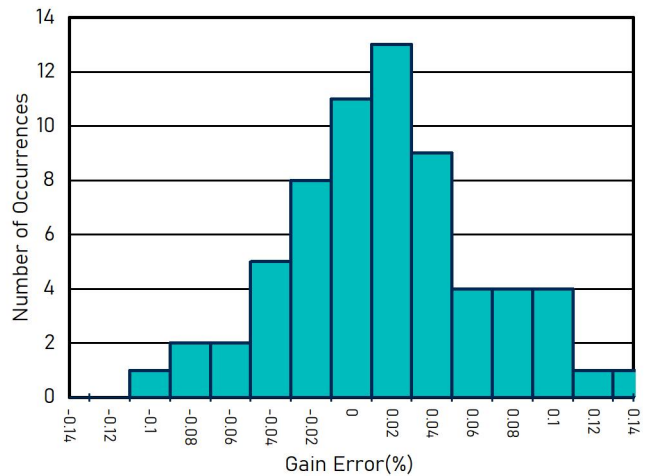


图 6 增益误差直方图(差分输入)

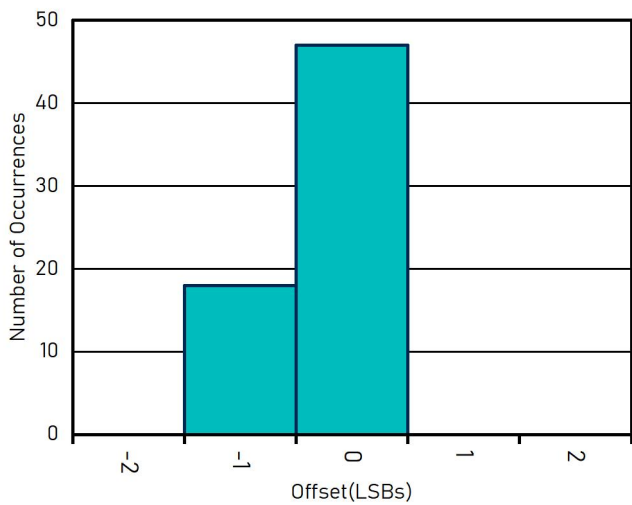


图 7 偏移误差直方图(差分输入)

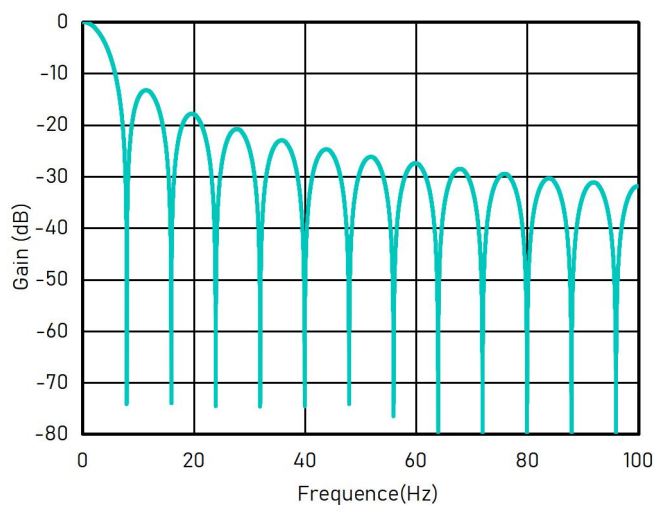


图 8 数字滤波器频率响应

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

10. 噪声性能

$\Delta\Sigma$ (Delta-Sigma)型模数转换器(ADC)的基本原理是过采样。 $\Delta\Sigma$ ADC 的输入信号以很高的调制器频率采样,随后在数字域中进行滤波与抽取(decimate),最终以所设定的输出数据速率(DataRate)得到一次转换结果。调制器频率与输出数据速率之比称为过采样比(Oversampling Ratio, OSR)。通过增大 OSR、降低输出数据速率,可以优化 ADC 的噪声性能。换言之,当降低输出数据速率时,输入参考的均方根噪声(RMS Noise)会下降,因为调制器的更多采样被平均到同一次转换。增大增益同样能够降低输入参考噪声,对测量微小电平信号尤其有利。

表 1 和表 2 总结了 LTD211X 的噪声性能数据,测试条件为 $T_A=25^\circ\text{C}$,所有输入短接在一起。其中,表 1 给出了在不同满量程范围(FSR)下的输入参考噪声,单位为 μV_{RMS} (括号内为 μV_{PP})。表 2 根据公式(1)由 μV_{RMS} 计算得到有效分辨率,并在括号中给出了根据公式(2)由 μV_{PP} 噪声计算的无噪声分辨率。

$$\text{有效分辨率} = \ln(\text{FSR}/V_{\text{RMS,Noise}})/\ln(2) \quad (1)$$

$$\text{无噪声分辨率} = \ln(\text{FSR}/V_{\text{PP,Noise}})/\ln(2) \quad (2)$$

表 1 不同 FSR 下的噪声 $\mu\text{V}_{\text{RMS}}(\mu\text{V}_{\text{PP}})$

DATARATE (SPS)	$\pm 6.144\text{ V}$	$\pm 4.096\text{ V}$	$\pm 2.048\text{ V}$	$\pm 1.024\text{ V}$	$\pm 0.512\text{ V}$	$\pm 0.256\text{ V}$
8	187.5(187.5)	125(125)	62.5(62.5)	31.25(31.25)	15.625(15.625)	7.81(7.81)
16	187.5(187.5)	125(125)	62.5(62.5)	31.25(31.25)	15.625(15.625)	7.81(7.81)
32	187.5(187.5)	125(125)	62.5(62.5)	31.25(31.25)	15.625(15.625)	7.81(7.81)
64	187.5(187.5)	125(125)	62.5(62.5)	31.25(31.25)	15.625(15.625)	7.81(15.62)
128	187.5(375)	125(125)	62.5(62.5)	31.25(62.5)	15.625(31.25)	7.81(31.25)
250	187.5(562.5)	125(250)	62.5(125)	31.25(62.5)	15.625(31.25)	7.81(39.06)
475	187.5(937.5)	125(375)	62.5(187.5)	31.25(125)	15.625(46.875)	15.62(46.875)
860	375(1312.5)	125(750)	62.5(312.5)	31.25(187.5)	15.625(93.75)	15.62(93.75)

表 2 有效分辨率(无噪声分辨率)

DATARATE (SPS)	$\pm 6.144\text{ V}$	$\pm 4.096\text{ V}$	$\pm 2.048\text{ V}$	$\pm 1.024\text{ V}$	$\pm 0.512\text{ V}$	$\pm 0.256\text{ V}$
8	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)
16	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)
32	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)
64	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)	16(16)
128	16(15)	16(16)	16(16)	16(15)	16(16)	16(16)
250	16(14.41)	16(15)	16(15)	16(15)	16(15)	16(13.68)
475	16(13.68)	16(14.42)	16(14.42)	16(14)	16(14.42)	16(13.42)
860	16(13.19)	16(13.42)	16(13.68)	16(13.42)	16(13.42)	16(12.42)

11. 特点描述

11.1. 概述

LTD211X 系列是一款小型、低功耗的 16 位 $\Delta\Sigma$ (Delta-Sigma) 模数转换器(ADC)。器件内部包含 $\Delta\Sigma$ ADC 核心、内部基准电压源、片上振荡器以及 I²C 接口。其中 LTD2114 与 LTD2115 还集成可编程增益放大器(PGA)和可编程数字比较器。

LTD211X 测量差分信号 VIN，即 V_{A1NP} 与 V_{A1NN} 之间的电压差。转换器由差分开关电容 $\Delta\Sigma$ 调制器和数字滤波器组成，该架构可对共模信号实现极高的抑制。输入信号与内部基准电压进行比较，数字滤波器接收来自调制器的高速比特流，并输出与输入电压成比例的数字码。

LTD211X 支持两种转换模式：单次转换(single-shot)模式和连续转换(continuous-conversion)模式。在单次转换模式下，ADC 在收到启动指令后仅对输入信号进行一次转换，将结果存入内部转换寄存器，随后进入待机状态。该模式适用于只需周期性转换或转换间隔较长的低功耗应用。在连续转换模式下，ADC 会在上一转换完成后自动启动下一次转换；连续转换速率等于所设定的数据速率。任何时刻读取数据寄存器都会获得最近一次完成的转换结果。

11.2. 功能描述

11.2.1. 多路复用器

LTD2115 内置输入多路复用器(MUX)，如图 9 所示。该 MUX 可测量四路单端或两路差分信号；此外，AIN0 与 AIN1 也可分别与 AIN3 组成差分对。MUX 的通道选择由 Config 寄存器中的 MUX[2:0] 位设置。当执行单端测量时，ADC 的负输入端通过多路复用器内部开关自动接地。

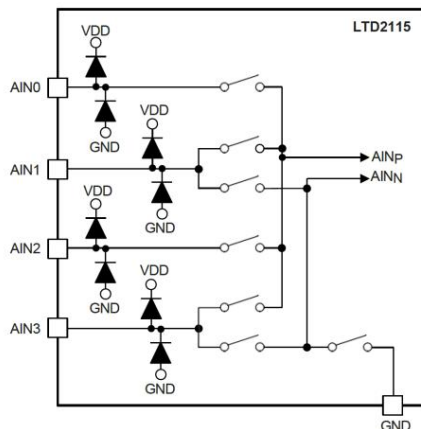


图 9 模拟输入电路示意图

LTD2113 与 LTD2114 不含输入多路复用器，仅可测量一路差分信号或一路单端信号。若进行单端测量，需在外部将 AIN1 引脚接地。在本文后续章节中，若无特殊说明，AINP 对应 AIN0，AINN 对应 AIN1(针对 LTD2113/LTD2114)。

连接到 VDD 和 GND 的静电放电(ESD)二极管可保护 LTD211X 的模拟输入。为避免二极管导通，应确保任一输入电压满足式(3)：

$$\text{GND}-0.3\text{ V} < V_{(\text{AIN}_x)} < \text{VDD}+0.3\text{ V} \quad (3)$$

若输入电压可能超出上述范围，请在输入端外接肖特基二极管并串联限流电阻，以将输入电流限制在安全值内(参见“绝对最大额定值”表)。

11.2.2. 模拟输入

LTD211X 采用开关电容输入级，电容器持续充放电以测量 AINP 与 AINN 之间的电压。输入信号被采样的频率称为采样频率，亦即调制器频率 f_{MOD}。LTD211X 内部 1 MHz 振荡器经四分频后得到 f_{MOD} = 250 kHz。由于电容值较小，从外部看来，其平均负载呈电阻性。图 10 给出了输入级结构，图 11 给出了 S₁、S₂ 开关时序。采样相位内，开关 S₁ 闭合，使 C_{A1} 充至(V_{A1NP})，C_{A2} 充至(V_{A1NN})，同时 C_B 充至差分电压(V_{A1NP}-V_{A1NP})。放电相位中，先断开 S₁，随后闭合 S₂，C_{A1} 与 C_{A2} 放电至约 0.7 V，C_B 放电至 0 V。此充放电循

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

环在 f_{MOD} 速率下产生平均电流，可用来计算等效输入阻抗 Z_{eff} ，其中 $Z_{eff} = V_{IN} / I_{AVERAGE}$ 。

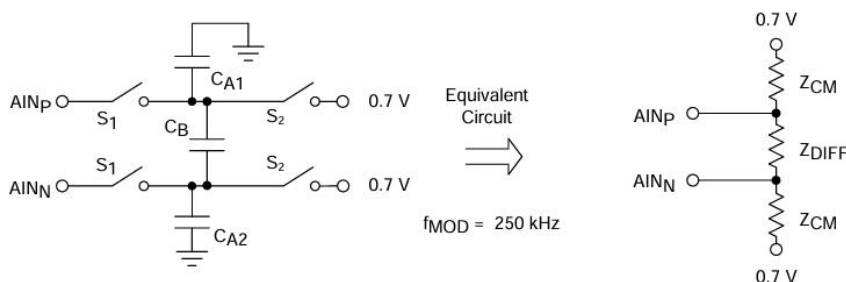


图 10 简化模拟输入电路

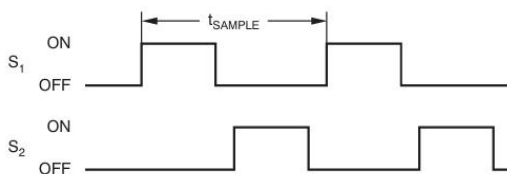


图 11 S1 与 S2 开关时序

对短接的 AIN_P 、 AIN_N 施加共模信号并测量引脚平均电流，可得到共模输入阻抗 Z_{CM} 。典型值随满量程范围而变，默认 FSR 下约为 $1.4M\Omega$ 。

差分输入阻抗 Z_{DIFF} 则通过在 AIN_P 和 AIN_N 之间施加差分信号、并将其中一个引脚固定在 $0.7V$ 来测量流经该引脚的电流。 Z_{DIFF} 与满量程范围成比例。

输入阻抗的典型值应被纳入精度预算；若信号源阻抗较高，可能需要缓冲器件。有源缓冲会带来噪声、失调及增益误差，需在高精度应用中予以评估。此外，时钟振荡器频率随温度轻微漂移，因此输入阻抗也随之漂移。在大多数应用中该漂移可忽略。

11.2.3. 满量程范围(FSR)与 LSB 大小

LTD211X 在 $\Delta\Sigma$ ADC 之前集成了可编程增益放大器(PGA)，LTD2114 与 LTD2115 可通过 Config 寄存器中的 PGA[2:0] 位设置满量程范围，支持 $\pm 6.144V$ 、 $\pm 4.096V$ 、 $\pm 2.048V$ 、 $\pm 1.024V$ 、 $\pm 0.512V$ 及 $\pm 0.256V$ 。表 3 给出了各 FSR(例如，在 FSR= $\pm 6.144V$ 时，公式中的 FSR 取值为 $6.144V$) 对应的 LSB 大小。LSB 的计算公式如下：

$$LSB = FSR / 2^{15}$$

表 3 各 FSR 对应的 LSB

FSR	LSB 大小
$\pm 6.144V^{(1)}$	187.5 μV
$\pm 4.096V^{(1)}$	125 μV
$\pm 2.048V$	62.5 μV
$\pm 1.024V$	31.25 μV
$\pm 0.512V$	15.625 μV
$\pm 0.256V$	7.8125 μV

(1) 此值表示 ADC 缩放前的满量程范围，请勿向模拟输入施加超过 $VDD+0.3V$ 的电压。

LTD2113 的满量程范围固定为 $\pm 2.048V$ 。模拟输入电压不得超出“绝对最大额定值”表中的限制。若 VDD 大于 $4V$ ，可使用 $\pm 6.144V$ 满量程以扩展输入范围。当 $VDD=3.3V$ 且设置 FSR= $\pm 4.096V$ 时，ADC 码只能覆盖 $|VIN| \leq 3.3V$ ，超出部分被截断。

11.2.4. 基准电压

LTD211X 集成片内基准，无法外接参考。初始精度与温漂已包含在电气特性表中的增益与失调规格里。

11.2.5. 振荡器

器件内部 $1MHz$ 振荡器无需外部时钟即可工作。其频率随温度与时间轻微漂移，输出数据速率与振荡器频率成比例变化。

11.2.6. 输出数据速率与转换时间

LTD211X 允许通过 Config 寄存器的 DR[2:0] 与 Config 寄存器的 DR4 位选择 8SPS 至 4kSPS 共十种输出速率。在单次转换模式下，转换时间等于 1/DR。

11.2.7. 数字比较器(仅 LTD2114 与 LTD2115)

LTD2114 和 LTD2115 内部集成可编程数字比较器，可通过 ALERT/RDY 引脚发出警报。COMP_MODE 位配置比较器为传统或窗口模式。传统比较器模式下，当转换结果超过高阈值寄存器(Hi_thresh)时，ALERT/RDY 置位；当结果低于低阈值寄存器(Lo_thresh)时清除。窗口比较器模式下，仅当结果落入阈值窗口时 ALERT/RDY 释放。

在窗口比较器模式或传统比较器模式下，可通过 Config 寄存器中的 COMP_LAT 位将比较器配置为“锁存”方式：一旦 ALERT/RDY 被拉低(或拉高)触发，即使后续输入电压恢复到阈值窗口内，警报仍保持，直到主机发出 SMBusAlert 响应，或读取 Conversion 寄存器才可清除锁存状态。

ALERT/RDY 的有效电平由 COMP_POL 位设定，可配置为高电平有效或低电平有效。两种比较器模式的时序示意图 12。

比较器还可以设置为在若干次连续转换结果都超过阈值后才拉响 ALERT/RDY。阈值由 Hi_thresh 与 Lo_thresh 寄存器给出，等待次数由 Config 寄存器的 COMP_QUE[1:0]位设定，可选择 1、2 或 4 次。“11”设置可禁用比较器功能，并将 ALERT/RDY 固定为高电平。

11.2.8. 转换就绪引脚(仅 LTD2114 与 LTD2115)

ALERT/RDY 引脚亦可配置为“转换就绪”信号。方法：将 Hi_thresh 的最高位设为 1，Lo_thresh 的最高位设为 0，即可使引脚输出转换完成脉冲。此时 COMP_POL 位仍决定极性；将 COMP_QUE[1:0]设为任意非“11”值，以保持 ALERT/RDY 功能开启，并允许转换就绪信号输出。COMP_MODE 与 COMP_LAT 位在该模式下失效。引脚仍需上拉电阻。

在连续转换模式下，LTD211X 在每次转换末尾在 ALERT/RDY 上产生约 8 μs 的“转换就绪”脉冲，如图 13。在单次转换模式下，若 COMP_POL=0，则转换结束时 ALERT/RDY 拉低。

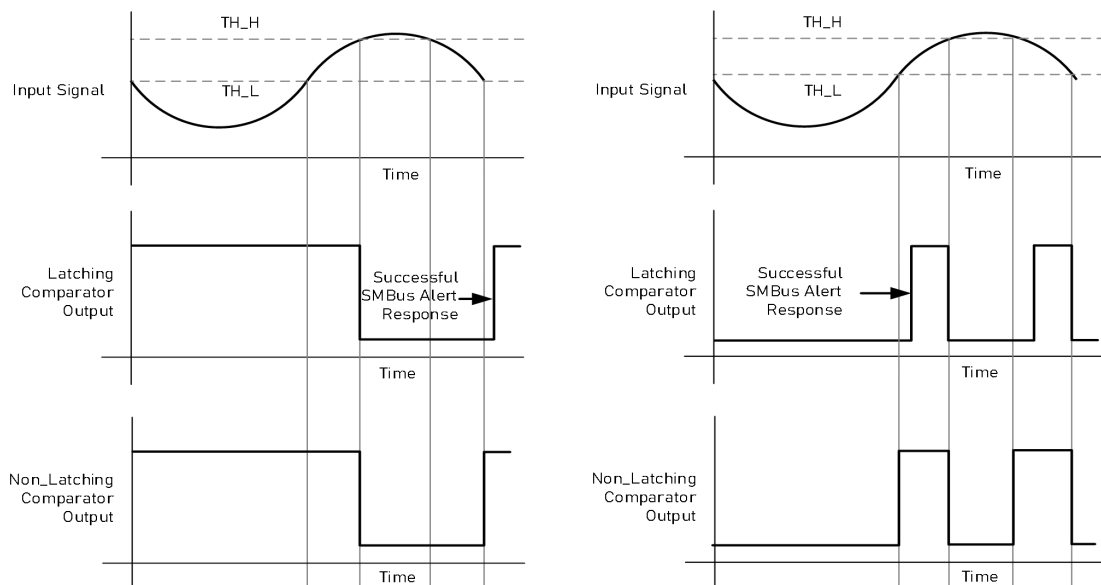


图 12 ALERT 引脚时序图(传统与窗口比较器模式)

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

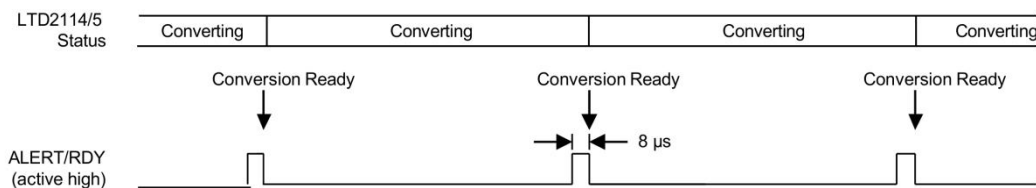


图 13 连续转换模式下的转换就绪脉冲

11.2.9. SMBusAlert 响应

在锁存比较器模式下(**COMP_LAT=1b**)，当比较器检测到转换超过阈值上限或下限时，**ALERT/RDY** 引脚变为有效。此有效状态将被锁存，只能通过读取转换数据或通过发出成功的 **SMBus** 警报响应并读取变为有效的器件 **I²C** 地址来清除。如果转换数据在有效状态清除后超过阈值上限或下限，则引脚会重新变为有效，此有效状态不会影响已在进行中的转换。

ALERT/RDY 引脚是一个开漏输出，该架构允许多个器件共享同一个接口总线。禁用时，该引脚保持高电平状态，因此不会干扰同一总线上的其他器件。当控制器检测到 **ALERT/RDY** 引脚已锁存时，控制器会向 **I²C** 总线发出 **SMBus** 警报命令(**00011001b**)。**I²C** 总线上的任何 **LTD2114** 和 **LTD2115** 数据转换器在 **ALERT/RDY** 引脚变为有效的情况下，都会对带有目标地址的命令做出响应。

如果 **I²C** 总线上的多个 **LTD211X** 使锁存的 **ALERT/RDY** 引脚变为有效，则在 **SMBus** 警报的地址响应期间通过仲裁来确定清除哪个器件的有效状态。具有最低 **I²C** 地址的器件始终会在仲裁中胜出。如果器件未在仲裁中胜出，则该器件不会清除比较器输出引脚的有效状态。然后，控制器重复 **SMBus** 警报响应，直到所有器件都清除了各自的有效状态。在窗口比较器模式下，**SMBus** 警报状态位在信号超过阈值上限时指示 **1b**，在信号超过阈值下限时指示 **0b**。

11.2.10. 温度传感器

LTD2115 集成了精密温度传感器。通过在 **Config2** 寄存器中设置位 **TS_MODE=1** 来启用温度传感器模式。温度数据表示为 **14** 位结果，在 **16** 位转换结果中保持左对齐。数据从最高有效字节(**MSB**)开始输出。读取 **2** 个数据字节时，前 **14** 位用于表示温度测量结果。一个 **14** 位 **LSB** 等于 **0.03125°C**。负数以二进制补码格式表示，如表 4 所示。

表 4 14 位温度数据格式

温度 (°C)	数字码 (BINARY)	HEX
128	01000000000000	1000
127.96875	00111111111111	0FFF
100	00110010000000	0C80
75	00100101100000	0960
50	00011001000000	0640
25	00001100100000	0320
0.25	0000000001000	0008
0.03125	00000000000001	0001
0	00000000000000	0000
-0.25	11111111111000	3FF8
-25	11110011100000	3CE0
-40	11011000000000	3B00

11.2.10.1. 温度转数字码

正温度值时：

正温度值时无需补码，只需将数字转换为 **14** 位左对齐格式的二进制代码，其中 **MSB=0** 表示正号。

例如： $50^{\circ}\text{C}/(0.03125^{\circ}\text{C}/\text{count}) = 1600 = 0640\text{h} = 00011001000000$

负温度值时：

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

通过将温度绝对值的二进制数取反加 1 来生成负数的二进制补码。然后用 MSB=1 表示负号。

例如： $|-25^{\circ}\text{C}|/(0.03125^{\circ}\text{C}/\text{count}) = 800 = 0320\text{h} = 00001100100000$

二进制补码形式： $1111001101111+1 = 11110011100000$

11.2.10.2. 数字码转温度

要从数字代码转换为温度，请首先检查 MSB 是 0 还是 1。如果 MSB 为 0，则只需将十进制码乘以 0.03125°C 即可得到结果。如果 MSB=1，则从结果中减去 1 并补全所有位。然后将结果乘以 -0.03125°C 。

例如：器件读回 0960h：0960h 的 MSB = 0。

$0960\text{h} \times 0.03125^{\circ}\text{C} = 2400 \times 0.03125^{\circ}\text{C} = 75^{\circ}\text{C}$

例如：器件读回 3CE0h：0960h 的 MSB=0。

将结果减去 1：3CE0h → 0320h

$0320\text{h} \times (-0.03125^{\circ}\text{C}) = 800 \times (-0.03125^{\circ}\text{C}) = -25^{\circ}\text{C}$

11.3. 器件功能模式

11.3.1. 复位与上电

LTD211X 在上电时自动复位，将 Config 寄存器中的所有位设为默认值。复位过程结束后，器件进入待机状态，此时模拟转换尚未开始，数字接口保持活动。这种初始待机可防止电源稳定过程中的电流浪涌。

LTD211X 还响应 I²C 总线的 general-call 复位命令(06h)。当收到该命令时，内部复位与重新上电效果相同。

11.3.2. 工作模式

LTD211X 具有两种工作模式：连续转换模式与单次转换模式，由 Config 寄存器中的 MODE 位选择。

11.3.3. 单次转换模式

当配置寄存器中的 MODE 位设置为 1b 时，LTD211X 将进入掉电状态，并以单次采样模式运行。这种掉电状态是 LTD211x 首次通电时的默认状态。虽然处于掉电状态，设备仍能响应指令。LTD211X 会保持这种掉电状态，直到配置寄存器的操作状态(OS)位被写入 1b。当 OS 位被激活时，设备会在约 25μs 内重新通电，将 OS 位重置为 0b，并开始单次转换。当转换数据准备就绪时，设备会再次掉电。在转换过程中向 OS 位写入 1b 不会产生任何影响。若要切换至连续转换模式，请将配置寄存器中的 MODE 位写入 0b。

11.3.4. 连续转换模式

当 MODE 位设为 0 时，LTD211X 持续执行转换。每完成一次转换，结果即写入 Conversion 寄存器，随后立即开始下一次转换。当写入新的配置时，当前转换先用旧配置完成，然后再按新配置继续连续转换。要返回单次模式，可将 MODE 位写 1 或复位器件。

11.3.5. 低功耗占空比

$\Delta\Sigma$ 模数转换器的噪声性能通常会在降低输出数据速率时得到提升，因为此时需要对内部调制器的更多采样值进行平均处理以生成一个转换结果。在功耗至关重要的应用场景中，这种低数据速率下的噪声性能提升并非总是必需。针对此类应用，LTD211X 支持占空比循环技术，通过周期性请求高数据速率读数(实际数据速率较低)来实现显著的节能效果。例如，当 LTD211X 处于断电状态且数据速率设置为 860 SPS 时，微控制器可指令其每 125 毫秒执行一次单次转换(8 SPS)。此时 860 SPS 的转换仅需约 1.2 毫秒，因此 LTD211X 在剩余的 123.8 毫秒内进入断电状态。在此配置下，LTD211X 的功耗仅为连续转换模式下能耗的百分之一。占空比循环速率完全由控制器自主设定。LTD211X 还提供不采用占空比循环的低数据速率方案，若需要也可实现更优的噪声性能。

11.3.6. 校准

11.3.6.1. 偏移和满量程增益寄存器

使用偏移和满量程增益寄存器分别校正偏移误差及满量程误差。在将输出数据乘以满量程寄存器之前，需先减去偏移校准寄存器的值，然后除以 4000h。校准完成后，最终输出数据将被限制为 16 位范围。

11.3.6.2. 偏移校准寄存器

偏移校准寄存器由一个 16 位寄存器组成，如表 5 所示。转换结果中会减去偏移值。该偏移值以二进制补码格式表示，其最大正值为 7FFFh，最大负值为 8000h。当寄存器值为 0000h 时，不进行偏移校正。尽管偏移校准寄存器提供了广泛的偏移值选择范围，但校准后的输入信号不得超过预校准范围的 $\pm 106\%$ ；否则，ADC 将超出其工作范围。表 6 列出了偏移校准寄存器的示例值。

表 5 偏移校准寄存器

寄存器	地址	位															
0FC	04h	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

表 6 偏移校准寄存器值

寄存器值	理想输出值 ^①
0001h	FFFFh
0000h	0000h
FFFFh	0001h

11.3.6.3. 满量程校准寄存器

满量程校准寄存器是一个 16 位寄存器组成，如表 7 所示。满量程校准值采用二进制格式，归一化为值为 4000h 的单位增益因子。表 8 列出了所选增益因子的寄存器值。大于归一化值的增益误差通过使用小于 4000h 的满量程值来校正。尽管满量程寄存器提供了广泛的可能值，但校准后的输入信号不得超过预校准输入范围的 $\pm 106\%$ ；否则，ADC 超出范围。

表 7 满量程校准寄存器

寄存器	地址	位															
F5C	05h	D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

表 8 满量程校准寄存器值

寄存器值	增益系数
4333h	1.05
4000h	1.00
3CCC	0.95

11.4. 编程

11.4.1. I²C 接口

LTD211X 通过 I²C 接口通信。I²C 为两线制开漏总线，支持一条总线上多个设备与多个主控。总线上的器件仅能将线路拉低至地；拉高由上拉电阻完成，因此无人驱动时 SDA、SCL 维持高电平。由于开漏结构，禁止两个器件同时拉低同一条线，否则将造成驱动冲突。

I²C 通信总由一主一从两个节点参与；主设备负责产生时钟并发起通信，从设备仅在寻址后响应。LTD211X 仅能作为从设备。总线包含 SDA(数据信号)与 SCL(时钟信号)。所有数据以 8 位为组在 SDA 上传输，位传输在 SCL 为低时，主机驱动 SDA；SCL 上升沿把 SDA 电平采样进寄存器。若 SDA 低电平保持超过 25 ms，总线将超时复位。

SDA 为双向线：主机从从机读数据时，从机驱动 SDA；主机写数据时，主机驱动 SDA。SCL 仅由主机驱动，LTD211X 从不拉低 SCL。

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

空闲状态下两条线均为高电平。只有主机可发起通信：先产生 START 条件(SCL 高期间 SDA 从高跳到低)，随后发送 7 位从地址与读/写位。被寻址从机在 SDA 上应答(ACK, 拉低 SDA 一个时钟位)。数据字节发送完毕后，由接收方在第 9 个时钟位应答。

若主机在数据阶段或地址阶段未收到 ACK，即产生 NACK：主机在 NACK 位期间保持 SDA 高电平。若设备不存在或未准备好，就会出现 NACK。通信结束由 STOP 条件指示(SCL 高期间 SDA 从低跳到高)。主机也可在总线保持忙状态时发起重复 START 条件，而不先发送 STOP。

11.4.1.1. I²C 地址选择

LTD211X 有一个地址引脚 ADDR，用于配置器件的 I²C 从地址。ADDR 可接 GND、VDD、SDA 或 SCL，从而实现四种地址(见表 9)。ADDR 在 SCL 的高电平期间连续采样；若将 SDA 作为地址，需在 SCL 拉高后的 100 ns 内保持 SDA 为低，以确保器件正确解码地址。

表 9 地址引脚与目标地址的对应关系

ADDR 连接	目标地址(7 位)
GND	1001000
VDD	1001001
SDA	1001010
SCL	1001011

11.4.1.2. I²C 通用呼叫

当 I²C 总线发送通用呼叫地址 0000000x 且第 8 位为 0 时，LTD211X 会应答。若第二字节为 00000110h(06h)，器件执行内部复位并进入掉电状态。

11.4.1.3. I²C 速率模式

I²C 支持三种速率：标准模式(≤100 kHz)、快速模式(≤400 kHz)与高速模式(Hs≤3.4 MHz)。LTD211X 兼容全部三种模式。标准或快速模式下无需特殊设置。要启用高速模式，主机须在 START 条件后发送特殊 Hs 主机码 00001xxx，其中 xxx 为主机特定定位。该字节与普通地址不同，其第 8 位不表示读写位，且从设备不得应答。LTD211X 检测到 Hs 主机码后，会忽略 NACK 并切换至最高 3.4 MHz 速率，直到下一个 STOP 条件。

11.4.2. 从设备操作

LTD211X 既可作为从接收器也可作为从发送器，但作为从设备时永远不驱动 SCL。

11.4.3. 接收模式

在从接收模式中，主机首先发送 7 位器件地址与写位(R/W=0)。LTD211X 在应答后，主机发送寄存器指针寄存器 Address Pointer 值。LTD211X 再次 ACK，然后主机写入两个字节数据，按高字节在前、低字节在后的顺序，LTD211X 对每个字节都应答。

11.4.4. 发送模式

在从发送模式中，主机发送 7 位地址并置读位(R/W=1)，LTD211X 应答后进入发送模式。随后，LTD211X 送出寄存器指针所指寄存器的高字节，主机 ACK；再送出低字节，主机可通过 NACK 或发送 START/STOP 来结束读取。

11.4.5. 寄存器读写

要访问 LTD211X 的特定寄存器，主机必须先将寄存器指针寄存器(Address Pointer)写入所需的地址值(位 P2:P0)。该写操作包含从地址字节、写位以及从机应答。寄存器指针写完后，主机可发送 STOP 或重复 START。

读操作时，P2:P0 中的先前值决定从哪个寄存器读取；若需要读取其他寄存器，必须重新写入寄存器指针。要写新值到 P2:P0，可在 START 后发送地址字节(写位 0)与寄存器指针字节，不需数据字节即可 STOP。随后主机可发起新的 START，发送地址字节(读位 1)开始读取，如图 14 所示。

当连续从同一寄存器读取时，无需重复写指针寄存器；LTD211X 会保留 P2:P0。然而，每次写操作都必须包含正确的寄存器

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

指针值。

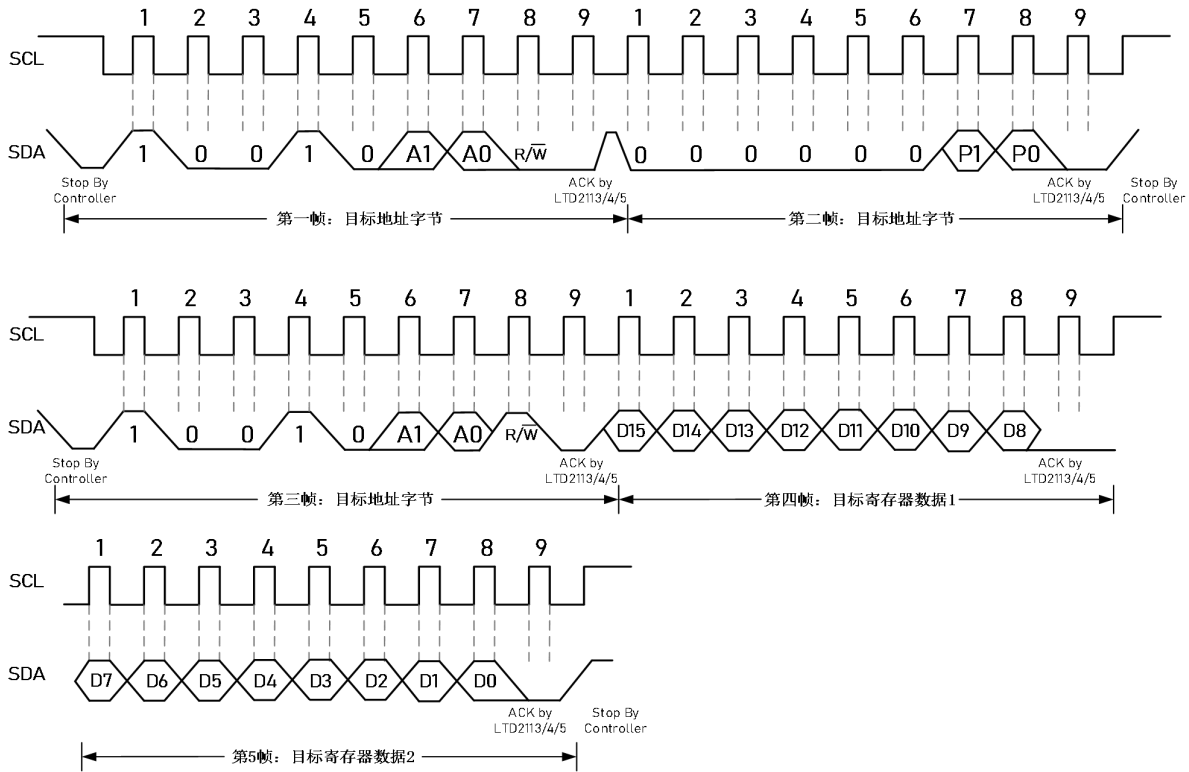


图 14 LTD211X 读时序

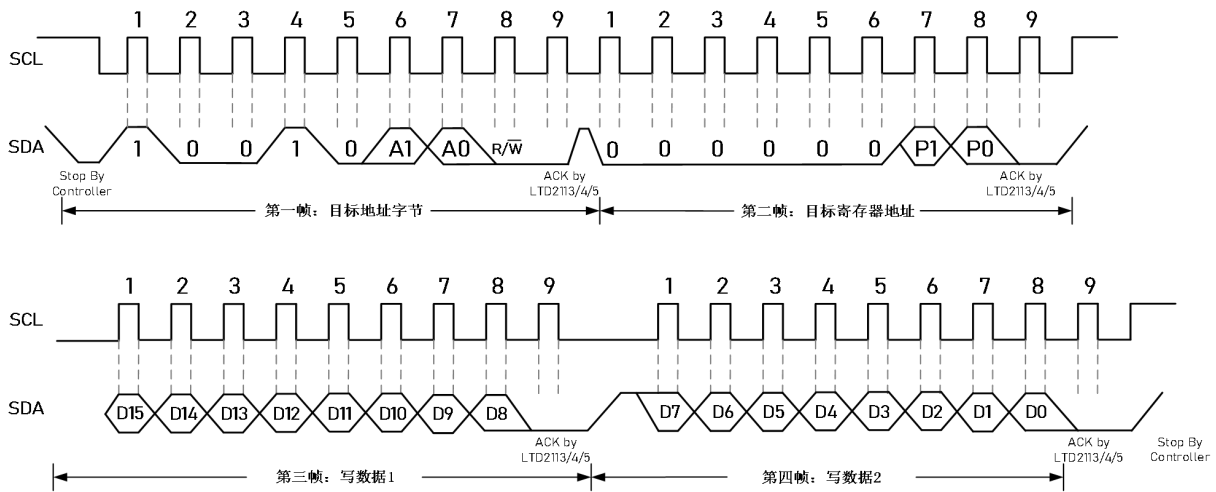


图 15 LTD211X 写时序

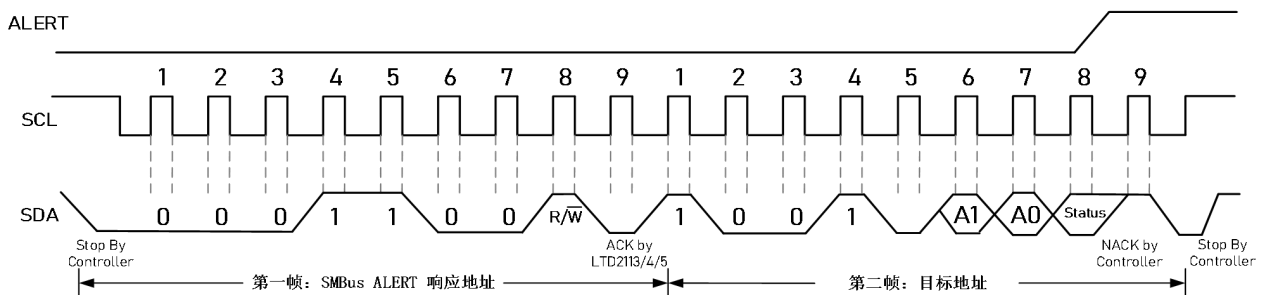


图 16 Alert 响应时序

11.4.6. 数据格式

LTD211X 以 16 位二进制二补码格式输出转换结果。正满量程(+FS)输入对应输出码 7FFFh，负满量程(-FS)输入对应输出码 8000h。超过满量程的输入会被钳位至这两个码值。表 10 总结了不同输入信号的理想输出码，图 17 则给出了输入电压与输出码的阶梯关系。

表 10 输入信号与理想输出码

输入信号 $V_{IN}=(V_{AINP}-V_{AINN})$	理想输出码
$\geq +FS \cdot (2^{15}-1)/2^{15}$	7FFFh
$+FS/2^{15}$	0001h
0	0000h
$-FS/2^{15}$	FFFFh
$\leq -FS$	8000h

(1) 不包含噪声、积分/微分非线性、失调及增益误差影响。

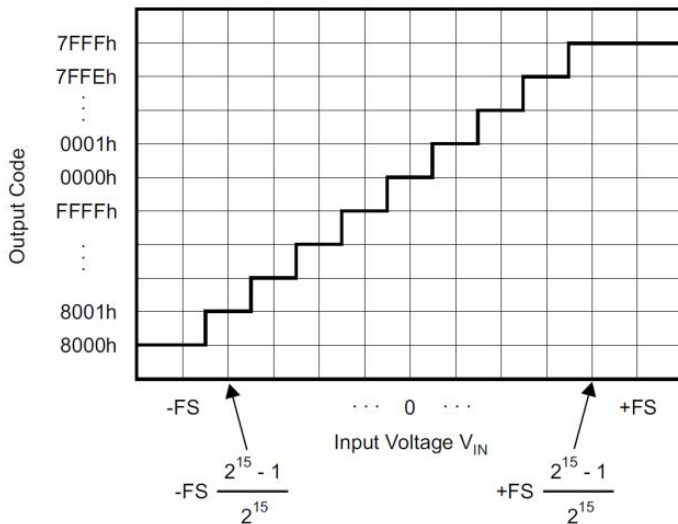


图 17 输出码转换曲线

11.5. 寄存器映射

LTD211X 共有 8 个寄存器，可通过 I²C 接口访问：Address Pointer、Conversion、Config、Config2，以及用于比较器功能的 Lo_thresh 与 Hi_thresh(LTD2113 不含比较器，因此无阈值寄存器)，用于校准功能的 OFC 和 FSC。在下述表格中，R/W=Read/Write;R=Read only;W=Write only;-n=value after reset。

11.5.1. Address Pointer 寄存器

通过写入 Address Pointer 寄存器来选择后续访问的寄存器，见图 14。

表 11 Address Pointer 寄存器结构

7	6	5	4	3	2	1	0
0	0	0	0	0		P[2:0]	
W-0h		W-0h		W-0h		W-0h	W-0h

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

表 12 Address Pointer 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
7:3	保留	W	0h	必须写 0h
2:0	P[2:0]	W	0h	寄存器地址指针 00h : Conversion 寄存器 01h : Config 寄存器 02h : Lo_thresh 寄存器 03h : Hi_thresh 寄存器 04h : OFC 寄存器 05h : FSC 寄存器 06h : Config2 寄存器

11.5.2. Conversion 寄存器

16 位 Conversion 寄存器以二补码格式存储最近一次转换结果。上电后寄存器清零，直到第一次转换完成。

表 13 Conversion 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h
7	6	5	4	3	2	1	0
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h

表 14 Conversion 寄存器描述

位	字段	类型	复位	描述
15:0	D15:0	R	0000h	16 位转换结果

11.5.3. Config 寄存器

16 位 Config 寄存器用于控制工作模式、输入通道、数据速率、满量程以及比较器功能。

表 15 Config 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
OS	MUX[2:0]			PGA[2:0]			MODE
R/W-1h	R/W-0h			R/W-2h			R/W-1h
7	6	5	4	3	2	1	0
DR[2:0]		COMP_MODE		COMP_POL	COMP_LAT	COMP_QUE[1:0]	
R/W-4h		R/W-0h		R/W-0h	R/W-0h	R/W-3h	

16 位高精度低功耗模数转换器(ADC)

表 16 Config 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
15	OS	R/W	1h	单次转换启动/状态
14:12	MUX[2:0]	R/W	0h	000b : AINP = AIN0 and AINN = AIN1 (默认) 001b : AINP = AIN0 and AINN = AIN3 010b : AINP = AIN1 and AINN = AIN3 011b : AINP = AIN2 and AINN = AIN3 100b : AINP = AIN0 and AINN = GND 101b : AINP = AIN1 and AINN = GND 110b : AINP = AIN2 and AINN = GND 111b : AINP = AIN3 and AINN = GND
11:9	PGA[2:0]	R/W	2h	000b : FSR = $\pm 6.144\text{ V}^{(1)}$ 001b : FSR = $\pm 4.096\text{ V}^{(1)}$ 010b : FSR = $\pm 2.048\text{ V}$ (默认) 011b : FSR = $\pm 1.024\text{ V}$ 100b : FSR = $\pm 0.512\text{ V}$ 101b : FSR = $\pm 0.256\text{ V}$ 110b : FSR = $\pm 0.256\text{ V}$ 111b : FSR = $\pm 0.256\text{ V}$
8	MODE	R/W	1h	0: 连续转换 1: 单次/掉电
7:5	DR[2:0]	R/W	4h	000b : 8 SPS 001b : 16 SPS 010b : 32 SPS 011b : 64 SPS 100b : 128 SPS (默认) 101b : 250 SPS 110b : 475 SPS 111b : 860 SPS
4	COMP_MODE	R/W	0h	比较器模式: 传统/窗口
3	COMP_POL	R/W	0h	比较器极性: 低有效/高有效
2	COMP_LAT	R/W	0h	比较器锁存使能
1:0	COMP_QUE[1:0]	R/W	3h	比较器队列/禁用

(1) 该参数定义了 ADC 的满量程范围。请勿向器件模拟输入端施加超过 $VDD + 0.3\text{ V}$ 的电压。

11.5.4. Lo_thresh 与 Hi_thresh 寄存器

比较器的上下阈值分别存储在两个 16 位二补码寄存器中。由于比较器位于 PGA 之后，当 PGA 设置改变时，应同步更新阈值寄存器。

若要将 ALERT/RDY 用作转换就绪信号，应将 Hi_thresh 的 MSB 置 1，而 Lo_thresh 的 MSB 置 0。若要启用比较器功能，则 Hi_thresh 必须恒大于 Lo_thresh。

表 17 Lo_thresh Register 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
Lo_thresh15	Lo_thresh14	Lo_thresh13	Lo_thresh12	Lo_thresh11	Lo_thresh10	Lo_thresh9	Lo_thresh8
R/W-1h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h
7	6	5	4	3	2	1	0
Lo_thresh7	Lo_thresh6	Lo_thresh5	Lo_thresh4	Lo_thresh3	Lo_thresh2	Lo_thresh1	Lo_thresh0
R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h

表 18 Hi_thresh Register 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
Hi_thresh15	Hi_thresh14	Hi_thresh13	Hi_thresh12	Hi_thresh11	Hi_thresh10	Hi_thresh9	Hi_thresh8
R/W-0h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h
7	6	5	4	3	2	1	0
Hi_thresh7	Hi_thresh6	Hi_thresh5	Hi_thresh4	Hi_thresh3	Hi_thresh2	Hi_thresh1	Hi_thresh0
R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h	R/W-1h

表 19 Hi/Li_thresh Register 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
15:0	Lo_thresh[15:0]	R/W	8000h	低阈值
15:0	Hi_thresh[15:0]	R/W	7FFFh	高阈值

11.5.5. OFC 寄存器

16 位 OFC 寄存器用于输出偏移校准。

表 20 OFC 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
OFC[15:8]							
R/W-00h							
7	6	5	4	3	2	1	0
OFC[7:0]							
R/W-00h							

表 21 OFC 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
偏移校准				
15:0	OFC[15:0]	R/W	0000h	二进制补码格式的 16 位字偏移校准。ADC 在满量程作之前从转换结果中减去偏移值。

11.5.6. FSC 寄存器

16 位 FSC 寄存器用于输出增益校准。

表 22 FSC 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
FSC[15:8]							
R/W-00h							
7	6	5	4	3	2	1	0
FSC[7:0]							
R/W-00h							

表 23 FSC 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
15:0	FSC[15:0]	R/W	0000h	满量程增益校准 直接二进制格式的 16 位字满量程增益校准。ADC 将寄存器值除以 4000h，然后将结果乘以转换数据。缩放作发生在 offset 作之后。

11.5.7. Config2 寄存器

16 位 Config2 寄存器用于系统更多配置功能。

表 24 Config2 寄存器结构

15	14	13	12	11	10	9	8
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
7	6	5	4	3	2	1	0
-	-	-	-	-	DR4	-	TS_MODE
-	-	-	-	-	R/W-0h	-	R/W-0h

表 25 Config2 寄存器描述

位	字段	类型	复位	说明
15:3	-	-	0h	与 DR[2:0]配合数据速率控制{DR4,DR[2:0]}
2	DR4	R/W	0h	1000=2kSPS 1001=4kSPS
1	-	-	0h	-
0	TS_MODE	R/W	0h	0: ADC 模式 (默认) 1: 温度模式

12. 应用与实现

12.1. 应用信息

以下小节给出 LTD211X 在不同场景下的示例电路与设计建议。

12.1.1. 基本连接

LTD2115 的典型 I²C 连接如图 18 所示。

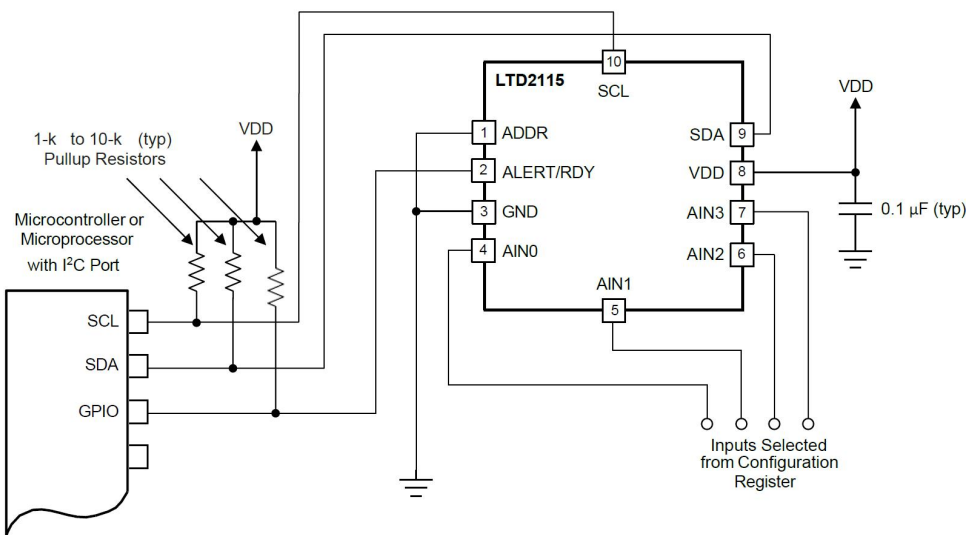


图 18 LTD2115 典型连接示例

LTD211X 的全差分输入非常适合与热电偶、热敏电阻等中等低阻抗源连接。虽然 LTD211X 能读取双极性差分信号，但输入端任何时候都不能承受负于地电压。在转换期间 LTD211X 会产生瞬时电流，推荐在电源脚旁放置 0.1 μF 旁路电容以提供瞬时电流。

LTD211X 直接兼容 I²C 标准、快速与高速模式的控制器，包括主从或单主配置。器件不执行时钟延展(clock- stretching)，即不会拉低 SCL，因此除非总线上还有其他需要拉低时钟的器件，无需考虑时钟延展情形。

SDA 和 SCL 线路需上拉电阻，因为总线为开漏结构。电阻值需根据总线容性与目标速率折衷：较大阻值功耗低但限制上升沿、降低总线速度；较小阻值可支持更高速度，但功耗增加且要求驱动能力。长总线因电容较大，通常需要较小的上拉电阻。

12.1.2. 单端输入

LTD2113 与 LTD2114 各能测量一路单端信号，LTD2115 最多可测量四路单端信号。LTD2113/1114 可通过将 AIN1 固定接地实现单端测量；LTD2115 则可通过配置 MUX[2:0]位选择单端通道。图 19 给出 LTD2115 的单端连接示例。单端输入量程为 0 V 至正电源或+FS(二者较小者)。器件不允许输入负于地的电压，并且在此范围内保持线性。

LTD211X 的差分量程为±FSR，而单端配置仅使用其一半动态范围。差分配置可最大化 ADC 动态范围，且相较单端模式具有更好的共模噪声抑制。

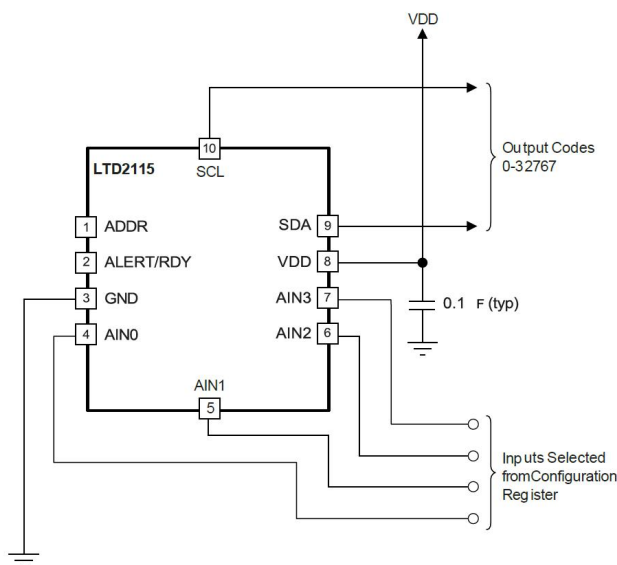


图 19 单端输入测量示例

注：为简明起见，数字引脚连线未在图中绘出。

通过设置 MUX[2:0] 位，LTD2115 还可将 AIN3 配置为公共参考端，使 AIN0、AIN1、AIN2 均相对于 AIN3 测量。该方案允许在允许的共模范围内使用负差分电压，但不提供共模抑制。

12.1.3. 输入保护

LTD211X 采用低电压 CMOS 工艺，模拟输入包含至电源轨的保护二极管。二极管的电流能力有限，若模拟输入电压超过电源轨约 300 mV 且持续过长，器件可能受损。一种保护过压的简单方法是在输入串联限流电阻。LTD211X 模拟输入允许连续电流最大 10 mA。

12.1.4. 未用引脚处理

未使用的模拟输入可悬空，也可通过电阻接地或接 VDD；接地通常可降低泄漏电流。对 NC(未连接)引脚，可保留悬空或用小电路上拉至 VDD。若未使用 ALERT/RDY 引脚，可悬空或通过上拉电阻拉至 VDD。

12.1.5. 模拟输入滤波

模拟前端滤波可实现两点目的：

1. 在采样过程中限制混叠(Aliasing)现象；
2. 降低外部噪声参与测量结果。

当输入信号中包含高于采样频率一半(奈奎斯特频率)的分量时，这些分量会折叠回较低频率并落入感兴趣带宽，造成混叠。数字滤波器的幅频响应会在调制器频率 f_{MOD} 及其整数倍处周期性重复，如图 20 所示。若输入信号在这些重复点附近具有频率成分，这些成分将仅按数字滤波器衰减量削减，再次折入通带。因此，在模数转换器前加入外部模拟抗混叠滤波器十分必要。

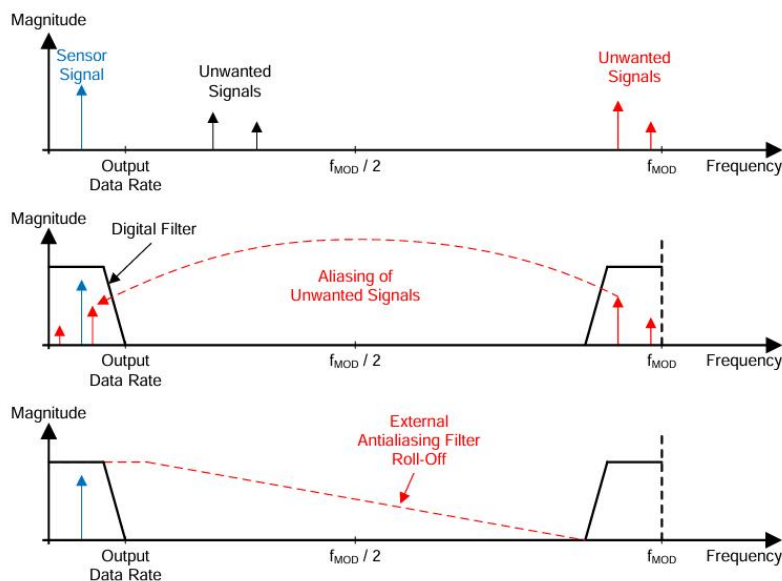


图 20 混叠效应示意图

许多传感器本身频率带宽有限，例如热电偶输出变化速率低，故本身不会混叠。然而，沿传感器连线的噪声可能折叠入通带，例如工频及其谐波、旁路电机、手机等产生的 EMI/RFI，或 PCB 上的时钟信号。模拟输入滤波可抑制这些非目标信号。

在大多数应用中，使用一阶 RC 滤波器即可显著抑制混叠；其截止频率一般选在输出数据速率或 $10 \times$ 输出数据速率。理论上任何高于 $f_{\text{MOD}}/2$ 的信号都会被 LTD211X 的数字滤波器衰减至噪声以下；因此 RC 滤波器主要用于抑制 $f_{\text{MOD}}/2$ 以内的外部噪声。

12.1.6. 多器件连接

在同一 I²C 总线上最多可连接四颗 LTD211X，通过不同的 ADDR 引脚配置为四个独立 I²C 地址。ADDR 可接 GND、VDD、SDA 或 SCL 以选择地址。若使用 SDA 作为地址引脚，需要在 SCL 线拉低后保持 SDA 低电平至少 100 ns，以确保器件在通信期间正确解码地址。

图 21 展示了四颗 LTD2115 并联在一条 I²C 总线的示例。每条总线仅需一组上拉电阻，不过随着器件数量增加与线路延长，总线电容上升，可能需要适当减小上拉阻值以维持所需的上升沿速度。

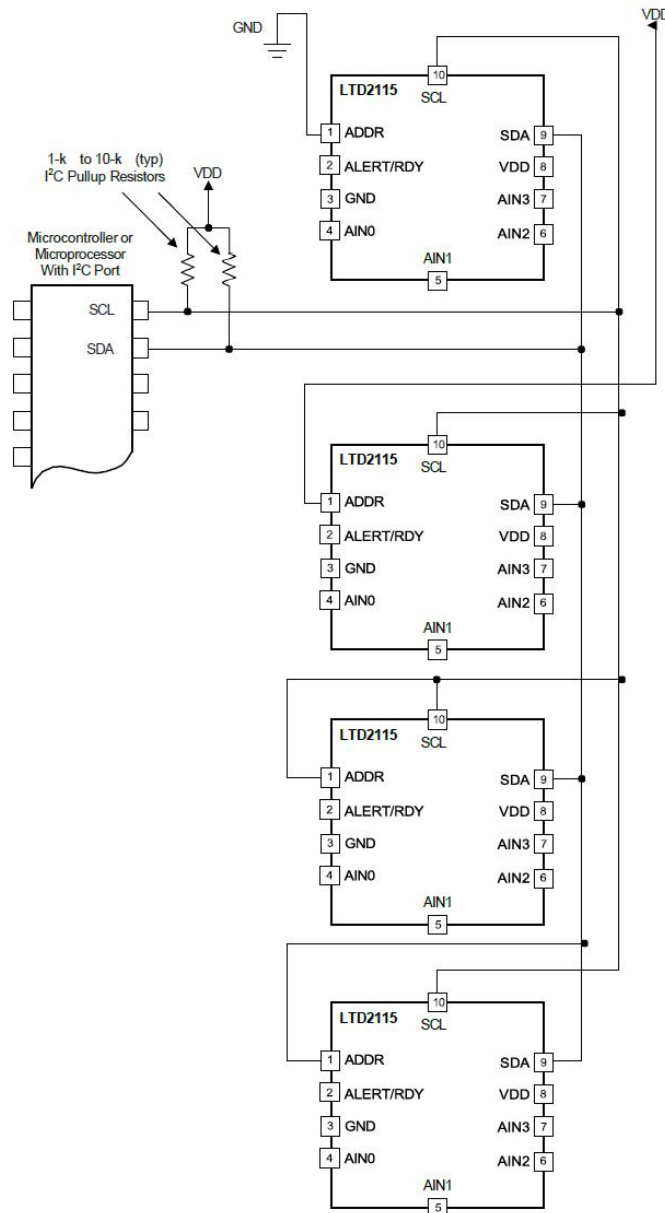


图 21 多颗 LTD211X 器件连接示例图

注：为简洁起见，图中省略了 LTD211X 的电源及输入连接；ADDR 引脚决定 I²C 地址。

12.1.7. 快速上手指南

本节给出 LTD211X 通信的简要示例。硬件包含：一颗 LTD211X(I²C 地址 1001000b)、带 I²C 接口的微控制器，以及若干离散元件(电阻、电容、串口连接器等)和 2V ~ 5V 供电。图 22 示出基本硬件连接。

LTD211X 通过 I²C 与主机(微控制器)通信。主机提供 SCL 时钟，SDA 传输数据；LTD211X 不会驱动 SCL。详细 MCU 编程与调试请参阅对应 MCU 数据手册。

通信流程：

1. 写 Config 寄存器(将器件设为连续转换模式)：

- 第 1 字节：0b10010000 (7 位地址+写位 0)
- 第 2 字节：0b00000001 (寄存器指针指向 Config)
- 第 3 字节：0b10000100 (Config 高字节)
- 第 4 字节：0b00000011 (Config 低字节)

2. 写 AddressPointer 寄存器(指向 Conversion):

-第 1 字节: 0b10010000

-第 2 字节: 0b00000000

3. 读 Conversion 寄存器:

-第 1 字节: 0b10010001(7 位地址+读位 1)

-第 2 字节: LTD211X 返回转换结果高字节

-第 3 字节: LTD211X 返回转换结果低字节

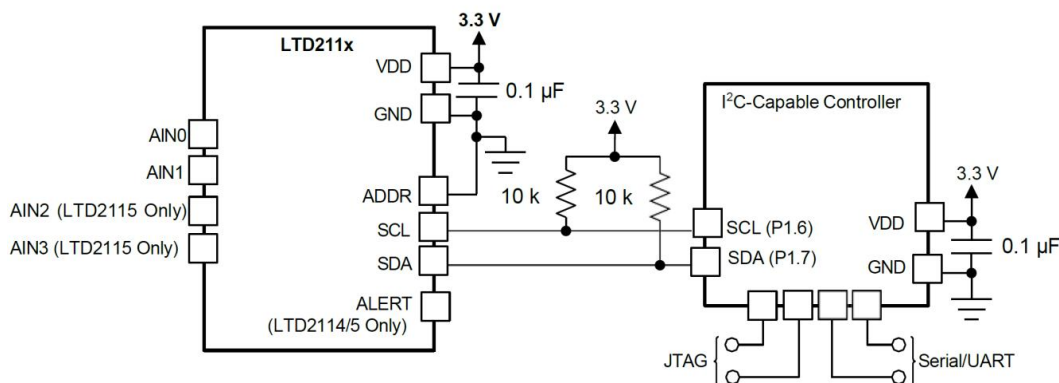


图 22 基本硬件配置示例图

注: 图中省略 LTD211X 电源/输入连接, 为简化示意。ADDR 引脚决定 I²C 地址。

12.2. 典型应用

基于分流电阻的电流检测方案被广泛用于监测负载电流。在低侧检测架构中, 分流电阻的共模电压接近地, 因此测量与总线电压无关。图 23 展示了一个双向、低侧电流检测电路示例。电路通过测量分流电阻两端电压, 并利用低漂移运算放大器进行放大与抬升, 之后由 LTD2115 进行数字化并通过 I²C 送至微控制器。该方案能够高精度测量流经分流电阻的双向电流。

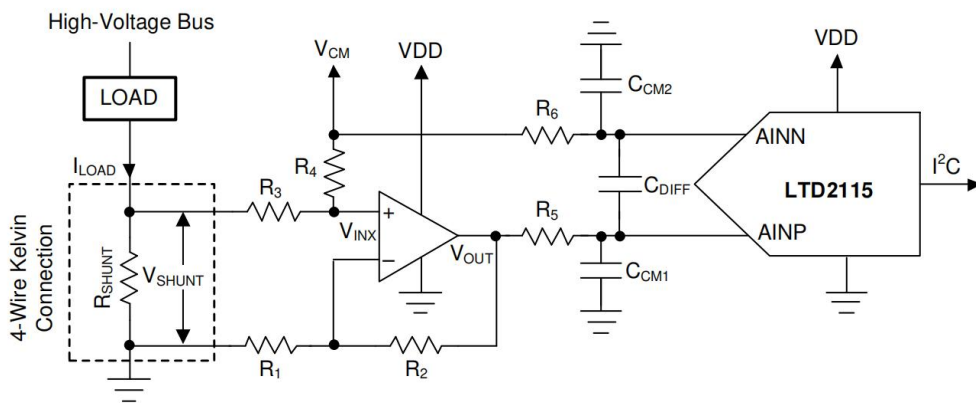


图 23 低侧电流分流监测电路图

12.2.1. 设计需求

表 26 给出了该应用的设计参数。

表 26 设计参数

设计参数	数值	单位
电源电压(VDD)	5	V
分流电阻电压(V _{SHUNT})	±50	mV
输出数据速率(DR)	≥200	次读数/秒
典型测量精度(T _A =25 °C)	±0.2	%

12.2.2. 详细设计步骤

电路第一级采用低漂移运算放大器构成非反相求和放大器，目的：

1. 将以地为参考的分流电压 V_{SHUNT} 抬升到共模电压 V_{CM} ，以便在单电源系统中实现双向电流测量。非反端电压(V_{INX})表达式下式：

$$V_{INX} = (V_{CM} \cdot R_3 + V_{SHUNT} \cdot R_4) / (R_3 + R_4)$$

2. 放大抬升后的电压(V_{INX})。运算放大器以增益 $(1+R_2/R_1)$ 的非反相放大配置工作，输出电压 V_{OUT} ：

$$V_{OUT} = V_{INX} \cdot (1 + R_2/R_1)$$

若在图 23 中取 $R_1=R_3$ ， $R_2=R_4$ ，可将上述公式简化为：

$$V_{OUT} - V_{CM} = V_{SHUNT} \cdot (1 + R_2/R_1) / (1 + R_4/R_3)$$

RC 滤波器之后的 ADC 差分输入电压如上式所示，可根据所选电阻及共模电压计算。

12.2.2.1. 分流电阻选择

分流电阻(R_{SHUNT})串联于负载回路如图 23 所示，可精确转换为负载电流。若分流电阻上的压降 $|V_{SHUNT}|$ 占总线电压较大比例，则降低系统效率；若 $|V_{SHUNT}|$ 太小，将对 ADC、运放及高精度电阻提出更高要求。需确保分流端子的绝对电压不超出运放输入共模范围。分流电阻功耗随电流上升而导致温升，为减小增益误差应选择低温漂、低阻值器件，并采用四端开尔文连接以消除走线电阻影响。

12.2.2.2. 运算放大器考虑

本设计示例对运放的要求：

- 单电源 5V 供电
- 低输入失调电压($< 10 \mu V$)与低漂移($< 0.5 \mu V/^\circ C$)
- 轨到轨输入/输出能力
- 低热噪声与 $1/f$ 噪声
- 高共模抑制比($\geq 100 \text{ dB}$)

运算放大器满足以上要求，因而被采纳。

12.2.2.3. ADC 输入共模电压

共模电压 V_{CM} 由精密电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 设定。当 $R_1=R_3$ 、 $R_2=R_4$ 且 $V_{SHUNT}=0 \text{ V}$ 时，可得 $V_{OUT}=V_{CM}$ 。若将 V_{OUT} 连接至 ADC 正输入 (A_{INP})， V_{CM} 接 ADC 负输入 (A_{INN})，则 V_{CM} 作为 ADC 的共模电压。为充分利用 ADC 动态范围，可将 V_{CM} 置于 $V_{DD}/2$ 处； V_{CM} 可由分压器或缓冲运放产生。

12.2.2.4. 电阻(R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4)的选择

电阻 $R_1 \sim R_4$ 的比例与精度直接决定系统整体精度。忽略一阶 RC 滤波器影响时，差分 ADC 输入的失调项 $V_{OUT,OS}$ 与增益 A_{OUT} 分别由下式给出：

$$V_{OUT,OS} = V_{CM} \cdot (R_2/R_1 - R_3/R_4) / (1 + R_3/R_4)$$

$$A_{OUT} = (1 + R_2/R_1) / (1 + R_4/R_3)$$

若 $R_1=R_3$ 且 $R_2=R_4$ ，则 $V_{OUT,OS}=0$ ，共模电压仅用于抬升 V_{SHUNT} 而不会在 ADC 差分端引入误差。高精度电阻可获得最佳的共模抑制与增益精度。

12.2.2.5. 噪声与输入阻抗考虑

若 $v_{n,RS}$ 为所有电阻的输入参考均方根噪声， $v_{n,OP}$ 为运算放大器的输入参考噪声， $v_{n,ADC}$ 为 LTD2115 的输入参考噪声，则整个系

统的等效输入噪声 V_n 可由公式(13)估算:

$$V_n^2 = V_{n,RS}^2 + V_{n,OP}^2 + V_{n,ADC}^2 / (1 + R_2/R_1)^2$$

注意, 运放增益级会抑制 ADC 自身噪声贡献 $V_{n,ADC}$ 。

12.2.2.6. 一阶 RC 滤波器考虑

尽管器件的数字滤波器可衰减高频噪声, 但在 ADC 输入端使用一阶低通 RC 滤波器可进一步抑制带外噪声并避免混叠。 R_5 、 R_6 与差分电容 C_{DIFF} 形成的差分 RC 滤波器, 其 -3 dB 截止频率 f_c 由公式(16)给出:

$$f_c = 1/[2\pi*(R_5+R_6)*C_{DIFF}]$$

应限制滤波电阻总值低于 1 k Ω , 以免输入电流在 R 上产生额外误差电压。

此外, 在每条共模线上并联电容 C_{CM1} 与 C_{CM2} , 用于抑制高频共模噪声; 应选择一个差分电容 C_{DIFF} , 其值至少比 C_{CM} 大一个数量级(10 \times), 以防共模噪声由于电容不匹配转换为差分噪声。

12.2.2.7. 电路实现

表 27 列出了本设计选择的器件参数。

表 27 器件参数

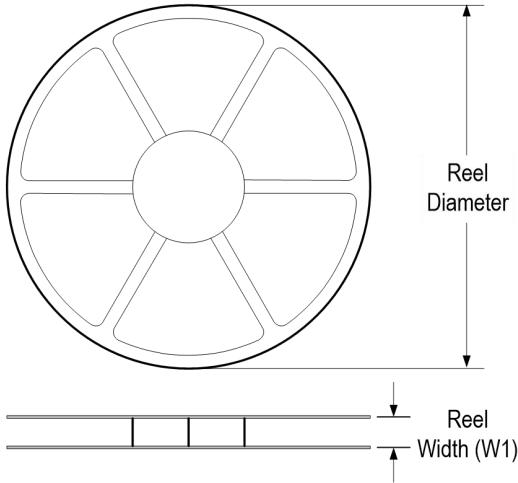
参数	数值
V_{CM}	2.5 V
ADC 满量程(FSR)	± 0.256 V
输出数据速率	250 SPS
R_1, R_3	1 k Ω (1%精密电阻)
R_2, R_4	5 k Ω (1%)
R_5, R_6	100 Ω (1%)
C_{DIFF}	0.22 μ F
C_{CM1}, C_{CM2}	0.022 μ F

当 V_{SHUNT} 在 -50 mV 至 +50 mV 范围内变化时, ADC 输入端得到 -0.250 V 至 +0.250 V 的差分电压, 因此 FSR 设为 ± 0.256 V 以最大化动态范围。差分 RC 滤波器及共模 RC 滤波器的 -3 dB 截止频率分别约为 3.6 kHz 与 0.36 kHz。

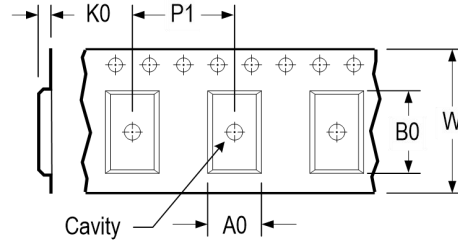
R_{SHUNT} 通常取 0.01 Ω 至 100 m Ω 。若 $R_1=R_3=1$ k Ω , 可在输入阻抗与电阻噪声之间取得良好折衷, 其等效输入噪声与前述噪声/输入阻抗分析一致。共模电压 V_{CM} 由一个简单分压网络并经缓冲运放产生, 值为 2.5 V(5 V 电源的一半)。

13. 编带和卷轴信息

REEL DIMENSIONS

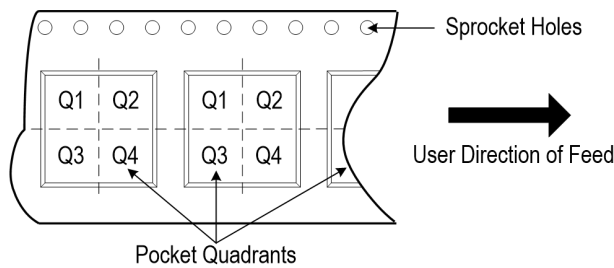


TAPE DIMENSIONS



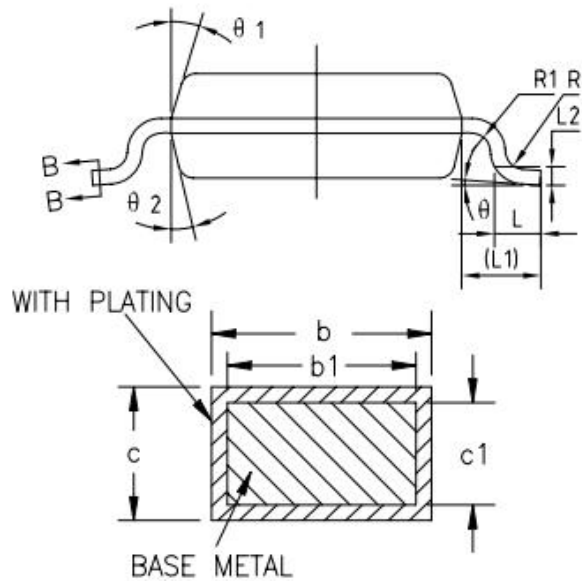
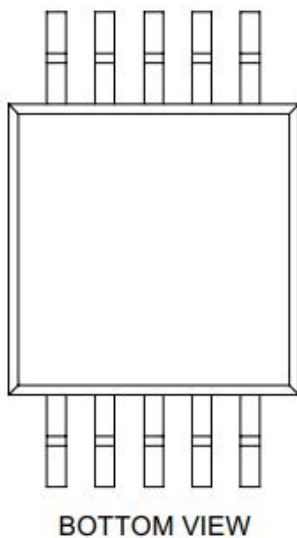
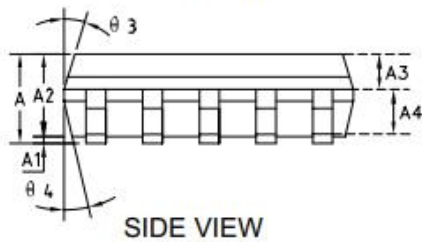
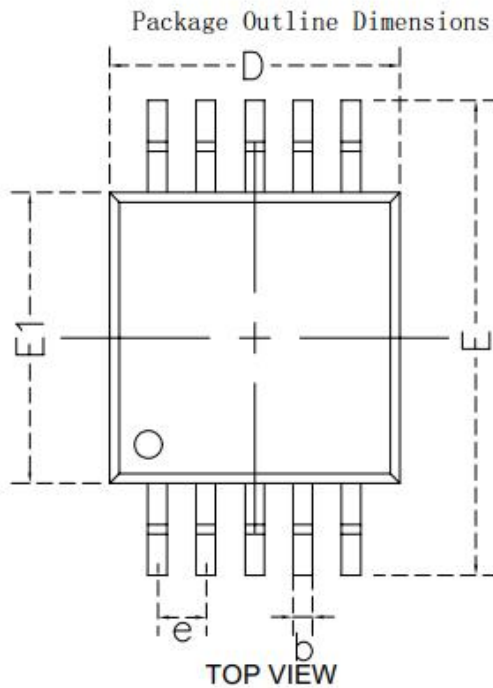
A0	Dimension designed to accommodate the component width
B0	Dimension designed to accommodate the component length
K0	Dimension designed to accommodate the component thickness
W	Overall width of the carrier tape
P1	Pitch between successive cavity centers

QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



Device	Package Type	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin 1 Quadrant
LTD2113XV10/R6	MSOP	10	3000	330	12.5	6.6	5.3	2.0	8.0	12.0	Q1
LTD2114XV10/R6	MSOP	10	3000	330	12.5	6.6	5.3	2.0	8.0	12.0	Q1
LTD2115XV10/R6	MSOP	10	3000	330	12.5	6.6	5.3	2.0	8.0	12.0	Q1

14. 封装信息



SYMBOL	MIN	NOM	MAX
A	0.75	—	1.10
A1	0	—	0.15
A2	0.75	0.85	0.95
A3	0.25	0.35	0.39
A4	0.346	—	0.510
b	0.18	0.225	0.27
b1	0.17	0.20	0.23
c	0.154	0.177	0.20
c1	0.144	0.152	0.16
D	2.90	3.00	3.10
e	0.40	0.50	0.60
E	4.70	4.90	5.10
E1	2.90	3.00	3.10
L	0.40	0.60	0.80
L1	0.95REF		
L2	0.25BSC		
R	0.07	—	—
R1	0.07	—	—
θ	0°	—	8°
$\theta 1$	9°	12°	15°
$\theta 2$	9°	12°	15°
$\theta 3$	9°	12°	15°
$\theta 4$	9°	12°	15°

NOTES:
 1. ALL DIMENSIONS REFER TO JEDEC STANDARD MO-137E
 2. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH
 3. DIMENSION E1 DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH
 4. FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED 0.25mm PER SIDE.

15. 说明

Linearin 是一家全球性的无晶圆厂半导体公司，专注于先进的高性能高质量模拟/混合信号 IC 产品及传感器解决方案。公司致力于创新高性能、模拟密集型传感器前端产品及模块化传感器解决方案，应用于医疗与可穿戴设备、智能家居、物联网传感、智能工业与智能工厂（工业 4.0）以及汽车等多个市场。Linearin 的产品系列包括广泛使用的标准目录产品、基于解决方案的应用特定标准产品（ASSP）以及传感器模块，这些产品能够帮助客户实现更快的产品上市速度。欲了解 Linearin 产品系列的完整清单，请访问：<http://www.linearin.com>。

欲获取更详细的产品信息或完整数据表，敬请与 Linearin 的销售部或代表联系。