

# INA4235 具有 I<sup>2</sup>C 接口的 48V 四通道 16 位超精密电流、电压、功率和电能监测器

## 1 特性

- 高侧或低侧电流检测
- 由 1.7V 至 5.5V 电源供电
- 报告电流、电压、功率和电能
- 可编程满量程：20mV/80mV
- 输入共模范围：-0.3V 至 48V
- 电流监控精度：
  - 16 位 ADC 分辨率
  - 0.1% 增益误差 (最大值)
  - 10 $\mu$ V 失调电压 (最大值)
- 电源监控精度：
  - 0.2% 满量程 (最大值)
- 能量监控精度：
  - 0.7% 满量程 (最大值)
- 低输入偏置电流：5nA (最大值)
- 低禁用电流：50nA (最大值)
- 可配置均值计算选项
- 过流和欠流事件的警报限值
- 兼容 1.2V 电压的 I<sup>2</sup>C/SMBus 接口
- 16 引脚可选择地址
- DSBGA-16 封装 (1.5mm × 1.5mm)

## 2 应用

- 笔记本电脑
- 安防摄像头
- 零售自动化
- 电源管理
- 电池监控器和平衡器
- 机架式服务器

## 3 说明

INA4235 器件是一款四通道 16 位数字电流监控器，具有兼容 I<sup>2</sup>C/SMBus 的接口，并可与 1.2V 至 5V 的数字总线电压兼容。该器件可监控外部检测电阻两端的电压，并报告各通道的分流电压、总线电压、电流、功率和电能值。

INA4235 具有所有通道通用的可编程 ADC 转换时间和均值计算功能。每个通道都具有可编程校准值，与内部乘法器结合使用时，可直接读取电流值 (单位为安培)、功率值 (单位为瓦特) 和电能 (焦耳) 值。每个通道可监控 IN- 引脚上的总线电压，并可针对过流和欠流情况以及过压和欠压情况发出警报。由于在电流测量模式下具有高输入阻抗，因此可以使用所需的更大电流检测电阻来测量小值系统电流。

INA4235 可在 -0.3V 至 48V 的共模总线电压范围内检测电流，与电源电压无关。该器件由一个 1.7V 至 5.5V 的单电源供电，在正常运行条件下消耗 400  $\mu$ A 的电源电流 (典型值)。该器件可置于低功耗待机模式，在该模式下，其典型工作电流为 2.5 $\mu$ A，并可通过使能引脚完全禁用，从而实现低于 50nA 的电源电流。该器件的额定工作温度范围为 -40°C 至 125°C，并具有多达 16 个可编程地址。

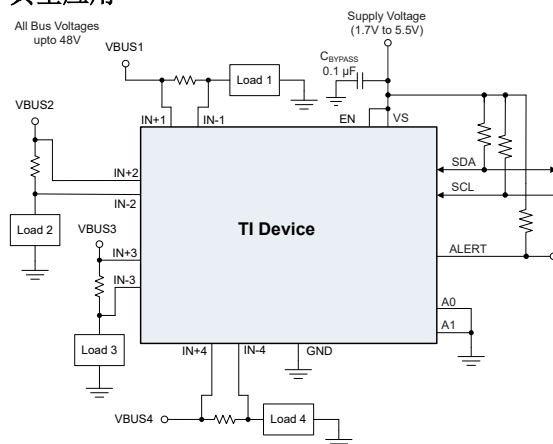
### 封装信息

| 器件型号    | 封装 <sup>(1)</sup> | 封装尺寸 <sup>(2)</sup> |
|---------|-------------------|---------------------|
| INA4235 | YBJ (DSBGA, 16)   | 1.5mm x 1.5mm       |

(1) 有关所有可用封装，请参阅节 13。

(2) 封装尺寸 (长 × 宽) 为标称值，并包括引脚 (如适用)。

## 典型应用



内容

|                                  |           |                             |           |
|----------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| <b>1 特性</b> .....                | <b>1</b>  | <b>7 寄存器映射</b> .....        | <b>18</b> |
| <b>2 应用</b> .....                | <b>1</b>  | 7.1 器件寄存器.....              | 18        |
| <b>3 说明</b> .....                | <b>1</b>  | <b>8 应用和实施</b> .....        | <b>26</b> |
| <b>4 引脚配置和功能</b> .....           | <b>3</b>  | 8.1 应用信息.....               | 26        |
| <b>5 规格</b> .....                | <b>4</b>  | 8.2 典型应用.....               | 30        |
| 5.1 绝对最大额定值.....                 | 4         | <b>9 电源相关建议</b> .....       | <b>33</b> |
| 5.2 ESD 等级.....                  | 4         | <b>10 布局</b> .....          | <b>33</b> |
| 5.3 建议运行条件.....                  | 4         | 10.1 布局指南.....              | 33        |
| 5.4 热性能信息.....                   | 4         | 10.2 布局示例.....              | 34        |
| 5.5 电气特性.....                    | 5         | <b>11 器件和文档支持</b> .....     | <b>35</b> |
| 5.6 时序要求 (I <sup>2</sup> C)..... | 7         | 11.1 器件支持.....              | 35        |
| 5.7 时序图.....                     | 7         | 11.2 文档支持.....              | 35        |
| 5.8 典型特性.....                    | 8         | 11.3 接收文档更新通知.....          | 35        |
| <b>6 详细说明</b> .....              | <b>12</b> | 11.4 支持资源.....              | 35        |
| 6.1 概述.....                      | 12        | 11.5 商标.....                | 35        |
| 6.2 功能方框图.....                   | 12        | 11.6 静电放电警告.....            | 35        |
| 6.3 特性说明.....                    | 12        | 11.7 术语表.....               | 35        |
| 6.4 器件功能模式.....                  | 14        | <b>12 修订历史记录</b> .....      | <b>35</b> |
| 6.5 编程.....                      | 15        | <b>13 机械、封装和可订购信息</b> ..... | <b>35</b> |

## 4 引脚配置和功能

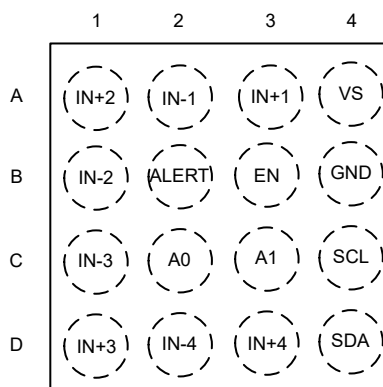


图 4-1. YBJ 封装 16 凸点 DSBGA (顶视图)

表 4-1. 引脚功能

| 引脚名称   | YBJ (DSBGA) | 类型      | 说明                                                                |
|--------|-------------|---------|-------------------------------------------------------------------|
| A0     | C2          | 数字输入    | 地址引脚。连接到 GND、SCL、SDA 或 VS。表 6-1 列出了引脚设置和相应的地址。                    |
| A1     | C3          | 数字输入    | 地址引脚。连接到 GND、SCL、SDA 或 VS。表 6-1 列出了引脚设置和相应的地址。                    |
| ALERT  | B2          | 数字输出    | 多功能警报，开漏输出。该引脚会发出警报以报告故障情况，也可以配置为在转换完成时通知主机。                      |
| EN     | B3          | 数字输入    | 使能引脚。一个逻辑高电平会启用器件；一个逻辑低电平会禁用器件。                                   |
| GND    | B4          | 接地      | 模拟和数字接地。                                                          |
| IN - 1 | A2          | 模拟输入    | 通道 1 电流检测负输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的负载侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的接地侧。针对该引脚进行总线电压测量。 |
| IN+1   | A3          | 模拟输入    | 通道 1 电流检测正输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的总线电压侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的负载侧。             |
| IN - 2 | B1          | 模拟输入    | 通道 2 电流检测负输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的负载侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的接地侧。针对该引脚进行总线电压测量。 |
| IN+2   | A1          | 模拟输入    | 通道 2 电流检测正输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的总线电压侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的负载侧。             |
| IN - 3 | C1          | 模拟输入    | 通道 3 电流检测负输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的负载侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的接地侧。针对该引脚进行总线电压测量。 |
| IN+3   | D1          | 模拟输入    | 通道 3 电流检测正输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的总线电压侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的负载侧。             |
| IN - 4 | D2          | 模拟输入    | 通道 4 电流检测负输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的负载侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的接地侧。针对该引脚进行总线电压测量。 |
| IN+4   | D3          | 模拟输入    | 通道 4 电流检测正输入。对于高侧应用，连接至检测电阻的总线电压侧。对于低侧应用，连接至检测电阻的负载侧。             |
| SCL    | C4          | 数字输入    | 串行总线时钟线路、开漏输入。                                                    |
| SDA    | D4          | 数字输入/输出 | 串行总线数据线，开漏输入/输出                                                   |
| VS     | A4          | 电源      | 电源，1.7V 至 5.5V                                                    |

## 5 规格

### 5.1 绝对最大额定值

在自然通风条件下的工作温度范围内测得（除非另有说明）<sup>(1)</sup>

|                       |                                  | 最小值       | 最大值 | 单位 |
|-----------------------|----------------------------------|-----------|-----|----|
| $V_S$                 | 电源电压                             |           | 6   | V  |
| $V_{IN+}$ 、 $V_{IN-}$ | 差分 ( $V_{IN+}$ ) - ( $V_{IN-}$ ) | -26       | 26  | V  |
|                       | 共模                               | GND - 0.3 | 50  | V  |
| $V_{IO}$              | SDA、SCL、ALERT、A0、A1、EN           | GND - 0.3 | 6   | V  |
|                       | 到任一引脚的输入电流                       |           | 5   | mA |
|                       | 开漏数字输出电流 (SDA、ALERT)             |           | 10  | mA |
| $T_A$                 | 工作温度                             | -55       | 150 | °C |
| $T_J$                 | 结温                               |           | 150 | °C |
| $T_{stg}$             | 贮存温度                             | -65       | 150 | °C |

(1) 超出绝对最大额定值运行可能会对器件造成永久损坏。绝对最大额定值并不表示器件在这些条件下或在建议运行条件以外的任何其他条件下能够正常运行。如果超出建议运行条件但在绝对最大额定值范围内使用，器件可能不会完全正常运行，这可能影响器件的可靠性、功能和性能并缩短器件寿命。

### 5.2 ESD 等级

|             |      |                                                               | 值     | 单位 |
|-------------|------|---------------------------------------------------------------|-------|----|
| $V_{(ESD)}$ | 静电放电 | 人体放电模型 (HBM)，符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 标准，所有引脚 <sup>(1)</sup> | ±3000 | V  |
|             |      | 充电器件模型 (CDM)，符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-002 标准，所有引脚 <sup>(2)</sup> | ±1000 |    |

(1) JEDEC 文档 JEP155 指出：500V HBM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

(2) JEDEC 文档 JEP157 指出：250V CDM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

### 5.3 建议运行条件

在自然通风条件下的工作温度范围内测得（除非另有说明）

|          |          | 最小值       | 标称值 | 最大值 | 单位 |
|----------|----------|-----------|-----|-----|----|
| $V_{CM}$ | 共模输入范围   | GND - 0.3 |     | 48  | V  |
| $V_S$    | 工作电源电压范围 | 1.7       |     | 5.5 | V  |
| $T_A$    | 环境温度     | -40       |     | 125 | °C |

### 5.4 热性能信息

| 热性能指标 <sup>(1)</sup> |            | INA4235 | 单位   |
|----------------------|------------|---------|------|
|                      |            | DSBGA   |      |
|                      |            | 16 引脚   |      |
| $R_{\theta JA}$      | 结至环境热阻     | 82.9    | °C/W |
| $R_{\theta JC(top)}$ | 结至外壳（顶部）热阻 | 0.5     | °C/W |
| $R_{\theta JB}$      | 结至电路板热阻    | 21.7    | °C/W |
| $\Psi_{JT}$          | 结至顶部特征参数   | 0.3     | °C/W |
| $\Upsilon_{JB}$      | 结至电路板特征参数  | 21.1    | °C/W |
| $R_{\theta JC(bot)}$ | 结至外壳（底部）热阻 | 不适用     | °C/W |

(1) 有关新旧热指标的更多信息，请参阅[半导体和 IC 封装热指标](#)应用手册。

## 5.5 电气特性

在  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3.3\text{V}$ ,  $V_{\text{SENSE}} = V_{\text{IN}+} - V_{\text{IN}-} = 0\text{mV}$ ,  $V_{\text{IN}-} = V_{\text{BUS}} = 12\text{V}$  时测得, 所有通道 (除非另有说明)

| 参数                         |                                                                 | 测试条件                                                                                            | 最小值      | 典型值         | 最大值       | 单位                           |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|-----------|------------------------------|
| <b>输入</b>                  |                                                                 |                                                                                                 |          |             |           |                              |
| CMRR                       | 共模抑制                                                            | $V_{\text{CM}} = -0.3\text{V}$ 至 $48\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ | 130      | 150         |           | dB                           |
|                            | 分流电压输入范围                                                        | ADCRANGE = 0                                                                                    | -81.9175 |             | 81.92     | mV                           |
|                            |                                                                 | ADCRANGE = 1                                                                                    | -20.4794 |             | 20.48     | mV                           |
| $V_{\text{os}}$            | 分流失调电压                                                          | $V_{\text{CM}} = 12\text{V}$                                                                    |          | $\pm 2$     | $\pm 10$  | $\mu\text{V}$                |
| $dV_{\text{os}}/dT$        | 分流失调电压漂移                                                        | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$                                                 |          | $\pm 1$     | $\pm 25$  | $\text{nV}/^\circ\text{C}$   |
| $V_{\text{os}_b}$          | IN- 总线失调电压                                                      |                                                                                                 |          | $\pm 1$     | $\pm 7.5$ | mV                           |
| $dV_{\text{os}_b}/dT$      | IN- 总线失调电压温漂                                                    | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$                                                 |          | $\pm 10$    | $\pm 30$  | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| $\text{PSRR}_{\text{SH}}$  | 电源抑制比<br>(电流测量)                                                 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$           |          | $\pm 0.2$   | $\pm 2$   | $\mu\text{V}/\text{V}$       |
| $\text{PSRR}_{\text{BUS}}$ | 电源抑制比<br>(电压测量)                                                 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$           |          | $\pm 0.5$   | $\pm 2$   | $\text{mV}/\text{V}$         |
| $Z_{\text{IN-}}$           | IN- 输入阻抗                                                        | 总线电压测量模式                                                                                        |          | 1.05        |           | M $\Omega$                   |
| $I_B$                      | 输入偏置电流                                                          | IN+, IN-, 电流测量模式                                                                                |          | 0.1         | 5         | nA                           |
| <b>直流精度</b>                |                                                                 |                                                                                                 |          |             |           |                              |
| $R_{\text{DIFF}}$          | 差分输入阻抗<br>(IN+ 至 IN-)                                           | $V_{\text{IN}+} - V_{\text{IN-}} < 82\text{mV}$                                                 |          | 140         |           | k $\Omega$                   |
|                            | ADC 分辨率                                                         | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$                                                 |          | 16          |           | 位                            |
|                            | 1 个最低有效位 (LSB) 阶跃幅度                                             | 采样电阻电压, ADCRANGE = 0                                                                            |          | 2.5         |           | $\mu\text{V}$                |
|                            |                                                                 | 采样电阻电压, ADCRANGE = 1                                                                            |          | 625         |           | nV                           |
|                            |                                                                 | 总线电压                                                                                            |          | 1.6         |           | mV                           |
|                            | ADC 转换时间<br>( $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $125^\circ\text{C}$ ) | CT 位 = 000                                                                                      |          | 140         |           | $\mu\text{s}$                |
|                            |                                                                 | CT 位 = 001                                                                                      |          | 204         |           | $\mu\text{s}$                |
|                            |                                                                 | CT 位 = 010                                                                                      |          | 332         |           | $\mu\text{s}$                |
|                            |                                                                 | CT 位 = 011                                                                                      |          | 588         |           | $\mu\text{s}$                |
|                            |                                                                 | CT 位 = 100                                                                                      |          | 1.100       |           | ms                           |
|                            |                                                                 | CT 位 = 101                                                                                      |          | 2.116       |           | ms                           |
|                            |                                                                 | CT 位 = 110                                                                                      |          | 4.156       |           | ms                           |
|                            |                                                                 | CT 位 = 111                                                                                      |          | 8.244       |           | ms                           |
|                            | 内部振荡器频率                                                         | $T_A = +25^\circ\text{C}$                                                                       |          | 500         |           | kHz                          |
|                            | 内部振荡器容限                                                         | $T_A = +25^\circ\text{C}$                                                                       |          |             | 0.5       | %                            |
|                            |                                                                 | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                                |          |             | 1         | %                            |
| $G_{\text{SERR}}$          | 分流电压增益误差                                                        |                                                                                                 |          | $\pm 0.015$ | $\pm 0.1$ | %                            |
| $G_{\text{S\_DRFT}}$       | 分流电压增益误差漂移                                                      | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                                |          | 8           | 25        | $\text{ppm}/^\circ\text{C}$  |
| $G_{\text{BERR}}$          | $V_{\text{IN-}}$ 电压增益误差                                         |                                                                                                 |          | $\pm 0.015$ | $\pm 0.1$ | %                            |
| $G_{\text{B\_DRFT}}$       | $V_{\text{IN-}}$ 电压增益误差温漂                                       | $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                                |          | 8           | 25        | $\text{ppm}/^\circ\text{C}$  |
| $P_{\text{TME}}$           | 功率总测量误差                                                         | 在满量程电压和电流下                                                                                      |          | $\pm 0.03$  | $\pm 0.2$ | %                            |
| $E_{\text{TME}}$           | 能量总测量误差                                                         | 在满量程电压和电流下                                                                                      |          | $\pm 0.1$   | $\pm 0.7$ | %                            |
| INL                        | 积分非线性                                                           | ADCRANGE = 0, 线性最佳拟合, $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                          |          | $\pm 2$     | $\pm 6$   | m%                           |
| DNL                        | 微分非线性                                                           |                                                                                                 |          | $\pm 0.1$   |           | LSB                          |

在  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = 3.3\text{V}$ ,  $V_{\text{SENSE}} = V_{\text{IN}+} - V_{\text{IN}-} = 0\text{mV}$ ,  $V_{\text{IN}-} = V_{\text{BUS}} = 12\text{V}$  时测得, 所有通道 (除非另有说明)

| 参数               |           | 测试条件                                                                                                                  | 最小值 | 典型值  | 最大值      | 单位            |
|------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|----------|---------------|
| <b>使能</b>        |           |                                                                                                                       |     |      |          |               |
| $I_{\text{EN}}$  | 输入漏电流     | $0\text{V} \leq V_{\text{EN}} \leq V_S$                                                                               |     | 1    | 50       | nA            |
| $V_{\text{IH}}$  | 逻辑输入电平, 高 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $3.6\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                | 1.1 |      | 5.5      | V             |
| $V_{\text{IH}}$  | 逻辑输入电平, 高 | $V_S = 3.6\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                | 1.3 |      | 5.5      | V             |
| $V_{\text{IL}}$  | 逻辑输入电平, 低 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                | 0   |      | 0.4      | V             |
| $V_{\text{HYS}}$ | 迟滞        |                                                                                                                       |     | 50   |          | mV            |
| <b>电源</b>        |           |                                                                                                                       |     |      |          |               |
| $I_Q$            | 静态电流      |                                                                                                                       |     | 400  | 500      | $\mu\text{A}$ |
|                  |           | $I_Q$ 与温度间的关系, $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                                       |     |      | 600      | $\mu\text{A}$ |
|                  |           | 关断                                                                                                                    |     | 2.5  | 4        | $\mu\text{A}$ |
| $I_Q$            | 静态电流已禁用   | $V_{\text{EN}} = 0\text{V}$                                                                                           |     | 5    | 50       | nA            |
| $V_{\text{POR}}$ | 上电复位阈值    | $V_S$ 下降                                                                                                              |     | 0.95 |          | V             |
| <b>SMBUS</b>     |           |                                                                                                                       |     |      |          |               |
|                  | SMBUS 超时  |                                                                                                                       |     | 28   | 35       | ms            |
|                  | 输入电容      |                                                                                                                       |     | 3    |          | pF            |
| <b>数字接口</b>      |           |                                                                                                                       |     |      |          |               |
| $V_{\text{IH}}$  | 逻辑输入电平, 高 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                | 0.9 |      | 5.5      | V             |
| $V_{\text{IL}}$  | 逻辑输入电平, 低 | $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$                                | 0   |      | 0.4      | V             |
| $V_{\text{HYS}}$ | 迟滞        |                                                                                                                       |     | 130  |          | mV            |
| $V_{\text{OL}}$  | 逻辑输出电平, 低 | $I_{\text{OL}} = 3\text{mA}$ , $V_S = 1.7\text{V}$ 至 $5.5\text{V}$ , $T_A = -40^\circ\text{C}$ 至 $+125^\circ\text{C}$ | 0   |      | 0.3      | V             |
|                  | 数字泄漏输入电流  | $0 \leq V_{\text{INPUT}} \leq V_S$                                                                                    |     |      | $\pm 50$ | nA            |

## 5.6 时序要求 (I<sup>2</sup>C)

|                            |                                  | 最小值  | 标称值 | 最大值  | 单位  |
|----------------------------|----------------------------------|------|-----|------|-----|
| I <sup>2</sup> C 总线 (快速模式) |                                  |      |     |      |     |
| F <sub>(SCL)</sub>         | I <sup>2</sup> C 时钟频率            | 1    |     | 400  | kHz |
| t <sub>(BUF)</sub>         | 停止和启动条件之间的总线空闲时间                 | 600  |     |      | ns  |
| t <sub>(HDSTA)</sub>       | 重复 START 条件后的保持时间。在此周期后,生成第一个时钟。 | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(SUSTA)</sub>       | 重复 START 条件建立时间                  | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(SUSTO)</sub>       | STOP 条件建立时间                      | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(HDDAT)</sub>       | 数据保持时间                           | 10   |     | 900  | ns  |
| t <sub>(SUDAT)</sub>       | 数据建立时间                           | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(LOW)</sub>         | SCL 时钟低电平周期                      | 1300 |     |      | ns  |
| t <sub>(HIGH)</sub>        | SCL 时钟高电平周期                      | 600  |     |      | ns  |
| t <sub>F</sub>             | 数据下降时间                           |      |     | 300  | ns  |
| t <sub>F</sub>             | 时钟下降时间                           |      |     | 300  | ns  |
| t <sub>R</sub>             | 时钟上升时间                           |      |     | 300  | ns  |
| t <sub>R</sub>             | 时钟上升时间 (SCLK ≤ 100kHz)           |      |     | 1000 | ns  |
| I <sup>2</sup> C 总线 (高速模式) |                                  |      |     |      |     |
| F <sub>(SCL)</sub>         | I <sup>2</sup> C 时钟频率            | 10   |     | 2940 | kHz |
| t <sub>(BUF)</sub>         | 停止和启动条件之间的总线空闲时间                 | 160  |     |      | ns  |
| t <sub>(HDSTA)</sub>       | 重复 START 条件后的保持时间。在此周期后,生成第一个时钟。 | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(SUSTA)</sub>       | 重复 START 条件建立时间                  | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(SUSTO)</sub>       | STOP 条件建立时间                      | 100  |     |      | ns  |
| t <sub>(HDDAT)</sub>       | 数据保持时间                           | 10   |     | 125  | ns  |
| t <sub>(SUDAT)</sub>       | 数据建立时间                           | 20   |     |      | ns  |
| t <sub>(LOW)</sub>         | SCL 时钟低电平周期                      | 200  |     |      | ns  |
| t <sub>(HIGH)</sub>        | SCL 时钟高电平周期                      | 60   |     |      | ns  |
| t <sub>F</sub>             | 数据下降时间                           |      |     | 80   | ns  |
| t <sub>F</sub>             | 时钟下降时间                           |      |     | 40   | ns  |
| t <sub>R</sub>             | 时钟上升时间                           |      |     | 40   | ns  |

## 5.7 时序图

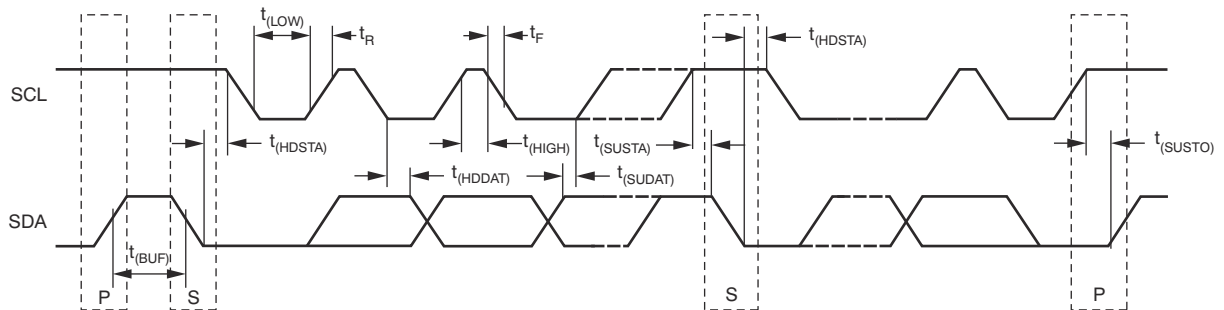


图 5-1. I<sup>2</sup>C 时序图

## 5.8 典型特性

在  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{VS} = 3.3\text{V}$ ,  $V_{CM} = 12\text{V}$  以及  $V_{SENSE} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 0\text{mV}$  时测得 (除非另有说明)

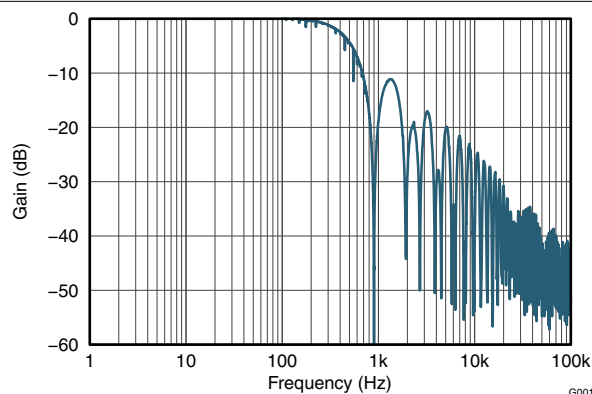


图 5-2. 频率响应

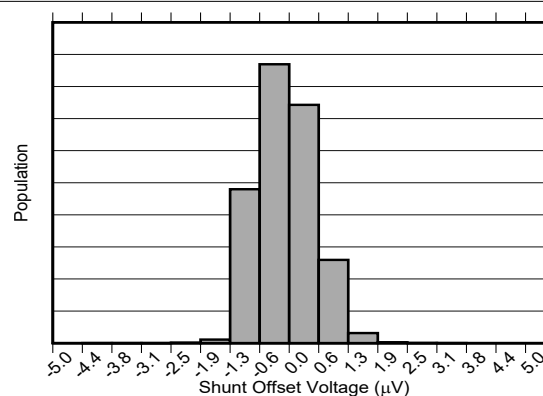


图 5-3. 分流输入失调电压产生分布图

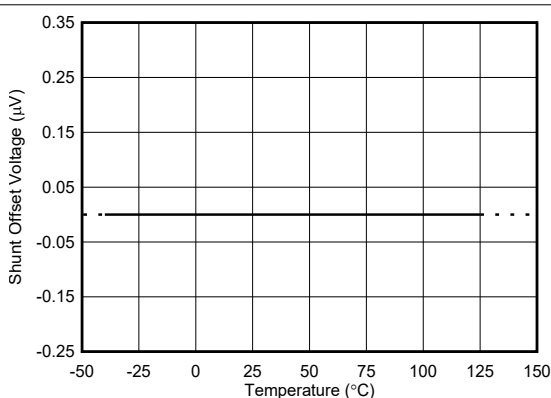


图 5-4. 分流输入失调电压与温度间的关系

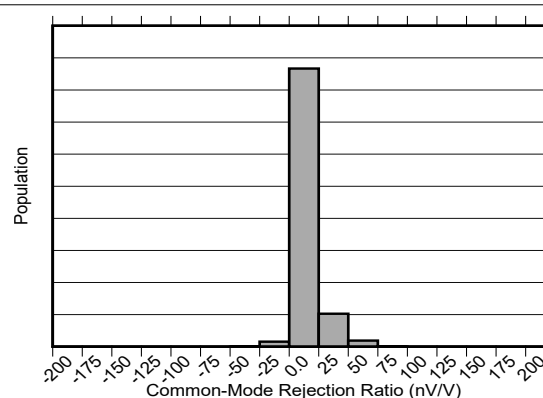


图 5-5. CMRR 产生分布图

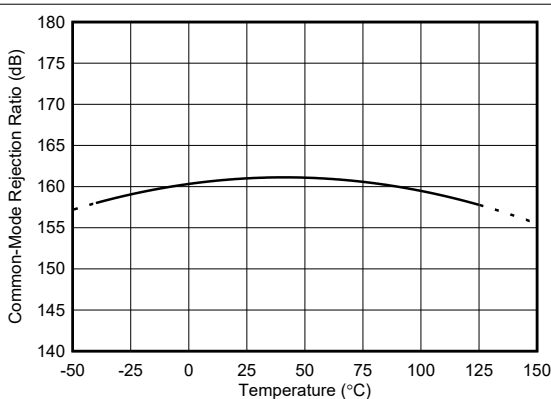


图 5-6. 分流输入 CMRR 与温度间的关系

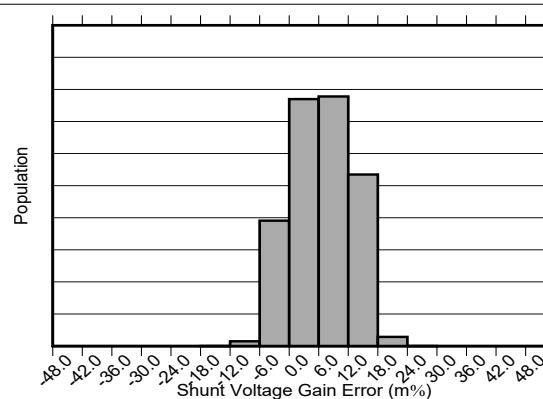


图 5-7. 采样电阻电压增益误差产生分布图



## 5.8 典型特性 (续)

在  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $V_{VS} = 3.3\text{V}$ ,  $V_{CM} = 12\text{V}$  以及  $V_{SENSE} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 0\text{mV}$  时测得 (除非另有说明)

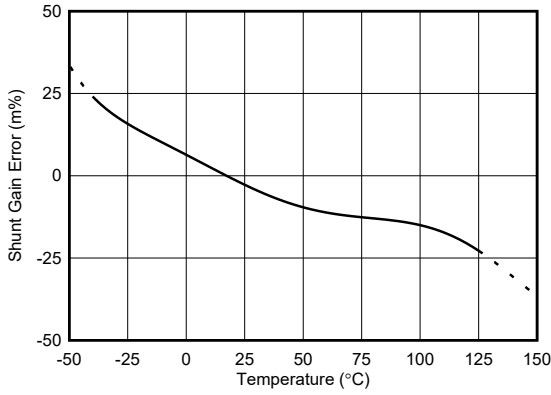


图 5-8. 分流增益误差与温度间的关系

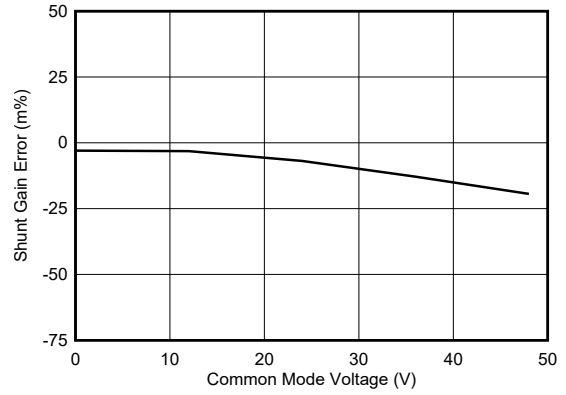


图 5-9. 分流增益误差与共模电压间的关系

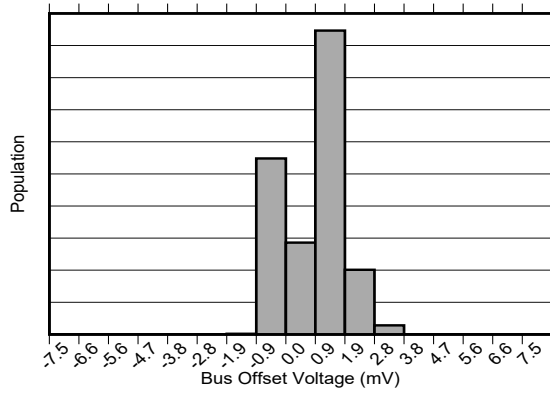


图 5-10. 总线失调电压 ( $V_{IN-}$ ) 产生分布图

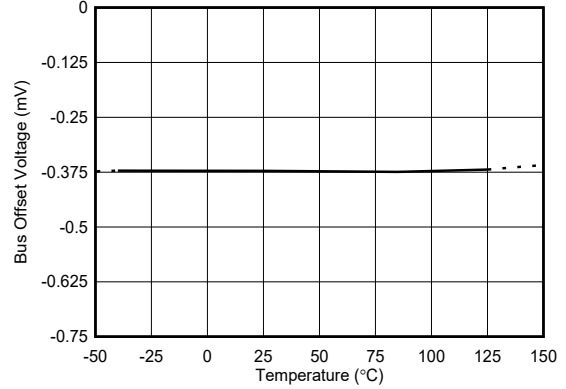


图 5-11. 总线失调电压 ( $V_{IN-}$ ) 与温度间的关系

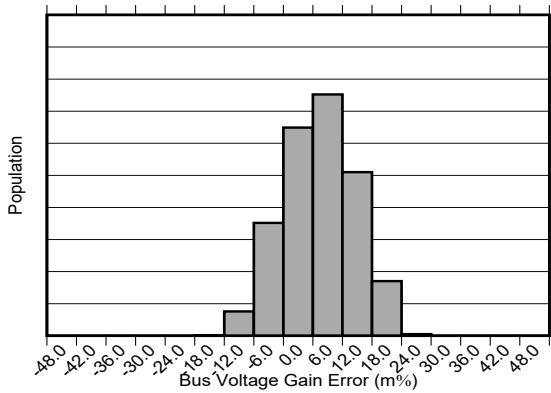


图 5-12. 总线电压 ( $V_{IN-}$ ) 增益误差产生分布图

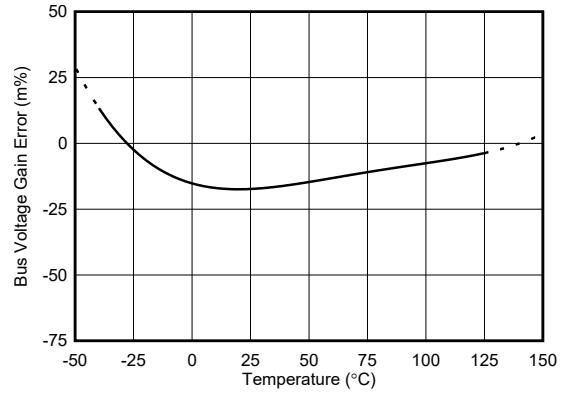


图 5-13. 总线电压 ( $V_{IN-}$ ) 增益误差与温度间的关系

## 5.8 典型特性 (续)

在  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{VS} = 3.3\text{V}$ ,  $V_{CM} = 12\text{V}$  以及  $V_{SENSE} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 0\text{mV}$  时测得 (除非另有说明)

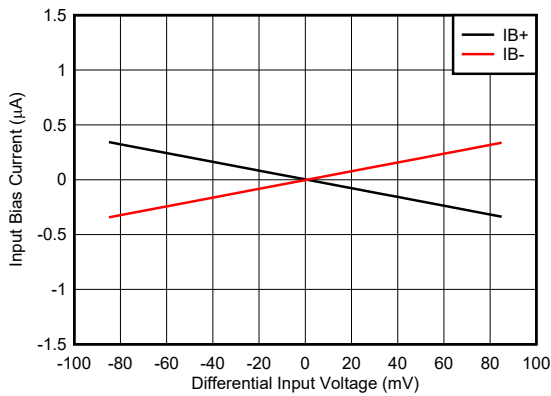


图 5-14. 输入偏置电流与差分电压间的关系

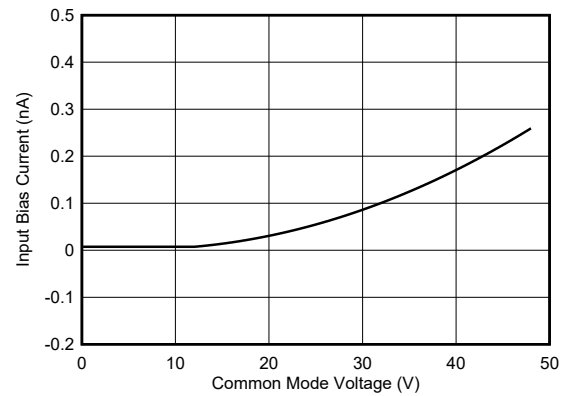


图 5-15. 输入偏置电流与共模电压 ( $IB+$ 、 $IB-$ ) 间的关系

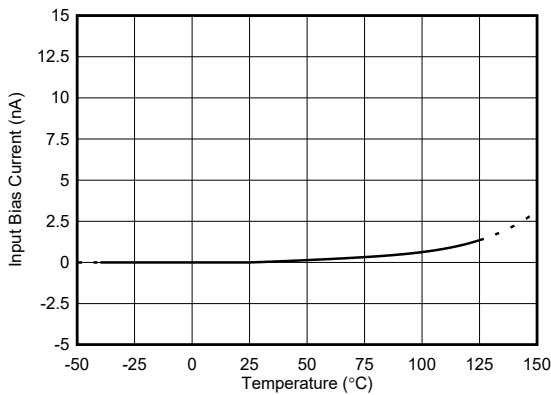


图 5-16. 输入偏置电流与温度间的关系

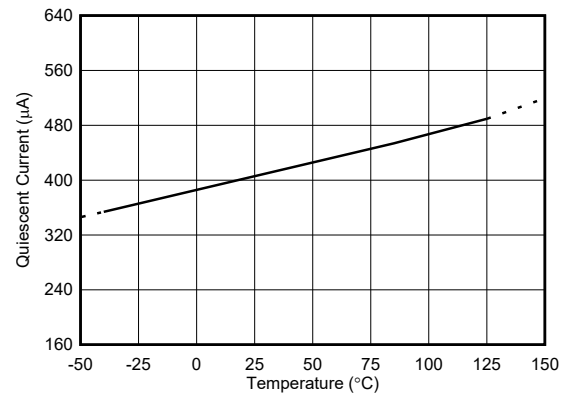


图 5-17. 静态电流与温度间的关系

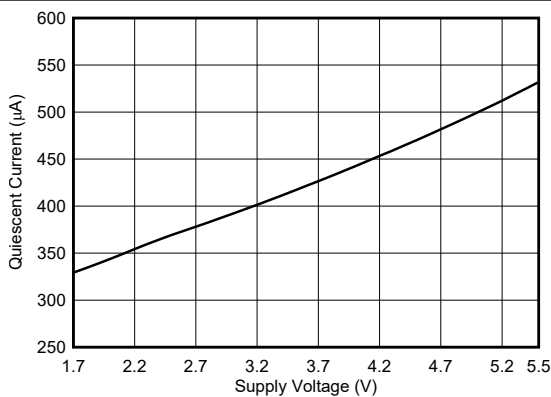


图 5-18. 静态电流与电源电压间的关系

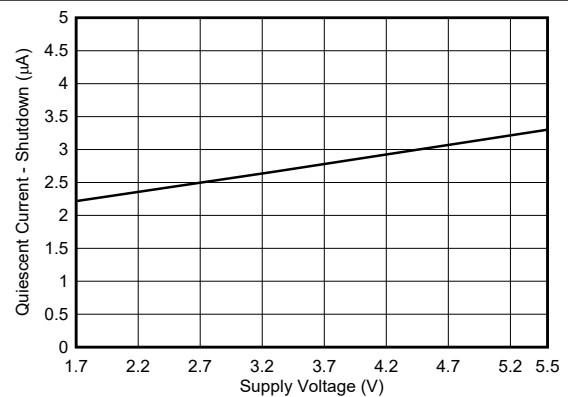


图 5-19. 静态电流 (关断) 与电源电压间的关系

## 5.8 典型特性 (续)

在  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{VS} = 3.3\text{V}$ ,  $V_{CM} = 12\text{V}$  以及  $V_{SENSE} = (V_{IN+} - V_{IN-}) = 0\text{mV}$  时测得 (除非另有说明)

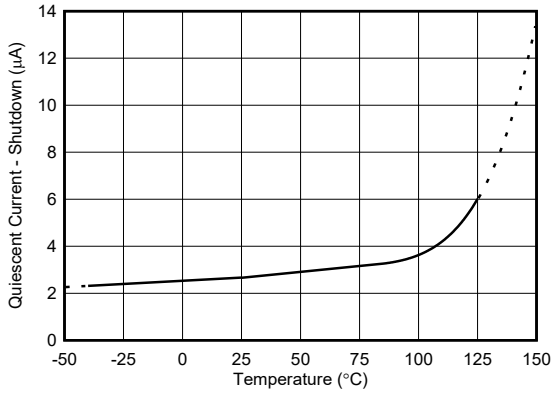


图 5-20. 静态电流 (关断) 与温度间的关系

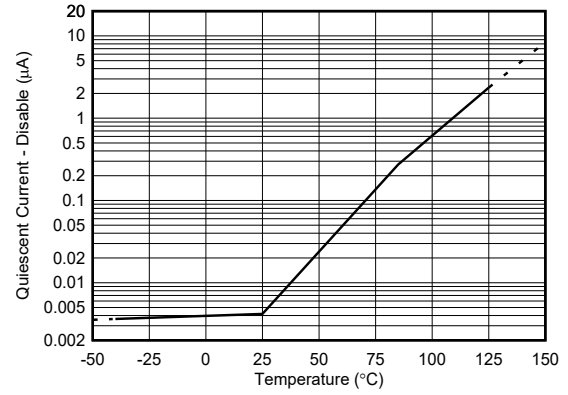


图 5-21. 静态电流 (禁用) 与温度间的关系

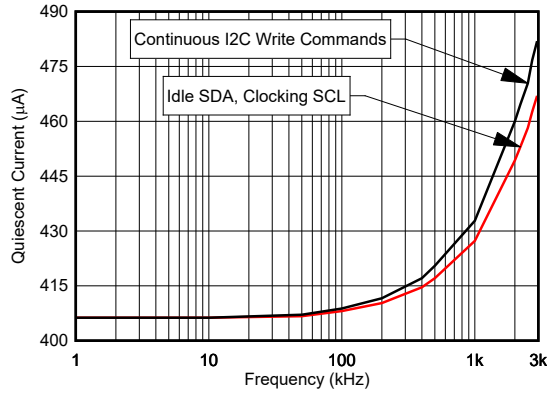


图 5-22. 静态电流与时钟 (SCL) 频率间的关系

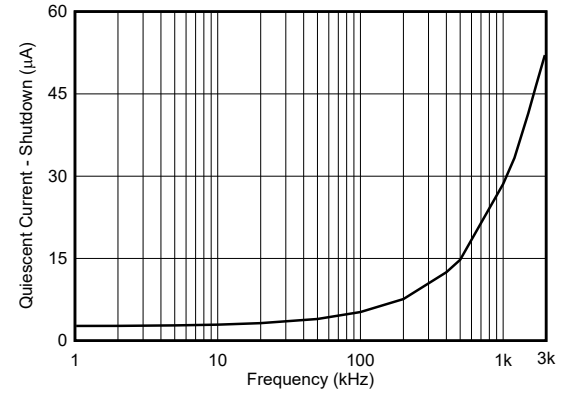


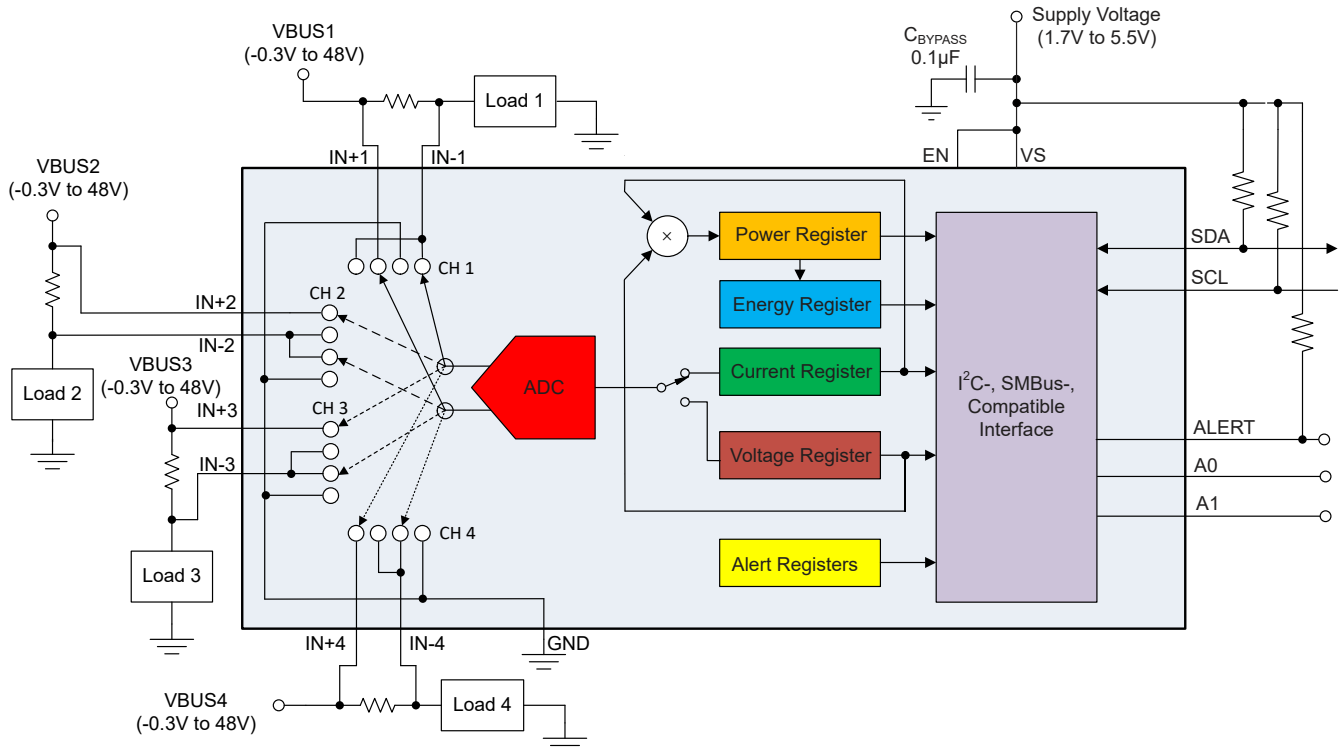
图 5-23. 静态电流 (关断) 与 SCL 频率间的关系

## 6 详细说明

### 6.1 概述

INA4235 是一款具有 I<sup>2</sup>C 和 SMBus 兼容接口的多通道数字电流检测放大器。该器件会报告每个通道的电流、电压、功率和能量，并具有可编程的超出范围限制，可在所选参数超出正常工作范围时发出警报。集成式模数转换器 (ADC) 可设置为不同的均值计算模式，并可针对连续运行或触发运行进行配置。[器件寄存器](#) 提供了有关 INA4235 的详细寄存器信息。

### 6.2 功能方框图



### 6.3 特性说明

#### 6.3.1 集成模数转换器 (ADC)

INA4235 集成了一个具有低失调电压的 16 位  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC。该 ADC 针对每个通道进行了多路复用，可处理分流电压和总线电压测量。相对于 IN- 和 GND 进行总线电压测量。分流电压测量是对负载电流流经每个通道的分流电阻器时产生的电压的差分测量，该值在 IN+ 和 IN- 引脚之间测得。分流电压测量的最大失调电压仅为 10 $\mu$ V，最大增益误差为 0.1%。对于给定的分流电阻器值，分流电压测量的低失调电压可在轻负载条件下提高精度。低失调电压的另一个优势是，能够准确检测到检测电阻上的较低压降，从而允许使用较低值的分流电阻器。低值分流电阻器可降低电流检测电路中的功率损耗，有助于提高终端应用的功率效率。

由于 IN+ 和 IN- 引脚处的总线共模和 VS 引脚处的电源电压互相独立，所以无需专门考虑电源时序；因此，总线共模电压与电源电压可在对方关闭时存在。

#### 6.3.2 内部测量和计算引擎

INA4235 的内部轮询测量方案如图 6-1 所示。对于每个通道，电流、功率和电能寄存器均通过分流电压和总线电压测量值计算得出，它们不受 ADC 转换时间的直接影响。每个通道的寄存器值在下一个通道前更新。启用平均值计算后，每个通道的寄存器会在平均值数量计算完成后更新。故障条件在转换或根据 ADC 转换时间进行计算后立即进行比较，并且与设定的平均值数量无关。缩短转换时间可加快警报响应速度，但由于噪声，有效分辨率较

低。较长的转换时间会减慢警报响应速度，但对噪声的敏感度较低。被禁用的通道或测量在轮询周期中被跳过。转换结束时，在达到选定的平均值数量之后，会在转换结束时设置转换就绪标志。

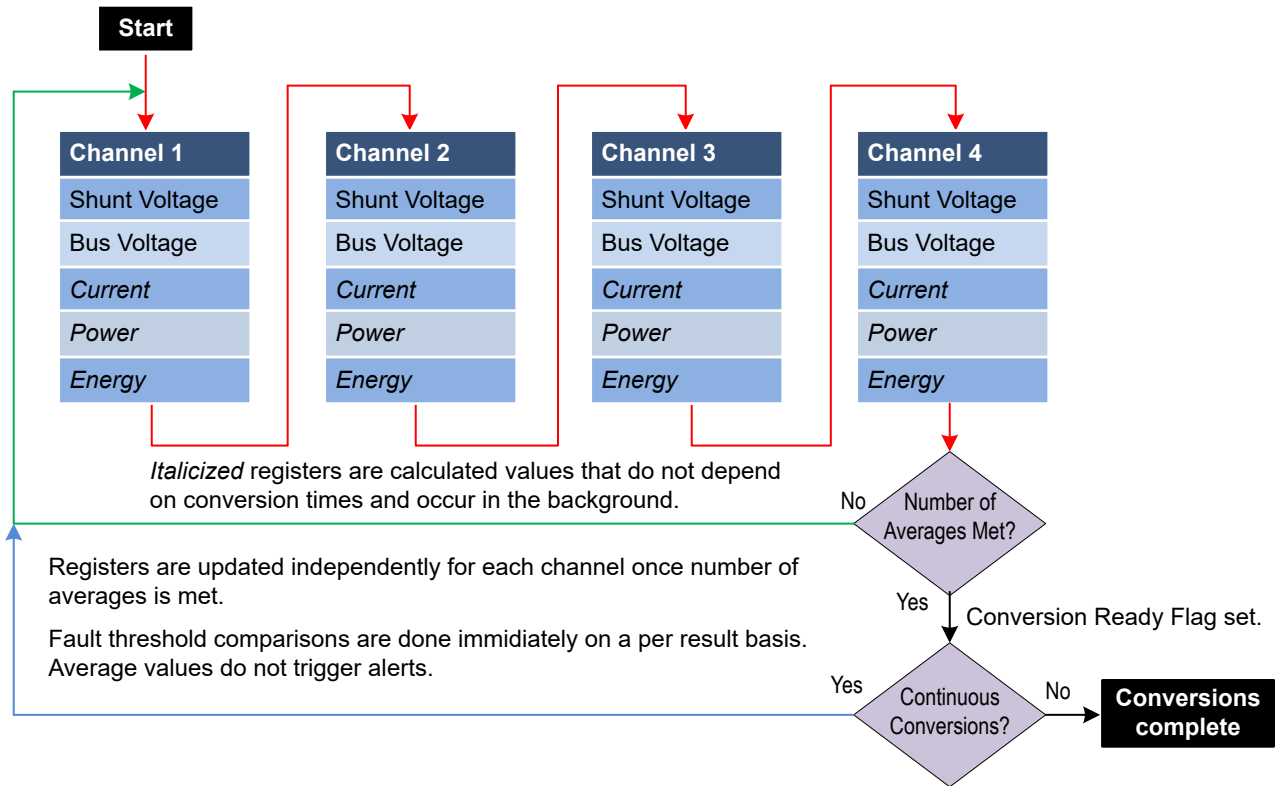


图 6-1. 内部测量和计算方案

根据测量的分流电压和相应校准寄存器中输入的值计算电流。功率的计算基于之前的电流计算值和最新的总线电压测量值。通过将之前的功率计算结果乘以当前时基间隔来累加电能。如果载入相应校准寄存器的值为零，则电流、功率和电能值也报告为零。启用平均值计算后，一旦达到平均值数量，寄存器值就会更新。这些计算在后台执行，并不会增加总体转换时间。

### 6.3.3 低偏置电流

执行电流测量时，INA4235 具有非常低的输入偏置电流，这提供了几个优势。INA4235 的低输入偏置电流可降低器件在工作和关断状态下消耗的电流。低偏置电流的另一个优势是，它允许在信号转换为数字数据之前使用输入滤波器来抑制高频噪声。在传统的数字电流检测监控器中，增加输入滤波器是以降低精度为代价的。然而，由于存在低偏置电流，由输入滤波器导致的精度下降可降至更低程度。低偏置电流的另一个优势是能够使用更大的分流电阻器来准确地感测更小的电流。使用更大的分流电阻值使器件能够准确地监测亚毫安范围内的电流。

当感测到的电流为零时，INA4235 中的偏置电流最小。随着电流开始增加，分流电阻器上的差分压降增加，从而导致偏置电流增加（请参阅图 5-14）。

INA4235 仅在进行电流测量时才具有低偏置电流。进行总线电压测量时，IN- 引脚的阻抗会降低。在总线电压测量期间，IN- 引脚会连接到一个阻抗约为 1MΩ 的内部电阻分压器。将内部多路复用器配置为仅执行电流测量将使器件始终具有低偏置电流。

### 6.3.4 低压电源和宽共模电压范围

INA4235 的电源电压范围为 1.7V 至 5.5V。该器件可在 1.7V 电压下运行，因此可用于 1.8V 电源轨中。即使电源电压为 1.7V，该器件也可监控高达 48V 的电压轨上的电流。这种宽共模工作范围使得该器件可用于共模电压超过电源电压轨的许多应用。

### 6.3.5 ALERT 引脚

INA4235 具有四个 [警报配置寄存器](#)，可以根据需要分配给四个通道。每个警报寄存器都有一个通道分配字段以及一个警报屏蔽字段。警报屏蔽字段允许从警报响应的五个可用功能中选择一个。基于被监测的功能，可通过向 [警报限值寄存器](#) 输入一个值来设置使 ALERT 引脚有效的相应阈值。

ALERT 引脚可实现对几个可用警报功能中的某一个进行监控，从而确定是否已经超过了用户定义的阈值。可被监控的五个警报功能如下：

- 采样电阻电压高于限值 (SOL)
- 采样电阻电压低于限值 (SUL)
- 总线电压高于限值 (BOL)
- 总线电压低于限值 (BUL)
- 功率高于限值 (POL)

ALERT 引脚是一个开漏输出。当在警报配置寄存器中选择的警报功能超过在警报限值寄存器中设定的值时，这个引脚被置为有效。每次只能启用和监控最多警报功能中的一个。

也可以在警报引脚处监测器件的转换就绪状态，以便在器件完成前一个转换并准备好开始新的转换时通知用户。转换准备就绪位 (CVRF) 可与警报功能中的一个在 ALERT 引脚上被监控。

如果警报功能未被使用，ALERT 引脚可保持悬空，从而不会影响器件的运行。

警报功能将已编程的警报限值与每个相应转换的结果进行比较。因此，如果信号的平均值不超过警报限值，则可以在一个转换周期内发出警报。基于这个中间转换的警报的触发可比更新的平均输出数据寄存器更快地检测到范围之外的事件。借助警报功能，可使用这种快速检测能力创建针对快速变化情况的警报限值，并通过对平均输出值进行软件监控创建针对持续时间较长情况的限值。

## 6.4 器件功能模式

### 6.4.1 连续运行与触发运行

INA4235 有两种运行模式（连续和触发），这些模式确定进行这些转换之后 ADC 如何运行。当 INA4235 处于正常运行模式（即 CONFIG1 寄存器的 MODE 位设置为“111”）时，该器件按顺序连续转换每个通道的一个分流电压读数和总线电压读数。

在触发模式下，将任意触发的转换模式写入 [节 7.1.1](#)（即 CONFIG1 寄存器的 MODE 位设置为 001、010 或 011）会触发所选参数的一个单次转换。这个动作会产生一个测量的单一集合。为了触发另外一个单次转换，配置寄存器必须被再次写入，即使在模式不发生变化的情况下也是如此。

虽然可随时读取 INA4235，并且来自上次转换的数据仍可用，但提供的转换就绪标志位（CVRF 位，FLAGS 寄存器）可帮助协调单次或触发转换。完成单个轮询周期内的所有转换、均值计算和乘法操作之后，CVRF 位被置位。

在以下情况下，CVRF 位被清除：

1. 写入 CONFIG1 寄存器（为省电模式配置 MODE 位的情况除外）；或者
2. 读取 FLAGS 寄存器。

### 6.4.2 器件低功耗模式

除了两种工作模式（连续和触发）之外，INA4235 还有两种低功耗模式。在关断模式下，该器件可降低静态电流和输入偏置电流，但能够处理 I<sup>2</sup>C 总线通信。在此状态下，静态电流降至小于 4  $\mu$ A。从关断模式完全恢复需要 40  $\mu$ s。器件保持在关断模式下，直到其中一个激活模式设置被写入到配置寄存器中。低功耗模式为禁用模式，可通过将使能引脚强制为逻辑低电平进行启动。在此模式下，静态电流最低，器件仅消耗 50nA（最大值）的电源电流，但器件无法识别此状态下的任何 I<sup>2</sup>C 总线通信。此外，器件配置在处于禁用状态时会复位，并且在启用时需要重新编程。从禁用状态恢复需要 100  $\mu$ s。

### 6.4.3 上电复位

当  $V_S$  降至低于 0.95V ( 典型 ) 时, 所有寄存器复位为默认值, 此时将置位上电复位 (POR)。默认上电寄存器值显示在每个寄存器描述的复位列中。

### 6.4.4 均值计算和转换时间注意事项

INA4235 有针对施加在所有通道上的分流电压和总线电压测量的可编程转换时间。针对这些测量的转换时间可在最快 140  $\mu$ s 到最长 8.244ms 之间进行选择。转换时间设置结合可编程均值计算模式, 支持将 INA4235 配置为在指定应用中优化可用的时序要求。还可针对分流电压和总线电压测量, 将 INA4235 配置成具有不同的转换时间设置。此类方法在总线电压往往相对稳定的应用中比较常见。相对于分流电压测量, 这个情况减少了总线电压测量所花费的时间。

可以在转换时间设置和使用的均值计算模式之间进行权衡。通过有效地过滤信号, 均值计算特性能够大大提升测量精度。通过这种方法, INA4235 可以减少测量中的噪声, 此噪声可能源自耦合到信号的噪声。平均数越多, INA4235 在减少测量的噪声成分方面就越高效。

所选的转换时间也会对测量精度产生影响。图 6-2 显示了多个转换时间, 以说明噪声对测量的影响。为了实现尽可能高的测量精度, 应根据系统的时序要求, 在允许的最长转换时间和最大数量的平均数之间进行折衷。

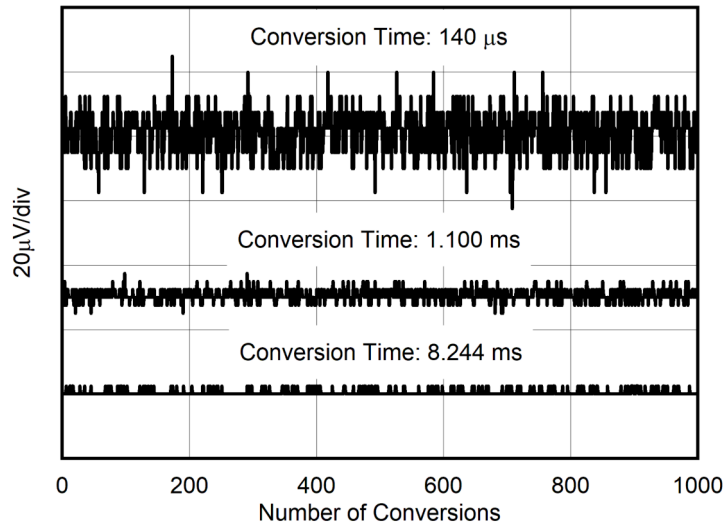


图 6-2. 噪声与转换时间的关系

## 6.5 编程

### 6.5.1 I<sup>2</sup>C 串行接口

INA4235 在 SMBus 和 I<sup>2</sup>C 接口上均仅作为目标器件运行。通过开漏 SDA 和 SCL 线路实现到总线的连接。SDA 和 SCL 引脚特有的集成式峰值抑制滤波器和施密特触发器可大大减少输入峰值和总线噪声的影响。尽管此器件将峰值抑制功能集成到数字 I/O 线路中, 但采用适当的布局技术有助于更大限度地减少进入通信线路的耦合量。这个引入的噪声会从两条通信线路本身之间的电容耦合信号边沿或者从其他出现在系统中的开关噪声源产生。在一个印刷电路板 (PCB) 上两层之间与接地并联的路由走线通常能减少通信线路间的耦合效应。将通信线路屏蔽可减少有害噪声耦合进入数字 I/O 线路的可能性, 而有害噪声耦合可能会被错误地解释为开始或停止命令。

INA4235 支持针对快速模式 ( 1kHz 至 400kHz ) 和高速模式 ( 1kHz 至 2.94MHz ) 的传输协议。对于所有数据字节, 首先传输最高有效字节, 并遵循 SMBus 3.0 传输协议。

要与 INA4235 通信, 控制器必须首先通过一个目标地址字节来寻找目标器件的地址。目标地址字节包括 7 个地址位和 1 个方向位, 这个方向位表明这个操作将是读取还是写入操作。



该器件具有两个地址引脚：A0 和 A1。表 6-1 列出了 16 个可能地址中每一个地址所需的引脚连接。该器件在每个总线通信上对引脚 A0 和 A1 的状态进行采样。在接口上发生任何活动之前确定引脚状态。

表 6-1. 地址引脚和目标地址

| A1  | A0  | 目标器件地址  |
|-----|-----|---------|
| GND | GND | 1000000 |
| GND | VS  | 1000001 |
| GND | SDA | 1000010 |
| GND | SCL | 1000011 |
| VS  | GND | 1000100 |
| VS  | VS  | 1000101 |
| VS  | SDA | 1000110 |
| VS  | SCL | 1000111 |
| SDA | GND | 1001000 |
| SDA | VS  | 1001001 |
| SDA | SDA | 1001010 |
| SDA | SCL | 1001011 |
| SCL | GND | 1001100 |
| SCL | VS  | 1001101 |
| SCL | SDA | 1001110 |
| SCL | SCL | 1001111 |

### 6.5.2 通过 I<sup>2</sup>C 串行接口写入和读取

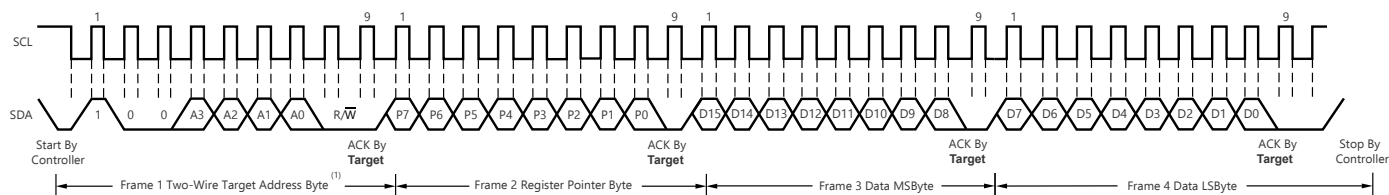
通过向 INA4235 上特定寄存器的指针写入适当的值，可实现对该寄存器的访问。有关寄存器和对应地址的完整列表，请参阅 [寄存器映射](#)。寄存器指针的值（请参阅图 6-5）是  $\overline{R/\overline{W}}$  位为低电平时目标地址字节之后传输的第一个字节。对此器件的每次写入操作都需要一个寄存器指针值。

写入寄存器的过程从控制器传输的第一个字节开始。这个字节为目标地址，其中  $\overline{R/\overline{W}}$  位为低电平。然后，器件确认接收到一个有效地址。控制器传输的下一个字节是要访问的寄存器的地址。此寄存器地址值将寄存器指针更新为指向所需的内部器件寄存器。下两个字节被写入由寄存器指针进行寻址的寄存器。器件确认收到每个数据字节。控制器可以通过生成启动或停止条件来终止数据传输。

从器件读取时，写入操作存储在寄存器指针中的最后一个值确定在读取操作期间应该读取哪一个寄存器。为了将寄存器指针更改为进行读取操作，必须在寄存器指针中写入一个新值。要完成此写入，应在  $\overline{R/\overline{W}}$  位为低电平时发出一个目标地址字节，后跟寄存器指针字节。无需额外的数据。然后，控制器会生成一个启动条件，并在  $\overline{R/\overline{W}}$  位为高电平时发送目标地址字节，以启动读取命令。下一个字节由目标器件发送，是寄存器指针所指示的寄存器的最高有效字节。该字节后跟一个来自控制器的确认；然后目标器件发送最低有效字节。控制器可以（也可能无法）确认收到第二个数据字节。控制器可在接收任何数据字节时生成非确认，或生成启动或停止条件，来终止数据传输。如果需从同一寄存器执行重复的读取操作，则无需连续发送寄存器指针字节。器件会保留寄存器指针值，直到下一次写入操作更改该值为止。

图 6-3 展示了写入操作时序图。图 6-4 展示了读取操作时序图。这些图显示了读取/写入 16 位寄存器的过程。

首先发送的寄存器字节为最高有效字节，之后是最低有效字节。

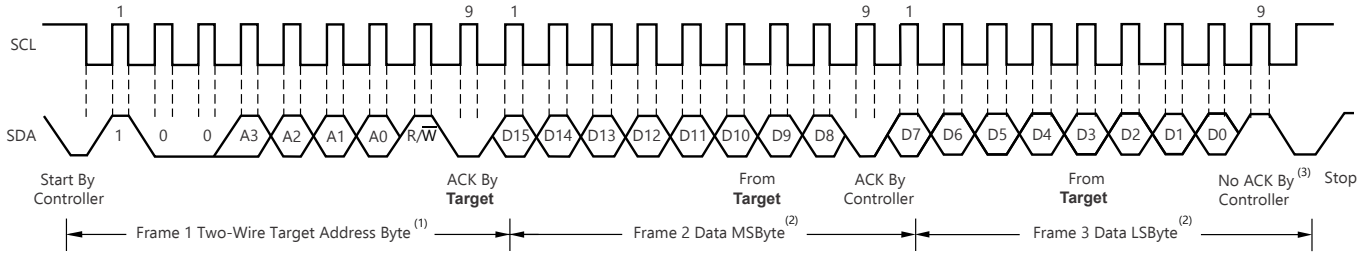


A. 通过 A0 地址引脚的设置可确定目标地址字节的值。请参阅表 6-1。



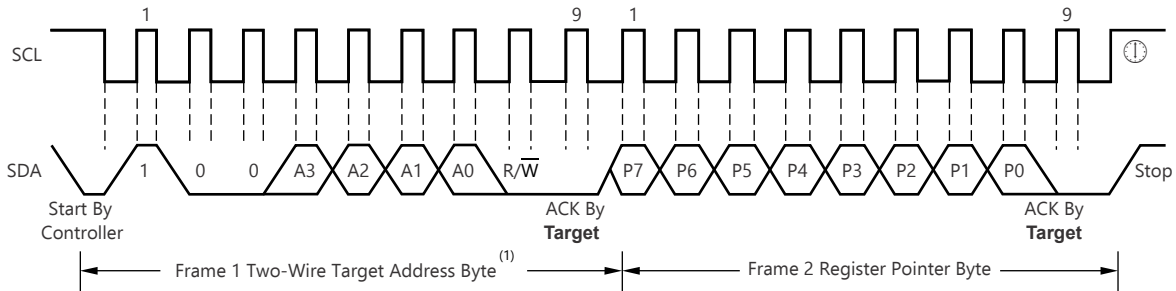
B. 此器件不支持数据包错误检查 (PEC)，也不执行时钟扩展。

**图 6-3. 写入字格式的时序图**



- A. 通过 A0 地址引脚的设置可确定目标地址字节的值。请参阅表 6-1。
- B. 从最后寄存器指针位置开始读取数据。如果需要一个全新的寄存器，必须更新寄存器指针。请参阅图 6-5。
- C. 也可能发送控制器的 ACK。
- D. 此器件不支持数据包错误检查 (PEC)，也不执行时钟扩展。

**图 6-4. 读取字格式的时序图**



- A. 通过 A0 地址引脚的设置可确定目标地址字节的值。请参阅表 6-1。

**图 6-5. 典型寄存器指针设定**

### 6.5.3 高速 I<sup>2</sup>C 模式

当总线空闲时，SDA 和 SCL 线路都被上拉电阻拉至高电平。控制器生成一个启动条件，后跟一个有效的串行字节，其中包含高速 (HS) 控制器代码 00001XXX。该传输在不高于 400kHz 的快速 (400kHz) 模式和标准 (100kHz) (F/S) 模式上进行。器件不对 HS 控制器代码进行确认，但的确会识别该代码并切换其内部滤波器以支持 2.94MHz 运行。

然后，控制器生成重复启动条件 (重复启动条件与启动条件具有相同的时序)。在这个重复的启动条件之后，协议与 F/S 模式一致，除非允许的传输速度高达 2.94MHz。不要使用停止条件，而是使用重复的启动条件将总线保持在 HS 模式。停止条件结束 HS 模式并切换器件的所有滤波器以支持 F/S 模式。

### 6.5.4 通用广播复位

通过通用广播地址 0000 000 (最后一个 R/W 位设置为 0) 寻址，实施对多个器件的通用广播复位。然后是以下数据字节 0000 0110 (06h)。

接收到这个 2 字节序列后，所有设计用于响通用广播地址的器件都将复位。总线上的所有 INA4235 器件都会执行软复位操作并返回默认上电条件

### 6.5.5 SMBus 警报响应

INA4235 设计为响应 SMBus 警报响应地址。SMBus 警报响应为简单目标器件提供一个快速故障识别。当警报出现时，控制器可以广播警报响应目标地址 (0001 100) (读取/写入位设为高电平)。在此警报响应之后，任何生成警报的目标器件都会通过确认警报响应并在总线上发送其地址来标识自身。

警报响应能够同时激活几个不同的目标器件，这一点与 I<sup>2</sup>C 通用广播相似。如果多于一个目标器件试图进行响应，那么采用总线仲裁规则。仲裁过程中不具有优先级的器件不会生成确认。在根据仲裁确定器件优先级之前，器件会继续将警报线路保持在低电平。

## 7 寄存器映射

### 7.1 器件寄存器

表 7-1 列出了 INA4235 寄存器。表中未列出的所有寄存器位置都应视为保留的位置，并且不得修改寄存器内容。

表 7-1. INA4235 寄存器概述

| 寄存器名称                     | 地址                  | 寄存器类型 | 寄存器大小 ( 位 ) | 默认值                      |
|---------------------------|---------------------|-------|-------------|--------------------------|
| CONFIG1                   | 0x20                | R/W   | 16          | 0xF127                   |
| CONFIG2                   | 0x21                | R/W   | 16          | 0x0000                   |
| CALIBRATION_(CH1 - CH4)   | 0x05、0x0D、0x15、0x1D | R/W   | 16          | 0x0000                   |
| ALERT_CONFIG(1 - 4)       | 0x07、0x0F、0x17、0x1F | R/W   | 16          | 0x0000                   |
| ALERT_LIMIT(1 - 4)        | 0x06、0x0E、0x16、0x1E | R/W   | 16          | 0x0000                   |
| SHUNT_VOLTAGE_(CH1 - CH4) | 0x00、0x08、0x10、0x18 | R     | 16          | 0x0000                   |
| BUS_VOLTAGE_(CH1 - CH4)   | 0x01、0x09、0x11、0x19 | R     | 16          | 0x0000                   |
| CURRENT_(CH1 - CH4)       | 0x02、0x0A、0x12、0x1A | R     | 16          | 0x0000                   |
| POWER_(CH1 - CH4)         | 0x03、0x0B、0x13、0x1B | R     | 16          | 0x0000                   |
| ENERGY_(CH1 - CH4)        | 0x04、0x0C、0x14、0x1C | R     | 32          | 0x0000                   |
| FLAGS                     | 0x22                | R     | 16          | 0x0000                   |
| MANUFACTURER_ID           | 0x7E                | R     | 16          | 0x5449 ( ASCII 中的 “TI” ) |
| DEVICE_ID                 | 0x7F                | R     | 16          | 0x4350                   |

复杂的位访问类型经过编码可适应小型表单元。表 7-2 展示了适用于此部分中访问类型的代码。

表 7-2. 器件访问类型代码

| 访问类型 | 代码 | 说明 |
|------|----|----|
| 读取类型 |    |    |
| R    | R  | 读取 |
| 写入类型 |    |    |
| W    | W  | 写入 |

#### 7.1.1 CONFIG1 寄存器 ( 地址 = 0x20h ) [复位 = F127h]

配置寄存器如表 7-3 所示。

表 7-3. CONFIG1 寄存器字段说明

| 位     | 字段             | 类型  | 复位    | 说明                                                                                                                                                                                    |
|-------|----------------|-----|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15-12 | ACTIVE_CHANNEL | R/W | 1111b | 这 4 位决定哪些通道处于活动状态。将此位设置为 “1” 可以启用每个通道。禁用的通道将在周期中被跳过。<br>Bit15 = 通道 4 测量启用/禁用。<br>Bit14 = 通道 3 测量启用/禁用。<br>Bit13 = 通道 2 测量启用/禁用。<br>Bit12 = 通道 1 测量启用/禁用。<br>上电默认值：1111b = 所有通道均处于活动状态 |

**表 7-3. CONFIG1 寄存器字段说明 (续)**

| 位    | 字段     | 类型  | 复位   | 说明                                                                                                                                                                                                                                 |
|------|--------|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11-9 | AVG    | R/W | 000b | 设置要取平均值的 ADC 转换结果数。均值计算完成后，更新回读寄存器。<br><b>000b = 1</b><br>001b = 4<br>010b = 16<br>011b = 64<br>100b = 128<br>101b = 256<br>110b = 512<br>111b = 1024                                                                              |
| 8-6  | VBUSCT | R/W | 100b | 设置 VBUS 测量的转换时间<br>000b = 140µs<br>001b = 204µs<br>010b = 332µs<br>011b = 588µs<br><b>100b = 1100µs</b><br>101b = 2116µs<br>110b = 4156µs<br>111b = 8244µs                                                                         |
| 5-3  | VSHCT  | R/W | 100b | 设置 SHUNT 测量的转换时间<br>000b = 140µs<br>001b = 204µs<br>010b = 332µs<br>011b = 588µs<br><b>100b = 1100µs</b><br>101b = 2116µs<br>110b = 4156µs<br>111b = 8244µs                                                                        |
| 2-0  | MODE   | R/W | 111b | 运行模式，可选择模式使器件在关断模式、连续模式或触发模式下运行。该模式还允许用户选择多路复用器设置，以针对总线电压和分流电压测量设置连续或触发模式。<br>000b = 关断<br>001b = 触发分流电压，单次<br>010b = 触发总线电压，单次<br>011b = 触发分流电压和总线电压，单次<br>100b = 关断<br>101b = 连续分流电压<br>110b = 连续总线电压<br><b>111b = 连续分流和总线电压</b> |

返回到[汇总表](#)。

## 7.1.2 CONFIG2 寄存器

配置寄存器如[表 7-4](#)所示。

**表 7-4. CONFIG2 寄存器字段说明**

| 位  | 字段  | 类型  | 复位 | 说明                                                     |
|----|-----|-----|----|--------------------------------------------------------|
| 15 | RST | R/W | 0b | 将该位设置为“1”会生成一个与上电复位相同的系统复位。<br>将所有寄存器复位为默认值，然后它们会自行清除。 |

表 7-4. CONFIG2 寄存器字段说明 (续)

| 位     | 字段          | 类型  | 复位    | 说明                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|-------------|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 14-12 | 保留          | R   | 000b  | 这些位始终读取 0。                                                                                                                                                                                                                                       |
| 11-8  | ACC_RST     | R/W | 0000b | 对这些位写入 1 会复位 ENERGY 寄存器并清除所有溢出标志。<br>Bit11 = 通道 4 能量复位, 溢出清除。<br>Bit10 = 通道 3 能量复位, 溢出清除。<br>Bit9 = 通道 2 能量复位, 溢出清除。<br>Bit8 = 通道 1 能量复位, 溢出清除。<br>上电默认值: <b>0000b = 所有通道均处于活动状态</b><br>写入后, 位会复位回 0。                                            |
| 7     | CNVR_MASK   | R/W | 0b    | 将此位设置为高电平会把 ALERT 引脚配置为在转换完成时被置为有效。<br>0b = 禁用 ALERT 引脚上的转换就绪标志<br>1b = 启用 ALERT 引脚上的转换就绪标志<br>ALERT 会保持有效, 直到标志寄存器中的 CVRF 字段被读取。                                                                                                                |
| 6     | ENOF_MASK   | R/W | 0b    | 当设置为 1 时, 当任何使能通道上发生能量溢出情况时, Alert 引脚切换                                                                                                                                                                                                          |
| 5     | ALERT_LATCH | R/W | 0b    | 当设置为 1 时, Alert 引脚的状态会在故障条件下锁存。要清除警报, 必须读取警报标志寄存器并移除故障条件。                                                                                                                                                                                        |
| 4     | ALERT_POL   | R/W | 0b    | 如果此位设为 1, ALERT 引脚会在故障情况下从低电平切换到高电平。<br>当设置为 0 (默认值) 时, ALERT 引脚会在故障期间从高电平切换到低电平。                                                                                                                                                                |
| 3-0   | 范围          | R/W | 0000b | 允许为每个通道选择分流器满量程输入范围。<br>Bit3 = 通道 4 范围选择。<br>Bit2 = 通道 3 范围选择。<br>Bit1 = 通道 2 范围选择。<br>Bit0 = 通道 1 范围选择。<br>范围选择位 = 0 选择 $\pm 81.92\text{mV}$<br>范围选择位 = 1 选择 $\pm 20.48\text{mV}$<br><b>0000b = 所有通道均设置为 <math>\pm 81.92\text{mV}</math> 范围</b> |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.3 校准寄存器

必须对表 7-5 中显示的校准寄存器进行编程, 以便在初始上电、下电上电事件后或在器件启用时接收有效的电流、功率和能源结果。

表 7-5. INA4235 校准寄存器

| 地址   | 寄存器名称           | 寄存器类型 | 寄存器大小 (位) |
|------|-----------------|-------|-----------|
| 0x05 | CALIBRATION_CH1 | R/W   | 16        |
| 0x0D | CALIBRATION_CH2 | R/W   | 16        |
| 0x15 | CALIBRATION_CH3 | R/W   | 16        |
| 0x1D | CALIBRATION_CH4 | R/W   | 16        |

该寄存器为器件提供分流电阻的值, 此分流电阻用于产生测量的差分电压。该寄存器还设定电流寄存器的分辨率。对该寄存器进行编程可设置 Current\_LSB 和 Power\_LSB。

表 7-6. 校准寄存器字段说明

| 位    | 字段        | 类型  | 复位    | 说明                 |
|------|-----------|-----|-------|--------------------|
| 15   | 保留        | R   | 0h    |                    |
| 14-0 | SHUNT_CAL | R/W | 0000h | 执行分流电压至电流转换所需的编程值。 |

返回到[汇总表](#)。

#### 7.1.4 警报配置寄存器

警报配置寄存器如表 7-7 所示。

表 7-7. INA4235 ALERT\_CONFIG 寄存器

| 地址   | 寄存器名称  | 寄存器类型 | 寄存器大小 ( 位 ) |
|------|--------|-------|-------------|
| 0x07 | ALERT1 | R/W   | 16          |
| 0x0F | ALERT2 | R/W   | 16          |
| 0x17 | ALERT3 | R/W   | 16          |
| 0x1F | ALERT4 | R/W   | 16          |

每个警报配置寄存器的格式如表 7-8 所示。

这些寄存器用于配置在何种情况下为每个通道触发警报。警报屏蔽字段会设置活动警报。根据应用的需求，最多可为给定通道分配 4 个警报，或者在所有通道之间平均分配 4 个警报。

表 7-8. 警报配置寄存器字段说明

| 位      | 字段         | 类型  | 复位            | 说明                                                                                                                                                                                 |
|--------|------------|-----|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 - 4 | 保留         | R   | 000000000000b | 保留                                                                                                                                                                                 |
| 4-3    | 通道         | R/W | 00b           | 选择<br>00b = 通道 1<br>01b = 通道 2<br>10b = 通道 3<br>11b = 通道 4                                                                                                                         |
| 2-0    | ALERT_MASK | R/W | 000b          | 设置所分配通道的活动警报<br>000b = 保留，无影响<br>001b = 分流电压超限 (SOL)<br>010b = 分流电压未超限 (SUL)<br>011b = 总线电压超限 (BOL)<br>100b = 总线电压未超限 (BUL)<br>101b = 功率超限 (POL)<br>110b = 保留，无影响<br>111b = 保留，无影响 |

警报配置寄存器会设置在何种情况下为每个通道触发警报。警报屏蔽字段会设置活动警报。根据应用的不同，最多可为给定通道分配 4 个警报，或者在所有通道之间按需分配 4 个警报。

返回到[汇总表](#)。

#### 7.1.5 警报限值寄存器

必须对表 7-9 中显示的警报限值寄存器进行编程，以设置所需的故障限制阈值。

表 7-9. INA4235 ALERT\_LIMIT 寄存器

| 地址   | 寄存器名称  | 寄存器类型 | 复位    | 寄存器大小 ( 位 ) |
|------|--------|-------|-------|-------------|
| 0x06 | LIMIT1 | R/W   | 0000h | 16          |
| 0x0E | LIMIT2 | R/W   | 0000h | 16          |
| 0x16 | LIMIT3 | R/W   | 0000h | 16          |

**表 7-9. INA4235 ALERT\_LIMIT 寄存器 (续)**

| 地址   | 寄存器名称  | 寄存器类型 | 复位    | 寄存器大小 (位) |
|------|--------|-------|-------|-----------|
| 0x1E | LIMIT4 | R/W   | 0000h | 16        |

警报限值寄存器的格式遵循相应结果寄存器的格式。

分流电压限值表示为有符号 16 位，总线电压限值表示为无符号 15 位，功率限值表示为无符号 16 位值。

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.6 分流电压寄存器

分流电压寄存器存储分流器电压读数， $V_{SHUNT}$ 。每个通道的分流电压测量具有唯一的地址，如表 7-10 所示。

**表 7-10. INA4235 SHUNT\_VOLTAGE 寄存器**

| 地址   | 寄存器名称             | 寄存器类型 | 寄存器大小 (位) |
|------|-------------------|-------|-----------|
| 0x00 | SHUNT_VOLTAGE_CH1 | R     | 16        |
| 0x08 | SHUNT_VOLTAGE_CH2 | R     | 16        |
| 0x10 | SHUNT_VOLTAGE_CH3 | R     | 16        |
| 0x18 | SHUNT_VOLTAGE_CH4 | R     | 16        |

每个分流电压寄存器的格式如表 7-11 所示。

如果均值计算处于启用状态，则这些寄存器包含分流电压平均值。

**表 7-11. 分流电压寄存器字段说明**

| 位    | 字段     | 类型 | 复位    | 说明                   |
|------|--------|----|-------|----------------------|
| 15-0 | VSHUNT | R  | 0000h | 分流输出上测得的差分电压。二进制补码值。 |

负数以二进制补码格式表示。通过对绝对值二进制数进行补数操作并加 1 来生成一个负数的二进制补码。MSB = “1” 表示负数。

**示例：**对于  $V_{SHUNT} = -80\text{mV}$  的值：

1. 取绝对值：80mV
2. 将这个值转变为一个完整的十进制数 ( $80\text{mV} \div 2.5\mu\text{V}$ ) = 32000
3. 将这个值转换为二进制 = 0111 1101 0000 0000
4. 对这个二进制结果作补数操作 = 1000 0010 1111 1111
5. 将 “1” 添加到补码以创建二进制补码结果 = 1000 0011 0000 0000 = 8300h

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.7 总线电压寄存器

总线电压寄存器存储在总线引脚上为每个通道测得的电压。总线电压测量值存储在唯一的寄存器地址中，如表 7-12 所示。

**表 7-12. INA4235 BUS\_VOLTAGE 寄存器**

| 地址   | 寄存器名称           | 寄存器类型 | 寄存器大小 (位) |
|------|-----------------|-------|-----------|
| 0x01 | BUS_VOLTAGE_CH1 | R     | 16        |
| 0x09 | BUS_VOLTAGE_CH2 | R     | 16        |
| 0x11 | BUS_VOLTAGE_CH3 | R     | 16        |
| 0x19 | BUS_VOLTAGE_CH4 | R     | 16        |

每个总线电压寄存器的格式如表 7-13 所示。

总线电压寄存器仅返回正值。如果均值计算处于启用状态，则该寄存器显示平均值。

**表 7-13. BUS\_VOLTAGE 寄存器字段说明**

| 位    | 字段   | 类型 | 复位    | 说明                   |
|------|------|----|-------|----------------------|
| 15-0 | VBUS | R  | 0000h | 总线电压输出。二进制补码值，但始终为正。 |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.8 CURRENT 寄存器

电流寄存器存储每个通道的计算得出的电流值。如表 7-14 所示，电流测量值存储在唯一的寄存器地址中。

**表 7-14. INA4235 CURRENT 寄存器**

| 地址   | 寄存器名称       | 寄存器类型 | 寄存器大小 ( 位 ) |
|------|-------------|-------|-------------|
| 0x02 | CURRENT_CH1 | R     | 16          |
| 0x0A | CURRENT_CH2 | R     | 16          |
| 0x12 | CURRENT_CH3 | R     | 16          |
| 0x1A | CURRENT_CH4 | R     | 16          |

每个总线电流寄存器的格式如表 7-15 所示。

如果均值计算处于启用状态，则该寄存器显示平均值。将分流电压寄存器中的十进制值乘以校准寄存器的十进制值可以得出电流寄存器的值。

**表 7-15. CURRENT 寄存器字段说明**

| 位    | 字段      | 类型 | 复位    | 说明                          |
|------|---------|----|-------|-----------------------------|
| 15-0 | CURRENT | R  | 0000h | 计算得出的电流输出 ( 单位为安培 )。二进制补码值。 |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.9 POWER 寄存器

功率寄存器存储每个通道的总线电压和电流的乘积值。功率测量值存储在唯一的寄存器地址中，如表 7-16 所示。

**表 7-16. INA4235 POWER 寄存器**

| 地址   | 寄存器名称     | 寄存器类型 | 寄存器大小 ( 位 ) |
|------|-----------|-------|-------------|
| 0x03 | POWER_CH1 | R     | 16          |
| 0x0B | POWER_CH2 | R     | 16          |
| 0x13 | POWER_CH3 | R     | 16          |
| 0x1B | POWER_CH4 | R     | 16          |

每个总线功率寄存器的格式如表 7-17 所示。

如果均值计算处于启用状态，则该寄存器显示平均值。功率寄存器通过将电流寄存器的十进制值乘以总线电压寄存器的十进制值来记录功率 ( 以瓦特为单位 )。这是一个无符号结果。

**表 7-17. POWER 寄存器字段说明**

| 位    | 字段    | 类型 | 复位    | 说明                           |
|------|-------|----|-------|------------------------------|
| 15-0 | POWER | R  | 0000h | 该位返回系统中功率的计算值。<br>这是一个无符号结果。 |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.10 电能寄存器

电能寄存器会累积来自功率寄存器的数据，并使用内部精密时基计算和存储每个通道的电能。电能测量值存储在唯一的寄存器地址中，如[表 7-18](#) 所示。

**表 7-18. INA4235 ENERGY 寄存器**

| 地址   | 寄存器名称      | 寄存器类型 | 寄存器大小 ( 位 ) |
|------|------------|-------|-------------|
| 0x04 | ENERGY_CH1 | R     | 32          |
| 0x0C | ENERGY_CH2 | R     | 32          |
| 0x14 | ENERGY_CH3 | R     | 32          |
| 0x1C | ENERGY_CH4 | R     | 32          |

每个总线功率寄存器的格式如[表 7-19](#) 所示。

电能寄存器会记录以焦耳为单位的电能并将精确振荡器用作时基。这是一个无符号结果。

**表 7-19. 电能寄存器字段说明**

| 位    | 字段     | 类型 | 复位        | 说明                           |
|------|--------|----|-----------|------------------------------|
| 31-0 | ENERGY | R  | 00000000h | 该位返回系统中电能的计算值。<br>这是一个无符号结果。 |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.11 标志寄存器

标志寄存器如[表 7-20](#) 所示。

**表 7-20. 标志寄存器字段说明**

| 位   | 字段              | 类型 | 复位      | 说明                                                                                                                                              |
|-----|-----------------|----|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15  | LIMIT4_ALERT    | R  | 0b      | 表示已超出第四个警报限值。此警报与通道无关。                                                                                                                          |
| 14  | LIMIT3_ALERT    | R  | 0b      | 表示已超出第三个警报限值。此警报与通道无关。                                                                                                                          |
| 13  | LIMIT2_ALERT    | R  | 0b      | 表示已超出第二个警报限值。此警报与通道无关。                                                                                                                          |
| 12  | LIMIT1_ALERT    | R  | 0b      | 表示已超出第一个警报限值。此警报与通道无关。                                                                                                                          |
| 11  | ENERGYOF_CH4    | R  | 0b      | 表示通道 4 的电能寄存器已溢出                                                                                                                                |
| 10  | ENERGYOF_CH3    | R  | 0b      | 表示通道 3 的电能寄存器已溢出                                                                                                                                |
| 9   | ENERGYOF_CH2    | R  | 0b      | 表示通道 2 的电能寄存器已溢出                                                                                                                                |
| 8   | ENERGYOF_CH1    | R  | 0b      | 表示通道 1 的电能寄存器已溢出                                                                                                                                |
| 7   | CVRF ( 转换就绪标志 ) | R  | 0b      | 虽然可随时读取此器件，并且来自上次转换的数据可用，但提供的转换就绪标志位可帮助协调单次或触发转换。<br>转换就绪标志位在所有转换、均值计算和乘法运算完成之后置位。<br>在以下情况下，将清除转换就绪标志位：<br>1.)写入配置寄存器 ( 断电选择除外 )<br>2.)读取标志寄存器 |
| 6   | OVF ( 数学溢出 )    | R  | 0b      | 如果算术运算导致一个溢出错误的话，该位被置为 1。该位表示电流和功率值可能是无效的。                                                                                                      |
| 5-0 | 保留              | -  | 000000b | 保留                                                                                                                                              |



返回到[汇总表](#)。

### 7.1.12 制造商 ID 寄存器 ( 地址 = 7Eh )

制造商 ID 寄存器如表 7-21 所示。

表 7-21. MANUFACTURE\_ID 寄存器字段说明

| 位    | 字段             | 类型 | 复位    | 说明              |
|------|----------------|----|-------|-----------------|
| 15-0 | MANUFACTURE_ID | R  | 5449h | 以 ASCII 格式读回 TI |

返回到[汇总表](#)。

### 7.1.13 器件标识寄存器 ( 地址 = 7Fh )

DEVICE\_ID 寄存器如表 7-22 所示。

表 7-22. DEVICE\_ID 寄存器字段说明

| 位    | 字段     | 类型 | 复位    | 说明        |
|------|--------|----|-------|-----------|
| 15-4 | DIE_ID | R  | 0x435 | 存储器件标识位   |
| 3-0  | REV_ID | R  | 1h    | 器件修订版本标识。 |

返回到[汇总表](#)。

## 8 应用和实施

### 备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 元件规格，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客户负责确定元件是否适合其用途，以及验证和测试其设计实现以确认系统功能。

### 8.1 应用信息

INA4235 是一款具有 I<sup>2</sup>C 和 SMBus 兼容接口的多通道电流分流监控器。该器件监控分流压降来计算 IN- 引脚处的电流和总线电压，可确定最多四个测量通道的功率和电能。可编程校准值、转换时间和均值计算（与内部乘法器结合使用）可实现电流值（单位为安培）、功率值（单位为瓦特）和电能（焦耳）值的直接读取。

#### 8.1.1 器件测量范围和分辨率

INA4235 器件支持每个通道的分流电压测量值的两个输入范围。IN+ 和 IN- 引脚之间支持的满量程差分输入可以是  $\pm 81.92\text{mV}$  或  $\pm 20.48\text{mV}$ ，具体取决于 [CONFIG2 寄存器](#) 寄存器中的 RANGE 字段。IN- 引脚上的总线电压测量范围为 0V 至 52.42V，但受工艺额定值限制，不超过最大工作电压。

[表 8-1](#) 描述了分流器和总线电压测量的满量程电压及相关的分辨率。

**表 8-1. ADC 满量程值**

| 参数   | 满量程值                                | 分辨率                          |
|------|-------------------------------------|------------------------------|
| 分流电压 | $\pm 81.92\text{mV}$ (ADCRANGE = 0) | 2.5 $\mu\text{V}/\text{LSB}$ |
|      | $\pm 20.48\text{mV}$ (ADCRANGE = 1) | 625nV/LSB                    |
| 总线电压 | 0V 至 52.4V (将可用范围限制为建议的工作电压)        | 1.6mV/LSB                    |

分别通过分流电压寄存器和总线电压寄存器读取器件的分流电压和总线电压测量值。分流电压和总线电压寄存器中的数字输出为 16 位。由于系统中的双向电流，分流电压测量值可以是正值或负值；因此，分流电压寄存器中的数据值可以是正值，也可以是负值。总线电压寄存器数据值始终为正值。通过将数字值乘以其各自的分辨率大小，可以将输出数据直接转换为电压。

此外，该器件还可灵活地报告计算出的电流（以安培为单位）和功率（以瓦特为单位），如[电流和功率计算](#)中所述。

#### 8.1.2 电流和功率计算

为了使 INA4235 以安培为单位报告电流值，必须在每个校准寄存器中写入一个恒定的转换值，该值取决于所选的 CURRENT\_LSB 以及每个通道的应用中使用的分流电阻。校准寄存器的值根据[方程式 1](#) 计算得出。CURRENT\_LSB 项是存储电流的 CURRENT 寄存器的所选 LSB 步长。[方程式 2](#) 显示 CURRENT\_LSB 的最小值基于最大预期电流，该公式直接定义 CURRENT 寄存器的最大分辨率。虽然 CURRENT\_LSB 值越小分辨率越高，但为了简化 CURRENT 的转换，通常为 CURRENT\_LSB 选择较高的整数（不高于 8x）值。

$R_{SHUNT}$  项是用于在  $IN+$  和  $IN-$  引脚产生差分电压的外部分流器的电阻值。ADCRANGE = 0 时，使用[方程式 1](#)。ADCRANGE = 1 时，SHUNT\_CAL 的值必须除以 4。

$$SHUNT\_CAL = \frac{0.00512}{Current\_LSB \times R_{SHUNT}} \quad (1)$$

其中

- 0.00512 是一个内部固定值，用于确保适当地保持调节。
- CURRENT\_LSB 是以安培为单位的电流步长的选定值。该值必须大于或等于 CURRENT\_LSB (最小值)，但小于 8 倍 CURRENT\_LSB (最小值)，以便减少分辨率损失。
- ADCRANGE = 1 时，SHUNT\_CAL 的值必须除以 4。

$$CURRENT\_LSB \text{ (minimum)} = \frac{\text{Maximum Expected Current}}{2^{15}} \quad (2)$$

请注意，电流是根据 SHUNT\_CAL 字段中设置的值进行分流电压测量后计算得出的。如果加载到 SHUNT\_CAL 字段的值为零，则通过 CURRENT 寄存器报告的电流值也为零。

使用计算值对 SHUNT\_CAL 字段进行编程后，可以从 CURRENT 寄存器中读取以安培为单位的测量电流。使用[方程式 3](#) 计算由 CURRENT\_LSB 调节的最终值：

$$\text{Current [A]} = CURRENT\_LSB \times CURRENT \quad (3)$$

其中

- CURRENT 是从 CURRENT 寄存器中读取的值

可以从 POWER 寄存器中将功率值读取为以库仑为无符号 16 位值。使用[方程式 4](#) 将功率转换为瓦特值：

$$\text{Power [W]} = 32 \times CURRENT\_LSB \times POWER \quad (4)$$

其中

- POWER 是从 POWER 寄存器中读取的值。
- CURRENT\_LSB 是所选通道的所选 lsb 大小。

可以从每个 ENERGY 寄存器中将电能值读取为 32 位无符号值。使用[方程式 5](#) 将能量转换为焦耳值：

$$\text{Energy [J]} = 32 \times CURRENT\_LSB \times ENERGY \quad (5)$$

其中

- ENERGY 是从每个 ENERGY 寄存器中读取的值。
- CURRENT\_LSB 是所选通道的所选 lsb 大小。

### 8.1.3 ADC 输出数据速率和噪声性能

INA4235 的噪声性能和有效分辨率取决于 ADC 转换时间。该器件还支持数字均值计算功能，有助于进一步降低数字噪声。此器件可选择 ADC 转换时间和数据平均值计算功能，这种灵活性提高了信噪比，并以更低的偏移量实现

更高的动态范围。较低信号电平下的噪声分布主要由系统噪声控制，而系统噪声主要由  $1/f$  噪声或白噪声组成。通过增加转换时间和平均值数量，可以提高 ADC 的有效分辨率。

表 8-2 总结了器件支持的输出数据速率转换设置。最快的转换设置为  $140\mu\text{s}$ 。典型的无噪声分辨率表示为基于器件测量数据的有效位数 (ENOB)。ENOB 是根据噪声峰峰值计算的，这可确保考虑完整的噪声分布。

**表 8-2. INA4235 噪声性能、电流测量、启用单通道**

| ADC 转换时间周期 [ $\mu\text{s}$ ] | 输出采样平均值计算<br>[采样量] | 输出采样周期 [ms] | 无噪声 ENOB ( $\pm 81.92\text{mV}$ )<br>(ADCRANGE = 0) | 无噪声 ENOB ( $\pm 20.48\text{mV}$ )<br>(ADCRANGE = 1) |
|------------------------------|--------------------|-------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 140                          | 1                  | 0.14        | 13.1                                                | 11.1                                                |
| 204                          | 1                  | 0.204       | 13.4                                                | 11.1                                                |
| 332                          | 1                  | 0.332       | 14.1                                                | 11.7                                                |
| 588                          | 1                  | 0.588       | 14.7                                                | 12.2                                                |
| 1100                         | 1                  | 1.1         | 14.7                                                | 12.5                                                |
| 2116                         | 1                  | 2.116       | 15.1                                                | 13.4                                                |
| 4156                         | 1                  | 4.156       | 15.7                                                | 14.1                                                |
| 8244                         | 1                  | 8.244       | 16.0                                                | 14.7                                                |
| 140                          | 4                  | 0.56        | 14.1                                                | 12.1                                                |
| 204                          | 4                  | 0.816       | 14.4                                                | 12.4                                                |
| 332                          | 4                  | 1.328       | 15.1                                                | 12.9                                                |
| 588                          | 4                  | 2.352       | 15.7                                                | 13.4                                                |
| 1100                         | 4                  | 4.4         | 15.7                                                | 13.7                                                |
| 2116                         | 4                  | 8.464       | 16.0                                                | 14.7                                                |
| 4156                         | 4                  | 16.624      | 16.0                                                | 14.7                                                |
| 8244                         | 4                  | 32.976      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 140                          | 16                 | 2.24        | 15.1                                                | 13.1                                                |
| 204                          | 16                 | 3.264       | 15.7                                                | 13.4                                                |
| 332                          | 16                 | 5.312       | 15.7                                                | 14.1                                                |
| 588                          | 16                 | 9.408       | 16.0                                                | 14.4                                                |
| 1100                         | 16                 | 17.6        | 16.0                                                | 15.1                                                |
| 2116                         | 16                 | 33.856      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 4156                         | 16                 | 66.496      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 8244                         | 16                 | 131.904     | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 140                          | 64                 | 8.96        | 15.7                                                | 13.7                                                |
| 204                          | 64                 | 13.056      | 16.0                                                | 14.4                                                |
| 332                          | 64                 | 21.248      | 16.0                                                | 15.1                                                |
| 588                          | 64                 | 37.632      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 1100                         | 64                 | 70.4        | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 2116                         | 64                 | 135.424     | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 4156                         | 64                 | 265.984     | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 8244                         | 64                 | 527.616     | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 140                          | 128                | 17.92       | 16.0                                                | 14.1                                                |
| 204                          | 128                | 26.112      | 16.0                                                | 15.1                                                |
| 332                          | 128                | 42.496      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 588                          | 128                | 75.264      | 16.0                                                | 15.7                                                |
| 1100                         | 128                | 140.8       | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 2116                         | 128                | 270.848     | 16.0                                                | 16.0                                                |
| 4156                         | 128                | 531.968     | 16.0                                                | 16.0                                                |

**表 8-2. INA4235 噪声性能、电流测量、启用单通道 (续)**

| ADC 转换时间周期 [ $\mu$ s] | 输出采样平均值计算<br>[采样量] | 输出采样周期 [ms] | 无噪声 ENOB ( $\pm 81.92$ mV)<br>(ADCRANGE = 0) | 无噪声 ENOB ( $\pm 20.48$ mV)<br>(ADCRANGE = 1) |
|-----------------------|--------------------|-------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 8244                  | 128                | 1055.232    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 140                   | 256                | 35.84       | 16.0                                         | 14.7                                         |
| 204                   | 256                | 52.224      | 16.0                                         | 15.7                                         |
| 332                   | 256                | 84.992      | 16.0                                         | 15.7                                         |
| 588                   | 256                | 150.528     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 1100                  | 256                | 281.6       | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 2116                  | 256                | 541.696     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 4156                  | 256                | 1063.936    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 8244                  | 256                | 2110.464    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 140                   | 512                | 71.68       | 16.0                                         | 15.1                                         |
| 204                   | 512                | 104.448     | 16.0                                         | 15.7                                         |
| 332                   | 512                | 169.984     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 588                   | 512                | 301.056     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 1100                  | 512                | 563.2       | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 2116                  | 512                | 1083.392    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 4156                  | 512                | 2127.872    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 8244                  | 512                | 4220.928    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 140                   | 1024               | 143.36      | 16.0                                         | 15.7                                         |
| 204                   | 1024               | 208.896     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 332                   | 1024               | 339.968     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 588                   | 1024               | 602.112     | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 1100                  | 1024               | 1126.4      | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 2116                  | 1024               | 2166.784    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 4156                  | 1024               | 4255.744    | 16.0                                         | 16.0                                         |
| 8244                  | 1024               | 8441.856    | 16.0                                         | 16.0                                         |

#### 8.1.4 滤波和输入考虑

测量电流通常会产生较多噪声，这种噪声难以定义。通过允许在配置寄存器 (0h) 中独立选择转换时间和平均值数量，INA4235 为滤波提供了几个选项。转换时间可针对分流电压和总线电压测量独立设置，从而更加灵活地配置和监控电源总线。

内部 ADC 基于一个三角积分 ( $\Delta \Sigma$ ) 前端，此前端有一个 500kHz (最大  $\pm 0.5\%$ ) 的采样速率。此架构具有良好的固有噪声抑制能力；但是，在采样率谐波或非常接近采样率谐波处发生的瞬变可能会引起问题。这些信号的频率为 1MHz 或更高，可通过在器件输入端加入滤波来管理这些信号。高频使得在滤波器上使用低值串联电阻成为可能，而这对测量准确度的影响可以忽略。通常，仅当瞬态恰好出现在 500kHz ( $\pm 0.5\%$  最大值) 采样率 (大于 1MHz) 的谐波上时，才需要对器件输入进行滤波。使用尽可能低的串联电阻值 (通常为 100  $\Omega$  或者更少) 和一个陶瓷电容器的滤波器。该电容器的建议值介于 0.1 $\mu$ F 和 1 $\mu$ F 之间。图 8-1 显示了在输入端添加滤波器的器件。

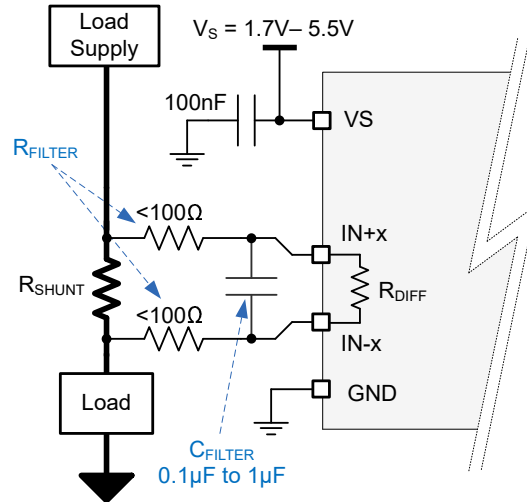


图 8-1. 输入滤波

对于器件输入，过载条件是另外一个考虑因素。器件输入在输入端可承受 26V 的额定电压。差分电压过大，会使分流器负载侧对地短路，导致分流器承受完整的总线电源电压（只要电源或者储能电容器能够支持此电压）。消除对地短路可能导致电感反冲，而电感反冲可能超过器件的 26V 差分及 48V 共模额定值。电感反冲电压应由具有足够储能电容的齐纳类型瞬变吸收器件（通常称为瞬变吸收器）来控制。具有瞬态稳定性的电流分流监控器参考设计介绍了一款高侧电流分流监控器（用于测量电流检测电阻器上产生的电压），并介绍了如何更好地保护电流检测器件免受瞬态过压情况的影响。

对于在分流器的一侧或两侧没有大型储能电解质的应用，施加到输入上的电压的过量  $dV/dt$  可能会导致输入过应力条件。硬物理短路非常可能是导致此事件的原因，过量的  $dV/dt$  会在具有大电流的系统中激活 ESD 保护功能。测试表明，通过添加与器件的每个输入串联的  $10\Omega$  电阻器，可充分保护输入免受  $dV/dt$  故障（高达器件的 48V 电压额定值）的影响。按照注释中给出的范围选择这些电阻器对准确度产生的影响最小。

## 8.2 典型应用

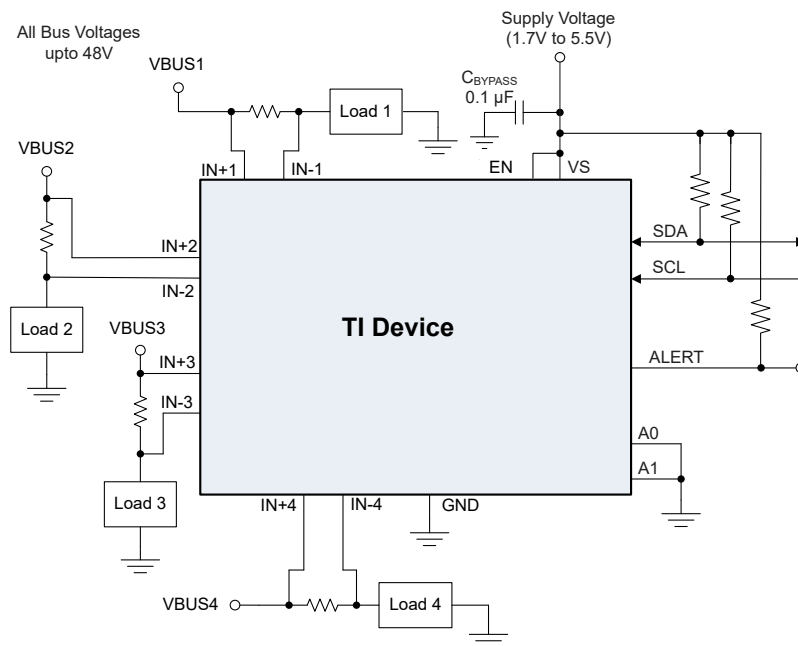


图 8-2. 典型的高侧检测电路配置，INA4235

### 8.2.1 设计要求

INA4235 具有 4 个通道，可测量电流通过电流检测电阻器 ( $R_{SHUNT}$ ) 时产生的电压。该器件还测量总线电源电压并计算每个通道的功率和电能。它还具有警报功能。可以对 ALERT 引脚进行编程，以响应用户定义的事件或转换就绪通知。

表 8-3 列出了图 8-2 中所示电路单通道的设计要求。

**表 8-3. 通道 1 的设计参数**

| 设计参数                          | 示例值           |
|-------------------------------|---------------|
| 电源电压 ( $V_S$ )                | 3.3V          |
| 总线电源轨 ( $V_{CM}$ )            | 12V           |
| 平均电流                          | 6A            |
| 过流故障阈值                        | 9A            |
| 监控的最大电流 ( $I_{MAX}$ )         | 10A           |
| ADC 范围选择 ( $V_{SENSE\_MAX}$ ) | $\pm 81.92mV$ |
| 能量累积期间                        | 1 小时          |

### 8.2.2 详细设计过程

此设计示例介绍了选择分流电阻器、对校准寄存器进行编程、设置正确的故障阈值以及如何正确为器件的通道 1 调节器件返回的值的过

#### 8.2.2.1 选择分流电阻

使用表 8-3 中的值，根据所选 ADC 范围内待感测的最大电流 ( $I_{MAX}$ ) 和最大允许感测电压 ( $V_{SENSE\_MAX}$ ) 计算分流电阻的最大值。在最大电流下工作时，差分输入电压不得超过器件的最大满量程范围  $V_{SENSE\_MAX}$ 。对于给定的设计参数，使用方程式 6 计算出  $R_{SHUNT}$  的最大值为  $8.192m\Omega$ 。小于最大计算值的最接近的标准电阻值为  $8.0m\Omega$ 。可以使用较小的电阻器来尽可能降低功率损耗，但这样会降低精度。所选分流电阻器必须具有足够的功率，以便在所需工作温度下处理最大负载时的功率损耗。

$$R_{SHUNT} < \frac{V_{SENSE\_MAX}}{I_{MAX}} \quad (6)$$

#### 8.2.2.2 配置器件

对 INA4235 进行编程的第一步是正确设置器件配置寄存器 CONFIG1 和 CONFIG2。初始上电时，配置寄存器设置为复位值 (请参阅表 7-3 和表 7-4)。在默认上电状态下，器件设置为在  $\pm 81.92mV$  范围内进行测量，而 ADC 持续转换所有通道的分流电压和总线电压 (IN- 处的电压)。如果默认上电条件不符合设计要求，则需要在每次禁用或  $V_S$  下电上电事件后正确设置这些寄存器。

#### 8.2.2.3 对分流校准寄存器进行编程

每个通道有四个分流校准寄存器，每次上电后都需要正确编程，器件才能根据电流正确报告任何结果。要计算校准寄存器的值，第一步是使用方程式 2 计算电流的最小 LSB 值。在最大预期电流为 10A 的情况下应用该公式，得出最小 LSB 大小为  $305.17578\mu A$ 。INA4235 允许选择的 CURRENT\_LSB 比最小 LSB 大 8 倍之多。本例中使用的值为  $500\mu A$ 。将方程式 1 应用于 Current\_LSB 和分流电阻器的选定值，会导致分类校准寄存器设置为 1280d (500h)。如果未能设置分流校准寄存器的值，会导致该通道基于电流的任何结果为零值。读取分流电压、总线电压或设置相应的警报限值不需要对这些寄存器进行编程。

#### 8.2.2.4 设置所需的故障阈值

INA4235 能够在多种不同的故障条件下将警报引脚置为有效，如警报配置寄存器 所述。需要通过对警报配置寄存器中的 ALERT\_MASK 字段进行适当编程，来选择将警报引脚置为有效所需的故障条件。可通过将所需跳变阈值编程到警报限值寄存器 中来设置故障阈值。



例如，可以将通道 1 配置为在出现过流情况时发出警报，方法是将 ALERT1 寄存器 CHANNEL 字段设置到通道 1 (00b)，并将 ALERT MASK 字段设置为分流过压 (001b)。必须在 Limit1 寄存器中对过流条件所需的阈值进行编程。在此示例中，过流阈值为 9.0A，电流检测电阻的值为 8.0mΩ，提供的分流电压限制为 72mV。一旦知道了分流电压限值，分流过压限制寄存器的值就可通过将分流电压限值除以分流电压 LSB 大小来计算。

在本例中，计算出的警报限值寄存器的值为  $72\text{mV} / 2.5\text{ }\mu\text{V} = 28800\text{d}$  (7080h)。

当禁用器件或对  $V_s$  进行下电上电时，存储在 LIMIT1 至 LIMIT4 寄存器中的值被设置为默认值。

编程到 LIMIT 寄存器中的故障限制可应用于单个通道或分配到 4 个测量通道中的每个通道。例如，如果还需要在通道 1 上监控总线电压，则 ALERT2 寄存器的 CHANNEL 字段也可以设置为通道 1 (00b)，并将 ALERT MASK 字段设置为监控过总线情况 (011b)。可以根据需要在 LIMIT2 寄存器中设置过压故障值。

### 8.2.2.5 计算返回值

通过将返回值乘以 LSB 值来计算参数值。假设设计要求如表 8-3 所示，表 8-4 展示了该应用示例的返回值。

表 8-4. 寄存器值

| 寄存器                     | 目录                     | LSB 值              | 计算得出的值                                                |
|-------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|
| Shunt_Voltage_CH1 (00h) | 19200d (4B00h)         | 2.5μV              | $19200 \times 2.5\text{ }\mu\text{V} = 0.048\text{V}$ |
| Bus_Voltage_CH1 (01h)   | 7500d (1D4Ch)          | 1.6mV              | $7500 \times 1.6\text{mV} = 12\text{V}$               |
| Current_CH1 (02h)       | 12000d (2EE0h)         | 电流 LSB = 500μA     | $12000 \times 500\text{ }\mu\text{A} = 6\text{A}$     |
| Power_CH1 (03h)         | 4500d (1194h)          | 电流 LSB x 32 = 16mW | $4500 \times 16\text{mW} = 72\text{W}$                |
| Energy_CH1 (04h)        | 16200000d (00F7 3140h) | 电流 LSB x 32 = 16mJ | $16200000 \times 16\text{mJ} = 259.2\text{kJ}$        |

采用二进制补码格式的分流电压和电流返回值。采用二进制补码格式时，二进制中的负值表示为返回值的最高有效位中有一个 1。这些值可以转换为十进制，方法是首先反转所有位并加 1 以获得无符号二进制值。然后，必须将该值转换为十进制，并加上负号。

### 8.2.3 应用曲线

图 8-3 和图 8-4 展示了在总线电压测量的转换时间为 140 μs、均值计算设置为 1 的情况下，ALERT 引脚对总线过压故障的响应。对于这些示波器屏幕截图，在 ALERT 通道上启用了持久性，以显示许多顺序故障事件的警报响应变化。警报响应时间可能会根据故障发生前的电流值以及故障条件超过编程故障阈值的程度而变化。图 8-3 展示了当故障条件大大超出编程阈值时过流故障的响应时间。而图 8-4 展示了当故障略超出编程阈值时的过压响应时间。外部故障事件与内部 ADC 转换启动不同步，因此存在警报响应变化。此外，ADC 不断进行采样以获得结果，因此，从零开始的故障事件与从接近设定故障阈值的值开始的故障事件相比，前者的响应速度更慢。在警报时间至关重要的应用中，最坏情况警报响应等于  $2 \times (t_{\text{conv\_shunt}} + t_{\text{conv\_voltage}}) \times$  启用的通道数。在过功率条件下发出警报时，需要额外添加 60 μs 以进行后台数学计算。



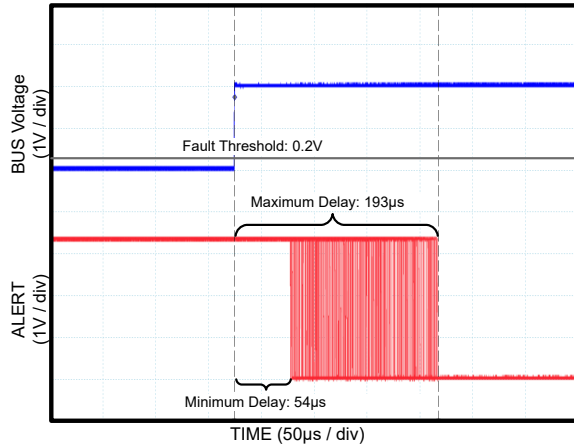


图 8-3. 警报响应时间 (采样值明显高于阈值)

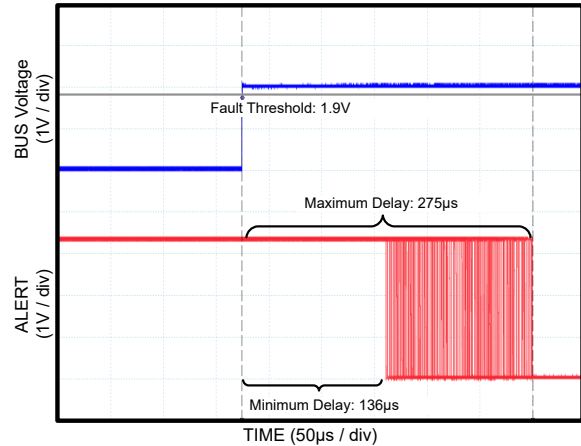


图 8-4. 警报响应时间 (采样值稍高于阈值)

## 9 电源相关建议

图 8-2 显示器件输入电路可在共模电压超出电源电压  $V_S$  的情况下准确测量信号。例如，施加到  $V_S$  电源引脚的电压可以为 5V，而监测到的总线电源电压（共模电压）可以高达 48V。请注意，无论器件加电与否，该器件的输入引脚也可以耐受整个 -0.3V 至 48V 范围的电压。

将所需的电源旁路电容器尽可能靠近器件的电源引脚和接地引脚放置以提供稳定性。电源旁路电容器的容值通常为 0.1µF。采用高噪声或高阻抗电源的应用可能需要额外的去耦电容器来抑制电源噪声。

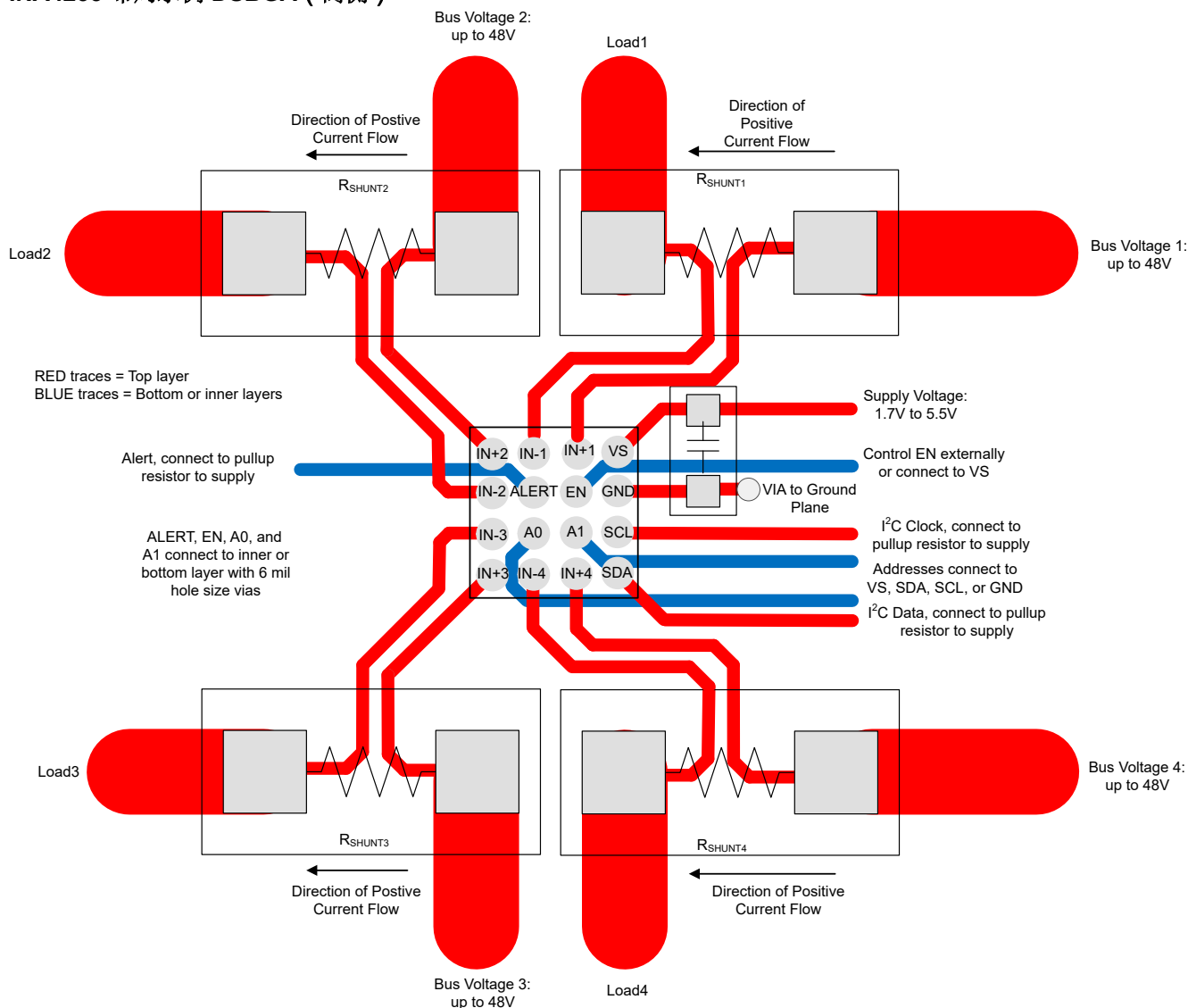
## 10 布局

### 10.1 布局指南

使用开尔文连接或 4 线制连接将每个通道的所有输入引脚（ $IN+X$  和  $IN-X$ ）连接到检测电阻。这些连接技术可确保在输入引脚之间仅检测电流检测电阻阻抗。电流检测电阻布线不良通常会导致在输入引脚之间存在额外的电阻。鉴于电流检测电阻的欧姆值非常低，任何额外的高载流阻抗都会导致严重的测量误差。电源旁路电容器的位置应尽可能靠近电源引脚和接地引脚。

## 10.2 布局示例

### INA4235 布局示例 DSBGA ( 高侧 )



## 11 器件和文档支持

### 11.1 器件支持

#### 11.1.1 开发支持

相关开发支持请参阅以下资源：

[INA234EVM 和 INA236EVM 用户指南](#)

### 11.2 文档支持

#### 11.2.1 相关文档

请参阅以下相关文档：

- 德州仪器 (TI)，[具有瞬态稳定性的电流分流监控器参考设计](#) 设计指南
- 德州仪器 (TI)，[INA234EVM 和 INA236EVM 用户指南](#)

### 11.3 接收文档更新通知

要接收文档更新通知，请导航至 [ti.com](#) 上的器件产品文件夹。点击 [通知](#) 进行注册，即可每周接收产品信息更改摘要。有关更改的详细信息，请查看任何已修订文档中包含的修订历史记录。

### 11.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

### 11.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

### 11.6 静电放电警告



静电放电 (ESD) 会损坏这个集成电路。德州仪器 (TI) 建议通过适当的预防措施处理所有集成电路。如果不遵守正确的处理和安装程序，可能会损坏集成电路。

ESD 的损坏小至导致微小的性能降级，大至整个器件故障。精密的集成电路可能更容易受到损坏，这是因为非常细微的参数更改都可能会导致器件与其发布的规格不相符。

### 11.7 术语表

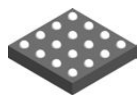
[TI 术语表](#) 本术语表列出并解释了术语、首字母缩略词和定义。

## 12 修订历史记录

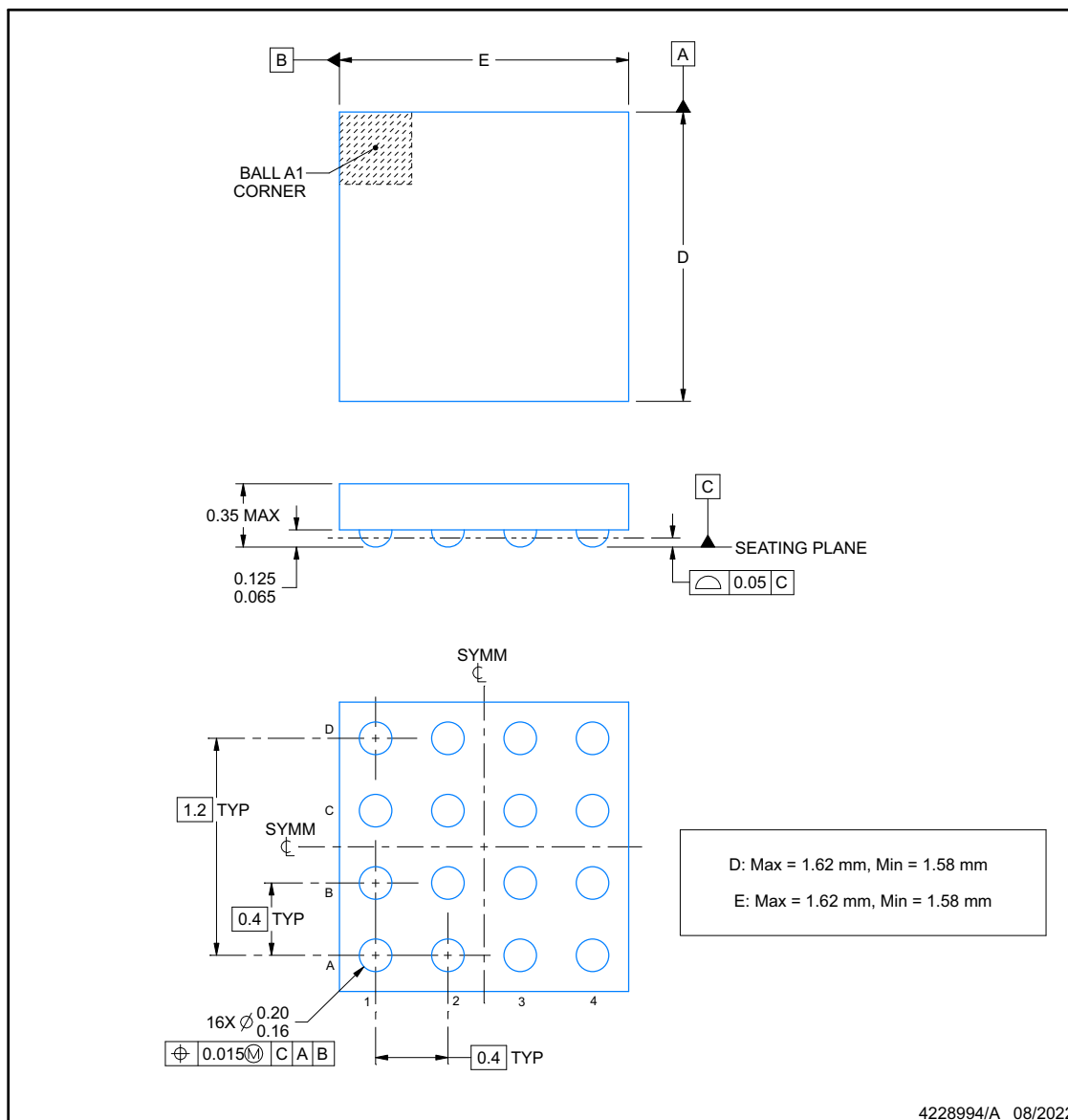
| 日期       | 版本 | 注释     |
|----------|----|--------|
| May 2024 | *  | 初始发行版。 |

## 13 机械、封装和可订购信息

以下页面包含机械、封装和可订购信息。这些信息是指定器件的最新可用数据。数据如有变更，恕不另行通知，且不会对此文档进行修订。有关此数据表的浏览器版本，请查阅左侧的导航栏。

**YBJ0016-C01****PACKAGE OUTLINE****DSBGA - 0.35 mm max height**

DIE SIZE BALL GRID ARRAY

**NOTES:**

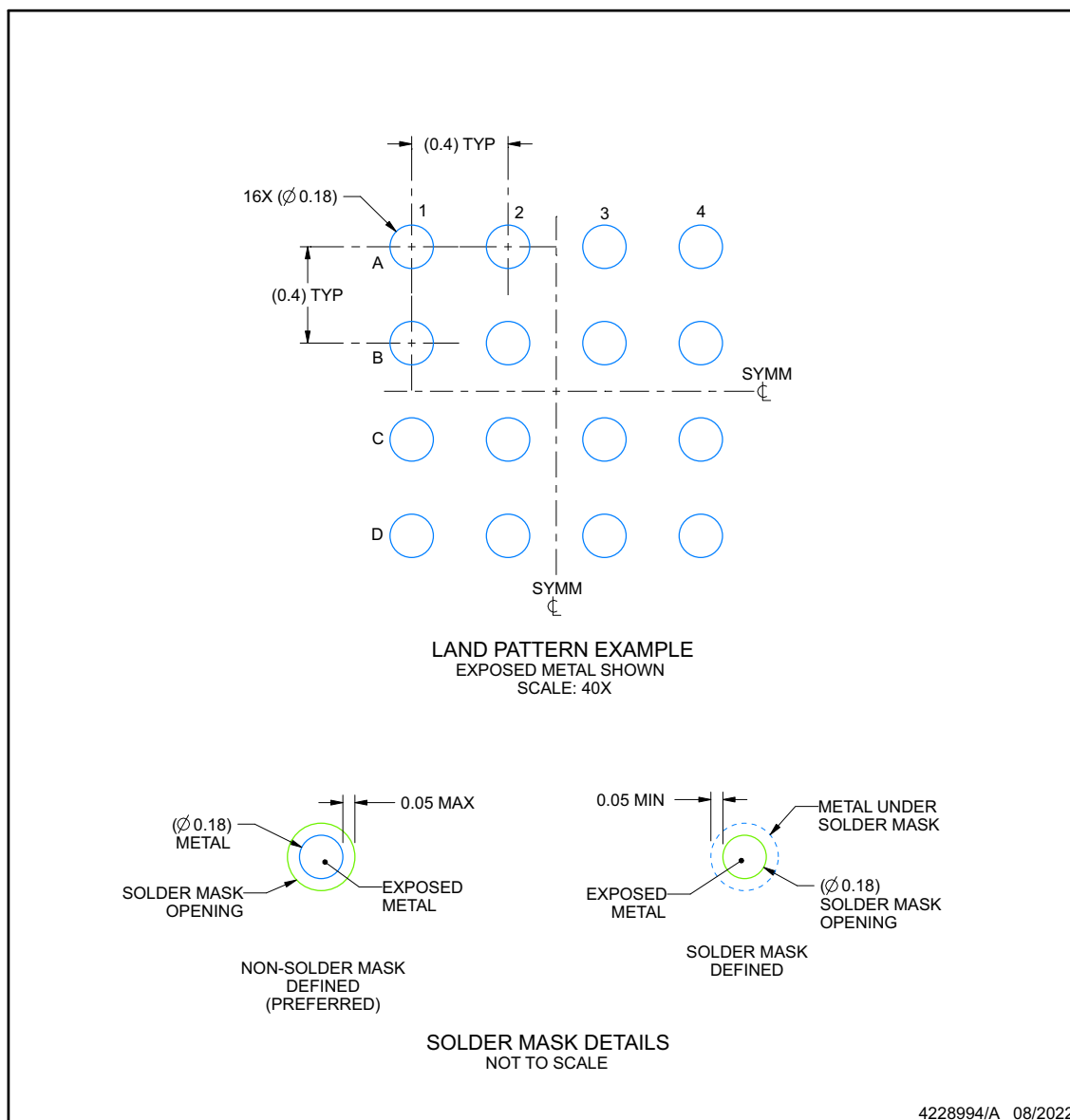
1. All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.

## EXAMPLE BOARD LAYOUT

**YBJ0016-C01**

**DSBGA - 0.35 mm max height**

DIE SIZE BALL GRID ARRAY



NOTES: (continued)

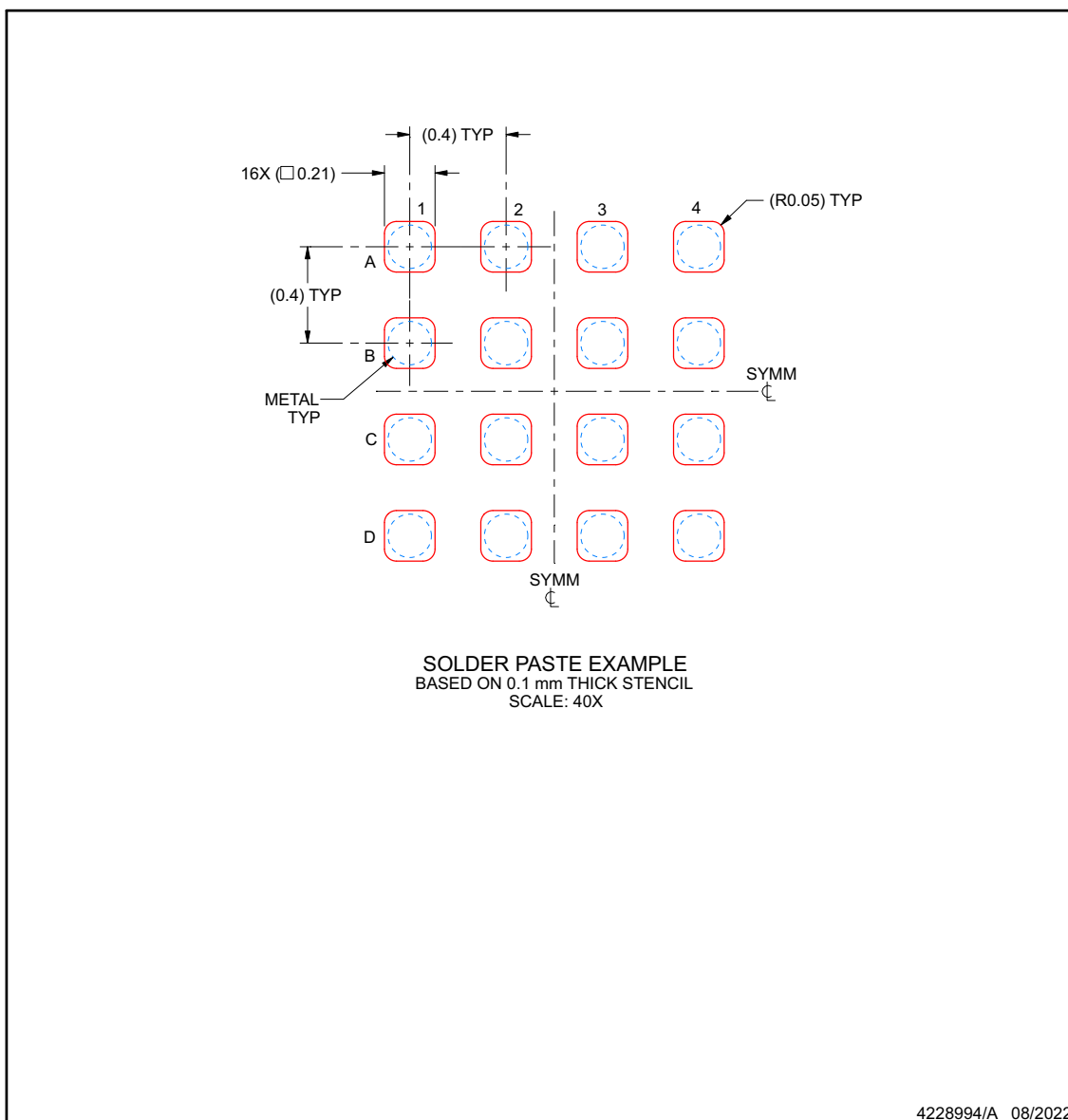
- Final dimensions may vary due to manufacturing tolerance considerations and also routing constraints. See Texas Instruments Literature No. SNVA009 ([www.ti.com/lit/snva009](http://www.ti.com/lit/snva009)).

## EXAMPLE STENCIL DESIGN

**YBJ0016-C01**

**DSBGA - 0.35 mm max height**

DIE SIZE BALL GRID ARRAY



NOTES: (continued)

4. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release.

## PACKAGING INFORMATION

| Orderable part number         | Status<br>(1) | Material type<br>(2) | Package   Pins   | Package qty   Carrier | RoHS<br>(3) | Lead finish/<br>Ball material<br>(4) | MSL rating/<br>Peak reflow<br>(5) | Op temp (°C) | Part marking<br>(6) |
|-------------------------------|---------------|----------------------|------------------|-----------------------|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|
| <a href="#">INA4235AIYBJR</a> | Active        | Production           | DSBGA (YBJ)   16 | 3000   LARGE T&R      | Yes         | SNAGCU                               | Level-1-260C-UNLIM                | -40 to 125   | I4235               |
| INA4235AIYBJR.A               | Active        | Production           | DSBGA (YBJ)   16 | 3000   LARGE T&R      | Yes         | SNAGCU                               | Level-1-260C-UNLIM                | -40 to 125   | I4235               |

<sup>(1)</sup> **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

<sup>(2)</sup> **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

<sup>(3)</sup> **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

<sup>(4)</sup> **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

<sup>(5)</sup> **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

<sup>(6)</sup> **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

**Important Information and Disclaimer:**The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.



## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司