TEXAS INSTRUMENTS
REF20-Q1
ZHCSP15 – DECEMBER 2021

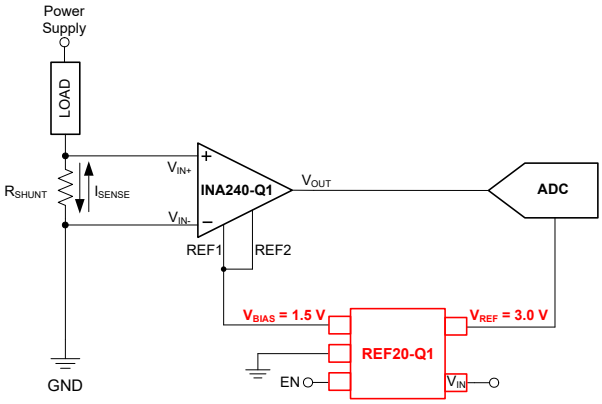
REF20xx-Q1 低温漂、低功耗、V_{REF} 和 $V_{REF}/2$ 双路输出、电压基准

1 特性

- 具有符合 AEC-Q100 标准的下列特性：
  - 器件温度等级 1：–40°C 至 +125°C 的工作环境温度范围
  - 器件 HBM ESD 分类等级 2
  - 器件 CDM ESD 分类等级 C7B
- 功能安全型
  - 可提供用于功能安全系统设计的文档
- 两个输出，V_{REF} 和 $V_{REF}/2$，方便用于单电源系统
- 出色的温漂性能：
  - –40°C 至 125°C 范围内为 8ppm/°C（最大值）
- 高初始精度：±0.05%（最大值）
- 可在温度范围内跟踪 V_{REF} 和 V_{BIAS}：
  - –40°C 至 125°C 范围内为 7ppm/°C（最大值）
- 微型封装：SOT23-5
- 低压降：10mV
- 高输出电流：±20mA
- 低静态电流：360 μA
- 线性调整率：3ppm/V
- 负载调整率：8ppm/mA

2 应用

- 远程信息处理控制
- 电池管理系统
- 逆变器和电机控制
- 汽车网关
- 配电盒
- 动力转向
- 车载充电器



应用示例

3 说明

仅具有正向电源电压的应用通常需要使用一个在模数转换器 (ADC) 输入范围中间位置的附加稳定电压来偏置输入双极信号。REF20xx-Q1 为 ADC 提供了基准电压 (V_{REF}) 和可用于偏置输入双极信号的高精度电压 (V_{BIAS})。

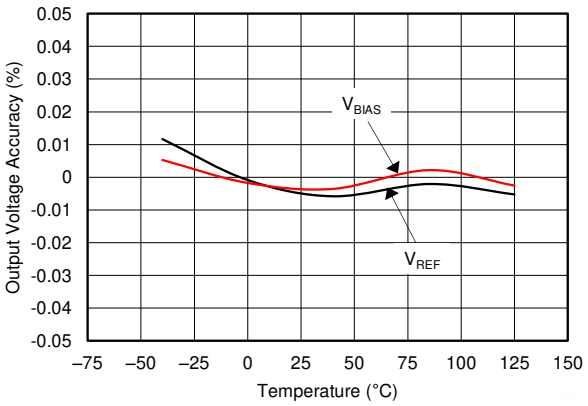
REF20xx-Q1 在 V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出端具有出色的温漂（最大 8ppm/°C）和初始精度 (0.05%)，同时可保持静态工作电流低于 430μA。此外，V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出端在 –40°C 至 125°C 的温度范围内相互跟踪，精度为 7ppm/°C（最大值）。与分立式解决方案相比，所有这些特性使得 REF20xx 提升了信号链的精度、节省了布板空间并降低了系统成本。仅 10mV 的超低压降允许器件在极低输入电压条件下工作，这一特性在电池供电系统中非常适用。

V_{REF} 和 V_{BIAS} 电压具有同样出色的规格，而且灌电流和拉电流能力同样强大。这些器件具有优异的长期稳定性和低噪声级别，非常适合高精度应用。

器件信息

器件名称	封装 (1)	封装尺寸（标称值）
REF20xx-Q1	SOT-23 (5)	2.90mm × 1.60mm

(1) 如需了解所有可用封装，请参阅数据表末尾的可订购产品附录。



V_{REF} 和 V_{BIAS} 与温度间的关系

本文档旨在为方便起见，提供有关 TI 产品中文版本的信息，以确认产品的概要。有关适用的官方英文版本的最新信息，请访问 www.ti.com，其内容始终优先。TI 不保证翻译的准确性和有效性。在实际设计之前，请务必参考最新版本的英文版本。

内容

1 特性.....1
2 应用.....1
3 说明.....1
4 修订历史记录.....2
5 器件比较表.....3
6 引脚配置和功能.....4
7 规格.....5
7.1 绝对最大额定值.....5
7.2 ESD 等级.....5
7.3 建议运行条件.....5
7.4 热性能信息.....5
7.5 电气特性.....6
7.6 典型特性.....7
8 参数测量信息.....14
8.1 焊接热漂移.....14
8.2 长期稳定性.....15
8.3 热迟滞.....16
8.4 噪声性能.....17
9 详细说明.....18
9.1 概述.....18
9.2 功能方框图.....18
9.3 特性说明.....18
9.4 器件功能模式.....19
10 应用和实施.....20
10.1 应用信息.....20
10.2 典型应用.....20
11 电源相关建议.....26
12 布局.....27
12.1 布局指南.....27
12.2 布局示例.....27
13 器件和文档支持.....28
13.1 文档支持.....28
13.2 接收文档更新通知.....28
13.3 支持资源.....28
13.4 商标.....28
13.5 静电放电警告.....28
13.6 术语表.....28
14 机械、封装和可订购信息.....28

4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

日期	修订版本	说明
2021 年 12 月	*	初始发行版

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

5 器件比较表

产品	V_{REF}	V_{BIAS}
REF2025-Q1	2.5V	1.25V
REF2030-Q1	3.0V	1.5V
REF2033-Q1	3.3V	1.65V
REF2041-Q1	4.096V	2.048V

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

6 引脚配置和功能

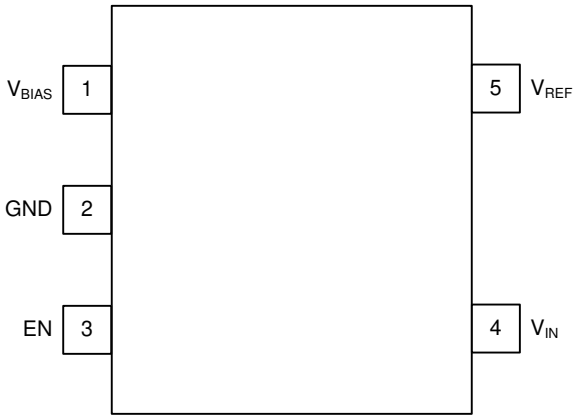


图 6-1. DDC 封装
SOT23-5
(顶视图)

表 6-1. 引脚功能

引脚		I/O	说明
编号	名称		
1	V_{BIAS}	输出	偏置电压输出 (V_{REF}/2)
2	GND	—	接地
3	EN	输入	启用 (EN ≥ V_{IN} – 0.7V，器件启用)
4	V_{IN}	输入	输入电源电压
5	V_{REF}	输出	基准电压输出 (V_{REF})

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

7 规格

7.1 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）(1)

		最小值	最大值	单位
输入电压	V_{IN}	– 0.3	6	V
	EN	– 0.3	V_{IN} + 0.3	
温度	工作温度	-55	150	°C
	结温，T_j		150	
	贮存温度，T_{stg}	-65	170	

(1) 应力超出*绝对最大额定值*下所列的值可能会对器件造成永久损坏。这些列出的值仅仅是应力额定值，这并不表示器件在这些条件下以及在*建议运行条件*以外的任何其他条件下能够正常运行。长时间处于绝对最大额定条件下可能会影响器件的可靠性。

7.2 ESD 等级

			值	单位
$V_{(ESD)}$	静电放电	人体放电模型 (HBM)，符合 AEC Q100-002 (1)	±2500	V
		充电器件模型 (CDM)，符合 AEC Q100-011	±1500	

(1) AEC Q100-002 指示 HBM 应力测试应符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 规范。

7.3 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_{IN}	电源输入电压范围 (I_L = 0mA, T_A = 25°C)	V_{REF} + 0.02 (1)		5.5	V

(1) 有关不同负载电流和温度下的最小输入电压，请参阅节 7.6 中的图 7-27

7.4 热性能信息

热指标 (1)		REF20xx-Q1 DDC (SOT23) 5 引脚	单位
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻	193.6	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳（顶部）热阻	40.2	°C/W
$R_{\theta JB}$	结至电路板热阻	34.5	°C/W
ψ_{JT}	结至顶部特征参数	0.9	°C/W
ψ_{JB}	结至电路板特征参数	34.3	°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*应用报告。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

7.5 电气特性

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA 且 V_{IN} = 5V（除非另有说明）。V_{REF} 和 V_{BIAS} 的规格相同。

参数			测试条件		最小值	典型值	最大值	单位
精度和温漂								
	输出电压精度				-0.05%		0.05%	
	输出电压温度系数 (1)		$-40°C \leq T_A \leq 125°C$			±3	±8	ppm/°C
	在温度范围内的 V_{REF} 和 V_{BIAS} 跟踪 (2)		$-40°C \leq T_A \leq 125°C$			±2	±7	ppm/°C
线性和负载调整率								
$\Delta V_{O(\Delta VI)}$	线性调整率		V_{REF} + 0.02V ≤ V_{IN} ≤ 5.5V			3	35	ppm/V
$\Delta V_{O(\Delta IL)}$	负载调整率	拉电流	0mA ≤ I_L ≤ 20mA，V_{REF} + 0.6V ≤ V_{IN} ≤ 5.5V			8	20	ppm/mA
		灌电流	0mA ≤ I_L ≤ –20mA，V_{REF} + 0.02V ≤ V_{IN} ≤ 5.5V			8	20	
电源								
I_{CC}	电源电流	工作模式				360	430	μA
			$-40°C \leq T_A \leq 125°C$				460	
		关断模式				3.3	5	
			$-40°C \leq T_A \leq 125°C$				9	
	使能电压		器件处于关断模式 (EN = 0)		0		0.7	V
			器件处于工作模式 (EN = 1)		V_{IN} – 0.7		V_{IN}	
	压降电压					10	20	mV
			I_L = 20mA				600	
I_{SC}	短路电流					50		mA
t_{on}	开通时间		0.1% 稳定，C_L = 1μF			500		μs
噪声								
	低频噪声 (3)		0.1Hz ≤ f ≤ 10Hz			12		ppm_{PP}
	输出电压噪声密度		f = 100Hz			0.25		ppm/√Hz
容性负载								
	稳定的输出电容器范围				0		10	μF
迟滞和长期稳定性								
	长期稳定性 (4)		0 到 1000 小时			25		ppm
	输出电压迟滞 (5)		25°C、–40°C、125°C、25°C	周期 1		60		ppm
				周期 2		35		

(1) 温漂通过箱形法指定。更多详细信息，请参阅 节 9.3 部分。
(2) 有关温度范围内 V_{REF} 和 V_{BIAS} 跟踪规格的详细信息，请参阅 节 9.3。
(3) 有关峰峰值噪声测量过程的更详细信息，请参阅 节 8.4。
(4) 有关长期稳定性测量过程的更详细信息，请参阅 节 8.2。
(5) 有关热迟滞测量过程的更详细信息，请参阅 节 8.3。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

7.6 典型特性

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。

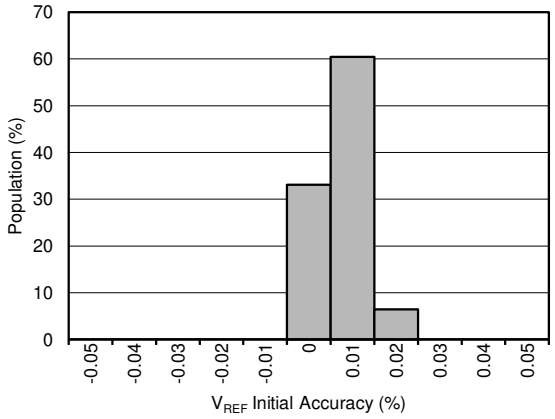
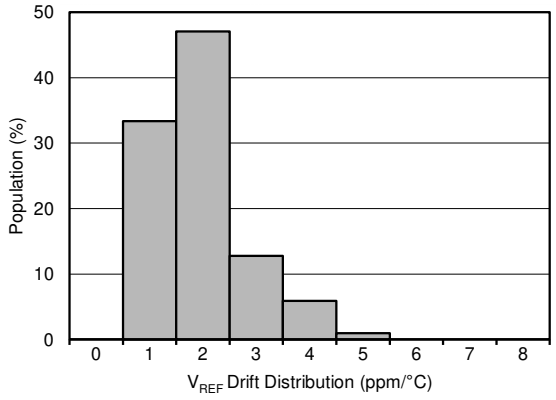


图 7-1. 初始精度分布 (V_{REF})



–40°C ≤ T_A ≤ 125°C

图 7-2. 温漂分布 (V_{REF})

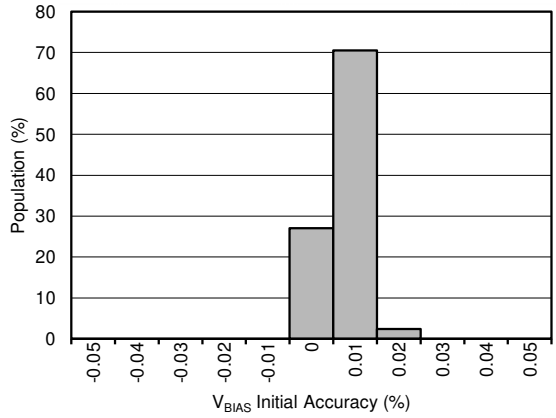
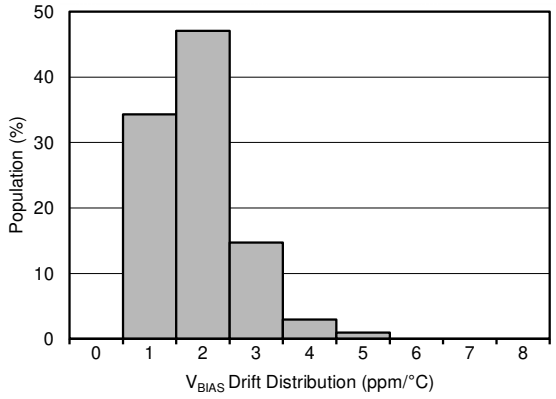


图 7-3. 初始精度分布 (V_{BIAS})



–40°C ≤ T_A ≤ 125°C

图 7-4. 温漂分布 (V_{BIAS})

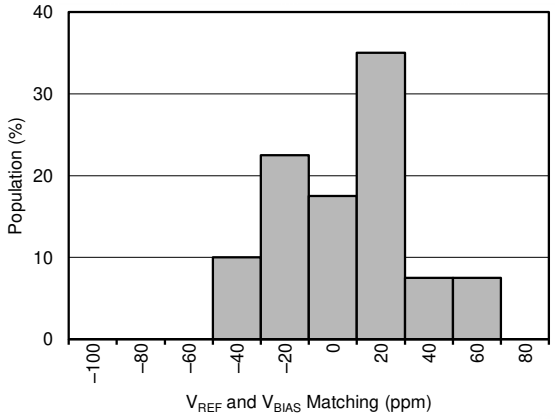
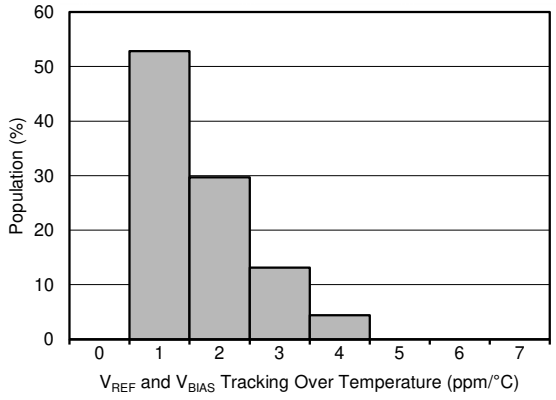


图 7-5. V_{REF} – 2 × V_{BIAS} 分布



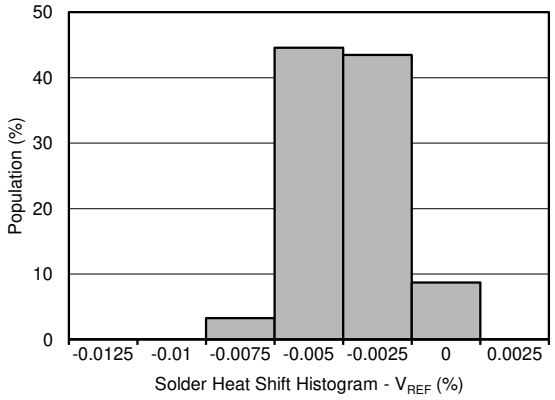
–40°C ≤ T_A ≤ 125°C

图 7-6. 在温度范围内的 V_{REF} – 2 × V_{BIAS} 漂移跟踪分布

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

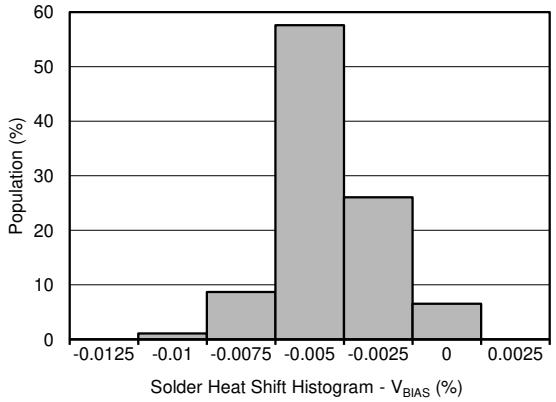
7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。



请参阅 节 8.1 部分，了解详情。

图 7-7. 焊接热漂移分布 (V_{REF})



请参阅 节 8.1 部分，了解详情。

图 7-8. 焊接热漂移分布 (V_{BIAS})

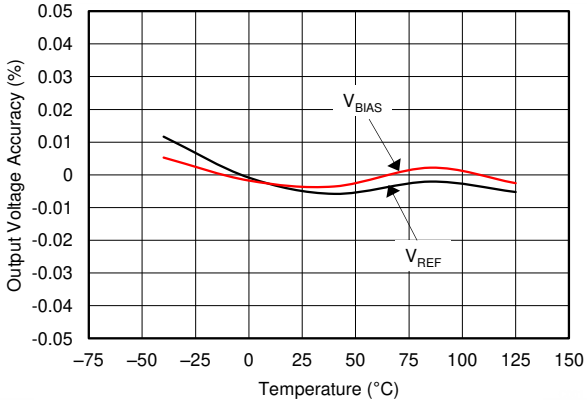


图 7-9. 输出电压精度 (V_{REF}) 与温度间的关系

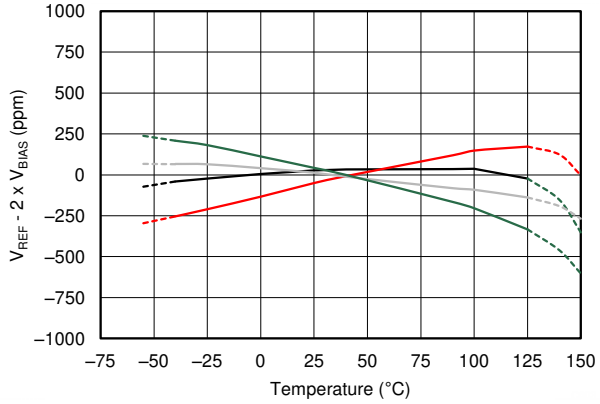
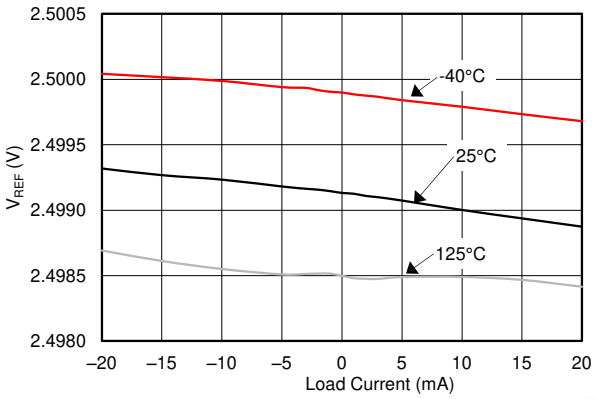
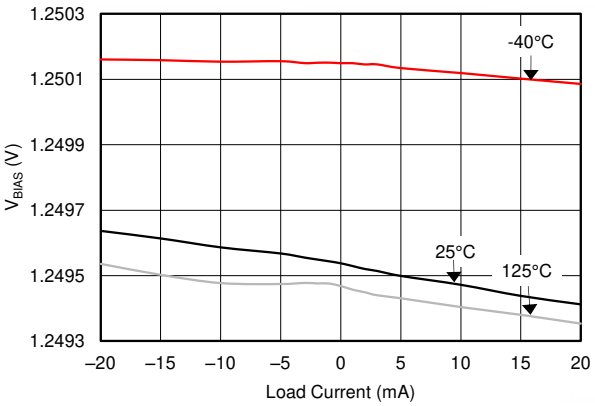


图 7-10. V_{REF} – 2 × V_{BIAS} 跟踪与温度间的关系



V_{REF} 输出

图 7-11. 输出电压变化与负载电流间的关系 (V_{REF})



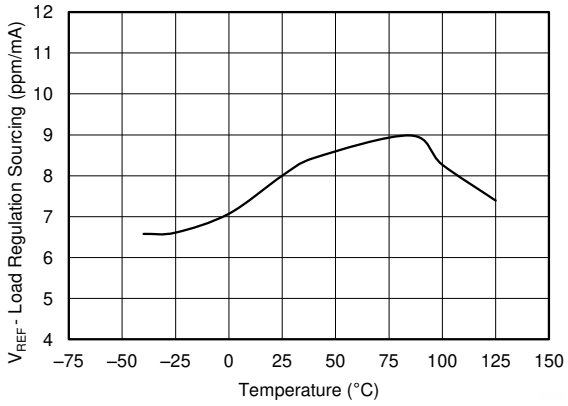
V_{BIAS} 输出

图 7-12. 输出电压变化与负载电流间的关系 (V_{BIAS})

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

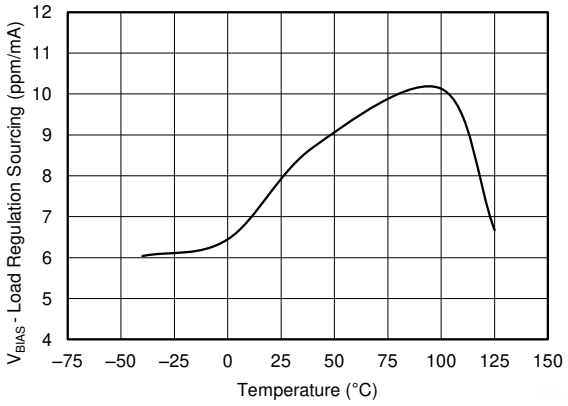
7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。



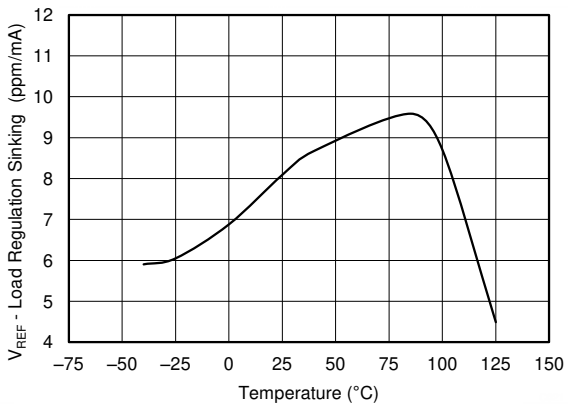
V_{REF} 输出　　I_L = 20mA

图 7-13. 负载调整率（拉电流）与温度间的关系 (V_{REF})



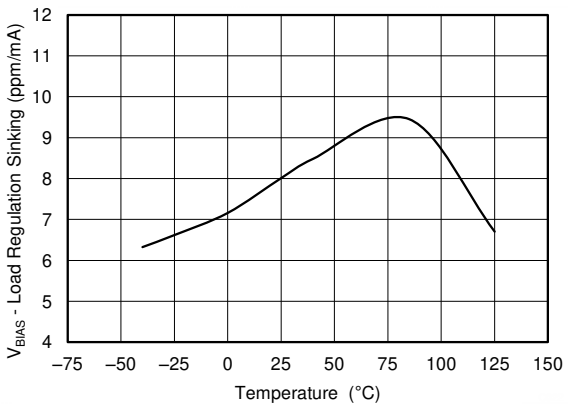
V_{BIAS} 输出　　I_L = 20mA

图 7-14. 负载调整率（拉电流）与温度间的关系 (V_{BIAS})



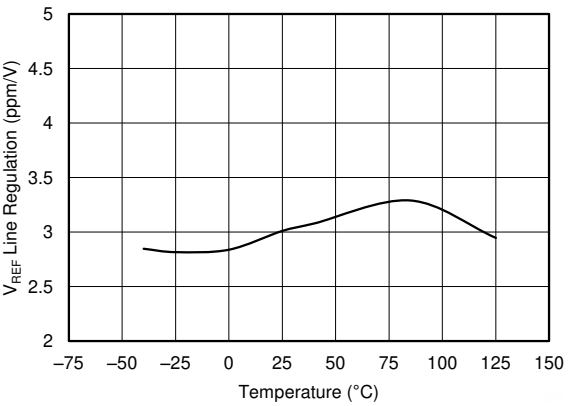
V_{REF} 输出　　I_L = – 20mA

图 7-15. 负载调整率（灌电流）与温度间的关系 (V_{REF})



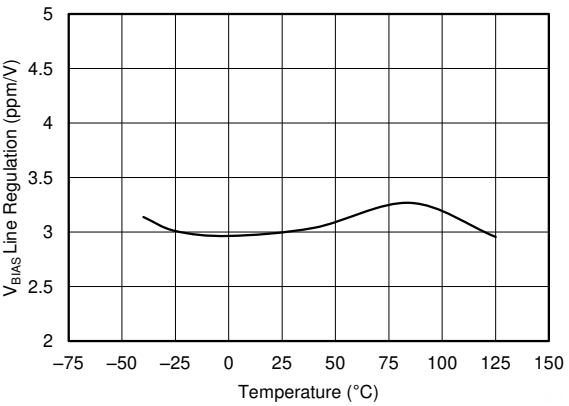
V_{BIAS} 输出　　I_L = – 20mA

图 7-16. 负载调整率（灌电流）与温度间的关系 (V_{BIAS})



V_{REF} 输出

图 7-17. 线性调整率与温度间的关系 (V_{REF})



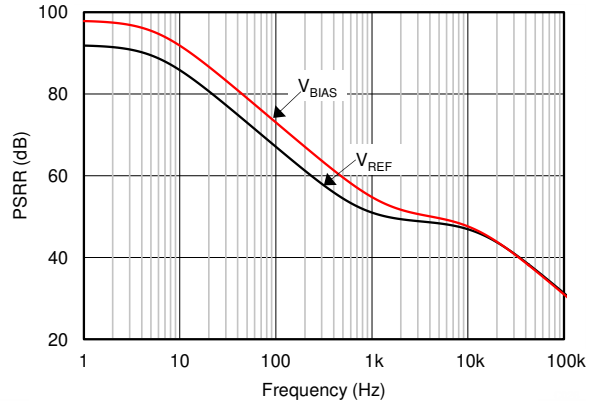
V_{BIAS} 输出

图 7-18. 线性调整率与温度间的关系 (V_{BIAS})

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

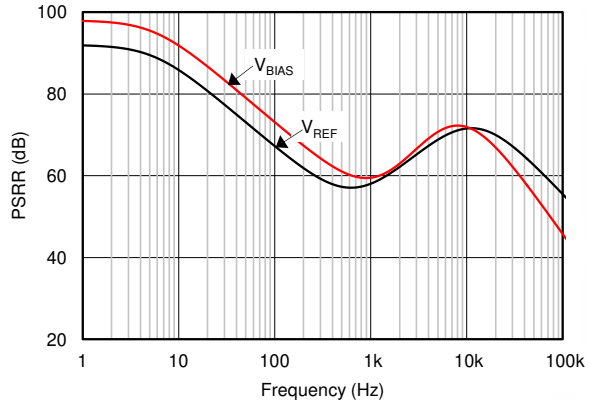
7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。



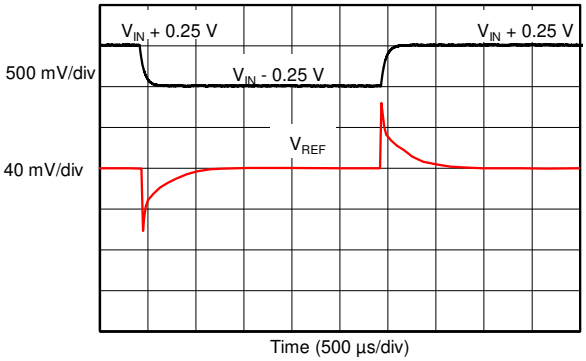
C_L = 0µF

图 7-19. 电源抑制比与频率之间的关系



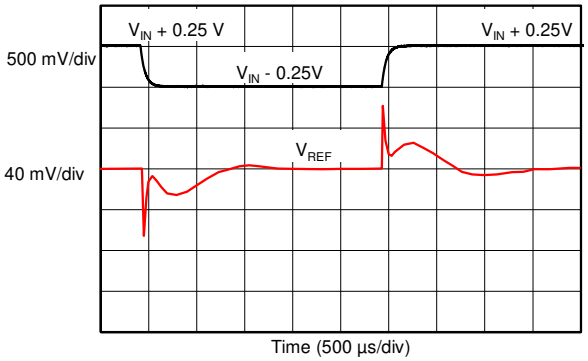
C_L = 10µF

图 7-20. 电源抑制比与频率之间的关系



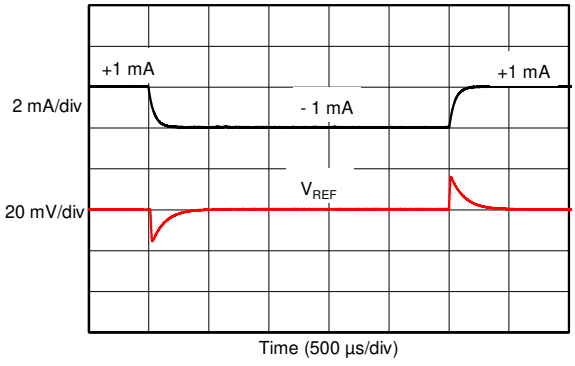
C_L = 1µF

图 7-21. 线路瞬态响应



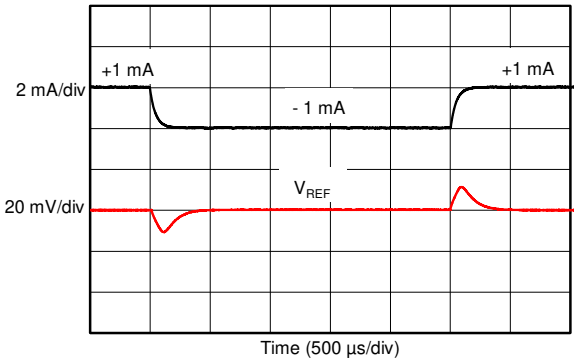
C_L = 10µF

图 7-22. 线路瞬态响应



C_L = 1µF　　I_L = ±1mA 阶跃

图 7-23. 负载瞬态响应



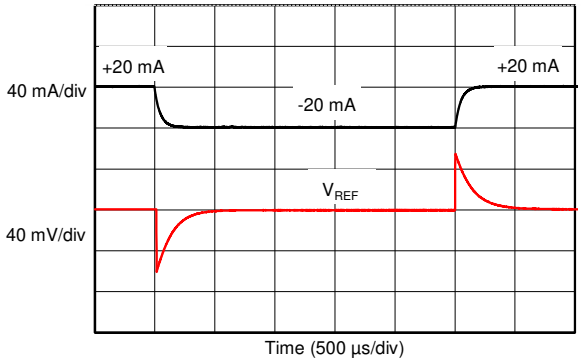
C_L = 10µF　　I_L = ±1mA 阶跃

图 7-24. 负载瞬态响应

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

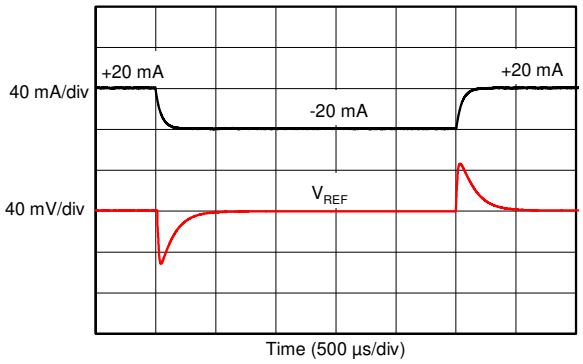
7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。



C_L = 1µF　　I_L = ±20mA 阶跃

图 7-25. 负载瞬态响应



C_L = 10µF　　I_L = ±20mA 阶跃

图 7-26. 负载瞬态响应

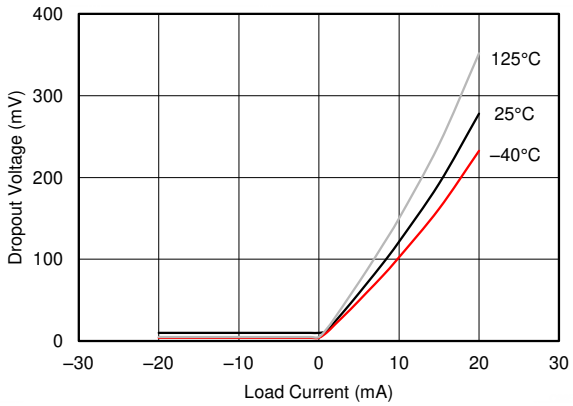
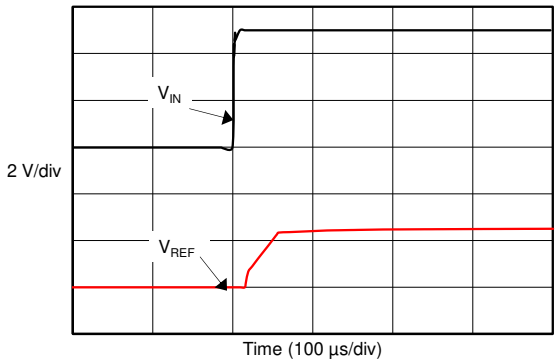
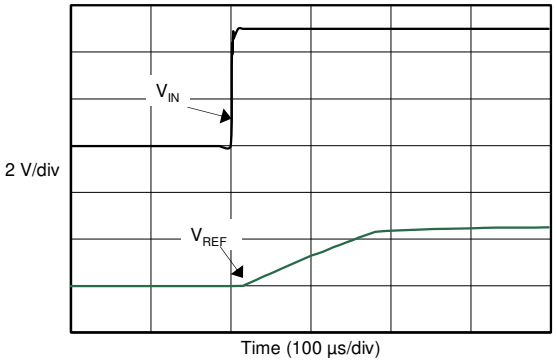


图 7-27. 最小压降电压与负载电流间的关系



C_L = 1µF

图 7-28. 导通稳定时间



C_L = 10µF

图 7-29. 导通稳定时间

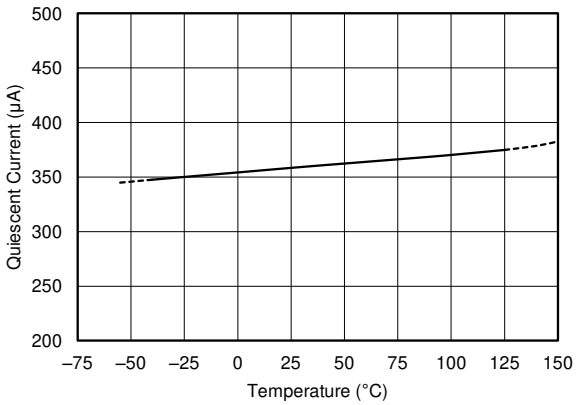


图 7-30. 静态电流与温度间的关系

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。

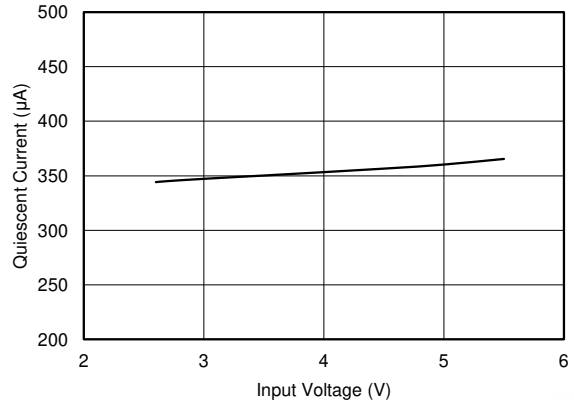
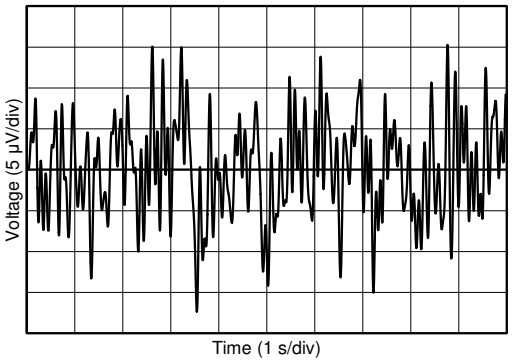
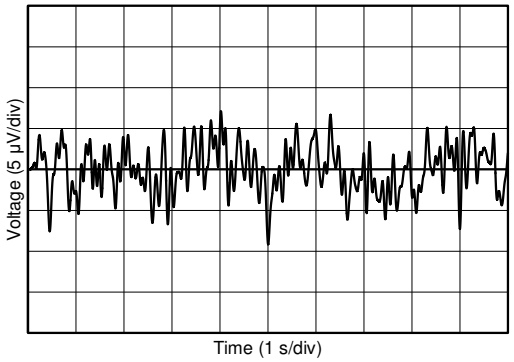


图 7-31. 静态电流与输入电压间的关系



V_{REF} 输出

图 7-32. 0.1Hz 至 10Hz 噪声 (V_{REF})



V_{BIAS} 输出

图 7-33. 0.1Hz 至 10Hz 噪声 (V_{BIAS})

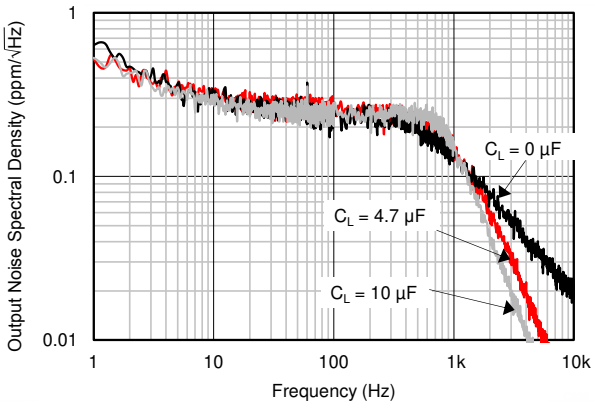
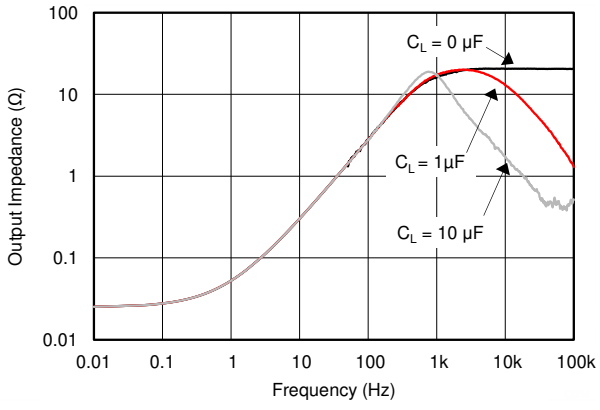
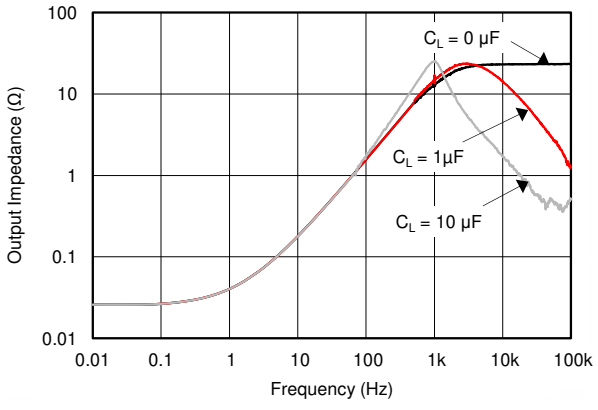


图 7-34. 输出电压噪声频谱



V_{REF} 输出

图 7-35. 输出阻抗与频率间的关系 (V_{REF})



V_{BIAS} 输出

图 7-36. 输出阻抗与频率间的关系 (V_{BIAS})

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

7.6 典型特性 (continued)

测试条件为 T_A = 25°C、I_L = 0mA、V_{IN} = 5V 电源、C_L = 0µF 且输出为 2.5V（除非另有说明）。

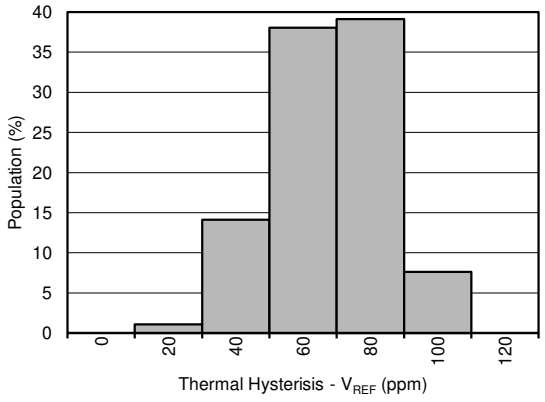


图 7-37. 热迟滞分布 (V_{REF})

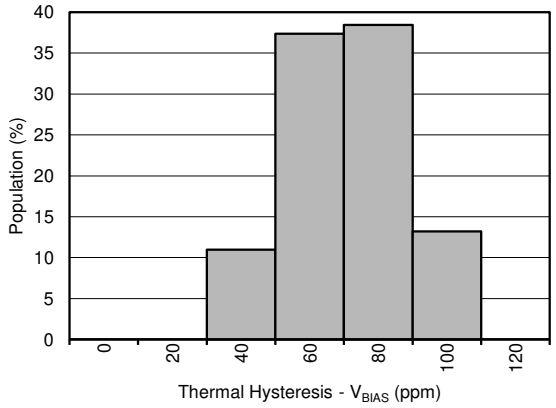


图 7-38. 热迟滞分布 (V_{BIAS})

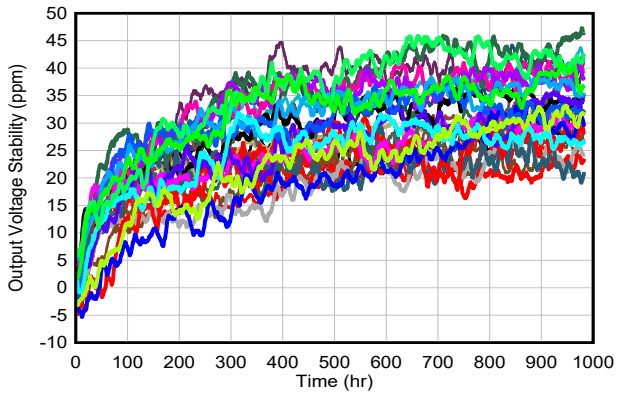


图 7-39. 长期稳定性（前 1000 小时）

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

8 参数测量信息

8.1 焊接热漂移

REF20xx-Q1 制造过程中所用的材料具有不同的热膨胀系数，因此在加热器件时，会在器件裸片上产生应力。器件裸片上的机械应力和热应力会导致输出电压漂移，从而降低产品的初始精度规格。回流焊是造成这种误差的常见原因。

为了说明这种影响，使用无铅焊锡膏和焊膏制造商建议的回流焊曲线，将总共 92 个器件焊接在四个印刷电路板上[每个印刷电路板 (PCB) 上 23 个器件]。回流焊曲线如图 8-1 中所示。印刷电路板使用 FR4 材料制成。电路板厚度为 1.57mm，面积为 171.54mm × 165.1mm。

在回流焊过程之前和之后测量基准和偏置输出电压；典型漂移如图 8-2 和图 8-3 所示。尽管所有测试单元都表现出很低的漂移 (< 0.01%)，但也可能产生更高的漂移，具体取决于印刷电路板的大小、厚度和材料。必须注意的是，直方图显示暴露于单个回流焊曲线的典型漂移。在两侧都有表面贴装元件的 PCB 经常会暴露于多个回流焊，这会导致输出偏置电压出现额外漂移。如果 PCB 暴露于多个回流焊，则必须在第二道工序焊接器件，以更大限度地减少器件暴露于热应力的情况。

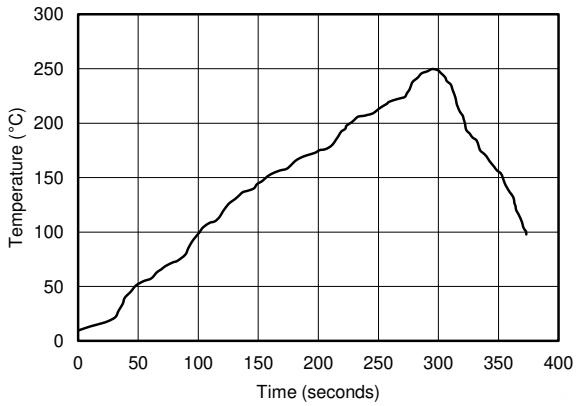


图 8-1. 回流焊曲线

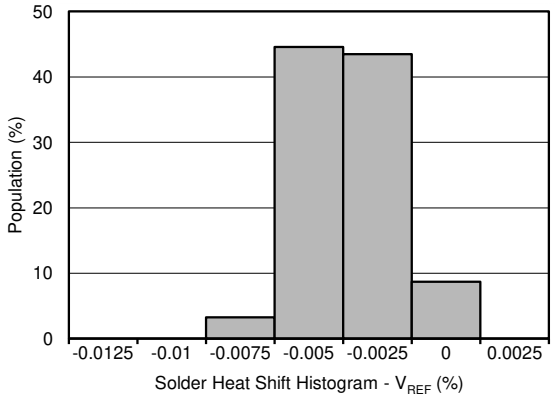


图 8-2. 焊接热漂移分布，V_{REF} (%)

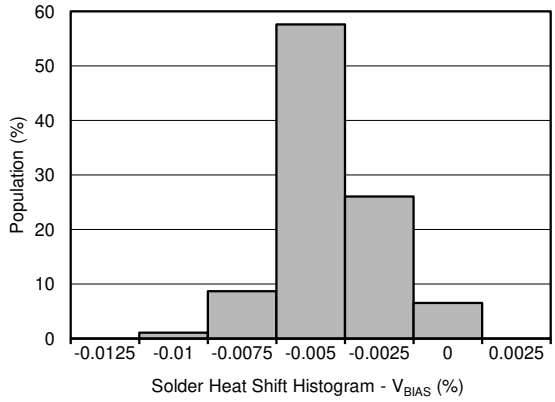


图 8-3. 焊接热漂移分布，V_{BIAS} (%)

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

8.2 长期稳定性

REF20xx-Q1 的长期稳定性数据是从焊接到印刷电路板上的 32 个器件上收集的，没有任何插槽或特殊的布局注意事项。然后将电路板放入空气温度保持在 T_A = 35°C 的烤箱中，定期测量 32 个器件的 Vref 输出。典型的长期稳定性如图 8-4 所示。

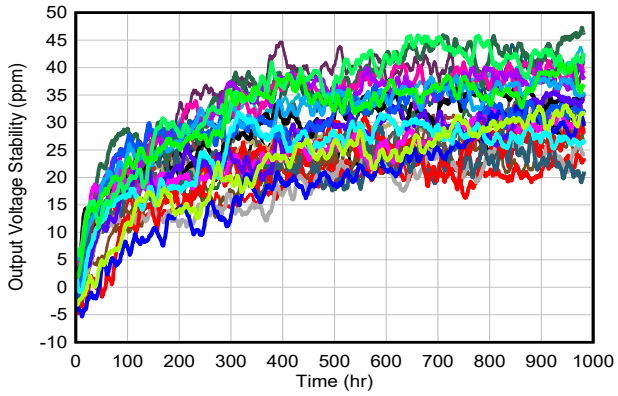


图 8-4. 长期稳定性 – 1000 小时 (V_{REF})

8.3 热迟滞

与实际应用类似，通过将 REF20xx-Q1 焊接到 PCB 上测量热迟滞。器件的热迟滞定义为器件在 25°C 下运行的输出电压与经过额定温度范围内所有温度后返回 25°C 时输出电压的差值。迟滞可表示为方程式 1：

$$V_{HYST} = \left(\frac{\left| V_{PRE} - V_{POST} \right|}{V_{NOM}} \right) \bullet 10^{6} \quad (ppm) \tag{1}$$

其中

- V_{HYST} = 热迟滞（单位为 ppm）
- V_{NOM} = 指定的输出电压
- V_{PRE} = 在 25°C 预热循环时测得的输出电压
- V_{POST} = 器件从 25°C 开始到经过 -40°C 至 125°C 额定温度范围内所有温度后返回 25°C 时测得的输出电压

典型的热迟滞分布如图 8-5 和图 8-6 所示。

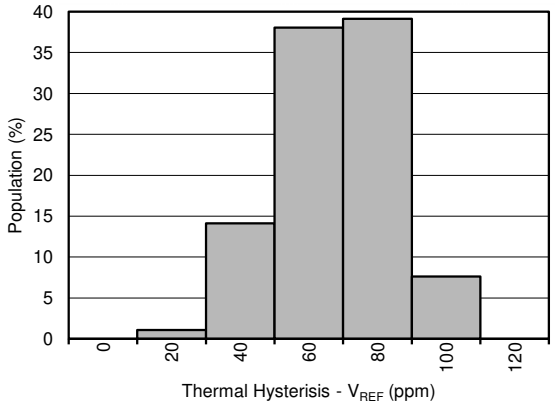


图 8-5. 热迟滞分布 (V_{REF})

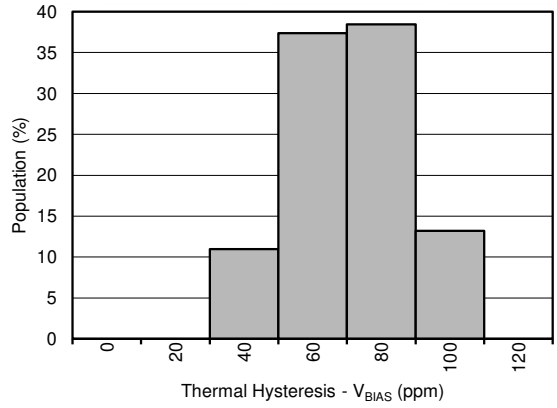


图 8-6. 热迟滞分布 (V_{BIAS})

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

8.4 噪声性能

在图 8-7 和图 8-8 中可以看到 0.1Hz 至 10Hz 的典型电压噪声。器件噪声随输出电压和工作温度的升高而增加。虽然必须注意确保输出阻抗不会降低交流性能，但是可使用额外滤波来改进输出噪声水平。峰峰值噪声测量设置如图 8-9 所示。

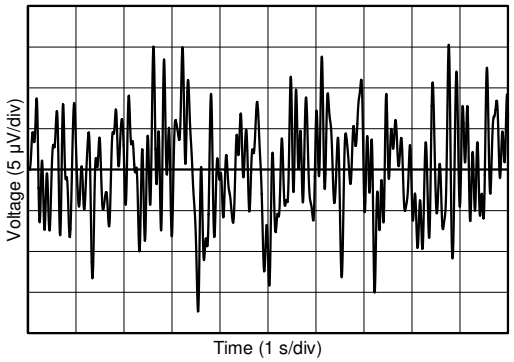


图 8-7. 0.1Hz 至 10Hz 噪声 (V_{REF})

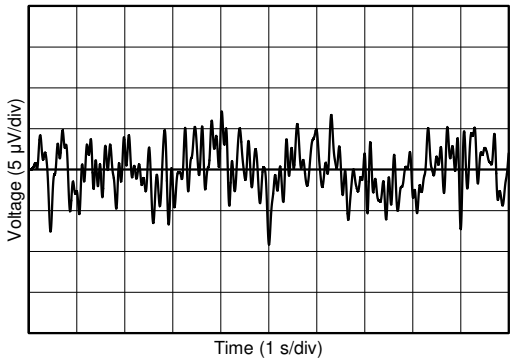


图 8-8. 0.1Hz 至 10Hz 噪声 (V_{BIAS})

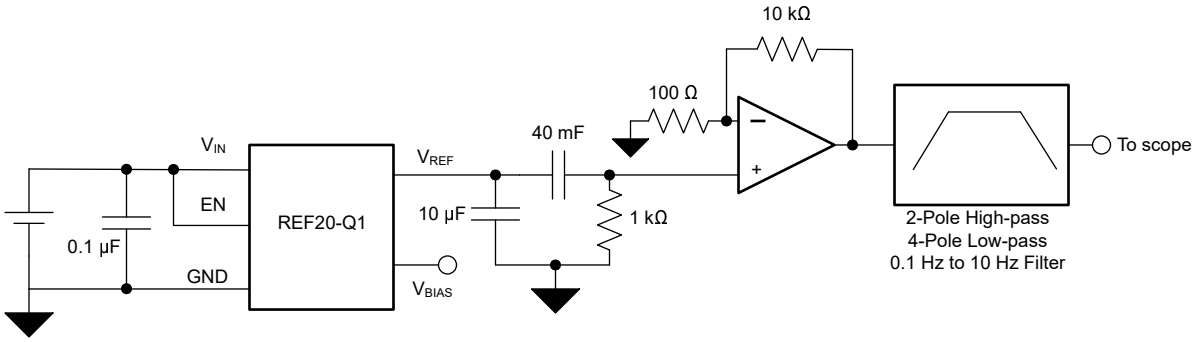


图 8-9. 0.1Hz 至 10Hz 噪声测量设置

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

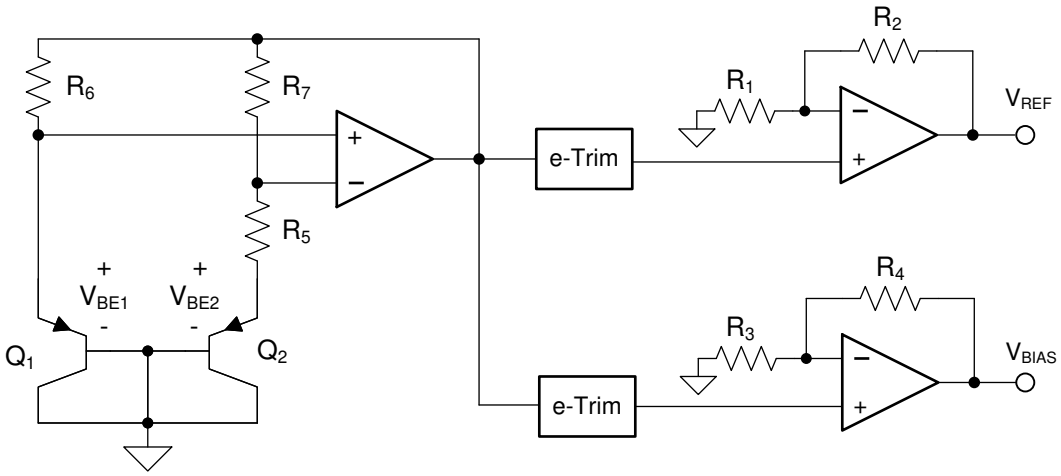
9 详细说明

9.1 概述

REF20xx-Q1 系列可提供 V_{REF} 和 V_{BIAS} ($V_{REF}/2$) 双路输出、带隙电压基准。*节 9.1* 提供了基本带隙拓扑的方框图，以及用于实现 V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出的两个缓冲器。晶体管 Q_1 和 Q_2 被偏置，使 Q_1 的电流密度大于 Q_2 的电流密度。两个基极发射极电压之差 (V_{BE1} – V_{BE2}) 具有正温度系数，并被强制施加在电阻器 R_5 两端。该电压被放大并添加到具有负温度系数的 Q_2 的基极发射极电压。由此产生的带隙输出电压几乎与温度无关。两个独立的缓冲器用于从带隙电压生成 V_{REF} 和 V_{BIAS}。电阻器 R_1、R_2 和 R_3、R_4 的阻值应确保 $V_{BIAS} = V_{REF}/2$。

e-Trim™ 是一种对 V_{REF} 和 V_{BIAS} 的初始精度和温度系数进行封装级修整的方法，在塑模成型工艺之后的最终制造阶段实施。该方法尽可能地减小了固有晶体管失配的影响，以及封装成型过程中引入的误差。REF20xx-Q1 中采用了 e-Trim 技术，从而更大程度降低温漂并提高 V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出的初始精度。

9.2 功能方框图



9.3 特性说明

9.3.1 V_{REF} 和 V_{BIAS} 跟踪

大多数单电源系统需要一个额外的稳定电压来偏置输入双极性信号，该电压值等于模数转换器 (ADC) 输入范围的中间值。REF20xx-Q1 的 V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出由*节 9.2* 中所示的相同带隙电压生成。因此，两个输出在 –40°C 至 125°C 的整个温度范围内彼此跟踪，精度为 7ppm/°C（最大值）。跟踪误差通过箱形法计算得出，如方程式 2 所述：

$$\text{Tracking Error} = \left(\frac{V_{DIFF(MAX)} - V_{DIFF\ (MIN)}}{V_{REF} \bullet \text{Temperature Range}} \right) \bullet 10^6 \quad \text{(ppm)} \tag{2}$$

其中

- $V_{DIFF} = V_{REF} - 2 \bullet V_{BIAS}$

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

跟踪精度如图 9-1 所示。

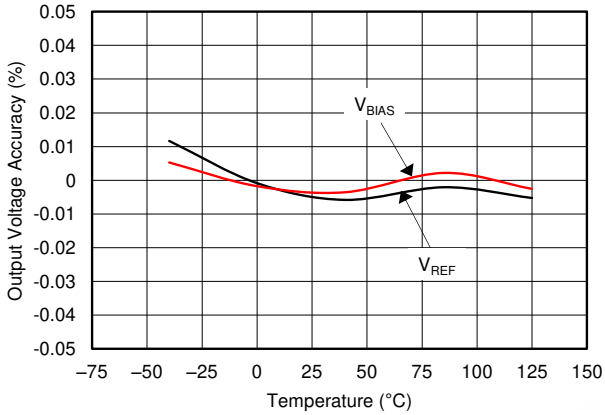


图 9-1. V_{REF} 和 V_{BIAS} 跟踪与温度间的关系

9.3.2 低温漂

REF20xx-Q1 旨在更大程度地减小温漂误差，温漂误差定义为输出电压在温度范围内的变化。使用箱形法计算温漂，如方程式 3 所述。

$$\text{Drift} = \left(\frac{V_{REF(MAX)} - V_{REF(MIN)}}{V_{REF} \bullet \text{Temperature Range}} \right) \bullet 10^6 \quad \text{(ppm)} \tag{3}$$

9.3.3 负载电流

REF20xx-Q1 系列可提供每路输出 ±20mA 的电流负载。通过将输出短路电流限制为 50mA，器件的 V_{REF} 和 V_{BIAS} 输出端均可受到短路保护。根据方程式 4，器件温度会升高：

$$T_J = T_A + P_D \bullet R_{\theta JA} \tag{4}$$

其中

- T_J = 结温 (°C)
- T_A = 环境温度 (°C)
- P_D = 耗散的功率 (W)
- $R_{\theta JA}$ = 结至环境热阻 (°C/W)

REF20xx-Q1 最高结温不得超过 150°C 的绝对最大额定温度。

9.4 器件功能模式

当 REF20xx-Q1 的 EN 引脚被拉高时，器件处于工作模式。器件必须处于工作模式才能正常运行。将 ENABLE 引脚拉至低电平可将 REF20xx-Q1 置于低功耗模式。在关断模式下，器件的输出变为高阻抗并且器件的静态电流降至 5μA。请参阅 *节 7.5*，了解有关逻辑高电压电平和逻辑低电压电平的信息。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

10 应用和实施

备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 器件规格的范围，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客 户应负责确定器件是否适用于其应用。客户应验证并测试其设计，以确保系统功能。

10.1 应用信息

本节介绍的低温漂、双向、单电源、低侧电流检测解决方案可准确检测 –2.5A 至 2.5A 的负载电流。输出的线性范围为 250mV 至 2.75V。正电流由 1.5V 至 2.75V 的输出电压表示，而负电流由 250mV 至 1.5V 的输出电压表示。差分放大器是 INA240-Q1 电流分流监控器，其电源和基准电压由低温漂 REF2030-Q1 提供。

10.2 典型应用

10.2.1 低侧电流检测应用

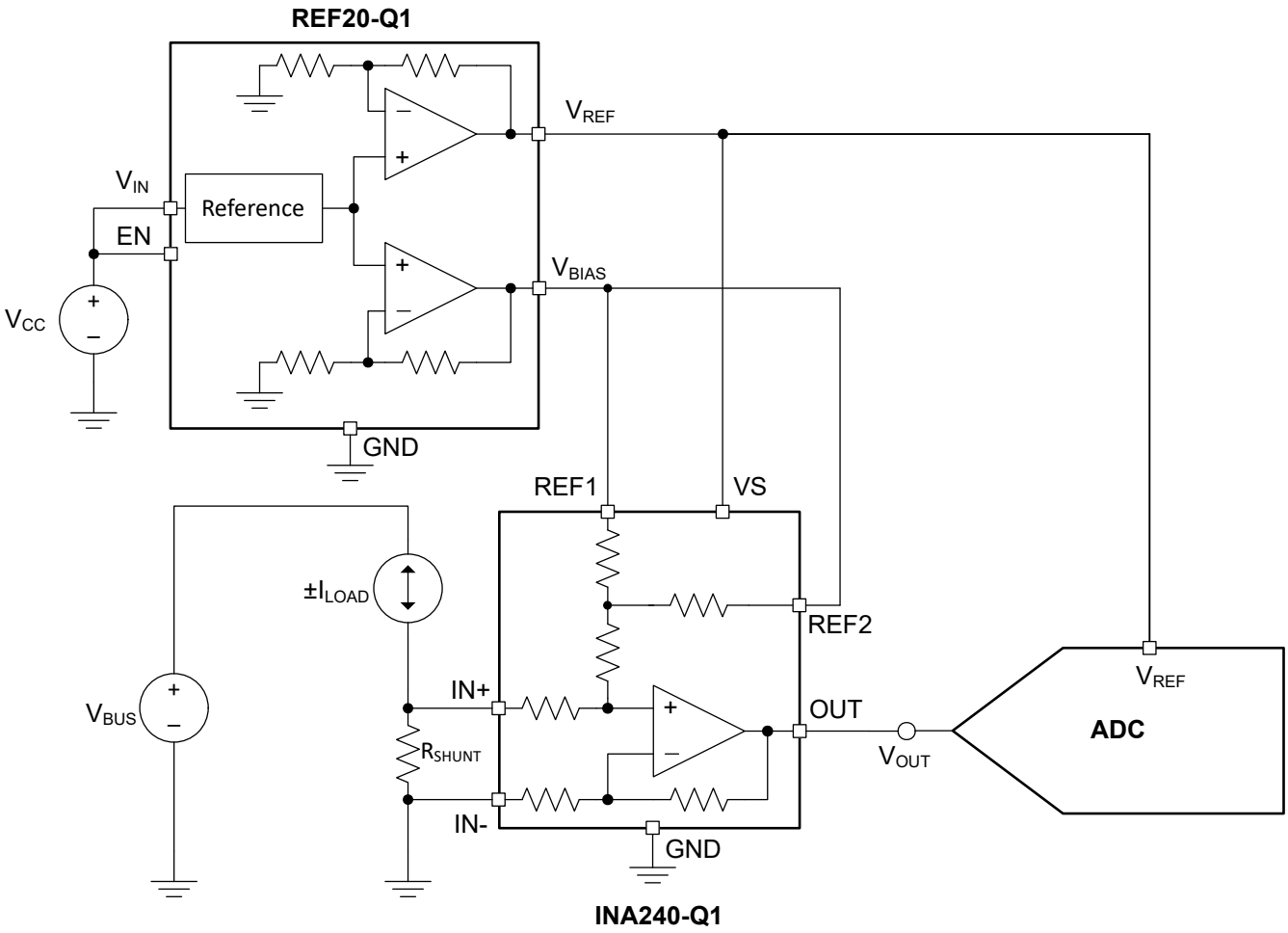


图 10-1. 低侧电流检测应用

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

10.2.1.1 设计要求

设计要求如下：

1. 电源电压：5.0V
2. 负载电流：±2.5A
3. 输出：250mV 至 2.75V
4. 最大分流电压：±25mV

10.2.1.2 详细设计过程

由于共模电压接近地电平，因此需要低侧电流检测。电流检测解决方案与总线电压 V_{BUS} 无关。检测双向电流时，请使用具有基准引脚的差分放大器。此过程通过偏置输出级使其响应负输入电压来区分正电流和负电流。有多种方法可以为差分放大器提供电源 (V+) 和基准电压（V_{REF} 或 V_{BIAS}）。对于低温漂解决方案，请使用一个同时提供电源和基准电压的单片基准。图 10-2 显示了适用于低温漂、低侧、双向电流检测解决方案的通用电路拓扑。此拓扑在与 ADC 连接时特别有用；请参阅图 10-1。与其他拓扑相比，该拓扑不仅能在温度范围内跟踪 V_{REF} 和 V_{BIAS}，还能使二者具有更好的匹配度。

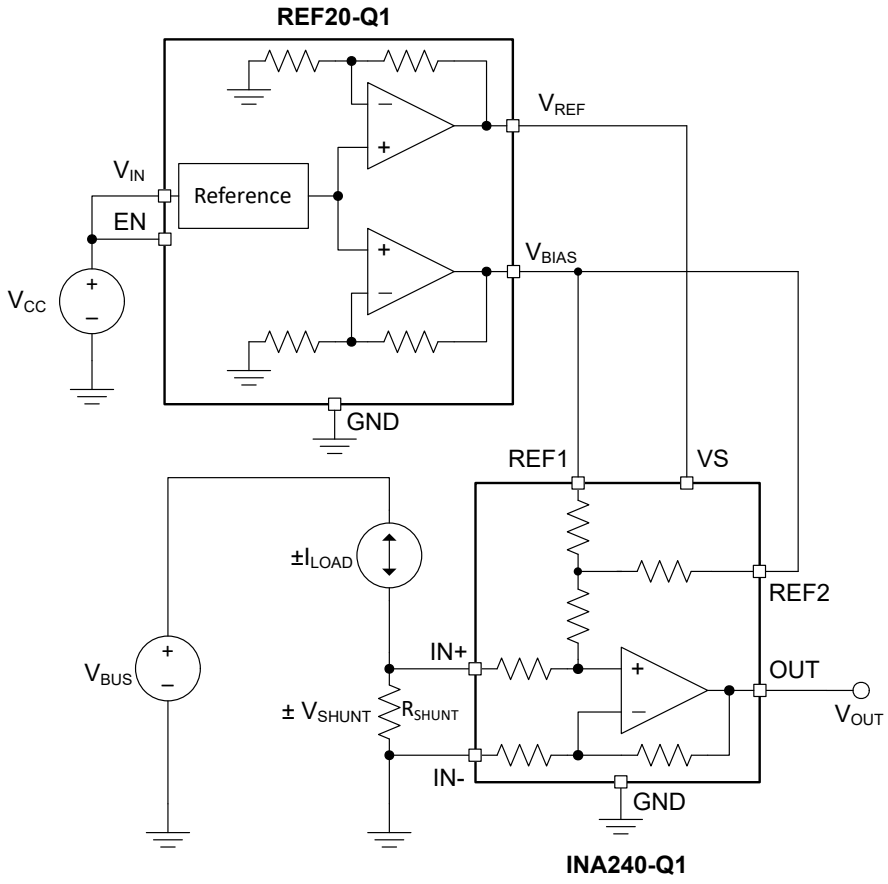


图 10-2. 低温漂、低侧、双向电流检测电路拓扑

图 10-2 中电路的传递函数如方程式 5 所示：

$$V_{OUT} = G \cdot (\pm V_{SHUNT}) + V_{BIAS}$$
$$= G \cdot (\pm I_{LOAD} \cdot R_{SHUNT}) + V_{BIAS} \quad (5)$$

10.2.1.2.1 分流电阻器

如图 10-2 所示，$_{SHUNT}$ 的值是系统负载的接地电位。如果 V_{SHUNT} 的值过大，则在连接接地电位实际为 0V 的系统时可能会出现问题。此外，如果 V_{SHUNT} 为过小的负值，除了导致出现可能的连接问题外，还可能会超出差分放大器的输入共模电压。因此，限制分流电阻器上的电压非常重要。方程式 6 可用于计算 R_{SHUNT} 的最大值。

$$R_{SHUNT(max)} = \frac{V_{SHUNT(max)}}{I_{LOAD(max)}} \tag{6}$$

假设最大分流电压为 ±25mV，负载电流范围为 ±2.5A，则最大分流电阻的计算方法如方程式 7 所示。

$$R_{SHUNT\,(max)} = \frac{V_{SHUNT\,(max)}}{I_{LOAD\,(max)}} = \frac{25mV}{2.5A} = 10m\Omega \tag{7}$$

为更大程度地减小温度范围内的误差，请选择低温漂分流电阻器。为更大程度地减小失调电压误差，请选择容差尽可能低的分流电阻器。本设计使用 Y14870R01000B9W 电阻器。

10.2.1.2.2 差分放大器

用于本设计的差分放大器必须具有以下特性：

1. 单电源 (3V)
2. 基准电压输入
3. 低初始输入失调电压 (V_{OS})
4. 低温漂
5. 固定增益
6. 低侧检测（输入共模范围低于接地电压）

本设计使用电流分流监控器 (INA240-Q1)。INA240-Q1 系列拓扑如图 10-3 所示。有关 INA240-Q1 的规格，请参阅 INA240-Q1 产品数据表。

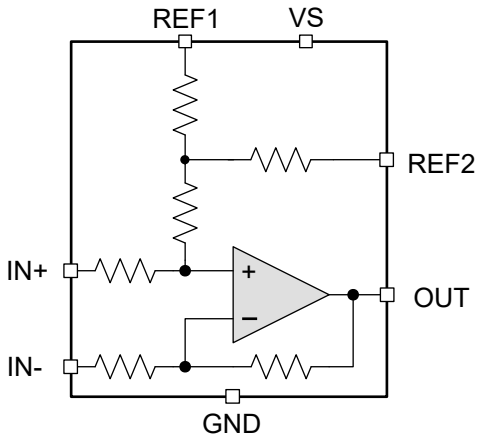


图 10-3. INA240-Q1 电流分流监控器拓扑

INA240-Q1 具有本应用所需的所有特性，因此是其理想的选择。通常，仪表放大器 (INA) 不具有该应用所需的输入共模摆幅到地程度。此外，INA 需要外部电阻器来设置其增益，这不适合低温漂应用。差分放大器通常具有更大的输入偏置电流，这会降低小负载电流下的解决方案精度。差分放大器的增益通常为 1V/V。当增益可调时，差分放大器使用不利于低温漂应用的外部电阻器。

10.2.1.2.3 电压基准

适用于本应用的电压基准必须具有以下特性：

1. 双路输出（3.0V 和 1.5V）

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

2. 低漂移
3. 两个输出之间的跟踪误差低

此设计使用 REF2030-Q1。REF20xx-Q1 拓扑如 节 9.2 所示。

REF2030-Q1 具有双路输出，是本应用的理想选择。8ppm/°C 的温漂和 0.05% 的初始精度使得本应用中由电压基准导致的误差超小。此外，两个输出之间的不匹配度很小，并且两个输出在温度范围内都能得到良好地跟踪，如图 10-4 和图 10-5 所示。

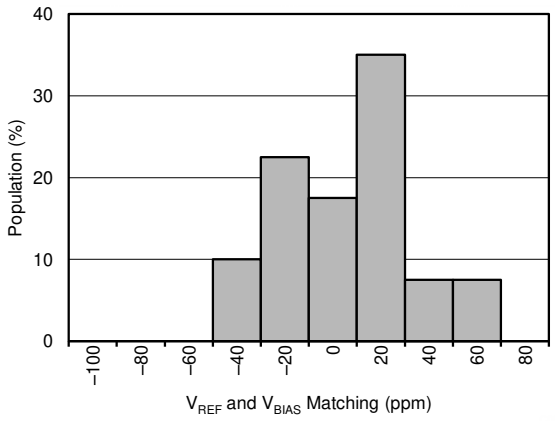


图 10-4. V_{REF} – 2 × V_{BIAS} 分布（T_A = 25°C 时）

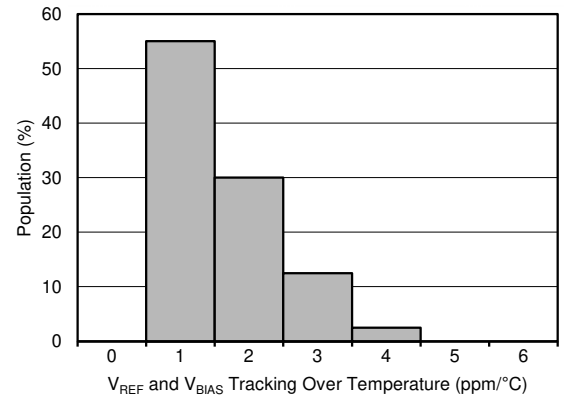


图 10-5. 在温度范围内的 V_{REF} – 2 × V_{BIAS} 漂移跟踪分布

10.2.1.2.4 误差计算

本节将讨论两种类型的误差：初始精度和温漂。精度误差包括：

- 分流电阻器容差：α_{shunt_tol} = 0.1%（最大值）
- INA 初始输入失调电压：V_{OS_INA} = 5 μV（典型值）
- INA PSRR：$V_{OS_INA_PSRR}$ = 1 μV/V（典型值）
- INA CMRR：$V_{OS_INA_CMRR}$ = 132dB（典型值）
- INA 增益误差：α_{INA_GE} = 0.05%（典型值）
- 基准输出精度：α_{REF_output} = 0.05%（最大值）

应该注意的是，在 25ºC 时，通过执行两点系统校准，可以大幅减少这些误差源。另一方面，仅能通过在温度范围内执行校准才能减少温漂误差。温漂错误包括：

- 分流电阻器温漂：δ_{shunt_drift} = 15ppm/ºC（最大值）
- INA 失调电压温漂：$\delta_{INA_drift_Vos}$ = 50nV/ºC（典型值）
- INA 增益误差温漂：$\delta_{INA_drift_GE}$ = 0.5ppm/ºC（典型值）
- 基准输出温漂：$\delta_{REF_drift_output}$ = 3ppm/ºC（典型值）

方程式 8 可用于将规格单位从百万分率 (ppm) 转换为百分比 (%)，反之亦然。

$$\% = (ppm/10{,}000) \tag{8}$$

方程式 9 可用于将规格单位从分贝 (dB) 转换为线性表示。

$$(V / V) = (1 / 10^{(dB/20)}) \tag{9}$$

对于某些误差计算，需要满量程范围 (FSR)。此设计的 FSR 由分流电阻器上的电压决定，即 ±25mV（或 50mV）。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

对于温漂误差，温度变化 (ΔT) 最大为 100ºC，即最大额定温度 (125ºC) 与室温 (25ºC) 之差。在计算分流电阻器和 INA240-Q1 的温漂误差时会使用此温度变化。由于 REF20-Q1 使用箱形法来确定温漂，因此用于计算的温度范围是整个工作温度范围，即 150ºC。

最后，由于 CMRR 和 PSRR 规格而产生的误差需要根据系统要求与器件额定值的差异进行调整。例如，INA240-Q1 的额定共模电压为 12V。本设计中的共模电压为 ~0V。这种差异会导致以输入为基准的失调电压。

以下表 10-1 汇总了初始精度计算。

表 10-1. 初始精度误差汇总

误差来源	器件：R_{SHUNT} (PPM)	器件：IN240-Q1 (PPM)	器件：REF2030-Q1 (PPM)	总计（PPM、RSS）
偏移量		100 FSR	500 FSR	510 FSR
CMRR		60 FSR		60 FSR
PSRR		40 FSR		40 FSR
增益误差	1000	500		1118
总计（PPM、RSS）	1000	1087.5 FSR	500 FSR	1231 FSR (0.123%)

以下表 10-2 汇总了总温漂计算。

表 10-2. 温漂误差汇总

误差来源	器件：R_{SHUNT} (PPM)	器件：IN240-Q1 (PPM)	器件：REF2030-Q1 (PPM)	总计（PPM、RSS）
温漂		100 FSR	495	505 FSR
增益误差漂移	1500	50		1501
总计（PPM、RSS）	1500	111.8 FSR	495	1583.52 FSR (0.194%)

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

10.2.1.2.5 应用曲线

在 25°C 下执行两点校准可消除与失调电压、增益误差等相关的误差。图 10-6 至图 10-8 显示了在不同条件下测得的误差。有关测量过程、校准和计算的更详细说明，请参阅 TIDU357。

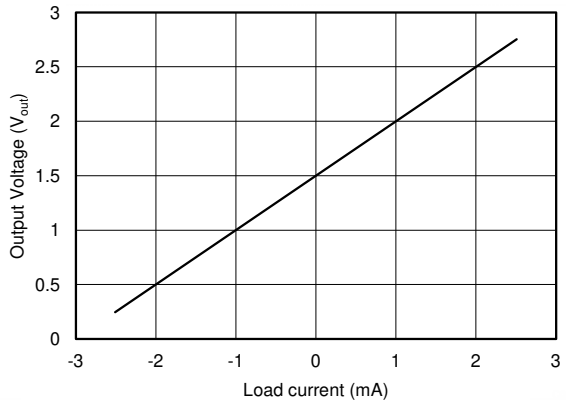


图 10-6. 经测量的传递函数

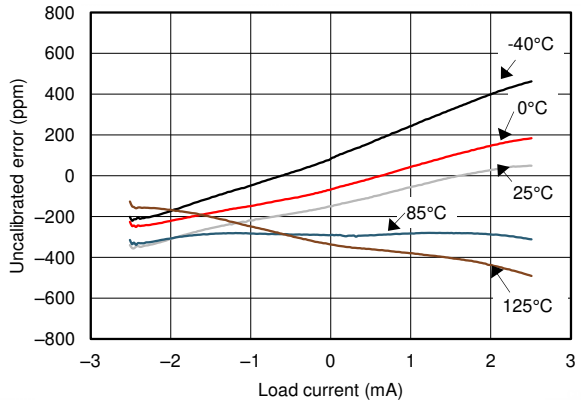


图 10-7. 未校准误差与负载电流间的关系

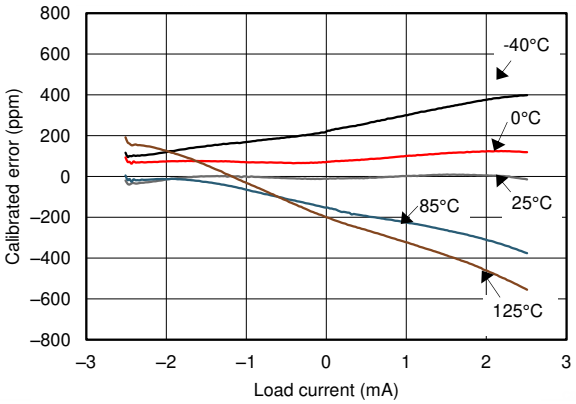


图 10-8. 校准误差与负载电流间的关系

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

11 电源相关建议

REF20xx-Q1 基准系列具有超低压降电压。可使用仅高于输出电压 20 mV 的电源来运行这些基准。图 11-1 中提供了有负载基准条件下的典型压降电压与负载关系图。建议使用 0.1µF 至 10µF 的电源旁路电容器。

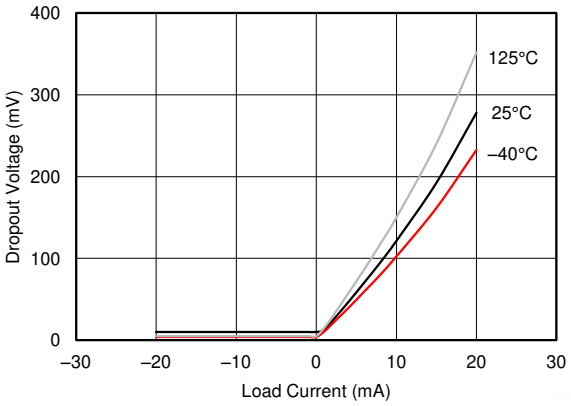


图 11-1. 压降电压与负载电流间的关系

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

12 布局

12.1 布局指南

图 12-1 展示了使用 REF2030-Q1 的数据采集系统的 PCB 布局示例。一些重要注意事项有：

- 在 REF2030-Q1 的 V_{IN}、V_{REF} 和 V_{BIAS} 处连接低 ESR 0.1 µ F 陶瓷旁路电容器。
- 按照器件规格对系统中的其他工作器件进行解耦。
- 使用实心接地层有助于散热和降低电磁干扰 (EMI) 噪声拾取。
- 外部组件的位置应尽量靠近器件。该配置可防止产生寄生误差 (如塞贝克效应) 。
- 尽可能缩短连接 INA 与偏置输出以及 ADC 与基准输出的布线长度，从而减少噪声拾取。
- 模拟布线敏感，不能与数字布线平行。尽可能避免数字布线与模拟布线交叉，仅在绝对必要时可垂直交叉布线。

12.2 布局示例

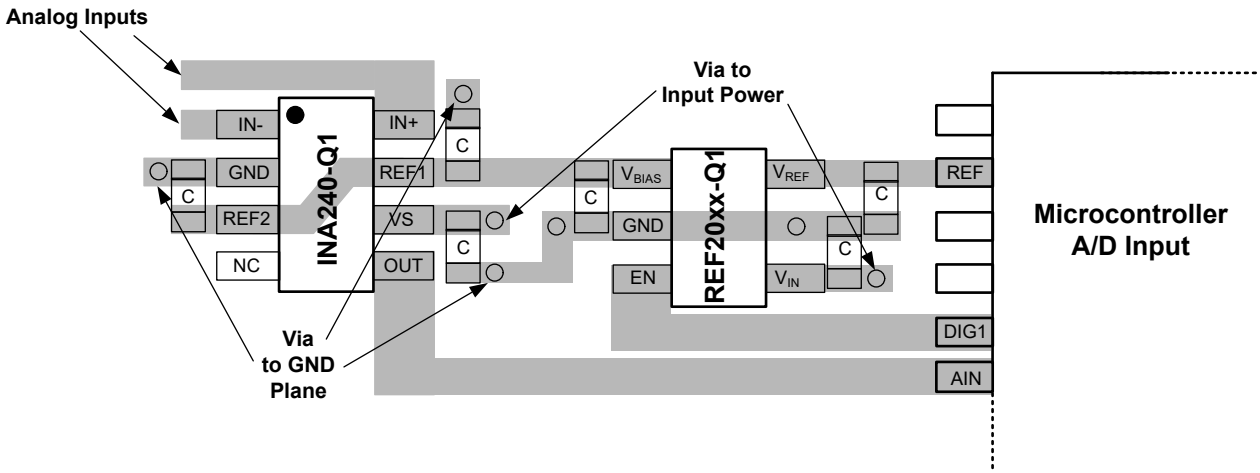


图 12-1. 布局示例

13 器件和文档支持

13.1 文档支持

13.1.1 相关文档

请参阅以下相关文档：

- *INA240-Q1 具有增强型 PWM 抑制功能和宽共模范围的汽车类、高侧和低侧、双向、零温漂电流检测放大器* (SBOS808)
- *低温漂双向单电源低侧电流检测参考设计* (TIDU357)

13.2 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 *订阅更新* 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。

13.3 支持资源

TI E2E™ 支持论坛是工程师的重要参考资料，可直接从专家获得快速、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可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》。

13.4 商标

e-Trim™ is a trademark of Texas Instruments, Inc.
TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

13.5 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。

13.6 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。

14 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可用的最新数据。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。

Copyright © 2023 Texas Instruments Incorporated

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package | Pins	Package qty | Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
REF2025QDDCRQ1	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GACQ
REF2025QDDCRQ1.B	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GACQ
REF2030QDDCRQ1	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GADQ
REF2030QDDCRQ1.B	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GADQ
REF2033QDDCRQ1	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GAEQ
REF2033QDDCRQ1.B	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GAEQ
REF2041QDDCRQ1	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GAFQ
REF2041QDDCRQ1.B	Active	Production	SOT-23-THIN (DDC) | 5	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	GAFQ

(1) **Status:** For more details on status, see our product life cycle.

(2) **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.

(3) **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the TI RoHS Statement for additional information and value definition.

(4) **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.

(5) **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.

(6) **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.

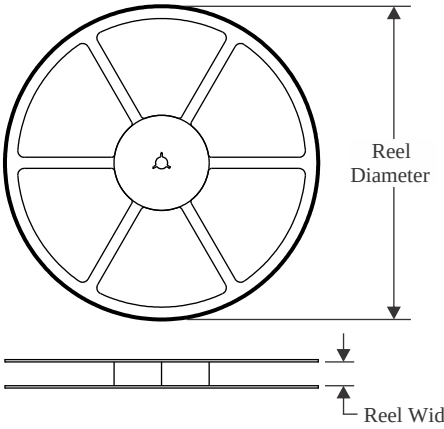
Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

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.

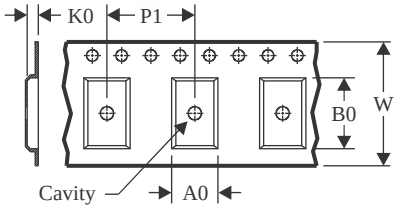
In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION

REEL DIMENSIONS

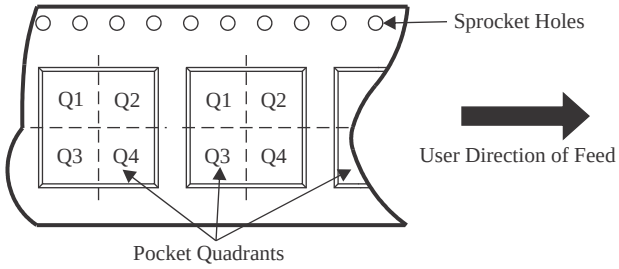


TAPE DIMENSIONS



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

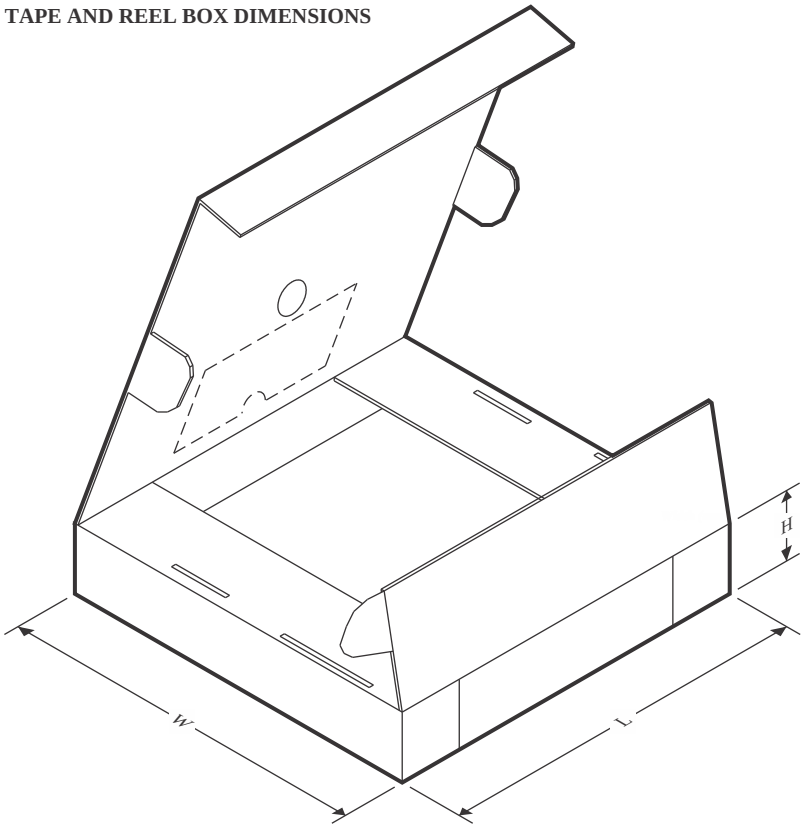
QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
REF2025QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
REF2030QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
REF2033QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3
REF2041QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	180.0	8.4	3.2	3.2	1.4	4.0	8.0	Q3

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

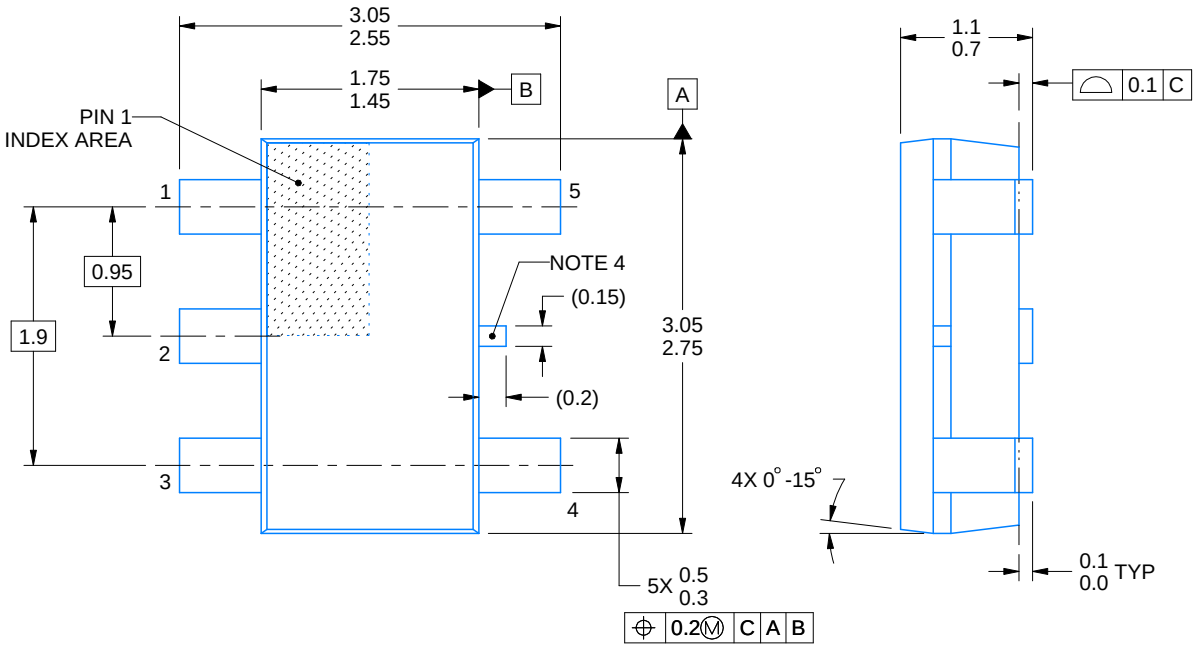
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
REF2025QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	213.0	191.0	35.0
REF2030QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	213.0	191.0	35.0
REF2033QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	213.0	191.0	35.0
REF2041QDDCRQ1	SOT-23-THIN	DDC	5	3000	213.0	191.0	35.0

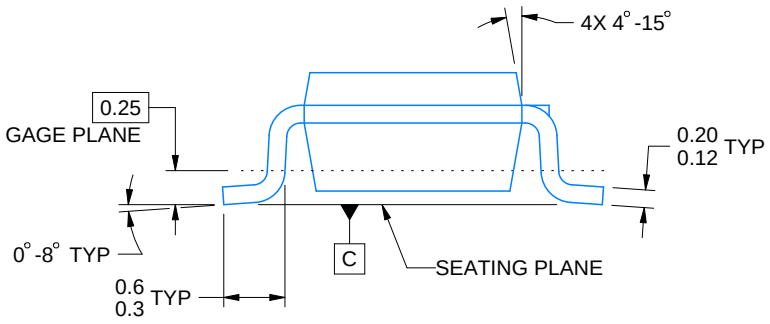
PACKAGE OUTLINE

DDC0005A

SOT-23 - 1.1 max height

SMALL OUTLINE TRANSISTOR

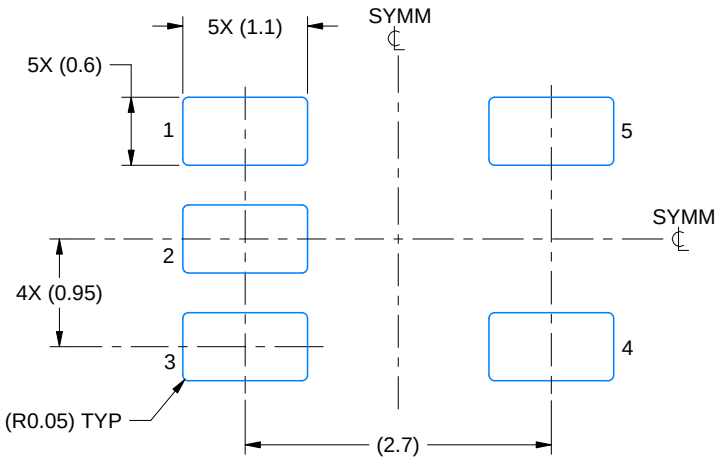




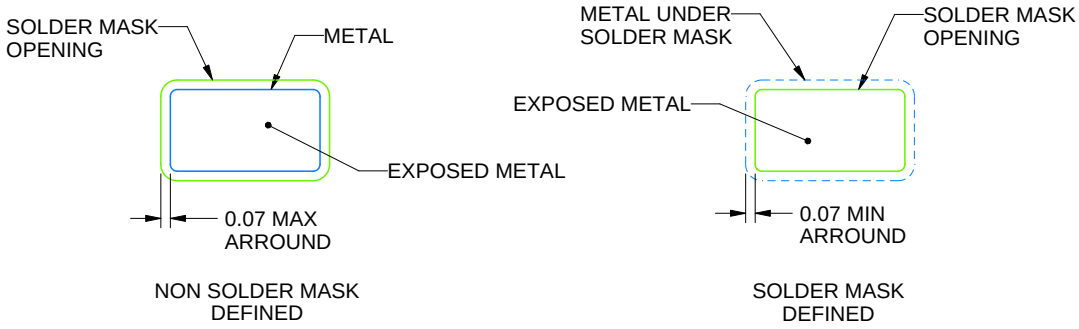
4220752/C 08/2024

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.
3. Reference JEDEC MO-193.
4. Support pin may differ or may not be present.



LAND PATTERN EXAMPLE
EXPLOSED METAL SHOWN
SCALE:15X

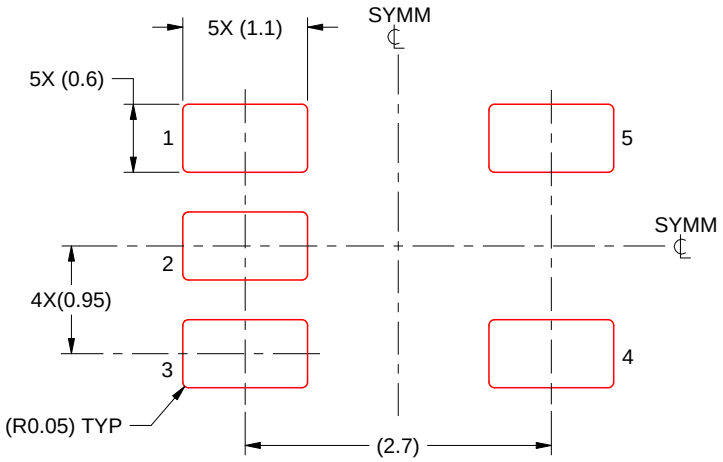


SOLDERMASK DETAILS

4220752/C 08/2024

NOTES: (continued)

4. Publication IPC-7351 may have alternate designs.
5. Solder mask tolerances between and around signal pads can vary based on board fabrication site.



SOLDER PASTE EXAMPLE
BASED ON 0.125 THICK STENCIL
SCALE:15X

4220752/C 08/2024

NOTES: (continued)

6. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.
7. Board assembly site may have different recommendations for stencil design.

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 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。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月