



Ben Collier

**摘要**

模数转换器 (ADC) 是一个关键模块，用于在实时控制应用中检测反馈信号和监测信号。但是，如果不仔细设计和评估 ADC 的基准电路，可能会出现明显的交流和线性误差，导致 ADC 检测性能不佳，从而导致系统性能不佳。本应用手册识别了这些误差的一些常见来源，并提供了可在 C2000™ 实时微控制器设计中使用的拓扑。

**内容**

<b>1 引言</b> .....	<b>2</b>
1.1 基准不可靠的症状.....	2
1.2 ADC 工作原理.....	2
1.3 布局指南.....	2
1.4 基准缓冲器主要规格.....	3
1.5 C2000 MCU 的 VREFHI 示例.....	3
<b>2 未缓冲的基准</b> .....	<b>4</b>
<b>3 缓冲基准</b> .....	<b>5</b>
<b>4 VDDA 作为 ADC 的基准电压</b> .....	<b>6</b>
<b>5 总结</b> .....	<b>6</b>
<b>6 参考文献</b> .....	<b>6</b>
<b>7 ADC 相关配套资料</b> .....	<b>7</b>

**插图清单**

图 1-1. 布局示例.....	3
图 2-1. 未缓冲的基准.....	4
图 3-1. 缓冲基准.....	5

**商标**

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

对于 SAR ADC，基准电压电路设计不当会导致采样的信号转换不准确。因此，在设计利用 C2000 实时 MCU 中所含 ADC 的系统时，有必要评估驱动 ADC 基准的电路。本应用报告推荐了一些基准电路拓扑，并简要强调了 [TI 高精度实验室 - 驱动 SAR ADC 上的基准输入](#) 关于 ADC 基准电路的视频系列中介绍的方法（在 C2000 实时 MCU 上 ADC 的特定上下文中）。

### 1.1 基准不可靠的症状

C2000 器件数据表提供了 ADC 性能许多方面的规格，其中包括 INL、DNL、增益误差、失调电压误差等线性规格。该数据表还提供了多种交流规格，例如 SNR、THD 和 ENOB。请参阅 [TI 模数转换器规格和性能特性术语表](#)，以了解这些规格的定义。当 ADC 性能超出这些数据表规格时，可能很难找到问题的根源。因此，了解 ADC 电压基准电路不佳可能导致哪些误差会有所帮助。

例如，高增益误差可能由具有直流误差的 ADC 基准电压导致，因为每个 ADC 代码表示的电压与预期值不同。相反，如果 ADC 基准电压在负载阻抗的快速变化期间不稳定，则可能会出现动态误差。[TI 高精度实验室 - 驱动 SAR ADC 上的基准输入](#) 中详细讨论了这些概念。

### 1.2 ADC 工作原理

根据给定的模拟输入电压，12 位单端 C2000 ADC 的预期转换结果通过以下公式计算得出。

$$\text{ADCRESULT}_x = 4095 \left( \frac{\text{ADCIN}_y - \text{VREFLO}}{\text{VREFHI} - \text{VREFLO}} \right) \quad (1)$$

对于单端 16 位 ADC，预期的转换结果通过以下公式计算得出。

$$\text{ADCRESULT}_x = 65535 \left( \frac{\text{ADCIN}_y - \text{VREFLO}}{\text{VREFHI} - \text{VREFLO}} \right) \quad (2)$$

对于 12 位差分端 ADC，预期的转换结果通过以下公式计算得出。请注意，一个差分转换需要两个输入。

$$\text{ADCRESULT}_x = 4095 \left( \frac{\text{ADCIN}_yP - \text{ADCIN}_yN + \text{VREFHI}}{2 \text{VREFHI}} \right) \quad (3)$$

对于差分端 16 位 ADC，预期的转换结果通过以下公式计算得出。

$$\text{ADCRESULT}_x = 65535 \left( \frac{\text{ADCIN}_yP - \text{ADCIN}_yN + \text{VREFHI}}{2 \text{VREFHI}} \right) \quad (4)$$

大多数 C2000 ADC 可以在两种不同的基准模式下工作：内部基准模式和外部基准模式。当选择内部带隙来生成 ADC 的基准电压时，C2000 器件本身会将电压驱动到 VREFHI 引脚。在外部基准模式下，VREFHI 和 VREFLO 由外部电路驱动。然后，VREFHI 和 VREFLO 引脚设置 ADC 转换范围。

### 1.3 布局指南

SAR ADC 每次转换期间会对 VREFHI 进行多次采样，如果在进行位确定时对 ADC 的内部电容器阵列进行切换并进行充电时，会发生高电流瞬变。VREFHI 必须保持稳定并适当建立以避免转换错误。由于这些动态电流，该基准引脚需要使用高质量旁路电容器 ( $C_{\text{REF}}$ ) 进行良好的去耦。在下图中，通过将电容器靠近 REF 引脚放置并使用宽布线连接，可以尽可能地减小基准电容器和 REF 引脚之间的电感。该设计还使用一个  $0.1 \Omega$  的小型串联电阻 ( $R_{\text{REF}}$ ) 来保持整体阻抗较小并在高频率下保持恒定。

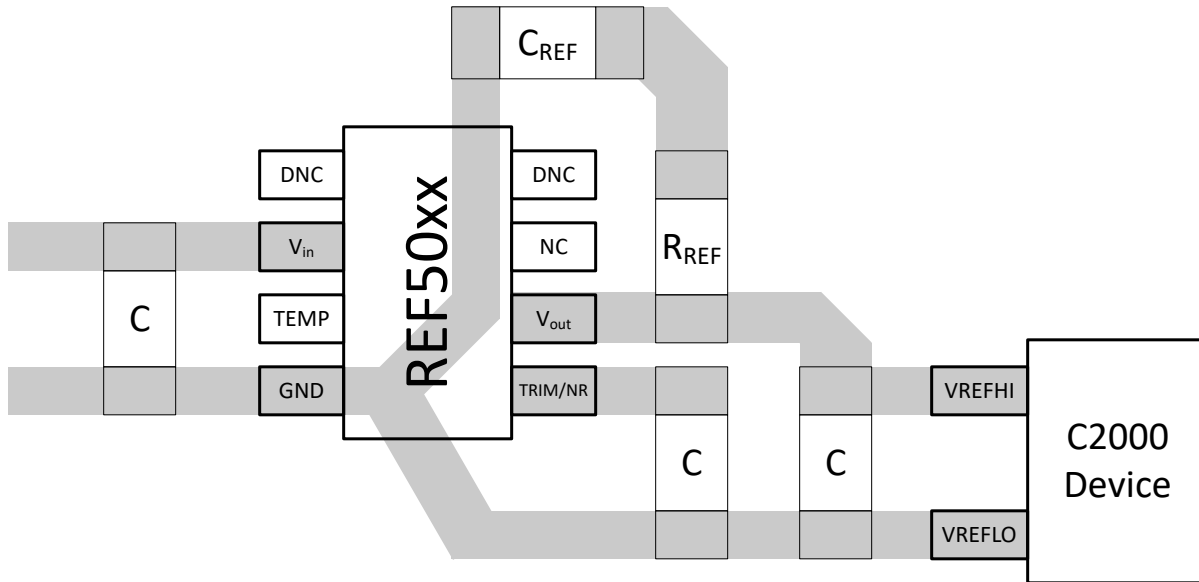


图 1-1. 布局示例

## 1.4 基准缓冲器主要规格

术语“基准缓冲器”用于描述放置在基准 IC 和 ADC 基准输入之间的放大器。基准缓冲器旨在满足 ADC 基准输入的极快瞬态电流要求。由于 VREFHI 和 VREFLO 之间使用了一个电容器  $C_{bypass}$ ，因此 ADC 基准可以在每个位的转换期间从该电容器汲取电流，但基准电路需要在位确定之间为该旁路电容器充电。如果单独使用基准 IC 无法足够快地给该电容器完全充电，则需要使用基准缓冲器来保持 ADC 性能。

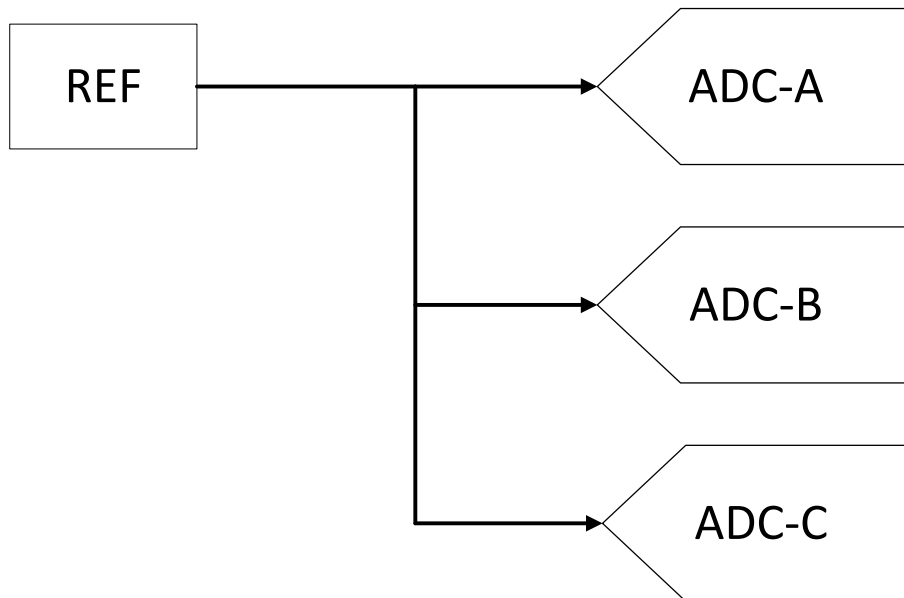
基准缓冲器的主要规格有最大输出电流、失调电压、失调电压漂移、带宽以及带宽范围内的输出阻抗。有关这些术语的定义，请参阅 [了解运算放大器规格](#)。要在整个温度范围内确保直流精度，需要具有低失调电压和失调电压漂移。要满足快速瞬态电流要求，需要具有高带宽和低输出阻抗。有关更多详细信息，请参阅 [TI 高精度实验室 - 驱动 SAR ADC 上的基准输入](#)。

## 1.5 C2000 MCU 的 VREFHI 示例

为了说明 ADC 基准精度的重要性，本节介绍了 ADC 基准存在直流误差的基本场景。如果  $VREFLO = 0V$  且  $VREFHI = 2.5V$ ，那么 12 位 ADC 的 4096 个可能代码每一个都表示大约  $0.61mV$  的电压。

如果 VREFHI 未达到预期电压，则每个 ADC 代码的值不再是  $0.61mV$ 。在极端情况下，如果 ADC 基准电压意外降至  $2.4V$ ，则每个代码对应的电压范围约为  $0.59mV$ 。如果 ADC 返回代码 4090，则用户认为采样的电压大约为  $2.5V$ 。实际输入电压几乎低了  $100mV$  !

## 2 未缓冲的基准



### REFERENCE PART OPTIONS:

REF35 (Recommended)

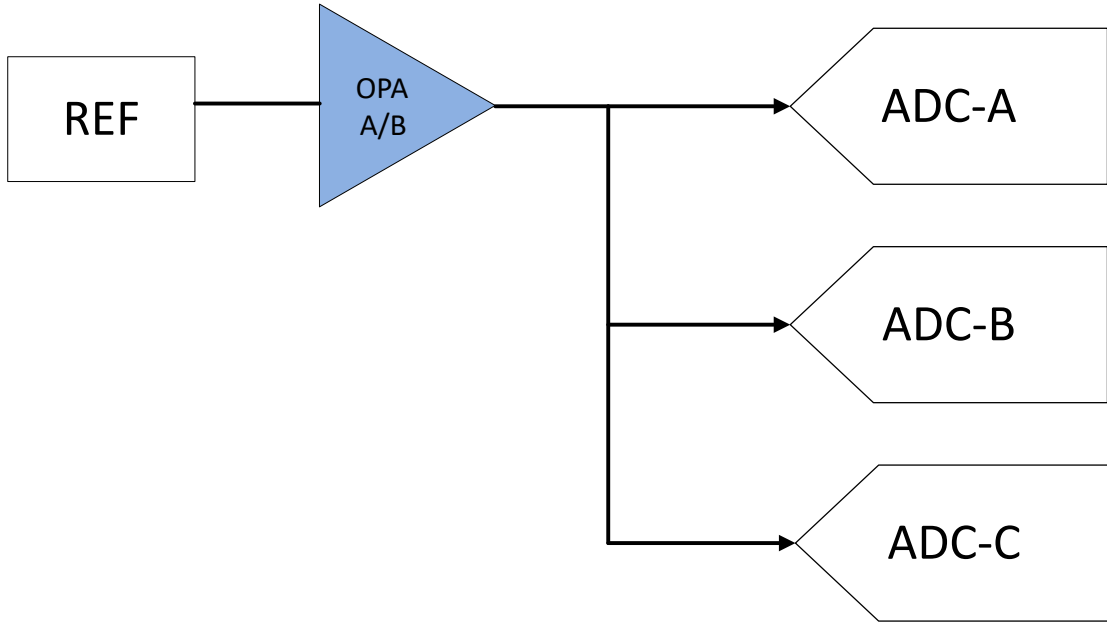
REF50xx

REF34

图 2-1. 未缓冲的基准

此拓扑使用单个电压基准器件来驱动多个 C2000 ADC。该拓扑足以在 12 位单端和差分模式下驱动多达三个 ADC。该拓扑也可用于驱动多达三个 16 位单端 ADC，但建议使用缓冲基准来驱动 16 位差分 ADC。为了获得出色的性能，必须在基准 IC 的输出端使用足够大的旁路电容器。

### 3 缓冲基准



#### REFERENCE PART OPTIONS:

REF35 (Recommended)  
 REF50xx  
 REF34

#### OP-AMP PART OPTIONS:

**A:**  
 OPA328 (Recommended)  
 OPA320  
 OPA350  
**B:**  
 TLV365 (Recommended)  
 OPA322

图 3-1. 缓冲基准

此拓扑使用一个电压基准 IC 和一个高精度运算放大器来驱动多个 ADC。该拓扑可为所有 C2000 ADC 提供出色的性能。特别建议使用此拓扑来驱动 16 位差分 ADC，因为非缓冲基准电路与缓冲基准电路之间存在相当大的性能差异。驱动三个以上 ADC 时，也建议使用该拓扑。

#### 备注

凭借零交叉技术，OPA328 能够将输出电压驱动至接近运算放大器的电源电压。对于大多数传统的轨到轨运算放大器，这可能会导致不可接受的输入失调电压。有关详细信息，请参阅 [OPAx328 的基准缓冲器、ADC 驱动器和跨阻应用](#)。

运算放大器的“B”选项为高精度运算放大器提供了具有成本效益的替代方案，其以牺牲直流性能来降低成本。当 ADC 在高频下采样时，这些放大器能够驱动基准，但由于放大器的输入失调电压误差，直流误差可能高达 2mV。

## 4 VDDA 作为 ADC 的基准电压

对于没有内部基准的 C2000 器件，VREFHI 最便宜的选择是使用 VDDA 作为基准。对于具有内部基准的 C2000 器件，与使用 VDDA 作为基准相比，内部基准始终是更好的性能选项。此外，一些低引脚数 C2000 封装将 VDDA 作为基准电压的唯一选择。理论上，以 VDDA 为基准可以实现良好的性能，但在实践中，一些常见的设计决策可能导致无法做到这一点。

一个可能限制性能的常见设计决策是使用不准确的低压降稳压器 (LDO) 直接为 VDDA 供电，因为许多此类 IC 提供的输出电压具有相对较大的误差范围。VDDA 10% 的误差幅度会直接导致转换中出现 10% 的增益误差。这会导致满量程转换产生 400LSB 误差！

VDDA 电源的另一个主要规格是瞬态响应。由于 VDDA 用于为器件中的多个模拟外设供电，因此来自 VDDA 的负载电流可能会频繁变化。如果 VDDA 电源无法快速解析为目标电压，这可能会导致较大的 ADC 转换误差，进而导致整体动态性能不佳。这个问题有时可以通过选择 VDDA 引脚上的电容器来缓解，因此请务必仔细阅读为 VDDA 供电的 IC 的输出电容器建议。

使用 VDDA 作为基准时，可以仔细设计输入电路，以更大限度地降低 ADC 转换误差。VDDA 电源电路的主要考虑因素是直流精度、温度漂移和瞬态响应。

## 5 总结

对于 ADC 精度至关重要的系统，基准电压电路设计是一个重要的考虑因素。如果没有可靠的基准电路，用户可能会看到较差的线性和动态性能，从而导致检测性能和准确度降低。

通过使用 TI 高精度实验室中提供的优秀资源：[TI 高精度实验室 - 驱动 SAR ADC 上的基准输入](#)以及本应用报告中的指导，用户可以了解如何以及为何设计 ADC 基准电路来实现 C2000 数据表中所示的性能。

## 6 参考文献

- [TI 高精度实验室 - 驱动 SAR ADC 上的基准输入](#)
- 德州仪器 (TI)：[TI 模数转换器规格和性能特性术语表](#)
- 德州仪器 (TI)：[OPAx328 的基准缓冲器、ADC 驱动器和跨阻应用](#)
- 德州仪器 (TI)：[C2000 MCU 的 ADC 输入电路评估 \(使用 TINA-TI 仿真工具\)](#)
- 德州仪器 (TI)：[经过 ASIL D 等级功能安全认证的高速牵引和双向直流/直流转换参考设计](#)
- 德州仪器 (TI)：[了解运算放大器规格](#)

## 7 ADC 相关配套资料

### 基础资料

- [C2000 MCU 的 ADC 输入电路评估 \(TINA-TI\) 应用报告](#)
- [C2000 Academy - ADC](#)
- [PSpice for TI 设计和仿真工具](#)
- [实时控制参考指南](#)
  - 请参阅 [ADC 部分](#)
- [TI 高精度实验室 - ADC](#)
- [TI 高精度实验室：驱动 SAR ADC 上的基准输入 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：模数转换器 \(ADC\) 简介 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：SAR ADC 输入驱动器设计 \(视频\)](#)
- [TI e2e：将 VDDA 连接到 VREFHI](#)
- [TI e2e：ADC 输入保护的拓扑](#)
- [TI e2e：采样时 ADC 输入电压为什么会下降？](#)
  - 使用 [ADC](#) 对高阻抗分压器进行采样
- [了解数据转换器应用报告](#)

### 入门资源

- [使用 ADC 中断实现 ADC-PWM 同步](#)
  - 注：这是非 TI (第三方) 网站。
- [适用于 C2000 MCU 的模数转换器 \(ADC\) 培训 \(视频\)](#)
- [C2000 ADC \(3 类\) 性能与 ACQPS 间的关系应用报告](#)
- [F2800x C2000 实时 MCU 系列硬件设计指南](#)
- [将 ADS8364 连接到 TMS320F2812 DSP 应用报告](#)

### 专家资料

- [通过 TM320F28xx/28xxx DSC 设计模拟接口概述应用报告](#)
- [模拟工程师计算器](#)
- [模拟工程师口袋参考书](#)
- [C2000 ADC 的电荷共享驱动电路 \(使用 PSpice-FOR-TI\) 应用报告](#)
- [C2000 ADC 的电荷共享驱动电路 \(使用 TINA-TI\) 应用报告](#)
- [使用示波器调试微控制器中的集成 ADC](#)
- [缓解 ADC 存储器串扰的方法应用报告](#)
- [TI 高精度实验室：ADC 交流规格 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：ADC 误差源 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：ADC 噪声 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：模数转换器 \(ADC\) 驱动拓扑 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：数据转换器上的电气过载 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：高速 ADC 基础知识 \(视频\)](#)
- [TI 高精度实验室：SAR 和  \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ ：了解差异 \(视频\)](#)
- [TI e2e：ADC 带宽说明](#)
- [TI e2e：ADC 校准和总体未调整误差](#)
- [TI e2e：ADC 基准驱动器选项](#)
- [TI e2e：过采样下的 ADC 分辨率](#)
- [TI e2e：交错模式的 ADC 配置](#)
- [TI e2e：使用单个 ADC 进行同步采样](#)
- [TMS320280x 和 TMS320F2801x ADC 校准应用报告](#)
- [TMS320F2810、TMS320F2811 和 TMS320F2812 ADC 校准应用报告](#)

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司