

## Application Note

**MSPM0 实现具有成本效益的现场变送器应用**

Manuel Philippin, Ahmed Noeman, Jose-Manuel Infante-Bernal

**摘要**

对于工业现场变送器而言，检测几毫伏范围的信号具有挑战性。本应用手册重点介绍了使用 MSPM0 模拟外设和极少外部元件并具有成本效益的集成高增益传感器前端。本文档提供了一个示例信号链及其测量结果。此外，还探讨了特殊的硬件和软件设计注意事项。

**内容**

<b>1 引言</b> .....	<b>2</b>
<b>2 技术</b> .....	<b>2</b>
2.1 MSPM0 中的模拟外设.....	2
2.2 仪表放大器 - INA350.....	2
2.3 电压基准 - REF2925.....	3
2.4 低压降稳压器 - TPS7B6933-Q1.....	3
<b>3 信号链</b> .....	<b>3</b>
<b>4 结果</b> .....	<b>5</b>
4.1 OPA 斩波模式的影响.....	5
4.2 过采样和硬件均值计算.....	6
4.3 采样速率对有效分辨率的影响.....	6
4.4 放大因子的影响.....	7
<b>5 总结</b> .....	<b>8</b>
<b>6 参考资料</b> .....	<b>8</b>

**商标**

LaunchPad™ is a trademark of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

现场变送器是各种行业和应用中的基本器件，用于测量、监控和传输远程或恶劣环境中传感器的数据。这些传感器能够便于准确和实时的数据传输，这对于过程控制和安全至关重要。

现场变送器位于偏远或难以到达的区域，例如石油钻机、管道、化工厂或环境监测点。现场变送器可监测和控制流程和系统，无需频繁进行人工干预。

对于实时数据传输，现场变送器提供了不同的模拟和数字接口。典型的模拟输出接口包括双线、环路供电、4-20mA 电流输出或比例式电压输出。值得注意的是，目前可以使用 IO-Link、SPE、HART 和 APL 等数字接口。

安全认证在化工、发电、石油和天然气等行业中非常普遍，在移动应用中也是如此。通过安全认证的产品或系统，具有高品质和可靠性保证，有助于预防事故、保护环境并挽救生命。

压力传感器是市场上销量最高的传感器之一。由于销量如此之高，有源元件 BOM 的价格目标非常具有挑战性。传感器安装在工艺流程附近或恶劣环境中，并且需要在  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $125^{\circ}\text{C}$  的宽工作温度范围下运行。由于压力变化是动态的，因此标准稳定时间低于 1ms。

需要使用高增益和低噪声 AFE 来实现 0.01% - 0.1% 的准确性，因为压力传感器中通常使用的应变仪（惠斯通电桥）仅提供低于 5mV 满量程范围内的小电压。典型传感器外壳采用 M17 或 M21 螺钉的外形尺寸，这限制了可能的 PCB 尺寸。在合理的面积和成本范围内实现低功耗、高增益前端颇具挑战性，需要合理的集成度。

MSPM0 MCU 凭借丰富灵活的集成式模拟资源，可提供出色的设计来应对这些挑战。利用 ADC、斩波稳定运算放大器和 DAC 等内部外设有助于解决这些技术难题。节 3 介绍了基于 MSPM0 的前端如何克服上述挑战。

## 2 技术

### 2.1 MSPM0 中的模拟外设

MSPM0 微控制器具有丰富的模拟资源。包含的外设包括：

- 12 位 4MSPS
- ADC
- 多达两个具有可编程增益设置的斩波稳定型运算放大器
- 一个具有 1MSPS 的 12 位 DAC
- 内部电压基准

除了标称 12 位分辨率外，MSPM0 ADC 还可以在硬件中对结果求平均值。这种均值计算的实现方法是在结果寄存器中累加最多 64 个采样值，然后将它们右移以计算这些值的平均值。从数学角度来看，此功能可使 ADC 达到 14 位的分辨率。此场景中的最大有效采样速率为 62.5kSPS (250kSPS 除以 8)。这种均值计算由包含一个特殊斩波模式的斩波稳定型 OPA 提供支持，用以协助对信号进行过采样和均值计算。

斩波将 OPA 的漂移降低至  $0.5\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ 。OPA 提供高达 32 的增益系数，两个内部 OPA 可级联以创建可直接连接到 ADC 输入的差分放大器。内部电压基准可配置为 1.4V 或 2.5V，并为模拟外设提供 200ppm/ $^{\circ}\text{C}$  的精度。这些元件创建了一种设置，可以使用具有成本效益的 MSPM0 MCU 和极少外部元件检测几毫伏范围的信号。

这些元件的电流消耗非常适合低功耗应用。完整的应用包括一个 ADC 和两个 OPA，而内部基准和 DAC 仅消耗 770uA 电流（加上控制器内核在 4MHz 时的功耗）。

### 2.2 仪表放大器 - INA350

INA350 是一款具有成本优势的可选增益仪表放大器，可提供四种增益选项并采用小型封装（X2QFN10 采用  $1.50\text{mm} \times 2.00\text{mm}$  封装）。INA350ABS 具有 10 或 20 的增益选项，INA350CDS 具有 30 或 50 的增益选项。可以通过切换增益选择 (GS) 引脚来选择这些增益选项。INA350 是桥式检测以及差分至单端转换应用的理想选择。

该器件直接连接到低速 10 位至 14 位 ADC，非常适合替换使用普通放大器和分立式电阻器构建的仪表放大器的分立式实施。INA350 在所有增益选项中实现了 85dB 的最小 CMRR 和 0.6% 的最大增益误差，以及 1.2mV 的最大失调电压，而仅消耗 125 $\mu\text{A}$  的最大静态电流。此器件有一个集成关断选项，可在电池或环路供电应用中进一步节省电能，从而在空闲时关闭放大器。

对于性能要求较高的传感器，**INA333** 是一款具有出色精度的低功耗（通常为  $50\mu\text{A}$ ）的零漂移仪表放大器。零漂移斩波电路可消除  $1/f$  噪声，并在温度范围内提供超低的失调电压和漂移，因此 **INA333** 非常适合直流和低频高增益应用。可通过单个外部电阻器在 1 到 10,000 范围内设置任意增益。**INA333** 经过激光修整，具有非常高的共模抑制（ $G \geq 100$  时为 100dB）。

### 2.3 电压基准 - REF2925

**REF29xx** 是采用微型 3 引脚 SOT-23 封装的精密、低功耗、低压降电压基准产品系列。**REF29xx** 的小尺寸和低功耗（最大  $50\mu\text{A}$ ）非常适合便携式和传感器应用。**REF29xx** 在任何容性负载下都很稳定，并且不需要负载电容器。**REF29xx** 可在 1mV 输出电压范围内的电源条件下空载运行。所有型号的额定宽工作温度范围均为  $-40^\circ\text{C}$  至  $125^\circ\text{C}$ 。

### 2.4 低压降稳压器 - TPS7B6933-Q1

**TPS7B6933-Q1** 器件是一款低压降线性稳压器，专为输入电压高达 40V 的应用而设计。该器件采用微型 5 引脚 SOT-23 封装。该器件非常适合轻负载条件下仅具有  $15\mu\text{A}$ （典型值）静态电流的传感器应用。该设计具有集成短路保护和过流保护功能。工作温度范围为  $-40^\circ\text{C}$  至  $125^\circ\text{C}$ 。

## 3 信号链

本节介绍如何利用 **MSPM0** 微控制器系列功能强大的模拟外设来应对压力变送器设计和其他高增益传感器接口的挑战。为了放大传感器的几毫伏信号，为 ADC 提供满量程输入，因此有必要显著放大信号。单靠 **MSPM0** 的内部运算放大器无法实现这种放大。因此，将具有 50 倍放大系数的 **INA350** 仪表放大器用作信号链的第一级。以下放大由 **MSPM0** 的内部斩波稳定 **OPA** 处理，该 **OPA** 在内部连接到 **MSPM0** 的 ADC。因此，内部 **OPA** 允许在 50 倍（缓冲器配置中的 **OPA** 无放大）和 1600 倍（内部 **OPA** 设置为 32 倍放大）之间灵活放大。图 3-1 中直观显示了信号链。

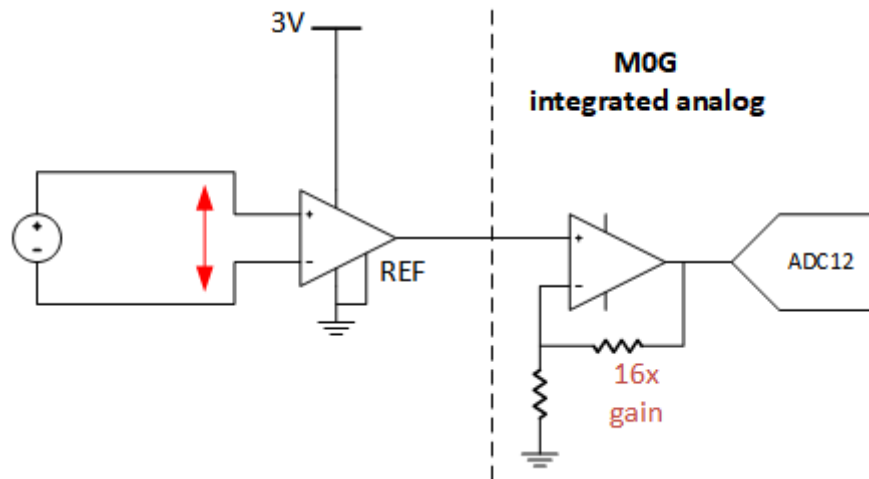


图 3-1. 使用 **INA350** 和 **MSPM0** 内部 **OPA** 的信号链

**ADC** 在过采样模式下使用，可通过利用硬件辅助取平均值功能来提高有效分辨率。**ADC** 配置为在结果缓冲区中聚合 64 个样本，然后将结果除以系数 8，这是通过在硬件中右移 3 位来完成的。此配置直接在 **SysConfig** 工具中完成，如图 3-2 所示。样本的总转换时间是每个样本的采样时间和转换时间的 64 倍，因为 **SysConfig** 中配置的采样时间始终等于一个样本。转换时间取决于 **ADC** 的时钟源。当考虑方程式 1 时，聚合 64 个样本并将所得的总和除以 8 会使 **ADC** 的标称分辨率增加 3 位。

$$\text{additional bits} = \sqrt{\log_2(n)} \quad \text{With } n \text{ being the oversampling factor} \quad (1)$$

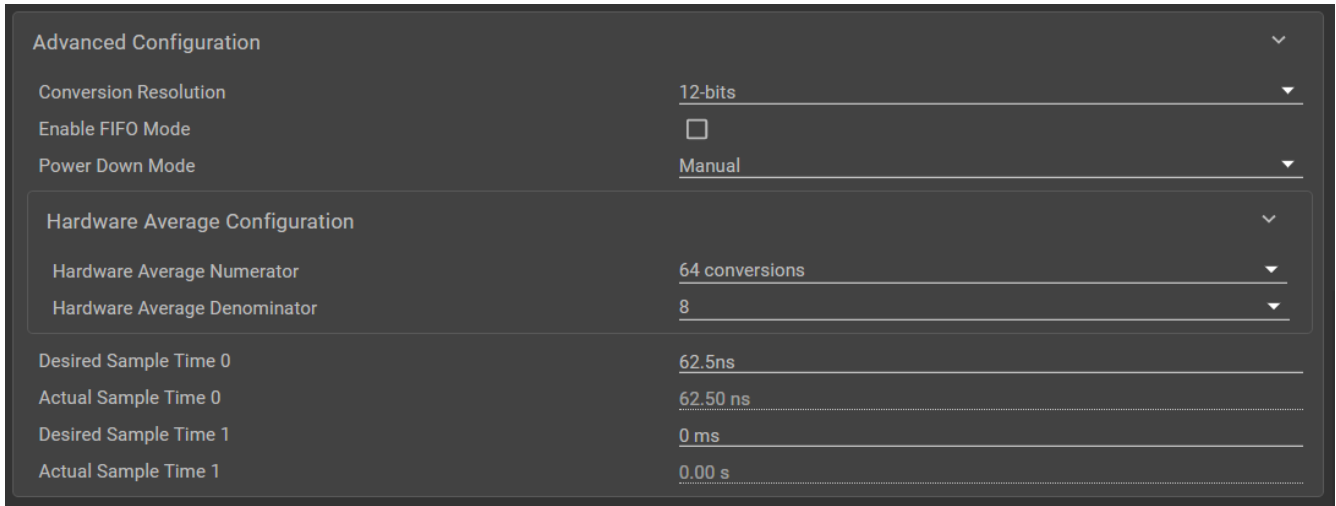


图 3-2. 用于过采样的 SysConfig ADC 配置设置

根据特定应用的尺寸和分辨率要求，此设置提供了使用 MSPM0 的内部基准电压生成或外部电压基准的灵活性。

节 4 中所述的测试结果是使用 [LP-MSPM0G3507 LaunchPad™ 开发套件](#) 和成本优化型 REF29x 电压基准执行的，该电压基准为 MSPM0G3507 输出 2.5V 电压，为 INA350 输出 2.5V 电压。

图 3-3 显示了双极电桥输入的完整选项。使用单电源信号链处理双极输入需要向输入添加直流偏移，首先是向 INA350 输出添加  $V_{cm}$ 。添加直流偏移后，在进一步放大时，信号链的其余部分需要考虑直流偏移。下一级从简单的增益级转换为差分放大器。

差分放大器使用图 3-3 中所示的两个放大器实现。这种实现方式具有多种优势。首先，差分放大器在正负输入端均提供高阻抗。其次，放大器允许使用缓冲的第二个输入（即  $V_{cm}$ ）作为输出，为 INA350 基准节点供电。OPA 的负输入由内部低分辨率 8 位 DAC 或高分辨率 DAC12（图 3-3）产生。

偏移校准也在图 3-3 中激活。通过测量 ADC12（如果输入为零），然后调整 DAC12 输出，直到 ADC12 读数为零（双极输入由中标度读数表示），即可完成此激活。该偏移校准可补偿整个信号链的组合偏移。

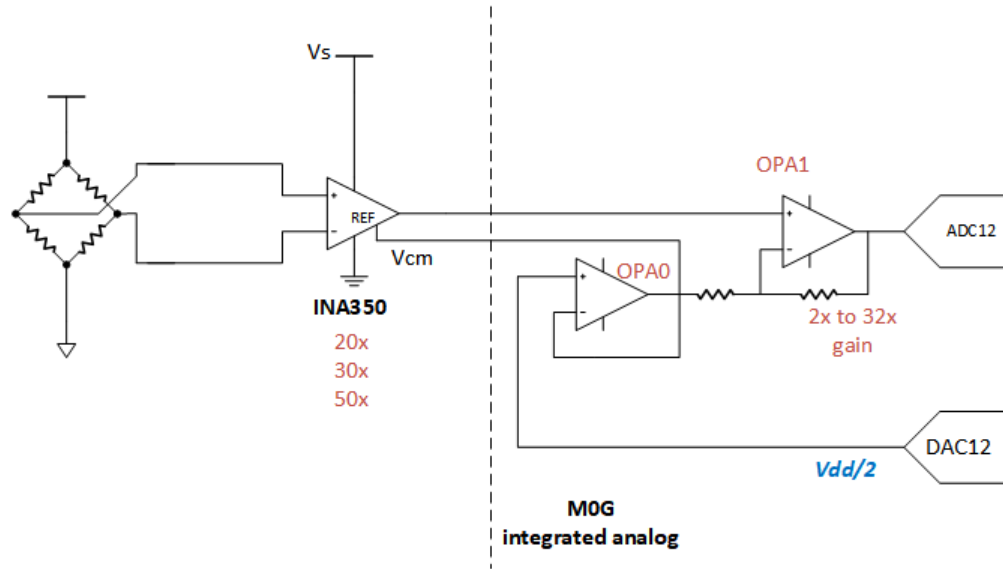


图 3-3. 使用内部 DAC 的双极高增益信号链

## 4 结果

当考虑整个信号链时，多种因素会影响可实现的分辨率。这些因素包括用于捕获信号的采样速率、使用的基准电压、用于放大器的斩波方法以及运算放大器的放大因子。

结果考虑了整个信号链的有效分辨率。在压力传感器的使用情况下，压力变化相对缓慢，因此，为了检测压力变化，可以限制采样速度。结果分析仅限于低于 10kHz 的频率，不考虑较高频信号的谐波和其他失真因素。方程式 2 和方程式 3 用于计算信号链的有效分辨率。

$$\text{ENOBs (DC Input)} = \frac{\mu}{\sigma} \text{ With } \mu = \text{average ADC output code and } \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \mu)^2}{n}} \text{ in LSBs} \quad (2)$$

$$\text{NF bits (for DC input)} = \frac{\mu}{N_{pp}} \text{ With } N_{pp} \text{ being the peak to peak noise in LSBs} \quad (3)$$

测量是对固定数量的样本采样连续信号。通过选择该连续信号的电平，ADC 的输入将始终接近  $V_{REF}$  的满量程。

### 4.1 OPA 斩波模式的影响

MSPM0 的内部 OPA 具有斩波功能，可减少 OPA 的漂移。可对该斩波进行配置以适应不同的用例和信号链。当在过采样和均值计算模式下使用 ADC 时，斩波必须调整为 ADC 辅助斩波模式。这种调整可防止斩波频率干扰 ADC 的均值计算功能。图 4-1 为生成的直方图，显示了一系列值的分布中的两个最大值，其中结合使用了标准斩波模式和 ADC 均值计算。图 4-1 表明信号链的有效分辨率显著降低。

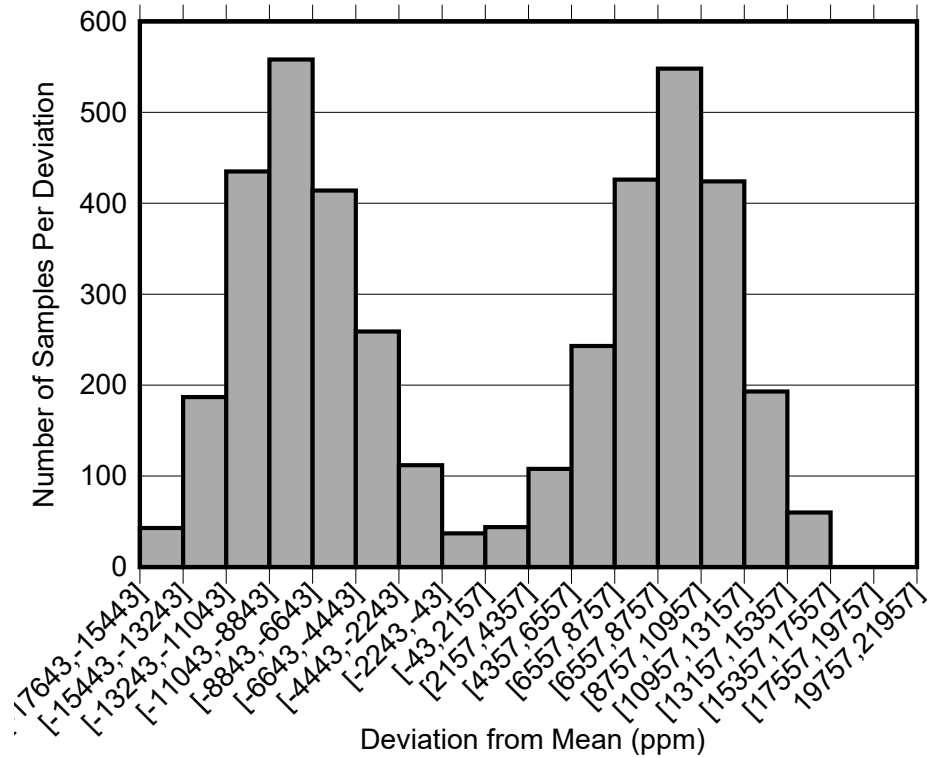


图 4-1. 结合使用 ADC 均值计算和标准斩波时的 ADC 样本直方图

## 4.2 过采样和硬件均值计算

对信号进行过采样，以及使用 MSPM0 的集成硬件均值计算功能来提高 ADC 的标称分辨率，都会对有效分辨率产生很大的影响。将 12 位模式下的独立 ADC 与使用 64 次过采样的 ADC 进行比较时，标称和有效分辨率结果会增加，如表 4-1 所示。表 4-1 中的测量使用 2.5V 的内部基准和接近满量程的输入。值得注意的是，在这两种情况下，标称分辨率和有效分辨率之间都存在显著偏差。但很明显，过采样将有效分辨率提高了近 3 位，这是标称分辨率增加时的预期结果。

表 4-1. 过采样对有效分辨率的影响

ADC 模式	标称分辨率	有效分辨率
标准，无过采样	12 位	8.39 位
64 次过采样	15 位	11.22 位

## 4.3 采样速率对有效分辨率的影响

ADC 的采样速率对整个信号链的有效分辨率有重大影响。由于该测试中使用了过采样和均值计算特性，因此有必要为该评估定义有效采样速率。有效采样速率由方程式 4 定义。

$$\text{effective sampling rate} = \frac{\text{nominal sampling rate}}{\text{aggregated samples}} \quad (4)$$

图 4-2 显示了有效分辨率对有效采样速率的依赖性。该测试通过图 4-2 中所示的完整信号链执行，但恒定增益设置为 2，从而产生总放大系数为 100 的内部 OPA。

图 4-2 表明有效分辨率随着采样速率的降低而提高。图 4-2 在有效采样速率为 1.8kSPS 时得到 12.88 位。将有效采样速率增加到高达 62.5kSPS 会使该配置的有效分辨率保持在 11.14 位。

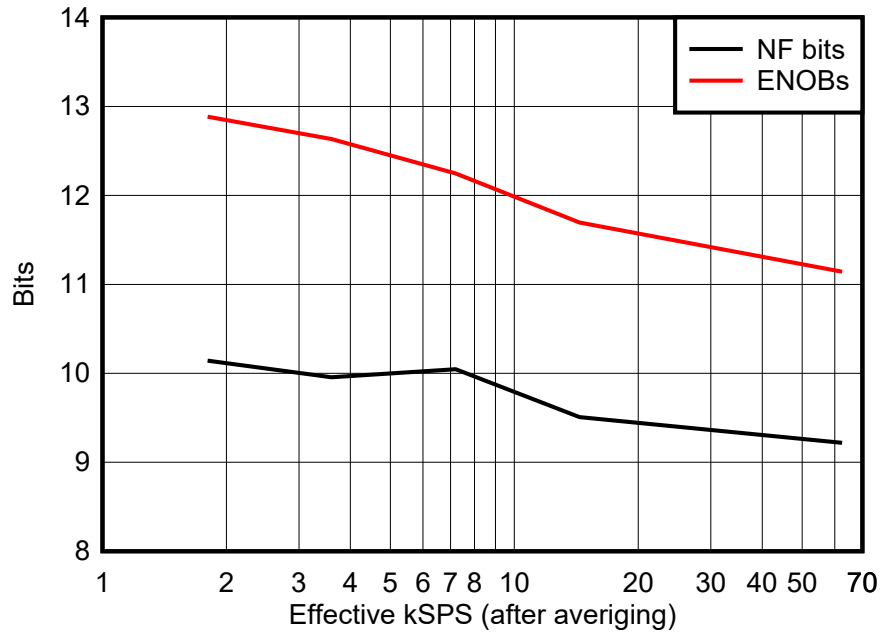


图 4-2. 有效分辨率与有效采样速率 [kSPS]

#### 4.4 放大因子的影响

放大压力变送器或高增益传感器接口的信号会影响信号和噪声，因此，利用信号链可以实现的有效分辨率也会受到影响。检测几毫伏范围内的信号时，信号必须放大多倍，因此必须密切监测放大后引入的噪声。

图 4-3 显示了以 LSB 为单位的噪声以及产生的有效分辨率与 MSPM0 内部 OPA 放大因子的依赖关系。值得注意的是，信号的总放大率是通过将外部 INA350 的放大率与该内部增益系数相乘而计算得出的。测量是采用 64 个样本的均值计算和 62.5kSPS 的有效采样速率进行的。

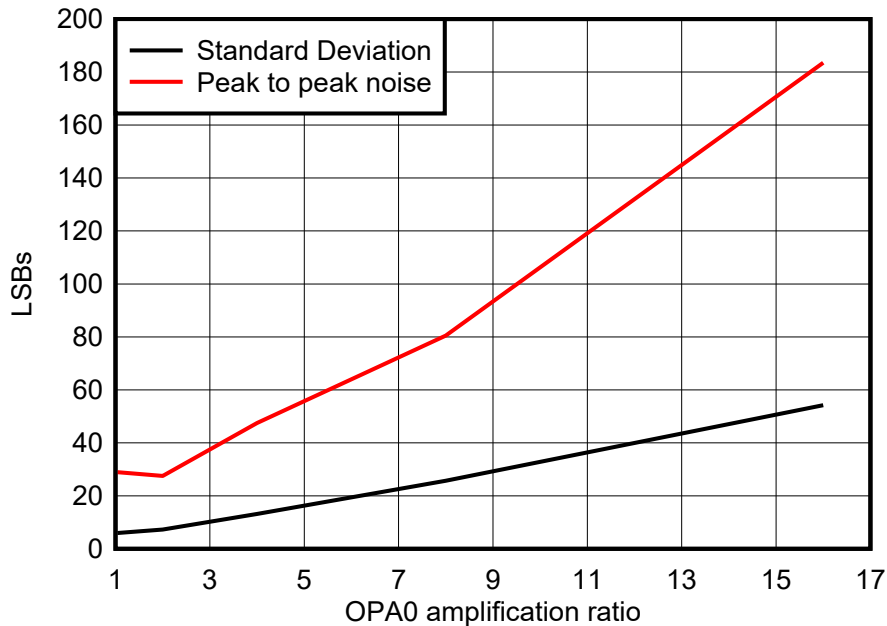


图 4-3. 噪声和有效分辨率与内部 OPA 的放大因子间的关系

如图 4-3 中所示，噪声随放大因子呈线性变化。当使用 16 倍放大因子时，整个信号链可实现的有效分辨率保持在 8.32 位，因此总放大倍数为 800。此分辨率仍可用于检测信号中的突变，并且能够降低有效采样速率以提高有效分辨率，如节 4.3 中所述。

## 5 总结

MSPM0 为许多高销量传感器变送器提供了灵活且实惠的设计。该器件提供了 MCU 设计所需的功能，例如丰富的模拟资源、小型封装以及在整个工业温度范围内运行。高增益前端只需极少的外部元件，例如高增益仪表放大器 INA350 和低功耗电压基准 REF2925。本文重点介绍了性能与成本的注意事项以及实现方式。本节中详述的结果旨在使设计人员能够正确且快速地选择和调整系统配置参数，实现所需的性能。

## 6 参考资料

- 德州仪器 (TI), [Arm®Cortex®-M0+ MCU](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [精密运算放大器 \(Vos<1mV\)](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [高速 ADC \( \$\geq 10\$ MSPS\)](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [精密 DAC \( \$\leq 10\$ MSPS\)](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [MSPM0 外设](#) 视频系列
- 德州仪器 (TI), [在模拟配置中使用缓冲器 OPA](#) 视频系列
- 德州仪器 (TI), [REF29xx 采用 3 引脚 SOT-23 封装的 100ppm/°C、50  \$\mu\$ A、CMOS 电压基准](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [TPS7B69xx-Q1 高电压超低 IQ 低压降稳压器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [INA350 成本和尺寸经优化的低功耗 1.8V 至 5.5V 可选增益仪表放大器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [INA333 低功耗 \(50 \$\mu\$ A\)、零漂移、轨至轨输出仪表放大器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [MSPM0G3507 LaunchPad™ 开发套件 \(LP-MSPM0G3507\)](#) 评估模块
- 德州仪器 (TI), [工业电流输出压力传感器变送器参考设计](#) 工具
- 德州仪器 (TI), [如何为压力变送器应用选择放大器](#) 应用简报



## 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