参考文献

*Design Guide: TIDA-010947*

# *采用 AMR 传感器的高分辨率低延迟紧凑型绝对角度编码器参考设计*

## 说明

此参考设计演示了一种小尺寸单圈磁旋转绝对角度编码器电路设计，该设计采用高精度模拟 AMR 360° 角度传感器，具有正弦和余弦差分比指标模拟输出以及使用霍尔传感器的集成象限检测。Cortex M0 MCU 包含 4MSPS 双采样 12 位 ADC 和在 250kSPS 下高达 14 位的有效分辨率，通过硬件均值计算实现低噪声和低延迟绝对角度计算，以及用于高速数据传输的 4Mbaud UART。绝对编码器需要 5V 输入电源电压（容差为 ±10%），并使用半双工 RS-485 收发器提供双向通信接口。

## 资源

| | |
|---|---|
| TIDA-010947 | 设计文件夹 |
| TMAG6180 | 产品文件夹 |
| MSPM0G3507 | 产品文件夹 |
| THVD1454 | 产品文件夹 |
| REF3533、TPS7A0533 | 产品文件夹 |

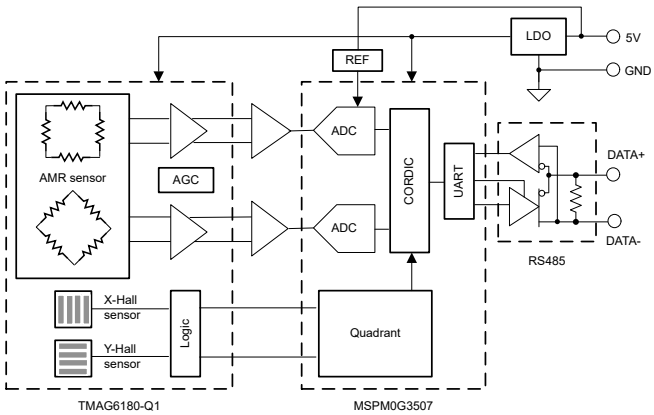
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

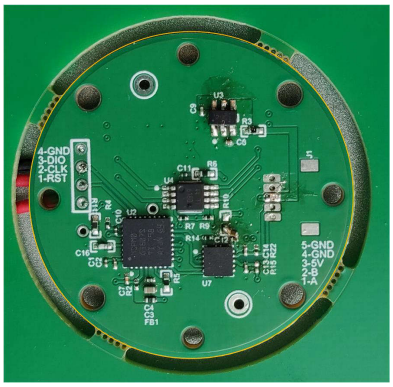
## 特性

- 低噪声绝对旋转角度优于 15ENOB，角度精度误差小于 0.05° (25°C 时)，具有 16µs 的低延迟
- 小型 IC 封装可实现直径为 30mm 的紧凑型圆形 PCB
- AMR 传感器和集成霍尔传感器（用于象限检测）可实现完整的 360° 测量并减少 BOM 数量
- 20mT 至 1T 的宽工作磁场范围可实现灵活的机械放置
- 具有集成双 12 位 ADC（高达 128 次过采样）的 MCU 和数学加速器有助于提高效率并降低系统成本
- 采用 VSON-10 封装且具有集成式 120Ω 可切换终端的 RS485 收发器有助于缩减 BOM 和节省空间

## 应用

- 伺服驱动器位置传感器
- 位置传感器
- 牵引逆变器位置传感器





English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 1 系统说明

单圈或多圈绝对旋转角度编码器用于许多应用，例如需要绝对机械角度位置的伺服驱动器和机器人。绝对编码器通常提供串行单向或双向半双工或全双工 RS485 接口，采用特定于供应商的协议或开放式编码器协议。

此参考设计演示了采用同轴感应的小型绝对单圈磁性旋转角度编码器电路设计，如图 1-1 所示。圆盘磁体安装在编码器旋转轴的末端。带有 TMAG6180-Q1 高精度模拟 AMR 360° 角度传感器的静态 PCB 采用同轴安装，从 AMR 传感器封装顶部到圆盘磁体之间存在可配置的空气间隙。有效空气间隙包括 IC 封装内 AMR 和霍尔传感器的位置。X 轴和 Y 轴上集成了两个独立的霍尔传感器输出，可用于以机械方式将传感器的角度范围扩展到 360°。

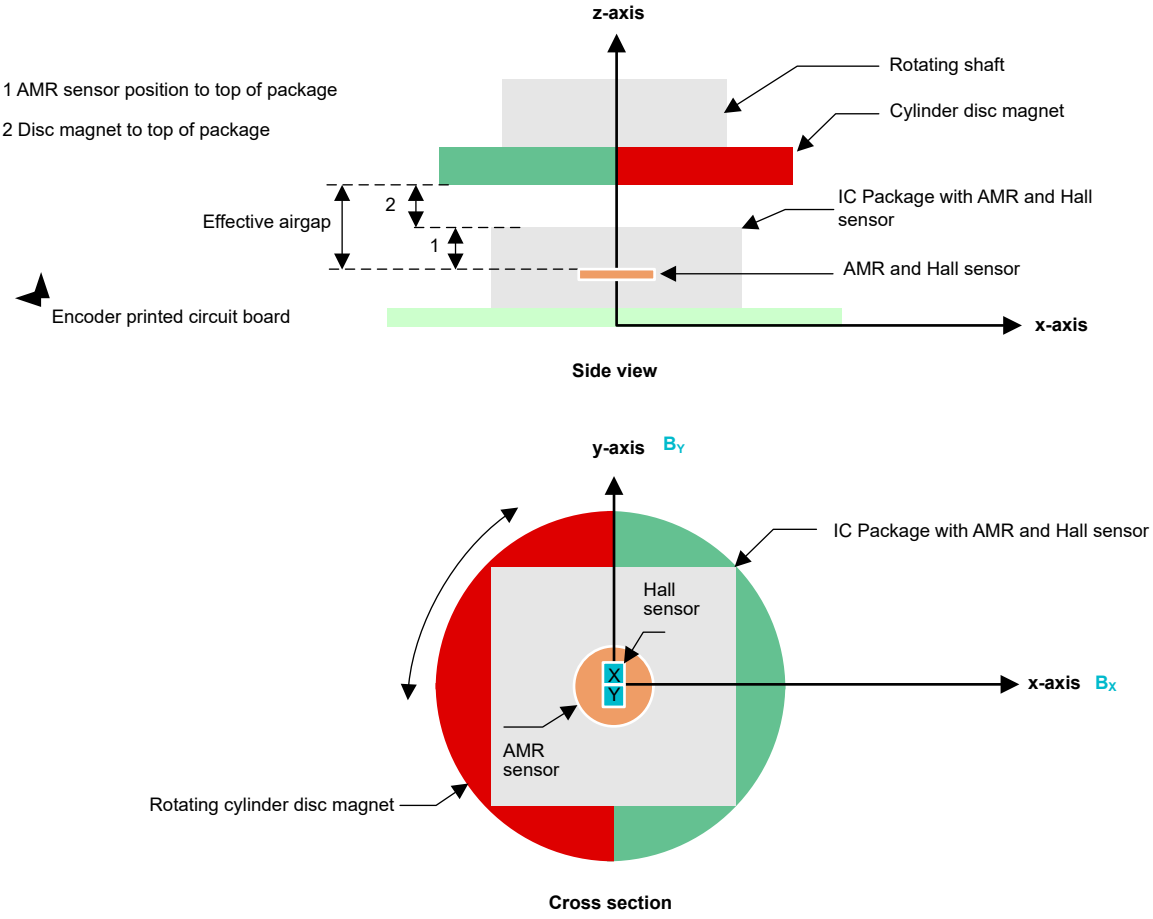



**图 1-1. 同轴磁角感应原理**

TMAG6180-Q1 具有集成信号调节放大器，并提供与所施加平面磁场的方向相关的差分正弦和余弦模拟输出。

Cortex M0 MCU MSPM0G3507 具有 4MSPS 双采样 12 位 ADC 和多达 128 次硬件均值计算功能，支持低噪声和低延迟绝对角度计算，并具有 4Mbaud UART 以实现高速旋转角度数据传输。绝对编码器电路设计使用半双工 RS-485 收发器提供双向接口，该收发器在小型 10-VSON 封装中集成了 120 Ω 可切换终端。需要一个容差为 ±10% 的 5V 电源来为绝对编码器电路供电。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

## 1.1 主要系统规格

表 1-1 中提供了采用 AMR 传感器的 TIDA-010947 高分辨率低延迟紧凑型绝对角度编码器参考设计的主要规格。

**表 1-1. 主要设计规格**

| 参数 | 值（典型） | 备注 |
|---|---|---|
| 功能 | 单圈磁性绝对角度编码器 | |
| 传感器类型 | TMAG6180-Q1 高精度模拟 AMR 360° 角度传感器 | 同轴感应 |
| 磁体 | 13mm 直径，1mm 厚，钕磁体 N52，Br = 1455 | 安装在轴端，用于同轴感应 |
| 磁体-传感器放置 | 轴端 | |
| 空气间隙 | 0.8mm | 可配置 |
| 25°C 时的角度精度误差 | ≤0.05° | 25°C 时校准的偏移和增益误差 |
| 角度标准差 | ≤0.0033° | |
| 角度分辨率（标准差） | 15.4 有效位数 (ENOB) | |
| 角度分辨率（数值） | 32 位 (IQ21) | 定制，MSPM0G3507 上特定 |
| 64 次过采样时的角度传播延迟（延迟） | 16 µs | x 和 y 方向磁场强度有效采样点到所计算角度之间的时间 |
| 有效角度采样率 | 32kHz | |
| 运行速度 | ≤100000rpm | 未经过测试 |
| 模数转换器 | 双 12 位 ADC（64 次硬件均值计算） | 集成到 MSPM0G3507，ADC 过采样可配置为多达 128 次 |
| 模数转换器过采样率 | 2.85MSPS（250ns 采样时间，100ns 转换时间） | 可配置采样时间，最短 150ns |
| 连接器 | 5 引脚，1mm 连接器 | 请参阅**表 4-1** |
| 接口 | RS485 | 具有集成式 120Ω 可切换终端的 THVD1454 半双工收发器 |
| 电源电压 | 5V ±10% | |
| 电源电流消耗 | 54mA | 16kHz T-format 命令频率下的平均电流 |
| 工作温度范围 | -40°C 至 125°C | 在 25°C 环境温度下测试的参考设计 |
| PCB 直径 | 30mm | |
| PCB 层 | 4 | |


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 2 系统概述

## 2.1 方框图

图 2-1 显示了本参考设计的方框图。

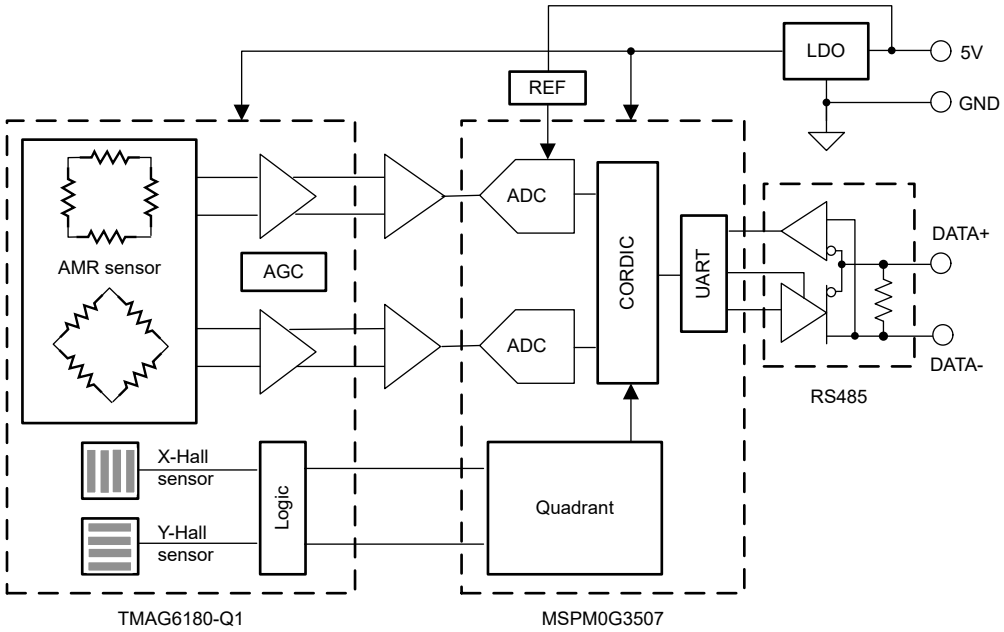



**图 2-1. 系统方框图**

## 2.2 设计注意事项

磁性编码器具有宽工作温度范围（高达 125°C 环境温度）以及抗冲击和振动的稳健性，因此在恶劣的工业应用中很受欢迎。

磁性传感器可以是霍尔效应传感器，也可以是磁阻传感器，例如各向异性磁阻 (AMR) 传感器，其噪声通常低于霍尔效应传感器。然而，磁阻传感器虽然可以测量磁场幅度，但无法检测方向。因此，需要额外的传感器（如数字霍尔开关）将测量范围扩展到 360°。

对于磁体安装在轴端的电机集成编码器应用，两个 ARM 传感器相互旋转 45° 的同轴感应结构设计精良。

电信号链偏移和增益不匹配以及模数转换器的采样率、速度和分辨率会影响所测绝对角度的精度，温漂超低的元件有助于减小角度误差。要从正弦和余弦传感器信号中对角度进行解码，需要使用除法、乘法、累加和反正切等数学函数。

具有高集成度和低功耗的小尺寸电路对于设计直径小于 30mm 的超小型圆形 PCB 至关重要。由于编码器可以集成电机，因此通常要求环境工作温度至少达到 125°C。

绝对编码器 RS485 通信接口需要设计为具有高 EMC 抗扰度，以更大限度地减少数据传输期间的位错误。


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

## 2.3 主要产品

### 2.3.1 TMAG6180-Q1

TMAG6180-Q1 是一款基于各向异性磁阻 (AMR) 技术的高精度角度传感器。该器件集成信号调节放大器，并提供与所施加平面磁场的方向相关的差分正弦和余弦模拟输出。该器件还在 X 轴和 Y 轴上具有两个独立的霍尔传感器输出，可用于将传感器的角度范围扩展到 360°。该设计的主要特性包括：

- 超低延迟 (< 2 µ s) 高速 AMR 角度传感器
- 具有低角度漂移，无需在整个温度范围内进行校准
- 正弦和余弦差分比指标模拟输出支持差分端或单端应用
- 宽工作磁场范围：20mT 至 1T
- 使用霍尔传感器的集成象限检测
- 温度范围：–40°C 至 150°C

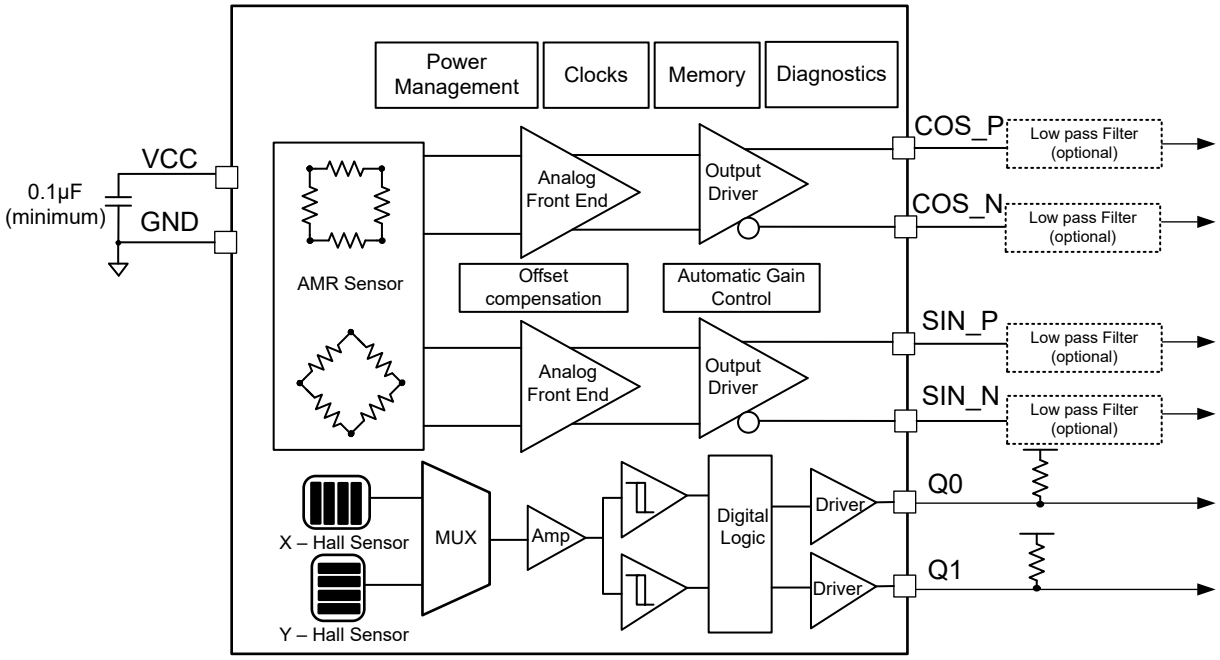



**图 2-2. TMAG6180 功能方框图**

### 2.3.2 MSPM0G3507

MSPM0G350x 微控制器 (MCU) 属于 MSP 高度集成的超低功耗 32 位 MCU 系列，该 MCU 系列基于增强型 Arm ™ Cortex®-M0+ 32 位内核平台，工作频率最高可达 80MHz。这些低成本 MCU 提供高性能模拟外设集成，支持 -40°C 至 125°C 的工作温度范围，并在 1.62V 至 3.6V 的电源电压下运行。此设计采用的 MSPM0G350x MCU 的主要特性包括：

- 两个具有总计多达 17 个外部通道的 12 位 4Msps 同步采样模数转换器 (ADC)
- 通过硬件均值计算可在 250ksps 下实现 14 位有效分辨率
- 经优化的低功耗模式
  - 运行：96µA/MHz (CoreMark)
  - 待机：1.5µA，具有 RTC 和 SRAM 保留功能
- 数学加速器支持 DIV、SQRT、MAC 和 TRIG 计算

### 2.3.3 THVD1454

THVD1454 是一款适用于工业应用的半双工 RS-485 收发器。该器件具有片上 120Ω 端接电阻器和驱动器输出压摆率控制等特性。该设计的主要特性包括：

- 总线引脚之间的引脚控制片上 120Ω 端接电阻器



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

- 可配置的最大数据速率 – SLR = 高电平：500kbps – SLR = 低电平或悬空：20Mbps
- 总线 I/O 保护
  - ±16kV HBM ESD
  - ±8kV IEC 61000-4-2 接触放电，±15kV IEC 61000-4-2 空气间隙放电
  - ±4kV IEC 61000-4-4 快速瞬态突发
  - ±16V 总线故障保护（总线引脚上的绝对最大电压）
- 工业级工作温度范围：-40°C 至 125°C



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 3 系统设计原理

## 3.1 硬件设计

### *3.1.1 角度传感器原理图设计*

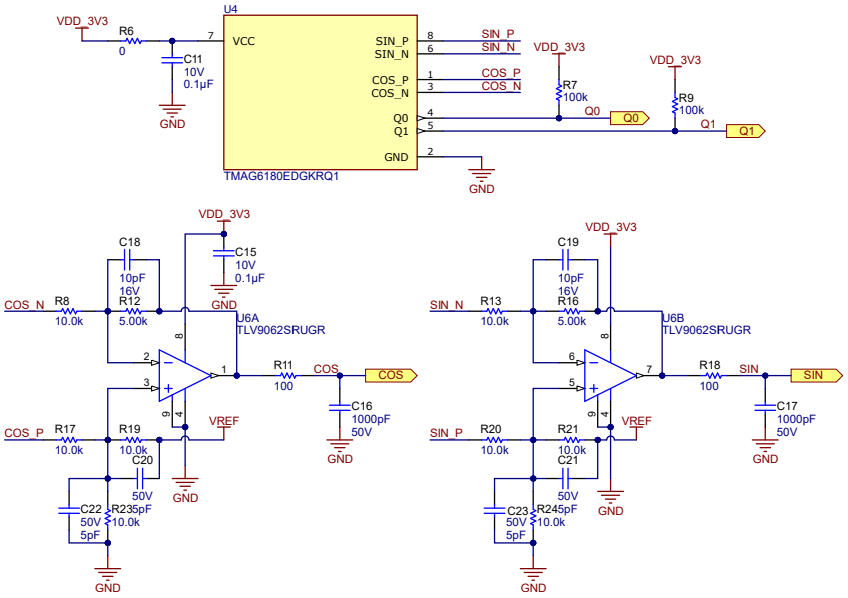



**图 3-1. AMR 传感器 TMAG6180 原理图**

在靠近 TMAG6180 VCC 和 GND 引脚的位置添加了一个 100nF 去耦电容器 C11。Q0 和 Q1 是开漏输出，100k 上拉电阻器 R7 和 R9 连接到 3.3V 电源轨。

TLV9062 是可选器件，用于将 TMAG6180-Q1 差分模拟输出 SIN_P 和 SIN_N 以及 COS_P 和 COS_N 转换为单端信号，以连接到 MSPM0G3507 ADC。通过安装 R8、R11、R12、R13、R16、R18 作为 0Ω 电阻器，可以绕过 TLV9062。为确保 VCC 处的电源电压稳定，将 C15 (100nF) 放置在 VCC 和 GND 之间。

TLV9062 的差分增益可以通过方程式 1 来计算。

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_{12}}{R_8} = \frac{R_{19} \parallel R_{23}}{R_{17}} = \frac{1}{2} \tag{1}$$

选择单位增益并使 R8 等于 10kΩ，因此 R17 和 R20 需要等于 10kΩ，R12 需要等于 5kΩ。

添加 C18 以滤除高频噪声。带宽 (BW) 可以使用方程式 2 来计算。

$$BW = \frac{1}{2\pi C_{18} R_{12}} = \frac{1}{2\pi (C_{20} \parallel C_{22})(R_{19} \parallel R_{23})} \tag{2}$$

选择 3MHz 带宽时，C18 和 C19 需要等于 10pF。C20 和 C23 需要等于 C18 的一半，即 5pF。


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

### 3.1.2 MSPM0G3507 原理图设计

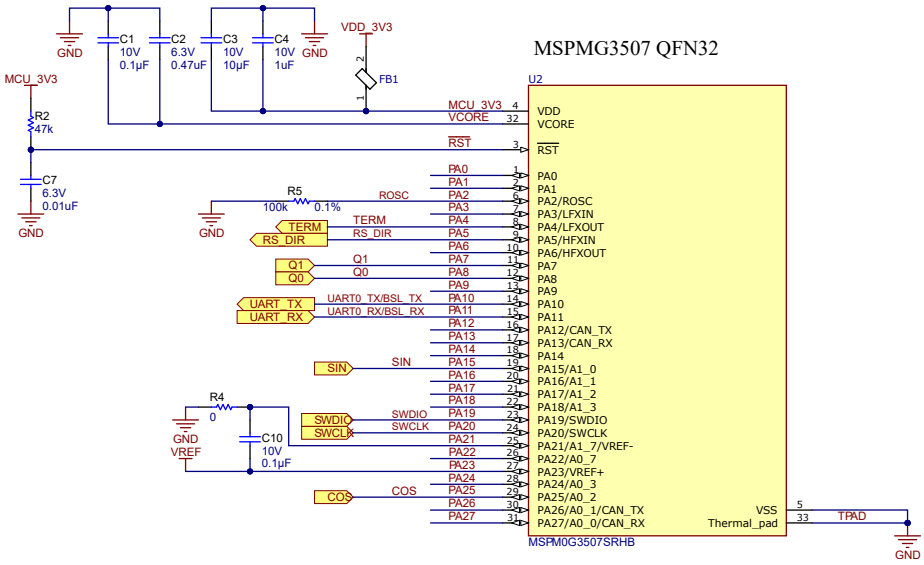



**图 3-2. MSPM0G3507 原理图**

陶瓷去耦电容器 C3 (10µF) 和 C4 (1µF) 跨接在 VDD 和 VSS 引脚上，C1 (100nF) 和 C2 (0.47µF) 跨接在 VCORE 和 VSS 引脚上。在 VDD 和 3.3V 电源轨之间添加了一个铁氧体磁珠 FB1，以避免高频数字电流影响模拟信号链。

nRST 复位引脚通过 47kΩ 电阻器 R2 和 10nF 下拉电容器 C7 上拉至 VDD。SYSOSC 频率校正环路 (FCL) 电路在 ROSC 引脚和 VSS 之间安装了容差为 0.1% 的 100kΩ 外部电阻器 R5。

MSPM0G3507 接受外部基准，以进一步提高集成 ADC 的精度。此设计采用外部 3.3V 基准 REF3533，并将其连接到 MSPM0G3507 VREF+ 和 VREF- 引脚。在 VREF+ 和 VREF- 上跨接一个 100nF 去耦电容器 (C10)。

### 3.1.3 RS485 收发器原理图设计

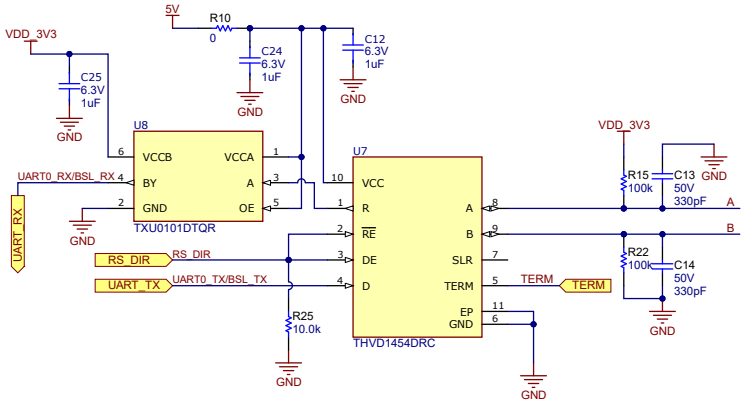



**图 3-3. THVD1454 原理图**

为避免 RS485 收发器的开关噪声影响为 TMAG6180 供电的 3.3V 电源轨，使用单独的 5V 电源为 THVD1454 供电。为确保在所有数据速率和电源电压下可靠运行，应使用 1µF 陶瓷电容器 (C12) 对 VCC 电源进行去耦，该电容器的位置应尽可能靠近电源引脚。此参考设计还使用电平转换器 TXU0101 将 THVD1454 R 引脚上的 5V 信号转换为 3.3V 信号，以便与 MSPM0 GPIO 输入电压范围兼容。

DE 和 /RE 引脚是 THVD1454 的方向控制引脚，因为 THVD1454 在半双工模式下工作。DE 和 /RE 引脚连接在一起。添加了下拉电阻器 R25 (10kΩ)，以确保 THVD1454 默认在接收模式下工作。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

THVD1454 集成了一个由 TERM 引脚控制的 120Ω 端子电阻器。TERM 引脚连接到 MSPM0 GPIO PA4，以通过 MSPM0 软件启用内部端子电阻器。

100kΩ 上拉电阻器 R15 和下拉电阻器 R22 分别连接至 A 和 B。这些电阻器可限制进入收发器的剩余钳位电流并防止收发器锁存。

### *3.1.4 电源和基准电压*

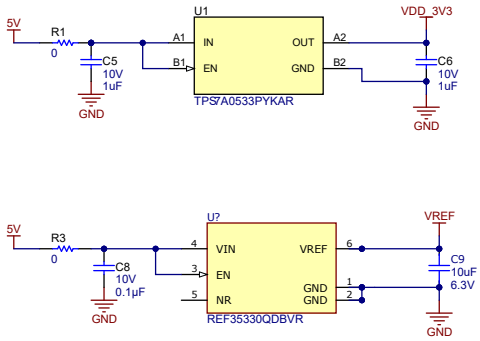



**图 3-4. 电源原理图**

本设计使用 TPS7A0533 和 REF3533 为电路板上的器件供电。对于 TPS7A0533，该器件接受高达 5.5V 的输入电压并为 TMAG6180、TLV9062、MSPM0G3507 和 THVD1454 电源生成 3.3V 电源轨。使用两个并联电容器 C5 (1µF) 进行噪声去耦，使用一个输出电容器 C6 (10µF) 更大限度地减少输出电压纹波。

对于 REF3533，该器件由外部 5V 电源供电并生成精确的 3.3V 输出作为 MSPM0 ADC 的基准。与 TPS7A0533 类似，C8 (100nF) 用于去耦。C9 (1µF) 用于更大限度地减少输出电压纹波。

## 3.2 软件设计

为了验证此参考设计，我们使用适用于 M0 MCU 的 MSPM0 软件开发套件开发了一款 TI 内部测试软件，用于 MSPM0G3507。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

### 3.2.1 角度计算时序

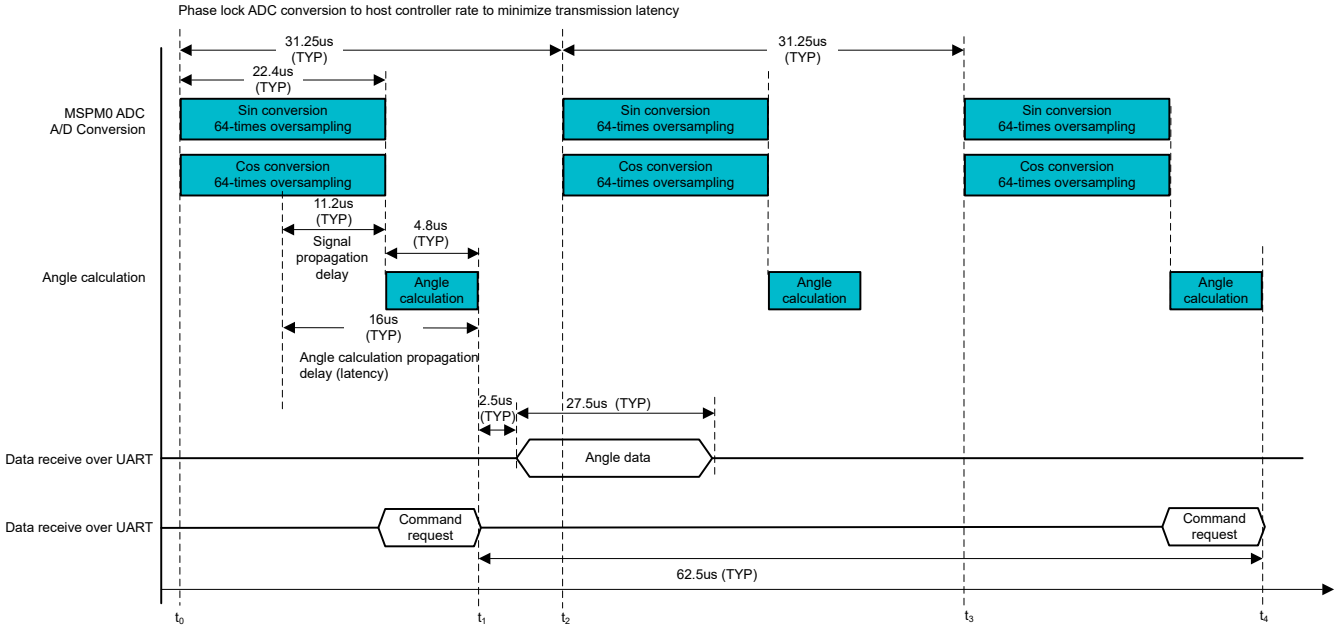



**图 3-5. MSPM0G3507 时序图**

在此参考设计中，MSPM0G3507 集成了双 ADC，用于转换 TMAG6180 的正弦和余弦输出信号。MSPM0G3507 中的 ADC 配置为 64 次硬件均值计算，并由内部 32kHz Timer0 同时定期触发。ADC 转换结束会触发中断，此时将读取两个 ADC 转换结果以及霍尔锁存器 Q0 和 Q1 的状态，并计算绝对角度。

当主机控制器发送命令请求以获取位置数据时，控制器会在 MSPM0 中触发 UART 中断。然后，发送数据将存储到一个阵列中，DMA 控制器启动向主机控制器的 UART 传输。

Timer0 中断会锁相到主机控制器中的编码器读取命令频率，以便更大限度地减少角度传输延迟和抖动。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

### 3.2.2 旋转角度计算

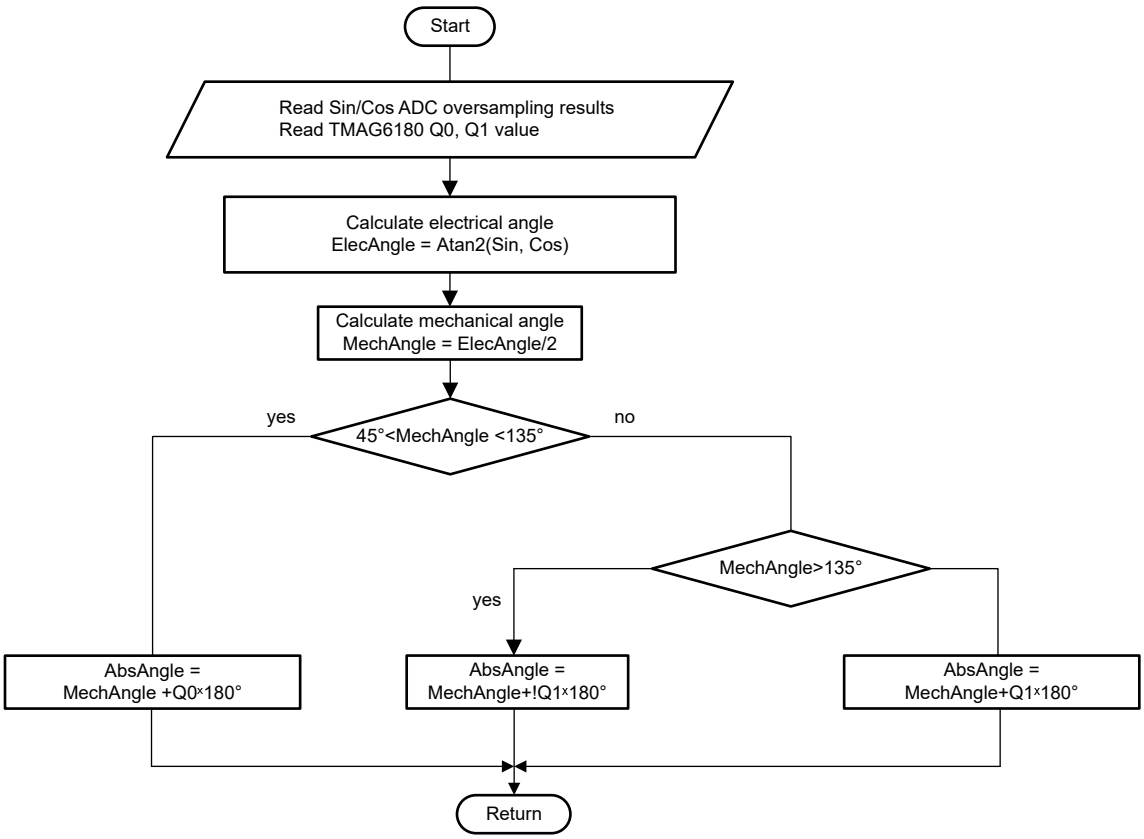



**图 3-6. 角度计算流程图**

由于 AMR 传感器在机械旋转一周过程中会生成两个正弦和余弦周期，需要额外的检测来区分 0° 至 180° 和 180° 至 360°。因此，TMAG6180 集成了两个 X、Y 霍尔开关，这有助于使用 Q0 和 Q1 输出将角度范围从 180° 扩展到 360°。角度计算流程图如图 3-6 所示，示例代码如下：

```
//---------------------------------------------------------------------------
//Angle calculation
//---------------------------------------------------------------------------
//comp0[0] = _IQ(0)
//comp0[1] = _IQ(1)
//comp1[0] = _IQ(1)
//comp1[1] = _IQ(0)
//---------------------------------------------------------------------------
    SinCosInput.SinCos.Sin = SinCosInput.SinCos.Sin - Adc16bitOffset;
    SinCosInput.SinCos.Cos = SinCosInput.SinCos.Cos - Adc16bitOffset;
//ATAN2 calculation
    DL_MathACL_startArcTan2Operation(MATHACL, &gAtanOpConfig, SinCosInput.SinCos.Sin,
SinCosInput.SinCos.Cos);
    DL_MathACL_waitForOperation(MATHACL);
    SinCosOutput.PhasePU = DL_MathACL_getResultOne(MATHACL);
    angle = _IQ(0.25) - (SinCosOutput.PhasePU>>1);
// Extend to 360 deg. 90 degree ~ 0.25, 45 degree ~ 0.125, 135 ~ 0.375
    if((angle <= _IQ(0.375)) && (angle>_IQ(0.125)))
        absangle=comp0[TMAG_Q0]+angle;
    else
    {
          if (angle>_IQ(0.375))
              absangle=comp1[TMAG_Q1]+angle;
          else
              absangle=_IQ(0.5)-comp1[TMAG_Q1]+angle;
    }
```


English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

### 3.2.3 旋转角度误差源和补偿

为了准确测量角度，磁体的中心需要以可接受的容差与传感器的中心对齐。按照以下步骤校准传感器，以获得理想精度：

- 根据磁体与传感器的对齐情况设置参考角。该误差可以保存在微控制器中，用于运行时的绝对位置计算。该误差在系统中也称为角度偏移。
- 电偏移校准，有关偏移校准步骤，请参阅 *AMR 角度传感器校准*。如果传感器无法在整个范围内旋转，则无法校准电偏移。
- 振幅不匹配校准，有关振幅不匹配校准步骤，请参阅 *AMR 角度传感器校准*。如果传感器无法在整个范围内旋转，则无法校准振幅不匹配。

其他误差源包括传感器信号链的非线性（如 3 次谐波）以及通过将参考角编码器与绝对磁性编码器轴耦合而产生的机械误差。图 3-7 至图 3-10 概述了误差源及其对角度误差的影响，以便了解和补偿这些类型的误差。

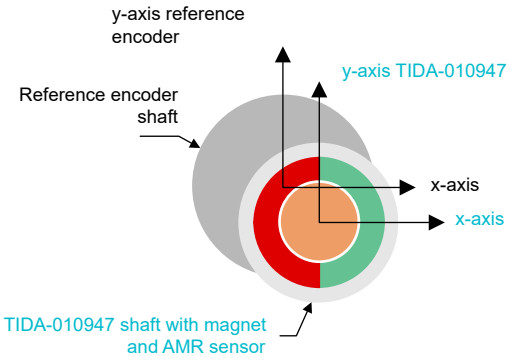



图 3-7. 联轴器机械位移

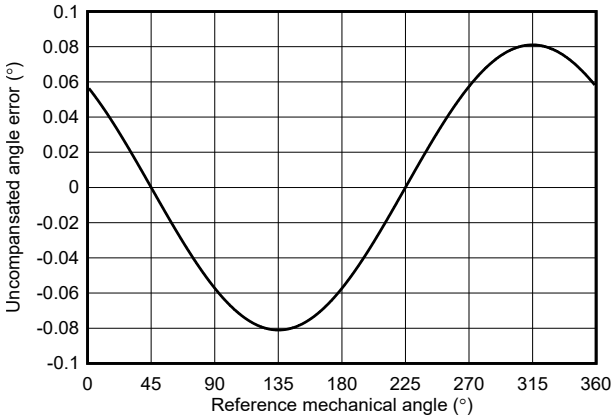



图 3-8. 联轴器位移导致的角度误差示例

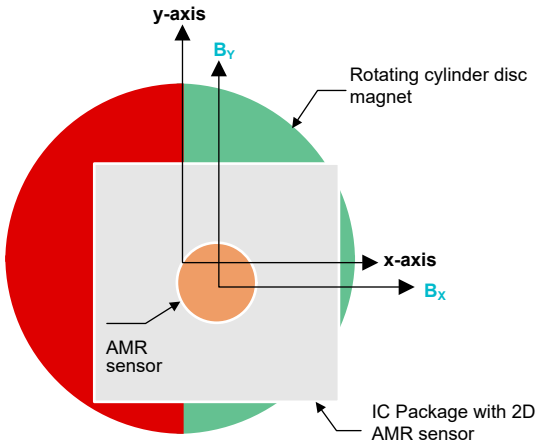



图 3-9. AMR 传感器位移

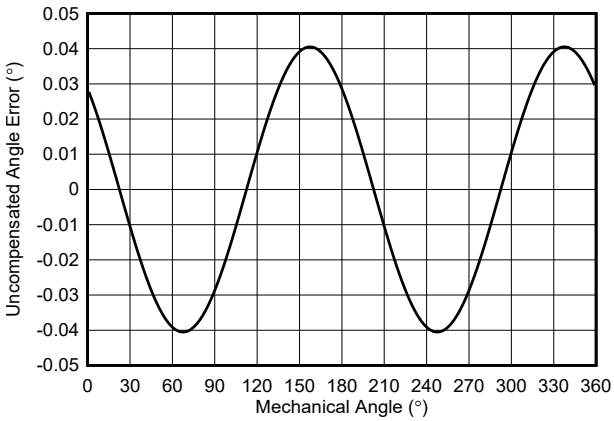



图 3-10. AMR 传感器位移导致的角度误差示例

传感器信号链的电偏移、增益不匹配和非线性（3 次谐波）会影响角度误差，示例如图 3-11 至图 3-13 所示。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

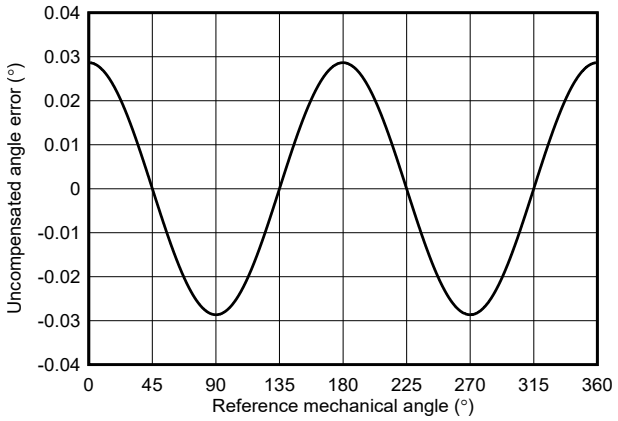



图 3-11. AMR 正弦/余弦信号链偏移 (0.1%) 导致的角度误差示例

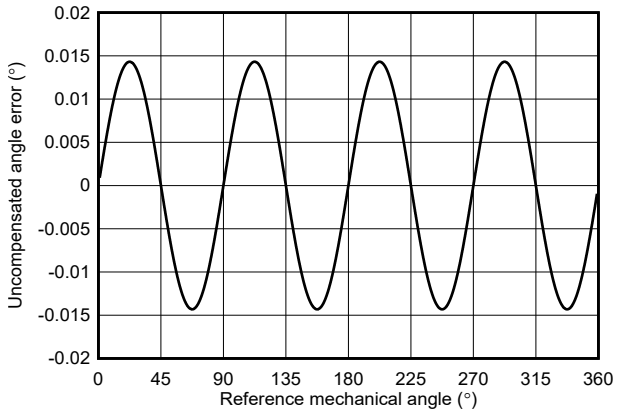



图 3-12. AMR 正弦/余弦信号增益不匹配 (0.1%) 导致的角度误差示例

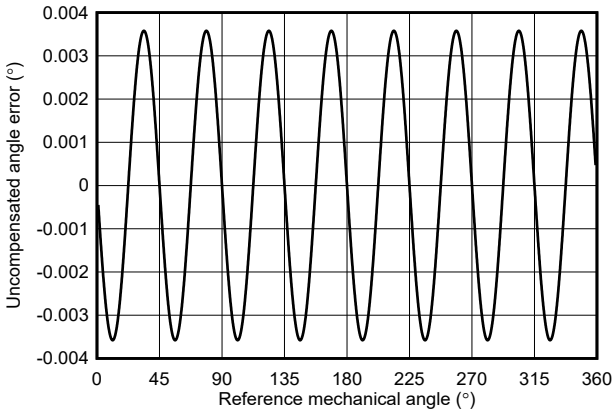



图 3-13. AMR 正弦/余弦信号链非线性 (-0.1%) 导致的角度误差示例

表 3-1 总结了对角度误差模式的影响。

表 3-1. 误差源以及对角度误差谐波的影响

| 误差源 | 联轴器位移 | AMR 传感器位移 | AMR 传感器信号链偏移 | AMR 传感器信号链增益不匹配 | AMR 传感器信号链非线性（3 次谐波） |
|---|---|---|---|---|---|
| 角度误差谐波（360 度旋转过程中） | 1 次 | 2 次 | 2 次 | 4 次 | 8 次 |

有关角度位置计算算法的更多信息，请参阅*实现更高系统角度检测精度*应用手册。

### *3.2.4 编码器通信接口*

此绝对编码器参考设计通过 RS485 接口发送角度数据，从而与主机控制器通信。按照 4M 波特率 UART 协议进行通信。主机控制器发送不同的 T-format 命令请求，编码器使用 T-format 协议规定的相应字段进行响应。图 3-14 显示了一个示例通信。有关 T-format 协议的更多详细信息，请参阅 *TAMAGAWA 编码器目录*。

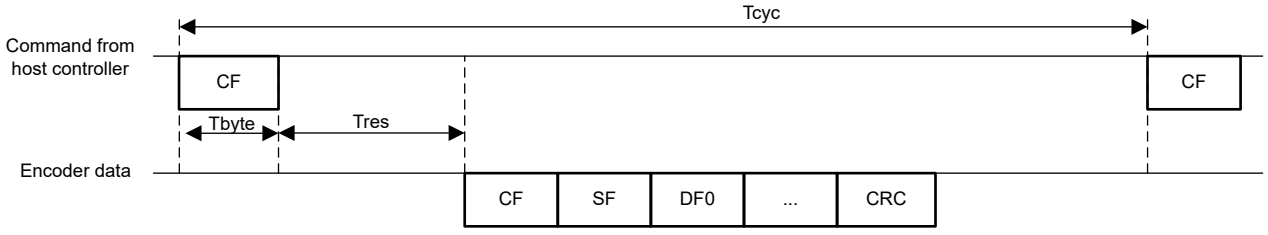



图 3-14. 命令请求



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

该软件配置为响应 ID3 命令，这需要返回所有编码器数据，包括命令字段、状态字段、单圈数据字段、编码器 ID、多圈字段、警报字段、CRC 字段，共 11 个字节。表 3-2 列出了字段格式。由于角度在 MCU 中以 IQ21 格式计算，因此需要 3 字节的数据字段来发送角度数据。

**表 3-2. 字段格式**

| | 位 1 | 位 2 | 位 3 | 位 4 | 位 5 | 位 6 | 位 7 | 位 8 | 位 9 | 位 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **内容** | 起始位，始终为 0 | 内容取决于特定字段。这 8 位数据包含在 CRC 计算中。 | | | | | | | | 停止位，始终为 1 |



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 4 硬件、软件、测试要求和测试结果

## 4.1 硬件要求

### 4.1.1 PCB 概述

PCB 顶视图和底视图如图 4-1 和图 4-2 所示。

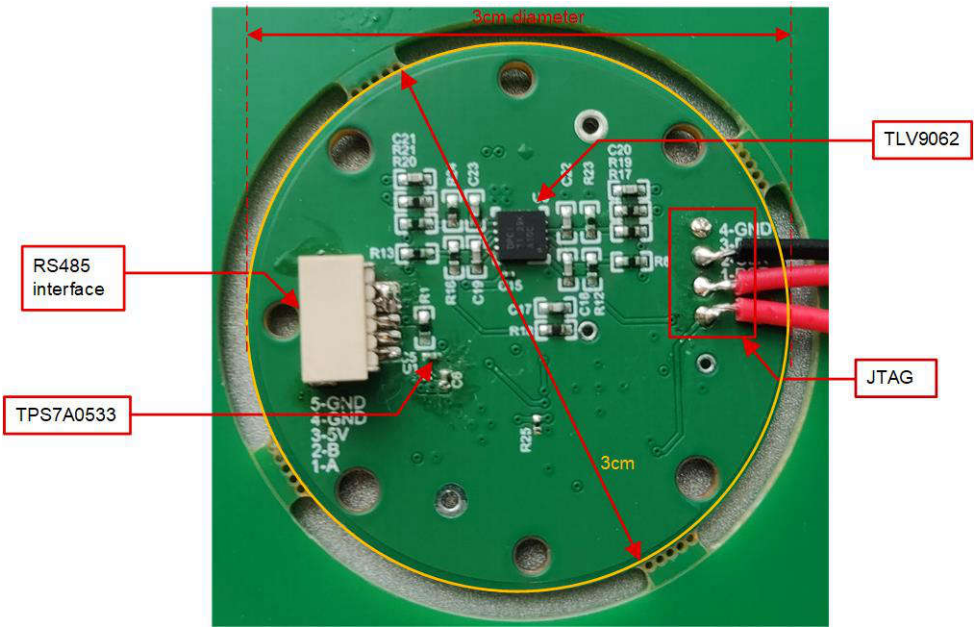



图 4-1. PCB 顶视图

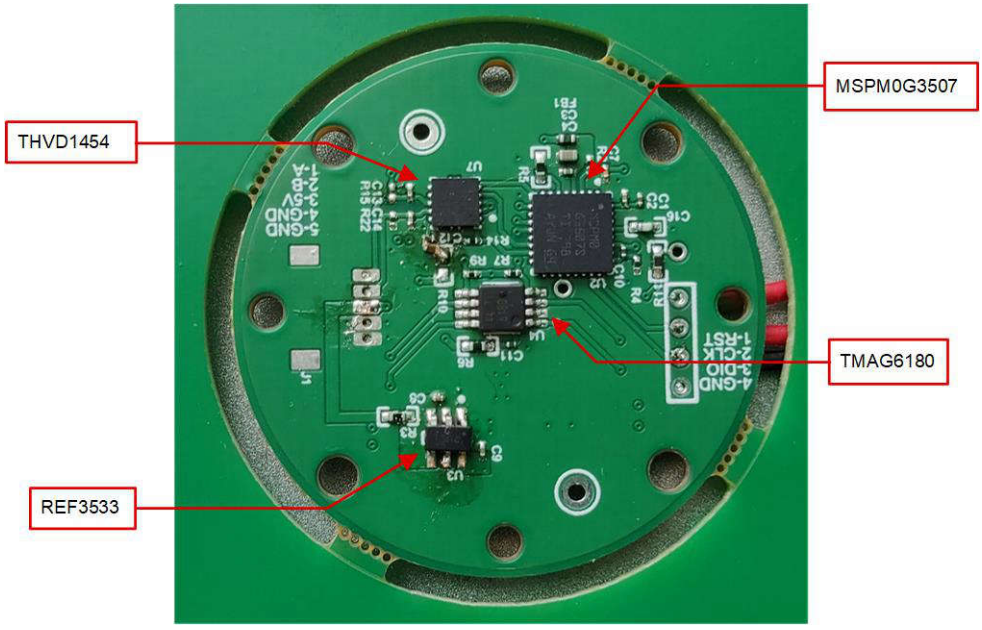



图 4-2. PCB 底视图

### 4.1.2 编码器和 JTAG 接口

表 4-1 和表 4-2 中列出了 TIDA-010947 接口。J1 是 RS485 数据通信接口。T-format 通过该接口实现，以与主机 MCU 进行通信。J2 是连接 MSPM0 MCU 的 JTAG 接口，用于下载和调试软件。


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

表 4-1. 编码器接口

| 引脚 | 信号 | 备注 |
|---|---|---|
| J1-1 | DATA+ | RS485 data+ 信号 |
| J1-2 | DATA- | RS485 data- 信号 |
| J1-3 | 5V 电源 | 外部电源 |
| J1-4 | GND | - |
| J1-5 | GND | - |

表 4-2. JATG 接口

| 引脚 | 信号 | 备注 |
|---|---|---|
| J2-1 | RST | 输入 |
| J2-2 | CLK | 输入 |
| J2-3 | DIO | 输入/输出 |
| J2-4 | GND | - |

### *4.1.3 软件要求*

为了验证此参考设计，我们使用适用于 M0 MCU 的 M0 软件开发套件开发了一款 TI 内部测试软件，用于 MSPM0G3507。

表 4-3. 主要软件配置

| 子系统 | 参数 | 值 |
|---|---|---|
| ADC0、ADC1 | 采样时间 | 250ns |
| | 转换时间 | 100ns |
| | 硬件均值计算 | 64 次 |
| UART | 波特率 | 4M |
| | 字长 | 8 位 |
| 中断 | ADC 触发频率 (Timer0) | 32kHz |
| | 位置计算频率 | 32kHz |

## 4.2 测试设置

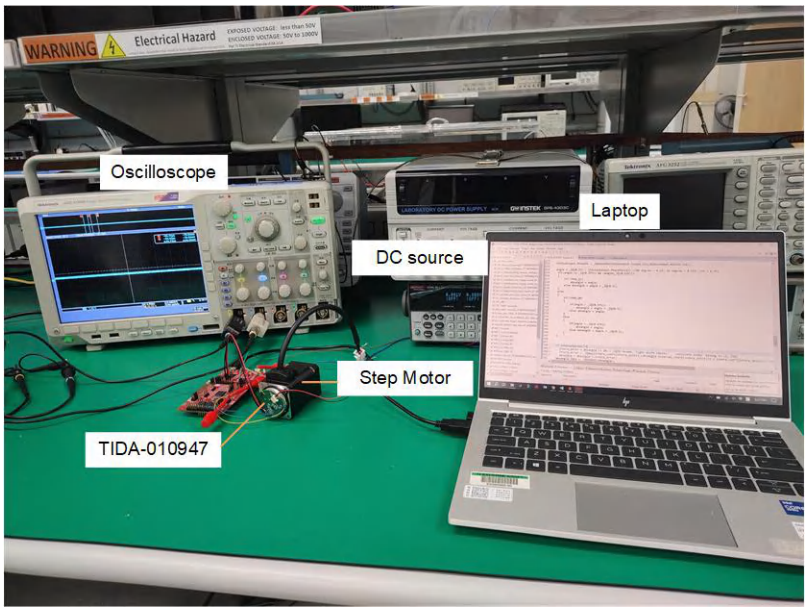



图 4-3. 测试设置



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

图 4-3 展示了实验室中的静态噪声测试设置。旋转角度精度测试是在外部实验室完成的，因此没有机会拍照。

## 4.3 测试结果

### *4.3.1 AMR 传感器正弦和余弦输出测量*

图 4-4 和图 4-5 展示了从 0 度到 180 度机械旋转半周后，AMR 传感器正弦和余弦信号在 MSPM0G3507 ADC 的输入端转换为单端信号。信号偏置为 1.65V，峰峰值幅度约为 2V。最大电压约为 2.65V，最小电压约为 0.65V。使用外部 REF3533 基准时，MSPM0 内部 ADC 的满标量程输入范围为 3.3V。这意味着 AMR 传感器使用满标量程范围的 62%，这就为信号链增益和偏移变化提供了足够的余量。

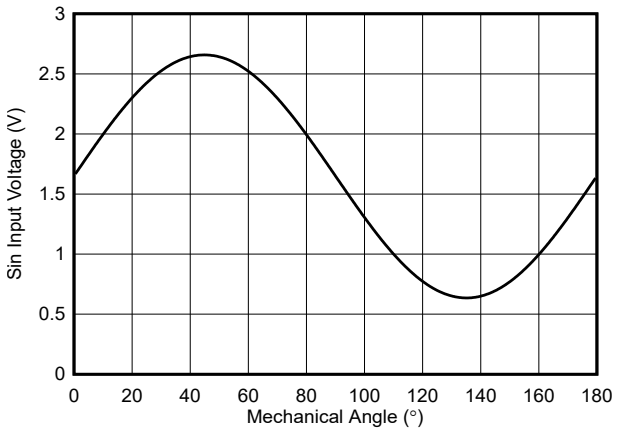



**图 4-4. MSPM0 ADC1 输入端的单端 AMR 传感器正弦波形**

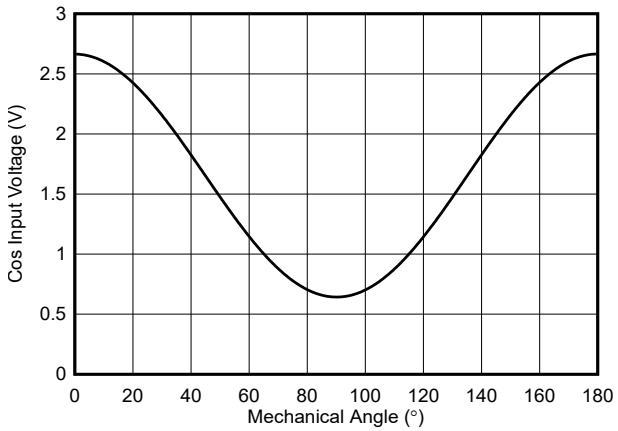



**图 4-5. MSPM0 ADC0 输入端的单端 AMR 传感器余弦波形**

为了测量信噪比和有效位数，以 32kHz 采样率和固定角度测量了 2000 个连续的正弦和余弦信号。

以下两个图展示了 62.5ms 时域中经过偏移校正的正弦和余弦信号。从相应的模数转换后正弦和余弦输入信号中减去 1.65V 偏置电压。峰峰值噪声在 0.6mV 以内。图 4-6 和图 4-7 展示了正弦和余弦信号的相应直方图。

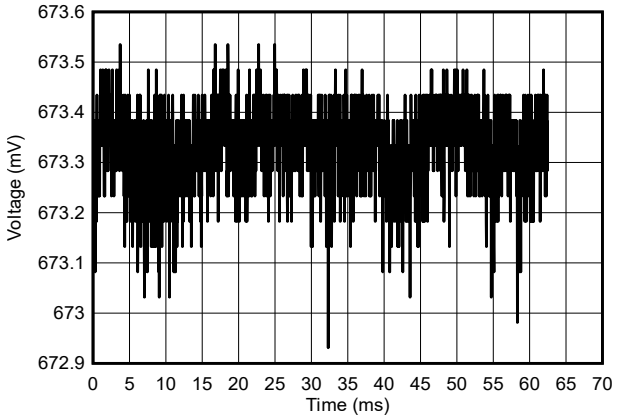



**图 4-6. 机械角度为 67.48 度且具有偏置电压校正功能的 AMR 传感器正弦电压信号**

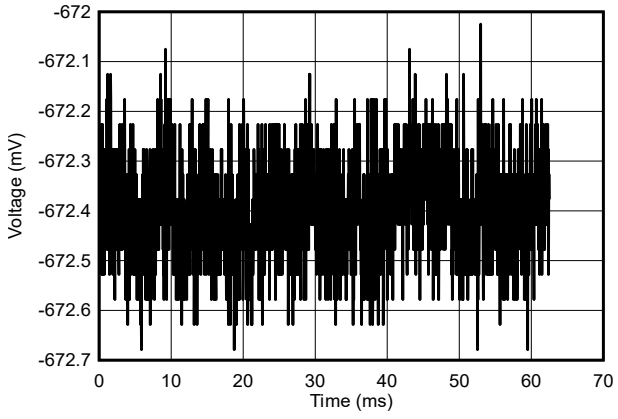



**图 4-7. 机械角度为 67.48 度且具有偏置电压校正功能的 AMR 传感器余弦电压信号**


English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

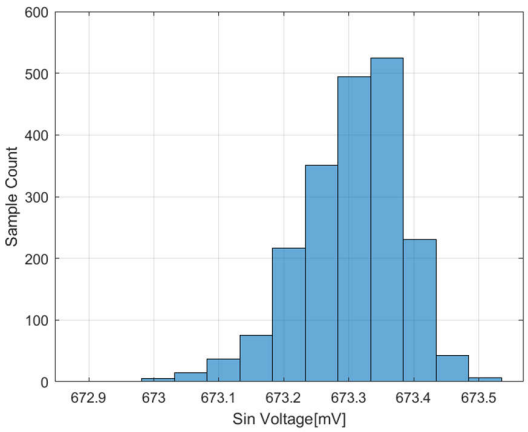



**图 4-8. 正弦信号直方图（2000 个样本）**

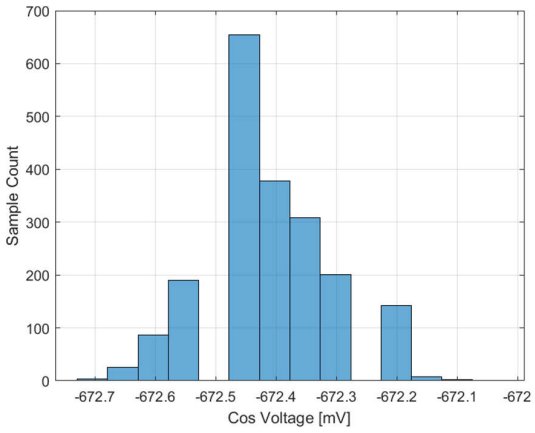



**图 4-9. 余弦信号直方图（2000 个样本）**

表 4-4 显示了标准差、信噪比 (SNR) 和有效位数 (ENOB) 与满标量程之间的关系。当 ADC 处于 64 次均值计算模式时，正弦信号的 ENOB 为 13.3 位，余弦信号为 13 位。

**表 4-4. 标准差、SNR 和 ENOB 与 TMAG6180 满标量程之间的关系**

| 参数 | X 轴 | Y 轴 | 备注 |
|---|---|---|---|
| 标准差 [mV] | 0.082 | 0.101 | RMS |
| 正弦/余弦振幅 [V] | 1 | 1 | 峰值 |
| SNR [dB] | 81.7 | 80 | dB |
| ENOB [位] | 13.3 | 13 | 位 |

### *4.3.2 静态角度噪声测量*

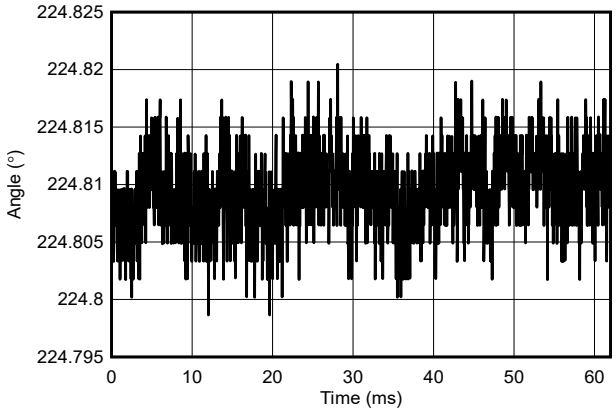



**图 4-10. 224.8 度时的静态角度（32kHz 采样率下采集 2000 个样本）**

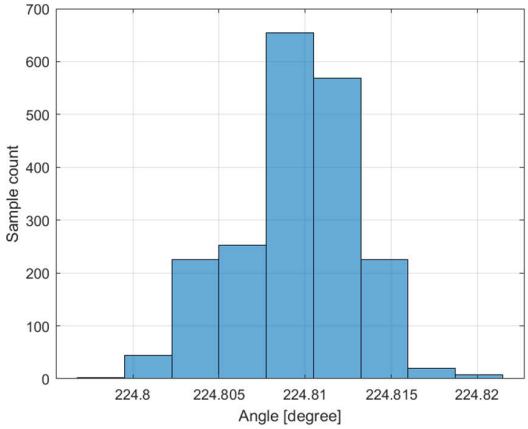



**图 4-11. 224.8 度时的角度直方图（2000 个样本，17 位二进制宽度时 1LSB）**

将电机轴保持在固定的 224.8° 机械角度。MSPM0 在 32kHz 频率下计算角度。采集 2000 个角度样本，在图 4-10 和图 4-11 中绘制时域图和直方图。

表 4-5 展示了相应的标准差和 ENOB 与满标度位置测量范围的关系。角度噪声的 RMS 为 0.0033°，即 94.7dB SNR 与 360° 满标量程范围及 15.4 ENOB 的关系。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

**表 4-5. TMAG6180 在静态角度 224.8° 处的标准差、SNR 和 ENOB**

| 参数 | 值 | 备注 |
|---|---|---|
| 标准差 [°] | 0.0033 | RMS |
| 满标量程 [°] | 0-360 | |
| SNR [dB] | 94.7 | SNR=20×log10(±180°/STDEV) |
| ENOB [位] | 15.4 | ENOB=(SNR-1.76)/6.02 |

假设噪声不相关，与 AMR 传感器正弦和余弦信号链（包括具有 64 次过采样的 12 位 ADC）的有效位数 (ENOB) 相比，绝对机械角度的理论总分辨率会增加 2 位。一个电 AMR 传感器周期内的正弦/余弦插值角的理论分辨率等于正弦和余弦子系统的 ENOB + 1 位。采用此设计时，每次机械旋转都有两个电气周期，从而产生一个额外的位。

更改电机轴角度（间隔为 22.5°）。每个角度采集 2000 个样本，相应的 RMS 和峰峰值列于表 4-6 和表 4-7 中。峰峰值静态角度噪声约为 0.02°，最大值出现在 225° 处。

**表 4-6. 前半周内的静态角度噪声（0° 至约 180°）**

| 机械角度 [°] | 0 | 22.5 | 45 | 67.5 | 90 | 112.5 | 135 | 157.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 标准差 [°] | 0.0025 | 0.0020 | 0.0028 | 0.0027 | 0.0026 | 0.0022 | 0.0028 | 0.0028 |
| 峰峰值 [°] | 0.0185 | 0.0160 | 0.0227 | 0.0185 | 0.0184 | 0.0173 | 0.0182 | 0.0192 |

**表 4-7. 后半周内的静态角度噪声（180° 至约 360°）**

| 机械角度 [°] | 180 | 202.5 | 225 | 247.5 | 270 | 292.5 | 315 | 337.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 标准差 [°] | 0.0029 | 0.0024 | 0.0031 | 0.0032 | 0.0026 | 0.0027 | 0.0019 | 0.0027 |
| 峰峰值 [°] | 0.0182 | 0.0182 | 0.0225 | 0.0245 | 0.0184 | 0.0182 | 0.0151 | 0.0206 |

图 4-12 展示了机械旋转一周的过程中，相对于左侧 y 轴的峰峰值角度噪声，显示为黑色。相对于右侧 x 轴的角度标准差显示为红色。

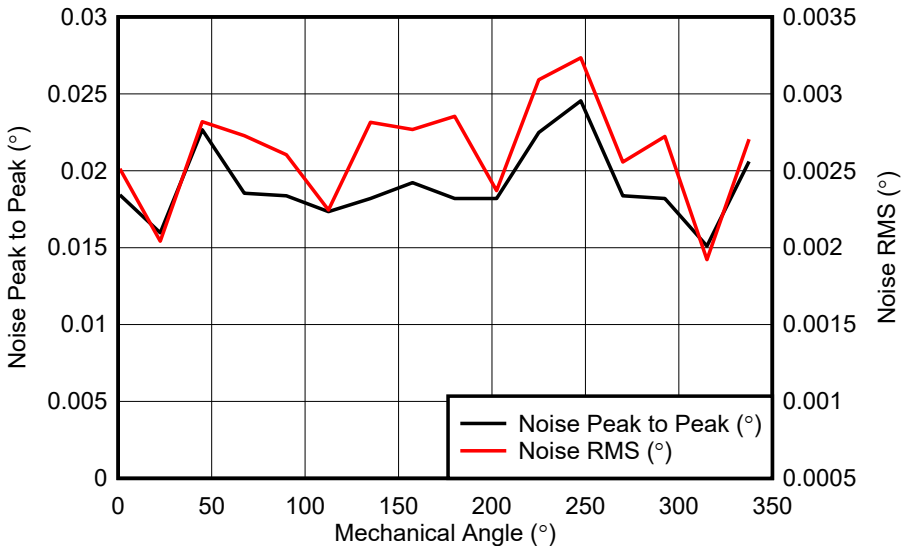



**图 4-12. 旋转一周过程中的静态角度噪声**

**表 4-8. 静态角度噪声与空气间隙间的关系**

| 机械角度 [°] | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.8mm 空气间隙下的标准差 [°] | 0.0031 | 0.0025 | 0.0020 | 0.0029 | 0.0027 | 0.0033 | 0.0032 | 0.0031 |



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

表 4-8. 静态角度噪声与空气间隙间的关系（续）

| 机械角度 [°] | 0 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.3mm 空气间隙下的标准差 [°] | 0.0038 | 0.0024 | 0.0035 | 0.0031 | 0.0035 | 0.0034 | 0.0034 | 0.0033 |

将有效空气间隙更改为 2.3mm，测量不同机械角度下的静态角度噪声，比较测试结果如表 4-8 所示。在较大空气间隙下，最大噪声 RMS 为 0.0038°，而在 0.8mm 空气间隙下为 0.0033°。较大的空气间隙会略微增加噪声，但对 SNR 和 ENOB 的影响可能很小。

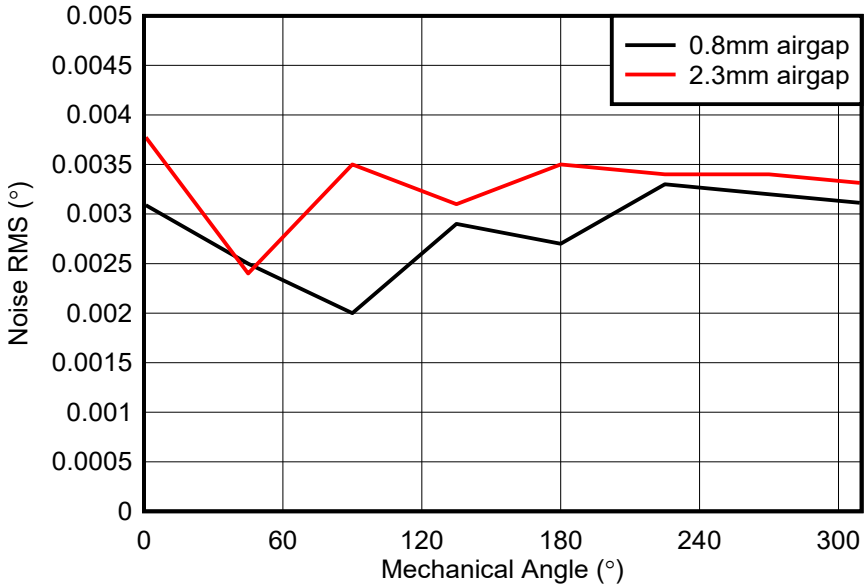



图 4-13. 静态角度噪声与空气间隙间的关系

### *4.3.3 旋转角度精度测量*

在本节中，将测试电机以恒定转速运行时的角度精度。在测试平台上，伺服电机以 30RPM 的转速驱动被测电机。主机控制器能够以 16kHz 的频率发送位置数据请求命令，并收集参考编码器和 TIDA-010947 位置数据。比较参考编码器和 TIDA-010947 数据以获得旋转角度精度。

为了帮助对磁性系统进行仿真，*TI 磁感应模拟器* (TIMSS) 工具可以加快磁性系统的设计和评估。

将空气间隙保持在 0.8mm，旋转一周收集 30000 个角度样本。旋转精度如图 4-14 所示。峰峰值误差为 0.28°，未进行任何偏移和增益校准。使用校准后数据补偿 1 次和 2 次谐波，可以将误差降至 +/-0.032°，如图 4-14 所示。


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

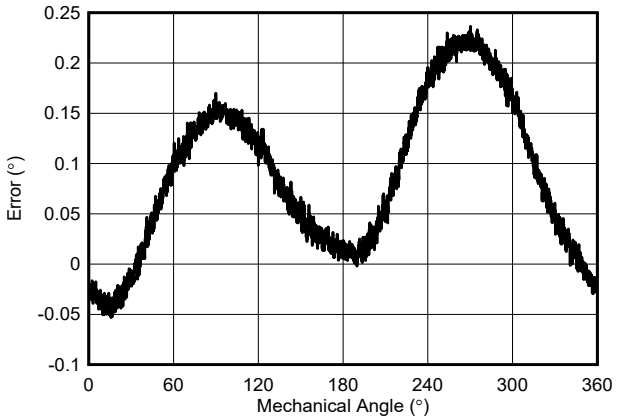



图 4-14. 0.8mm 空气间隙下未经校准的旋转角度精度

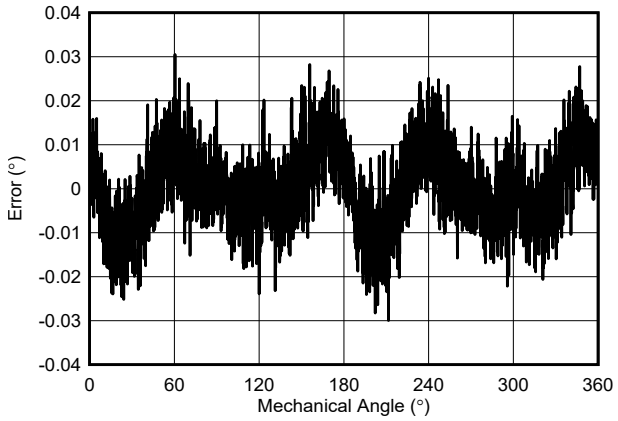



图 4-15. 25°C 环境温度下进行偏移校准时的旋转角度精度

要进行可重复性测试，请在旋转两周的过程中持续对角度数据进行采样。使用相同的校准参数后，比较两个周期的校准结果。图 4-16 显示了结果。Cycle1 和 Cycle2 数据几乎完全重叠，这意味着 TIDA-010947 具有良好的可重复性。

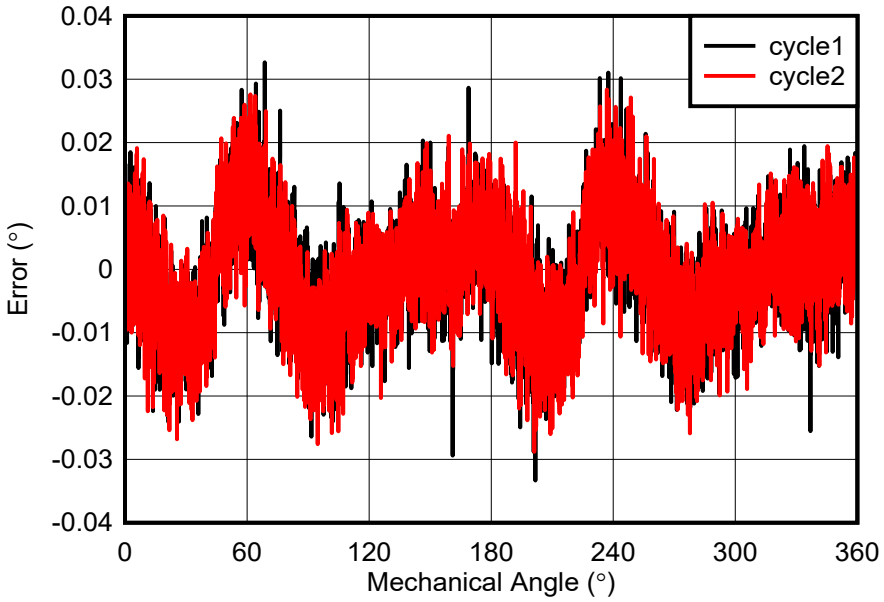



图 4-16. 25°C 环境温度下进行偏移校准时的旋转角度精度，重复试运行

#### 4.3.3.1 空气间隙对噪声、谐波和总角度精度的影响

随着空气间隙的增加，磁场会减小，导致位置传感器的噪声更高。本节分析空气间隙对 TIDA-010947 的影响。通过使用垫圈，空气间隙从 0.3mm 变为 2.3mm。重复执行节 4.3.3 中所述的测试步骤，测试结果如图 4-17 至图 4-20 所示。在所有空气间隙下，校准误差都低于 ±0.037°。


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

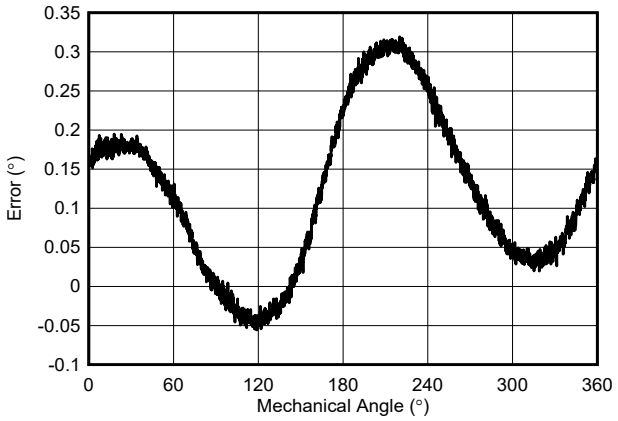



图 4-17. 未经校准的旋转角度精度（在 0.8mm 空气间隙下校准）

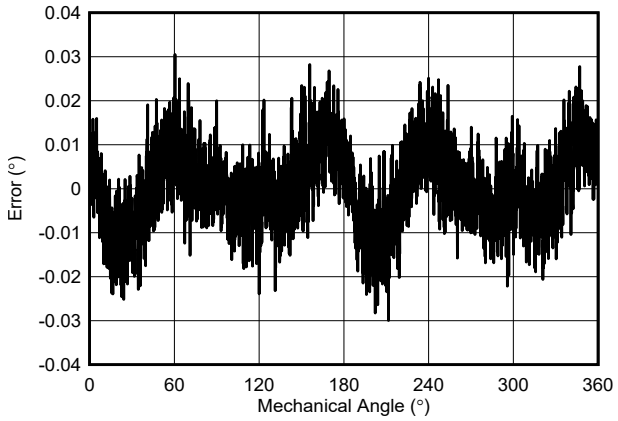



图 4-18. 在 0.8mm 空气间隙下校准的旋转角度精度

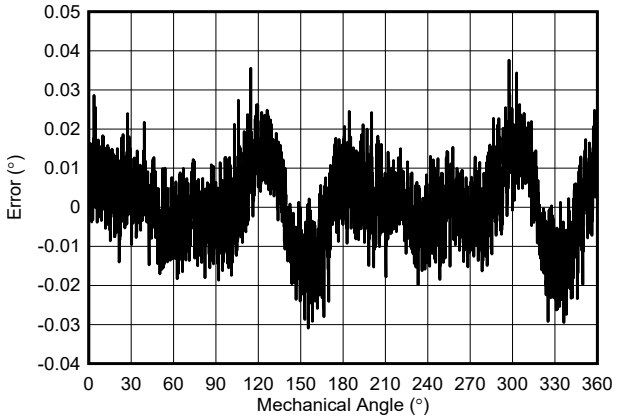



图 4-19. 在 1.3mm 空气间隙下校准的旋转角度精度

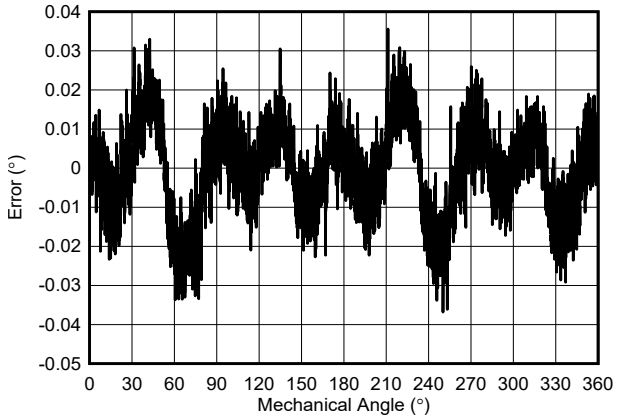



图 4-20. 在 2.3mm 空气间隙下校准的旋转角度精度

为了进一步分析空气间隙对谐波的影响，需要进行 FFT 分析。表 4-9 中列出了结果。4 次谐波是由信号链增益不匹配引起，这不受空气间隙影响。8 次谐波是由 AMR 传感器和信号链的非线性引起，空气间隙越大，8 次谐波的值就越大。

表 4-9. 角度误差和谐波与空气间隙间的关系

| 空气间隙 | 偏移校准后的角度误差 [°] | 4 次谐波 [°] | 8 次谐波 [°] |
|---|---|---|---|
| **0.3mm** | <0.04° | 0.0086 | 0.0015 |
| **0.8mm** | <0.04° | 0.006 | 0.0012 |
| **1.3mm** | <0.04° | 0.0062 | 0.0041 |
| **2.3mm** | <0.04° | 0.0058 | 0.0113 |



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

### 4.3.4 RS485 接口和信号完整性

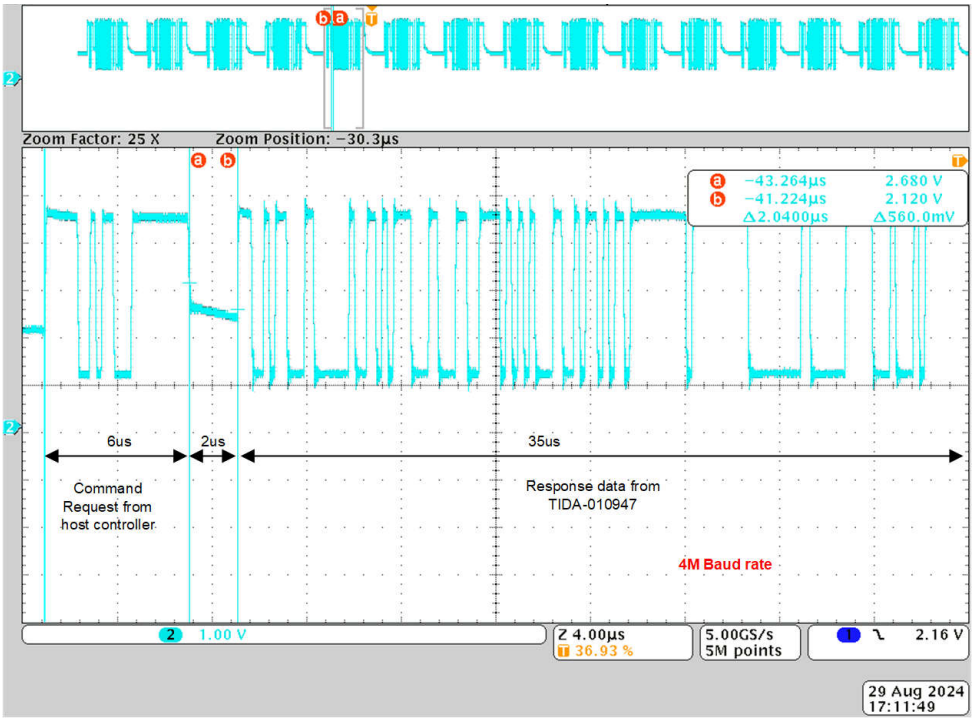



**图 4-21. 请求新角度数据的时序图 (Tamagawa T-format)**

图 4-21 展示了主机控制器和 TIDA-010947 之间的通信时序图。通信基于 T-format 协议。主机控制器每 62.5 µ s (32kHz) 发送一次命令请求，TIDA-010947 在 2 µ s 内以相应的角度数据进行响应。请求命令需要 6 µ s，响应数据需要 35 µ s。

图 4-22 展示了 RS485 信号的上升和下降时间，约为 40ns。由于 UART 波特率为 4M，1 位信号可持续 250ns，因此上升和下降时间不会影响通信。

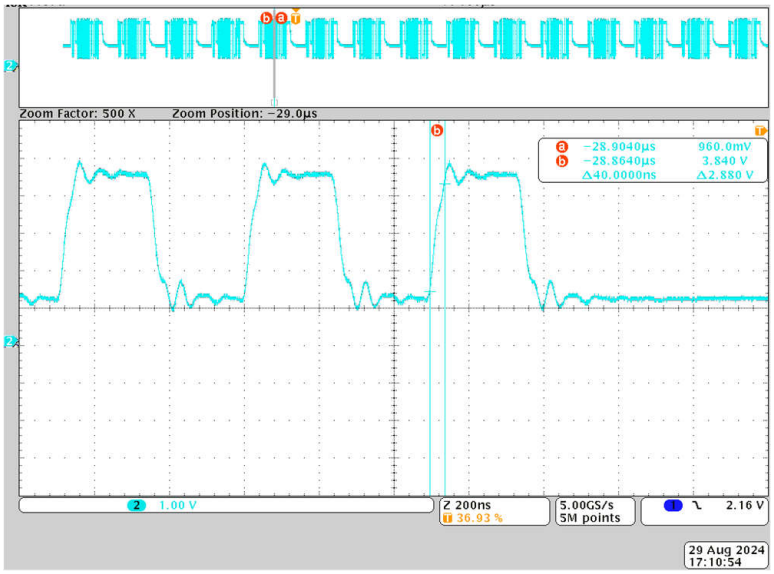



**图 4-22. RS485 信号上升和下降时间**


Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 5 设计和文档支持

## 5.1 设计文件

### 5.1.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 TIDA-010947 中的设计文件。

### 5.1.2 BOM

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 TIDA-010947 中的设计文件

### 5.1.3 PCB 布局

要下载 PCB 布局，请查找 TIDA-010947 中的设计文件

### 5.1.4 Altium 工程文件

要下载 Altium 工程文件，请查找 TIDA-010947 中的设计文件

### 5.1.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请查找 TIDA-010947 中的设计文件

### 5.1.6 装配图

要下载装配图，请查找 TIDA-010947 中的设计文件

## 5.2 工具与软件

**工具**

| | |
|---|---|
| TI-MAGNETIC-SENSE-SIMULATOR | 包括机械运动和传感器输出的磁性仿真软件。 |

**软件**

| | |
|---|---|
| MSPM0-SDK | MSPM0 SDK 通过单个软件包提供软件、工具和文档的精选集合，可以加快 MSPM0 MCU 平台应用程序的开发。 |
| MSP-IQMATHLIB | Texas Instruments® MSP IQmath 和 Qmath 库是一个高度优化的高精度数学函数集合，使 C 语言编程人员可以将浮点算法无缝移植到 MSPM0、MSP430 和 MSP432 器件上的定点代码中。 |

## 5.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，*AMR 角度传感器校准* 应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，*实现更高系统角度检测精度* 应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，*TI 磁感应模拟器功能简介* 应用简报。
4. TAMAGAWA SEIKI, *Rotary Encoders Catalog*, product catalog

## 5.4 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。

## 5.5 商标

TI E2E™ and Arm™ are trademarks of Texas Instruments.
Cortex® is a registered trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。



English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 6 关于作者

**YUFENG ZHANG** 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师，负责为工业驱动器指定并开发系统设计。

**MARTIN STAEBLER** 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的高级技术人员，负责为工业驱动器指定并开发系统设计。


English Document: TIDUF97
Copyright © 2024 Texas Instruments Incorporated

# 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出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