

使用霍尔效应传感器实现精确电机位置控制的绝对角度编码器参考设计



说明

此参考设计展示了精密电机控制应用（如机械臂控制）中典型的绝对角度编码方法。可以使用各种磁感应技术来实现角度编码。这通过检测两个磁通密度、**B** 场和自然为 **90** 度异相的矢量分量来完成。在磁体旋转时，传感器输入为正弦波，这允许使用三角函数属性进行计算。不过，由于系统的电气和机械特性，通常需要校正最终结果以达到最高精度。通常在大部分精密电机控制应用中，最终目标误差低于 **0.1°**。此设计探究了选择磁体、确定放置和校正系统级缺陷以实现高精度角度测量的过程。

资源

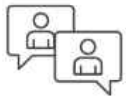
TIDA-060040	设计文件夹
TMAG5170	产品文件夹
DRV5055	产品文件夹

特性

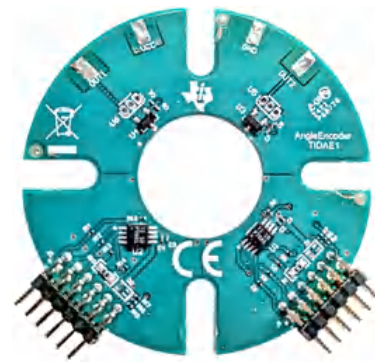
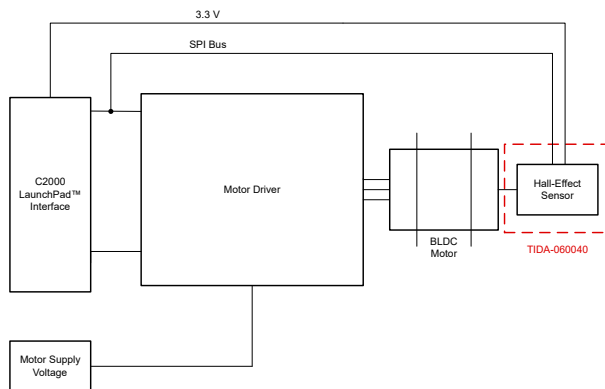
- 测量同轴、平面内和偏轴对齐中的角度以灵活对齐并放置传感器
- **0.1°** 精度的校准过程
- 可选数字 **SPI** 通信或模拟输出
- 包含传感器放置指导方针的设计文件

应用

- 移动机器人电机控制
- 移动机器人感应模块
- 割草机器人
- 机器人伺服驱动器
- 伺服驱动器位置传感器
- 位置传感器
- 自平衡个人交通工具



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

在任何精密电机控制应用中，需要评估电机轴的角度位置以确保系统的总体控制符合预期。不正确的位置数据会影响用户安全、增大制造容差，并产生损失、导航故障或导致设备受损。因此在许多应用中，必须持续监控和评估角度位置。例如，在自主移动机器人和割草机器人中，匹配每个机轮的角旋转速度对于正确导航非常重要。

虽然可以采用各种技术来测量角度，但此设计使用了两种标准技术，分别是一维 (1D) 线性霍尔效应传感器或三维 (3D) 线性霍尔效应传感器。每种技术都面临必须解决的各种挑战。

表 1-1. 角度测量方法

方法	优势	劣势
3D 霍尔效应 (此设计中展示的方法)	<ul style="list-style-type: none"> • 单个传感器可捕获整个磁场 • 灵活放置传感器，以实现紧凑的解决方案 • 角度位置在系统上电时可用 • 不受脏污工作条件的影响 	<ul style="list-style-type: none"> • 根据范围和放置方式，磁场可能是非理想磁场 • 磁体成本
1D 霍尔效应 (此设计中展示的方法)	<ul style="list-style-type: none"> • 具有模拟输出的廉价传感器 • 紧凑的解决方案尺寸 • 角度位置在系统上电时可用 • 不受脏污工作条件的影响 	<ul style="list-style-type: none"> • 需要精确放置传感器以实现准确的相位对齐 • 磁体成本
霍尔效应增量编码	<ul style="list-style-type: none"> • 捕获旋转磁体的转速和方向 • 简便计算增量角度变化 • 不受脏污工作条件的影响 	<ul style="list-style-type: none"> • 需要多极环形磁体 • 仅提供增量角度位置，上电时的位置未知
电感式感应角度编码	<ul style="list-style-type: none"> • 不受附近固定永磁体的影响 • 不受脏污工作条件的影响 	<ul style="list-style-type: none"> • 需要精密设计的感应线圈和金属目标
光学编码	<ul style="list-style-type: none"> • 提供具有最高分辨率的数据 	<ul style="list-style-type: none"> • 解决方案尺寸往往较大 • 必须在清洁条件下运行
步进电机脉冲计数	<ul style="list-style-type: none"> • 简单的实施过程 • 可通过专门配置来实现精密控制 	<ul style="list-style-type: none"> • 步长抖动在绝对位置中带来不确定性 • 开始位置未知
无传感器电机控制	<ul style="list-style-type: none"> • 不需要额外感应元件 	<ul style="list-style-type: none"> • 未检测 • 停止时的电机位置 • 低转速下效果不佳 • 在极高转速下会难以管理 • 需要复杂计算

由于存在灰尘、污垢和尘垢等污染物，并非所有解决方案都能使用光学编码。创建传感器密封环境的光学解决方案尺寸往往较大，无法很好地适用于紧凑设计。

对于电感式和线性霍尔效应解决方案，角度计算的前提是使用彼此异相 90° 的正弦输出。

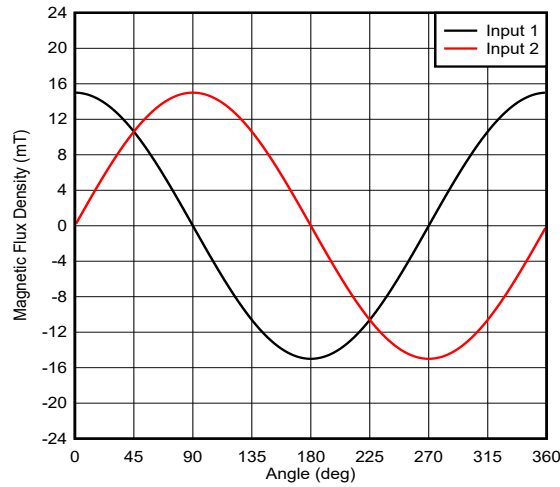


图 1-1. 正弦和余弦输入

对于此波形的输出，使用[方程式 1](#) 到[方程式 4](#) 来说明绝对角度。

$$Out1 = \sin \theta \tag{1}$$

$$Out2 = \cos \theta \tag{2}$$

$$\tan \theta = \frac{Out1}{Out2} \tag{3}$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{Out1}{Out2}\right) \tag{4}$$

如[方程式 4](#) 所示，通过计算两个输出比率的反正切值来确定角度。若要在软件中简化这一计算步骤，可使用许多编码库提供的 `atan2()` 函数。此函数将自动考虑每个输入的符号，并应用调整以生成 $\pm 180^\circ$ 范围的输出。

另一种方法是使用带有集成 CORDIC 计算器的器件。CORDIC 算法执行的矢量旋转与二进制搜索近似，并已针对数字逻辑进行了优化。[TMAG5170](#) 和 [TMAG5273](#) 等器件可以使用器件输出生成角度输出，并最大限度地降低总系统延迟。

可以按照以下排列实施线性霍尔效应解决方案，这些排列将在[传感器位置](#)中详细说明。

- 1D 平面内
- 1D 偏轴
- 3D 平面内
- 3D 偏轴
- 3D 同轴

2 系统概述

系统规格

参数	规格
工作电压	3.0V - 5.5V (DRV5055A4)
	2.3V - 5.5V (TMAG5170)
磁场输入	$\pm 85\text{mT}$ (DRV5055A4)
	$\pm 100\text{mT}$ (TMAG5170)
输出格式	0.2V 至 $V_{cc} - 0.2\text{V}$ (DRV5055A4)
	SPI 最高 10MHz
最佳角度精度	$< 0.1^\circ$

2.1 方框图

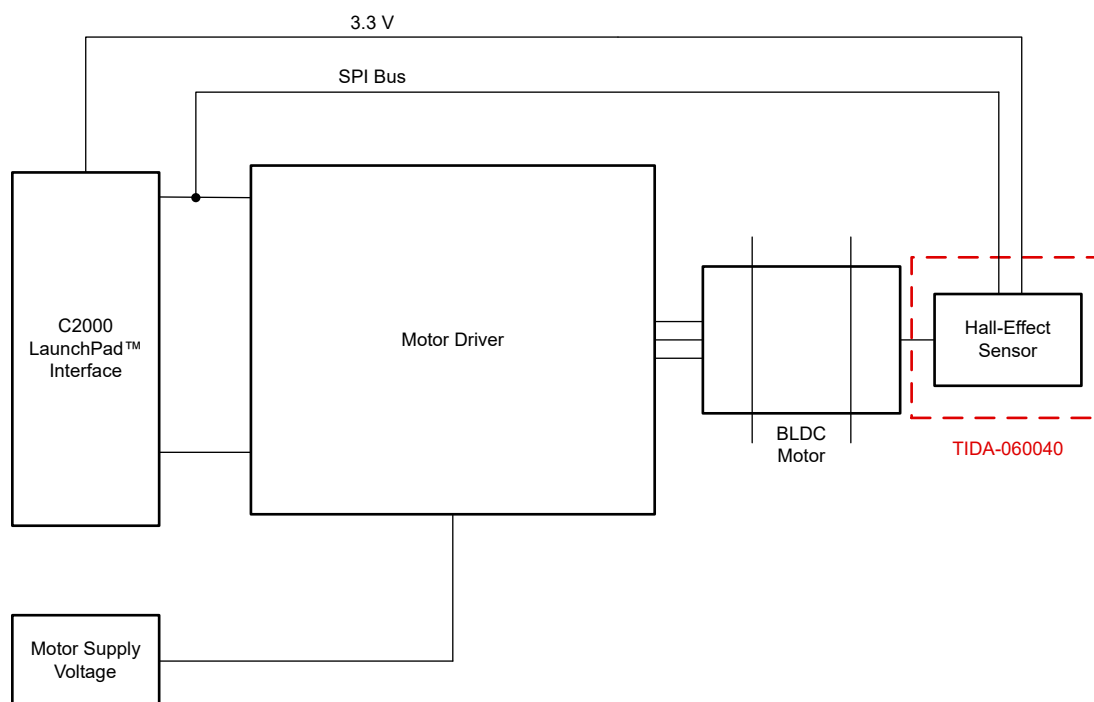


图 2-1. TIDA-060040 方框图

2.2 重点产品

2.2.1 TMAG5170

TMAG5170 是高精度线性 3D 霍尔效应传感器，适用于各种工业应用。高集成度可在各种位置感测系统中提供灵活性和准确性。此器件在 X、Y 和 Z 轴具有 3 个独立的霍尔传感器。精密信号链和集成型 12 位 ADC 可实现高精度和低漂移磁场测量，同时支持高达 20kSPS 的采样率。片上温度传感器数据可用于系统级漂移补偿。

2.2.2 DRV5055A4

DRV5055 是一款线性霍尔效应传感器，可按比例响应磁通密度。该器件可用于在各种应用中进行精确的位置感测。该器件由 3.3V 或 5V 电源供电。当不存在磁场时，模拟输出可驱动一半 V_{CC} 。输出会随施加的磁通量密度呈线性变化，五个灵敏度选项可以根据所需的感应范围提供最大的输出电压摆幅。南北磁极产生唯一的电压。

2.3 设计注意事项

2.3.1 磁体选择

为测试选择的磁体为 **R834DIA**，这是 N42 级径向环形磁体。磁体的指定内径为 4.75mm (0.1875in)，外径为 12.7mm (0.5in)。磁体厚度为 6.35mm (0.25in)。

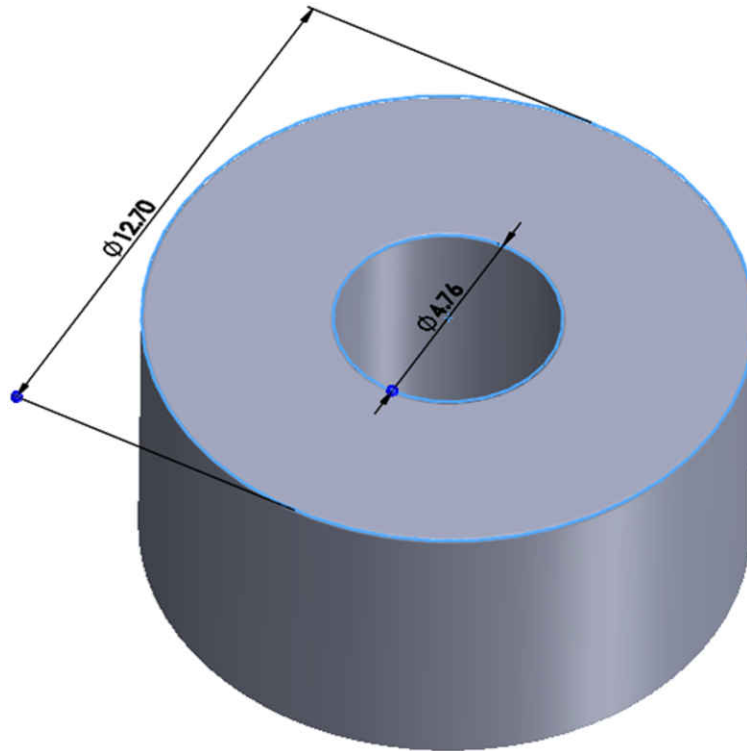


图 2-2. 径向环形磁体

2.3.2 磁体形状

选择了环形磁体形式，因为它可以轻松安装至旋转轴。对于中心没有钻孔的实心圆柱形磁体，必须使用二级夹具进行安装才能确保适当对齐和居中

2.3.3 磁体转速

随着电动系统速度的增加，由于系统中的实际传播延迟，传感器的固定相位延迟误差受到影响。控制器对于此延迟的管理功能会影响器件设置和终端性能。

例如，**TMAG5170** 提供的平均值计算模式有助于改进观察到的输入基准噪声。更大限度地降低此噪声可帮助实现极高精度的结果，但会使总积分时间按比例增加。积分时间的增加决定了生成的相位相关误差。

平均值计算模式	采样方式	总转换时间
1 ×	XY	75 μs
32 ×	XY	1.625ms
1 ×	XYZZYX	175 μs
32 ×	XYZZYX	4.825ms

此积分延迟会导致传感器速度受限。对于使用 **XYZZYX** 转换方式的 32 × 采样，总积分时间为 4.825ms。在约 35RPM 的电机转速下，磁体将在单个转换期间旋转 1°。与最短积分时间 75 μs 相比，磁体旋转速度必须达到更快的 64 × 才能在一个转换期间同样旋转 1°。

对于任何电机，尤其是带负载的电机，在轴接近目标位置时，必须有减速周期。因此，必须了解相位延迟才能预测何时开始减速。随着轴速度的增加或降低，系统必须考虑此延迟以准确了解实际电机位置。

虽然平均值增加可减少噪声对测量的影响，但图 2-3 展示了采样时间增加会导致实际电机轴角度与从传感器收集的数据之间产生更大差异。

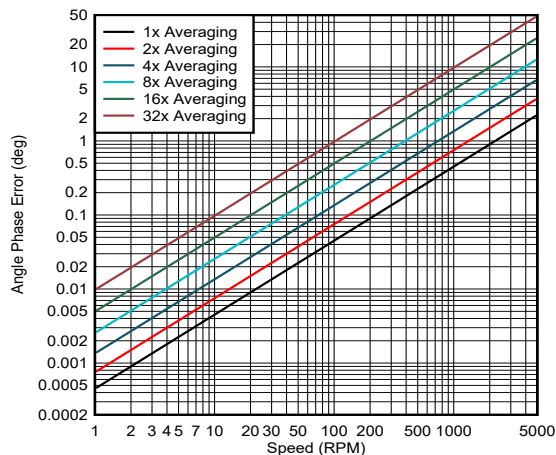


图 2-3. 角度相位误差与电机转速

2.3.4 传感器位置

执行了磁场仿真以评估同轴、平面内和偏轴对齐的可能位置。

使用径向磁体，在评估对齐到磁体极化方向的磁场时，将在任何空气间隙距离产生最大幅度磁场矢量。在此情况下，要检查的第一个目标位置是沿从磁体中心向外径延伸的直线，与磁体居中垂直。

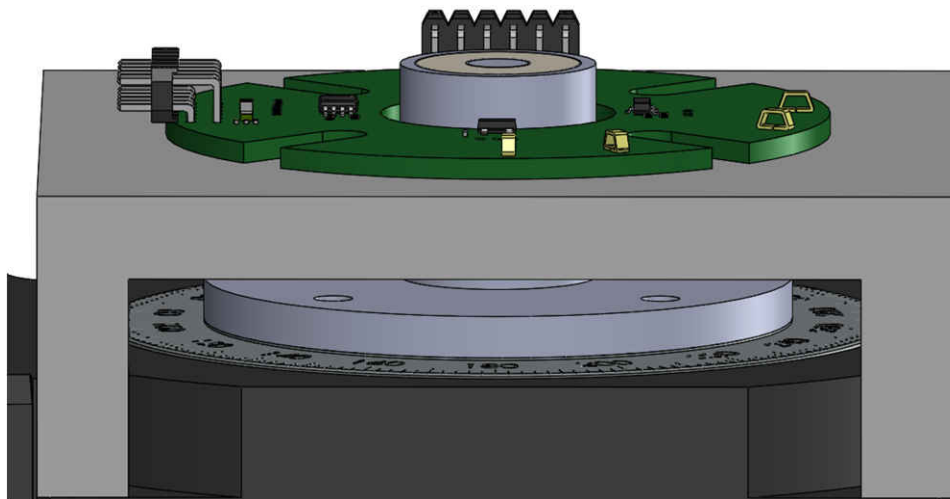


图 2-4. 平面内传感器对齐

在此位置，有必要在一次完整旋转中对 B 场的各个分量检查峰值磁通密度以及磁场质量。图 2-5 演示了随着传感器水平距离发生变化而观察到的峰值幅度，如图 2-4 所示。

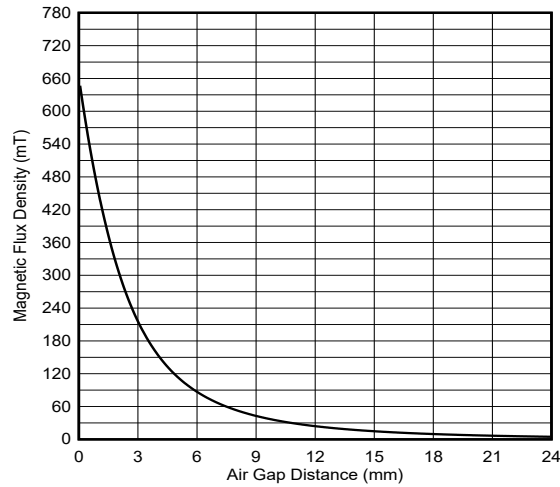


图 2-5. 平面内幅度和空气间隙距离

下面几张图显示了几个选定位置处的磁场矢量分量，以演示磁场性质。在每种情况下，传感器位置均与磁体中心完全对齐，因此矢量中没有 Z 分量。

2mm 空气间隙磁场输入是放置位置过于接近磁体源的传感器的示例。(X 轴)上的输入具有近 150mT 的峰值，而(Y 轴)输入的峰值在 300mT 以上，超出了 TMAG5170 的线性输入范围。

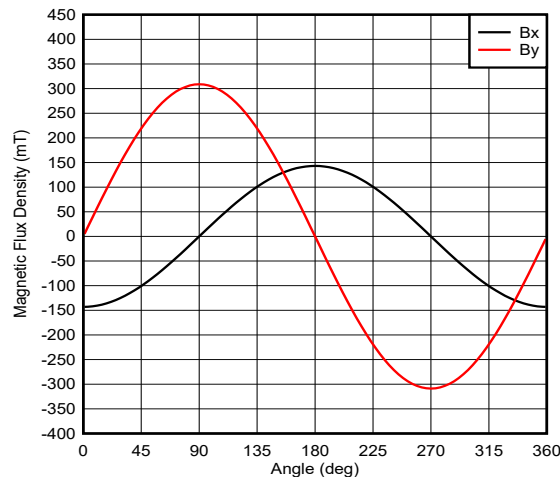


图 2-6. 2mm 空气间隙磁场输入

此外，正弦输入存在一些较小的谐波失真。磁场输入的任何失真最终都会导致某种周期性的角度误差。对于所有磁体，正弦性通常根据范围实现改进。

5.9mm 空气间隙磁场输入显示了磁场离传感器过远的情况。X 和 Y 分量具有理想的正弦曲线，4.5mT 峰值输入信号过小，无法在高精度应用中使用。在如此小的输入信号下，输出噪声会在角度计算中导致严重误差。

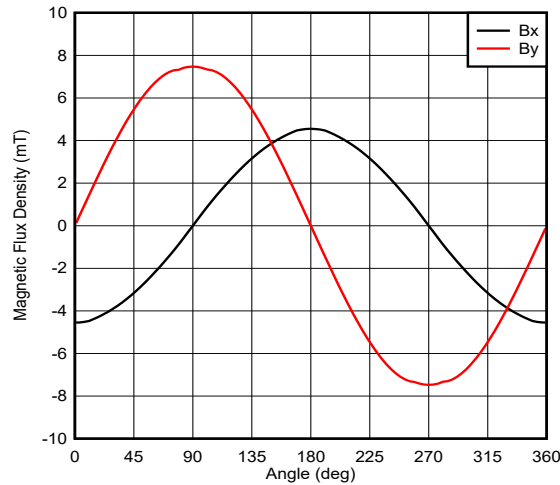


图 2-7. 20mm 空气间隙磁场输入

目标是使输入接近于目标传感器线性磁感应范围的最大值。如使用 [TMAG5170](#) 和 [DRV5055](#) 等目标器件，在选择传感器位置以最大限度地提高 SNR 时，必须允许系统容差。器件灵敏度、安装对齐和磁体质量的变化都会对观察到的场幅度产生影响。

表 2-1 显示了这两个器件的灵敏度选项。

表 2-1. 线性霍尔效应传感器输入范围

器件	线性磁感应范围 (B_L)
TMAG5170A1	$\pm 25\text{mT}$ 、 $\pm 50\text{mT}$ 、 $\pm 100\text{mT}$
TMAG5170A2	$\pm 75\text{mT}$ 、 $\pm 150\text{mT}$ 、 $\pm 300\text{mT}$
DRV5055A1 、 DRV5055Z1	$\pm 22\text{mT}$
DRV5055A2 、 DRV5055Z2	$\pm 44\text{mT}$
DRV5055A3 、 DRV5055Z3	$\pm 88\text{mT}$
DRV5055A4 、 DRV5055Z4	$\pm 176\text{mT}$

为了能使用任一器件，从磁体表面选择了水平传感器范围 4.65mm ([DRV5055](#)) 和 5.9mm ([TMAG5170](#))，以确保在所有可能位置，输入磁场在 [TMAG5170A1](#) (使用 $\pm 100\text{mT}$ 设置) 和 [DRV5055A4](#) 的 B_L 内。

在此范围下，5.9mm 空气间隙磁场输入显示了预计输入磁场分量。

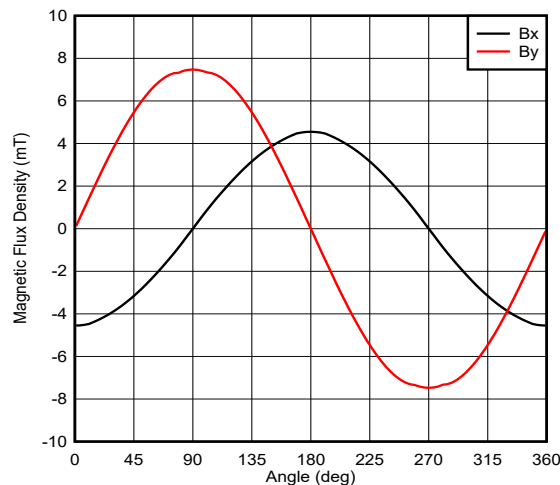


图 2-8. 5.9mm 空气间隙磁场输入

很显然，此范围下的传感器输入适合于 **TMAG5170**，但 X 轴和 Y 轴在振幅上极不匹配。如果直接使用这些输入，生成的角度计算会有效地绘制椭圆形输入。反正切是一个圆函数，如果不加以校正，会导致严重的测量误差。将 X 和 Y 幅度绘制到坐标平面可呈现这一关系。

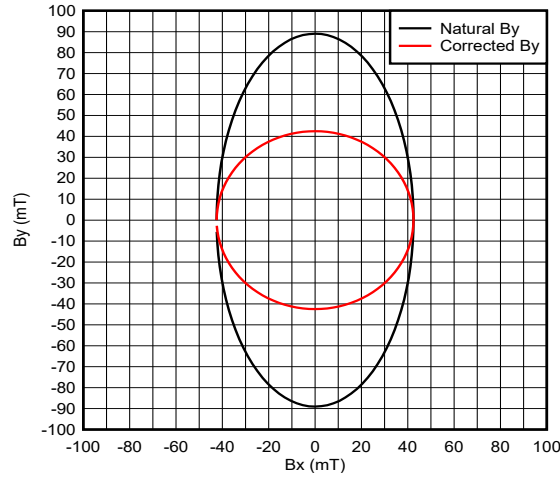


图 2-9. 振幅匹配在角度计算中的优势

有效角度误差很大。若要抵消此影响，应降低 (X 轴) 结果，否则 (Y 轴) 结果需要增益增加。任何一种变换都会将角度计算的输入标准化，并将此误差解析为预计的圆形式。

5.9mm 空气间隙磁场输入表明，由于磁场矢量的方向性，平面内对齐不适合于 SOT-23 封装选项中的 **DRV5055**。当与旋转磁体的中心完美共面时，没有垂直分量。如果将 SOT-23 封装选项用于此器件，传感器将检测磁场矢量的 Z 分量，它在此对齐中对所有角度均为 0mT。最好在此位置使用 LPG 穿孔封装。TIDA-060040 包括此封装型号的可选元件封装尺寸，与 SOT-23 封装的目标位置相邻。确保传感器距离 PCB 的垂直间距相同，以保证每个传感器都可观察到旋转磁体的等效输入，并且传感器以与 PCB 表面正交的方式进行安装。如果使用 **DRV5055** 解决方案，请移除未使用的封装选项以实现更为理想的 PCB 布局。

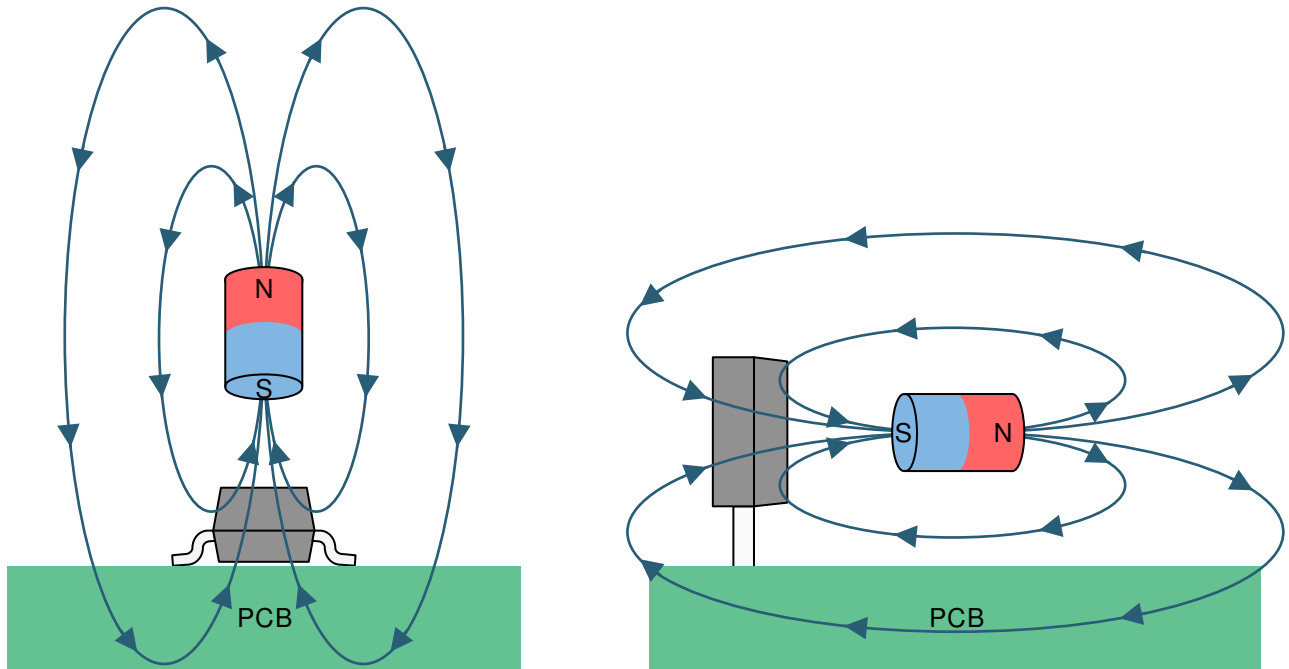


图 2-10. DRV5055 灵敏度

对使用 TO-92 封装的机械组件设置精密控件的另一种方法是，对传感器位置提供垂直偏移，这会产生垂直方向的磁场矢量分量。

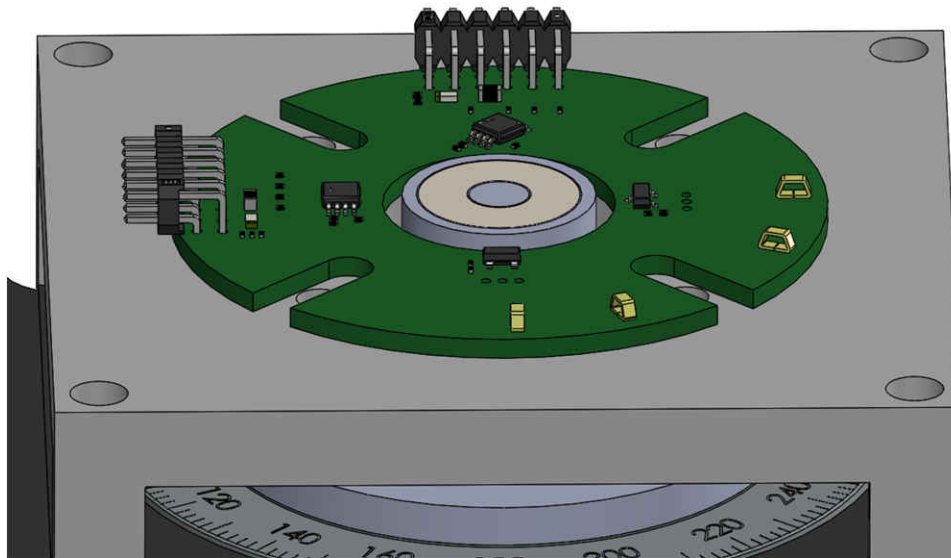


图 2-11. 偏轴传感器对齐

其结果是不再与磁体中心共面的一个对齐。此放置被称为偏轴（或平面外）。实际上，与磁体不共面或在旋转轴上不居中的所有放置都属于此类别。关键特性是，磁场矢量在所有三个轴中具有正弦分量。因此，适合 SOT-23 封装选项的位置有很多。

在偏轴传感器对齐显示的传感器位置中，平面内传感器对齐的唯一变化是垂直偏移 3.175mm。这使得与磁体表面的水平对齐量相同，传感器现在与磁体最上面的表面共面。在此位置中，偏轴磁场输入显示了每个磁场分量的幅度。

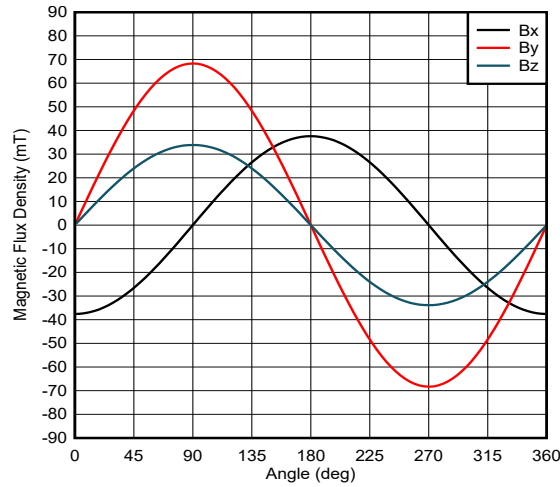


图 2-12. 偏轴磁场输入

根据垂直放置，每个场分量的幅度可能有所不同，使用 3D 传感器则可以选择可提供高质量输入的两个轴。除了偏轴和平面内位置以外，最后要检查的对齐是同轴放置。

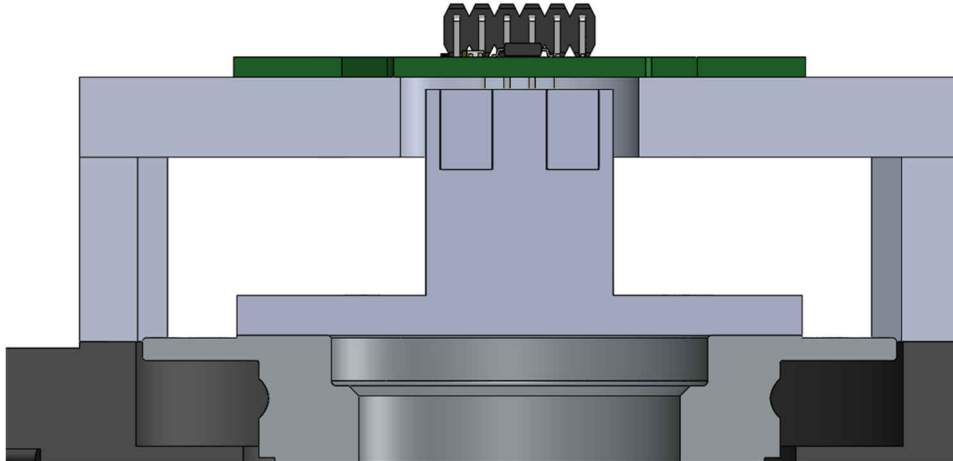


图 2-13. 同轴传感器对齐

这是一个很独特的位置，其中磁场矢量本质上平行于磁体的圆形表面。此条件非常适合 3D 传感器，如 TMAG5170。矢量完全在 XY 平面内，因此单个传感器在监控这些轴时，应具有完全正弦输入。

同轴磁场输入显示了磁体之上 3mm 范围的传感器输入。

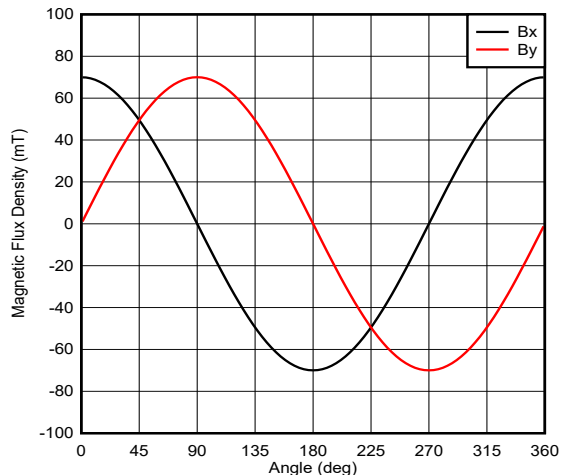


图 2-14. 同轴磁场输入

2.3.5 预期性能

根据图 2-15、图 2-16 和图 2-17 中的模拟结果，现在可以估算因振幅不匹配或非正弦输入而导致的任何角度误差。

- TMAG5170 误差

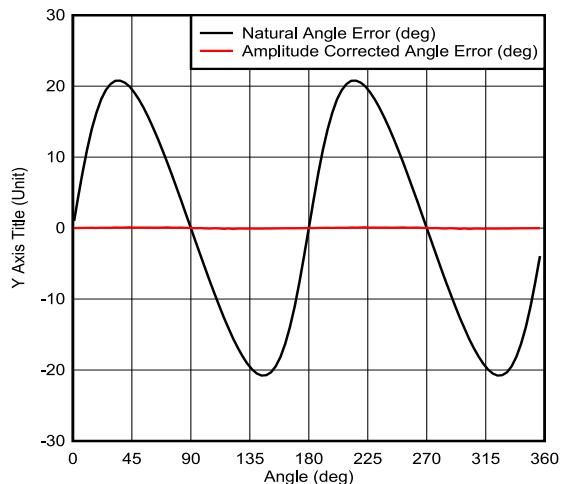


图 2-15. 预计的 TMAG5170 平面内角度误差

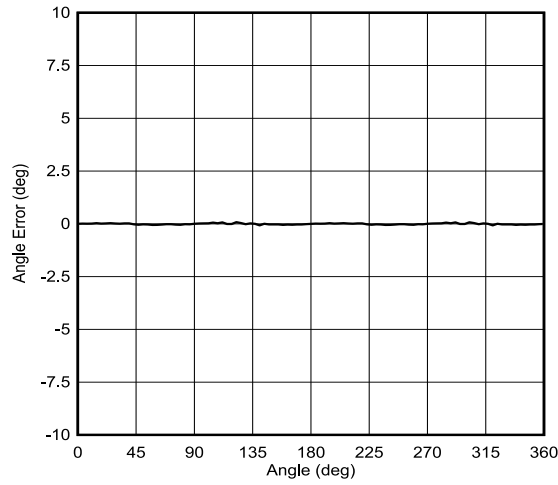


图 2-16. 预计的 TMAG5170 偏轴角度误差

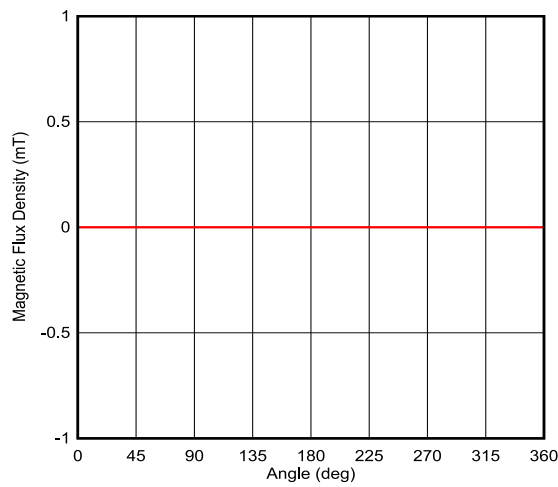


图 2-17. 预计的 TMAG5170 同轴角度误差

- DRV5055 误差

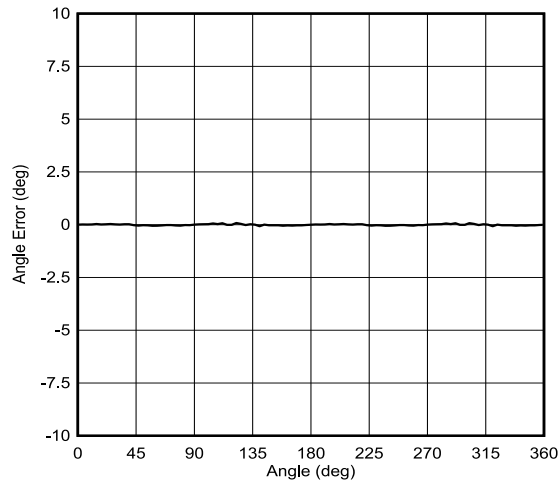


图 2-18. 预计的 DRV5055 偏轴角度误差

在每种情况下可以明显看出，通过振幅校正，每个选项均可提供设计角度编码的可行途径。不过，每种情况均假定了理想的机械容差。[测试结果](#)详细说明了从每种器件配置观察到的实际误差。

无论何种选项，输入基准噪声还会影响总体角度精度。随着输入 SNR 比的变化，生成的峰值噪声性角度误差大致遵循噪声性角度误差中的趋势。对于所用的任何传感器，可以根据角度精度要求来计算所需的输入信号。

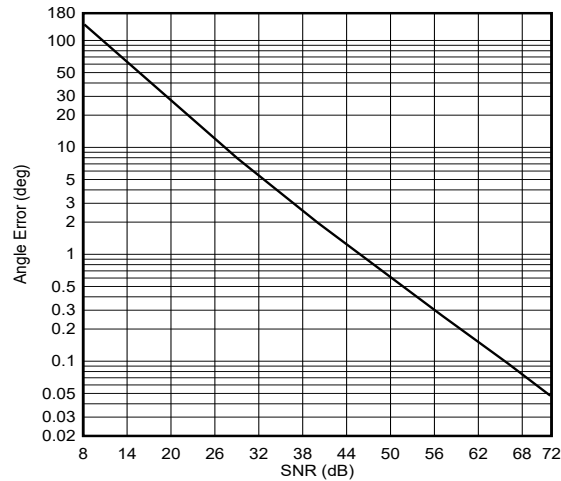


图 2-19. 噪声性角度误差

2.3.6 传感器位置的布局

在使用这些器件设计角度编码器时，PCB 上的实际传感器位置是一个重要因素。传感器在封装中的放置可能会导致 3 个轴中的任何一个产生意外放置误差。

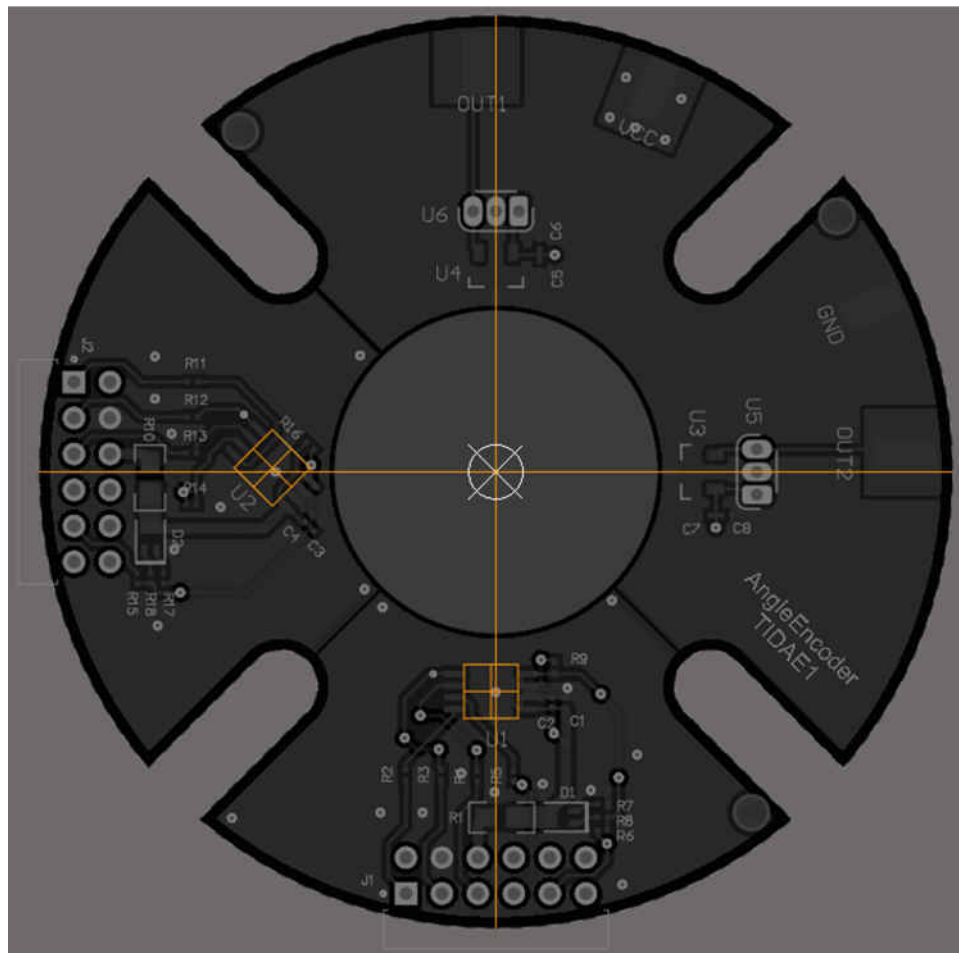


图 2-20. TIDA-060040 传感器放置

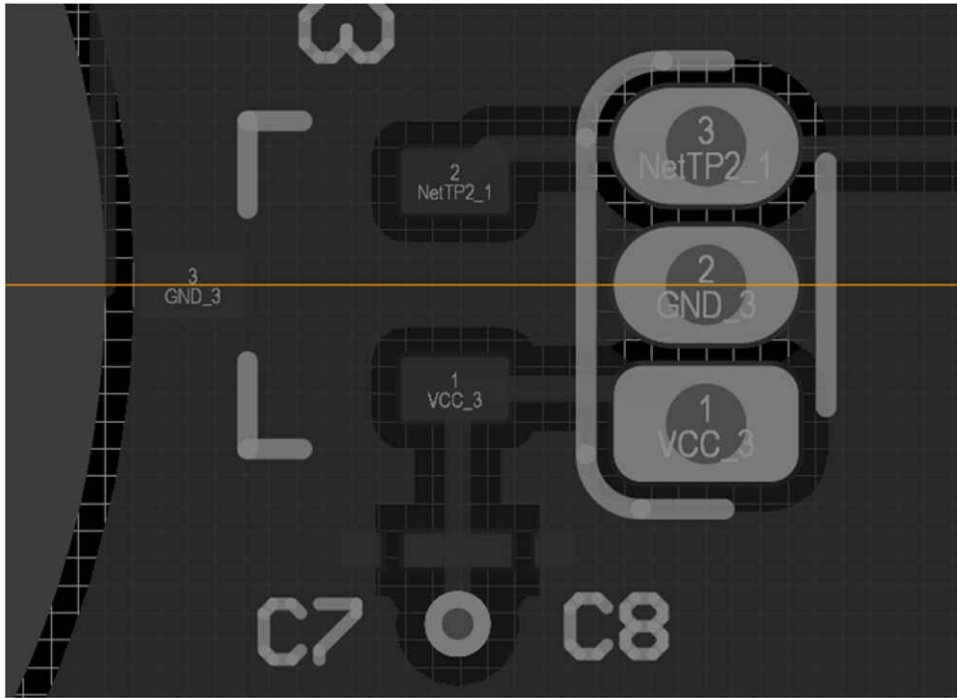


图 2-21. DRV5055 传感器位置

DRV5055 具有一项优势，那就是 XY 平面中的传感器位置相对于封装居中。不过，实施此器件需要在磁体旁分隔 90° 放置两个传感器。此外，根据传感器位置，可能需要使用 LPG 穿孔封装。

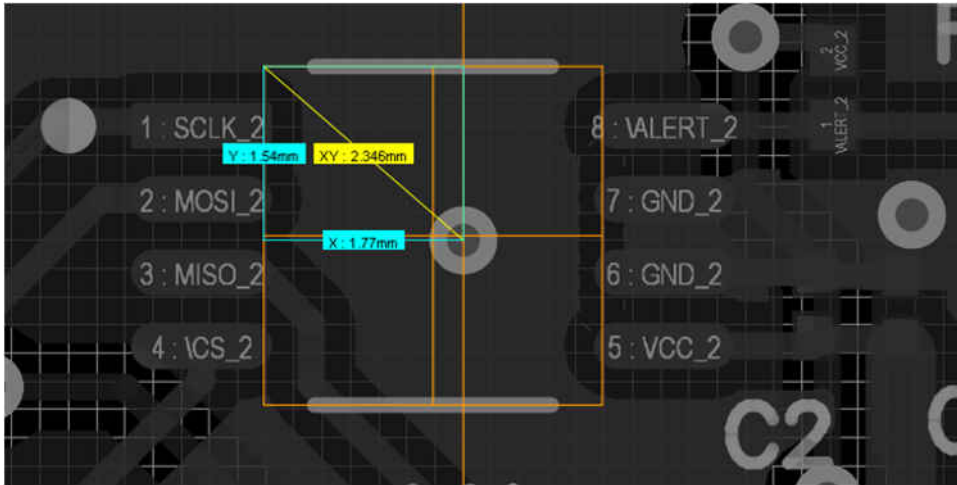


图 2-22. TMAG5170 传感器位置

对于 TMAG5170，布局文件 TIDA-060040 包含指示实际传感器位置的对齐层。此外，还在目标传感器所在位置放置了一个过孔以帮助对齐。

2.3.7 45° 对齐

TIDA-060040 还显示了 [TMAG5170](#) 的额外对齐选项。

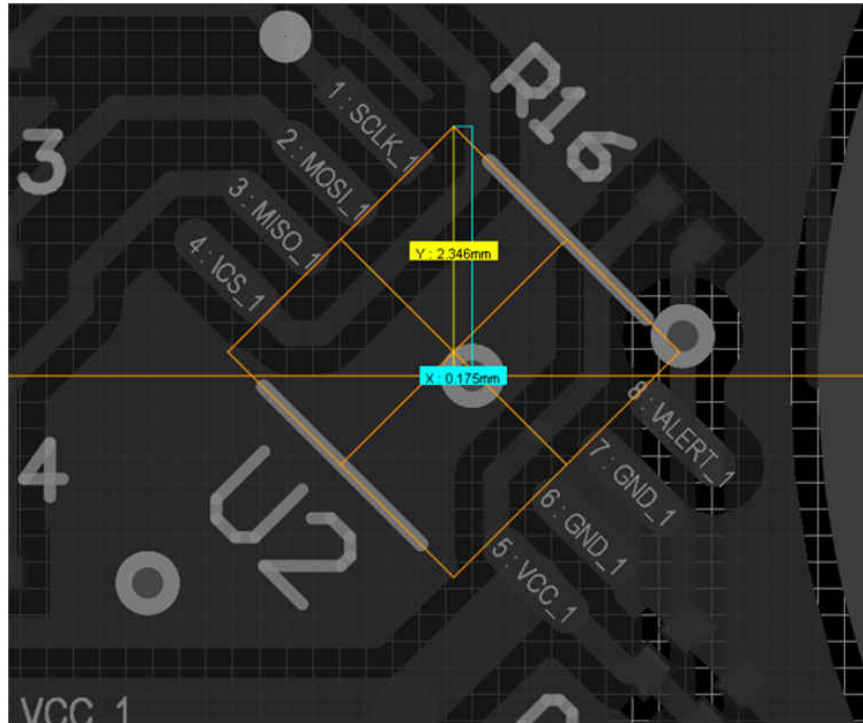


图 2-23. TMAG5170 45° 对齐

第二个传感器位置选项使器件物理旋转 45°。传感器的 X 轴和 Y 轴观察同一输入幅度，而不是正常的正交对齐。对每个轴的有效输入是两个轴的平均值。通过此旋转度数安装器件的好处是，可使传感器位于一个输入可能过大且/或一个输入可能没有足够 SNR 的位置。此对齐提供更加紧凑的解决方案，但会使相位对齐产生误差。通过此方式旋转传感器，会产生相位误差，这是两个通道之间总计不匹配的结果。此相位误差如 [方程式 5](#) 中的 β 所示。若要正确使用具有相位误差的输入，对反正切计算进行以下三角函数调整会很有帮助：

$$A\cos(\theta - \beta) = A\cos(\theta)\cos(\beta) + A\sin(\theta)\sin(\beta) \quad (5)$$

$$\frac{In_2}{In_1} = \frac{A\cos(\beta)\cos(\theta) + A\sin(\theta)\sin(\beta)}{A\sin(\theta)} \quad (6)$$

$$\frac{In_2}{In_1} = \frac{\cos(\beta)}{\tan(\theta)} + \sin(\beta) \quad (7)$$

$$\tan(\theta) = \frac{\cos(\beta)}{\left(\frac{In_2}{In_1} - \sin(\beta)\right)} \quad (8)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\cos(\beta)}{\left(\frac{In_2}{In_1} - \sin(\beta)\right)}\right) \quad (9)$$

应用 [方程式 9](#) 时，验证矢量分量的实际相移非常重要。制造对齐误差以及各种不等振幅输入可能会导致 β 值与传感器的物理旋转不同。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

图 3-1 展示了 TIDA-060040 的原理图和电路板连接。

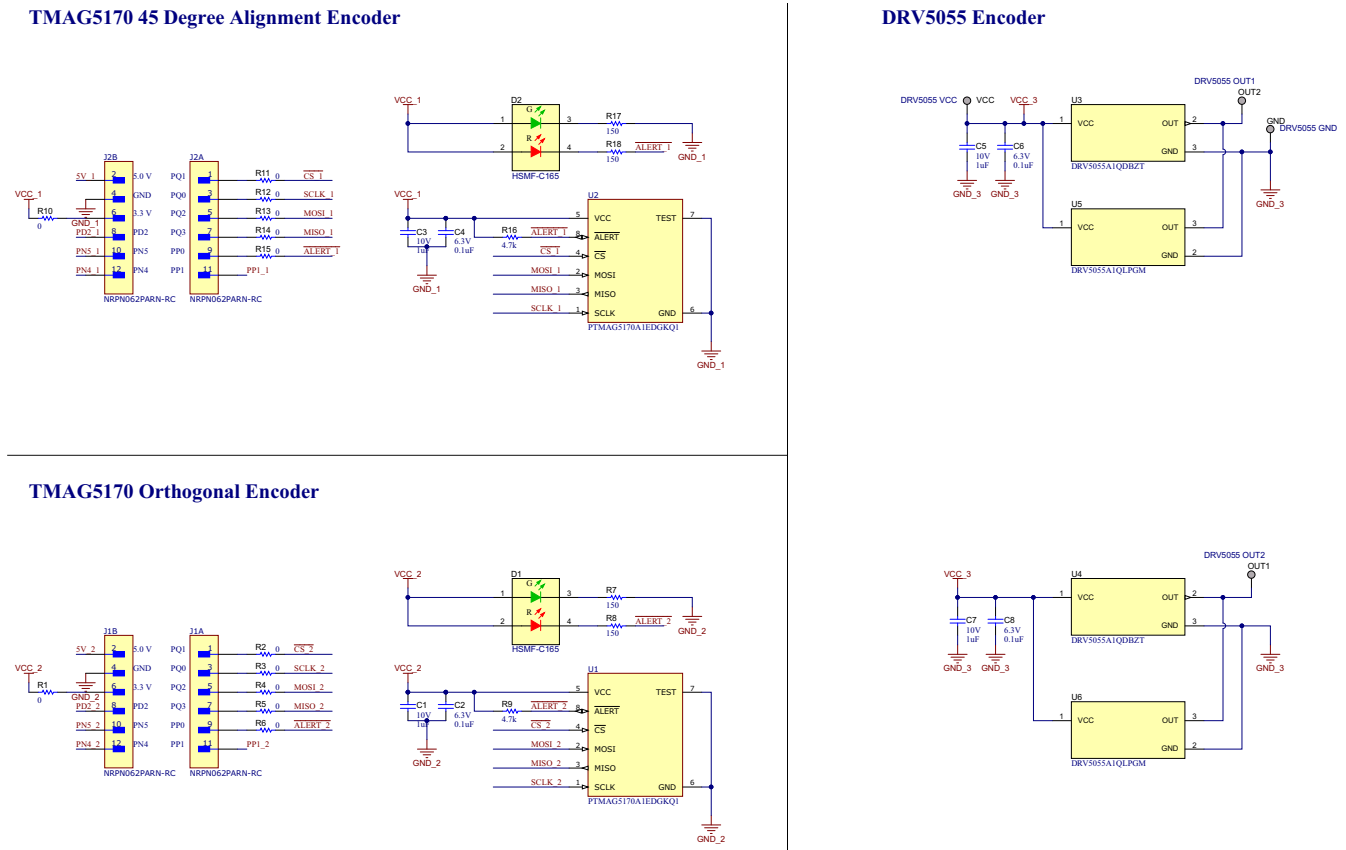


图 3-1. TIDA-060040 原理图

配置了 J1 和 J2 电路板连接器以与 TI-SCB (SENS077) 兼容。

表 3-1. J1 和 J2 引脚连接汇总

引脚	信号
1	nCS
2	未使用
3	SCLK
4	GND
5	控制器输出外设输入
6	3.3 V
7	控制器输入外设输出
8	未使用
9	警报
10	未使用
11	未使用
12	未使用

图 3-2 显示了 TIDA-060040 的布局。

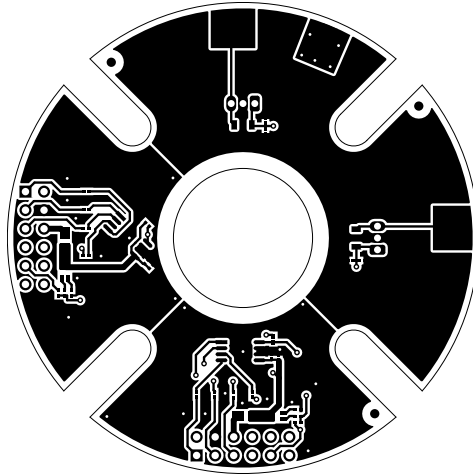


图 3-2. TIDA-060040 布局

可以根据需要使用或调整此布局以适应任何磁体和电机几何形状。此设计包括适用于 [TMAG5170](#) 正交、45° 旋转的 [TMAG5170](#) 和 [DRV5055](#) 的选项，但可以根据需要减少 PCB 布局以用于单个传感器选项。

3.2 测试设置

3.2.1 测试设备

此设计使用以下硬件进行了测试：

- Newport 运动控制器 (ESP301)
- Newport 电动旋转台 (URS50BCC)
- 磁体 (R834DIA)
- 3D 打印磁体支架

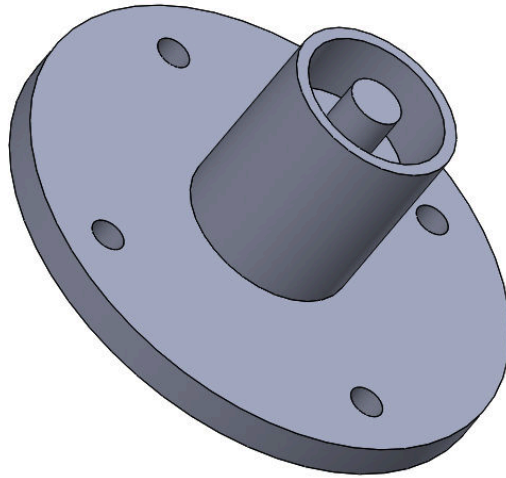


图 3-3. 支架

- 3D 打印安装板

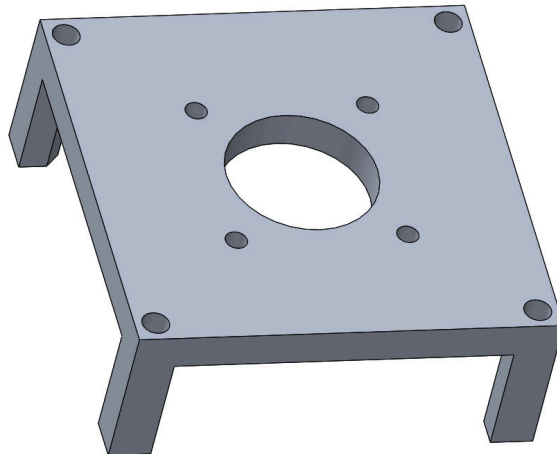


图 3-4. 安装板

- TI-SCB (SENS077)
- Micro USB 电缆

3.2.2 测试硬件配置

1. 将 Newport 旋转台连接到 Newport 运动控制器
2. 将 3D 打印磁体支架安装至 Newport 旋转台
3. 将磁体插入磁体支架中的凹进处
4. 将 TIDA-060040 连接至 3D 打印安装板
5. 将 TIDA-060040 连接到 TI-SCB (TI 传感器控制板)
6. 通过 USB 电缆将 TI-SCB 连接到 PC

3.2.3 测试软件配置和初始数据捕获

1. 启动 [TMAG5170UEVM GUI](#)
 - a. 验证与 TMAG5170A1 传感器的连接
 - i. 有关调试与传感器控制板之间连接的步骤，请参阅 [TMAG5170UEVM 用户指南](#)
 - b. 配置 TMAG5170A1
 - i. 对于所有轴，将 TMAG5170A1 设置为 $\pm 100\text{mT}$ 输入范围
 - 如果输入未达到饱和，可以将通道灵敏度设置为较低值，但用于角度计算的两个轴应匹配。
 - ii. 将 TMAG5170A1 设置为 *有效测量模式*
 - iii. 将 *平均值* 设置为 32x 并将转换方式设置为 XYZZYX
 - Newport 旋转台的最大速度限制为 20 秒/转。
 - iv. 设置 GUI 以在超过 1 次或更多完整旋转期间持续收集数据
 - 捕获 X、Y 和 Z 通道的峰值数据
2. 使用捕获的数据，可以执行系统的一阶校准。
 - a. 根据 X、Y 和 Z 通道输出，选择需要最低灵敏度增益校正的输入。
 - i. [TMAG5170](#) 能够进行 11 位增益校正，倍增因子范围为 0 到 2。
 - ii. 尽可能扩展通道，或使用所需的最低衰减以达到两个正弦输入通道的同等匹配振幅。
 - b. 通过分析峰-峰值输出电平，还可以计算偏差校正以消除信号链误差或外部条件导致的直流偏置。
 - c. 应用灵敏度增益和偏差校正，并验证一次完整旋转过程的结果。对每个轴测量的振幅应完全相同。现在还可以禁用角度计算中不需要的任何轴。
3. 系统现在应已删除器件相关误差，并具有与角度计算相匹配的输入。与机械对齐相关的误差可能仍然存在，捕获旋转数据可消除这些误差。[测试结果](#)一节详细说明了这一过程。

3.3 测试结果

TIDA-060040 按之前讨论的以下三个方向分别进行了测试：同轴、平面内和偏轴。每个方向的结果随后经过校准，使用控制器计算得出的最终误差和内部 CORDIC 输出在一次完整旋转中以 0.25° 步进角度显示。

3.3.1 校准方法

从计算中去除信号链误差后，仍有一些可能的机械源会影响用于计算角度的输入磁场的质量：

- **电机轴倾斜** - 导致 TIDA-060040 与旋转磁体之间产生正交误差。这会使预计场对齐发生固定偏移。
- **电机轴偏移** - 导致传感器位于不同于目标的位置和方向。根据偏移方向，这会影响峰值输入振幅或输入的相位对齐。
- **磁体倾斜** - 当磁体未正交安装到电机轴的旋转轴时发生。磁体在旋转期间出现摆动，并产生不断变化的场方向。
- **磁体和电机轴偏心** - 旋转轴未与电机轴中心对齐或磁体中心未与旋转轴对齐所致。这会在旋转期间造成位置的侧向变化，影响 B 场幅度。
- **焊接和装配对齐误差** - 因焊料回流过程中的封装对齐或安装 TIDA-060040 PCB 时的容差而产生的误差可能会导致各种方向和位置误差，这同样会影响输入的相位和幅度。
- **近场行为** - 与许多磁体类型非常接近时，磁场可能会对传感器产生非理想输入。目标输入场是纯正弦波形。当传感器非常靠近磁体时，所观察的场通常会发生一定程度的失真，具体取决于磁体的几何形状。

先前的所有误差会共同在角度测量中造成非线性问题。这些因素不可预测，它们可能会共同造成重大误差，如果不加以考虑，会导致系统控制不佳。由于这些因素，必须实施最终校准以解决产生的误差，从而达到精密控制。

多点线性化是一种很有用的方法，可用于快速适应系统间的变化。请考虑[周期性角度误差](#)中的假设性误差。

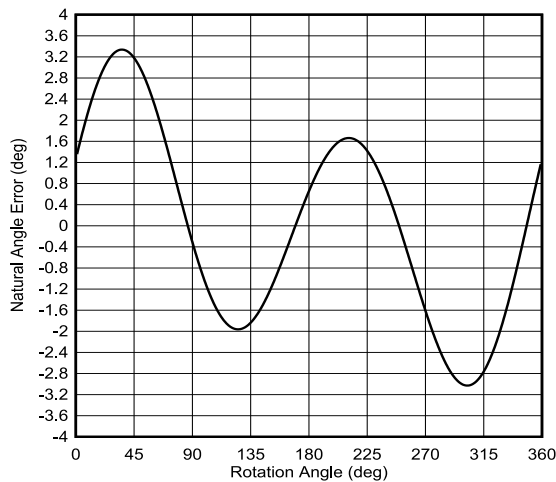


图 3-5. 周期性角度误差

在此示例中，多点线性化捕获任意数量离散点的绝对误差。控制器随即假定对这些点之间的误差进行的线性估算。随着点数量增加，估算的精度接近实际误差。当确定任何给定角度的误差近似值后，可以直接从测得的角度中减去此值。

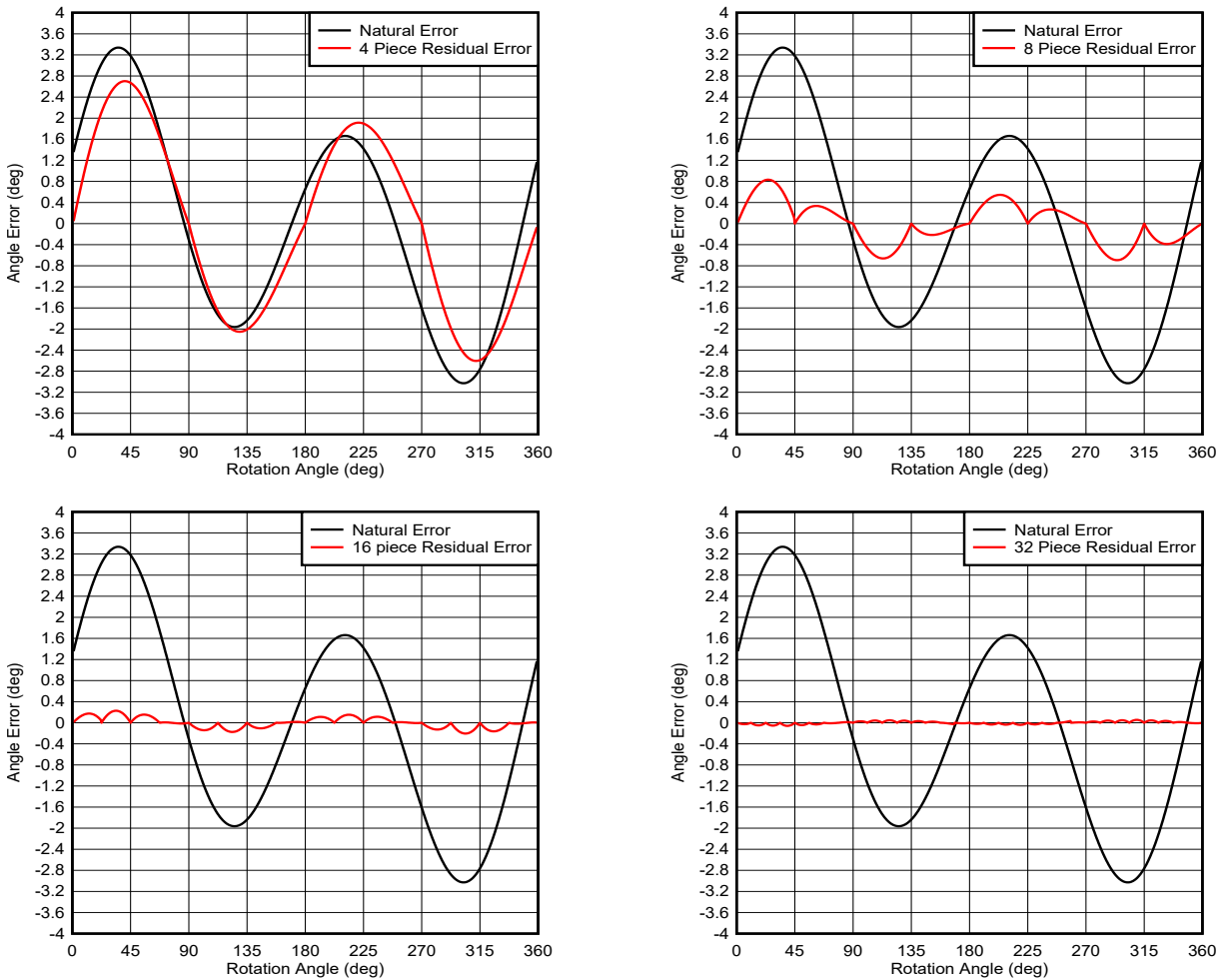


图 3-6. 多点线性化

随着样片数量增加，生成的峰值误差将持续减小。根据所需的系统精度，8 个点到 64 个点通常可提供适当精度。在更高级的方法中，可以将误差曲线与包括旋转频率谐波的一组公式相匹配。通过执行复杂分析，可以生成一系列系数 α_i 和 β_i ，并按方程式 10 所示来使用这些系数：

$$Correction\ Factor = \sum_{i=1}^n [\alpha_i \sin(i*\theta) + \beta_i \cos(i*\theta)] \quad (10)$$

在此公式中，总误差包括测得角度的每个谐波的标量系数。使用此方法生成的结果比多点线性化方法更加准确，并且不需要在内存中存储大量数据。

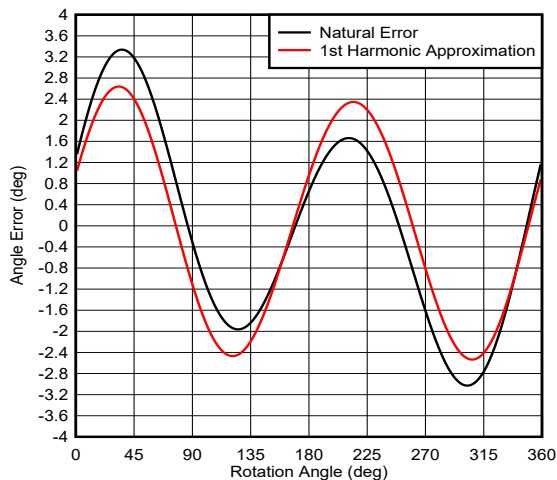


图 3-7. 第一个谐波近似

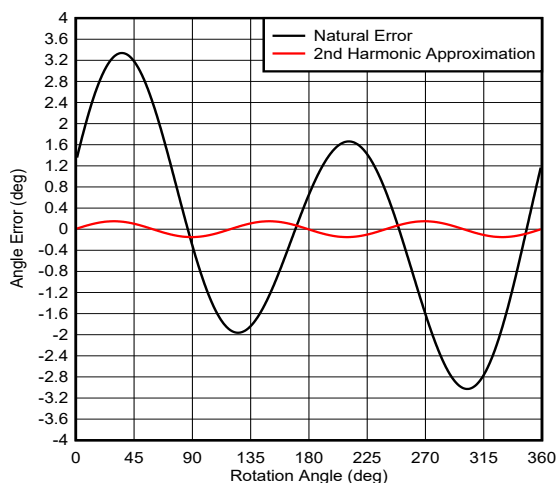


图 3-8. 第二个谐波近似

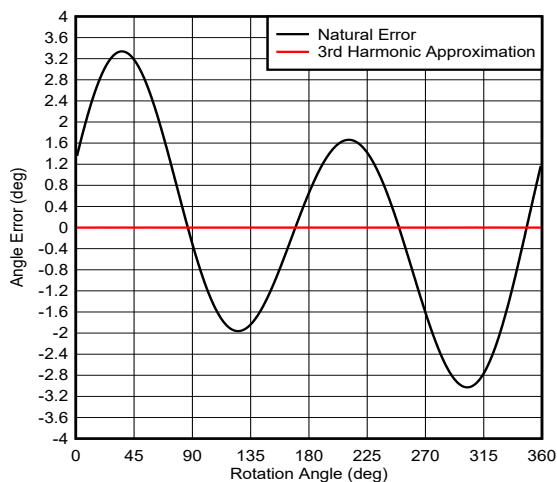


图 3-9. 第三个谐波近似

对于所有测试结果，数据均以 0.25° 间隔捕获并进行分析以减少谐波。

若要在实际制造环境中达成一致结果，可能需要对每个系统进行一定程度上的校准，因为每个器件会在各种机械容差中略有不同。

3.3.2 TMAG5170 同轴

同轴对齐是测量磁场角度的理想情况，但需要关于电机的更多区域。电机必须为双轴，或者轴端不可用于驱动负载。因此在通过任何给定电机实施时，同轴对齐具有最不紧凑的解决方案尺寸。在此方向上，机械误差的影响降至最低；这产生了最出色的未校准结果。

安装板配置为与[传感器位置](#)中显示的仿真结果相匹配。

备注

在每个测试用例中，[校准方法](#)中详述的机械误差在某种程度上都存在，捕获的数据反映了应用振幅和偏差校正后，这些条件的结果。

整个设置的手动装配和制造容差导致的机械误差必须解决。测试结果表明的这些对齐缺陷对于以下目的非常重要：展示对齐误差的重要性以及校准流程如何校正大范围角度误差。受到严格控制的制造规范降低了每种用例所述的误差。

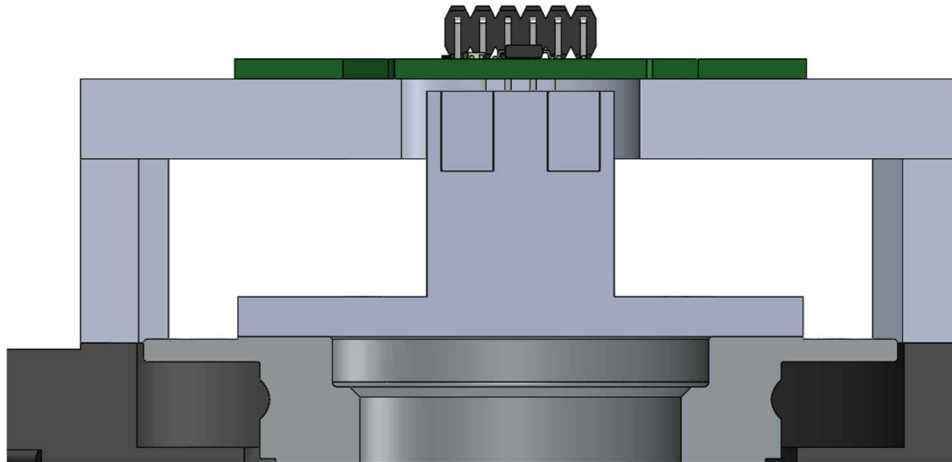


图 3-10. 同轴配置

同轴机械角度误差显示了为此对齐捕获的预校准生成误差。

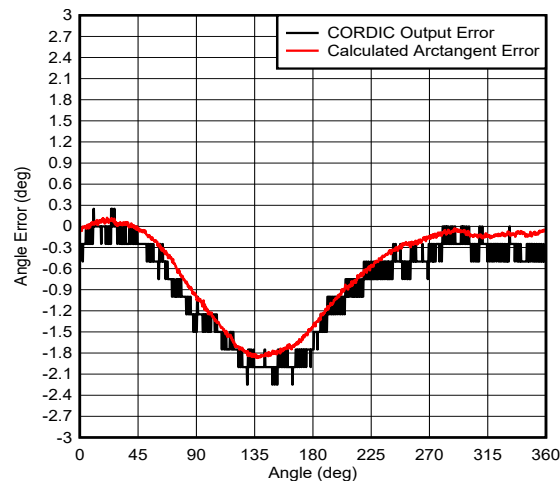


图 3-11. 同轴机械角度误差

在所有对齐情况中，同轴对齐最能容忍机械对齐误差。总的来说，场矢量近乎平行于磁体表面，因此输入的幅度和相移不像其他对齐情况那么大。

表 3-2. 同轴谐波校正因子

谐波	α_i	β_i
1	0.42	-0.73
2	-0.35	0.07
3	-0.01	0.06
4	-0.02	0.01

同轴校准后角度误差显示了在应用谐波数据后，直接反正切计算和 CORDIC 输出的生成误差。

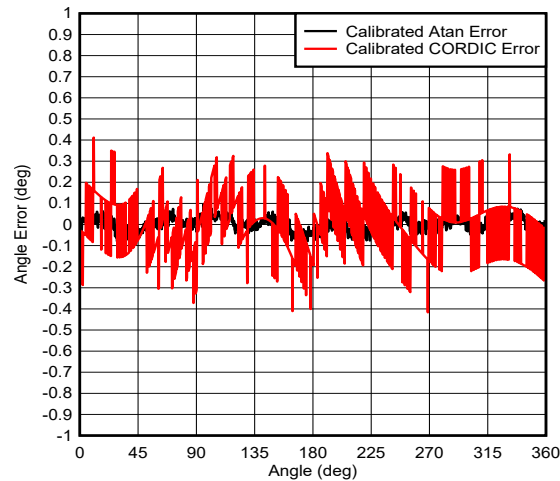


图 3-12. 同轴校准后角度误差

值得注意的是，TMAG5170 CORDIC 输出的 0.25° 分辨率使测量精度受到限制。若要达到极高精度，可从器件的 X 和 Y 分量输出直接计算反正切结果。TMAG5170 CORDIC 输出的优势是，它可减少微处理器的负担，并降低总体测量延迟。

3.3.3 TMAG5170 平面内

平面内对齐与同轴方法不同，在平面内对齐中，传感器与磁体共面放置。这能够实现极小的总体封装解决方案，但会产生极不均衡的输入幅度。

此外，此对齐很容易产生机械误差，这在检查峰值角度误差时非常明显。此位置对于磁体旋转中的偏心误差非常敏感。任何磁体居中失准都会导致不断变化的空气间隙范围。如平面内幅度与空气间隙距离中所示，此范围的微小变化会对磁场幅度产生重大影响。在此位置配置传感器时，一定要格外注意精确安装磁体，这一点非常重要。

此外，在磁体外边缘，场矢量方向随着它环绕相反磁极而不断变化。因此，倾斜和对齐误差将导致相位误差和不断变化的输入振幅。

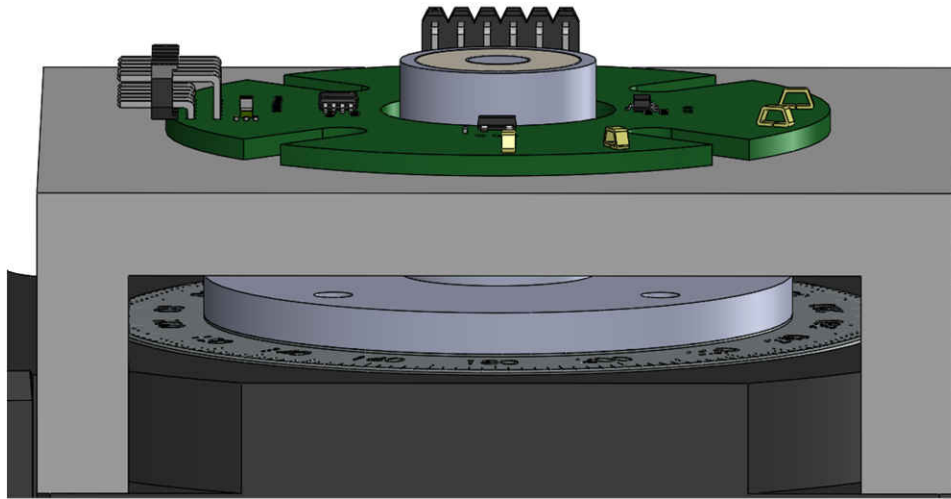


图 3-13. 平面内配置

平面内机械角度误差显示了为此对齐捕获的预校准生成误差。

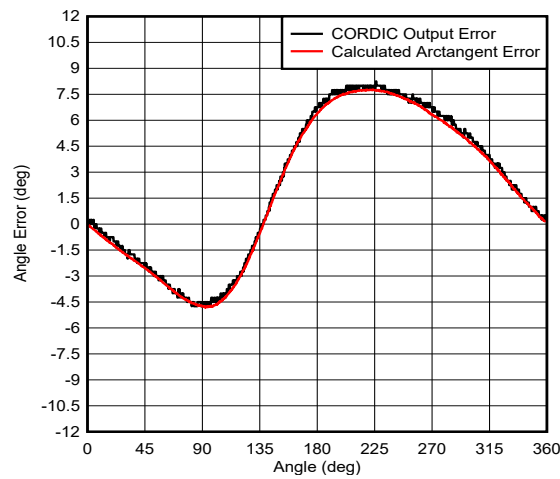


图 3-14. 平面内机械角度误差

针对平面内对齐显示的角度误差很大。此测试设置的装配对齐误差会导致非常严重的角度误差。虽然误差很大，但仍可向最终结果应用校准以达到低于 0.1° 的精度。

表 3-3. 平面内谐波校正因子

谐波	α_i	β_i
1	5.33	2.68
2	-0.5	-1.22
3	-0.26	0.51
4	0.17	0.05
5	-0.04	-0.02

平面内校准后角度误差显示了在应用谐波数据后，直接反正切计算和 CORDIC 输出的生成误差。

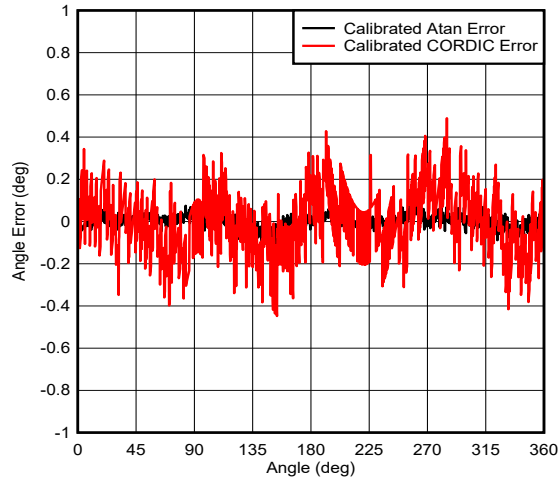


图 3-15. 平面内校准后角度误差

3.3.4 TMAG5170 偏轴

第三个选项是关于磁体的其他所有可能的位置。同轴和平面内的预期输入为纯二维输入，而偏轴情况通常在所有三个方向具有场分量。

TMAG5170 功能广泛，可检测 3D 场，因此可以使用各种传感器方向以及任何两个 90 度异相的矢量分量。在此情况下，使用了 XZ 场分量来计算角度位置。

在此对齐中观察到的误差与通过平面内配置观察到的误差类似。

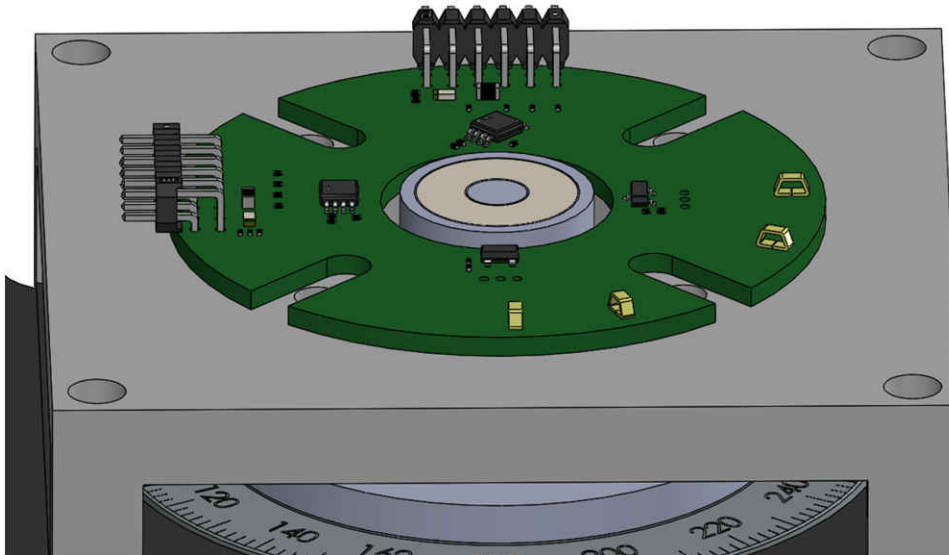


图 3-16. 偏轴配置

偏轴机械角度误差显示了在应用谐波数据后，直接反正切计算和 CORDIC 输出的生成误差。

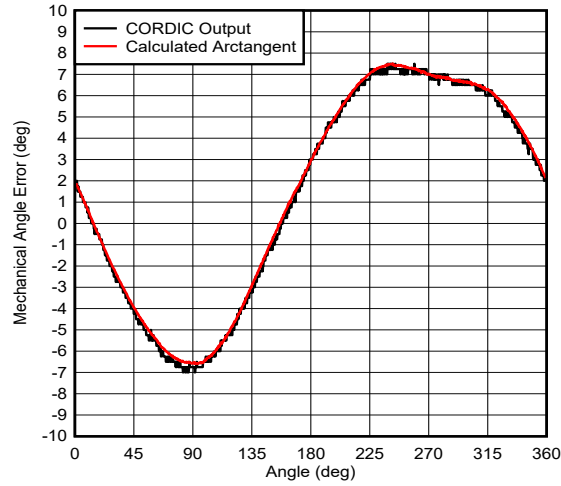


图 3-17. 偏轴机械角度误差

表 3-4. 偏轴谐波校正因子

谐波	α_i	β_i
1	-6.97	-0.55
2	-0.05	1.12
3	-0.15	0.07
4	-0.13	-0.13
5	0.02	0.03

偏轴校准后角度误差显示了在应用谐波数据后所产生的误差。

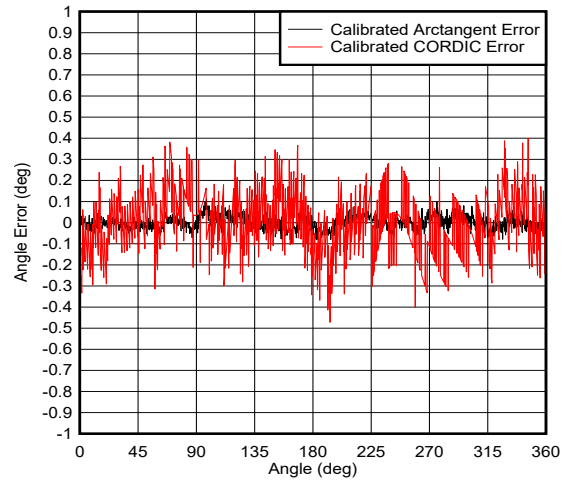


图 3-18. 偏轴校准后角度误差

3.3.5 TMAG5170 45° 对齐

如设计注意事项中所述，45° 对齐选项通过固有匹配针对每个轴观察到的输入幅度，大大降低了调整灵敏度增益的需要。某些灵敏度不匹配仍然存在，这可能需要小幅调整。

此对齐按平面对齐进行测试，测试范围与先前结果完全相同。此对齐无法使用 TMAG5170 的 CORDIC 输出，因为它需要调整反正切计算才能得出有用结果。

将为此对齐捕获在执行相位校正后产生的预校准误差，45° 角度对齐机械角度误差中显示了这些误差。

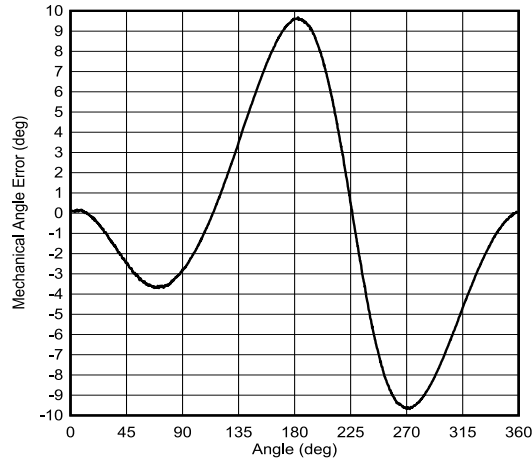


图 3-19. 45° 角度对齐机械角度误差

表 3-5. 45° 角度对齐谐波校正因子

谐波	α_i	β_i
1	-2.64	4.34
2	0.18	-5.59
3	0.82	0.51
4	-0.43	-0.05
5	0.06	-0.1
6	0	0.05
7	-0.025	-0.005

45° 校准后角度误差显示了在应用谐波数据后所产生的误差。

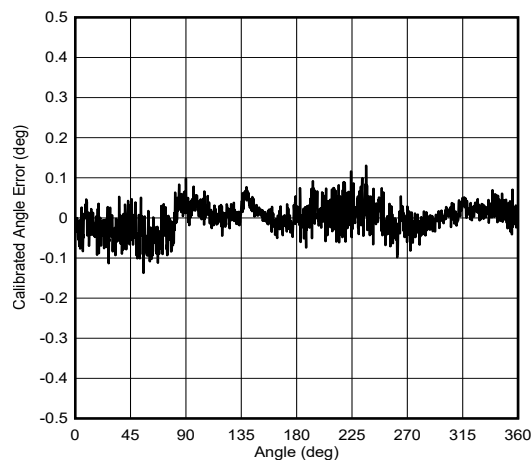


图 3-20. 45° 校准后角度误差

3.3.6 DRV5055 偏轴结果

对于此器件，在对捕获的模拟数据执行计算之前，传感器的灵敏度匹配需要通过控制器进行标准化。此对齐需要传感器按 90° 散布在磁体上，并且占用的空间比单个 **TMAG5170** 更多，更可能会产生机械不同轴。尽管存在这些缺陷，但仍可以按照相同的谐波调整方法来消除角度误差。

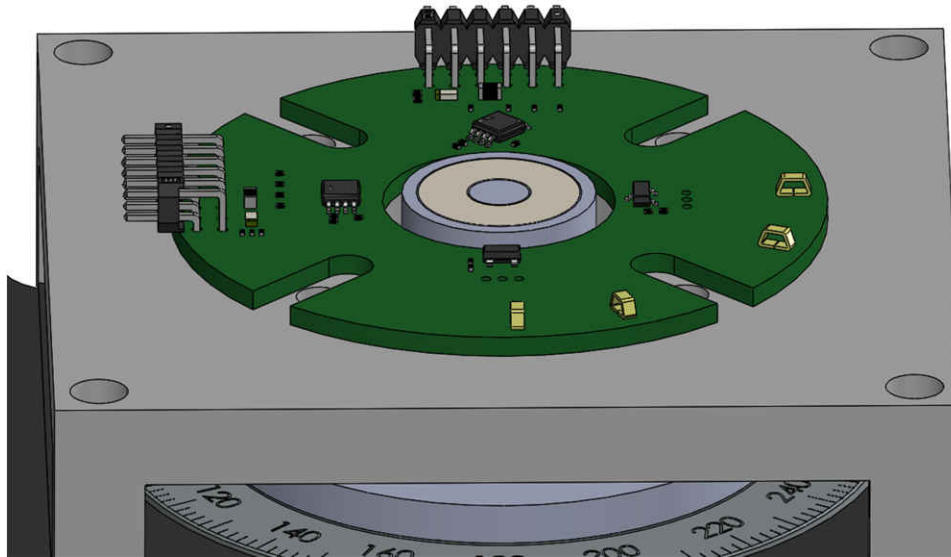


图 3-21. DRV5055 偏轴配置

DRV5055 偏轴机械角度误差显示了为此对齐捕获的预校准生成误差。使用此配置时观察到的挑战是，系统中可能的机械误差数量现在因存在第二个传感器而加倍。这会产生更复杂的误差曲线。尽管如此，仍可以使用相同的校准程序并提供出色结果。

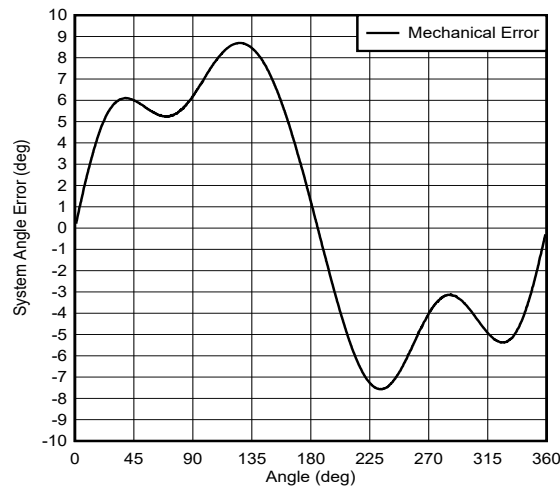


图 3-22. DRV5055 偏轴机械角度误差

谐波	α_i	β_i
1	-7.3	0.35
2	1.17	0.22
3	-2.23	0.28
4	-0.81	-0.14
5	-0.075	0.01
6	-0.035	0.02
7	-0.03	-0.005
8	-0.01	0

DRV5055 偏轴校准后角度误差显示了在应用谐波数据后所产生的误差。

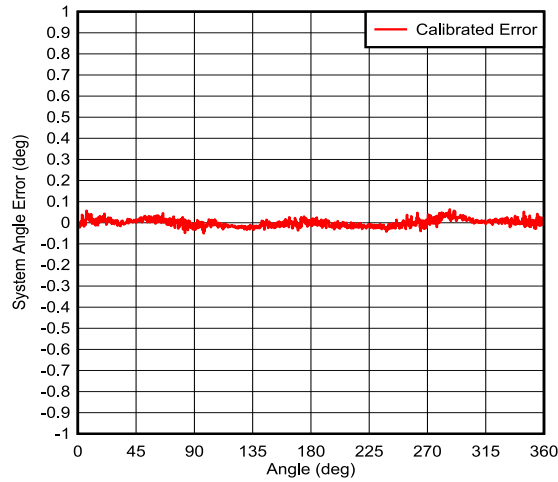


图 3-23. DRV5055 偏轴校准后角度误差

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

若要下载原理图和布局，请参阅 [TIDA-060040](#) 的设计文件。

4.1.2 BOM

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-060040](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

[TMAG5170UEVM GUI](#) TMAG5170UEVM GUI 提供了一个简单平台，可配置器件寄存器并监控和记录 TMAG5170A1 和 TMAG5170A2 的输出。

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[TMAG5170 具有 SPI 的高精度 3D 线性霍尔效应传感器](#)数据表
2. 德州仪器 (TI)，[DRV5055 比例式线性霍尔效应传感器](#)数据表

4.4 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](#)》。

4.5 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。

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司