

### 摘要

随着对自动化精密控制系统的需求增加，设计更可靠且不太可能因机械磨损而失效的系统的需求也在增加。其中许多应用都需要检测角旋转。虽然可以使用多个一维传感器来实现此功能，但新型三维传感器可提供更大的灵活性和准确性，同时支持更紧凑的设计。

### 内容

<b>1 引言</b> .....	2
1.1 使用一维传感器进行角度测量.....	2
1.2 角度测量难题.....	3
<b>2 多轴传感器的优势</b> .....	6
2.1 简化的机械放置.....	6
2.2 灵敏度匹配.....	9
2.3 CORDIC 角度估算.....	9
2.4 篡改和杂散磁场检测.....	12
<b>3 角度测量注意事项</b> .....	15
3.1 传感器对齐.....	15
3.2 传感器校准.....	16
3.3 输入参考噪声.....	17
3.4 采样率的影响.....	17
<b>4 实际应用</b> .....	19
4.1 按钮式旋钮.....	19
4.2 离轴设计.....	21
<b>5 总结</b> .....	23
<b>6 参考文献</b> .....	24
<b>7 修订历史记录</b> .....	24

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

角度测量是系统反馈的一种重要形式，适用于各种应用。可以使用霍尔效应传感器计算精确的旋转位置，这将提高整体系统的可靠性和成功率。在检测机械臂的位置、施加到脚踏板的力或者旋钮或液位控制的位置时，角度精度还可以改善最终用户的整体系统控制。

### 1.1 使用一维传感器进行角度测量

使用旋转磁体进行角度测量的传统方法是利用两个线性霍尔效应传感器，这两个传感器与径向圆柱体磁体位于同一平面内，相隔  $90^\circ$ 。

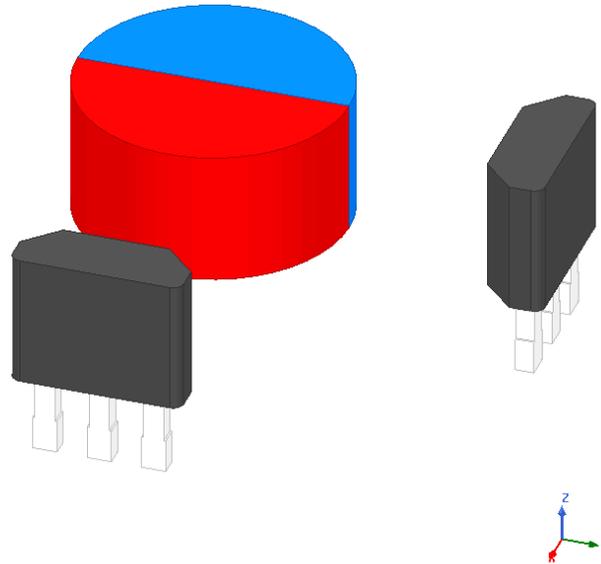


图 1-1. 双传感器角度测量

标准霍尔效应传感器只能检测垂直于器件表面的磁通密度或  $B$  场分量。在采用图 1-1 中的配置时，每个传感器仅检测  $B$  场的一部分，该部分沿一个轴从磁体中心沿径向向外指。当磁体旋转时，生成的输出会产生匹配的正弦和余弦波形，并具有与物理位置相关的  $90^\circ$  偏移。我们可以观察到，当磁体的磁极完全对准传感器时，该传感器检测到的峰值磁通密度就会出现。

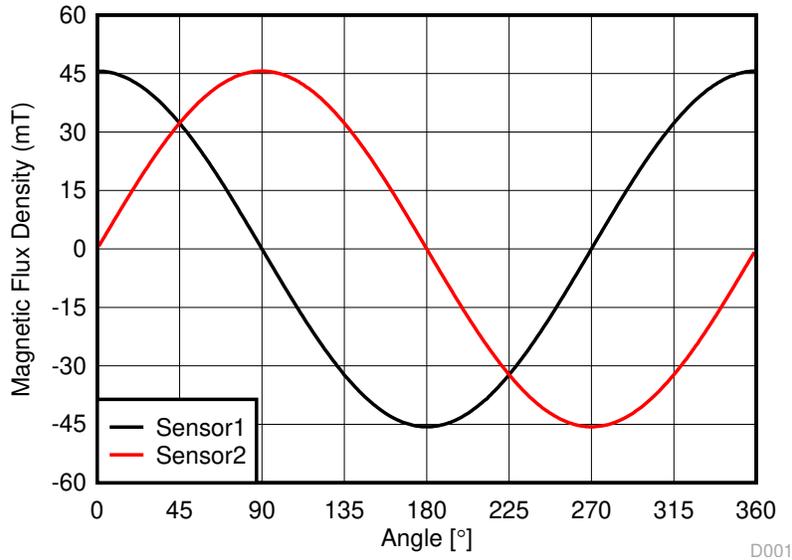


图 1-2. 双传感器输入信号

考虑到输出的三角关系，可以使用反正切函数来计算角度。具体而言，许多数学库中常见的 ATAN2 或 ARCTAN2 函数能够接受来自全部四个象限的笛卡尔 (X,Y) 输入，并可计算相关的角度。

该关系提供了一种可靠的方法来确定旋转磁体的角度。[线性霍尔效应传感器角度测量理论、实现和校准应用报告](#) 是一个更详细讨论该配置的附加资源。

## 1.2 角度测量难题

在使用两个霍尔效应传感器计算角度时，必须解决一些难题。

首先，正确对齐需要足够大的 PCB 面积，以便将两个传感器正确放置在与磁体具有合理距离的位置。考虑一个半径和厚度均为 3.125mm (0.125in) 的 NdFeB 型磁体。

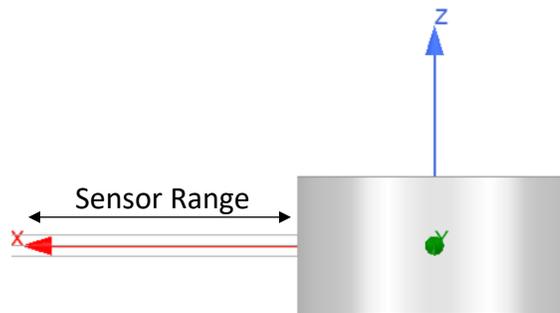


图 1-3. 示例磁体

磁体表面到传感器的距离是变化的（在图 1-3 中用“传感器距离”表示），我们可以分析观察到的输入。如果磁体的材料等级也发生变化，那么我们将获得任何给定传感器的各种灵敏度选项的间距曲线。例如，考虑一个峰值输入范围为  $\pm 50\text{mT}$  的传感器。假设提供 10% 的缓冲区以避免输出钳位风险，我们将获得图 1-4 中所示的磁场行为。

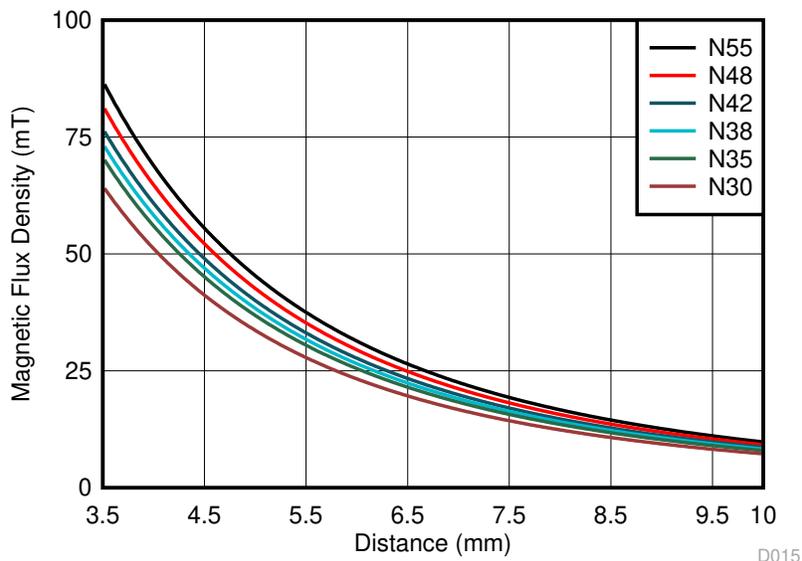


图 1-4. 各种磁体材料的磁通密度与距离之间的关系

请注意，N35 磁体的检测距离为 4.5mm，而 N55 磁体相对于传感器的目标距离为 5mm。该距离将对任何目标应用中的设计机制产生直接影响。任何双传感器解决方案都需要足够的物理空间来将两个传感器放置在选定的距离处。在该距离上，即使是机械间距的微小变化也会对观测到的大小产生重大影响。两个传感器的间距不匹配将导致误差。

其次，务必考虑器件灵敏度变化。考虑一个最大灵敏度误差为  $\pm 5\%$  的传感器。在最坏的情况下，一个传感器将报告施加了 52.5mT 的满量程输出，而另一个传感器报告施加了 47.5mT。当使用预期输入为 45mT 的 N35 磁体时，旋转磁体时的输出图如图 1-5 所示。

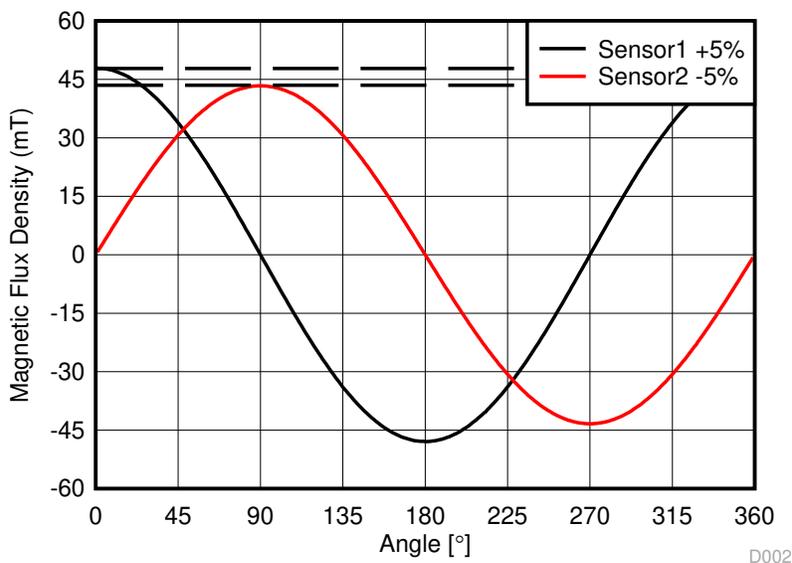


图 1-5. 在传感器不匹配的情况下检测到的两个传感器输入

可以使用反正切计算来确定该灵敏度误差产生的角度误差。图 1-6 展示了周期为  $180^\circ$  的循环重复误差。最小误差对应于任一 B 场输入的过零。在这种情况下，该灵敏度不匹配导致的峰值角度误差为  $2.86^\circ$ 。

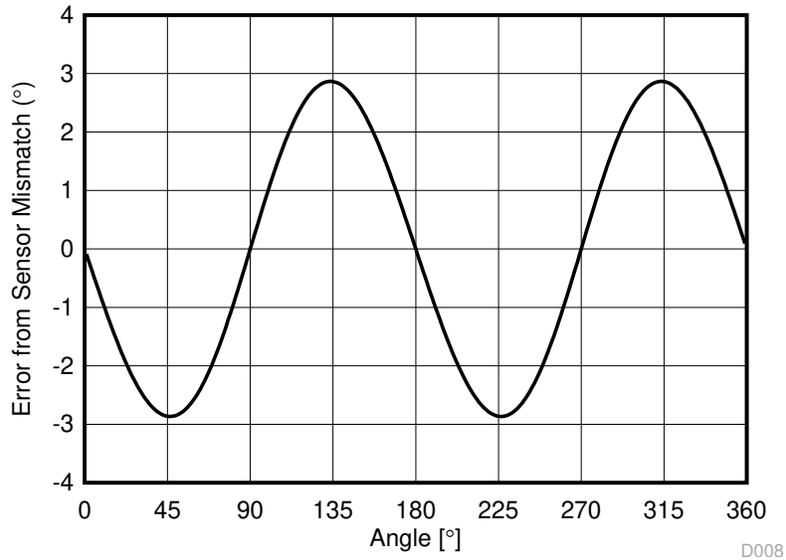


图 1-6. 计算得出的传感器不匹配导致的角度误差

在任何系统中，磁体对齐和居中会出现额外的误差，从而可能导致偏移、摆动或倾斜，这是正常现象。组件中的对齐误差可能会影响传感器之间的 90° 间距，或者物理组件可能无法完全对齐。所有制造容差都会对系统产生影响，预计会出现额外的误差，需要进行校准以实现最佳性能。

## 2 多轴传感器的优势

一种将所讨论的与一维 (1D) 传感器相关的挑战降至最低的新方法是将多个灵敏度轴集成到单个器件中。在前面的示例中，在每个传感器上仅观察到磁场的一个分量。

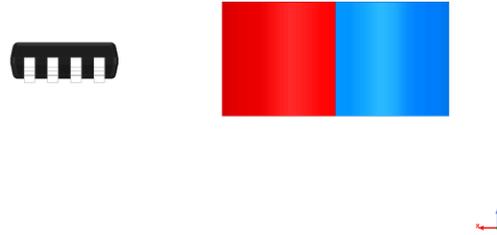


图 2-1. 平面中的 3D 传感器

如果一个传感器要在最初检查的同一位置捕获  $B$  场矢量的  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  分量，我们可以减少器件数量并解决与机械装配相关的不确定性。在与 1D 案例中探讨的相同距离处仅使用一个这样的传感器时，我们可以观察到图 2-2 所示的磁场。

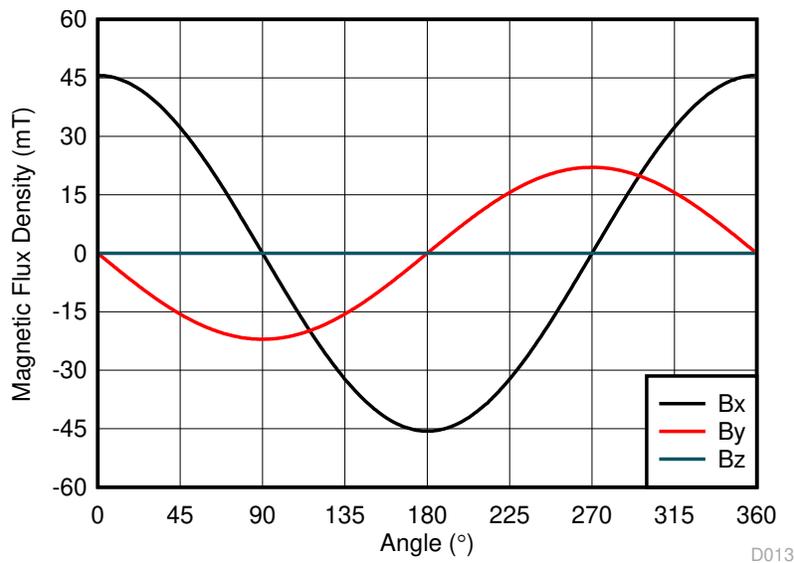


图 2-2. 3D 平面内传感器的磁通密度与角度之间的关系

请注意，在该位置， $X$  和  $Y$  分量仍然共享正弦和余弦关系。由于传感器位置与磁体完全对齐，因此  $Z$  分量保持为零。鉴于  $X$  和  $Y$  输入之间的自然  $90^\circ$  相移，具有全部三个灵敏度轴的传感器（例如 [TMAG5170](#)）非常适合检测旋转磁体的角度位置，无论封装方向如何都是如此。或者，[TMAG5170D-Q1](#) 是 [TMAG5170](#) 的双芯片版本，可在系统需要冗余时使用。

如图所示，峰值大小不相等，我们讨论过这是双传感器方法中的一个重要误差源。幸运的是，[TMAG5170](#) 器件提供了一种简单的解决方案来实现峰值匹配，本文档对此进行了详细探讨。

### 2.1 简化的机械放置

[TMAG5170](#) 器件提供广泛的机械放置选项。通常，存在三种主要配置，称为平面内、同轴和离轴。

平面内对齐（如图 2-1 所示）描述了我们已经显示的配置，其中传感器与旋转磁体的中心垂直对齐，因此以与磁体的磁极共面的方式放置。

同轴放置是指传感器沿着径向磁体的旋转轴放置，如图 2-3 所示。当磁体围绕 Z 轴旋转时，传感器位置可以相应地沿着 Z 轴放置在磁体正上方或正下方。保持与第一个示例相同的空气间隙，但位移沿 Z 方向向下，而不是沿 Y 方向向外。

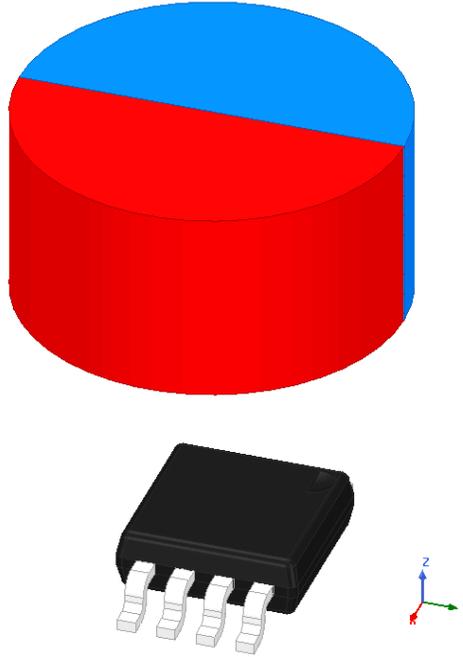


图 2-3. 同轴放置

此处磁场的 X 和 Y 分量的响应完全匹配。这种放置为多轴传感器提供了最简单的实现，因为输入在幅度和  $90^\circ$  异相上自然匹配。

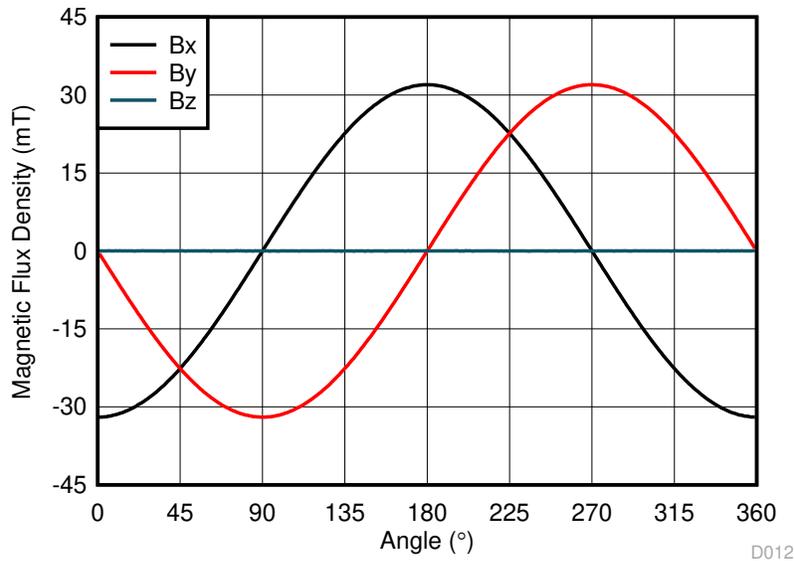


图 2-4. 同轴磁场分量

最后一个选项是离轴放置，它可以是合理接近磁体的任何其他位置。例如，假设我们继续保持磁体和传感器之间的垂直空气间隙，但现在将传感器移动到磁体外周正下方的位置，如图 2-5 所示。

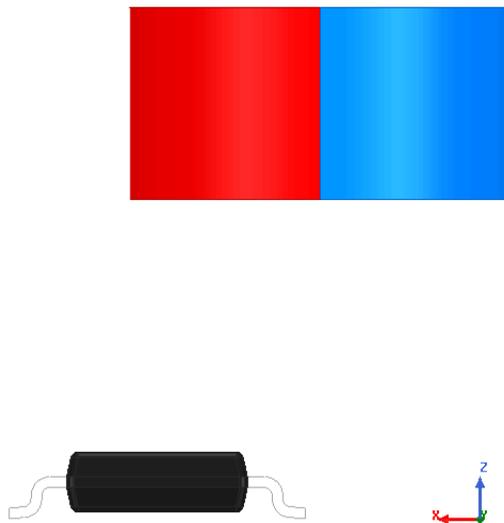


图 2-5. 离轴放置

在该位置，我们在 X、Y 和 Z 轴上分别观察到一部分磁场。磁场矢量的 X 和 Z 分量与 Y 分量的相位差均为 90°。

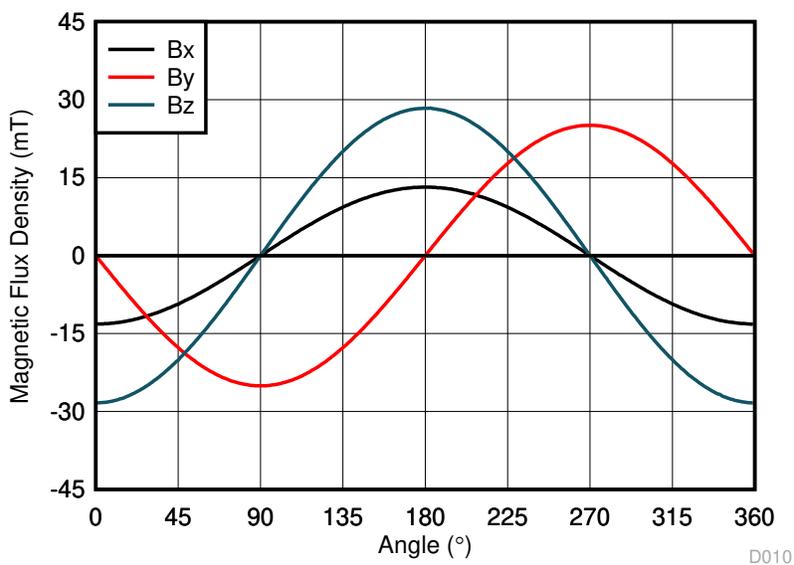


图 2-6. 离轴磁场分量

在此处，最好选择磁场矢量的 Y 和 Z 分量进行角度计算。这些输入将提供最大的信噪比，并且与 X 和 Y 更加匹配。

## 2.2 灵敏度匹配

每当器件灵敏度匹配时，每个传感器都会产生相等的振幅输出，图 1-6 中所示的场景就会得到解决。为了获得最大的设计灵活性，我们需要一种在使用平面内和离轴对齐时实现匹配的方法。在其中的每种配置中，观察到场分量之间的峰值振幅不相等并不少见。鉴于此行为，将这些信号与 ATAN2 函数一起使用自然会出现类似于在灵敏度不匹配时观察到的误差。随着振幅失配的增加，角度误差的严重程度也将同样增加。

单个封装中的霍尔元件采用相同的制造和工艺，因此有理由期望同一器件中任何两个传感器之间的性能更自然地匹配。然而，即使传感器完全匹配，我们仍然可以预测由不相等的输入幅度导致的误差。

TMAG5170 允许用户通过衰减两个输入中的较大者来归一化计算，从而解决该问题。例如，我们可以调整平面内示例中看到的峰值振幅，这样预期的角度精度将仅受以输入为基准的噪声和量化误差的限制。

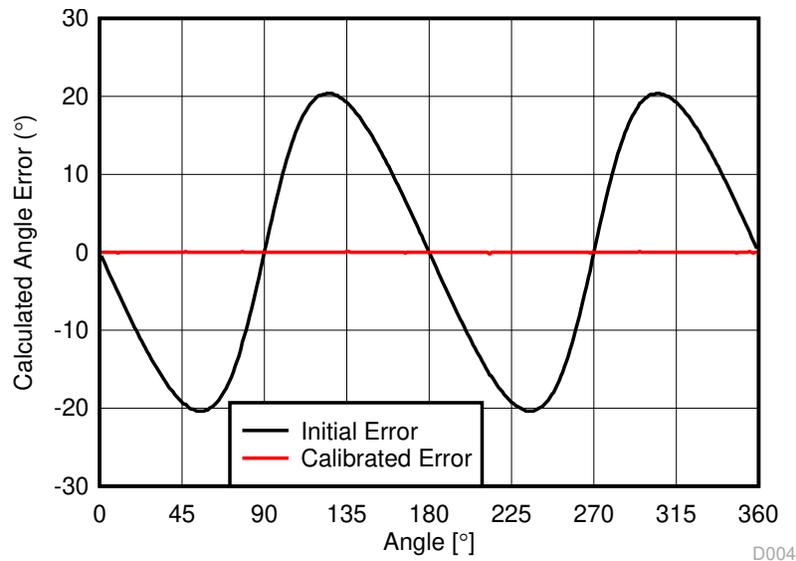


图 2-7. 平面内角度误差与输入校正之间的关系

将两个输出相互归一化的功能使 TMAG5170 在任何角度检测应用中都具有通用性。

## 2.3 CORDIC 角度估算

CORDIC (即坐标旋转数字计算器) 为数字系统使用坐标数据计算角度提供了一种快速有效的方法。该算法通过执行二进制搜索以围绕原点旋转一个点，直到生成的矢量位于单个轴上，从而快速近似计算角度。由于坐标输入以迭代阶跃旋转，因此可以通过所有阶跃的总和来估算起始角度。完成这些旋转后产生的结束位置也将产生输入矢量的大小。当与多轴霍尔效应传感器的输出一起使用时，该算法被证明是快速且精确的角度计算的极佳选择。考虑图 2-8 中的点。

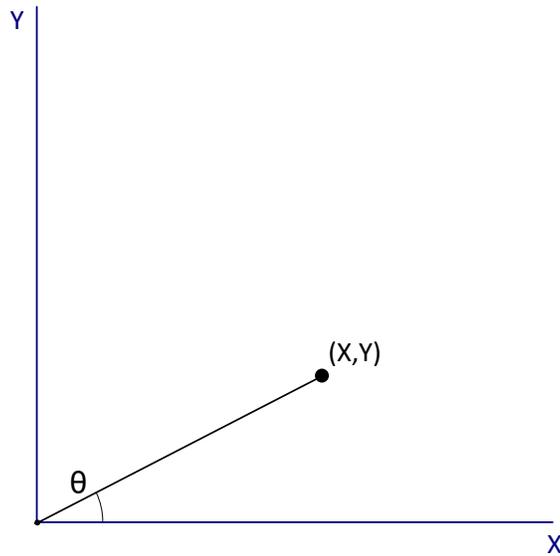


图 2-8. CORDIC 输入

如果将该点顺时针旋转  $45^\circ$  (表示为  $\alpha_0$ )，则新生成的矢量将离开第一象限，如图 2-9 所示。

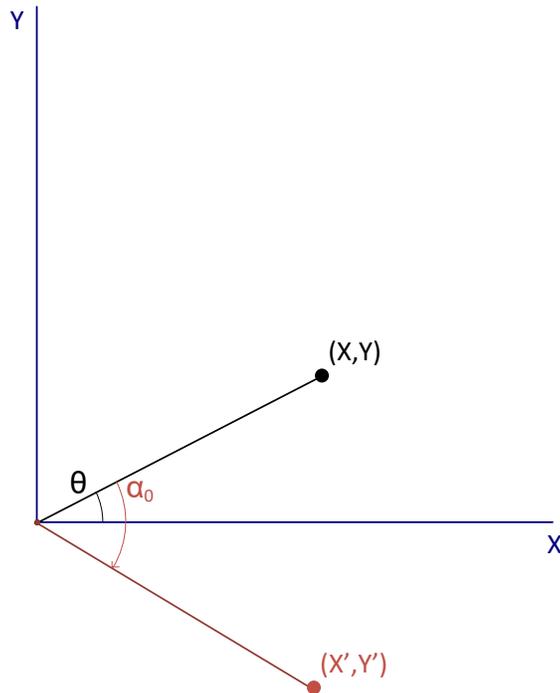


图 2-9. CORDIC 第一个阶跃

由于目标是将矢量与 X 轴对齐，因此在下一个阶跃中必须逆时针调整旋转方向。在下次迭代中，坐标将逆时针旋转  $22.5^\circ$  ( $\alpha_1$ )。此处的结果不会产生象限变化，因此旋转方向会继续沿此方向。此过程继续进行，添加和减去角度阶跃并更改旋转方向，直到结果与 X 轴对齐。如图 2-10 所示，5 次迭代后的近似角度约为  $19.69^\circ$ 。

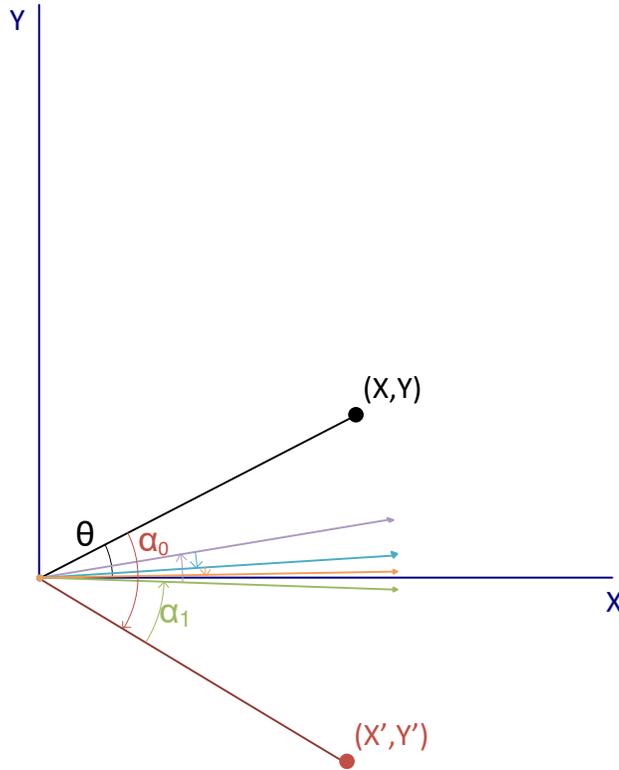


图 2-10. CORDIC - 5 次迭代

在方程式 1 中的矩阵乘法之后描述了在空间中旋转坐标点的代数过程。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x' = x \cos(\alpha) - y \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$y' = x \sin(\alpha) + y \cos(\alpha) \quad (3)$$

如果从结果乘积中分解出  $\cos(\alpha)$  因子，那么我们将得到公式 4 和 5：

$$x' = \cos(\alpha) \times (x - y \tan(\alpha)) \quad (4)$$

$$y' = \cos(\alpha) \times (y + x \tan(\alpha)) \quad (5)$$

随着算法的进行，我们必须确定旋转的方向。如果我们选择逆时针旋转，结果将产生公式 6 和 7：

$$x' = \cos(\alpha) \times (x + y \tan(\alpha)) \quad (6)$$

$$y' = \cos(\alpha) \times (y - x \tan(\alpha)) \quad (7)$$

请注意，此处唯一的区别是每个公式中的运算是反转的。因此，我们可以通过检查操作符号轻松确定旋转方向。该旋转可以由一个可选值表示，我们将其表示为  $\mathbf{d}$ 。

$$d_n = \begin{cases} 1 & \text{for CW rotation} \\ -1 & \text{for CCW rotation} \end{cases} \quad (8)$$

此时，一些近似值可简化角度计算。如果  $\cos(\alpha)$  被完全移除，检查结果将显示已创建一个新矢量，该矢量旋转了正确的角度但大小大于原始矢量。该因子实际上是一个标量，用于将生成的矢量归一化为循环的每个阶跃的正确大小。标量值由旋转角度决定，可使用预先确定的阶跃大小针对每个阶跃轻松计算。

如果对每个角度转换使用固定次数的迭代，则每个矢量转换的累积乘积将始终产生恒定的最终标量  $\mathbf{m}$ 。因此，在例程中可以忽略  $\cos(\alpha)$  的值。相反，最终的大小结果可以按  $\mathbf{m}$  缩放一次。假设使用算法的十次迭代（0 至 9），则  $\mathbf{m}$  的结果值如公式 [方程式 9](#) 所示。

$$\frac{1}{\mathbf{m}} = \prod_{n=0}^i \cos(\alpha_n) \quad (9)$$

$$m_9 = 1.64676 \quad (10)$$

此外，我们可以注意到  $\tan(\alpha)$  接近于  $2^{-n}$  的值。如果将正切计算替换为乘以 2 的幂，则该算法的实现将变得更加简单。考虑以下值表：

$\alpha_n$ [°]	$\tan(\alpha)$	$2^{-n}$	$\tan^{-1}(2^{-n})$ [°]
45	1	1	45
22.5	0.414	0.5	26.565
11.25	0.199	0.25	14.036
5.625	0.098	0.125	7.125
2.8125	0.049	0.0625	3.576

由于此替换的结果角度大于或等于真正二分搜索中使用的预期阶跃值，因此新的角度阶跃大小仍将能够收敛。虽然可能需要一两次以上的迭代才能达到相同的精度，但我们获得了用固定的向右移位操作替代正切值查找表的好处。

对算法进行这些修改后，我们得到 [方程式 11](#) 至 [方程式 14](#)，可以迭代使用这些公式来确定任何二维矢量的角度和大小。

$$x_{n+1} = x_n - y_n \times d_n \times 2^{-n} \quad (11)$$

$$y_{n+1} = y_n + x_n \times d_n \times 2^{-n} \quad (12)$$

$$\theta = \sum_{n=0}^i d_n \times \alpha_n \quad (13)$$

$$\text{magnitude} = \frac{x_i}{\mathbf{m}} \quad (14)$$

请注意，该方法仅使用了少数几次循环，为快速计算提供了一种简洁的解决方案。集成了 CORDIC 引擎的器件（例如 [TMAG5170](#)）能够快速解析角度计算并将其作为输出提供，而不会对整体转换时序产生任何重大影响。

## 2.4 篡改和杂散磁场检测

多轴灵敏度的另一个好处是可以实现篡改和杂散磁场检测。再次考虑在同轴放置中生成的输出。

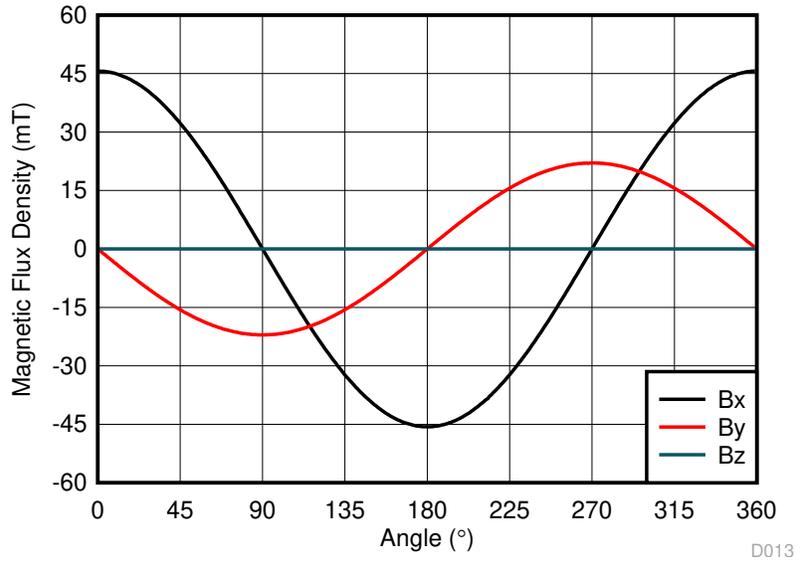


图 2-11. 3D 平面内传感器的磁通密度与角度之间的关系

在这种情况下，请注意虽然角度计算是可能的并且只需要 X 和 Y 轴，但在 Z 方向上的该位置没有产生输入。  
TMAG5170 允许用户同时监控全部三个轴，因此在采用该配置时，Z 轴上的任何输入都可以指示来自外部源的磁场。

此外，TMAG5170 允许用户以编程方式为将触发 ALERT 引脚输出的任何轴设置阈值。可以设置高阈值和低阈值，如图 2-12 所示。

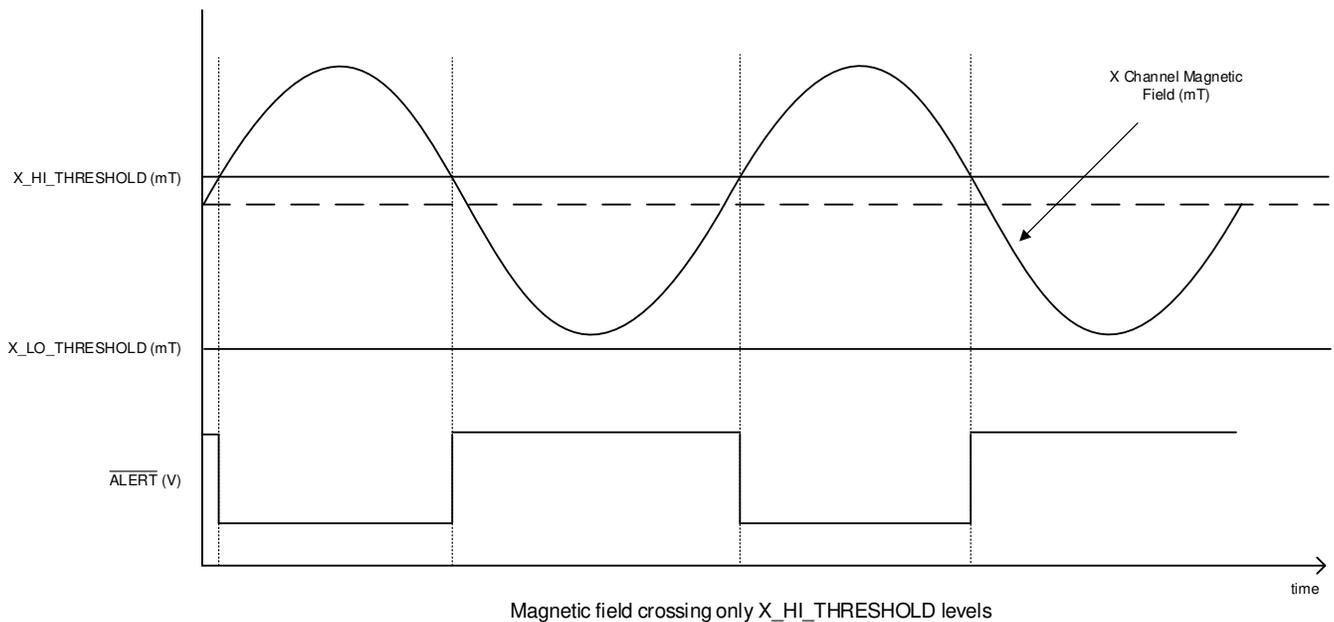
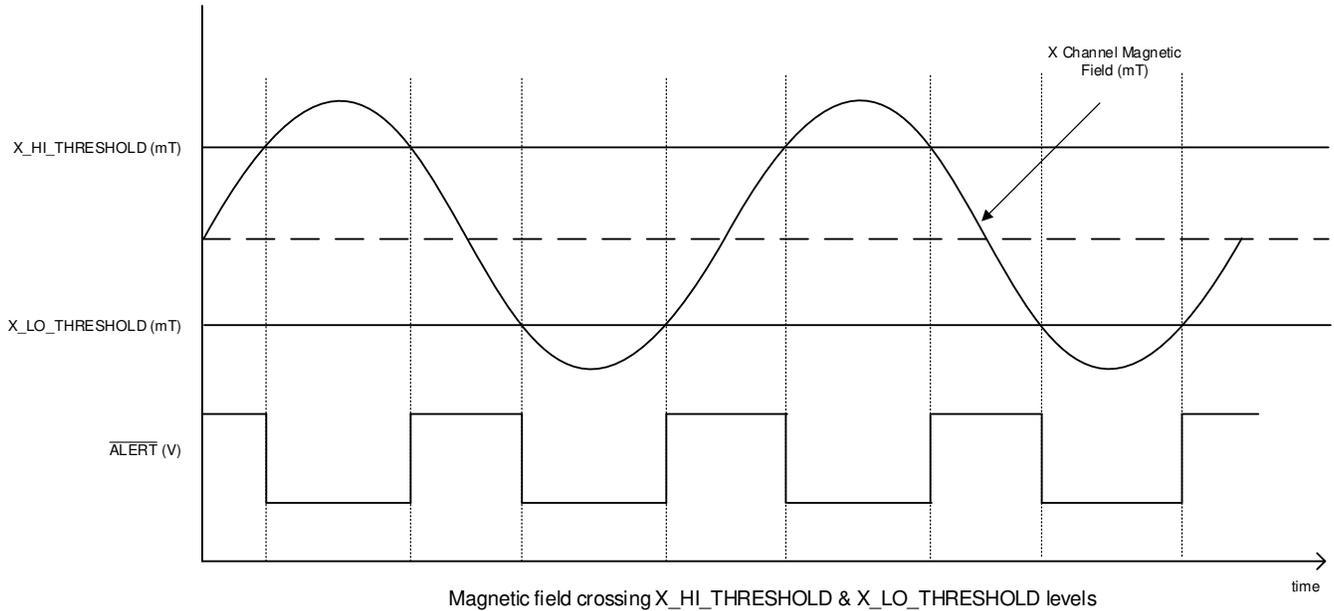


图 2-12. TMAG5170 磁性开关模式

不仅可以在未使用的轴上设置触发器，还可以使用预期信号设置有关可接受输入的限值。可以使用上限和下限对每个轴进行单独编程。这样，该器件可配置为针对任何不应超过的磁输入将操作限制在固定的操作窗口。

将该功能添加到任何测量中有助于提供安全监控，从而通知控制器何时采取措施以防止操作发生错误的输入。

### 3 角度测量注意事项

尽管多轴霍尔效应传感器能够简化许多与捕获角度测量值相关的问题，但仍需要考虑一些重要细节，以便尽可能地提高性能。

#### 3.1 传感器对齐

能够访问 **B** 场矢量的全部三个分量可以极大地简化与磁体相关的任何放置。如前所述，传感器可以放置在磁体附近的任何位置，那里有足够大的磁通密度，可以通过将输出调节至匹配的振幅来进行测量。

尽管有这一优势，传感器相对于磁体的旋转对齐仍值得考虑。在许多情况下，传感器的平面将受到安装传感器的电路板的限制。在该平面内，传感器可以自由旋转  $360^\circ$ 。当以与磁体同平面或离轴方式放置传感器时，传感器相对于磁体的对齐方式将对观察到的磁场产生影响。

未对准旋转磁体中心的传感器将以不同于图 2-2 所示的方式分离 **B** 场矢量。例如，考虑图 3-1 中所示的对齐方式，其中传感器与磁体处于同一平面内。

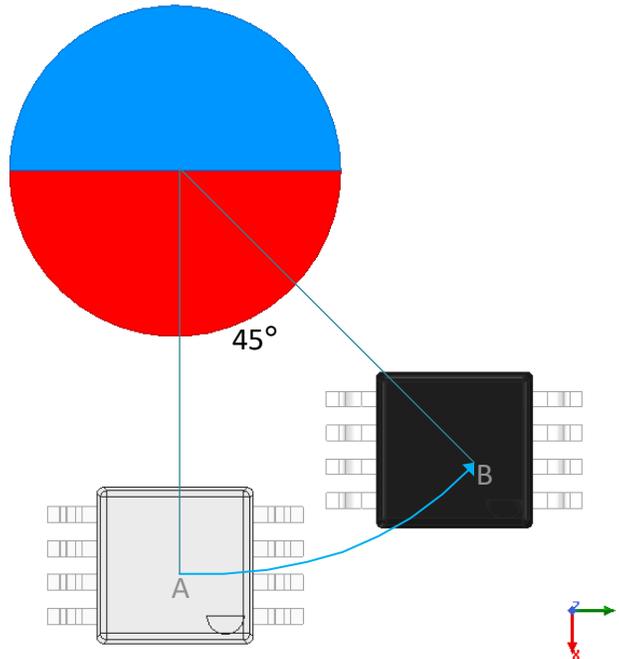


图 3-1. 进行  $45^\circ$  旋转的平面内传感器

在这种情况下，传感器位于  $45^\circ$  位置，但仍与沿 X 轴放置时一样对齐。在磁体旋转  $45^\circ$  时，磁极面向传感器，但与器件内的任何元件不直接正交。这也可以通过将传感器就地旋转  $45^\circ$  来实现。从机械上讲，两个方向将会产生相同的效果。由于这种旋转，我们可以观察到 A 和 B 两个位置的磁场输入的预期变化，如图 3-2 所示。

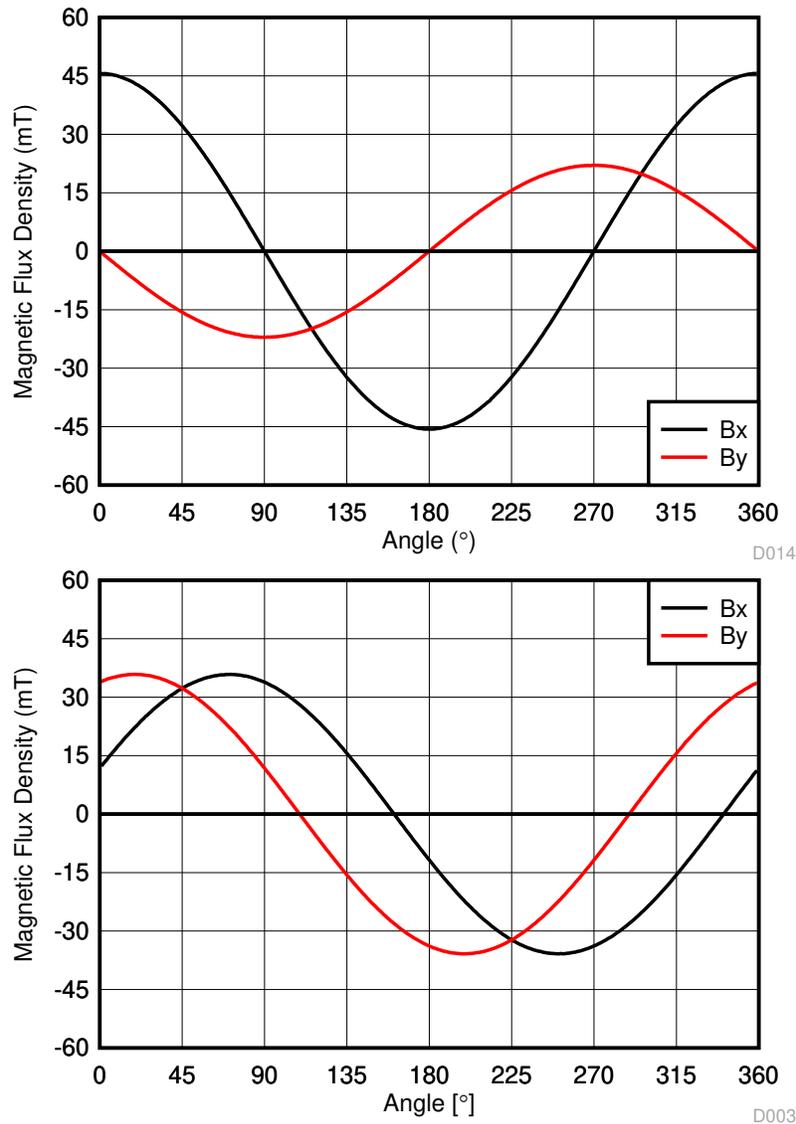


图 3-2. 旋转  $45^\circ$  的平面内对齐

通过旋转传感器，我们在 B 场矢量的每个分量中实现了匹配的输入。当磁体旋转  $45^\circ$  并且磁极指向传感器时，每个霍尔元件将与 B 场矢量的 X 和 Y 分量相匹配，并且将检测到相等的幅度。通过这种旋转，每个传感器都能够检测到一个峰值，该峰值等于 B 场矢量的原始 X 和 Y 分量的平均值。因此，高方向为平面内检测提供了理想的磁体和传感器对齐方式。

### 3.2 传感器校准

在某些系统中，传感器放置可能会受到机械限制，因此平面内或同轴  $45^\circ$  对齐都无法实现。在这些情况下，需要进行传感器输出匹配来实现最佳性能。角度位置计算要求分量在整个旋转过程中保持固定大小，以便产生一致的结果。

磁体的圆形形状允许通过超越函数（正弦和余弦）来描述位置的角度变化。只要这两个函数的缩放比例相同，计算得到的旋转路径就是圆形的。如果每个分量的缩放比例不相等，则预测路径将变为椭圆形。角度误差将通过将椭圆引用归于圆形旋转（或移动）来引入。

要解决该问题，最简单的方法是确保 CORDIC 计算的输入幅度相等。TMAG5170 器件允许用户通过对任何一个通道实施增益衰减系数来调整 CORDIC 输入。

图 3-3 说明了 X 分量振幅  $A_x$  大于 Y 分量振幅  $A_y$  的情况。必须减小  $A_x$  以匹配  $A_y$  的比例。

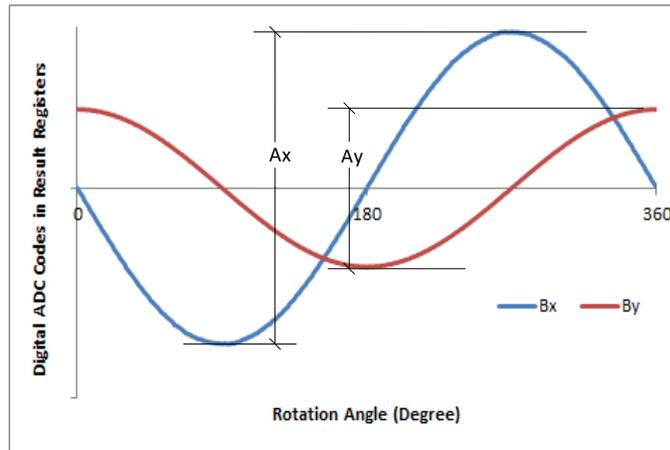


图 3-3. 角度计算的幅度校正

设置 TMAG5170 峰值的校准过程很简单：

1. 通过将 CONV\_AVG 寄存器设置为 32x，将器件设置为每次转换获得最大样本数。
2. 将磁体旋转 360° 并记录所需轴的输出值。
3. 确定每个轴的峰值
  - a. 请注意哪个轴实现了最大幅度输入。根据传感器相对于磁体的方向和位置，这可能是 X、Y 或 Z 中的任何一个。
4. 计算增益调整：
$$G_x = \frac{A_y}{A_x}$$
  - a. 该比率应始终在分母上具有较大的峰值，以便  $G < 1$ 。该轴将根据增益系数进行衰减，并使用 Gain\_Selection 寄存器进行选择。
5. 将增益系数 G 乘以 1024。将最接近的整数值编程到 GAIN\_VALUE 寄存器中。

此功能允许用户同时校正灵敏度不匹配和非理想对齐所导致的任何误差。通过提供此校正，可以将传感器放置在磁体附近存在两个足够大的输入的任何位置。

### 3.3 输入参考噪声

对于任何测量系统，务必记住工作信噪比 SNR。在本例中，在观察输出时，霍尔效应传感器以输入为基准的噪声将显示为杂散磁场。理想情况下，该低电平噪声的幅度将比实际输入磁通密度小得多。

随着输入幅度的减小，信噪比将受到影响，结果将导致角度测量的准确性降低。

对于许多传感器而言，抵消该影响的唯一方法是使用更强的磁体或将传感器放置在离磁体更近的位置。成本和机械设计可能会禁止这些选项中的任何一个。TMAG5170 提供了一种额外的方法来通过平均样本进一步降低该噪声。

用户可编程均值计算可以设置在 2 倍至 32 倍范围内的值。虽然这确实会导致更长的转换时间，但它也可以降低总有效噪声。每当样本数量加倍时，以输入为基准的噪声的有效 RMS 值都将减小为原来的  $1/\sqrt{2}$ 。在输入磁场较小的情况下，降低输入噪声的好处尤为重要。该选项还可以帮助减小其他外部噪声因素（例如机械振动）的影响。

### 3.4 采样率的影响

在设计采用 3D 传感器进行角度计算的系统时要考虑的另一个变量是传感器的采样率。例如，考虑适用于 TMAG5170 的表 3-1。

表 3-1. 更新速率设置

工作模式	寄存器设置	更新速率			备注
		单轴	两轴	三轴	
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 000b	22.2 ksps	14.3 ksps	10.5 ksps	最快的更新速率
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 001b	14.3 ksps	8.3 ksps	5.9 ksps	
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 010b	8.3 ksps	4.5 ksps	3.1 ksps	
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 011b	4.5 ksps	2.4 ksps	1.6 ksps	
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 100b	2.4 ksps	1.2 ksps	0.8 ksps	
X、Y、Z 轴	CONV_AVG = 101b	1.2 ksps	0.6 ksps	0.4 ksps	最佳 SNR 情况

在表 3-1 所示的工作条件下，展示了单轴、两轴或三轴操作的各种均值计算模式的更新率。

在对移动目标执行角度计算的任何系统中，每次测量之间的角度阶跃将由该采样率设置。例如，假设 **TMAG5170** 以最大平均速率或表 3-1 所示的 **0.417ksps** 对全部三个轴进行采样。每个样本之间的时间约为 **2.4** 毫秒。如果被检测的磁体以 **100RPM** 的速度旋转，则每个样本之间产生的角度变化为 **1.44** 度。这将在测量中显示为固定偏移，并定义可检测到的最小角度变化。

此外，根据采样率设置，可能会有额外的角度误差。虽然以流水线方式运行以获得最大采样率，但任何 **TMAG5170** 转换的典型转换时间预计约为 **25** 微秒。如果对 **32** 次转换进行均值计算，则总采样时间约为 **800** 微秒。在第一个通道的均值计算时间范围内，角度将改变 **0.48** 度。到第二次通道转换完成时，角度将再次增加相同的量，总移动量约为 **1** 度。两个样本之间的时序偏移将导致角度误差。这再次凸显了伪同步采样的优势。

在磁体高速旋转的系统中应小心谨慎，以便应对这些类型的误差并适当选择设置。

## 4 实际应用

为了帮助演示该功能，请考虑使用几种方法来实现简单的旋转磁体，这些磁体可用于任何数量的应用，例如电子换挡器拨盘或连接到在自动化工厂中工作的机械臂电机的传感器。对于此分析，我们将尝试使用同轴和离轴方法进行测量，演示设计过程。

### 4.1 按钮式旋钮

结合 [TMAG5170EVM](#)，设计了一个按钮拨盘来演示该器件的角度检测功能。我们将回顾使用同轴方法实现的该附件的设计过程。

#### 4.1.1 评估设计限制

为了充分展示 [TMAG5170 A1](#) 和 [A2](#) 型号的性能，已确定输入磁通密度应接近 [TMAG5170A1](#) 最高范围的满量程输入。

设计了一个直径为 1in 的旋钮，以便能够提供足够大的东西来进行操作，同时使解决方案足够小，从而能够方便地与 EVM 封装一起运送。因此，任何磁体的可用开口都需要约为 1/2in。

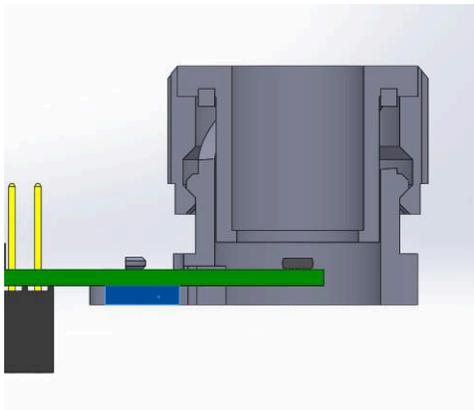


图 4-1. TMAG5170 按钮式旋钮附件

#### 4.1.2 磁体选择

如前所述，该设计的磁体需要直径为 1/2 英寸，同时提供足够大的磁通密度以在接近  $\pm 100\text{mT}$  输入范围的满量程输入下运行。最好在设计中留出余量以允许变化，因此选择了大约 90% 的粗略目标来指导磁体选择。

即使在此限制范围内，在磁体厚度、磁体材料以及磁体和传感器之间的空气间隙方面仍然存在相当大的灵活性。对于这种直径的磁体，1/8 英寸是常见的可用厚度，可用于多种材料类型，并且在组装过程中易于处理。

选择磁体几何形状后，对各种材料和空气间隙的磁通密度进行仿真，来确定其余变量。

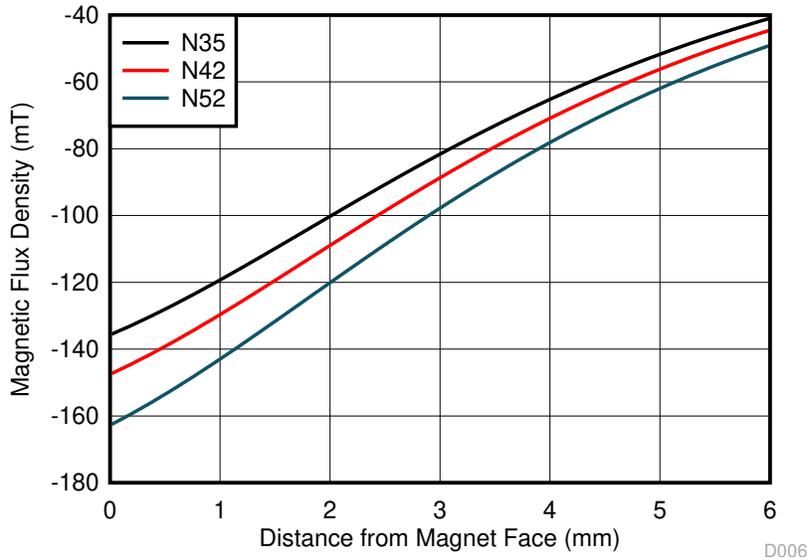


图 4-2. 按钮式旋钮接近仿真

基于这些结果，选择了 N42 材料在距离传感器 3mm 的位置使用。

#### 4.1.3 原型设计和验证

通过将旋钮附件安装到 EVM，GUI 提供了捕获和绘制每个通道输出的选项，或者作为替代方案，有一个可视化界面显示磁体角度的实时更新。

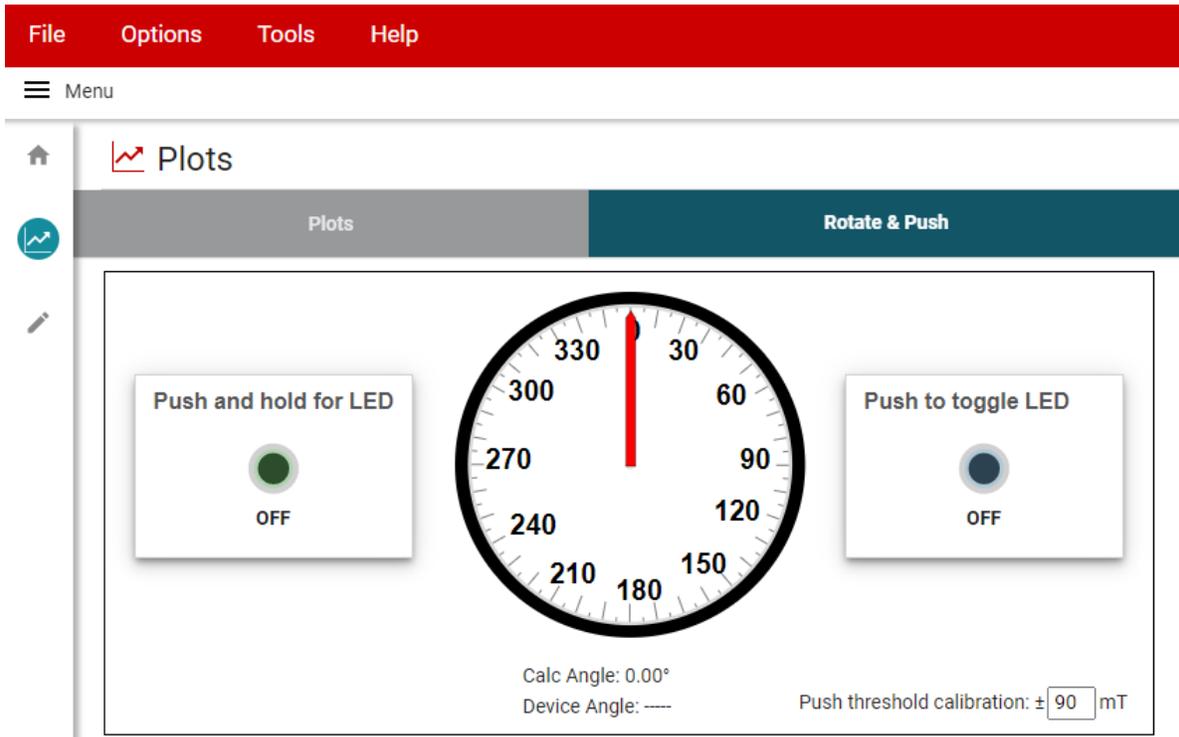


图 4-3. TMAG5170 “Rotate & Push” GUI

该输出格式有助于模拟最终应用的外观，但无法告诉我们确切的测量误差。

相反，我们可以从大量数据样本中捕获数据，然后用该数据来绘制 X 和 Y 输入数据与输出角度的关系图。通过该方法，我们可以查找表明器件角度响应中任何非线性的异常行为。

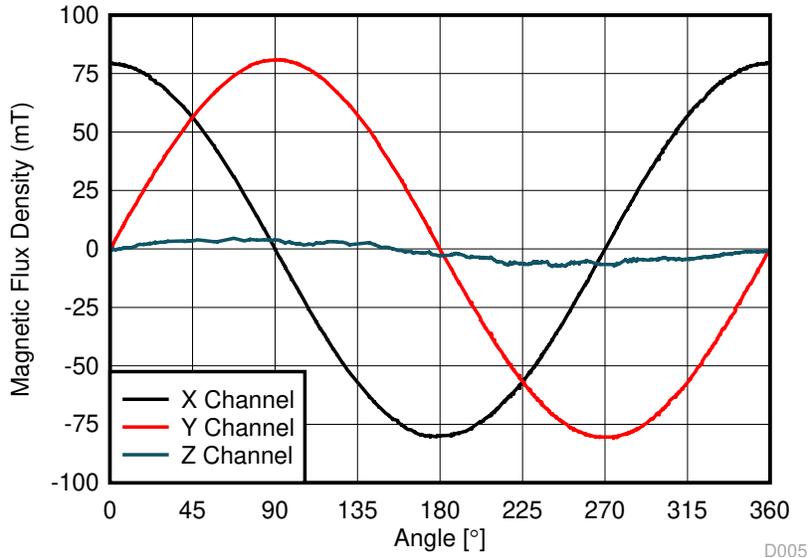


图 4-4. TMAG5170 旋钮附件测量数据

请注意，此处有一些小的不规则现象，但在整个旋转过程中，我们看到相当平滑的结果，非常接近理想输入的模式。这主要是由于旋钮的处理会影响传感器接近和磁体倾斜。还有一些偏移，会导致在 Z 方向产生磁场的可检测部分。

另请注意，峰值幅度与此处的仿真值不匹配。在原型设计过程中，发现需要更换原始旋钮设计中使用的弹簧，并且替换用弹簧具有一定的铁磁性。尽管存在这种干扰，但最终结果仍然能够为该用例检测到相当准确的角度。在设计任何应用时，始终建议考虑外部材料对观察到的磁场的影响。

## 4.2 离轴设计

为了进一步展示使用具有灵敏度校正功能的 3D 传感器设计角度测量系统的优势，我们还将尝试离轴配置并在磁体旋转时测量其精确角度。为此，我们希望将传感器放置在磁体的外边缘，类似于图 2-5 中所示。

在该配置中，我们将使用按钮式旋钮上的相同磁体，但会将其安装到能够精确驱动角度位置的运动控制器中。在此处，我们可以确定配置的确切性能。

对于该分析，我们将使用  $\pm 50\text{mT}$  范围并再次将 90% 满量程作为峰值输入值。

### 4.2.1 灵敏度增益校正

通过使用仿真软件，可以发现导致在 Z 方向产生大约 45mT 峰值输入的离轴放置。相同的放置方式会在 X 方向上产生大约 32mT 的峰值幅度。

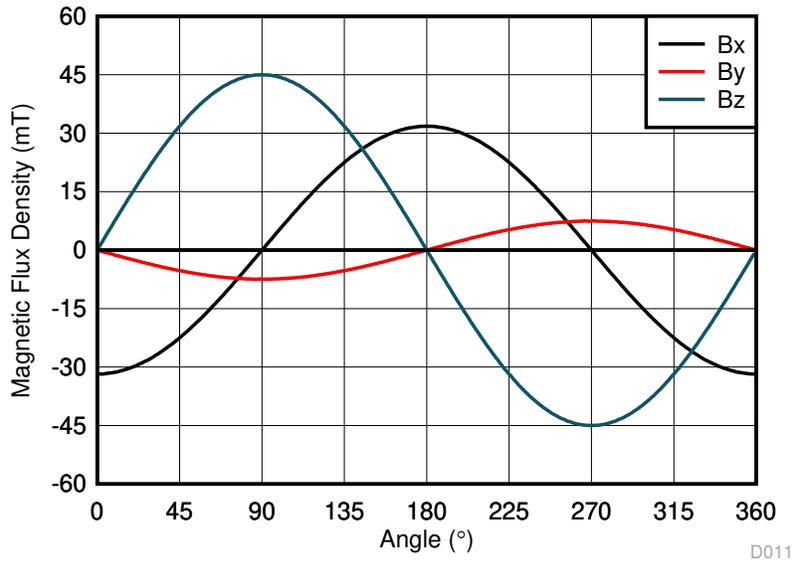


图 4-5. 仿真离轴配置

然后在物理设置中匹配该配置，并捕获单次旋转的输出。在此处，我们可以看到仿真中的 X 和 Z 分量与捕获的结果之间的行为非常接近。

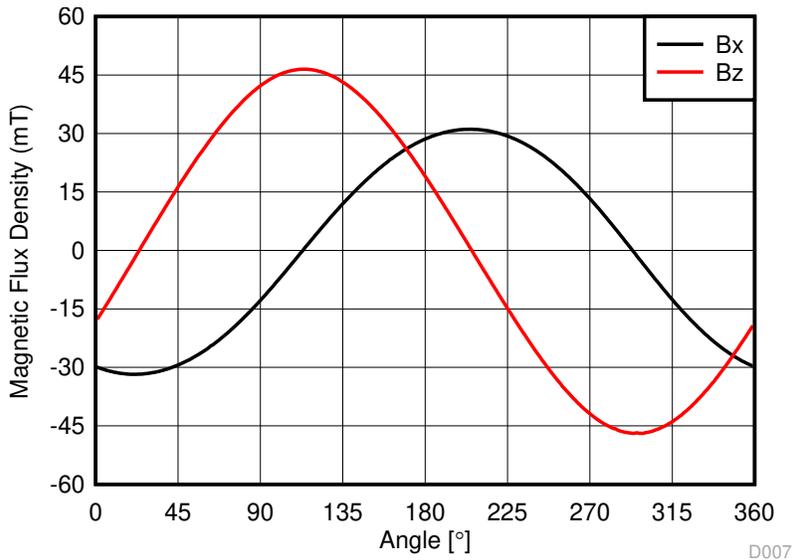


图 4-6. 初始离轴测量数据

要正确配置 TMAG5170 进行角度测量，必须按照传感器校准中详述的过程衰减 Z 分量以匹配 X 分量。根据峰值输入值的测量结果，确定需要 67.3% 的比例因子来匹配峰值振幅。

## 4.2.2 精度验证

在使用仿真数据执行角度计算时，该近似位置的角度误差接近于零，与 **TMAG5170** 的 0.25 度分辨率相比可以忽略不计。虽然初始测量数据显示的输出似乎符合预期并且本质上是正弦曲线，但我们还发现，当计算角度位置并根据精确角度位置绘制时，我们会看到一些意外的角度误差。这在图 4-7 中表示为角度误差。

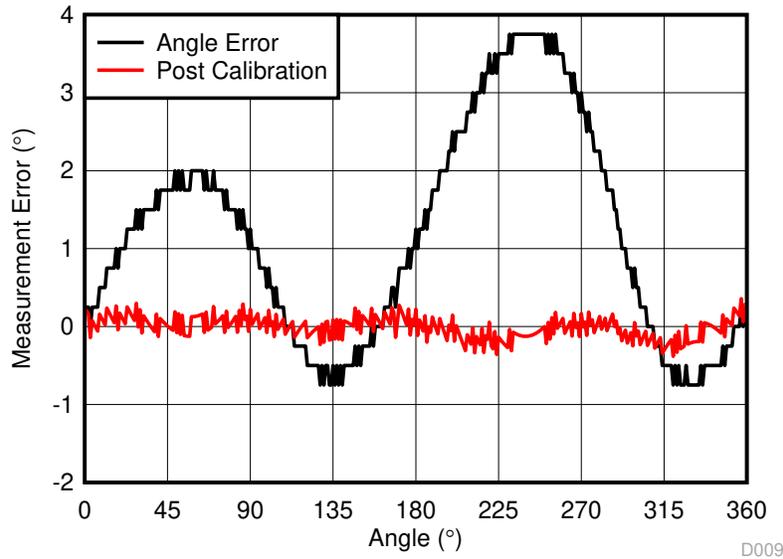


图 4-7. 测得的离轴角度误差

即使在调整输入以实现理想匹配后，在物理设置中观察到的角度误差也与设置中的机械误差有关。少量的磁体倾斜和摆动会产生循环重复误差。

但是，有多种方法可用于进一步校准该误差。[线性霍尔效应传感器角度测量理论、实现和校准应用报告](#) 讨论了可以实施以消除该行为的各种选项。图 4-7 中的“校准后”曲线说明了进一步校准测量值以实现尽可能稳健的设计的好处。这在许多需要精密运动的应用中是必不可少的，例如在制造和自动化机械中很常见。

## 5 总结

利用三维传感器（例如 **TMAG5170**），能够使用单个霍尔效应传感器确定磁体的角度位置。这在空间有限的系统中尤其强大。为了让器件更易于访问，内置的可扩展性允许用户选择几乎任何位置，方法是允许系统调节输入到 **CORDIC** 计算器的输入以使其匹配。

当输入分量的振幅匹配时，角度计算很简单。通过确保在运行 **CORDIC** 算法之前将输出调节到等效幅度，可以轻松消除角度测量的非线性。

应始终注意考虑机械容差和误差。最佳精度始终需要一些额外的校准，因为在组装和制造过程中发生的磁体旋转变化（例如倾斜、摆动和偏移）通常无法提前预测。

## 6 参考文献

- 德州仪器 (TI), [TMAG5170-Q1 具有 SPI 接口的 3 轴线性霍尔效应传感器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [TMAG5170D-Q1 具有 SPI 的双芯片高精度 3D 线性霍尔效应传感器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [TMAG5170UEVM 工具文件夹](#)
- 德州仪器 (TI), [TMAG5170DEVM 工具文件夹](#)
- 德州仪器 (TI), [线性霍尔效应传感器角度测量理论、实现和校准应用报告](#)

## 7 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

<b>Changes from Revision * (January 2021) to Revision A (April 2023)</b>	<b>Page</b>
• 添加了提及 TMAG5170D-Q1 的信息。.....	<b>6</b>
• 添加了对 TMAG5170D-Q1 数据表和 TMAG5170DEVM 工具文件夹的引用。.....	<b>24</b>

## 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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司