

摘要

需要精确角度反馈的电机控制系统广泛应用于很多应用环境中。例如，自主移动机器人（如真空吸尘器、割草机器人或仓库运输机器人）依靠准确的反馈来正确地引导机器人到达目标位置。此外，制造 6 轴机械臂和协作机器人需要实现精准控制，以确保具备更大吞吐量和最佳质量所需的精确度。在所有系统中，机械对齐公差和信号链因素会影响观察到的磁传感器测量角度误差。此报告将讨论磁体选择、传感器放置以及这些电气和机械误差源会对测量产生哪些影响。最后，角度误差的校准过程将说明如何为任何系统实现最佳的角度精度。

内容

| | |
|------------|----|
| 1 引言 | 3 |
| 2 磁体选择 | 4 |
| 2.1 放置注意事项 | 4 |
| 2.2 磁体属性 | 4 |
| 3 测量非线性 | 8 |
| 4 机械误差源 | 11 |
| 5 信号链误差 | 17 |
| 6 校准方法 | 20 |
| 7 修订历史记录 | 22 |

插图清单

| | |
|----------------------------------|----|
| 图 1-1. 理想的正弦、余弦和反正切输入 | 3 |
| 图 2-1. 传感器放置选项 | 4 |
| 图 2-2. 径向磁场曲线 | 4 |
| 图 2-3. B-H 曲线示例 | 5 |
| 图 2-4. 磁体和传感器的空气间隙范围 | 5 |
| 图 2-5. 各种磁体材料的磁场振幅峰值与空气间隙距离之间的关系 | 6 |
| 图 2-6. 各种磁体半径的磁场振幅峰值与空气间隙距离之间的关系 | 6 |
| 图 3-1. 振幅不匹配非线性 | 8 |
| 图 3-2. 失调电压非线性 | 9 |
| 图 3-3. 相位误差非线性 | 9 |
| 图 3-4. 输入失真非线性 | 10 |
| 图 4-1. 存在磁体倾斜的同轴对齐 | 11 |
| 图 4-2. 同轴：存在磁体倾斜的磁场输入 | 11 |
| 图 4-3. 同轴：存在磁体倾斜的角度误差 | 11 |
| 图 4-4. 偏轴：存在磁体倾斜的磁场输入 | 12 |
| 图 4-5. 偏轴：存在磁体倾斜的角度误差 | 12 |
| 图 4-6. 平面：存在磁体倾斜的磁场输入 | 12 |
| 图 4-7. 平面：存在磁体倾斜的角度误差 | 12 |
| 图 4-8. 存在偏心的同轴对齐 | 12 |
| 图 4-9. 同轴：存在偏心的磁场输入 | 13 |
| 图 4-10. 同轴：存在偏心的角度误差 | 13 |
| 图 4-11. 偏轴：存在偏心的磁场输入 | 13 |
| 图 4-12. 偏轴：存在偏心的角度误差 | 13 |
| 图 4-13. 平面：存在偏心的磁场输入 | 13 |
| 图 4-14. 平面：存在偏心的角度误差 | 13 |
| 图 4-15. 存在传感器倾斜的同轴对齐 | 14 |
| 图 4-16. 同轴：存在传感器倾斜的磁场输入 | 14 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 图 4-17. 同轴：存在传感器倾斜的角度误差..... | 14 |
| 图 4-18. 偏轴：存在传感器倾斜的磁场输入..... | 14 |
| 图 4-19. 偏轴：存在传感器倾斜的角度误差..... | 14 |
| 图 4-20. 平面：存在传感器倾斜的磁场输入..... | 15 |
| 图 4-21. 平面：存在传感器倾斜的角度误差..... | 15 |
| 图 4-22. 存在位置偏移的同轴对齐..... | 15 |
| 图 4-23. 同轴：存在位置偏移的磁场输入..... | 15 |
| 图 4-24. 同轴：存在位置偏移的角度误差..... | 15 |
| 图 4-25. 偏轴：存在位置偏移的磁场输入..... | 16 |
| 图 4-26. 偏轴：存在位置偏移的角度误差..... | 16 |
| 图 4-27. 平面：存在位置偏移的磁场输入..... | 16 |
| 图 4-28. 平面：存在位置偏移的角度误差..... | 16 |
| 图 5-1. 输入参考噪声导致的角度误差..... | 17 |
| 图 5-2. 8 位量化误差..... | 18 |
| 图 5-3. 12 位量化误差..... | 18 |
| 图 5-4. TMAG5170 角度相位误差与旋转速度之间的关系..... | 18 |
| 图 6-1. 存在综合机械误差的同轴角度误差..... | 20 |
| 图 6-2. 8 点线性化..... | 20 |
| 图 6-3. 16 点线性化..... | 20 |
| 图 6-4. 32 点线性化..... | 21 |
| 图 6-5. 谐波近似线性化..... | 21 |

表格清单

| | |
|----------------------|---|
| 表 2-1. 磁性材料温度响应..... | 7 |
|----------------------|---|

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在磁感应用中实现超高精度的角度测量需要考虑所有可能的误差源。这些不同的误差源可能由系统机械缺陷导致，或者与感应器件的信号链有关。鉴于这些因素，采取合适的设计步骤有助于获得最精确的结果。

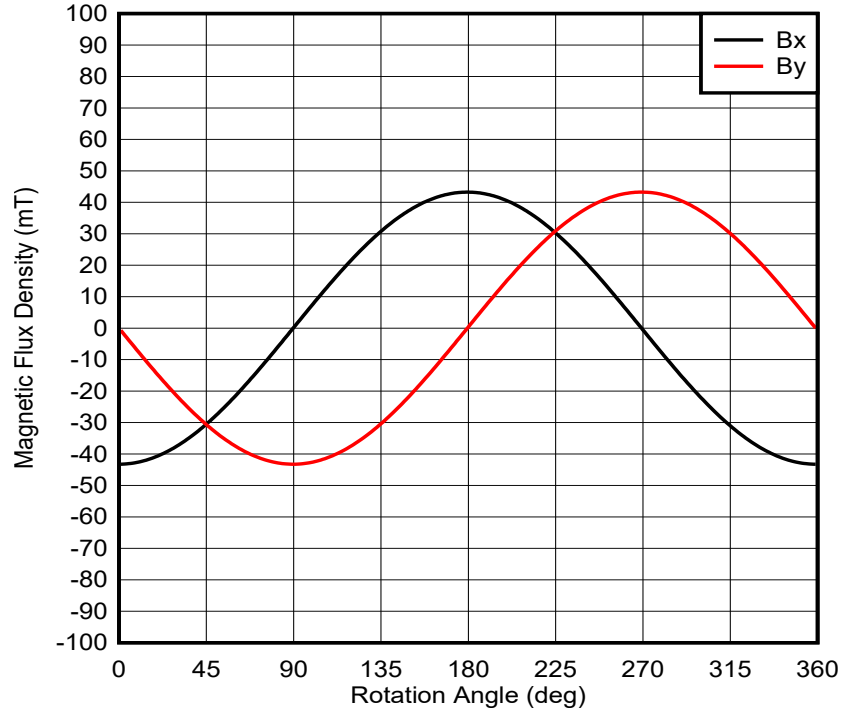


图 1-1. 理想的正弦、余弦和反正切输入

通常使用正弦输入 90 度异相来测量角度。这种正弦/余弦关系支持使用反正切来计算最终误差。这可以使用两个一维传感器来实现，两个传感器的放置很重要，相对于旋转磁体有 90 度隔离，也可以将一个二维或三维传感器放置在磁场足够强的位置。磁场矢量的独立分量自然为 90 度异相，因此这些传感器适合角度检测。

2 磁体选择

设计使用磁性输入（霍尔效应、AMR、GMR、TMR）进行角度测量时，用作输入源的磁体在开始时非常重要。根据传感器的方向灵敏度，务必确保磁场输入足以保证传感器正常工作。

简要考虑 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#) 或 [TMAG5170D-Q1](#)。这些器件是线性三维（3D）霍尔效应传感器。[TMAG5170](#) 和 [TMAG5170D-Q1](#) 使用 SPI，而 [TMAG5273](#) 和 [TMAG5173-Q1](#) 使用 I2C 进行通信。考虑到所有这三个轴的灵敏度，任意一个传感器的放置都非常灵活。

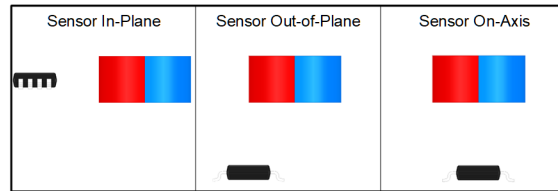


图 2-1. 传感器放置选项

2.1 放置注意事项

关于图 2-2 中所示的位置，有几点关键注意事项。同轴情况是使用单一磁传感器进行角度感应的最理想位置。在这种布局中，磁场自然与磁体表面并列，并完全位于传感器的 XY 平面内。为了实现此布局，径向磁体以旋转轴为中心，传感器与磁体旋转轴精准对齐。即使使用非圆形磁体，这种关系在此位置仍然适用。

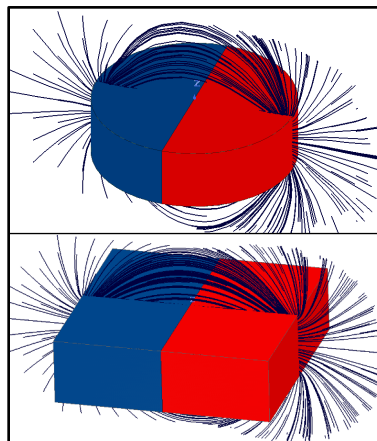


图 2-2. 径向磁场曲线

虽然在此位置可以使用方形表面的磁体，但由于输入磁场的非正弦性质，我们并不建议使用这种磁体。方形磁体有助于在装配最终产品时实现对齐。对于任何磁体形状，同轴对齐的主要优点是机械误差通常对最终角度测量的影响较小。[节 4](#) 对此进行了说明。

图 2-1 中的另一个选项是平面对齐。这是一个非常紧凑的对齐选项，但产生的输入严重不匹配。造成的振幅不匹配会导致角度计算呈现非线性。[TMAG5170](#) 和 [TMAG5273](#) 可提供振幅校正，从而最大程度地减少这种影响。这种对齐方式可将偶极环形磁体安装在沿旋转轴的任意位置，以便系统其他部分自由使用轴端。平面对齐便于将角度测量更轻松地集成到 BLDC 电机中，同时最大程度地减少电机尺寸的增加。

最后的放置选项显示为偏轴，代表任何其他位置。除了平面和偏轴对齐，还有一些位置会产生可测量的磁场，其中一个分量在所有三个笛卡尔坐标系方向。每个分量的振幅将随位置变化，但仍将保持正弦，并且在相位上以 90 度间隔相互分隔。虽然有些位置可产生同样平衡的输入，但预计用于角度计算的两个轴之间会形成振幅不匹配。

2.2 磁体属性

除了选择使用径向圆柱进行轴上测量或使用环形磁体进行偏轴测量或平面测量之外，各种其他磁体属性也将影响观察到的磁场。

材料等级

任何磁体的材料等级将直接影响该磁体的 **B-H** 关系。了解施加的外部 **H** 场源与任何磁体产生的 **B** 场之间的关系非常有用。

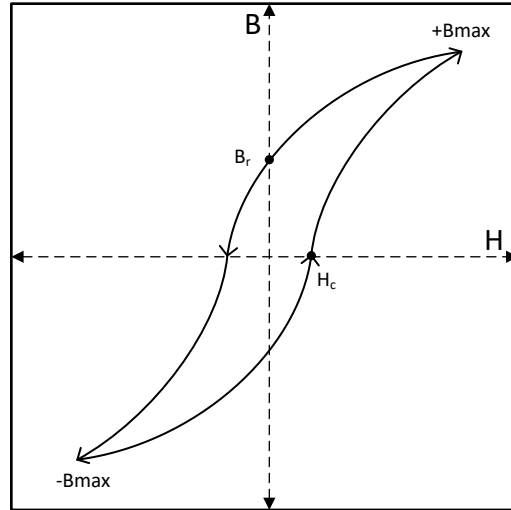


图 2-3. B-H 曲线示例

当移除用于磁化永磁体所施加的 **H** 场后，残余 **B** 场值称为“剩余磁化强度”或 B_r 。此值应在闭合的磁路中测量，且不等于磁体的表面磁场。表面磁场应在开放的磁路中使用磁力计来测量，将因磁体几何形状而异。对于相同等级的任何大小的磁体， B_r 都是恒定的，而磁体产生的表面磁场将取决于该磁体的表面积和磁极长度之间的关系。

任何磁性材料的各种不同等级具有不同的 B_r 值，它决定了该磁体产生的磁场强度。考虑尺寸相同的各种等级和材料的磁体的 **B** 场与距离之间的关系，如图 2-5 所示。如果传感器放在磁体的极化轴旁边，则可以调整范围找到 **B** 场峰值，该值可在旋转过程中观察到。在本例和以下所有图形中，将使用直径为 6mm、厚度为 3mm 的磁体。

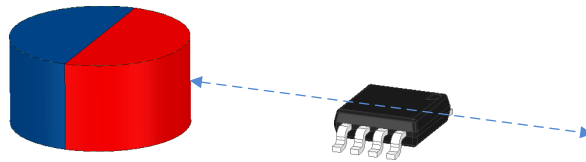


图 2-4. 磁体和传感器的空气间隙范围

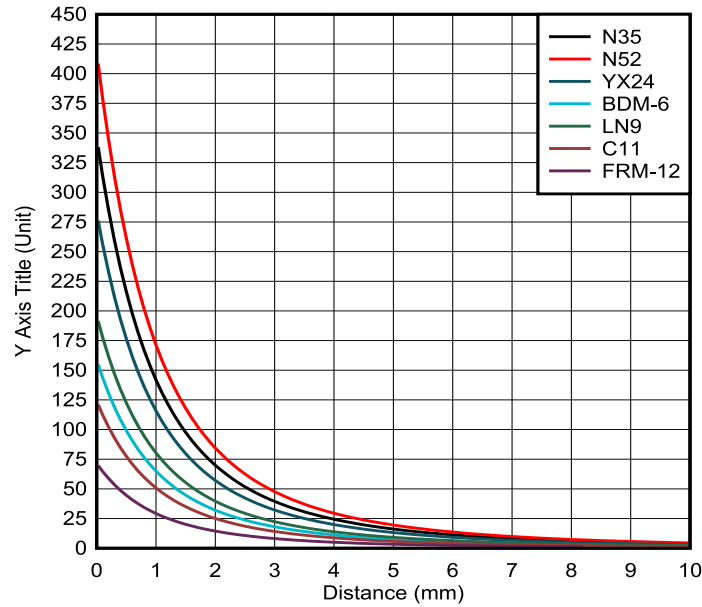


图 2-5. 各种磁体材料的磁场振幅峰值与空气间隙距离之间的关系

大小

如材料等级中所述，磁体大小会影响任何指定磁体的表面磁通密度和产生的测量磁场。考虑高度和半径相等的各种 N52 级钕磁体的 B 场与距离之间的关系，如图 2-6 所示。

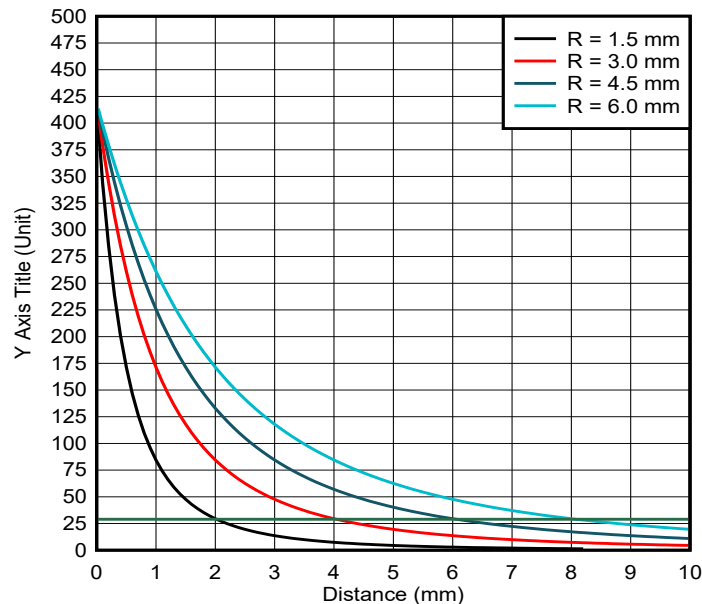


图 2-6. 各种磁体半径的磁场振幅峰值与空气间隙距离之间的关系

请注意，每个磁体的表面磁场相等，半径更大的磁体在任何空气间隙距离观察到的磁场更大。另外还值得注意的是，在任何距离观察到的磁场与磁体半径之比始终保持恒定。也就是说，使用 1.5mm 半径的磁体在 2mm 处观察到的磁场与使用 6mm 半径的磁体在 8mm 处观察到的磁场相等。

温漂

各种磁性材料对温度变化的响应不同。对于所有磁体，磁场强度将减小某个值，直到某个居里温度，此时磁体内的原子偶极无法再保持磁力校准。各种磁体材料的典型值如表 2-1 中所示

表 2-1. 磁性材料温度响应

| 材质 | 温漂 (C) |
|--------|----------|
| NdFeB | -0.12%/C |
| SmCo | -0.04%/C |
| AlNiCo | -0.02%/C |
| 铁氧体 | -0.2%/C |

对于宽工作温度范围的系统，通常选择 **Samarium Cobolt (SmCo)** 型磁体，因为这种磁体温漂低，但它们无法提供钕磁体通常所具备的磁场强度。

最后，对于大多数应用，目标是尽可能使用较小的磁体为传感器产生可测量的输入。对于任何系统，能否将磁体安装在旋转轴上以及成本和供货情况可能都是选择磁体时要考虑的主要因素。钕磁体 (**NdFeB**) 往往可提供最高的磁场强度，而铁氧体磁体往往成本最低。

3 测量非线性

除了磁体的材料属性会影响磁场强度，机械不同轴性和公差可能会导致角度计算出现非线性。

总体而言，将可观察到的最终误差结果分为四大类：每一类都会对测量线性度产生直接影响，需要恰当管理以最大程度减小最终角度误差。分别是：

- 振幅不匹配
- 偏移量
- 相位误差
- 失真

振幅不匹配

振幅不匹配是影响精确度的主要因素。在绘制相互对抗的独立输入时，可以与理想的单位圆进行比较。

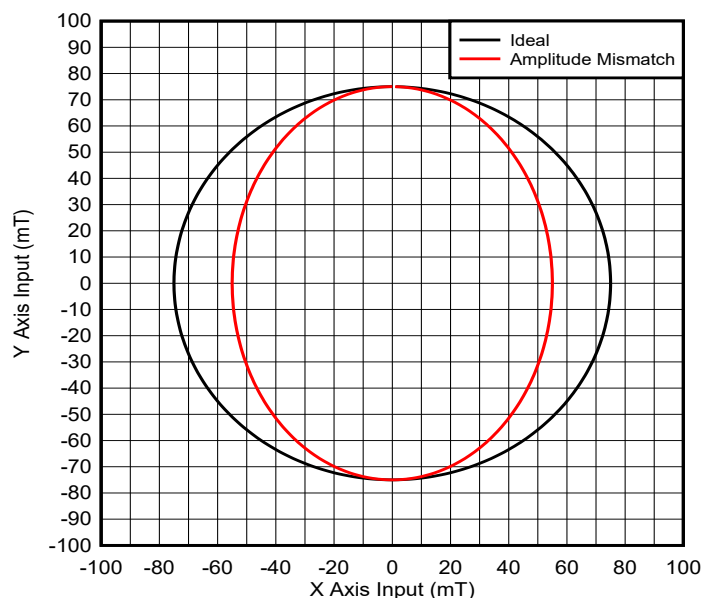


图 3-1. 振幅不匹配非线性

请注意在轴交叉处，误差为零。在交叉处之间的点，误差可能非常大。通常，通过向两个输入源中的任意一个应用标准化因子来管理误差。较大输入的振幅可能需要衰减，而较小输入的振幅可能需要增加增益。TMAG5170 和 TMAG5273 中均集成有此功能，以协助系统校准。

在需要双传感器或冗余传感器的情况下，由于传感器放置，振幅匹配是一个需要特别关注的问题。TMAG5170D-Q1 通过垂直堆叠每个传感器来简化传感器放置难题。这减少了产生不同程度的振幅失配的机械放置误差。

失调

输入参考失调电压可导致输入无法以零为中心。这种不平衡会导致单位圆无法正确居中。

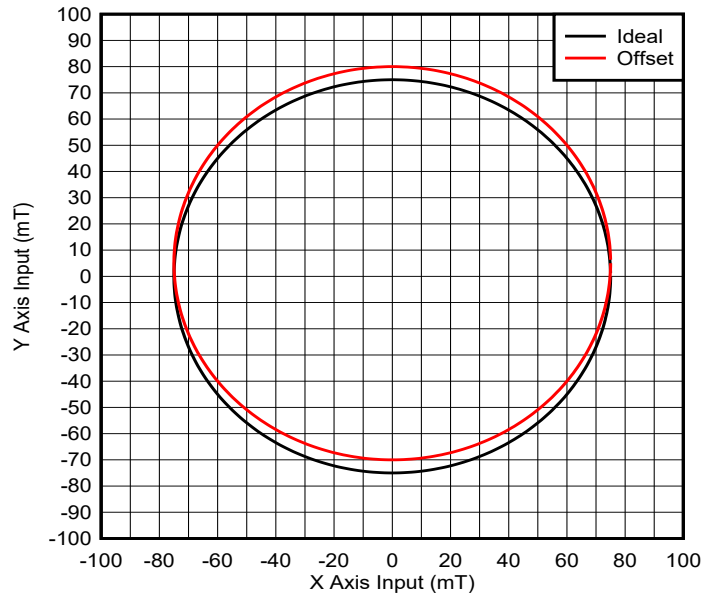


图 3-2. 失调电压非线性

相位误差

用于反正切计算的两个输入之间的相位误差是由于输入异相大于或小于 90 度所导致的。在共同作用下，这些输入所生成的图与振幅不匹配的情况相似，但没有沿两个轴偏斜。

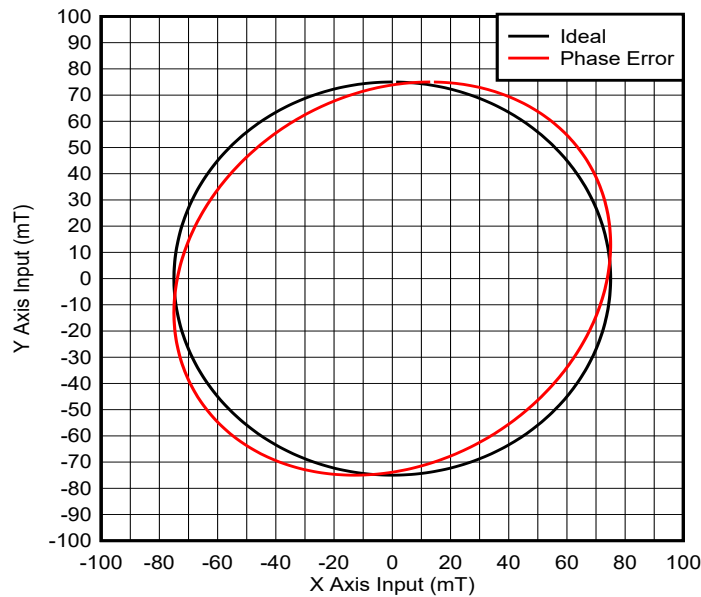


图 3-3. 相位误差非线性

失真

失真是由于感应的磁性输入不是纯正弦波所导致的。这可能是由各种因素造成的，例如磁体范围不一致或磁体形状不规则。例如，旋转非圆形磁体或改变与传感器的距离可能会导致输入呈现更复杂的非线性。

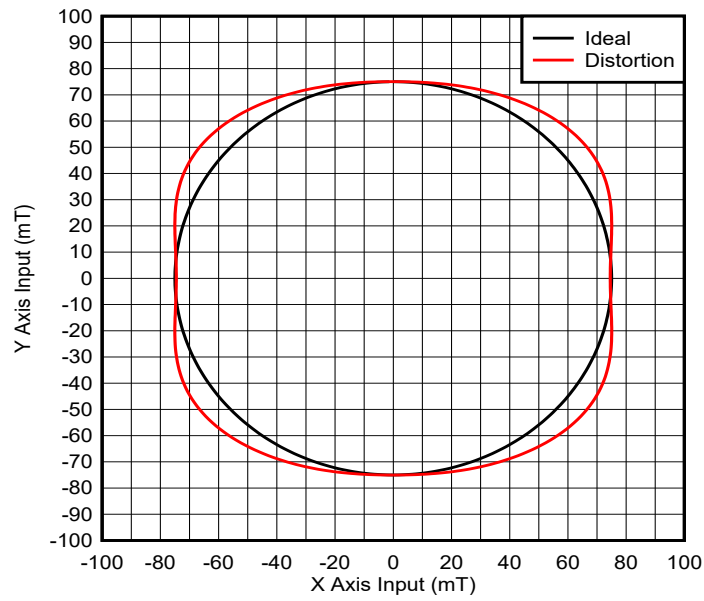


图 3-4. 输入失真非线性

4 机械误差源

各种非线性是系统级机械误差的典型副产物。这通常由装配公差导致，并会产生以前讨论的图形的各种组合。

这些误差可能由以下任一情况造成：

- 磁体倾斜和摆动
- 磁体偏心
- 传感器对齐
- 传感器放置偏移

显然，对于任何配置，为了在所有系统中实现一致的性能，限制制造差异都是有益的。

应使用直径为 6mm、厚度为 3mm 的磁体对这些误差进行独立仿真。对于平面对齐或同轴对齐的情况，应将传感器置于距离最近的磁体表面 4mm 处。对于偏轴对齐的情况，应将传感器置于磁体外径下方 4mm 处。磁体等级应为 N52。

磁体倾斜

安装在电机轴上的磁体的正交性所产生的误差会导致静置时对齐倾斜。

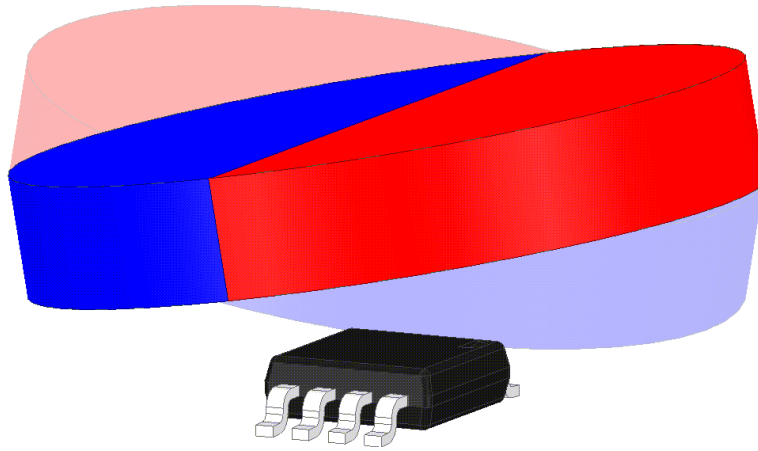


图 4-1. 存在磁体倾斜的同轴对齐

在旋转过程中，会沿着电机轴产生这种倾斜，从而导致摆动行为。造成的非线性度将取决于倾斜的严重程度和传感器位置。为了进行比较，图 4-2 至图 4-7 显示了这种影响以及对于每个对齐位置磁体倾斜 2 度所造成的角度误差。在每种情况下，由振幅不匹配或偏移所导致的显示角度误差已经校正，残留误差是由相位不理想或输入失真所导致的。

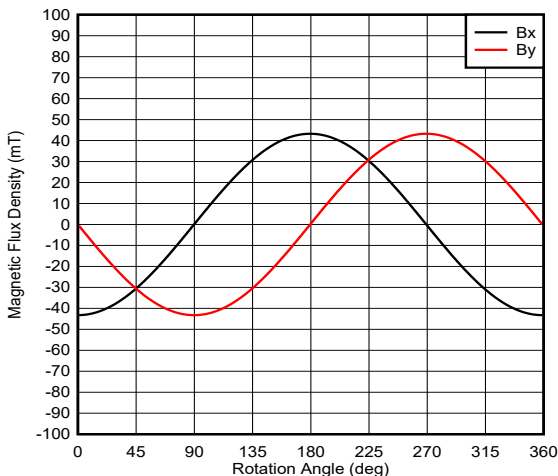


图 4-2. 同轴：存在磁体倾斜的磁场输入

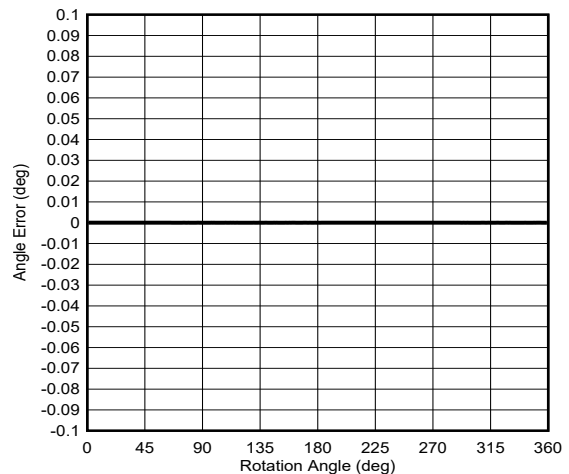


图 4-3. 同轴：存在磁体倾斜的角度误差

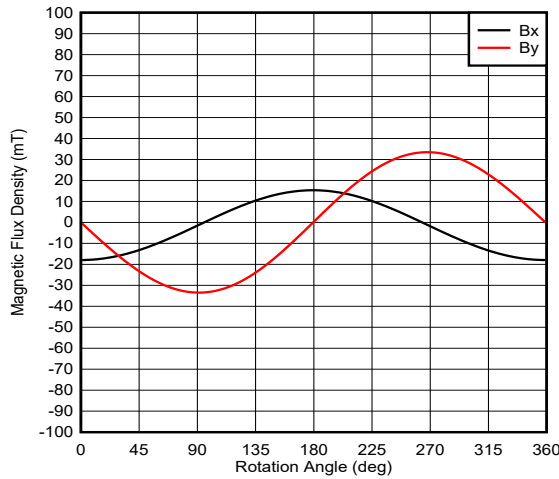


图 4-4. 偏轴：存在磁体倾斜的磁场输入

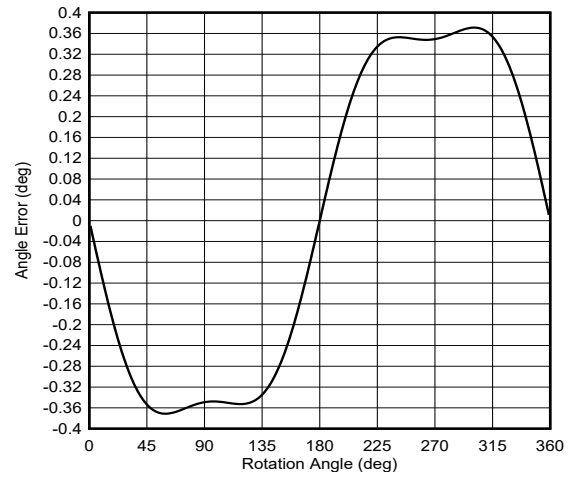


图 4-5. 偏轴：存在磁体倾斜的角度误差

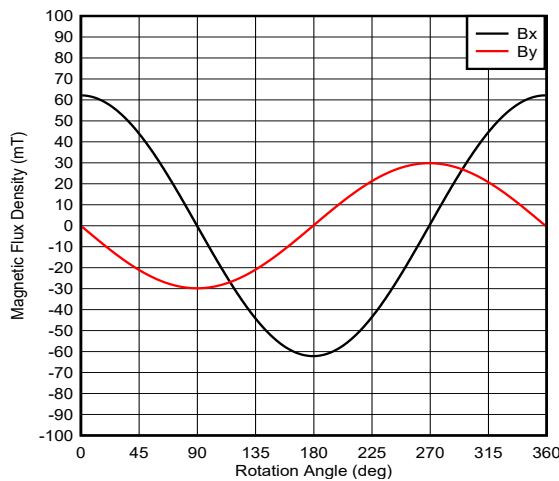


图 4-6. 平面：存在磁体倾斜的磁场输入

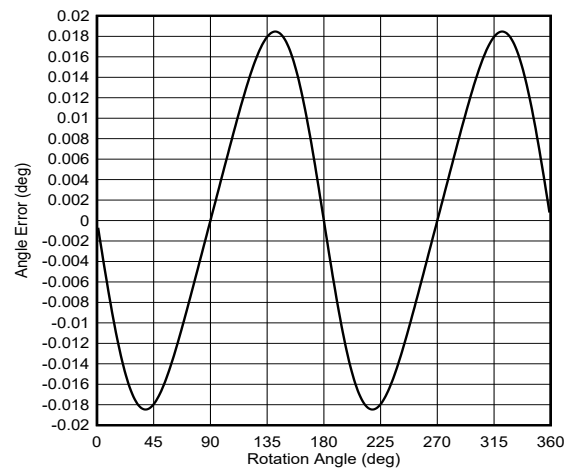


图 4-7. 平面：存在磁体倾斜的角度误差

磁体偏心

如果磁体无法以轴的旋转轴为中心，那么会出现另一种摆动。

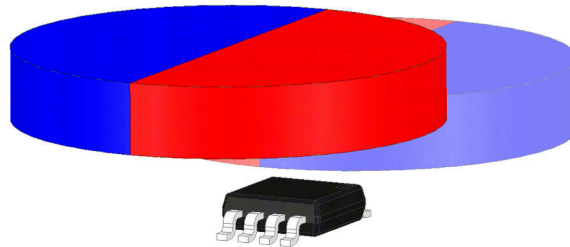


图 4-8. 存在偏心的同轴对齐

偏心图

在这种情况下，磁体将在自己的平面内振荡。其结果是，磁体位置与角度有关。此误差可能会导致严重的角度误差。偏移中心 0.1mm 会产生以下误差。在每种情况下，由振幅不匹配或偏移所导致的显示角度误差已经校正，残留误差是由相位不理想或输入失真所导致的。

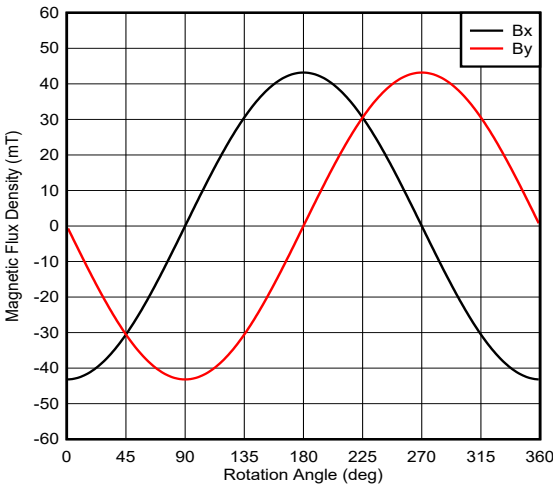


图 4-9. 同轴：存在偏心的磁场输入

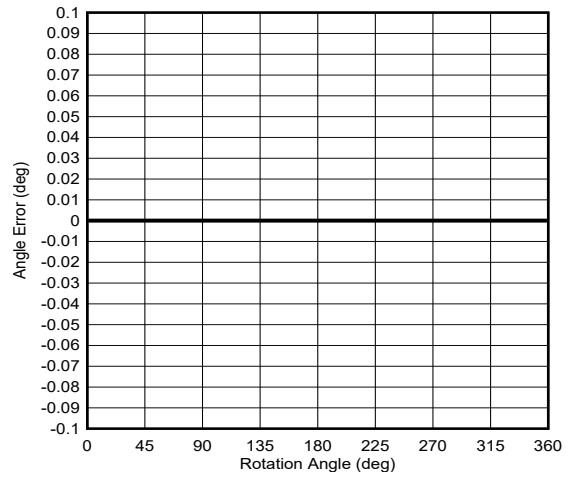


图 4-10. 同轴：存在偏心的角度误差

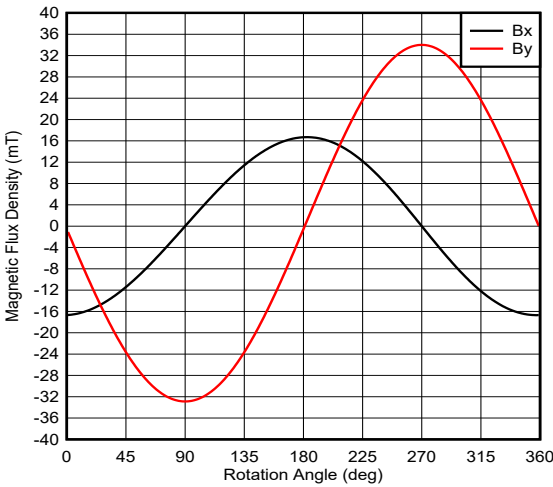


图 4-11. 偏轴：存在偏心的磁场输入

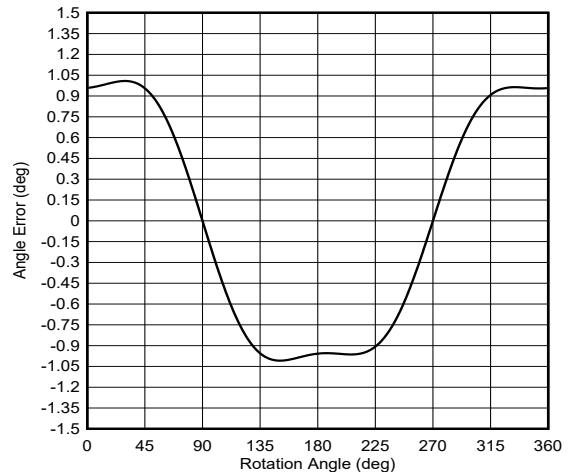


图 4-12. 偏轴：存在偏心的角度误差

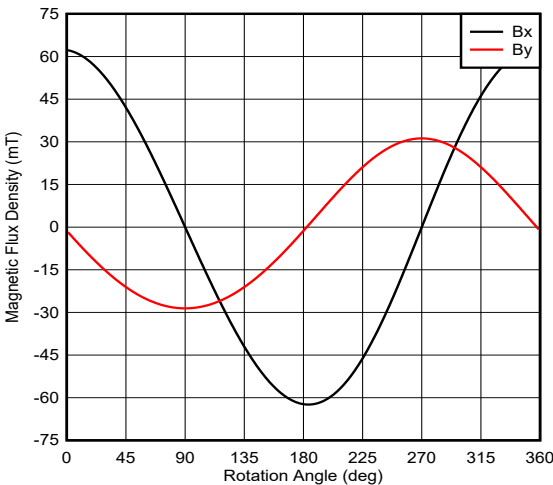


图 4-13. 平面：存在偏心的磁场输入

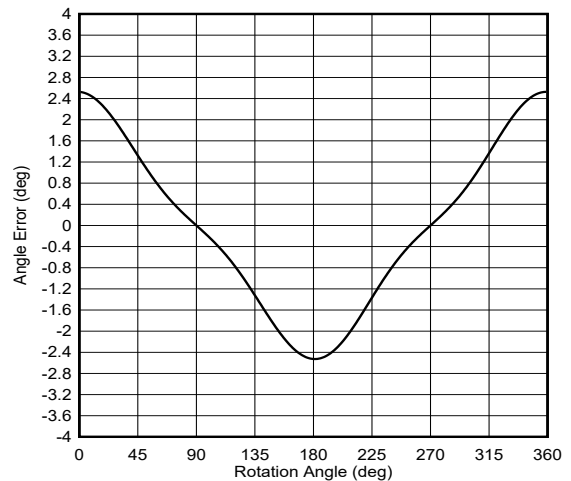


图 4-14. 平面：存在偏心的角度误差

传感器对齐

要实现系统正确对齐，通常需要将传感器置于正交于旋转磁体的位置。

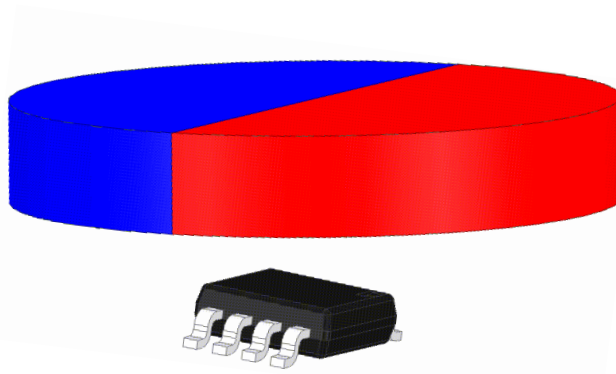


图 4-15. 存在传感器倾斜的同轴对齐

这种对齐可能受到旋转轴倾斜或实际传感器倾斜的影响。在焊料回流的过程中，很多表面贴装器件会根据 PCB 空间进行自对齐，随着焊料熟化可能会发生一些变化。即使围绕每个轴仅旋转几度也会产生以下误差。在每种情况下，由振幅不匹配或偏移所导致的显示角度误差已经校正，残留误差是由相位不理想或输入失真所导致的。

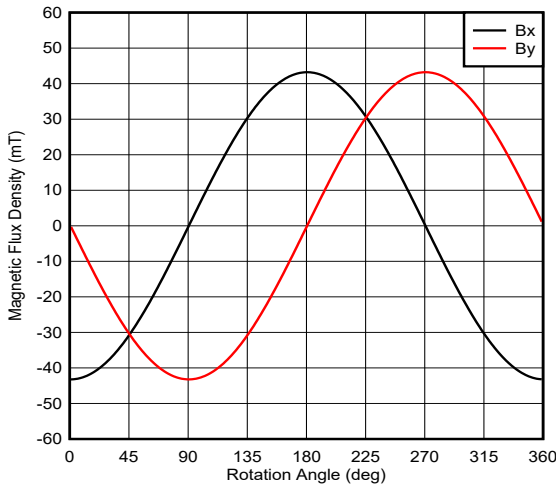


图 4-16. 同轴：存在传感器倾斜的磁场输入

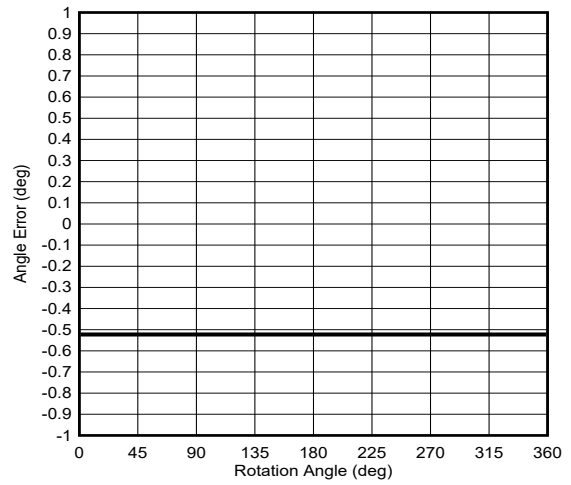


图 4-17. 同轴：存在传感器倾斜的角度误差

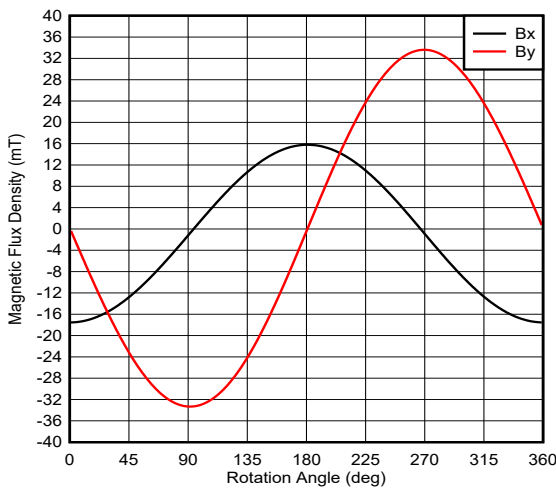


图 4-18. 偏轴：存在传感器倾斜的磁场输入

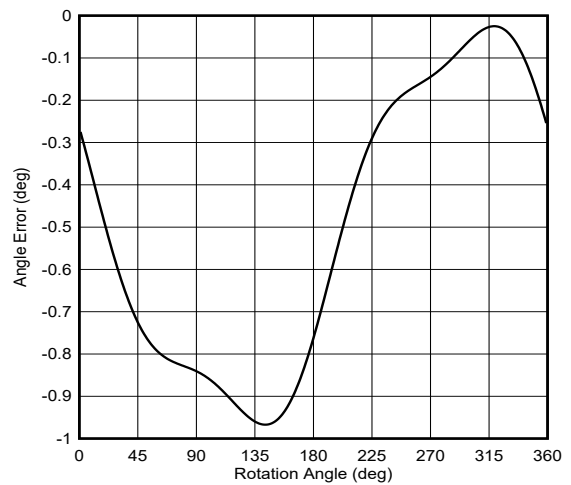


图 4-19. 偏轴：存在传感器倾斜的角度误差

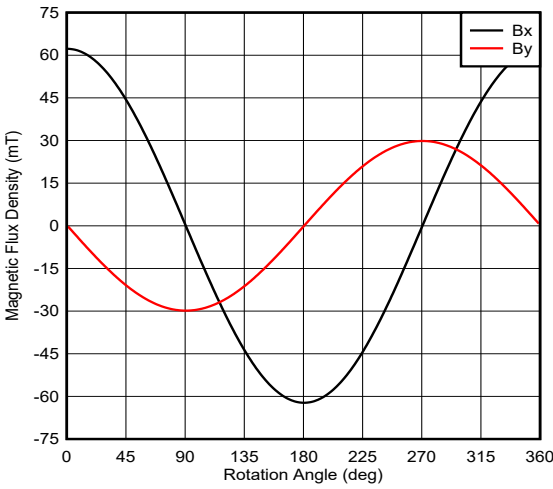


图 4-20. 平面：存在传感器倾斜的磁场输入

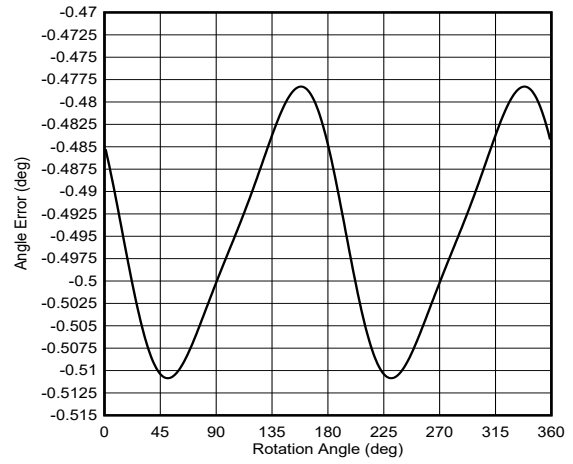


图 4-21. 平面：存在传感器倾斜的角度误差

传感器放置偏移

传感器放置偏移是由传感器最终位置与预期设计不符所导致的。

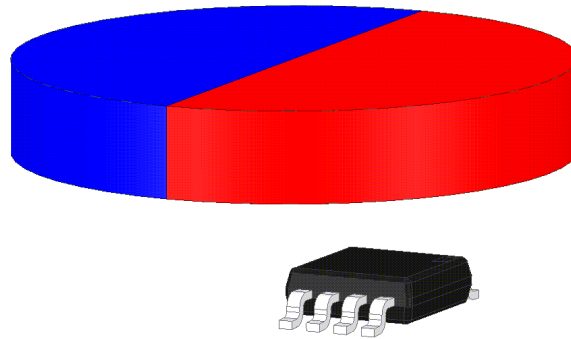


图 4-22. 存在位置偏移的同轴对齐

这可能由各种装配挑战所导致，包括焊料回流过程中器件对齐的位置以及较大系统中系统组件位置的公差。在 X 和 Y 方向上偏移 0.5mm 会产生以下误差。在每种情况下，由振幅不匹配或偏移所导致的显示角度误差已经校正，残留误差是由相位不理想或输入失真所导致的。

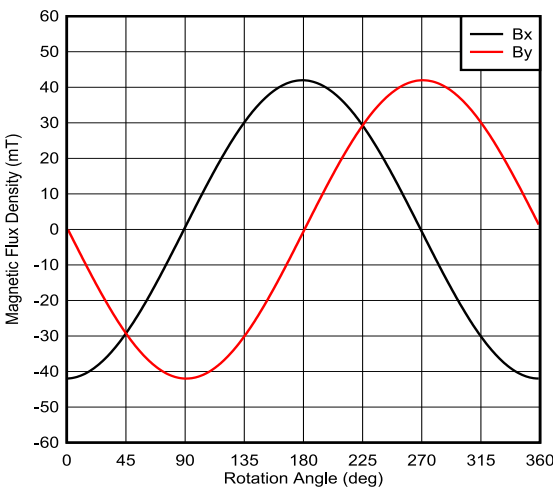


图 4-23. 同轴：存在位置偏移的磁场输入

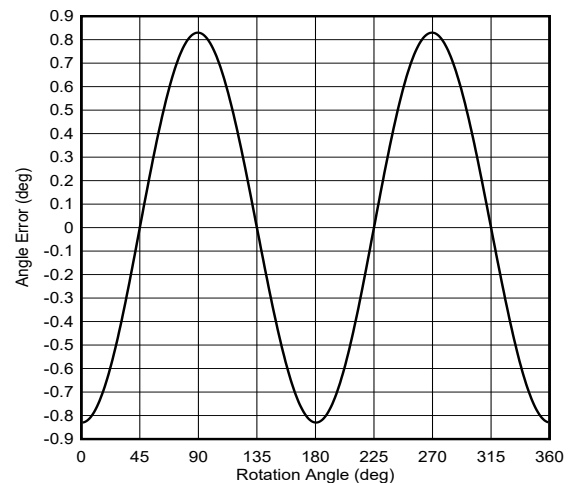


图 4-24. 同轴：存在位置偏移的角度误差

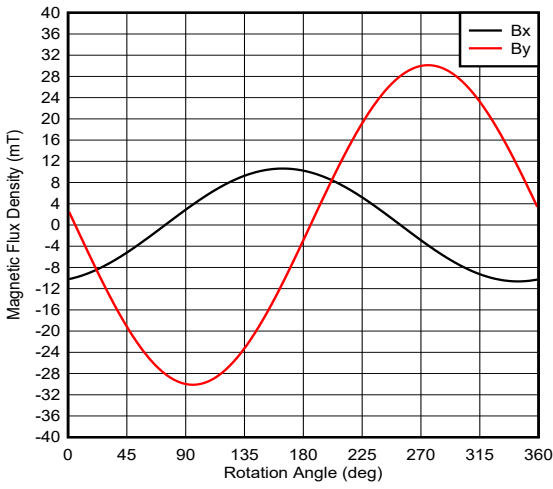


图 4-25. 偏轴：存在位置偏移的磁场输入

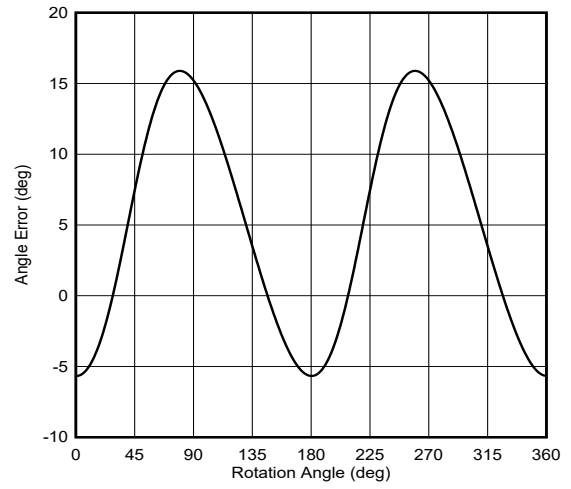


图 4-26. 偏轴：存在位置偏移的角度误差

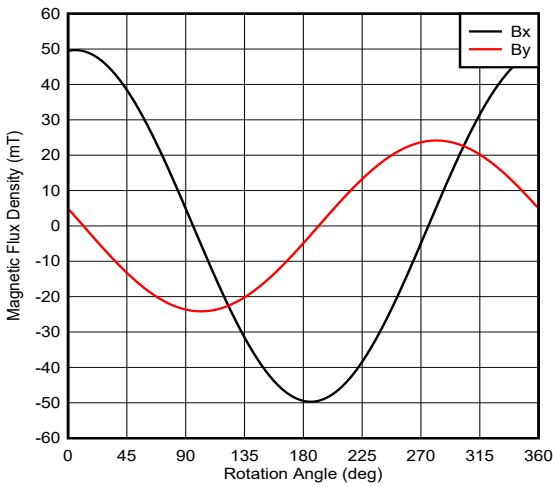


图 4-27. 平面：存在位置偏移的磁场输入

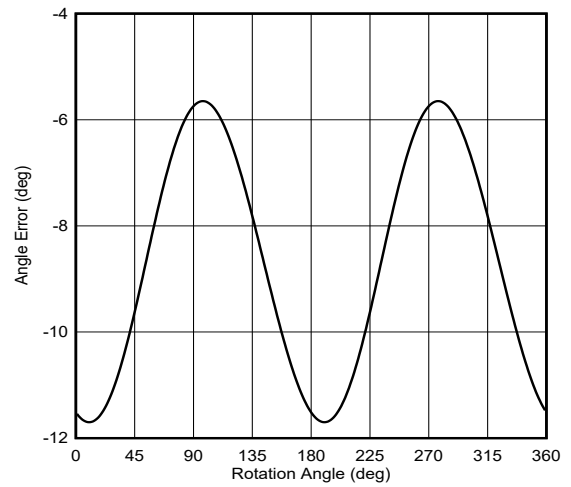


图 4-28. 平面：存在位置偏移的角度误差

5 信号链误差

除了各种机械误差，可能还存在信号链误差，这使得角度测量更加复杂。无论如何使用数据，这些因素可能直接决定了测量的质量。对于包括 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#) 或 [TMAG5170D-Q1](#) 在内的线性霍尔效应传感器，建议在设计角度测量时了解以下参数。

灵敏度不匹配

如前所述，振幅不匹配会导致输出角度呈现非线性。甚至在传感器位置输入合适的情况下，每个通道的灵敏度增益误差也可能会发生一些变化。对于输入振幅不匹配的情况，可以使用相同的方法予以纠正，以校正每个通道间的小误差。也就是说，可以使用标量灵敏度增益调整将两个输出通道标准化为同一振幅。

偏移量

输入参考失调电压表现为器件输出的固定直流失调电压。这会直接产生如[失调](#)中所述的角度误差。使用任意旋转磁体来执行初始扫频，从而校正此误差。使用测量峰值，可以针对任何系统最大程度地减小灵敏度增益误差和输入参考失调电压。

噪声

可能影响角度精度的另一个关键参数是噪声。考虑 RMS 输入参考噪声参数，这代表 1σ 值。当考虑任何测量系统时，信噪比 (SNR) 会影响理想情况下的分辨率。当绘制 SNR 与角度误差峰值的关系时，最终精确度通常符合 [图 5-1](#) 所示的趋势

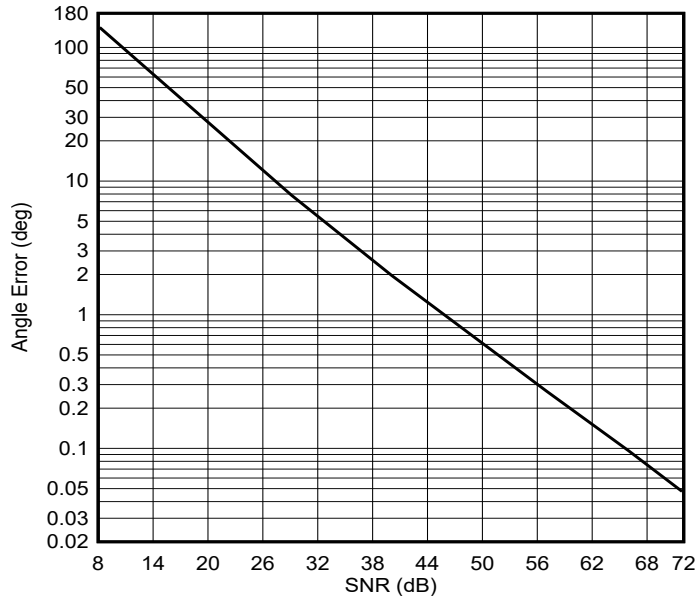


图 5-1. 输入参考噪声导致的角度误差

如果 SNR 不符合或未超过此图中的值，角度测量中产生的误差可能会带来不确定性，而这无法通过校准的方法进行校正。

为了消除 SNR 的限制，有一些选项可供使用。首先，可以使用采样取平均值的方法将输入噪声降低样本数的平方根倍。[TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#) 和 [TMAG5170D-Q1](#) 提供高达 32 倍取平均值，可显著降低噪声。此选项的缺点在于采样时间增加，这会导致不必要的延迟，从而大大降低采样率。

另一个选项是调整磁体强度或传感器距离。每一个选项都会增加可用磁场并提高测量的 SNR。

量化误差

使用 ADC 将模拟霍尔电压转换为数字电压会导致量化误差。ADC 中的可用位数会设置用于微控制器的最小测量分辨率。对于任何指定样本，典型的最大误差小于或等于 1/2 LSB。出于演示目的，我们在图 5-2 和图 5-3 中将使用 8 位 ADC 的满量程输入的角度误差与 12 位 ADC 的角度量化误差进行了比较。

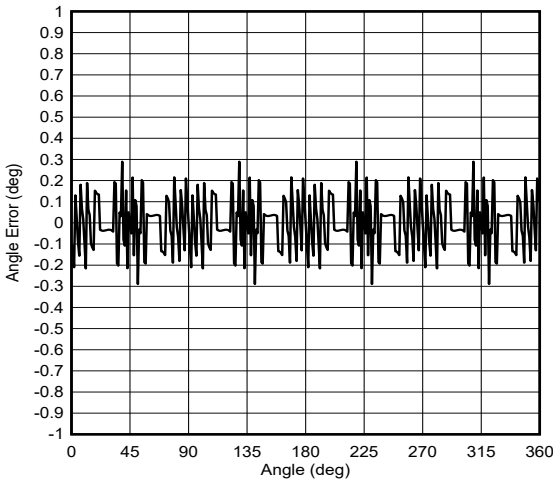


图 5-2. 8 位量化误差

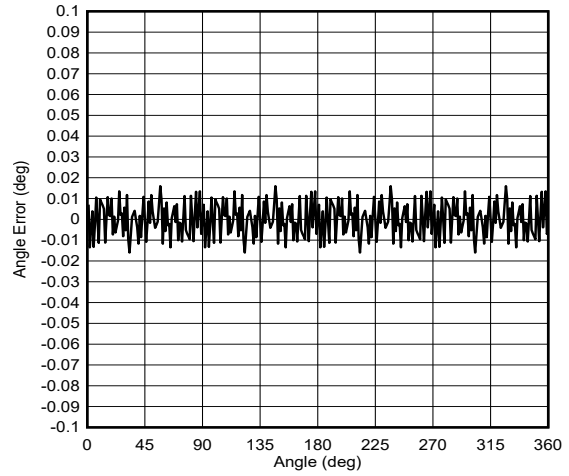


图 5-3. 12 位量化误差

TMAG5170 具有集成的 12 位 ADC，能够使用 16 位输出字长返回平均结果。

传播延迟

对于用于确定移动目标位置的任何磁体感应应用，务必应考虑传感器的传播延迟。微控制器将在一段时间后收到反馈，那时运动仍然不会间断。因此，旋转磁体的测量角度会出现一些固定相位延迟，具体取决于传感器的转换时间。

如果电机的速度已知，可以将此信息与传感器的采样率配合使用，以评估转换过程中磁体位置的变化。

TMAG5170、TMAG5173-Q1、TMAG5273 和 TMAG5170D-Q1 均支持可定制的采样方式以及取平均值。这会产生可变传播延迟。有关完整的时序信息，请参阅数据表。例如，使用 XYX 采样方式的各种取平均值模式的预期延迟如图 5-4 所示

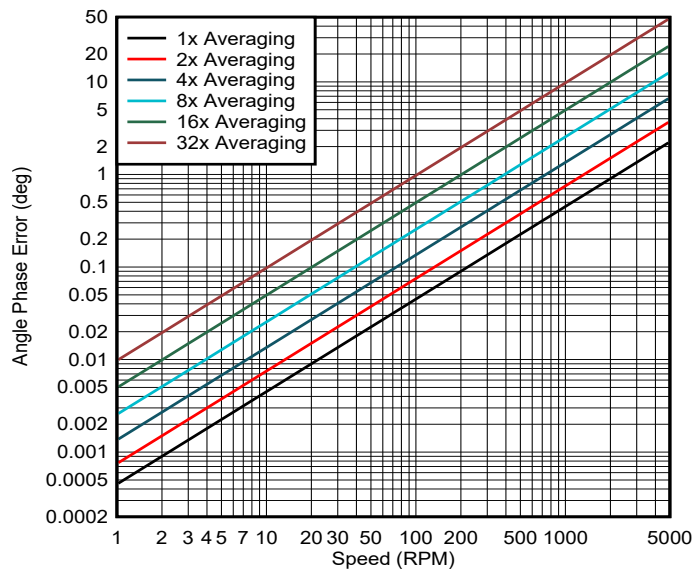


图 5-4. TMAG5170 角度相位误差与旋转速度之间的关系

建立质量测量的关键一步是使用确定性的测量方案。这可以使用集成触发模式来实现。通过触发转换在已知时间启动，可将输出结果与实际磁体位置进行非常精确的关联。

温漂

如温漂中所述，任何磁体的磁场都随温度变化。这会给测量带来某些挑战。[TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#) 和 [TMAG5170D-Q1](#) 均可提供可编程的温度补偿，使传感器能够调整以适应这些磁场强度变化。0.12%/C、0.2%/c 和 0 设置可帮助适应大多数磁体配置。

其他信号链误差

在考虑其他磁选项时，还需要评估其他误差源（例如磁迟滞和跨轴灵敏度）的影响，这些不会给 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#)、[TMAG5273](#) 或 [TMAG5170D-Q1](#) 带来严重影响。这些因素在利用集成磁集中器或磁阻传感器（例如 GMR 或 TMR）的器件中更加常见。

磁迟滞是由向铁磁材料施加磁场所导致的。与图 2-3 中所示的行为相似，集中器存在一些残留磁化，具体取决于永磁体磁场的先前状态。因此，角度测量取决于磁体之前的位置，磁体顺时针旋转与逆时针旋转时，观察到的输入存在差异。

跨轴灵敏度是一个磁场通道的某些部分耦合到另一轴的测量的结果。这会产生一些潜在的非线性，后者取决于另一通道的状态。在测量中消除此误差需要执行复杂的校准例程。

6 校准方法

为了解决任何系统特有的非线性问题，通常必须实施校准，以确保获得最精确的结果。虽然在执行反正切计算之前消除机械或电气误差后产生的结果最具线性，但单独消除每个误差源的做法并不实际。相反，可通过与已知角度对比来创建最终曲线。测量的角度减去误差，可最大程度地减小微控制器使用的最终位置误差。考虑每个不同机械误差模式的影响相结合产生的可能角度误差。虽然通常同轴情况的误差很小或没有误差，但是当这些因素结合在一起，将出现复杂的误差类型。图 6-1 中值得注意的是，循环振幅在一次完整旋转中会发生变化。

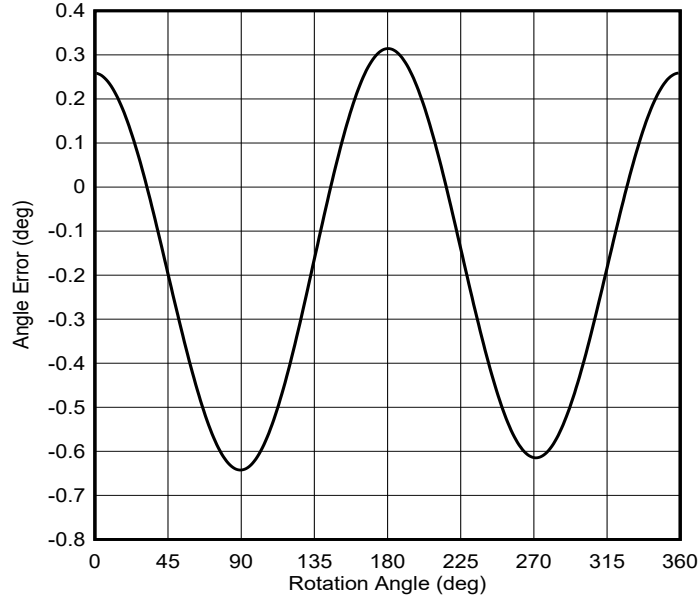


图 6-1. 存在综合机械误差的同轴角度误差

通常情况下，可使用两种方法来校准此类角度测量误差。第一种方法使用多点查找表来生成分段逼近的误差曲线。随着数据点数量增加，生成的图将快速接近实际的系统误差。考虑对示例误差曲线的 8 点、16 点和 32 点校准进行比较。

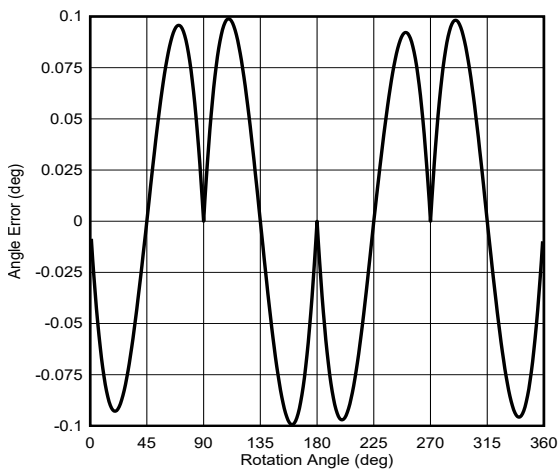


图 6-2. 8 点线性化

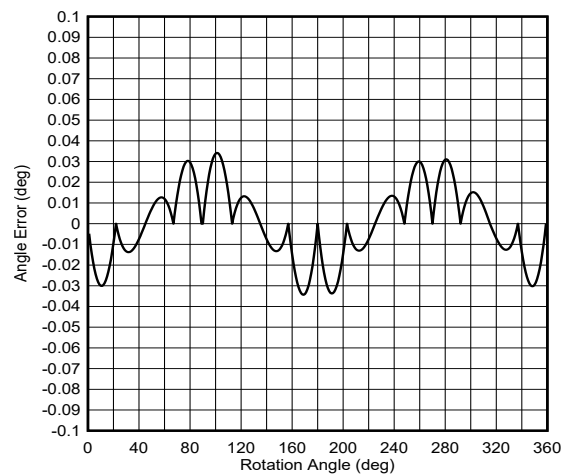


图 6-3. 16 点线性化

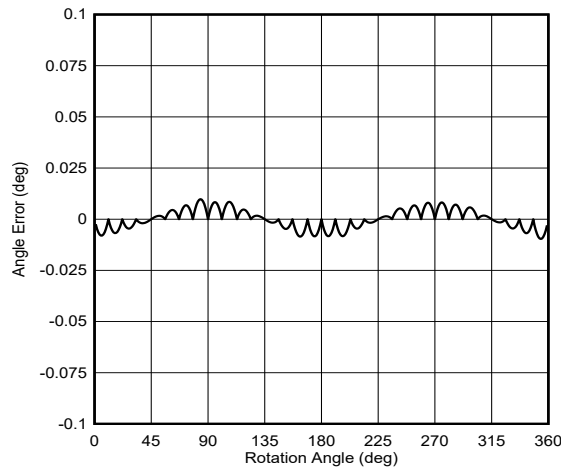


图 6-4.32 点线性化

此方法需要一个查找表，用于通过假设误差在这些已知值之间发生线性变化来估算最近数据点之间的误差。

另一种方法是尝试通过基于公式的解决方案来估算所有位置的误差。误差本质上是循环的，因此可以通过对每个谐波的正弦值和余弦值求和来计算近似值。同样，随着数据点的数量增加，精确度也随之提高。使用图 6-5 中的相同误差曲线，在校正前 4 个谐波后可以达到更高的精确度。

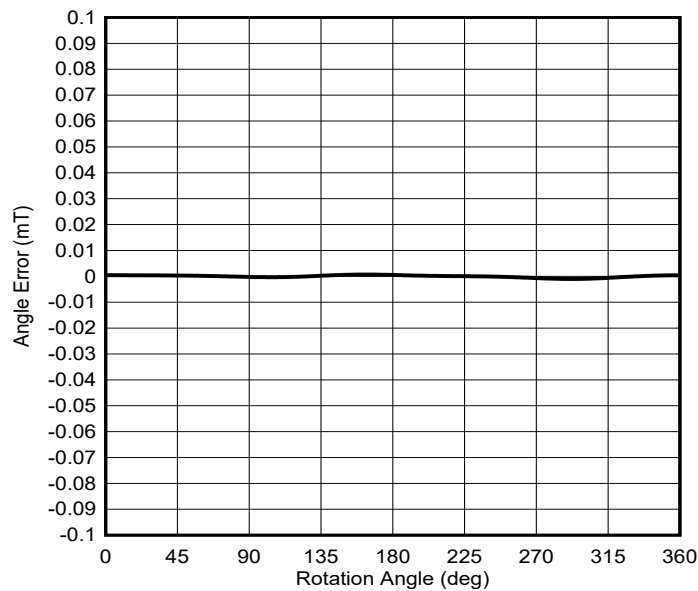


图 6-5. 谐波近似线性化

有关使用 [TMAG5170](#) 进行角度编码的详细信息和实验室环境中采集的校准示例，请参阅 [使用霍尔效应传感器实现精确的电机位置控制的绝对角度编码器参考设计](#)。

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

Changes from MARCH 29, 2022 to MAY 9, 2023 (from Revision * (March 2022) to Revision A (May 2023))

| | Page |
|--------------------------------|------|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... | 3 |
| • 添加了 TMAG5170D-Q1..... | 4 |
| • 添加了 TMAG5170D-Q1..... | 8 |
| • 添加了 TMAG5170D-Q1..... | 17 |

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