

Application Note

线性位置应用的磁体选择



摘要

对于必须检测磁体沿线性路径滑动位置的位置感应应用（例如线性电机运输系统），磁体的几何形状和与传感器的相对空气间隙会在磁体通过传感器时影响磁场的行为。

此外，在任何系统中，必须为每个传感器更大限度地扩大感应范围，从而减少元件数量并节省成本。在仅需要少量传感器的小型应用中，单个磁体的成本通常会超出传感器的总成本。但是，设计人员可以考虑使用稍大的磁体来减少大型阵列中的传感器总数。

本应用手册讨论了使用 3D 磁传感器（如 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#) 和 [TMAG5273](#)）在线性阵列中放置、校准和感应各种磁体几何形状和材料的范围。

内容

1 引言.....	2
2 磁体选择.....	4
2.1 磁体参数的影响.....	4
2.2 校准方法.....	6
3 总结.....	10
4 参考资料.....	10
5 修订历史记录.....	11

插图清单

图 1-1. 具有一维霍尔效应传感器的线性位置感应阵列.....	2
图 1-2. 线性阵列配置中的 DRV5055 输出.....	3
图 1-3. 线性运动期间观察到的磁场分量示例.....	3
图 2-1. 滑动线性磁性位置感应.....	4
图 2-2. B 场 Z 分量与线性位置间的关系.....	4
图 2-3. 减小磁体直径后的线性位置扫描.....	5
图 2-4. 磁体厚度增加后的线性位置扫描.....	5
图 2-5. 各种磁性材料的磁通量密度与空气间隙范围间的关系.....	6
图 2-6. 垂直空气间隙为 10mm 时的磁体 (10mm ϕ $\times$ 4mm).....	7
图 2-7. 机械角度与计算出的反正切间的关系.....	7
图 2-8. 校准后的位置误差与绝对位置间的关系.....	8
图 2-9. 空气间隙为 10mm 时磁体的位置误差 (5mm ϕ $\times$ 4mm).....	8
图 2-10. 空气间隙为 10mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm).....	8
图 2-11. 空气间隙为 5mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm).....	9
图 2-12. 空气间隙为 20mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm).....	9
图 2-13. 空气间隙为 5mm 时磁铁位置误差 (10mm $\times$ 10mm $\times$ 4mm).....	9

表格清单

表 2-1. 磁性材料温度响应.....	5
----------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在检测任何系统中磁体的线性运动时，设计人员必须针对所用特定磁体更大限度地提高传感器的总感应范围，同时保持所测量的总体位置误差具有非常小的容差。此策略使设计人员能够更大限度减小磁体尺寸，并减少阵列中捕获系统全冲程长度所需的霍尔效应传感器总数。

更严格的磁性位置感应容差可为系统中的每个单独动子提供准确的位置，从而在线性电机运输系统等受控系统中产生更好的反馈。在线性电机运输系统中，通常有几个单独的动子使用重复的线性电机围绕轨道或平台进行驱动。对于任何动子，始终了解绝对位置对于正确地将目标放置在每个制造步骤、有效地移动平台以实现最大吞吐量以及准确驱动控制该位置的电机级至关重要。

一直以来，此功能由一维线性霍尔效应传感器（例如 [DRV5055](#)）提供支持，这些传感器在使用 SOT-23 封装时捕获磁场的 z 分量。

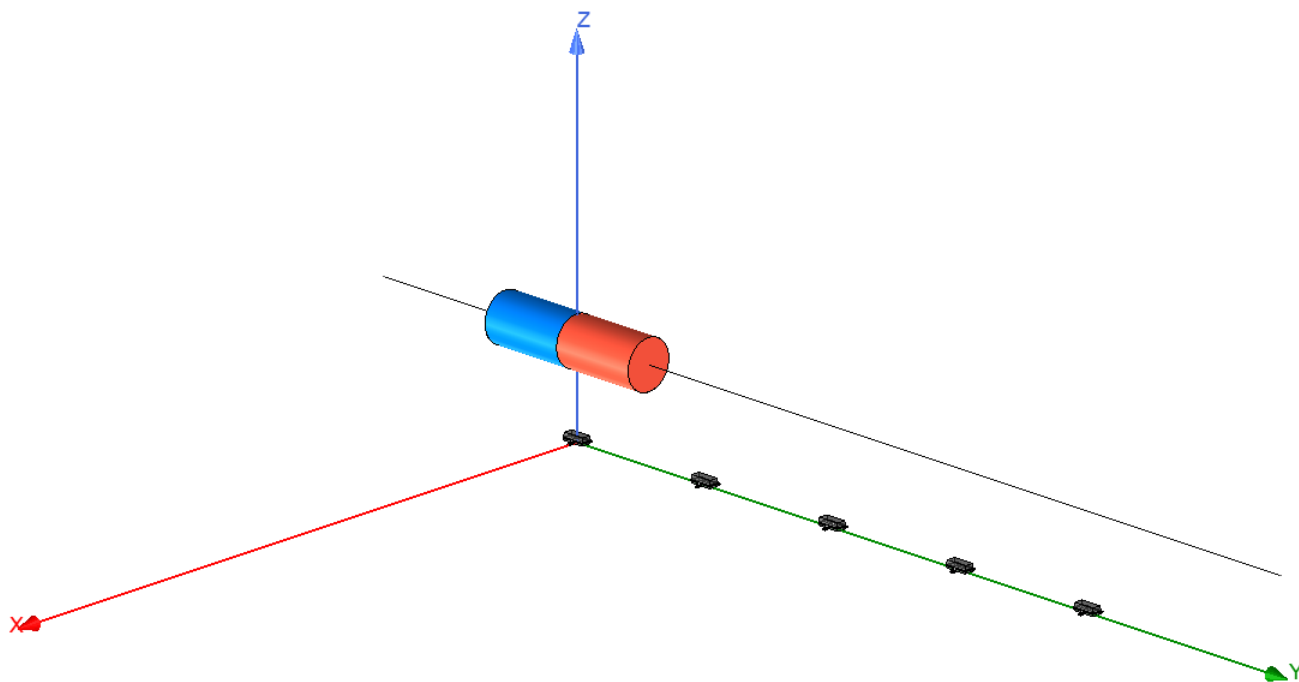


图 1-1. 具有一维霍尔效应传感器的线性位置感应阵列

在这种类型的位置感应配置中，感应范围限制在输入磁场的线性区域，该区域大约为磁体的长度。

DRV5055 Linear Array Response

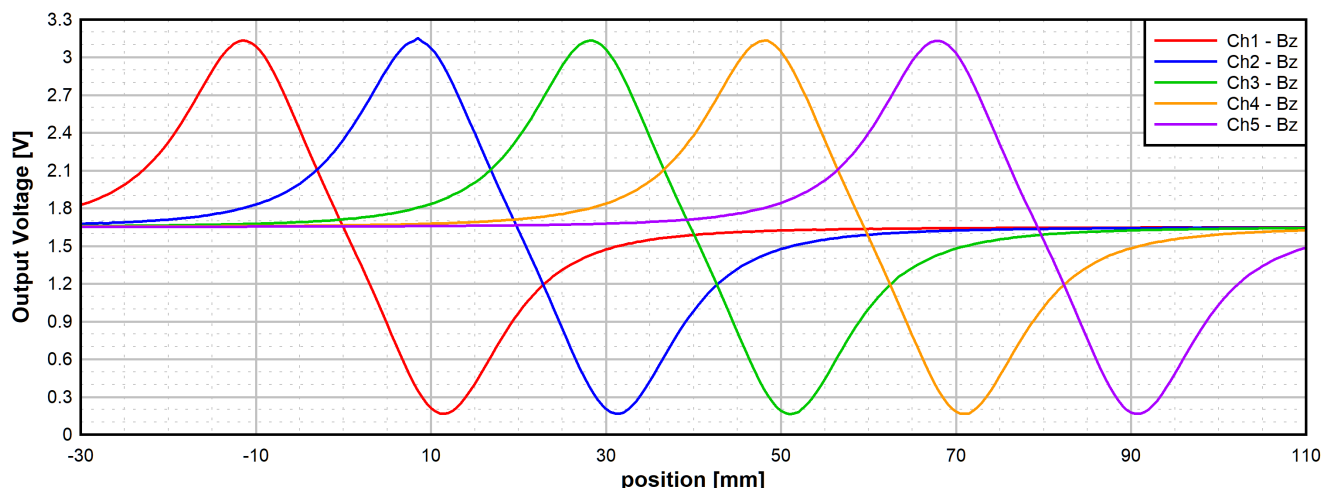


图 1-2. 线性阵列配置中的 DRV5055 输出

线性霍尔效应传感器阵列设计 应用手册中更详细地介绍了该配置。

通过使用 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#) 或 [TMAG5273](#) 等 3D 线性霍尔效应传感器实现此设计，获得了显著的优势。首先，传感器能够检测整个 $\mathbf{B}$ 场矢量的每个分量。通过扩展信息，我们可以在运动范围内识别出精确的磁体位置，冲程长度大于使用单轴传感器检测到的冲程长度。此外，这些传感器还集成了振幅和偏移校正功能，可用于校正各种机电因素。

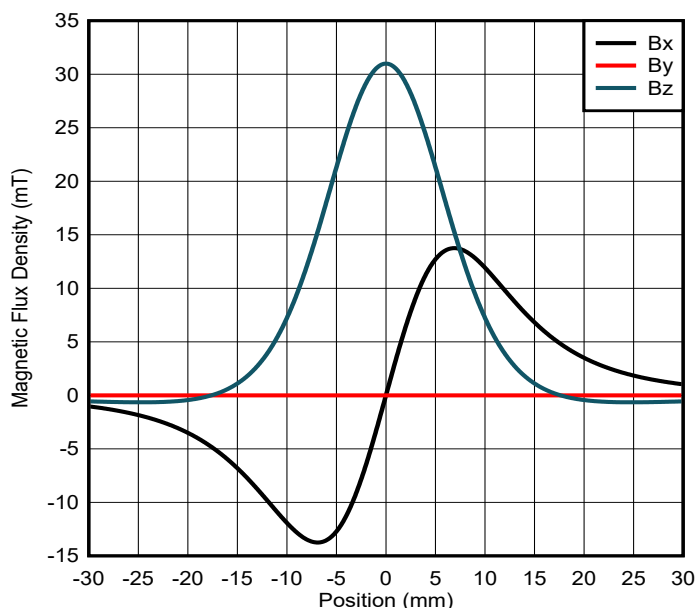


图 1-3. 线性运动期间观察到的磁场分量示例

了解磁体选择对使用 3D 传感器的滑动排列中的位置测量质量有何影响，以及如何以正确方式线性化该测量，从而更大限度地减小误差。

2 磁体选择

2.1 磁体参数的影响

为线性动子选择磁体时，应考虑温度、磁性材料、磁体等级、磁体几何形状和一般机械限制。这些系统变量都会影响系统的整体功能和可靠性。

作为一项示例研究，模拟了在空气间隙递增时，具有 850mT 剩余磁化强度 (B_r) 的轴向磁化圆柱体磁体在传感器上方移动。

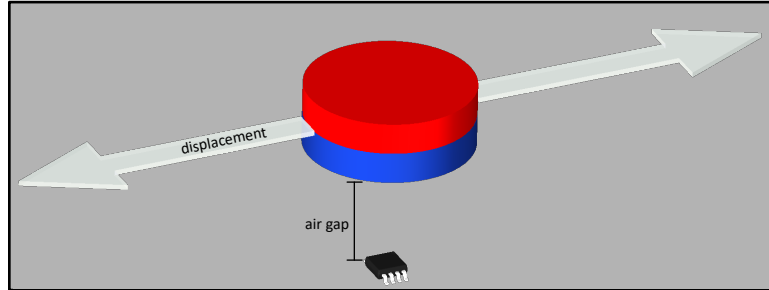


图 2-1. 滑动线性磁性位置感应

磁体的外径为 16mm，厚度为 6mm。每条水平线代表可观察到的磁通密度的垂直分量 (B_z) 的幅度。绘制在一起，生成了一个 3D 热图，其中展示了该磁场分量在磁体下方区域的变化情况。在本例中，水平位移在 -40mm 至 +40mm 范围内扫描，传感器和磁体之间的垂直空气间隙范围为 2mm 至 15mm。

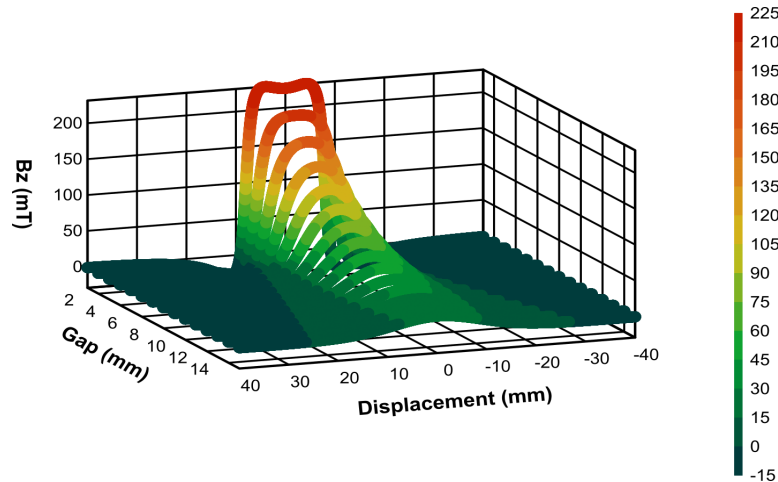


图 2-2. B 场 Z 分量与线性位置间的关系

对于 TMAG5170，该器件提供两种型号，每个型号都具有三种用户可编程输入范围，介于 $\pm 25\text{mT}$ 至 $\pm 300\text{mT}$ 之间。任何高于最大范围的输入都没有用。或者，TMAG5170D-Q1 是 TMAG5170 的双芯片版本，可在系统需要冗余时使用。

仔细观察这些结果，当传感器元件和磁体之间的空气间隙距离非常小时，随着曲线开始变平，钟形输入曲线的峰值附近会出现失真。在非常接近的范围内，不良的峰值是由磁体集中于磁场的锐角效应引起的。

为了进行比较，请考虑磁体几何形状的变化如何影响整体功能。例如，如果磁体的外径为 8mm，而所有其他参数相同，您会注意到行为上的几个不同变化。

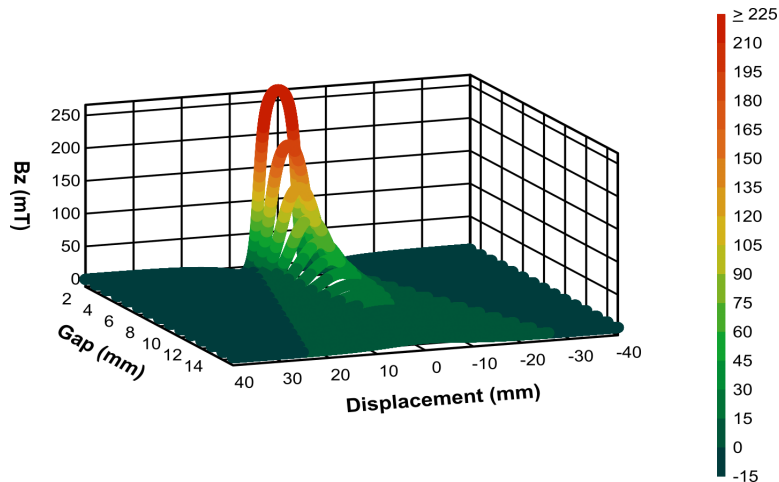


图 2-3. 减小磁体直径后的线性位置扫描

一个值得注意的变化是，输入范围的有效宽度显著减小。节 2.2 一节介绍了最大感应范围通常至少是磁体直径的 2 倍。

此外，当使用较窄的磁体时，在非常靠近时观察到的锐角效应会显著降低。当空气间隙范围增大时，峰值振幅会快速下降。直观地说，较小磁体的感应范围不如原磁体的感应范围大。降低信噪比 (SNR) 会增加任何测量中的不确定性，这使得事情变得更复杂。因此，应使目标输入值接近所选传感器的满量程输入范围。

假设更大的直径更适合增大的感应范围，则有关磁体厚度影响的另一项研究可提供更多信息。接下来，考虑将厚度从 6mm 增加到 12mm 的影响。

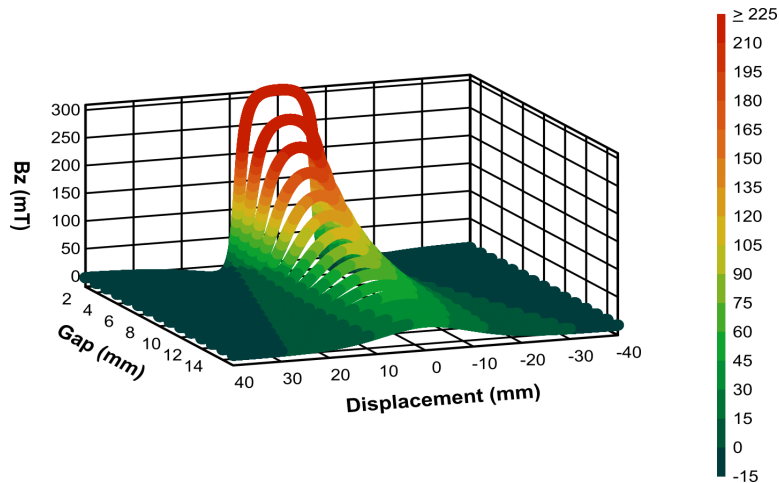


图 2-4. 磁体厚度增加后的线性位置扫描

与减小磁体直径类似，增加厚度也会降低锐角效应，尽管在非常靠近的位置仍会出现可见的失真。我们可以据此推断厚度与直径之比会影响此运动可实现的最接近感应范围。毫无疑问，当使用质量较大的磁体时，B 场峰值幅度也会增加。

除了考虑磁体尺寸外，磁体的材料和等级也会影响磁场强度和构建系统的成本。例如，磁性材料会随着温度的升高而减弱。表 2-1 展示了此行为的典型值。

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

表 2-1. 磁性材料温度响应 (续)

材质	温漂 (C)
铁氧体	-0.2%/C

如果工作环境中的温度变化较大，请考虑选择钐钴 (SmCo) 磁体来降低温漂的影响。

考虑传感器的近似工作空气间隙范围。传感器观察到的磁通量密度与距离的平方成反比。也就是说，随着距离的增大，预计场强度会出现指数衰减。

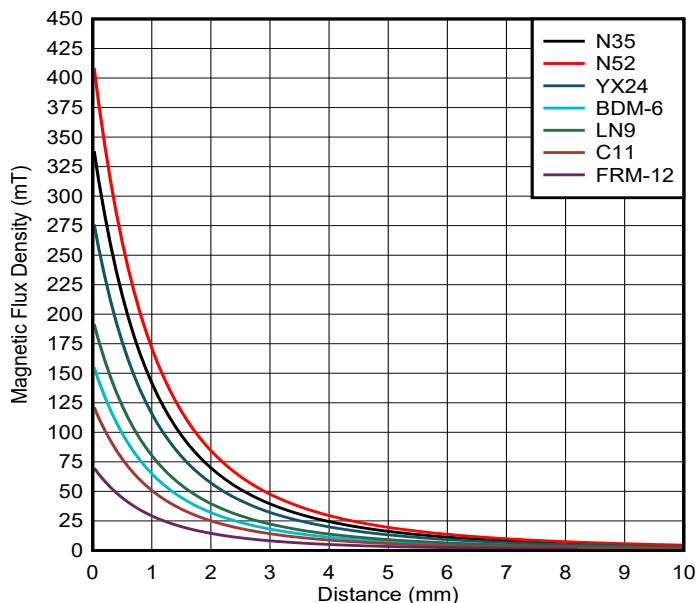


图 2-5. 各种磁性材料的磁通量密度与空气间隙范围间的关系

对于任何磁性材料，通常有几个不同等级的磁体，通常以材料的 B_r 进行区分。无论磁体的大小如何，该值都是针对任何特定材料定义的。随着 B_r 的减小，任何特定形状磁体的 B 场都会减弱。钕型磁体（如 N35 和 N52）往往是市面上磁力很强的商用磁体，而 FRM-12 等价格低廉的铁氧体材料往往磁力较弱。

2.2 校准方法

对于所选的任何特定磁体，可以通过使用霍尔效应传感器输出的反正切推导机械角来计算磁体的位置。

例如，图 1-1 产生的具有 850mT 剩余磁化强度的输入磁场如下图所示。

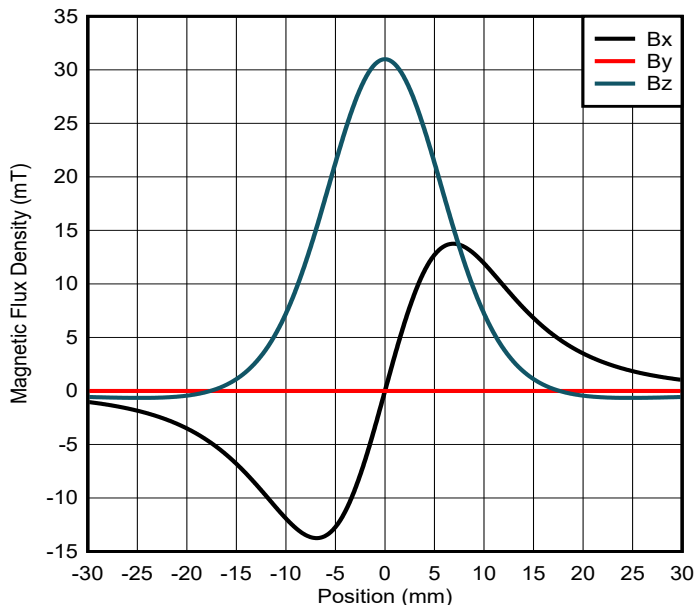


图 2-6. 垂直空气间隙为 10mm 时的磁体 (10mm $\phi \times 4$ mm)

可以直接将使用这些输入的角度计算与实际机械角度进行比较。

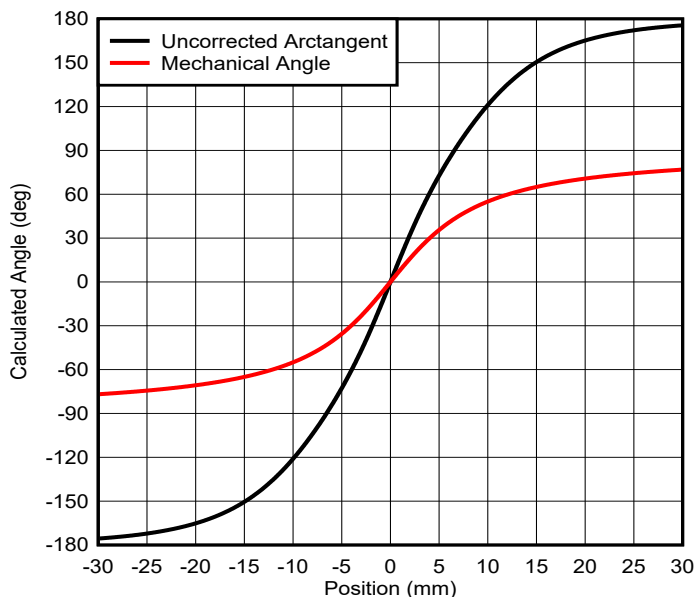


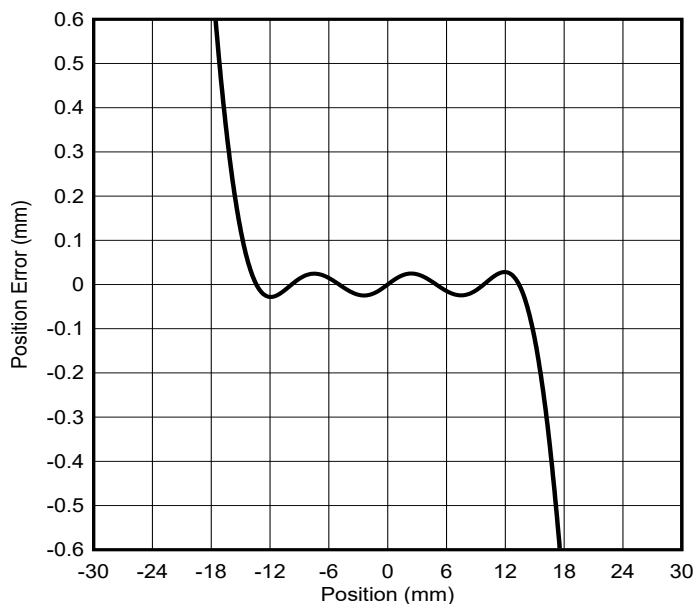
图 2-7. 机械角度与计算出的反正切间的关系

请注意，形式相似，但在形状和程度上有所失真。可以使用以下形式来校正此失真：

$$Position = \tan\left(\gamma * \tan\left(\frac{\alpha * (B_z - \beta)}{B_x}\right) + \phi * B_x\right) * \frac{magnet\ thickness + air\ gap}{2} \quad (1)$$

在方程 1 中，需要四个具体的校正因数来获得线性度。 α 指定应用于 Z 轴输入的振幅校正， β 指定必须应用于 Z 轴输入的固定偏移。 γ 是针对磁角的标量校正，而 ϕ 是 Y 轴输入的标量因子，用于校正最终结果中的一些非线性。

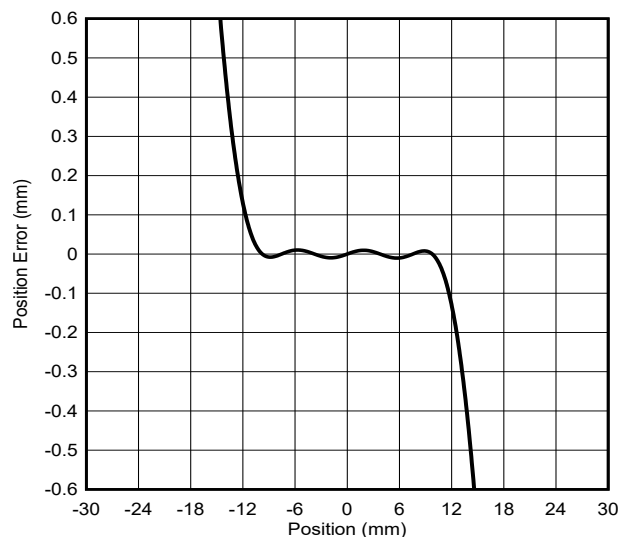
在本例中，为每个因素设置以下凭经验推导出的值会产生最终位置精度，如图 1-1 所示。



$$\alpha = 0.791 ; \beta = 16.3 ; \gamma = 0.4104 ; \phi = 0.448$$

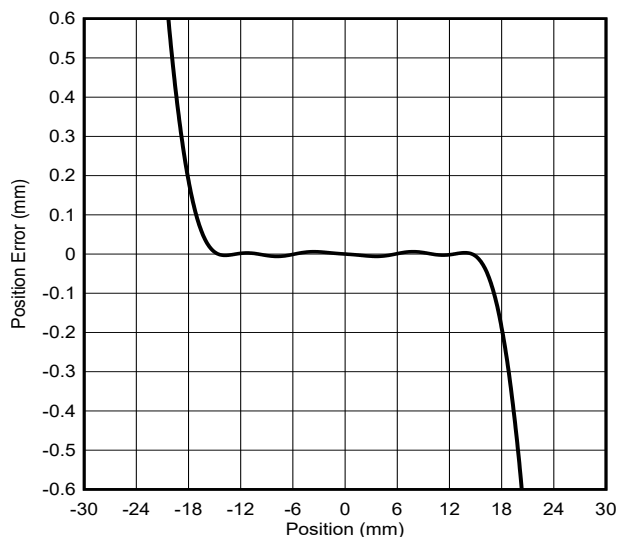
图 2-8. 校准后的位置误差与绝对位置间的关系

为了获得相似的精度，在下图中采用了同样的方法。在每种情况下，在约为磁体直径 2 倍的区域内，位置误差都最小。



$$\alpha = 0.833 ; \beta = 4.85 ; \gamma = 0.397 ; \phi = 1.07$$

图 2-9. 空气间隙为 10mm 时磁体的位置误差 (5mm ϕ $\times$ 4mm)



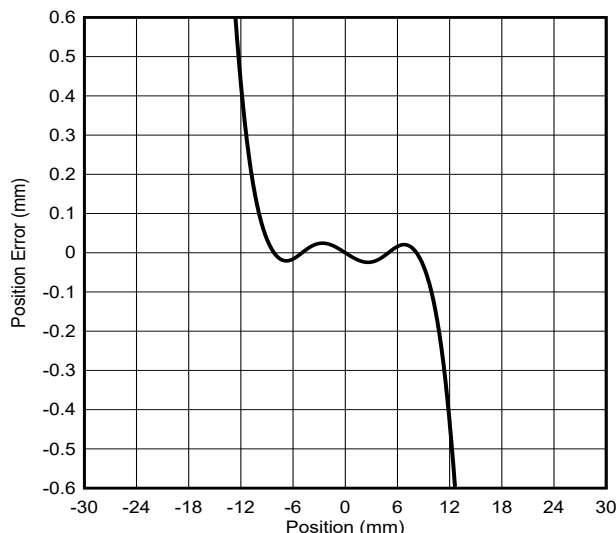
$$\alpha = 0.739 ; \beta = 24.12 ; \gamma = 0.4215 ; \phi = 0.4617$$

图 2-10. 空气间隙为 10mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm)

每次校准的质量随所应用的校正因数的精确性而异。对于直径最大的磁体，感应范围内的峰值误差约为 10 μ m。

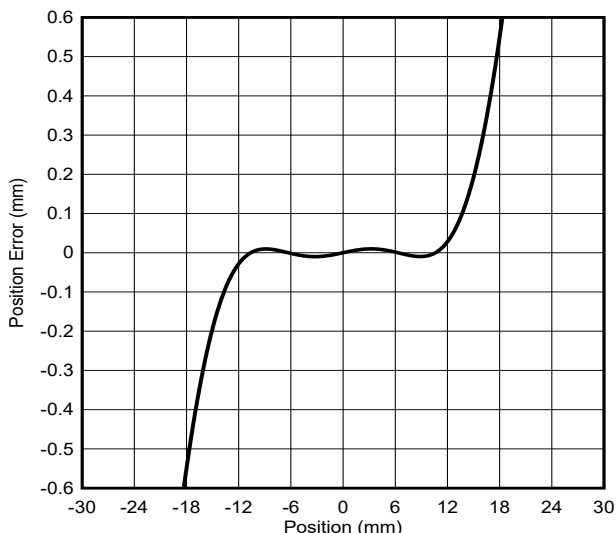
类似地，对于较小（也是最弱）的磁体，电势感应范围与磁体直径之比最大。

同样，可以改变空气间隙距离来演示对传感器的预期感应范围的影响。考虑根据空气间隙为 5mm 和 20mm 时的 14mm ϕ $\times$ 4mm 磁体生成的以下图表。



$$\alpha = 0.79 ; \beta = 58.9 ; \gamma = 0.297 ; \phi = 0.049$$

图 2-11. 空气间隙为 5mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm)

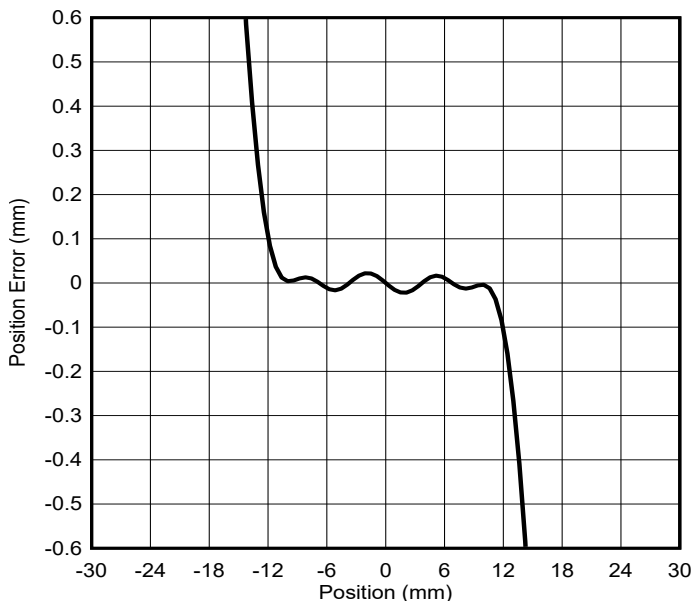


$$\alpha = 0.775 ; \beta = 4.95 ; \gamma = 0.436 ; \phi = 1.54$$

图 2-12. 空气间隙为 20mm 时磁体的位置误差 (14mm ϕ $\times$ 4mm)

在这两种情况下，磁体的最大感应距离都有所减小。在空气间隙为 5mm 时，输入磁场受到失真的限制。在空气间隙为 20mm 时，感应范围受磁场强度的限制。因此，设计目标是确保强磁场既不会使传感器的输入饱和，也不会因磁体的近距离而失真。

在某些情况下，使用条形磁体有利于轻松组装。这种校准方法不限于圆柱形磁体。与之前的情况类似，对穿过传感器的方形表面磁体实施相同的校准方法可以实现出色的线性度（请参见图 1-1）。



$$\alpha = 0.75 ; \beta = 53.7 ; \gamma = 0.3815 ; \phi = 0.089$$

图 2-13. 空气间隙为 5mm 时磁铁位置误差 (10mm $\times$ 10mm $\times$ 4mm)

3 总结

如上面的校准结果所示，有多个选项可用于优化每个 3D 霍尔效应传感器的放置，以实现较长的可观察行程距离。为了获得更高质量的结果，具有足够强的磁体以使用传感器的大部分线性输入范围是有利的，而更宽的磁体可以产生更大的感应范围。在空气间隙距离很小的情况下，使用较厚的磁体来减少可能在磁体角附近导致的失真。

正确实施的 3D 霍尔效应传感器（包括 [TMAG5170](#)、[TMAG5173-Q1](#) 和 [TMAG5273](#)）可将感应范围增加约 2 倍，并可实现 10 μm 的线性误差，如 [图 1-1](#) 中所示。更大限度地扩大感应范围对于减少任何线性位置感应应用中所需的传感器总数至关重要。此外，减少线性误差对于自动化系统（如线性电机运输系统）实现制造和装配质量和高度可重复性能所需的精确控制至关重要。

4 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[DRV5055 比例式线性霍尔效应传感器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[线性霍尔效应传感器阵列设计](#) 应用手册。
- 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。
- 德州仪器 (TI)，[TMAG5273 具有 I2C 接口的低功耗线性 3D 霍尔效应传感器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[TMAG5173-Q1 具有 I2C 接口的高精度 3D 霍尔效应传感器](#) 数据表

5 修订历史记录

Changes from Revision A (July 2022) to Revision B (May 2024)	Page
--	------

- | | |
|--------------------------|---|
| • 通篇添加了 TMAG5173-Q1..... | 1 |
|--------------------------|---|
-

Changes from Revision * (July 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..... | 1 |
| • 添加了对 TMAG5170D-Q1 的引用..... | 4 |
| • 添加了 参考文献 部分..... | 10 |
-

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司