

Application Note

使用霍尔效应传感器的电子换挡器设计



摘要

电子换挡器用于确定车辆的操作模式，因此需要内置可靠的冗余功能，以确保在发生任何干扰时都能维持关键功能。为了实现这种冗余功能，许多制造商在设计时采用了多个相同的独立传感器件。本文档详细介绍了如何使用 [TMAG5170D](#) 来设计电子换挡器，其中 [TMAG5170D](#) 在单个封装中集成了两个独立的传感器件。

内容

1 简介.....	2
2 选择机械实现.....	3
3 选择磁性实现.....	4
4 磁体传感器放置.....	6
5 原型设计和基准测试.....	8
6 误差源.....	11
7 总结.....	12
8 推荐器件.....	13
9 参考资料.....	14
10 修订历史记录.....	15

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

最终用户通常希望电子换挡器稳健可靠、触感明显，并且操作所需的灵巧度极小。从合同汽车制造商的角度来看，设计需要满足功能安全要求，并且底层设计需要足够灵活和精确，以便能够打包并在多种不同的车型中重复使用。在满足这些基本目标后，制造商希望尽可能地降低成本和功耗并缩小设计尺寸。

本文档介绍了使用 **TMAG5170D** 实现电子换挡器的设计流程。**TMAG5170D** 是一款经过专门设计的多传感器器件，可满足具有功能安全要求的系统所需的冗余。封装中的特色堆叠芯片减小了感应元件之间的间距，从而降低了传感器之间的误差。此外，较低功耗唤醒和睡眠模式使得电子换挡器设计人员可以尽可能地降低功耗。

图 1-1 总结了本文中介绍的设计流程。

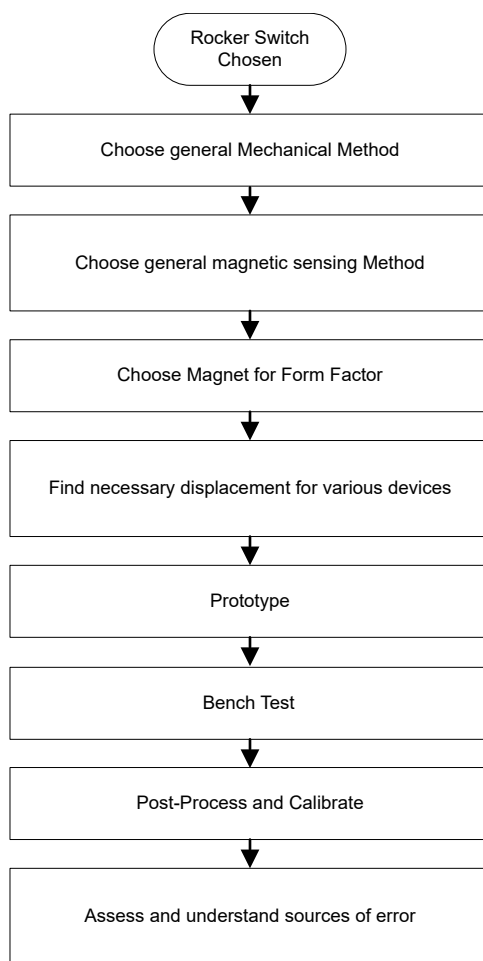


图 1-1. 开发流程

2 选择机械实现

电子换挡器的机械实现不仅影响最终用户的体验，还会对适合使用的磁体与传感器组合产生影响。图 2-1 中列出了五种可能的机械实现。从左到右依次为按钮、刻度盘、操纵杆、控制杆和拨杆实现。本文档探讨了控制杆换挡器设计。有关其他实现的相关内容，请查看节 9。

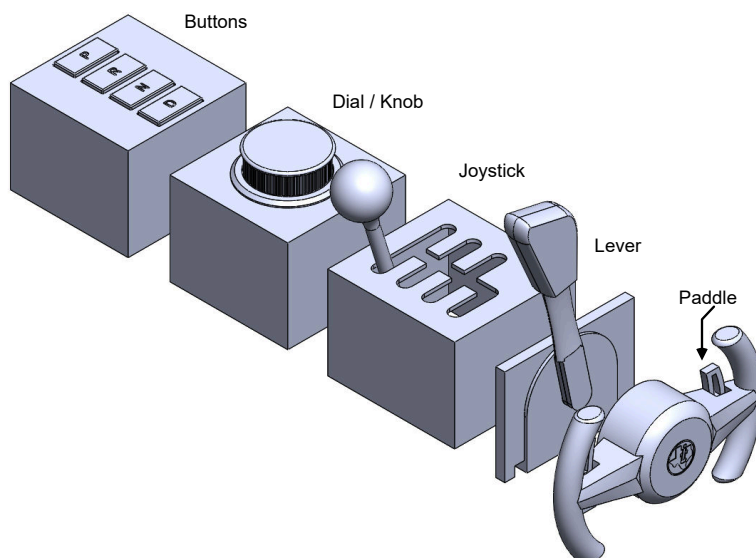


图 2-1. 电子换挡器机械实现

3 选择磁性实现

对于许多设计而言，符合逻辑的做法是将磁体置于要感应的移动元件中，而不是将其置于可能通过迹线和电线由某些远距离电源供电的传感器中。因此，磁体需要安装在换挡杆中的某个位置，并且根据磁体的放置位置，适用的磁体类型可能不同。图 3-1 显示了两种可能的磁体实现方案。左侧是一个径向磁体，其中心位于控制杆的支点中心，而右侧是一个轴向磁体，距离旋转轴有一定距离。

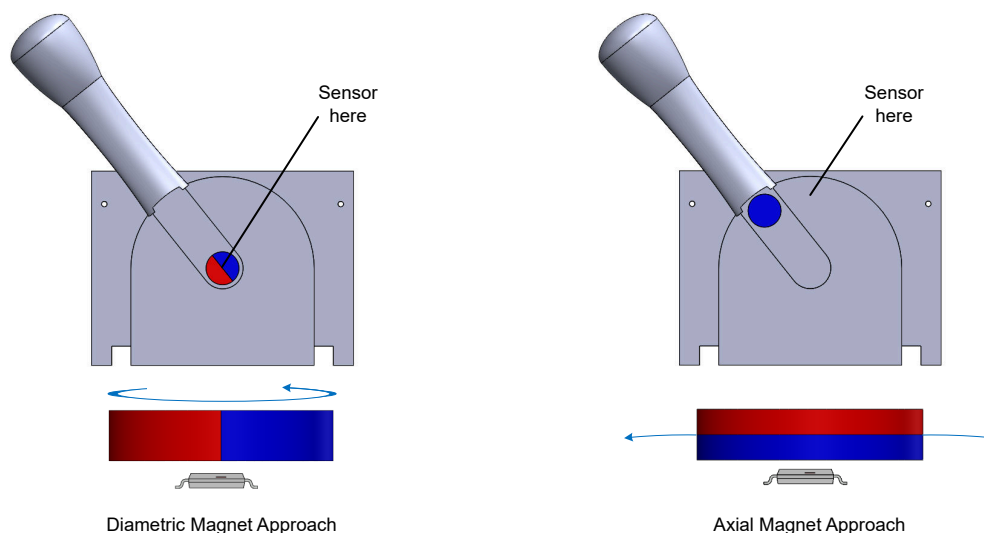


图 3-1. 磁性实现

本应用手册中所述设计的目标是实现线性而无混叠的输出，所需信号如图 3-2 中所示。对于检测绕轴旋转的物体，3D 或多轴传感器比单轴传感器更适合。单轴传感器无法避免混叠问题，多轴传感器却不仅具有封装方向的灵活性，而且还不受混叠的影响。这是因为相互垂直的磁场表现出类似于正弦波和余弦波的行为。通过对两个相互垂直的磁场进行反正切运算，可以得到磁体在宽运动范围内的线性输出。

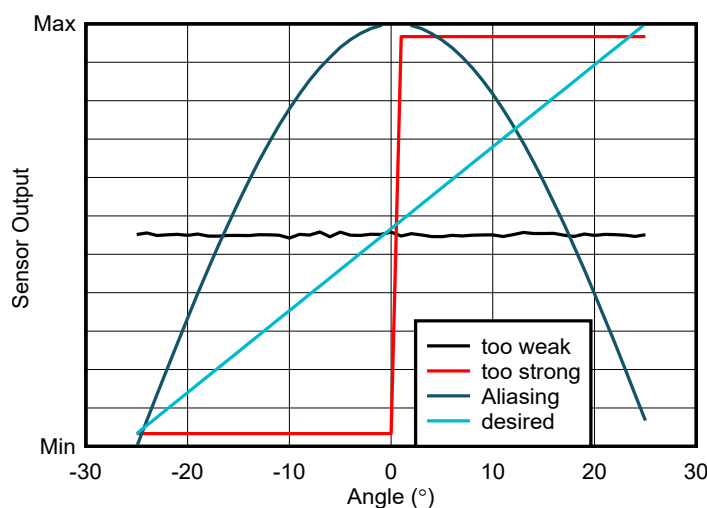


图 3-2. 输出图

对于径向磁体，预计出现图 3-3 中所示的磁场行为，而对于轴向磁体，预计出现图 3-4 中所示的磁场行为。

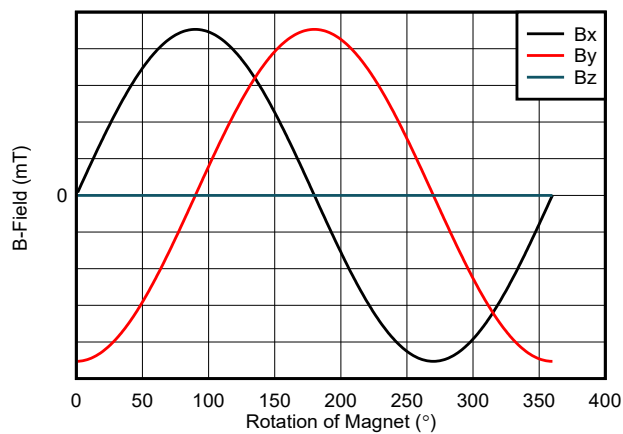


图 3-3. 径向方法的 B 场行为

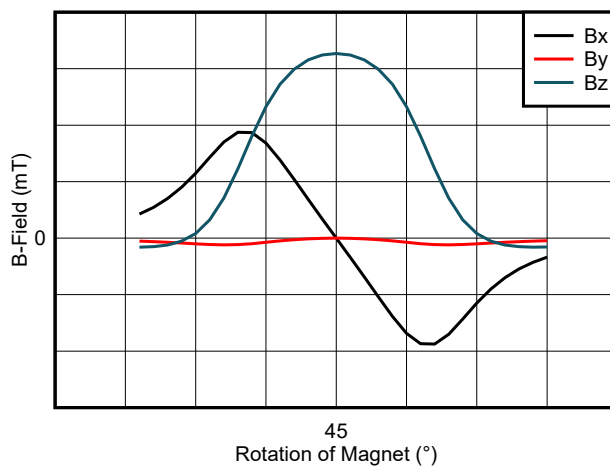


图 3-4. 轴向方法的 B 场行为

由于此设计中的换挡器会旋转并需要冗余测量，因此选择了 TMAG5170D。

4 磁体传感器放置

对于本应用报告中介绍的设计，除了放置换挡器检测系统的外壳外，还有两个约束条件决定了磁体和传感器之间的相对位置。这些限制条件是器件本底噪声和最大检测范围。目标是使器件检测到的最大磁场略小于用于优化信噪比的最大检测值。不过，这可能是不可能的，因此量化与不同峰值场强相关的误差对于判断磁体距离是否足够接近或磁体磁性足够强大以实现所需的机械磁性实现非常有用。对于峰值 B_x 和 B_y 磁场预计几乎相等的径向方法，图 4-1 显示了一个 Σ 磁噪声为 $185 \mu T$ 时最大误差估计是多少。图 4-1 和本节中后续的所有图示都是根据德州仪器 (TI) 磁感应仿真器 (TIMSS) 中进行的仿真得出。

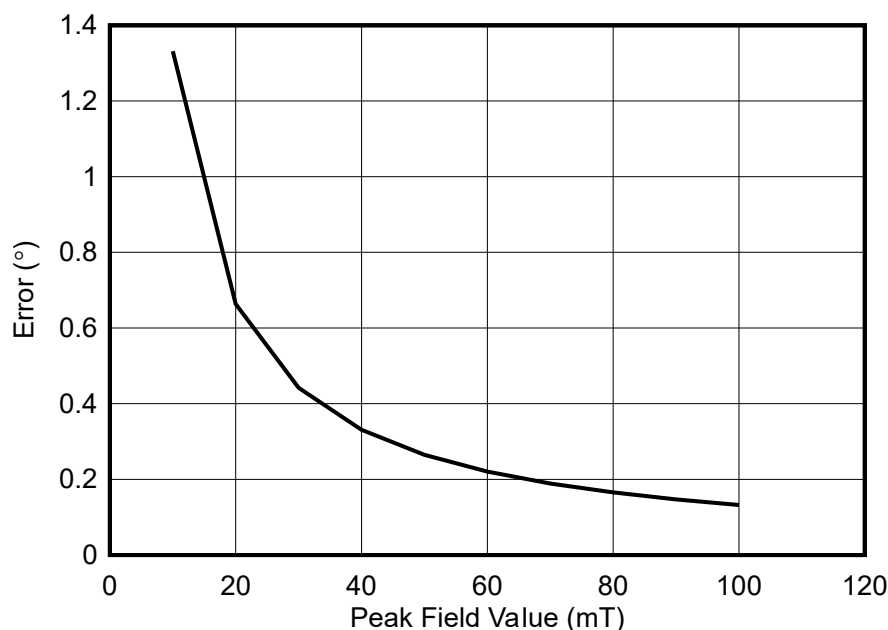


图 4-1. 径向方法中误差与峰值磁强间的关系

根据图 4-1 中观察到的结果，对于确定磁体的尺寸和等级以及磁体与器件之间的合理距离或空气间隙，可以遵循一些指导。为了评估磁体与器件之间距离（图 4-2 中以空气间隙表示）的影响，图 4-3 显示了一个直径为 12.7mm、厚度为 3.175mm 的 N42，TMAG5170 在距离磁体原点 -8mm 至 -2.5mm 范围内任何 z 偏移处测得的峰值磁场值。

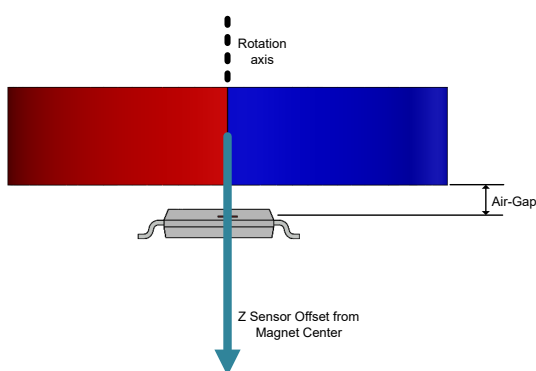


图 4-2. 传感器 Z 偏移扫描图

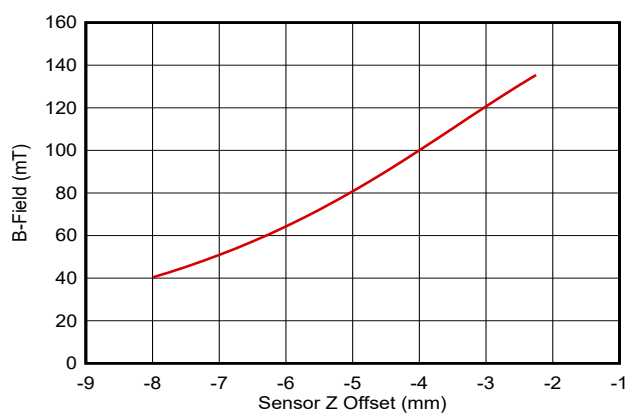


图 4-3. 最大 B_x 或 B_y 场与传感器 Z 偏移间的关系

为了评估磁体尺寸的影响，图 4-4 显示了一个厚度为 3.175mm、直径为 2mm 至 20mm 且空气间隙为 7mm 的 N42，可以观察到什么样的磁场值。

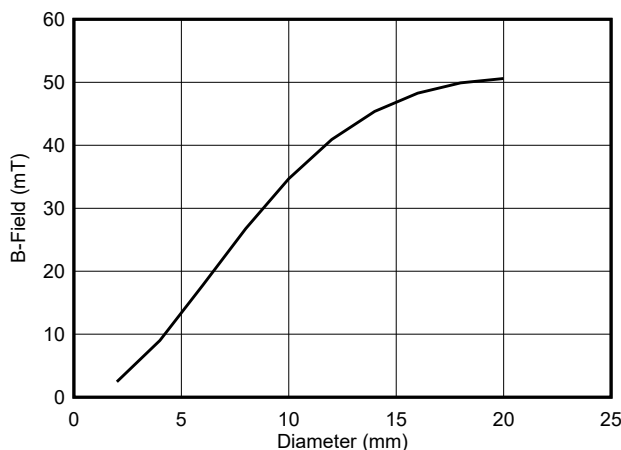


图 4-4. 最大 Bx 或 By 场与磁体直径间的关系

从图 4-1 中可以看出，根据器件本底噪声，为了使器件的误差保持在 1° 或更低，至少需要约 15mT 的磁场。图 4-3 显示，当磁体和器件之间的空气间隙加大时，预期的信号振幅会减小；但是，对于在目标放置区域中选择的磁体尺寸，振幅似乎至少是保持误差小于 1° 所需的两倍。最后，图 4-4 显示，对于所需的 7mm 偏移，如果仅考虑噪声导致的误差，则可以使用直径小至 5.4mm 的磁体来保持 1° 的误差。

由于噪声不是唯一的误差源，建议进行一些关于制造公差和组装公差的偏移扫描分析。图 4-5 表明，更小的直径对相同偏移下的误差不太宽容。根据大量未显示的仿真数据，偏移小于磁体直径长度的 10% 通常看似可提供小于 1° 的误差。至于磁体厚度，图 4-6 表明在不同厚度下只能观察到角度误差的轻微变化。

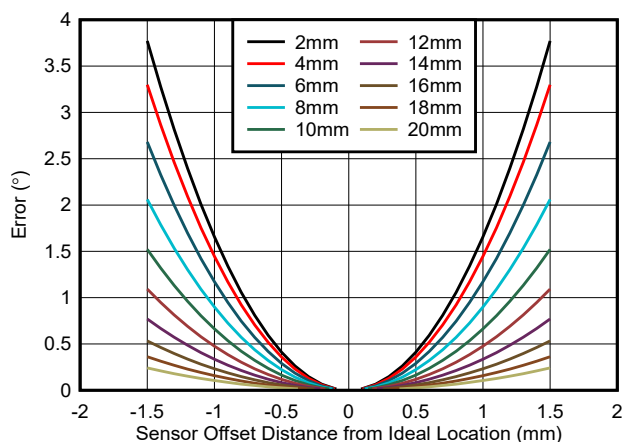


图 4-5. 直径扫描

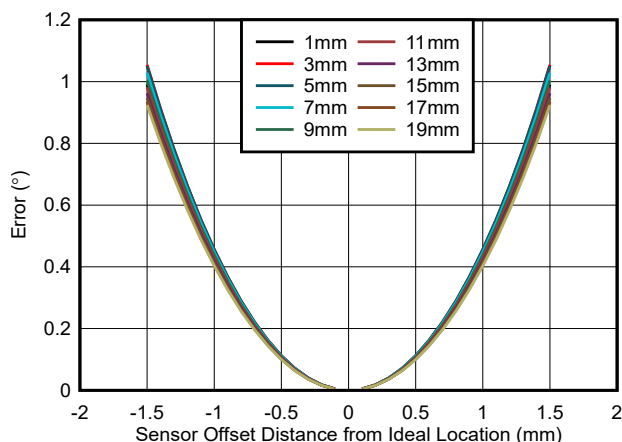


图 4-6. 厚度扫描

5 原型设计和基准测试

虽然仿真有助于初步设计和可行性评估，但验证实际性能需要原型设计和基准测试。仿真排除了未实现的变量，因此没有完全匹配实际测试用例所需的所有参数。基准测试揭示了仿真与具有制造和组装公差的生产系统之间的一些可能差异。

图 5-1 显示了本应用手册中介绍的径向制造设计以及用于进行性能基准测试的设置。在该设置中，Newport URS50BCC 旋转台旋转电子换挡器换挡杆，同时一个 python 程序收集 Newport 角度和 TMAG5170D 磁通测量值和角度计算值。收集数据后，会将从 TMAG5170D 收集的第一个角度与 Newport 报告的第一个角度进行比较，并将从 TMAG5170D 的所有后续计算角度中减去这两个值之间的差值，以进行单点校准。随后，计算 Newport 和偏移的 TMAG5170D 角度之间的差值，以确定单点校准角度误差，单位为度，如图 5-2 所示。

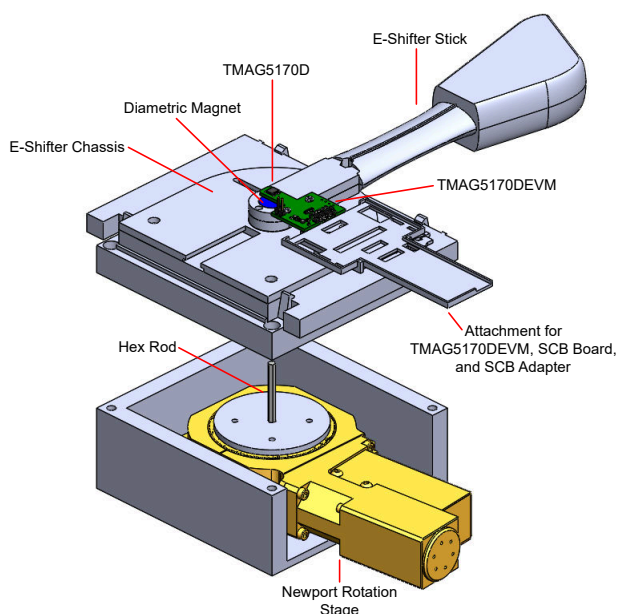


图 5-1. 测试设置分解图

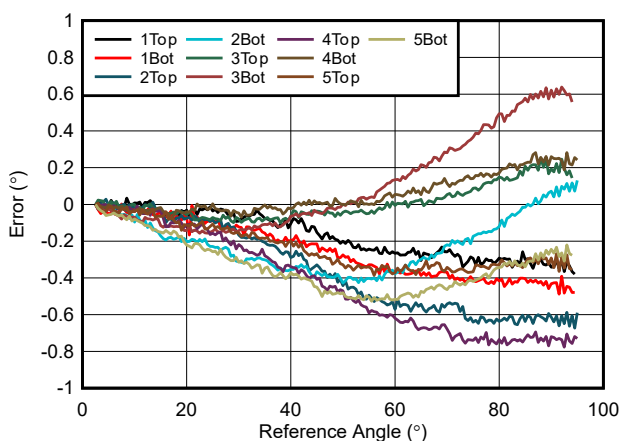


图 5-2. 单点校准方法

通过绘制经过单点校准的数据与 Newport 角度（被视为绝对角度参考点）的关系图，图 5-3 中的数据看起来是线性的并与参考相似，但没有图 5-2 中所示的精确 1-1 关系。为了尽可能地减小绝对角度源与从 TMAG5170D 获得的角度的差值，可以进行两点或更多点校准。本演示中使用了移动边界来进行两点校准。然后，使用了边界点之间的差值来确定描述从 TMAG5170D 计算的角度与误差之间关系的公式所对应的系数，如图 5-4 所示。

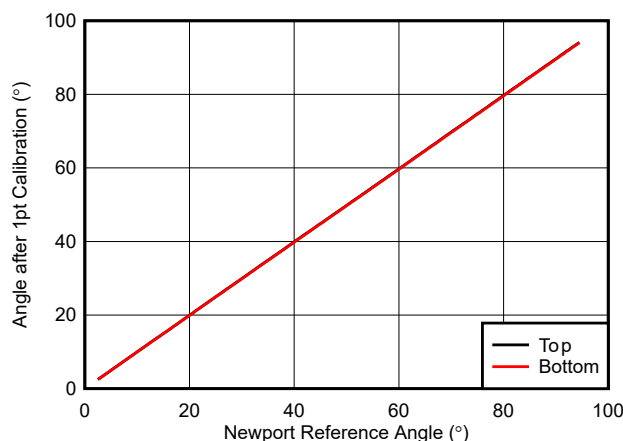
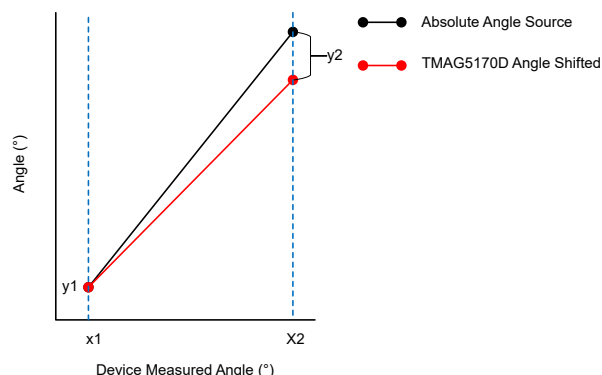


图 5-3. 角度比较



$$y = mx + b \quad (1)$$

$$y = \text{error} \quad (2)$$

$$x = 1 \text{ pt calibrated TMAG5170 data} \quad (3)$$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

$$b = y_2 - mx_2 \quad (5)$$

$$\text{Angle}_{\text{Cal}} = \text{Angle}_{\text{TMAG}} + (m \times \text{Angle}_{\text{TMAG}} + b) \quad (6)$$

图 5-4. 两点校准方法

通过两点校准，我们得到了图 5-5。这些结果显示最大误差在 -0.5° 和 0.12° 之间，而不是之前 -0.8° 和 0.63° 之间的误差。这表明最大误差可以校准为低至 $\pm 0.5^\circ$ ，误差范围缩小了近 60%。通过将校准扩展到三点，得到了图 5-6。该集合的误差为 -0.15° 到 0.14° ，与单点校准相比，误差范围缩小了 80%。

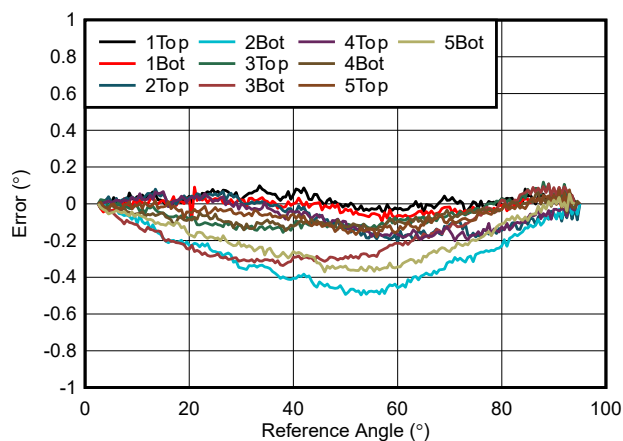


图 5-5. 两点校准方法

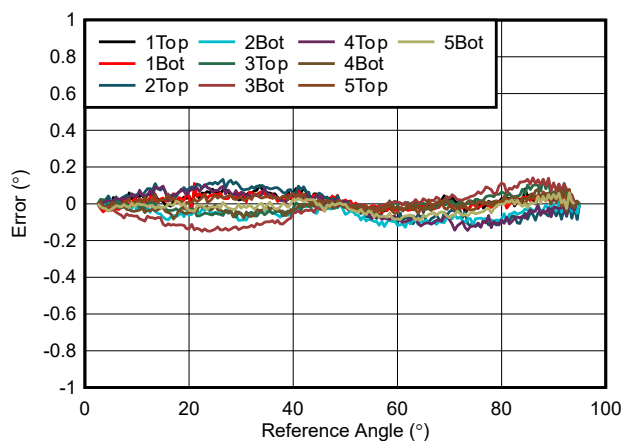


图 5-6. 三点校准

由于电子换挡器需要冗余，传感器之间的误差也是一个非常重要的指标。图 5-7 至图 5-10 显示了在每个器件上不同传感器之间观察到的差异度数。检查发现，未进行校准时，误差范围大致为 ± 0.6 度，而进行单点校准时，误差范围偏移为 -1.2 至 0.2。从单点校准是将两个传感器起始角归零这个角度来看，这一点很合理。涉及更多点的校准可以补偿误差，因此每增加一个校准点，误差范围都会有所缩小。

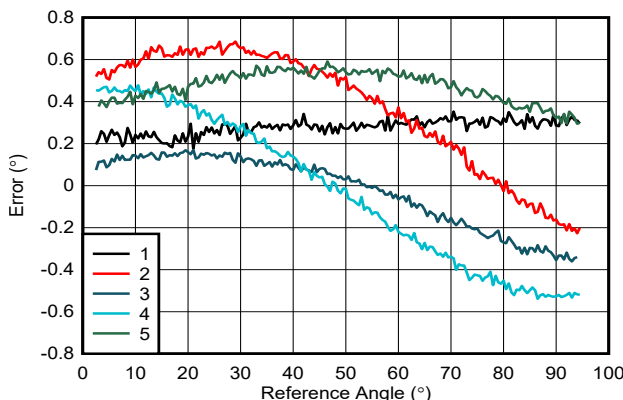


图 5-7. 传感器间的无校准误差

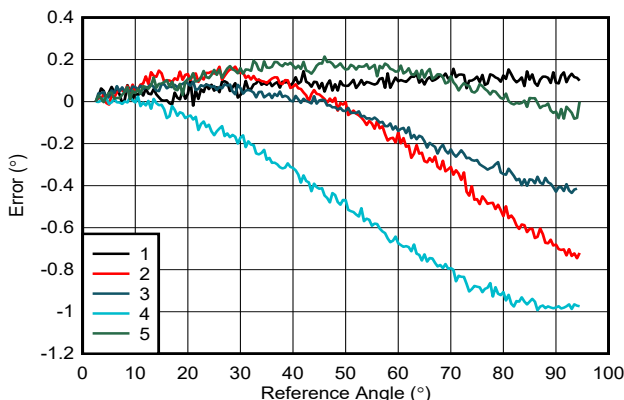


图 5-8. 传感器间的单点校准误差

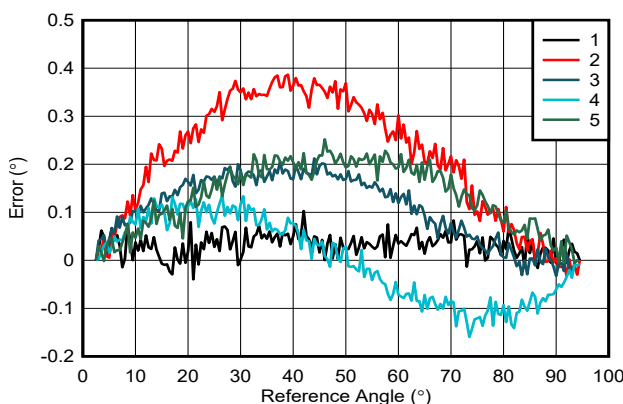


图 5-9. 传感器间的两点校准误差

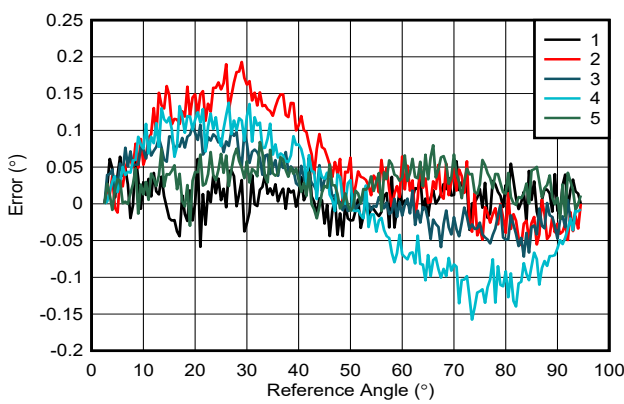


图 5-10. 传感器间的三点校准误差

6 误差源

有多种可能的误差源，其中许多误差源与制造和组装相对应。在基准评估的过程中，此类误差源易于识别，因此在投入大规模生产之前，基准测试是一种良好的必要做法。以下列表显示了针对此具体设计确定的所有可能的误差源，包括在初步设计中需要考虑的误差源：

- 磁体相对于旋转轴的偏移（偏心）
- 磁体倾斜
- 传感器偏移
- 传感器倾斜
- 磁体差异
- 器件型号
- 外部磁场
- 附近材料的影响
- 基准设置误差
- 后处理误差

如需更深入地了解磁体偏移和传感器偏移对设计的影响，请参阅[双芯片磁性位置传感器中堆叠芯片和并排芯片实施方案之间的比较](#)应用手册。

测试台架设置误差既与理论设计中基准角度源的预期精度相关，也与在目标位置对被测器件 (DUT) 信号的可测量精度相关。作为基准设置误差的一个示例，[图 6-1](#) 显示了最初如何收集数据来评估本应用手册中介绍的设计。初步设置引入的测量误差来自人类视觉分辨率的极限、保持精确位置的能力以及时间同步平均数据。[图 5-1](#) 中所示的设置消除了这些误差来源。

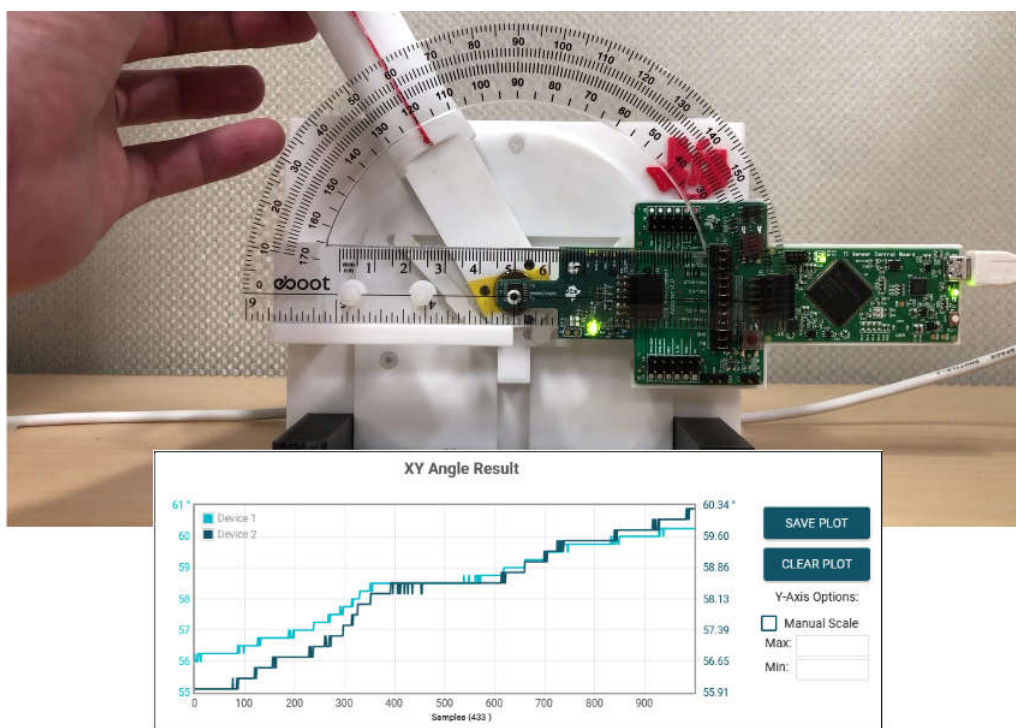


图 6-1. 初步测试设置

后处理误差可能源于对数据求平均值的方式、数据的转换方式，以及校准算法的执行方式。图 6-2 展示了一个后处理误差示例。在该特定情况下，在基准测试期间的每个离散步骤都进行了多次测量，以考虑噪声。这些测量值采用二进制补码格式，随后会像非二补码数一样错误地取平均值。由于二进制补码格式中一个接近 0 的负数与一个很大的非二进制补码数具有相同的二进制格式，因此当像非二进制补码数一样取平均值时，对于一个标准非二进制补码格式中应该接近 0 的值，其平均值会变得非常大。

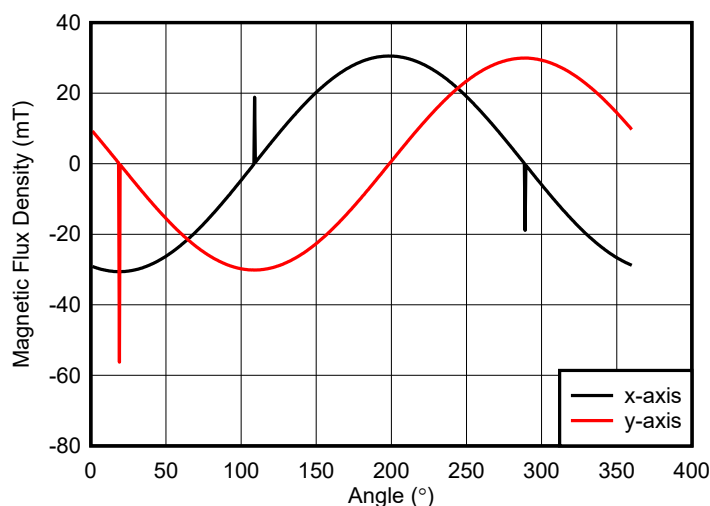


图 6-2. 用户不当后处理导致的误差

7 总结

本应用手册介绍了一个电子换挡器设计。该设计流程始于确定将最终用户位置选择转换为换挡器系统可以处理的电激励信号的一般方法。接着将介绍霍尔效应器件的适用设计场景，以及如何相应地确定配套磁体的尺寸规格与安装间距。设计结果表明了可以实现的性能，以及可以进一步提高设计精度的校准方法。鉴于任何制造设计在组装过程中都会引入一定的误差，本文还介绍了各种误差来源，提醒设计人员要面临的挑战。尽管存在这些挑战，但该设计实现了低于 $\pm 0.2^\circ$ 的绝对角度误差和冗余误差。

8 推荐器件

表 8-1. 推荐器件

检测应用	问题	推荐的传感器	传感器对功能的改善
电子换挡器控制模块	为最终用户提供一种切换汽车驻车、倒车、空档和行驶状态的方法	TMAG5170D-Q1	3D 霍尔效应传感器可实现绝对角度位置（同轴或离轴）或在 3D 空间中解析多个位置。提供 SPI、I2C、Sin/Cos 接口。双芯片可实现强大的功能安全性（高达 ASIL-D 级）。
		TMAG5170-Q1	
		TMAG5173-Q1	
		TMAG6180D-Q1	
		TMAG6180-Q1	具有可配置阈值开关输出的 4 通道电感式传感器提供低功耗设计，不受碎屑、液体和磁体的影响，同时支持佩戴手套操作。
		LDC3114-Q1	
电子换挡器执行器	从电子换挡器控制模块获取反馈，以精确高效地更改档位设置	DRV5013-Q1	现有采用 SOT-23 和 TO-92 封装的霍尔效应锁存器，当环形磁体或径向充磁磁体在齿数较少的齿轮上旋转时，这类锁存器能够检测出极性变化。
		DRV5015-Q1	
		TMAG5170-Q1	3D 霍尔效应传感器可为高齿数齿轮提供高分辨率绝对角度位置（同轴或离轴）。SPI。双芯片版本可实现强大的功能安全性（高达 ASIL-D 级）。
		TMAG5170D-Q1	
离合器	监控双离合变速器的主动档位设置，并根据电子换挡器控制模块的反馈确定可以接合哪个离合器盘来调整车速。	DRV5013-Q1	霍尔效应锁存器具有多种电源、灵敏度和封装选项，支持灵活地监控齿轮轴上环形磁体的极性变化。
		DRV5015-Q1	

9 参考资料

- 德州仪器 (TI), [适用于 HMI 按钮应用的电感式触控系统设计指南](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [采用霍尔效应传感器的操纵杆和控制杆设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [用于电器旋钮的 3D 霍尔效应传感器](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [TI 磁感应模拟器](#)。
- 德州仪器 (TI), [电感式检测计算器工具](#)。
- 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), [双芯片磁性位置传感器中堆叠芯片和并排芯片实施方案之间的比较](#) 应用手册。

10 修订历史记录

Changes from Revision * (February 2024) to Revision A (August 2025)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 向 <i>推荐器件</i> 部分添加了“建议使用的器件”表.....	13

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月