参考文献

Application Note

设计实现低成本、低功耗磁性开关

Scott Bryson

摘要

为了延长使用寿命，改善用户体验，许多应用都采用磁性开关来代替机械接触开关，因为机械开关随着时间的推移容易因机械磨损、氧化和接触表面污染物堆积而失效。在家用电器、锁、门窗控制和流量计等许多应用中，必须将总功耗保持在超低水平以保持高功效。虽然机械开关在电路开路时具有零功耗的优点，但这些开关在长期可靠性方面表现不佳。磁性设计（包括簧片开关、霍尔效应传感器和隧道磁阻传感器）通常用作可靠性更高的低功耗替代方案。

内容

1 简介.....1
1.1 簧片开关.....1
1.2 霍尔效应传感器.....2
1.3 隧道磁阻 (TMR) 传感器.....4
2 设计注意事项.....5
2.1 技术复杂性和成本.....5
2.2 灵敏度轴.....5
2.3 机械限制.....7
2.4 功耗.....7
3 总结.....8
4 参考资料.....9
5 修订历史记录.....10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

簧片开关、霍尔效应传感器和隧道磁阻 (TMR) 传感器都是提高系统可靠性的实用选项，每种技术的工作原理略有不同。本文将简要介绍这些技术，并从设计复杂性、机械限制和功耗等方面对各项技术进行比较，进而分析每种磁性开关技术的优缺点。

1.1 簧片开关

在前面提到的三种技术（簧片开关、霍尔效应传感器和 TMR 传感器）中，只有簧片开关是零功耗设计。

簧片开关通常由两到三个由铁磁材料制成的金属触点构成，如图 1-1 所示。具有两个金属触点的簧片开关具有单个触点，当存在足够强的磁场时，该触点会闭合；而三触点簧片开关则具有一个公共引脚，可根据磁体的存在情况在两条路径之间切换。对于这两种情况，触点可以具有由簧片开关制造商决定的常闭或常开位置。

簧片开关通常在真空时进行密封，或填充惰性气体，以防止污染物堆积或表面氧化，否则会增加接触电阻，甚至可能完全阻碍电气接触。

图 1-1. 典型的簧片开关

English Document: SLYA090
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

簧片开关的一个常见用途是将开关嵌入磁导表面之后，并通过与附近磁场的相互作用来控制开关。与在移动的目标上放置机械撞锁板相比，只需一个能够移动到簧片开关附近的永磁体即可。

簧片本身是由铁磁材料制成的，可以引导磁场。当正确放置时，磁场可以在两片簧片之间引导，从而对每片簧片施加小的扭矩。这会迫使两片簧片相互靠近并闭合电路。请注意，当存在磁体时，两片簧片尖端之间产生的集中的磁通密度，如图 1-2 所示。

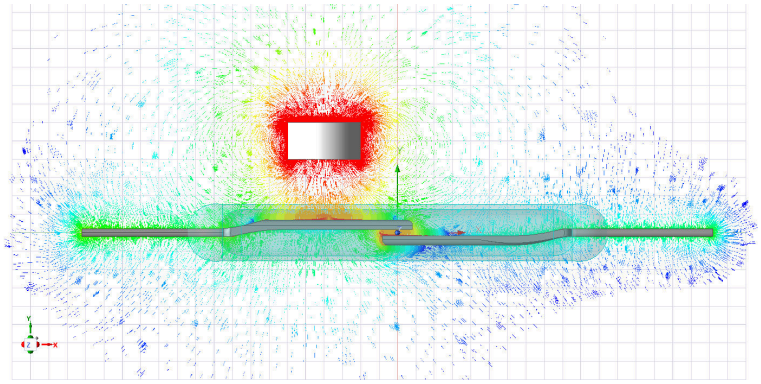

图 1-2. 簧片开关的仿真响应

闭合簧片开关所需的磁体具体放置位置和方向可能会因器件的构造而异。两片簧片之间的磁场必须足够强，才能使它们向彼此弯曲。如果磁体距离连接点过远，磁场可能无法在两片簧片之间充分引导。磁铁位置的水平偏移会降低簧片之间集中的磁场强度，如图 1-3 所示。

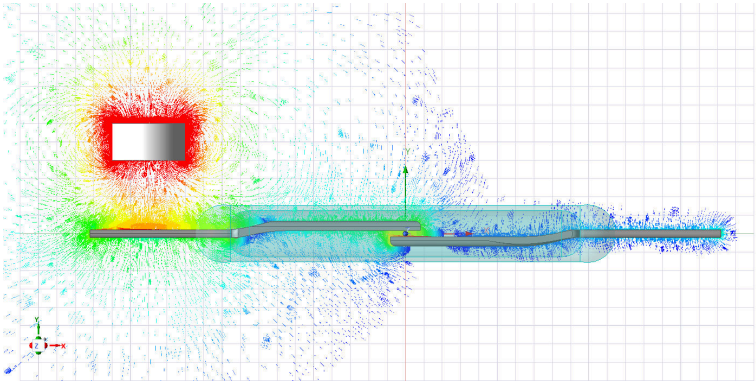

图 1-3. 簧片开关的偏移仿真

簧片开关制造商会提供灵敏度图，必须遵循该图正确放置用于开关应用的磁体。

1.2 霍尔效应传感器

霍尔效应是由 Edwin Hall 发现的。他发现，当电流通过正交施加磁场的导体时，洛伦兹力会在导体上产生可测量的电压。

洛伦兹力源于带电粒子在电磁场中的运动，如图 1-4 所示并在方程式 1 中描述。

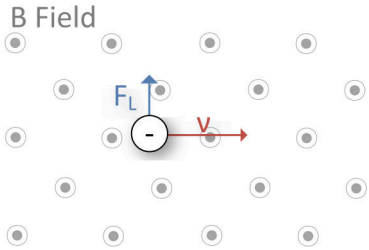

图 1-4. 洛伦兹力

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

$$\vec{F}_L = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) \quad (1)$$

当电流通过磁场时，我们观察到了霍尔效应，如图 1-5 所示。

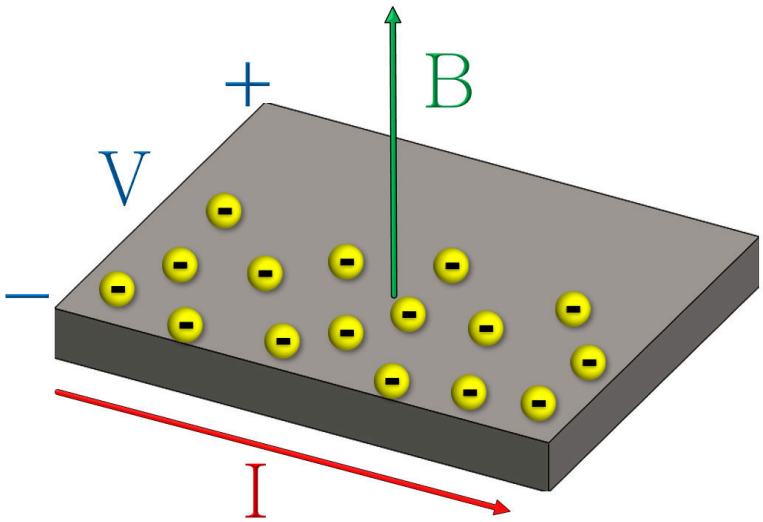

图 1-5. 霍尔效应

当对导电霍尔元件施加电流并将其置于磁场中时，与电流正交的导体上会产生线性变化的电压，可生成多种输出格式，有助于跟踪源磁体的位置）。

需要特别留意开关格式。当电压被放大并驱动到比较器结构中时，如图 1-6 所示，电压可用于产生二进制输出响应，如图 1-7 所示。该器件可以针对多种运行阈值和释放阈值（通常分别称为 B_{OP} 和 B_{RP}）进行设置，并且可以设置为以不同的间隔进行采样，以限制电流消耗。

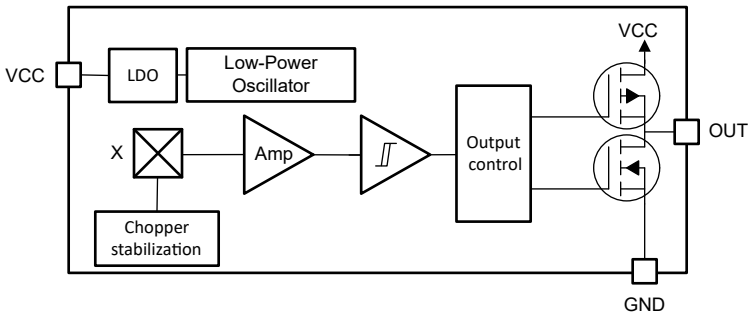

图 1-6. TMAG5233 方框图

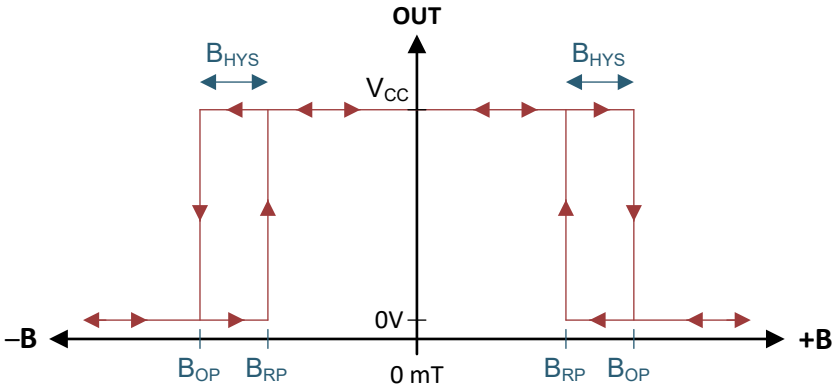

图 1-7. 全极开关输出

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

这项技术可轻松集成到半导体工艺中。以往，霍尔元件的灵敏度与 PCB 表面垂直，可以检测类似图 1-8 中 B-Field 矢量的 Z 分量，但最近的器件还能够实现在 X 或 Y 方向检测水平矢量分量的平面内感应元件。图 1-9 中显示了该灵敏度。

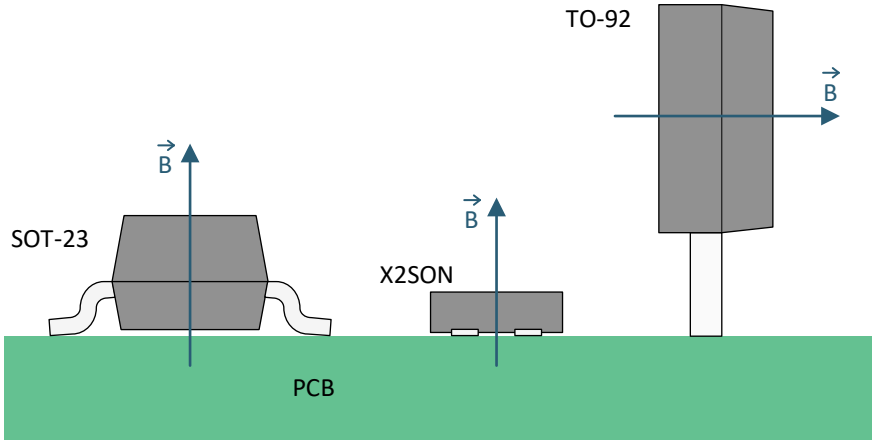

图 1-8. DRV5032 垂直灵敏度

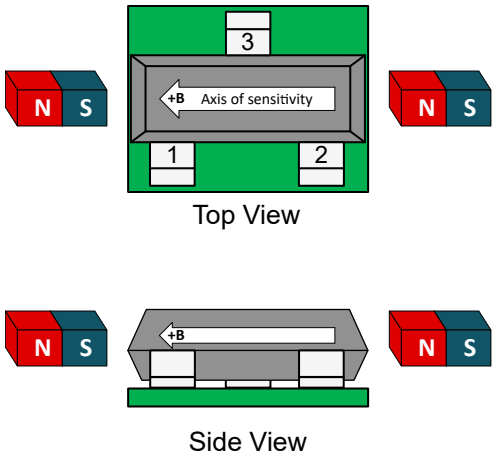

图 1-9. TMAG5233 平面内灵敏度

1.3 隧道磁阻 (TMR) 传感器

随着材料科学和量子力学的进步，磁性开关中正逐步采用一项新技术，该技术充分利用电子在被超薄介电层分隔的磁性结构之间发生的隧穿效应。

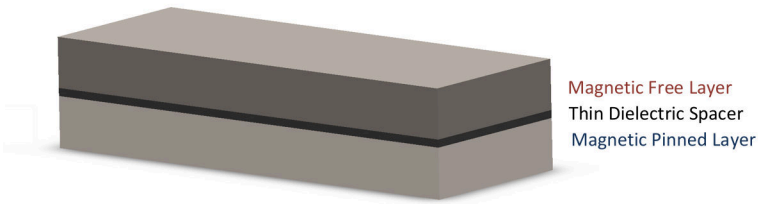

图 1-10. 简化的 TMR 叠层结构

图 1-10 中所示的顶部和底部块实际上是由导电磁性材料构成的复杂层叠结构，它们能够产生 TMR 效应。在制造过程中，底层材料被施加了特定的磁化方向，通常称为固定层。此外，顶层材料称为自由层。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

当外部磁场作用于这种结构时，材料的总电阻会根据外加磁场的方向变化。当外加磁场的磁矢量与基底层的磁化方向平行时，电阻处于最大值；而当外加磁场趋向于与电流方向反平行时，电阻会降至最小，如图 1-11 所示。

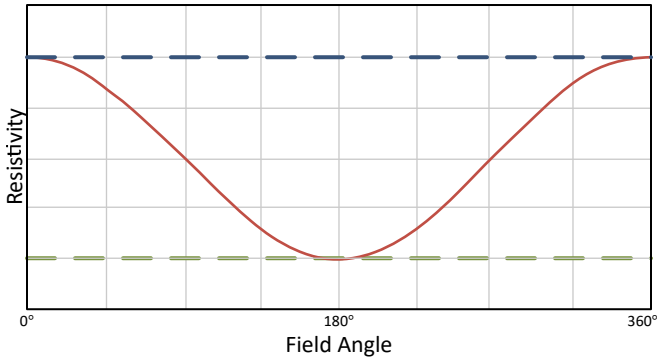

图 1-11. TMR 阻抗图

由于这项技术采用常规制造工艺，因此制造 TMR 传感器时，通常需要确保传感器对 XY 平面内施加的磁场敏感。

2 设计注意事项

在讨论了每种技术的基本工作原理后，接下来的问题是如何在实际设计中更充分地考虑每种技术。在实践中，设计的机械稳健性、传感器的灵敏度、总成本和功耗是关键的决定因素。

2.1 技术复杂性和成本

创建任何开关技术的复杂性直接影响传感器的尺寸和成本。

霍尔效应传感器可以小型化，并可轻松集成到现代半导体工艺中。因此，这些器件的制造和销售成本通常低于 TMR 或簧片开关。

簧片开关封装在玻璃管或其他密封外壳中，这种工艺的封装尺寸更大，也更昂贵。这些外壳可能很脆弱，这也增加了处理和安装成本，并且在使用过程中可能由于物理损坏而需要更换。

创建 TMR 传感器所涉及的复杂材料堆叠需要半导体制造流程中不常见的专用沉积设备，还需要增加磁化固定层的步骤。增加的工艺步骤和专用材料使 TMR 天生就比霍尔效应传感器更昂贵。TMAG5233 和 TMAG5133 等低功耗霍尔效应传感器可能是更实用的选择。

2.2 灵敏度轴

鉴于每种传感器类型的构造方法不同，激活开关功能的灵敏度方向可能会限制传感器与输入磁场的对齐。

2.2.1 霍尔效应开关

霍尔效应传感器是非常灵活的选择。这些传感器具有检测任意磁场分量的能力，经过配置，可以用于检测任何比 B_{OP} 更强的磁场。采用此检测技术的小型表面贴装封装可实现极其灵活的放置。这些器件采用垂直或水平（平面内）灵敏度，可通过较长导线轻松连接并嵌入在目标表面后，也可以轻松安装到控制器 PCB 中；请参阅图 2-1。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

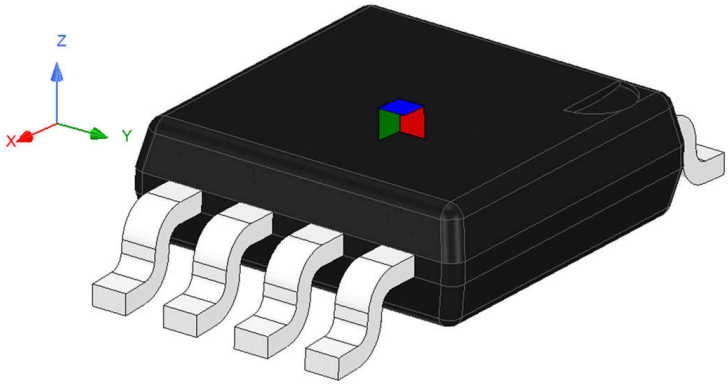

图 2-1. 霍尔效应灵敏度

2.2.2 TMR 开关

TMR 开关通常设计为对 XY 平面内的磁场特别敏感。在大多数情况下，这些器件被视为平面传感器，并需要将磁体按照节 1.3 所示方式放置。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2.2.3 簧片开关

簧片开关的灵敏度取决于磁场与开关中铁磁结构的相互作用。磁场必须在两片簧片之间充分引导，使它们弯曲。在某些情况下，簧片开关可能存在对磁体不敏感的区域，将磁体旋转 90°后即可激活。

这些器件通常支持多种排列方式，但根据磁体的运动，它们可能具有多个跳闸点。另外，由于尺寸较大，放置和安装这些器件较为困难。

2.3 机械限制

开关的整体灵敏度决定了传感器所需的输入磁体的范围。通常，每种开关技术都可以使用小于 5mT 的工作阈值 (B_{OP}) 进行配置。可以使用模拟工具，例如 *TI 的磁感应模拟器*，来确定特定磁体所需的总范围。

TMR 传感器中的电子隧穿效应实现了现有磁性传感器可提供的超高磁性灵敏度，并且可以配置为与霍尔效应传感器类似的全极操作。也就是说，无论传感器上存在哪个磁极，开关都可以工作。在产品组装过程中，这通常有助于减少对齐磁体所需的工作量。但是，有一些功能需要区分磁极，这时可能需要单极开关，如图 2-2 所示。

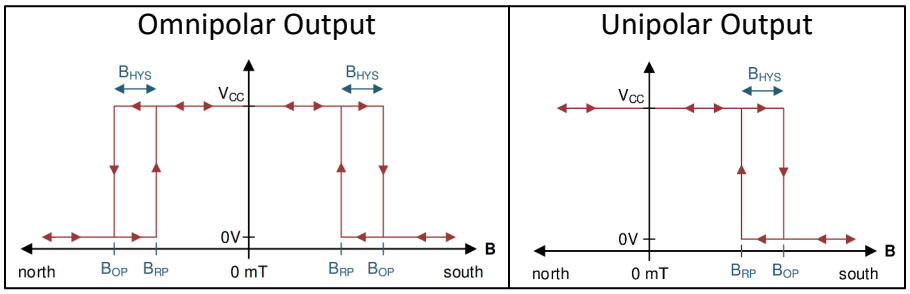

图 2-2. 磁性开关输出模式

霍尔效应传感器提供相同的功能，并具有检测方向的多功能性，但是磁体位置的灵活性优于 TMR 传感器。使用 TMR 传感器时，必须考虑一个特别问题，那就是输入磁场必须始终保持低于最大输入磁场额定值上限。由于器件的固定层具有特定极性的磁化，因此如果施加了明显强的磁场，可能会对传感器造成不可修复的损坏。TMR 的磁场过度暴露可能表现为偏移，甚至是器件整体灵敏度的变化。霍尔效应传感器不会受到此风险的影响，因此可以根据需要，尽可能靠近磁体。

在所有情况下，输入磁场必须变化，即最大输入始终超过 B_{OP} 的最大额定值，并且当磁体被移开时，最小磁场小于 B_{RP} 的最小额定值。这有助于消除具有边沿条件的器件运行异常的风险。对于簧片开关，开关的实际构造可能会出现由单个稳压器传递磁场而产生的操作区域。这可能包括意外开关区域的可能性，在没有制造商指导的情况下，这些区域更难预测。

使用簧片开关进行设计时，还需要考虑一个问题，那就是两个簧片接触后分离产生弹性碰撞，导致簧片开关发生去抖。去抖会延长信号的稳定时间，如果处理不当，可能会影响传输完整性。这些机械触点的打开和闭合也会随着时间的推移而磨损，从而导致开关机制最终失效。断开簧片开关所需的开关周期数取决于开关的构造和施加的负载。对于较高的负载，此断点可能在 100,000 和 1,000,000 个开关周期之间。

簧片开关的最后一个机械考虑因素是，其构造限制了它们不像封装的霍尔效应传感器或 TMR 传感器那样容易处理。在许多情况下，簧片开关的外壳不允许使用拾取和放置机以及回流焊接等标准组装程序进行表面贴装安装。在组装过程中，必须小心，以免损坏外壳。

2.4 功耗

尽管存在机械限制，但簧片开关通过引入永磁体以及随之产生的电磁力拉动簧片，达到了零功耗设计的目标。

霍尔效应传感器和 TMR 传感器都需要通过检测元件的偏置电流，该电流受洛伦兹力（霍尔效应）或量子隧穿 (TMR) 的影响。TMR 传感器的典型阻抗高于霍尔效应传感器，因此在相同的输入电压下，TMR 传感器产生的电流更低。TMR 传感器通常能在 1 μA 或更低电流下实现平均工作电流。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

但是，在许多电池供电的应用中，霍尔效应传感器仍然可以与 TMR 竞争。两个传感器的典型工作行为都是使用所需的有源偏置电流，定期对传感器进行采样。在两次采样之间，传感器会在预定的时间段内处于低功耗状态。在这种低功耗状态下，霍尔效应传感器可以消耗极少的功率。

例如，TMAG5233 和 TMAG5133 在设计上非常适合低功耗开关应用，例如监控与人机交互 (HMI)。在这些情况下，数据刷新率会保持非常低，以减少检测元件的总运行时间。为了更大限度地减小 TMAG5233 的平均电流，提供了 5Hz 的采样率，以实现约 0.55 µA 的典型工作电流。对于 TMAG5133，提供了 20Hz 的采样率，以实现约 1.8 µA 的典型工作电流。

3 总结

检测技术的进步不断促进推出可提高整体系统可靠性的低功耗器件。与 TMR 传感器相比，TMAG5233 和 TMAG5133 等霍尔效应传感器能够以更低的制造成本和相当的灵敏度阈值提供同等低功耗磁检测。

表 3-1. 技术比较

参数	霍尔效应	TMR	簧片开关
成本	最低	高	最高
检测方向	垂直或平面内（X、Y、Z）	通常为平面内（X、Y）	垂直或平面内，具体取决于构造
处理	标准 PCB 组装	标准 PCB 组装	通常需要手动安装
电流消耗	低至 0.55 µA	<0.3 µA	零电流
典型工作阈值 (B_{OP})	低至 1.8mT	低至 0.3mT	<5mT
强磁场造成的永久性损坏	无	一些器件在低至 100mT 的磁场下可能会受损	罕见

要进一步探索低功耗和平面磁性开关选项，请参阅表 3-2。

表 3-2. 相关器件

器件	等级	灵敏度方向	封装选项	平均电流（µA)
TMAG5233	商用级	平面内	SOT23-3(DBV)	2.7 µA (40Hz) 0.55 µA (5Hz)
TMAG5133	商用级	平面内	X1LGA (ZFC)	2.7 µA (40Hz) 1.8 µA (20Hz)
DRV5032	商用级	垂直	SOT23-3(DBV) TO-92(LPG) X2SON(DMR)	5.7 µA (80Hz) 1.6 µA (20Hz) 0.69 µA (5Hz)
TMAG5231	商用级	垂直	SOT23-3(DBV) X2SON (DMR)	16 µA (216Hz) 2 µA (20Hz) 1.3 µA (10Hz)
TMAG5123 (Q1)	商用级（汽车级）	平面内	SOT23-3 (DBV)	3.5mA (10kHz)

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4 参考资料

1. Flair Electronics, *Magnetic Reed Switch Principals of Operation*.
2. 德州仪器 (TI)，3D 霍尔效应传感器简介视频。
3. *Magnetic Force*.
4. Electronic Design, *What's the Difference Between TMR and GMR Sensors?*.

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5 修订历史记录

Changes from Revision * (September 2024) to Revision A (June 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
- 通篇添加了 TMAG5133 参考信息.....1

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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出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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司