Technical Article

平稳操作：多轴霍尔效应电流传感器如何实现精确的扭矩控制



- 多传感器电流检测解决方案无需修改汇流条即可实现低于 1% 的精度，是单轴无芯替代方案的 20 倍。
- 消除电动汽车和混合动力汽车中不均匀的加速和发出的电机声音。

随着汽车制造商追求从电动汽车 (EV) 到混合动力汽车（或两者并行推进）的不同电气化策略，设计工程师面临着减小电子系统（尤其是牵引逆变器）尺寸和重量以延长行驶里程并提高效率的挑战。

牵引逆变器转换电池电源以精确控制电机扭矩。电机相电流的微小测量误差会对扭矩控制环路产生不利影响，从而产生扭矩纹波：振动、加速不均匀、不必要的噪声以及会缩短行驶里程的低效率运行。

传统的测量方法需要在牵引逆变器尺寸、重量减轻和精度之间进行取舍。TMCS2100-Q1 是业内先进的多传感器、多轴霍尔效应电流传感器，无需取舍即可解决电流测量难题。随着新兴的 800V 架构对牵引逆变器精度要求的提高，该功能变得越来越重要。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

C 型芯到无芯：解决一个问题，创造另一个问题

工程师们历来使用 C 型磁芯实现来测量车辆中的电机相电流，这种实现由一个线性环境霍尔效应传感器组成，该传感器放置在磁芯周围的空气间隙中 (图 1)。

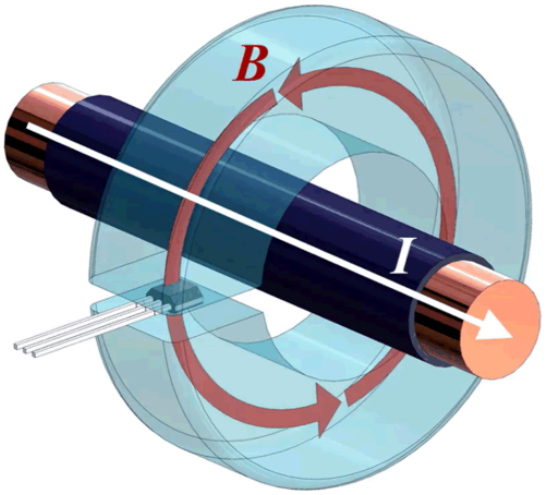


图 1. 采用线性环境霍尔效应传感器的 C 型芯实现方案

在消除相位之间的磁串扰的同时，C 型芯会增加相当大的尺寸和重量。随着业界对更小、更轻车辆的需求推动了采用无芯电机相电流测量，设计人员必须解决相间串扰、振动引起的位移误差以及外部磁场产生的偏移误差。

位移误差

无芯电流检测解决方案不直接测量电流，而是测量流经导体的电流产生的磁场，如安培定律所述。由于磁场强度会随着与导体的距离增加而减弱，因此必须“教”会霍尔效应传感器在其相对于导体的位置上，针对特定电流值所应测量的磁场强度。

一旦教会传感器电流与磁场之间的耦合系数，任何相对于该位置点的位移都会导致在流过导体的电流量相同的情况下，所感测到的磁场发生变化。这会产生位移误差。

多种因素会导致位移误差，包括：

- 霍尔效应传感器的器件间可变性。
- 组件机械部件的制造公差。
- 装配公差。
- 车辆运行过程中出现振动。

下线校准可以解决大多数因素。但是，振动会产生动态、随机位移误差，而校准无法预测或校正这些误差。

English Document: SSZTDD7
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

汇流条修改困境

振动是无芯解决方案的主要挑战之一。汇流条将牵引逆变器连接到电机，而霍尔效应传感器通常位于牵引逆变器内的印刷电路板上。隔离要求阻止了汇流条和传感器之间的牢固连接，因此振动会导致它们之间产生相对移动，这种移动会直接转化为测量误差。为了解决这个问题，制造商开发了多种汇流条几何形状，每个几何形状都在磁耦合强度与对相对运动的灵敏度之间实现平衡。

微分无芯解决方案根据发生行末校准且位移误差等于零的空间中相对于理想点的磁场变化来评估振动影响。

如图 2 所示，借助这种理解，工程师可以计算传感器位移引起的特定磁场幅度 (|B|) 的变化：

- 磁场幅度从导体衰减 1/d。
- 霍尔效应传感器放置在导体边缘，以更大限度地提高磁场强度。
- 差分磁场可更大限度地降低串扰的影响。
- 对于 z 轴位移，水平磁场 (B_X) 的减小速度比垂直磁场 (B_Z) 慢。
- 对于 x 轴位移，水平磁场 (B_X) 的减小速度比垂直磁场 (B_Z) 快。
- 典型振动为 0.5mm 至 0.7mm。
- 对 |B| 的更改直接相当于当前测量值中的误差。
- 对 |B| 的更改表示各个轴误差的平方和根 (方程式 1)：

$$|B| = \sqrt{B^2_X + B^2_Z} \quad (1)$$

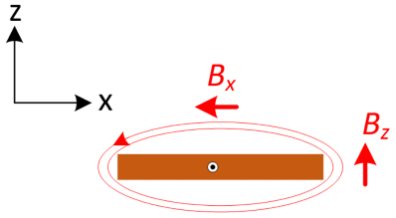


图 2. 位移如何影响水平和垂直磁场强度

市场上存在三种类型的差分无芯传感器。垂直差分无芯传感器使用两个相反极性传感器仅在垂直方向上测量磁场，并需要修改汇流条，以使其宽度与设备中传感器的间距相匹配 (图 3)。

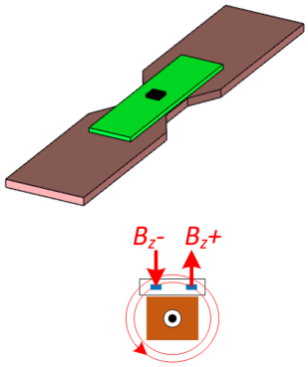


图 3. 垂直差分无芯解决方案

水平差分无芯传感器使用两个相反极性传感器仅测量水平方向上的磁场，并且需要用槽口修改汇流条，以便为封装中的传感器创建适当的磁场方向 (图 4)。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

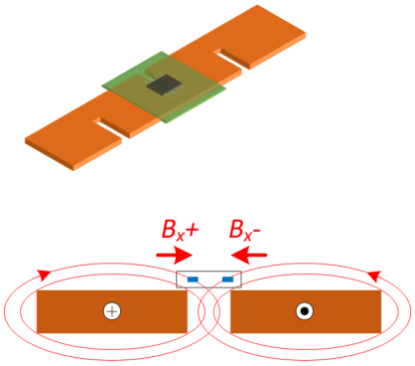


图 4. 水平差分无芯解决方案

孔内差分无芯传感器只测量穿过汇流条中间的孔中产生的水平磁场 (图 5)。

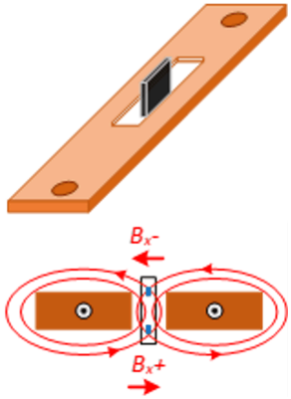


图 5. 孔内差分无芯解决方案

通过相对于汇流条使用两个器件，TI 的多传感器、多轴方案无需修改母线，并简化了其他无芯方案通常产生的热点热管理问题 (图 6)。每个 TMCS2100-Q1 器件都会在水平和垂直方向上测量汇流条边缘的磁场，从而为计算提供 100% 的磁场信息。这种全场方法还可以更大限度地降低相位之间磁串扰的影响，从而进一步保护测量精度并减少扭矩纹波。

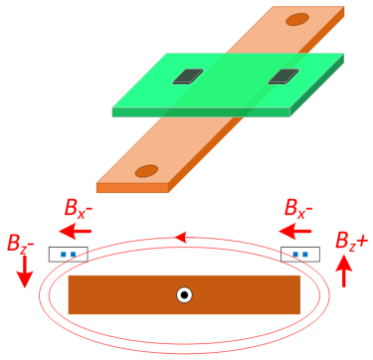


图 6. 多传感器、多轴无芯解决方案

假设有一个简单的振动模型，只在 x 方向、z 方向或同时在两个方向上移动 d = 0.4mm (表 1)，您可以计算通过不同实现测量的磁场变化 (表 2)。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 1. 振动位移定义

(x - d, z + d)	(x, z + d)	(x + d, z + d)
(x - d, z)	校准点 (x, z)	(x + d, z)
(x - d, z - d)	(x, z - d)	(x + d, z - d)

表 2. TMCS2100-Q1 可在整个无芯设计中提供超低的磁场误差

	垂直	水平	孔内	TMCS2100-Q1
初始汇流条大小 (w × t)	18mm x 3mm	18mm x 3mm	16mm x 2mm	18mm x 3mm
对传感器汇流条的修改	3.5mm x 3mm （陷波以匹配器件中的传感器间距）	6mm x 3mm （3 层 – 层宽，以匹配设备中的传感器间距）	孔： 10mm x 5mm （汇流条厚度需要与器件中的传感器间距相匹配）	无
距汇流条的距离	<2mm	<3mm	在汇流条内	> 3mm
|B| 的增量	仅 B_Z	仅 B_X	仅 B_X	B_X 和 B_Z
磁场的幅度误差	x-0.4 / x / x+0.4 z+0.4: 18.1% / 16.3% / 18.1% z: 2.3% / Cal / 2.3% z-0.4: -17.9% / -21.1% / -17.9%	x-0.4 / x / x+0.4 z+0.4: 15.9% / 14.6% / 15.9% z: 1.7% / Cal / 1.7% z-0.4: -15.7% / -18.1% / -15.7%	x-0.4 / x / x+0.4 z+0.4: 0.2% / 2.9% / 0.2% z: 2.3% / Cal / 2.3% z-0.4: 0.2% / 2.7% / 0.2%	x-0.4 / x / x+0.4 z+0.4: 1.0% / 1.1% / 1.0% z: 0.0% / Cal / 0.0% z-0.4: -1.0% / -1.0% / -1.0%

大多数牵引逆变器系统在所有运行条件下都需要小于 3% 的总误差。许多设计工程师分配的振动误差最大为 1%，并且希望减少。如表 2 所示，只有 TMCS2100-Q1 能在任意方向的 0.4mm 振动下实现 <1% 的性能偏差，而竞品解决方案在大多数条件下都会超出 3% 的总预算。在较小位移条件下，当位移误差在 0.1mm 移动时降至 0.25%，TMCS2100-Q1 的优势会更加明显，其精度比单轴无芯替代方案高大约 20 倍。

无芯差分电流测量的多传感器、多轴方法可更大限度地减少振动引起的误差，同时无需修改汇流条即可适应机械配置，从而简化热设计。图 7 显示了牵引逆变器电流输出生成的用于控制电机的磁场仿真。

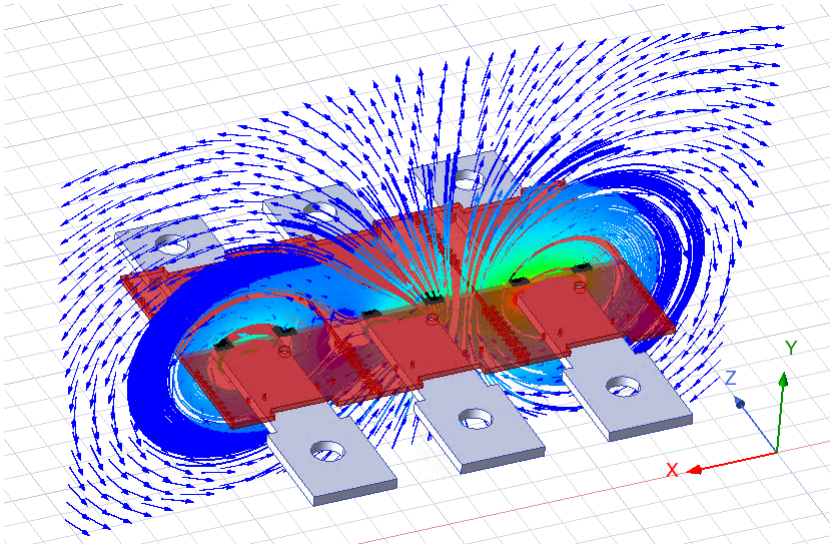


图 7. 牵引逆变器电流输出产生的用于控制电机的磁场仿真

设计人员可以使用 TMCS2100 评估模块 (TMCS2100EVM) 评估器件的性能。该模块包括一个 3D 打印夹和一个镀镍汇流条，用户最多可以测试三个汇流条，如图 8 所示。该评估模块可直接连接到 TMCS2100 表征评估模块 (TMCS2100CHAREVM)，从而表征磁环境并计算要编程到每个器件中的系数。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

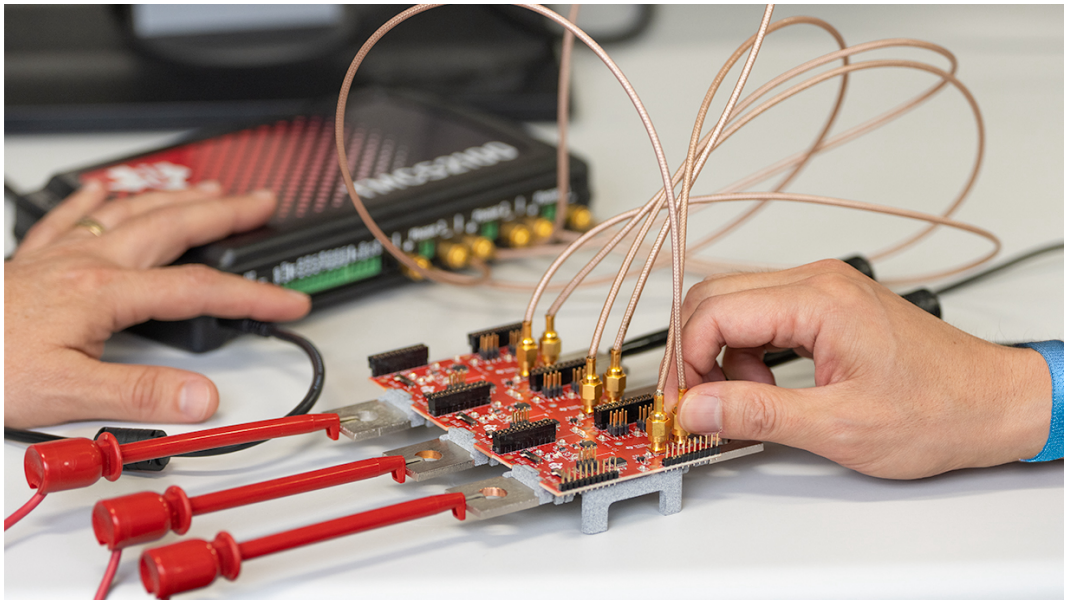


图 8. 设计人员可以使用 TMCS2100EVM 来评估器件的特性和性能。该评估模块与 TMCS2100 表征评估模块配合使用来执行表征编程

结语

由于能够提高电流检测精度，同时降低复杂性和成本，该技术将成为下一代电动汽车动力总成的重要推动因素。随着汽车制造商不断追求更轻、更高效的车辆，多轴方法展示了创造性的工程。

TMCS2100-Q1 多轴无芯霍尔效应电流传感器可同时在多个方向上测量磁场，比单轴替代产品精确度高达 20 倍——在 0.4mm 移动时的位移误差小于 1%（在 0.1mm 时低至 0.25%），可在需要零汇流条修改的情况下显著降低振动影响。

其他资源

- 订购 TMCS2100 评估模块和 TMCS2100 表征评估模块。
- 了解 TI 的无芯霍尔传感器与传统 C 型芯霍尔传感器的比较情况，其中包含“TI 无芯霍尔传感器重新定义电流检测”。
- 下载汽车类大功率、高性能 SiC 牵引逆变器参考设计。
- 阅读技术白皮书“EV 牵引逆变器的设计优先级”。
- 观看视频“TI 高精度实验室：磁电流检测简介”。

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

Copyright © 2026 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、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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月