

Technical Article

平順運作的關鍵：多軸霍爾效應電流感測器如何精準控制扭力



- 多感測器電流感測解決方案無需修改匯流排設計，即可達到 $<1\%$ 的準確度，其性能較單軸無磁芯替代方案優秀 20 倍。
- 消除電動車 (EV) 與油電混合車在加速時的頓挫感，以及馬達高頻運轉的嗡嗡異音。

隨著各大車廠推進多元電動化策略，無論是聚焦電動車、油電混合車，或是兩者並重，設計工程師都面臨著同一個挑戰：必須縮減車用電子系統（特別是牽引逆變器）的體積與重量，以進一步提升車輛續航力並改善能源效率。

牽引逆變器的作用是轉換電池電能，藉此精準控制電動馬達扭力。馬達相位電流只要出現微小的量測誤差，就會干擾扭力控制迴路，進而引發扭力漣波，這會導致車輛振動、加速時出現頓挫感、產生惱人的異音，甚至降低運作效率而縮短續航里程。

過去的傳統量測方案總是讓人陷入兩難：要在牽引逆變器的體積與重量和量測準確度之間做出取捨。作為業界首款多感測器、多軸霍爾效應電流感測器，TMCS2100-Q1 讓您無需在體積大小與準確度之間抉擇，就能輕鬆解決電流量測難題。隨著 800V 高壓新架構對牽引逆變器的準確度要求越來越嚴格，這項突破性能力也變得比以往更加關鍵。

從 C 型磁芯到無磁芯：解決了舊麻煩，卻帶來了新問題

過去，工程師在量測車用馬達相位電流時，多半採用 C 型磁芯架構，做法是將一個線性霍爾感測器，放置在環繞導體的磁芯氣隙 (圖 1) 之中。

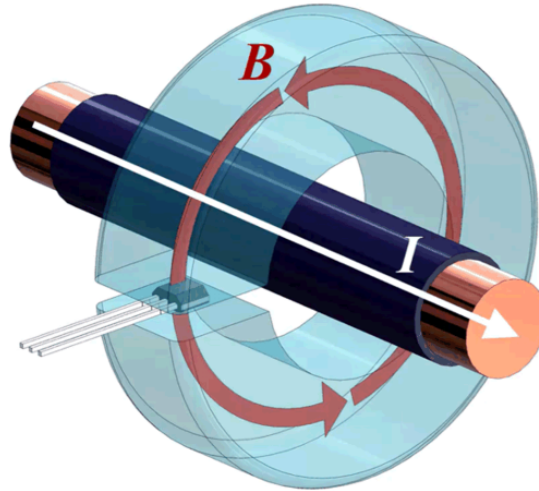


圖 1. 採用線性環境霍爾效應感測器的 C 型磁芯架構

C 型磁芯雖能消除各相位之間的磁串擾，卻會大幅增加系統的體積和重量。隨著車輛小型化與輕量化的趨勢推動無磁芯馬達相位電流量測的普及，設計師接著必須解決三大難題：相位間磁場串擾、車輛振動引起的位移誤差，以及外來磁場造成的偏移誤差。

位移誤差

無磁芯電流感測解決方案並不是直接量測電流本身；而是如同安培定律所描述的，透過量測電流流經導體時所產生的磁場，來推算出電流大小。由於距離導體越遠、磁場強度就會隨之減弱，因此您必須「告知」霍爾效應感測器：在相對於導體的特定位置上，對應特定電流值時應量測到的磁場強度是多少。

設定好感測器的電流對磁場耦合係數後，只要感測器的位置稍微偏離這個點，即使完全相同的電流通過導體，感測器測量到的磁場強度也會跟著改變，這會造成位移誤差。

造成位移誤差的因素有很多，具體包括：

- 霍爾效應感測器的裝置間差異性。
- 機構組件中各機械零件的製造公差。
- 組件公差。
- 車輛在運作行期間振動。

透過產線末端的下線校準，就能解決絕大部分的誤差因素。然而，車輛振動會產生動態且隨機的位移誤差，這透過校準完全無法預測或修正。

匯流排修改的兩難困境

車輛振動是改用無磁芯架構時面臨的主要挑戰之一。匯流排負責將牽引逆變器連接至馬達，而霍爾效應感測器則通常安裝在牽引逆變器內部的電路板上。受限於電氣隔離規範，匯流排與感測器無法剛性固定在一起，因此車輛振動會導致兩者之間產生相對位移，而這種位移會直接轉化為電流量測誤差。為了克服這個難題，製造商開發出多種匯流排幾何形狀，希望在磁耦合強度與對相對位移的敏感度之間取得最佳平衡。

差分無磁芯解決方案在評估振動影響時，是以下線校準時的空間理想點（此時位移誤差為零）為基準，並根據磁場偏離該點的變化量來計算。

如 图 2 所示，工掌握了這個概念後，工程師就能計算出由感測器位移所導致的特定磁場強度 ($|B|$) 變化量：

- 磁場強度會隨著與導體之間的距離呈反比 ($1/d$) 衰減。
- 霍爾效應感測器佈設於導體邊緣，以最大化磁場強度。
- 採用差分磁場量測技術，能將串擾的影響降至最低。
- 針對 Z 軸位移，水平磁場分量 (B_x) 的衰減速度慢於垂直磁場分量 (B_z)。
- 針對 X 軸位移，水平磁場分量 (B_x) 的衰減速度快於垂直磁場分量 (B_z)。
- 典型振動為 0.5mm 至 0.7mm。
- $|B|$ 的變化量，直接等同於電流量測值的誤差。
- $|B|$ 的變化量，即為各獨立軸向誤差的平方和開根號 (方程式 1)：

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_z^2} \quad (1)$$

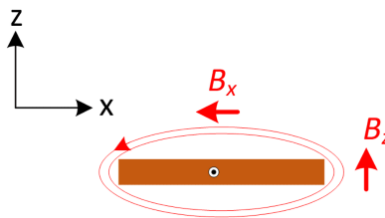


图 2. 位移如何影響水平與垂直磁場強度

目前市場上主要有三種類型的差分無磁芯感測器。垂直差分無磁芯感測器採用兩個極性相反的感測元件，專門量測垂直方向的磁場；這種設計需要修改匯流排架構，讓匯流排寬度配合裝置內部感測元件的間距 (图 3)。

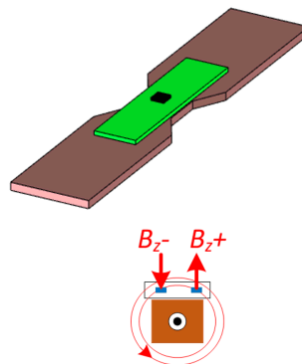


图 3. 垂直差分無磁芯解決方案

水平差分無磁芯感測器採用兩個極性相反的感測元件，專門量測水平方向的磁場；這種設計需要在匯流排上開出缺口，讓封裝內的感測元件產生正確的磁場方向 (图 4)。

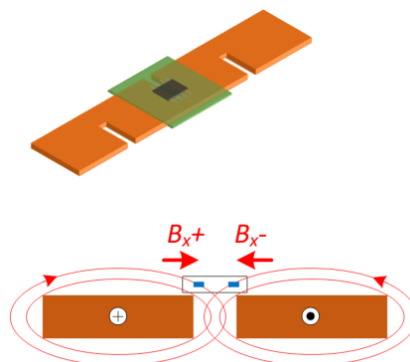


图 4. 水平差分無磁芯解決方案

開孔式差分無磁芯感測器，僅量測在匯流排正中央開孔處所產生的水平磁場 (图 5)。

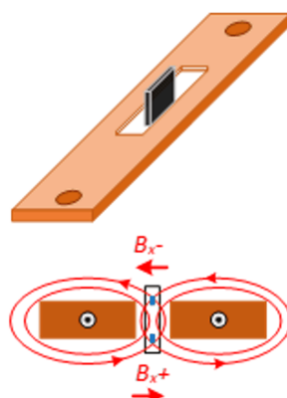


图 5. 開孔式差分無磁芯解決方案

透過相對於匯流排擺放兩個裝置，TI 的多感測器、多軸量測方案完全不需要修改匯流排結構，並大幅簡化了其他無磁芯解決方案常見的熱點散熱問題 (图 6)。每個 TMCS2100-Q1 裝置都會同時量測匯流排邊緣的水平與垂直方向磁場，為後續計算提供 100% 完整的磁場資訊。這種全磁場量測方案也能將相位間串擾降至最低，進一步保障量測準確度，並降低馬扭力漣波。

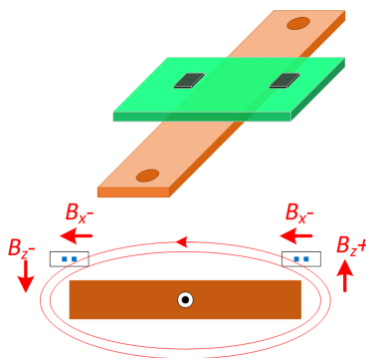


图 6. 多感測器、多軸無磁芯解決方案

假設在簡化的振動模型下，感測器產生了 0.4mm 的位移 (不論是單獨 X 軸、單獨 Z 軸，或兩軸同時發生，表 1)，我們都能計算出不同實作方案所量測到的磁場變化量 (表 2)。

表 1. 振動位移定義

(x - d, z + d)	(x, z + d)	(x + d, z + d)
(x - d, z)	校準點 (x, z)	(x + d, z)
(x - d, z - d)	(x, z - d)	(x + d, z - d)

表 2. TMCS2100-Q1 在所有無磁芯設計中展現最低的磁場誤差

	垂直	水平	開孔式	TMCS2100-Q1																																																																
原始匯流排尺寸 (w × t)	18mm x 3mm	18mm x 3mm	16mm x 2mm	18mm x 3mm																																																																
感測器所需的匯流排修改	3.5mm x 3mm (配合裝置感測器間距的開口)	6mm x 3mm (開出 3 道切槽，切槽寬度需配合裝置內感測器間距)	間隙： 10mm x 5mm (匯流排厚度需要配合裝置感測器間距)	無																																																																
與匯流排的距離	<2mm	<3mm	匯流排內	>3mm																																																																
B 的 Delta 值	僅限 B _Z	僅限 B _X	僅限 B _X	B _X 和 B _Z																																																																
磁場強度誤差	<table><tr><td></td><td>x-0.4</td><td>x</td><td>x+0.4</td></tr><tr><td>z+0.4</td><td>18.1%</td><td>16.3%</td><td>18.1%</td></tr><tr><td>z</td><td>2.3%</td><td>Cal</td><td>2.3%</td></tr><tr><td>z-0.4</td><td>-17.9%</td><td>-21.1%</td><td>-17.9%</td></tr></table>		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%	<table><tr><td></td><td>x-0.4</td><td>x</td><td>x+0.4</td></tr><tr><td>z+0.4</td><td>15.9%</td><td>14.6%</td><td>15.9%</td></tr><tr><td>z</td><td>1.7%</td><td>Cal</td><td>1.7%</td></tr><tr><td>z-0.4</td><td>-15.7%</td><td>-18.1%</td><td>-15.7%</td></tr></table>		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%	<table><tr><td></td><td>x-0.4</td><td>x</td><td>x+0.4</td></tr><tr><td>z+0.4</td><td>0.2%</td><td>2.9%</td><td>0.2%</td></tr><tr><td>z</td><td>2.3%</td><td>Cal</td><td>2.3%</td></tr><tr><td>z-0.4</td><td>0.2%</td><td>2.7%</td><td>0.2%</td></tr></table>		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%	<table><tr><td></td><td>x-0.4</td><td>x</td><td>x+0.4</td></tr><tr><td>z+0.4</td><td>1.0%</td><td>1.1%</td><td>1.0%</td></tr><tr><td>z</td><td>0.0%</td><td>Cal</td><td>0.0%</td></tr><tr><td>z-0.4</td><td>-1.0%</td><td>-1.0%</td><td>-1.0%</td></tr></table>		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%
	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%																																																																	

大多數牽引逆變器系統都要求在所有運作條件下，總誤差必須小於 3%。許多設計工程師只給振動誤差最多 1% 的額度，甚至希望比例能再更低。如表 2 所示，只有 TMCS2100-Q1 能在面對任何方向的 0.4mm 振動時保持小於 1% 的誤差表現；相對地，競爭對手的解決方案在大多數條件下，誤差都會直接超出 3% 的總容許誤差預算。在位移量較小時，TMCS2100-Q1 的優勢更加明顯：當位移僅 0.1mm 時，位移誤差可低至 0.25%，比傳統單軸無磁芯替代方案精準約 20 倍。

這種多感測器、多軸的無磁芯差分電流量測解決方案，不僅能將振動引發的誤差降至最低，還能在不修改匯流排的前提下彈性配合各種機構配置，進一步簡化散熱設計。圖 7 展示了用於控制馬達的牽引逆變器輸出電流所產生的磁場模擬結果。

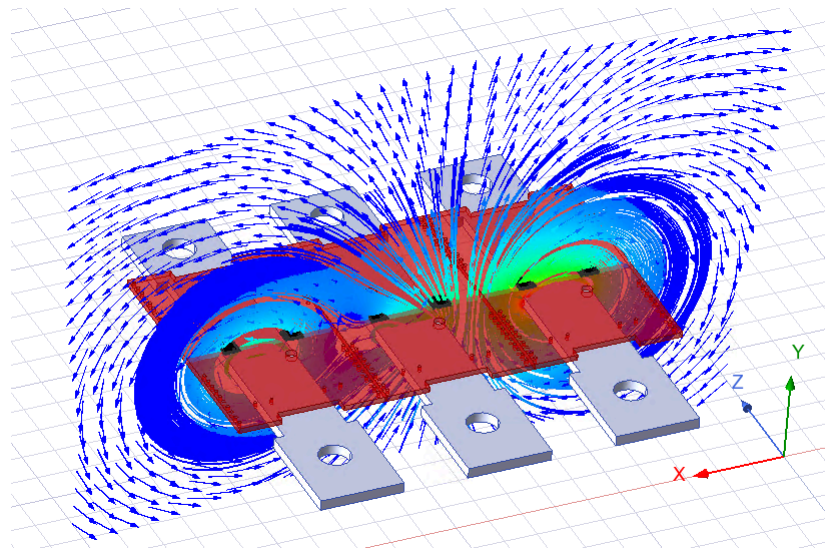


圖 7. 用於控制馬達的牽引逆變器輸出電流所產生的磁場模擬結果

設計師可使用 TMCS2100 評估模組 (TMCS2100EVM) 評估裝置性能。該模組包含一個 3D 列印夾具與一個鍍銀匯流排，使用者可以測試多達三個匯流排，如圖 8 所示。該評估模組可直接連接至 TMCS2100 特性評估模組 (TMCS2100CHAREVM)，以對磁場環境進行特性分析，並計算出需燒錄至各個裝置中的參數係數。

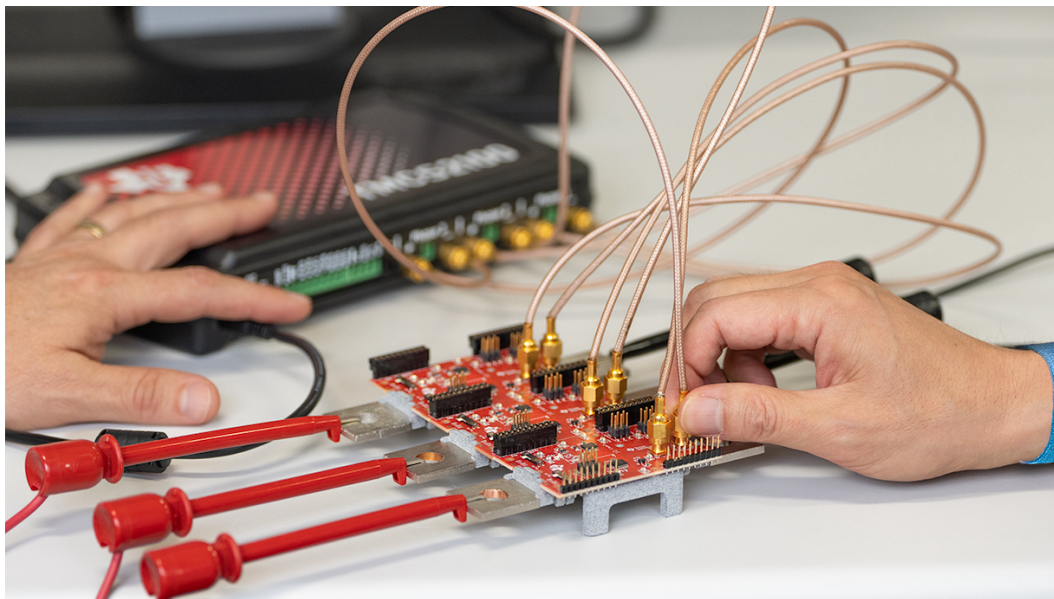


图 8. 設計師可使用 TMCS2100EVM 評估裝置的功能和性能。本評估模組需搭配 TMCS2100 特性分析評估模組使用，以執行特徵化程式燒錄

結論

電流感測穩確度的提升，結合更低的複雜度與成本，使此技術成為推進下一代電動車動力系統的重要關鍵。隨著各車廠進一步追求更輕量、更高效的車輛，多軸方案展現了創意工程的全新視角。

TMCS2100-Q1 多軸無磁芯霍爾效應電流感測器可同時測量多個方向的磁場，準確度比單軸替代方案高出多達 20 倍；在 0.4mm 的位移下位移誤差 <1%（在 0.1mm 時更低至 0.25%），大幅降低振動影響，同時完全無需對匯流排進行機構修改。

其他資源

- 立即訂購 [TMCS2100 評估模組](#)與 [TMCS2100 特性分析評估模組](#)。
- 閱讀「[TI 無磁芯霍爾效應感測器重新定義電流感測](#)」，瞭解 TI 無磁芯霍爾效應感測器與傳統 C 型磁芯霍爾效應感測器的對比。
- 下載[高功率、高性能汽車 SiC 牽引逆變器參考設計](#)。
- 閱讀「[電動車牽引逆變器的設計優先事項](#)」技術白皮書。
- 觀看「[TI Precision Labs：磁性電流感測簡介](#)」影片。

註冊商標

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025