

位置感測器如何推動汽車和工業應用創新

本文為德州儀器白皮書：探討了汽車和工業應用中位置檢測的趨勢，以及相關的設計挑戰和解決方案。

■文：Manny Soltero

無論您的駕駛經驗豐富與否，都有可能沒注意到方向盤甚至制動系統在不同車輛之間有什麼差異。這是設計使然。操控方面的改進為駕駛員提供了更多便利，但總體而言，這些系統的感覺相對保持不變，以確保無論哪一年的車型，用戶體驗都是一樣的。

然而，隨著時間的推移，這些系統中使用的技術也在不斷發展，位置感測器就是其中的重要組成部分。

當今有許多類型的位置感測器可供使用，包括超聲波、光學、磁、電容和電感式感測器。位置傳感積體電路 (IC) 可檢測物體的運動，並將輸入信號轉換為適用於微控制器 (MCU) 處理和控制的電信號。在本文中，當提及位置感測器時，您可以假設 IC 感測器使用霍爾效應、各向異性磁阻 (AMR) 或電感技術。圖 1 說明了這三種感測器類型的基本功能。

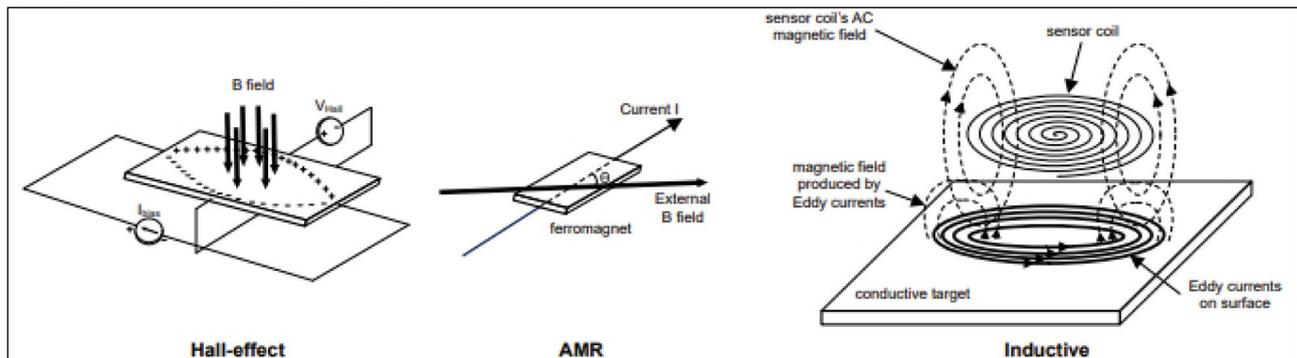
在霍爾效應技術中，電流會被導入鐵磁材料中。施加磁場 (標記為 B 場，請參閱圖 1) 會產生垂直於電流流動的霍爾電壓。

AMR 感測器的電阻隨施加的磁場而降低。此外，各向異性方面意味著 AMR 感測器取決於施加的磁場的方向。

電感式感測器使用感測器線圈 (電感器) 來產生自己的磁場，這些磁場與金屬目標上形成的渦流產生的磁場耦合。

本文討論了位置檢測的四種當前趨勢：系統電氣化、提高可靠性和安全性的需求、整體最終產品外形的小型化以及從稀土材料到鐵氧體的過渡。通過瞭解 IC 感測器的最新改進，設計人員可以從中受益，這些感測器現在更加精確和靈敏，能夠提供更高的解析度和更多功能，功耗比以往更低，同時採用越來越小的封裝。

圖 1: 霍爾效應、AMR 和電感感測器功能。



趨勢一：系統電氣化

自動駕駛、對更好用戶體驗的需求以及減少溫室氣體排放的推動力，使得汽車電氣化程度不斷提高，這需要在汽車中安裝更多的半導體器件，包括位置感測器。這是我們的第一個趨勢。

熱效率對於電動汽車 (EV) 至關重要。電動泵將冷卻劑 (如機油和水乙二醇) 在整個車輛內迴圈，以控制各種系統的溫度。多個電子控制單元 (ECU) 控制這些系統。電動汽車開啓後，MCU 可以通過監測溫度來確定是否有足夠的冷卻液泵送到特定系統。電動泵增量旋轉編碼器中使用的高解析度霍爾效應感測器使微處理器能夠更高效地響應熱事件。諸如高頻寬 TMAG5110-Q1 之類的器件可提供低延遲輸出，同時還提供高靈敏度功能，從而讓設計人員在感測器放置方面擁有更大靈活性。

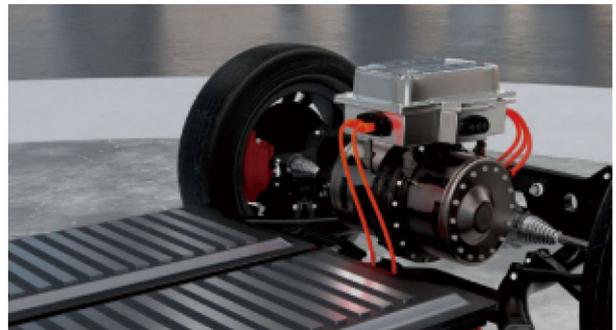
各原始設備製造商 (OEM) 的轉向柱設計不盡相同，但常用的實現方式是連接多個控制模組，並管理多個開關和按鈕控制功能，例如轉向燈、前照燈、雨刮器、巡航控制和滾輪。以前考慮到自動駕駛或舒適性原因，這些功能是採用機械方式實現的，現在已成為同時具有磁性功能的電氣解決方案。對於大多數應用，TMAG5170D-Q1 和 TMAG5173-Q1 能夠以高精度測量複雜角度，從而滿足汽車安全完整性等級 (ASIL) B 甚至 ASIL D 系統級合規性。圖 2 顯示了經過改裝，以使用 3D 霍爾效應感測器開發板代替機械觸點的 OEM 轉向柱控制模組。

圖 2: 轉向柱加裝 TI 3D 感測器評估模組。



馬達位置檢測是馬達設計的一個基本方面，可確保馬達以卓越效率運行。隨著功效要求的提高，位置感測器的性能預期也會提高，這些感測器能夠高精度地監測馬達軸的精確旋轉位置。通過瞭解電機的位置，牽引逆變器中的微處理器和功率級可以為馬達線圈提供精確的電流量，從而更高效地管理扭矩。挑戰在於當馬達以全速 (100,000rpm 或更高) 運行時，如何以盡可能高的精度 (約 0.5°) 在整個額定溫度範圍內測量角度。由於 LDC5072-Q1 電感式感測器 (也稱為電感式旋轉變壓器) 本身對雜散磁場具有抗擾度，因此適用於此任務。這項技術的另一個好處是不需要磁體。圖 3 顯示了頂部安裝了牽引逆變器的馬達。

圖 3: 馬達和牽引逆變器。



汽車電氣化為位置感測器創造了許多用例，其中電動助力轉向 (EPS) 最為普遍。隨著 EPS 的不斷發展，馬達位置感測器和車輪位置感測器的精度和解析度要求也不斷提高。

在 EPS 系統中，TMAG6181-Q1 可以非常精確地提供馬達轉子位置，角度誤差低至 0.4°，並支持高達 100,000rpm 的轉速，延遲小於 2μs，而 TMAG5170D-Q1 有助於確定方向盤的 3D 位置。方向盤角度感測器將資料發送到 ECU，以實現出色的車輛操作和控制。

電氣化不僅涉及汽車，還涉及電動自行車、踏板電動自行車和電動踏板車等運輸系統。雖然這些產品已經問世多年，但在馬達換向、轉

速和輪速感應方面仍有新的進步，需要位置感測器。電動自行車有幾種新趨勢值得注意：

馬達換向之前是通過三鎖存器無刷直流電機實現的，但大多數電動自行車電機提供商現在都通過高速、高精度角度感測器來監控馬達。TMAG6180-Q1 AMR 傳感器具有高精度角度測量（室溫下為 0.1°），因此非常適合這種應用。

使用 TMAG5115 等霍爾效應鎖存器進行車輪轉速和節奏監控可實現低抖動和快速回應時間，從而實現精度更高的速度和方向測量。過去，霍爾效應開關主要用於車輪轉速檢測。

趨勢二：提高可靠性和安全性的需求

在開發工業、個人電子產品和汽車系統的同時，設計人員還在思考如何使他們的設計更可靠，以延長產品的壽命。位置檢測的一個新趨勢涉及到通過幾種不同的方法來實現這一目標：從機械系統轉向磁感測器，以及加速實現功能安全合規性。

磁感測器消除了由摩擦引起的恒定機械磨損。例如，在無繩電動工具中，機械觸發器設計是很常見的故障模式，製造商通常要求在產

品生命週期內進行 >200,000 次迴圈。使用壽命週期目標因最終產品而異，但人們期望基於磁的解決方案能夠延長產品壽命。表 1 總結了其中的一些示例。

汽車電氣化的出現，以及幾乎所有電力驅動產品都增加了更多的電子設備，共同推動了對功能安全的需求。汽車行業的汽車產品遵循國際標準組織的 26262 標準，而工業部門則遵循國際電子電機委員會的 61508 標準。功能安全旨在通過消除由電子系統故障引起的不合理風險來保護用戶。如果系統發生故障，則應預設為可預測的已知狀態。

根據嚴重程度或後果（可能發生的傷害程度）、暴露或可能性（發生的可能性有多大）和可控性（用戶可控制的程度）、汽車和工業功能安全標準分為幾類。汽車系統中需要最高功能安全等級的幾個例子是 EPS 或換檔系統（電子換檔器）。考慮到與系統故障相關的風險，這兩個系統通常都需要最高汽車等級（ASIL D）。

為了滿足 ASIL D 級要求，系統開發人員通常使用冗餘感測器或解決方案，這些解決方案具有兩個完全相同但獨立的感測器，它們在

表 1: 轉向非接觸式方法的工業、個人電子產品和汽車系統應用示例。

應用	現有技術	使用位置感測器而非機械感測器的好處	推薦技術
用於無線電動工具和醫療電鑽的觸發器	機械電位器設計	<ul style="list-style-type: none"> ■延长了觸發機制的生命週期 ■您可以將感測器直接放置在主電路板上，無需外部模組。 	霍爾效應，電感式
冰箱門開 / 關檢測	微型開關	<ul style="list-style-type: none"> ■無需可見開關，就能呈現美觀的門介面。 	霍爾效應
遊戲控制器和鍵盤	機械設計	<ul style="list-style-type: none"> ■提供了檢測特定按鈕或觸發器上作用力的功能 ■在遊戲控制器中，這有助於防止隨著時間的推移而出現漂移。 	霍爾效應，電感式
轉向系統：轉向杆換擋器、轉向柱、旋鈕和電子換擋器	機械設計	<ul style="list-style-type: none"> ■使用無磨損的電氣位置信號提供線控轉向方法 	霍爾效應、電感和 AMR
制動系統	機械液壓設計	<ul style="list-style-type: none"> ■電子線控制動提供了更高的安全性和快速的回應時間。 	霍爾效應，電感式

內部相互隔離。兩個感測器同時發生故障的可能性非常低。這些類型的高性能系統也需要高精度角度檢測。TMAG5170-Q1 3D 感測器及其雙晶片同等產品 TMAG5170D-Q1 具有針對器件和系統級別的内置診斷功能。

趨勢三：最終產品的整體外形小型化

第三個趨勢與磁系統設計的小型化有關。縮減產品尺寸的原因很多：為了降低成本、提升用戶體驗、打造更時尚的外觀，這樣做通常涉及縮減磁體尺寸或使用多軸感測器。另一種風險較小的方法是通過遷移到製造流程允許的尺寸更小、集成度更高的元件來減小電路板尺寸。為了解決這些問題，德州儀器 (TI) 提供了採用 Extra-Small Outline No-lead (X2SON) ($1.1\text{mm}^2 \times 1.4\text{mm}^2$) 和 Wafer Chip Scale Packaging (WCSP) ($0.8\text{mm}^2 \times 0.8\text{mm}^2$) 封裝的小尺寸解決方案。在小型封裝中實現高集成度的一個例子是 TMAG3001，它是採用 WCSP 封裝的 3D 線性解決方案。

縮減磁體尺寸會帶來問題，因為這意味著磁場較弱，因此需要具有高靈敏度的磁感測器。借助 TMAG5231 等高靈敏度解決方案，有望使用更小的磁體。或者，您可以將磁體放置在更靠近感測器的位置，以便在沒有高靈敏度解決方案的情況下實現精確測量。對於較弱的磁場，具有高信噪比 (SNR) 的器件有助於確保盡可能精確的測量。DRV5055 和 TMAG5253 可以提供高達 70dB 的 SNR。

不論技術如何發展，縮小終端設備尺寸的大趨勢對任何位置感測器都是一個挑戰。電感式感測器使用金屬目標來檢測物體的位置或存在，通過滿足資料表中規定的指南，可以實現與健身腕帶上側按鈕一樣小的外形尺寸。電感式感測器的主要系統級要求是使感應線圈的尺

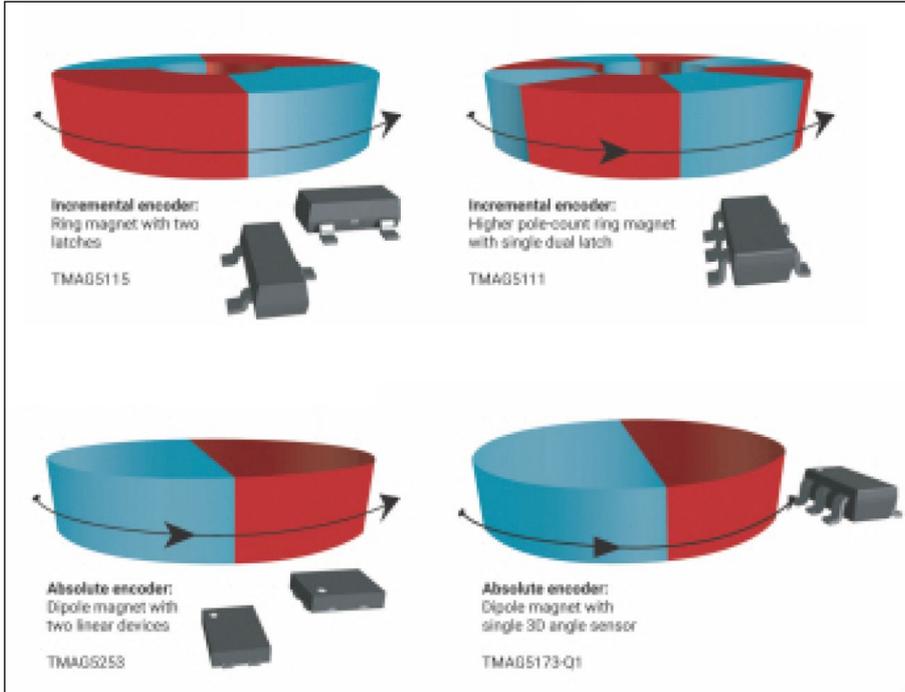
寸與目標相同，並且位於線圈直徑的 10% 到 20% 範圍內。趨向於縮小尺寸的應用示例包括醫用胰島素泵、手術內鏡工具以及工廠自動化中的氣缸。

通過減少元件數量，還可以實現小型化。例如，在電錶 (或智慧電子鎖和門窗感測器) 中實現篡改檢測涉及使用單個 3D 線性感測器，而非三個霍爾效應開關或線性器件，來檢測大型外部磁體的篡改，這種篡改導致電錶無法準確測量用電量。設計人員正在使用 3D 磁感測器通過更低功耗和可調外部磁場檢測器件 (如 TMAG5273) 來改進電錶設計。借助此類器件還可通過更少的元件實現小型化的其他優勢，包括採用單個數位介面而非多個輸出，降低印刷電路板組裝成本以及提高磁性靈敏度的可配置性。

當使用更少的元件來縮小系統尺寸時，增量和絕對編碼器設計人員面臨的一個挑戰是如何提高產品的解析度，包括在數位或類比輸出解決方案之間進行選擇。增量編碼器監控磁體的移動速度或速率以及方向。絕對編碼器可以做到這一點，並始終能在高解析度下確定其確切位置。

增量編碼器設計人員使用數位輸出霍爾效應鎖存器時，解析度嚴格取決於系統中磁極的數量。實現更高的解析度需要更高極數的環形磁體，而隨著磁極尺寸變小，磁體產生的磁場本身就會變弱，迫使設計人員將感測器放置在更靠近磁體的位置或使用靈敏度更高的感測器。此時，大多數設計人員轉為使用具有雙集成鎖存器的單晶片解決方案，例如 TMAG5111。務必確保雙鎖存器解決方案具有內置的 2D 鎖存器，這可以在監控 3D 空間中的任何兩個軸時實現很大的靈活性。更高解析度的設計需要帶有線性感測器的絕對編碼器。具

圖 4：編碼器的更高解析度趨勢。



有角度測量功能的單個 3D 線性感測器是高解析度絕對編碼器的最終遷移步驟。請注意，此實現僅

測量兩個軸，但大多數 3D 線性感測器可以靈活地配置任何兩個軸。使用 3D 感測器的一個額外好處是能夠檢測按壓功能。圖 4 展示了編碼器設計的趨勢。

趨勢四：從稀土材料到鐵氧體的過渡

稀土材料的生產主要集中在全球少數幾個國家/地區。這些材料並非取之不盡、用之不竭，按照目前的消耗速度，如果不進行回收利用，預計世界儲量很可能在 21 世紀下半葉耗盡。

一些公司已經開始通過將一些磁體消耗轉

移到鐵氧體材料來減少依賴和地緣政治風險。鐵氧體磁鐵的成本僅為稀土磁鐵（如釹鐵硼）的一小部分，而且由於鐵氧體材料豐富，價格穩定。使用鐵氧體磁體的缺點是產生的磁場大大減少，降低了多達 10 倍，並且溫漂為 0.2%/°C。

德州儀器 (TI) 的 TMAG5170 和 TMAG5273 磁感測器與陶瓷鐵氧體或稀土磁體配合使用，並具有專門針對這些磁體類型的溫漂補償功能。

結語

創新是工業和汽車系統不可或缺的一部分，位置感測器對於需要精確測量線性或旋轉運動的應用至關重要。隨著各個行業採用新型技術，市場對提升安全和用戶體驗的需求將持續增長，進而需要精確的感應技術。德州儀器 (TI) 的位置感測器正在推動這四個趨勢，公司將在未來繼續開發位置感測器，以支持下一波浪潮。

參考資料

1. Britannica. n.d. "Abundance, Occurrence, and Reserves." 2023 年 10 月 24 日。CTA

下期預告

6G、5G、ORAN、衛星通信