

以機電執行器智慧整合驅動器解決方案強化邊緣智慧

為了強化邊緣智慧，機電執行器需要智慧和高度整合的驅動器解決方案。這些智慧邊緣裝置融合了執行器和感測器功能，可協助在機器層面更能進行即時決策，並向更高的控制層級、雲端或 AI 生產力解決方案提供原位回饋資訊。本文討論了類比和數位技術交匯之處——智慧邊緣的智慧驅動器解決方案和技術。

■文：Stephan Kubisch

ADI Trinamic 解決方案總監

在尋求強化邊緣智慧的過程中，機電執行器等物理邊緣裝置需要更多智慧才能獲得更好的機器即時決策等優勢。這些執行器提供智慧、有價值和豐富的感測器式回饋。此類邊緣裝置是工業 4.0 及更高階段的關鍵。其控制機器人，操縱工廠流程並使之自動化，將數位資訊轉化為物理運動，同時提供高水準的智慧和自主感知¹。當執行器操縱事物時，感測器用於測量和量化實際參數，即將參數從物理值轉換回數位值。因此，執行器和感測器在大多數時候仍被認為是不同的裝置或零組件。

步進馬達和電磁閥佔據了這些機電執行器的很大部分，在每個生產廠房、各種汽車應用、實驗室自動化等場合都可以看到。在實驗室和醫療應用、工業應用以及汽車應用的推動下，全球的步進馬達和電磁閥市場已達數十億美元，且在不斷成長。這些應用對執行器和驅動器電子裝置的自動化和小型化要求越來越高。傳統的驅動器解決方案不能適應這些新的要求，並且缺乏感測能力。

最新的矽 cDriver 解決方案由智慧控制器和驅動器組成，其將感測器和執行器功能融合到單個整合元件中，以使用在嵌入式運動控制解決方案內部，進而實現邊緣智慧執行器^{2,3}。只能在機電執行器中直接獲得的系統參數和狀態變數，可以就地進行測量和評估（如溫度、電磁閥反應時間和馬達負載值）。

感測器功能與執行器的此種融合改變了機電執

行器的範式。其從簡單的功率轉換系統發展成自我意識感測器，可以有效控制執行器，並向更高的控制層級、雲端或 AI 生產力解決方案提供原位回饋資料。於是，機電單元成為了感測器。

機電執行器——概述

步進馬達和電磁閥廣泛應用於汽車、工業和醫療健康領域。兩者有很多相似之處：透過銅線圈通電引起機械運動。

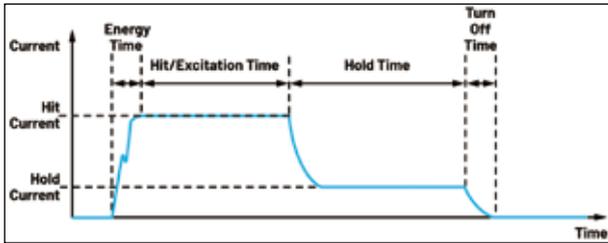
兩相步進馬達通常由兩個電流源控制，這兩個電流源在步進馬達的兩相中感應產生 90° 相移的正弦和餘弦形狀的電流。流過步進馬達線圈（定子）的電流決定磁場的方向。轉子像指南針一樣在定子線圈的磁場中定向。以電氣方式控制磁場的旋轉，轉子就能透過在磁場中的定向來旋轉。圖 1 顯示了標準混合步進馬達的定子 / 轉子佈置和一些不同類型步進馬達的示例。

電磁閥可與步進馬達相比擬。線圈通電引起機械運動。運動零件不是旋轉磁體，而是金屬柱塞，

圖 1：具有 50 個磁極對的混合步進馬達（左）和不同類型的步進馬達（右）。



圖 2：開關閥的電流波形。



產生線性運動。從控制角度看，電磁閥有兩種類型：開關閥和比例閥。開關電磁閥用於實現氣動或液壓閥的開 / 關功能。當線圈通電時，磁場產生，金屬柱塞沿磁場方向移動。為使柱塞移動，初始電流（衝擊電流）相當高，但只需要較小的電流即可將柱塞保持在適當位置（保持電流）。當線圈斷電時，磁場消失，柱塞可以在外力（彈簧、重力）的作用下自由回退。圖 2 顯示了驅動開關閥時的典型電流曲線。電流上升階段（通電時間）的小幅下降是由柱塞運動產生的反電動勢（BEMF）引起的。當激勵時間結束時，電流可以降低到保持水準，以根據需要將柱塞保持在適當位置。比例閥可以透過控制能量流和調節電磁閥電流將柱塞保持在任何位置。比例閥通常在閉迴路控制系統中用於控制特定的系統變數，例如壓力、空氣或流體流量。

為何需要採用新方法來控制機電執行器？

目前市面上的驅動器 IC 解決方案並不是為電磁閥驅動應用和高效經濟的建置方案而量身訂作的。其缺乏嵌入式時序控制器、特定於應用的功能、診斷功能和保護功能。每當需要先進控制特性（驅

圖 3：微型電磁閥、歧管和混合歧管示例（圖片來源：經 Lee Hydraulic Miniaturkomponenten GmbH/The Lee Company 許可）。



動器時序控制器、擾動、快速消磁、電流測量）或高層次診斷功能（柱塞運動檢測⁴、開 / 關狀態檢測、電感測量、負載開路檢測）時，系統複雜性就會明顯增加，因為需要採用額外的外部變通方法和電路^{5,6,7,8}。設計人員需要設計每個模組（數位控制器、電流感測、訊號處理、功率級、保護）並將其相互連接。設計人員仍然必須面對一些問題，包括電路板空間的佔用、漫長的設計階段、應用可靠性、冗長的物料清單（BOM）和缺乏彈性。

以下介紹一些全球趨勢，這些趨勢導致人們對機電執行器的嵌入式控制和驅動器解決方案提出了額外要求和需求。

微型執行器的演變

機電執行器的持續小型化，使其成為醫療裝置、化學工業、實驗室自動化、半導體製造、食品和飲料產業以及工業和汽車應用中節省成本和空間的零組件。小型化閥門和歧管以及混合解決方案（步進馬達 + 電磁閥）的示例如圖 3 所示。直徑尺寸小到只有幾毫米。雖然微型執行器的優勢有望推動增長，但這些市場提出了更多要求，例如：更長的有效壽命、耐用性和可靠性、小尺寸嵌入式控制器和驅動器解決方案（由於空間限制）以及簡化的操作和控制。

增強型診斷

機電執行器在長期運行過程中容易退化，並可能出現其他故障情況，包括電氣方面（線圈問題、殘餘線圈功率、過熱、絕緣故障）和機械方面（閥門

部分關閉或開啓、手動超控、壓力差、灰塵聚集、閥門機械損壞、油脂乾燥)。這些挑戰會影響執行器及其所在系統的性能、壽命和工作可用性。因此，數位化需求非常迫切：關於本地系統參數的詳細和高品質的診斷回饋，用於監測執行器及其控制電子裝置的健康狀態，以便在本地機器層面更能進行決策，對變化做出反應，並將預處理的診斷資訊或原始資料從邊緣傳遞到更高的控制層級。除了簡單的驅動器錯誤標誌之外，還需要回饋和診斷！

能源效率

如今，碳足跡扮演著重要角色。能源效率受到全球環境政策、成本和應用限制的推動。能源是全球極寶貴的資源之一，其成本持續成長。因此，我們需要有效控制並盡可能降低執行器的功耗。另一個積極的副作用是當功耗得到有效控制時，電磁閥或步進馬達在應用中可保持較低溫度。這將會簡化系統散熱工作，並可能使其可用於對溫度有嚴格要求的特定應用，例如敏感的實驗室應用。

上市時間

在系統複雜性增加的同時，開發時間需要縮短。高度整合、經過驗證且隨時可用的建構模組和子系統有助於降低或隱藏整體複雜性，有助於降低設計風險，進而將上市週期保持在合理水準⁹。系統設計越來越多由通訊介面和以軟體為中心的視角主導。因此，主動系統元件和建構模組的選擇將以其通訊和控制介面的彈性和能力為依據。

總體擁有成本

與產品整個生命週期相關的總成本通常被理解為擁有權總成本 (TCO)。這不僅涵蓋開發成本或其他非經常性工程成本，還包括所有直接和間接類型的營運費用：能源成本 (能效)、維護成本、工作可用性和供應鏈風險。能源成本可以直接衡量，而維

護成本可以提前估算。在產品壽命很長的細分市場中，例如在工業和醫療應用中，需要考慮並將盡可能降低總體擁有成本。

cDriver 中感測器 – 執行器融合的影響

參考所討論的不同全球趨勢，我們需要將類似感測器的能力整合到機電執行器的 cDriver 中。多晶片和單晶片的晶片級解決方案不斷出現，其不僅包含類比驅動器部分，還將由增強的數位功能、感測能力和決策以及通訊介面來主導和定義。此種感測器 – 執行器融合滿足了許多需求，並為基於電磁閥和步進馬達的應用帶來了廣泛的優勢。

微型執行器的演變：精巧型嵌入式硬體解決方案

對於微型閥門、歧管和多軸步進馬達應用，使用高度整合和嵌入式硬體解決方案來驅動和控制其很有利。如果控制器和驅動器電子裝置可以同樣精巧，那麼整個執行器子系統將能為空間受限的應用帶來尺寸縮小的競爭優勢。

單電磁閥、歧管或多軸步進系統的典型嵌入式硬體解決方案由一個用於通訊的匯流排介面、一個用於應用控制的微控制器單元 (MCU) 以及一個或多個控制器 / 驅動器單元組成，如圖 4 所示。

通訊介面和 MCU 取決於應用和整體系統架構，通常每個單元只需要一次。相反，歧管 / 多軸系統可能多次需要執行器控制器 / 驅動器級，這就提供了極大的優化潛力。電磁閥的典型驅動器方案也提供擴展特性，但 BOM 較大，並且需要很大的空間來放置所有零件^{5,6,7,8}。

圖 4: 典型電磁閥或步進馬達控制器和驅動器解決方案 / 簡圖。

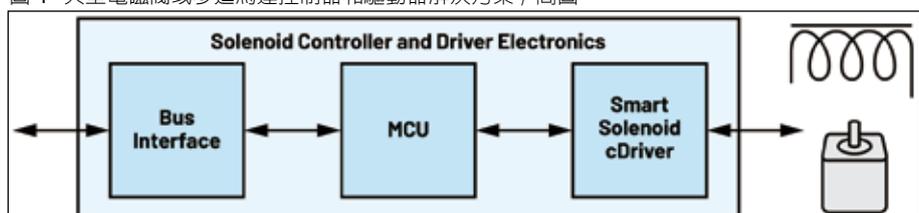
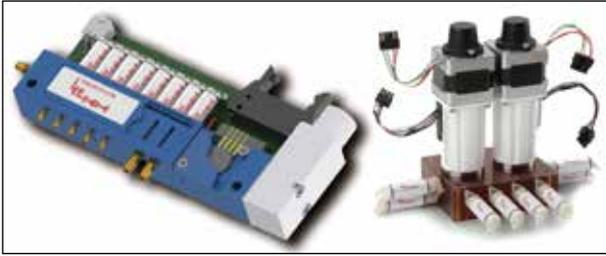


圖 5: 歧管示例



圖片來源：經 Lee Hydraulische Miniaturkomponenten GmbH/The Lee Company 許可。

將這些擴展的控制和感測功能完全整合到單一元件中，所需的電路板空間便可充分減小。例如，採用整合電流檢測的解決方案消除了較大的外部感測電阻和額外的分流放大器。低 $R_{DS(ON)}$ 的整合驅動器級可實現最佳效率並降低熱損耗，這對所需的散熱面積或在關鍵應用環境中也有積極影響。

圖 5 顯示了典型的歧管示例。空間的節省和 BOM 的減少有助於實現超精巧的解決方案，並節省這些應用內部的零組件、PCB 和外殼材料的成本。

像電磁閥一樣，步進馬達解決方案同樣由驅動器部分主導。高度整合的步進 cDriver 可大幅節省空間，同時提供卓越的控制。除了診斷和回饋功能外，其還配備了整合運動控制器和電源級^{10,11}，以及完全整合的電流感測功能^{12,13}。

瑞士 Hombrechtikon Systems Engineering AG 電子工程師 Reto Himmler 證實：「我們使用 ADI

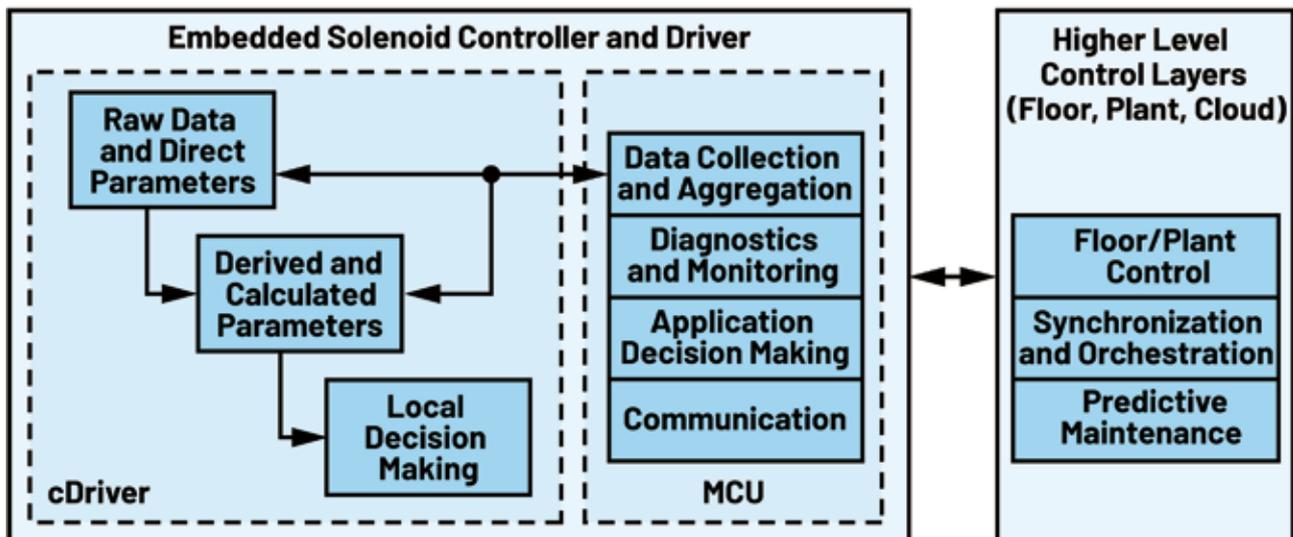
Trinamic 步進馬達驅動器已經超過十年，其具有業界領先的特性。TMC5240¹³ 正是我們期待已久的元件！更高的馬達電流、精巧尺寸和整合的電流成測功能有助於節省實驗室自動化設備中寶貴的電路板空間。低 $R_{DS(ON)}$ 帶來的低損耗為機械設計提供了更大的自由度。8 點斜坡很不錯，儘管現有產品的 6 點斜坡就已經非常適合我們的應用。」

增強型診斷：為預測性維護和自我意識鋪路

智慧 cDriver 可在本地提供類似感測器的資料。但是，使用這組豐富的資訊的用途為何？

智慧 cDriver 解決方案提供的參數包括：驅動器溫度、線圈電阻和溫度資訊、線圈電感估計值、電源電壓、實際線圈電流和 BEMF 資訊。透過智慧整合演算法和函數可以推導出系統和應用條件以及其他系統參數，例如：電磁閥的反應和行程時間、局部電流驟降、負載開路檢測、過流和短路檢測、零組件閉合和柱塞運動檢測、柱塞位移測量及即時電流監測。對於步進馬達，還可以讀出基於 StallGuard 的實際負載資訊和 CoolStep 電流減小水準^{14,15}。對於許多應用，StallGuard 負載值是非常有價值的資訊，因為長期漂移可能顯示應用中機械和齒輪的性能降級或機械終點擋板有缺陷。StallGuard

圖 6: 感測器和診斷資料的可用性和流程。



值與電機軸上的負載情況直接相關，並且可以在應用中隨著時間變化，具體取決於馬達加速度或外力。利用 StallGuard 值甚至可以提前檢測實際馬達是否要失速，此資訊隨後可用於應用中的無感測器端位元止動裝置檢測或校準。

本地檢測能力和診斷以及此種原位回饋的獲取，在三個不同層面上為預測性維護和自我意識鋪平了道路，如圖 6 所示：

- 本地，cDriver 零件內部
- 應用層面上，嵌入式子系統的本地 MCU 中
- 更高層面上，如生產廠房、工廠控制或雲端

得益於本地監測和自診斷功能，可以直接在控制器和驅動器電子裝置內部做出更好的即時決策。這些功能包括：可配置的熱保護限值，可配置的短路檢測，故障情況下的驅動器保護，衝擊電流到保持電流的自動切換，以及即時故障報告，例如當電磁閥的柱塞卡住時。

使用本地 MCU 在應用上下文中解譯類似感測器的資料，可以實現更精細的功能。透過 cDriver 的序列介面可以實現即時監測。診斷資訊和參數可作為連續回饋流從執行器和 cDriver 獲得。這有助於實現更具體的狀態監測、長期故障識別，甚至模式檢測。反應和行程時間測量、局部驟降搜索、柱塞位移和負載值：這些參數隨時間的漂移是執行器老化的徵兆，顯示在其使用壽命期間需要預防性維護。感測器資料可以聚合。除了檢測簡單故障之外，還可以對應用統計資料進行預處理，並將其轉換為正確的格式，然後透過通訊匯流排介面（如 IO-Link、CANopen，甚至工業乙太網路的衍生介面）傳送到更高控制層。

在更高控制層上，資料來自分散的各個執行器、歧管或多軸系統。另一種可能性是，將生產廠房的資訊孤島集中並提供額外的選項，以便改善控制，監控系統健康狀況，簡化維護，或者將其與中繼資料一起放入上下文中。例如，知道歧管的反應和行程時間有助於同步多個閥門，或改善不同電磁閥和其他執行器的編排，以實現更好的交互和輸送量。有缺陷的執行器得以識別和定位。

能源效率：卓越的控制品質

測量電磁閥反應和行程時間以及檢測電流局部驟降的功能可對功耗產生積極影響。目標電流和擺率等控制參數得以調整，進而優化反應和行程時間。此外，從衝擊電流到保持電流的自動切換可以發生在最佳時間點，而不是等待某個靜態的預配置命中時間視窗。不必要的能量不會泵入電磁閥線圈，可以節省下來，而這又能進一步提高電磁閥單元的效率。在雙穩態脈衝電磁閥（門鎖閥）的情況下尤其如此，因為保持狀態透過機械方式（彈簧）加以保證，使得保持電流為零，總功耗的來源只有激勵衝擊電流。

在步進馬達應用中，在 StallGuard 負載值的基礎上使用 ADI Trinamic CoolStep 解決方案還能節省大量能源^{14,15}。CoolStep 由此提供一種無感測器動態電流水準控制，其將馬達軸上的實際負載考慮在內。當軸上的負載很低時，不需要用滿標稱目標電流來驅動馬達。目標電流可以調整到所需的最小值。當負載增加時，目標電流以同樣的方式進行調整，以提供更大的馬達轉矩。甚至峰值負載也可以擷取，目標電流可以暫時提升到標稱電流以上而不會損壞電機。其將以最小電流驅動步進馬達，使馬達的能耗降低高達 90%。

此種能效的提高還導致散熱和熱應力更小，進而延長電磁閥 16 或步進馬達的壽命，提高其可靠性和功能可用性。將執行器保持在較低溫度為更廣泛的應用和用例提供了可能。例如，在實驗室、化學或醫療領域，需要適當控制溫度，避免其達到臨界限值。

上市時間：簡化控制 / 易於使用

cDriver 零件採用以介面為中心的架構。介面的雙向特性支援採集 cDriver 內部提供的感測器資料和參數，並根據應用對控制參數進行配置和調整。cDriver 零件本身就是子系統，為電磁閥和步進馬達控制提供隨時可用且支援廣泛配置的高端構建模組。軟體發展（針對電磁閥或步進馬達部分）被大幅壓縮——基本上完全不需要。開發者無需成為電

磁閥或步進馬達控制方面的專家，而是可以將重點放在其自己的專用功能和通訊方面。這種以通訊為中心、聚焦於介面的思維方式催生了「軟體定義硬體」，不僅對系統設計或軟體工程師有利，而且縮短了上市時間，有效地降低了設計風險。

總體擁有成本

本文討論的智慧和高度整合的 cDriver 零組件有助於降低擁有權總成本。三個不同層面上的成本有望得到節省：能源成本、維護成本和因緩解風險而產生的計畫外費用。

提高能效和降低功耗的功能直接影響到營運費用——節能就是節約成本。

基於大量診斷資料和感測器式回饋的預測性維護措施有助於降低計畫外維護成本，並普遍地簡化維護流程，因為故障點可以輕鬆定位。來自執行器子系統的連續回饋流有助於監控系統狀況並提高工作可用性，這反過來又能防止因生產停機時間而產生的額外成本。

cDriver 零件高度整合的另一個重要影響是 BOM 大幅減少，同樣不可低估，如上述示例所示。但是，這不單是 BOM 成本的降低。貿易戰或其他全球事件導致的全球供應鏈挑戰、晶圓廠產能以及半導體和電子元件短缺，損害了即時製造和交付產品的能力，甚至造成了根本無法製造和交付的情況。這不僅僅是一個風險，更是一個事實。BOM 零組件數量的減少有助於消除依賴性，並防止控制器和驅動器電子裝置的計畫外重新設計以及隨後的重新認證工作。

結語

憑藉感測器和執行器的融合，新的 cDriver 零件實現了邊緣智慧機電執行器。cDriver 零件不僅能切換電磁閥或轉動馬達，還提供廣泛的診斷功能，因此其本身就是一種感測器。其利用預處理資料在本地做出決策，並提供安全和監控功能。此種智慧感測執行器解決了機械挑戰，隱藏了複雜性，封裝

了複雜功能，為更高控制層提供了豐富的資訊以供進一步處理，並且降低了成本和功耗，可為未來的資訊—物理系統和生產廠房提供額外的價值。這是數位化的全新水準，也是邊緣機電執行器控制的一個範式變化。德國 MEV Elektronik Service GmbH 的運動控制產品線經理 Guido Gandolfo 表示：「新的步進馬達驅動器系列使客戶能在更短的時間內開發出更小、更智慧、效率更高的產品。這是維持 ADI Trinamic 驅動器先進地位的利器。」MEV 為一家專業從事運動控制和設計導入支援的代理商。

參考文獻

- 1 Jeff DeAngelis。「工廠邊緣智慧：提高生產力和改善成本。」Electronic Products, 2021 年 5 月。
- 2 “嵌入式運動控制簡介。” ADI Trinamic, 2018 年 11 月。
- 3 “超越感測器和攝像頭：嵌入式運動與馬達控制如何推動物聯網發展。” Trinamic, 2018 年 12 月。
- 4 Roberto Casiraghi、Luigi Franchini 和 Pietro Introini。「電磁閥柱塞運動檢測。」ADI, 2020 年。
- 5 Manu Balakrishnan 和 Navaneeth Kumar N。「柱塞運動檢測。」Texas Instruments, 2015。
- 6 「具有柱塞故障檢測的 24V 直流電磁閥的電流控制驅動器參考設計。」Texas Instruments, 2014 年 11 月。
- 7 「適用於電磁閥執行器的穩健閉迴路控制與監測系統。」ADI, 2019 年。
- 8 Scott Beversdorf 和 Chuck Whiting。「適用於汽車控制系統的電磁閥電流測量。」《類比對話》，第 38 卷第 2 期，2004 年 4 月。
- 9 「運動控制如何定義系統設計——工程視角。」ADI Trinamic, 2017 年 8 月。
- 10 TMC5072 智慧整合雙軸步進驅動器及控制器。ADI。
- 11 TMC5130 智慧整合步進驅動器及控制器。ADI。
- 12 TMC2240 智慧整合步進驅動器。ADI。
- 13 TMC5240 智慧整合步進驅動器。ADI。
- 14 StallGuard 和 CoolStep。ADI。
- 15 如何在 TMC5130-EVAL-KIT 上配置 StallGuard2 和 CoolStep。ADI。
- 16 Jun Peng、Xuanheng Tang、Bin Chen、Fu Jiang、Yingze Yang、Rui Zhang、Dianzhu Gao、Xiaoyong Zhang 和 Zhiwu Huang。「使用電磁閥的物理指標和資料特性預測故障類型。」Applied Sciences, 第 10 卷第 4 期，2020 年。GTA