電機多樣化應用：從新能源車、機器人到 AI 算力中心

編輯部整理

新能源電動汽車——多合一電驅與高密化路線取捨

「扁線繞組 + 直噴油冷 + 800V SiC 電控」的量產主力協同與高頻電磁重構

電動車與高效能馬達中常見的扁線繞組 (Hairpin / I-pin / X-pin)，是指將傳統圓形銅線替換為矩形斷面 (扁線) 的定子繞組技術。「扁線繞組 + 定轉子直噴油冷 + 800V 碳化矽 (SiC) 功率電控」已確立為中高端與主流新增車型的標準量產配置。據 TrendForce 統計，新能源乘用車新上市車型中扁線繞組電機滲透率已超過 80%，完成對散線繞組的結構性替代；配套油冷定子的電驅總成佔比從早期 19.5% 攀升至 41.2% 以上。在主流八合一、十合一電驅總成中，電機轉速普遍拉升至 20,000 rpm 至 25,000 rpm，體積功率密度突破 3.5 kW/L 至 4.5 kW/L。

電驅系統的高密化並非單一零部件指標疊加，而是功率半導體開關特性與電機本體電磁、熱工設計的深度耦合。逆變器從 400V 矽基 IGBT 升級為 800V SiC MOSFET 後，開關頻率由 10 kHz 提升至 20 kHz ～ 40 kHz，dv/dt 達 30 V/ns ～ 50 V/ns。高頻 PWM 載波諧波注入定子繞組，在扁銅線內誘發集膚效應與鄰近效應，交流銅耗急升 (高頻下可達直流的 2.5 至 4 倍)，高頻諧波磁場在矽鋼片內的渦流損耗與永磁體表面渦流發熱亦同步增加。抑制手段是從電磁源頭重構阻抗匹配：定子繞組由 4 層、6 層扁線演進為 8 層乃至 10 層超薄扁線，配合不對稱定子槽口拓撲與 0.20 mm ～ 0.25 mm 超薄低鐵損矽鋼片。熱管理端，機殼水冷套已無法導出扁線端部與高轉速轉子內部的積熱，低黏度自動變速箱油 (ATF) 直噴油冷使冷卻介質直接接觸發熱源，將繞組與磁鋼熱阻降低 40% 以上，確保電機在 H 級 (180°C) 或 C 級絕緣體系下維持穩定的連續額定輸出。

圖說：匯川聯合動力 (Inovance Automotive) PM53 五代扁線 X-pin 定子轉子視圖，展示扁線繞組、直噴油冷結構，適配 800V SiC 電控乘用平臺



少稀土 PMaSynRM 的成本窗口與低速 NVH 工程妥協

面對重稀土 (鏑、鈥) 與輕稀土 (鈸、鐠) 價格波動及海外供應鏈合規要求，永磁輔助同步磁阻電機 (PMaSynRM) 作為少稀土與去稀土路線的折衷，已在 A 級緊湊型乘用車及雙電機四驅車型的輔驅前橋規模化裝車。但評估鐵氧體基 PMaSynRM 必須釐清工程基準：鐵氧體永磁磁能積 (BH_max 約 3.5 ～ 4.5 MGOe) 僅為高性能燒結釹鐵硼 (40 ～ 52 MGOe) 的 1/3 至 1/4。部分廠商宣稱的「體積縮小 18%、重量減輕 25%」必須限定為相對早期感應異步電機 (IM) 的對標結果，或拉高基準轉速搭配高減速比齒輪箱所達成的系統級減重，而非以鐵氧體替換釹鐵硼的本體紅利；若在同轉速、同冷卻條件與同體積包絡下與釹鐵硼 IPMSM 直接對比，峰值轉矩密度仍存在 20% ～ 30% 的物理落差。在低速大轉矩工況下的取捨上，其核心掣肘在於轉矩脈動與聲振粗糙度 (NVH) 妥協。該拓撲中磁阻轉矩佔總輸出轉矩比例高達 60% ～ 75%，轉子內部必須衝壓出多層流線型磁障結構以最大化交直軸電感差。多層磁障使氣隙磁通密度富含空間諧波，在起步或低速爬坡等大電流工況下極易激發定子齒部劇烈徑向電磁力波，在 2,000 Hz ～ 5,000 Hz 人耳敏感頻段引發電磁嘯叫。工程界可透過轉子斜極分段、非均勻氣隙設計與電控端諧波電流注入將轉矩脈動壓制在 5% 以內，但轉子多層薄肋在高轉速離心力下的應力集中，以及諧波注入對直流母線電壓裕度的佔用，使 PMaSynRM 仍鎖定在對成本敏感、對極限加速與 NVH 要求相對寬容的經濟型乘用車或商用車。

軸向磁通電機的商用車先行落地

軸向磁通永磁電機 (AFPM，又稱盤式電機) 憑藉磁通方向與轉軸平行、有效氣隙面積隨轉子外徑三次方 (D3) 增長的拓撲特性，在極限功率密度上展現顯著優勢。英國 YASA (已被 Mercedes-Benz 收購) 及中國太華動力、盤古動力的高性能樣機，瞬時峰值功率密度已達 40 kW/kg 至 59 kW/kg。但車規級選型必須嚴格區分瞬時峰值 (僅維持 10 秒至 30 秒) 與連續額定工況的溫升限制：雙轉子夾單定子的無軛部結構中，定子鐵芯與繞組完全封閉在兩個高速旋轉的轉子磁盤之間，缺乏傳統徑向電機的外機殼散熱面積；在連續額定負載下，受限於定子微流道油冷換熱極限與環氧灌封膠導熱係數 (僅 1.5 ～ 3.0 W/m·K)，連續額定功率密度普遍回落至 15 kW/kg ～ 25 kW/kg。

圖說 :YASA 馬達的定子鐵質量減少了 80%，功率密度是無軸流馬達的 2-3 倍



圖片來源：yasa.com

基於上述熱力學特性與製程成熟度，軸向磁通電機在新能源汽車領域呈現「重型商用車先行規模化、乘用車主驅審慎導入」的分化節奏。新能源重卡、城市電動公交、礦山寬體車及工程機械領域，盤轂動力等廠商已實現軸向磁通電驅橋與輪邊驅動系統的數萬台級交付。由於軸向長度較同功率徑向電機縮短約 40% ～ 50%，商用車底盤得以省去中央傳動軸與差速器，將電機集成於車輪內側或車橋中部，既騰出更大電池包佈置空間，又實現單橋減重 200 kg 至 300 kg。乘用車市場除 Mercedes -AMG 平台、法拉利與蘭博基尼插電混動超跑採用軸向磁通電機作為 P2/P3 混動增扭單元外，主流百萬元級走量乘用車在未來三至五年內仍以徑向扁線油冷電

機為主力；軸向磁通電機在乘用車的滲透，仍有賴於定子軟磁複合材料或卷繞鐵芯自動化良率提升，以及雙轉子軸向氣隙在熱膨脹與底盤衝擊下動態防剮蹭製程的成本下探。

具身智慧機器人——無框力矩、QDD 與靈巧手微型驅動

機器人關節驅動指標重構與第四代無框力矩電機量產突破

多位機器人運動控制領域的專家與演算法架構師在公開論壇中明確指出：「在具身智能系統中，端到端強化學習及模型預測控制運動控制演算法與底層電機的力矩響應特性存在深度綁定關係。」具身智慧人形機器人、四足機器人與柔性協作機器人的運行工況，與追求萬轉以上高速巡航效率的新能源汽車截然不同。關節長期處於低速正反轉、頻繁啓停、動態變載乃至瞬間雙足落地衝擊與堵轉支撐狀態，決定了電機選型遵循「低轉子轉動慣量、極低轉矩脈動、低堵轉溫升優先於高速峰值效率」的準則。據蘇州翰泰 (Honpine)、步科股份、鳴志電器等廠商公開參數，中國國產第四代無框力矩電機 (Frameless Torque Motor) 已在人形機器人髖、膝與肩部大關節批量定型裝機；新一代產品透過多極分數槽集中繞組、高槽滿率成型線圈與轉子 Halbach 充磁陣列優化，在維持輕量化外徑包絡下將定子中空內徑擴大至 85 mm 級，足以容納高壓母線、EtherCAT/CAN-FD 光纖與視覺傳感線束從關節軸心無干涉穿過；連續扭矩密度較上一代提升約 30%，全工況扭矩脈動壓制在 1% 以內，優於高端醫療手術機器人採用的 2% 閾值。

人形機器人在非結構化路面行走或執行全身動態平衡任務時，上層控制環路以 1 kHz 至 4 kHz 高頻直接下發關節目標力矩指令；若底層無框力矩電機齒槽轉矩過大、扭矩脈動超過 2% ～ 3%，或高倍過載下因定子齒部磁飽和導致轉矩常數顯著非線性衰減，將直接擴大虛擬仿真與真實物理世界間的遷移落差 (Sim-to-Real Gap)，AI 控制神經網絡不得不消耗大量算力補償底層執行器的非線性擾動與摩擦死區，易引發關節抖振或姿態失穩。因此維持 2.5 至 3 倍過載區間內的線性度，已成為保障具身智慧算法高魯棒性落地的物理基石。

準直驅本體力控架構與微型軸向磁通、空心杯電機

在人形機器人下肢髖、膝、踝等高衝擊大關節中，高扭矩密度無框力矩電機 + 低減速比精密行星減速器 (N 通常 5:1 至 20:1) 構成的準直驅 (QDD) 執行器，正逐步替代傳統高速伺服電機 + 高減速比諧波減速器 (N 為 50:1 至 100:1) 方案。百倍減速比的諧波方案雖能放大靜態輸出扭矩，但反射慣量與反向驅動摩擦使其喪失機械後驅透明性，遭遇地面突發衝擊極易損壞柔輪齒面，且必須額外配置昂貴易碎的關節扭矩傳感器才能實現柔順力控。QDD 方案的扁平大外徑無框力矩電機本體轉矩密度較傳統徑向永磁

圖說 :Kollmorgen TBM 系列無框電機適用於機器人關節、移動機器人及其他電池供電設備



圖片來源： kollmorgen.com

伺服電機提升 1.5 倍以上，配合低減速比行星齒輪將反射慣量降低一個數量級以上；關節因而具備極高的反向驅動效率 (>85%)，控制器僅需採集相電流即可推算關節實時外力矩，在不依賴外部力傳感器的前提下實現高帶寬本體電流力控 (Proprioceptive Force Control) 與主動阻抗吸收。

針對空間極度受限的上肢腕部、踝關節側擺與多自由度靈巧手，微型特種電機呈現明確的代際分工與量產時序差異。腕部與緊湊型旋轉關節採用印刷電路板定子或軟磁複合材料三維磁路的微型軸向磁通關節電機，憑藉極短軸向厚度與高懸臂抗彎剛度受到整機廠高度關注；但受制於微米級雙氣隙裝配公差與小批量模具攤銷成本，目前仍處於工程樣機驗證階段，預計 2027 至 2028 年隨人形機器人年產量跨過萬台門檻後逐步放量。已進入商業化交付的 12 至 22 自由度仿人靈巧手中，高響應空心杯電機 (Coreless Motor，外徑 8 mm ～ 16 mm) 配合微型行星齒輪箱、行星滾柱絲槓或腱繩傳動，依然是確定性最高的量產主力。空心杯電機徹底消除無鐵芯轉子的鐵損與齒槽效應，機械時間常數低至 2 ms ～ 5 ms，能在毫秒級時間內響應精細抓握力控指令；核心挑戰在於極細漆包線斜繞 / 菱形繞組在持續抓握堵轉下的局部散熱限制，及超薄磁瓦與進口高端空心杯在極限壽命一致性上的收斂。

AI 數據中心液冷——CDU 循環泵與高可靠 EC 風機

高密算力機櫃熱流與 CDU 循環泵專用電機容錯設計

隨著生成式 AI 大模型訓練與推理集群的算力密度躍升，單顆 GPU/ASIC 加速晶片的熱設計功耗 (TDP) 已突破 1,000 W 至 1,400 W，帶動單機櫃功率密度從傳統數據中心的 10 kW ～ 15 kW 攀升至 60 kW ～ 130 kW 以上。在如此嚴苛的熱流密度下，傳統定速風冷已觸

表：人形機器人各關節部位電機架構與核心關鍵績效指標

關節部位與典型自由度	外徑 90–130 mm；中空內徑達 85 mm 級；扁平大徑長比拓撲	峰值扭矩 120–360 N·m；本體轉矩密度提升 >1.5 倍；扭矩脈動 <1.0%；過載倍數 2.5–3.5 倍	反向驅動透明性、純相電流本體力控 (無力傳感器)、落足抗衝擊與堵轉低溫升	關鍵控制訴求與工程挑戰
高槽滿率無框力矩電機 + 諧波減速器 (微型軸向磁通關節電機預計 2027–2028 年逐步放量)	外徑 50–85 mm；緊湊中空結構；高極對數分數槽集中繞組	額定扭矩 15–80 N·m；扭矩密度較前代提升 ~30%；扭矩脈動 <1.0%–1.5%；定位精度 <1 arcmin	末端軌跡高剛性、低齒槽轉矩抑制低速爬行、受限空間線束穿引與散熱平衡	高動態反向驅動透明性、純相電流本體力控 (無力傳感器)、落足瞬間抗衝擊與堵轉低溫升
高響應無刷空心杯電機 (或微型無刷內轉子電機) + 微型行星齒輪 / 絲槓 / 腱繩傳動	外徑 8–16 mm；無鐵芯自支撐線圈轉子；超輕量化圓柱構型	單指推力 10–30 N；機械時間常數 2–5 ms；零齒槽轉矩 (0%)；轉速 15,000–35,000 rpm	毫秒級觸覺反饋閉環、微型繞組防燒毀保護、多指協同微電流分辨率與成本	末端軌跡跟蹤高剛性、極低齒槽轉矩抑制低速爬行、受限空間內多軸線束穿引與散熱平衡
仿人靈巧手及末端執行器 (單手 12–22 DOF，手指獨立驅動)	高響應無刷空心杯電機 (或微型無刷內轉子電機)+ 微型行星齒輪 / 絲槓 / 腱繩傳動	外徑 8–16 mm；無鐵芯自支撐線圈轉子；超輕量化圓柱構型	單指推力 10–30 N；機械時間常數 2–5 ms；零齒槽轉矩 (0%)；轉速 15,000–35,000 rpm	毫秒級觸覺反饋閉環、高功率密度下的微型繞組防燒毀保護、多指協同微電流分辨率與成本控制

及空氣比熱容與機房風道壓降的天花板，推動算力設施全面轉向「冷板式液冷 (Cold Plate Liquid Cooling) 為主、浸沒式液冷協同演進」的混合架構。液冷冷量分配單元 (CDU) 承擔二次側冷卻液分配、壓力調節與熱交換的核心職能，而驅動冷卻液循環的 CDU 循環泵專用電機直接決定算力集群的零宕機可用性。據 OCP 液冷規範及交付數據，流體機械與特種電機龍頭廠商已完成高可靠 CDU 循環泵專用電機的定型與批量交付。此類電機全面摒棄存在磨損滴漏隱患的傳統機械軸封，轉而採用全封閉屏蔽電機 (Canned Motor) 或永磁磁力耦合無軸封結構，從物理結構上實現「零洩漏」運行。

圖說 :Ebmpapst 高靜壓 48V EC 外轉子風機



圖片來源 :ebmpapst.com

CDU 循環泵電機的設計核心在於耐化學腐蝕材料工程、屏蔽套渦流損耗平衡與 N+1 冗餘容錯控制的三維協同。冷板式液冷二次側普遍採用去離子水、乙二醇或丙二醇水溶液並添加緩蝕劑與殺菌劑，定轉子屏蔽套必須採用 316L 奧氏體不鏽鋼、哈氏合金或鈦合金薄壁激光焊接製程，並配置循環冷卻液自潤滑的高純度碳化矽陶瓷滑動軸承，以承受 50,000 至 80,000 小時連續高速運轉而不產生金屬離子析出。電磁效率方面，金屬屏蔽套置於氣隙磁場中會引發顯著渦流損耗；工程上將非磁性合金屏蔽套壁厚控制在 0.3 mm ～ 0.5 mm，並搭配正弦波磁場定向控制 (FOC) 寬域變頻驅動，使循環泵能依伺服器 GPU 實時結溫與機櫃負載動態調節轉速 (n)。按流體機械相似定律，泵軸功率與轉速三次方成正比，寬域無級調速可使數據中心在非滿載時段節省 35% ～ 50% 的泵功損耗。為滿足 Tier IV 級高可用標準，CDU 電機電控系統普遍集成雙繞組冗餘或 N+1 熱插拔並流容錯演算法；當單台泵電機檢測到軸承磨損特徵頻率或相電流異常，在毫秒級內將流量負載轉移至冗餘泵組，避免局部斷流導致算力晶片熱失控。

高靜壓 EC 無刷風機與浸沒式液冷電機 PFAS 材料重構

儘管冷板式液冷可帶走伺服器內部約 70% ～ 80% 的核心熱量，但機櫃內剩餘 20% ～ 30% 的熱負荷仍需依賴強迫風冷或背板熱交換器 (RDHX) 散熱，使具備高靜壓、高平均無故障時間與低待機功耗的電子換向 (EC) 外轉子無刷風機成為 AI 液冷機櫃不可或缺的配套動力單元：ebm-papst、台達電、尼得科等廠商的新一代 48V 直流母線高靜壓 EC 風機提供 800 Pa 至 1,500 Pa 靜壓支撐，峰值氣電綜合效率超 65%，45°C 環境溫度下 L10 壽命突破 70,000 至 100,000 小時。

在散熱極限更高的全浸沒式液冷 Tank 箱體內部，用於強制擾流循環的潛液泵電機、維護升降機構電機與精密電動調節閥驅動器，均需長期完全浸沒於絕緣冷卻介質中工作。值得警惕的產業變數是，早期廣泛使用的全氟聚醚 (PFPE)、氫氟醚 (HFE) 等氟化液，正受到歐盟化學品管理局 (ECHA) 與美國環保署 (EPA) 針對 PFAS (全氟和多氟烷基物質，俗稱「永久化學品」) 環保限令的嚴格約束，加之國際化工巨頭逐步關停相關產線，全球新建的浸沒式液冷集群正大規模轉向「單相合成烴類 (如聚 α－烯烴 PAO)」或「合成酯類絕緣冷卻油」。這一介質切換，對浸

沒環境內運行的電機提出材料相容性與電磁熱設計挑戰：

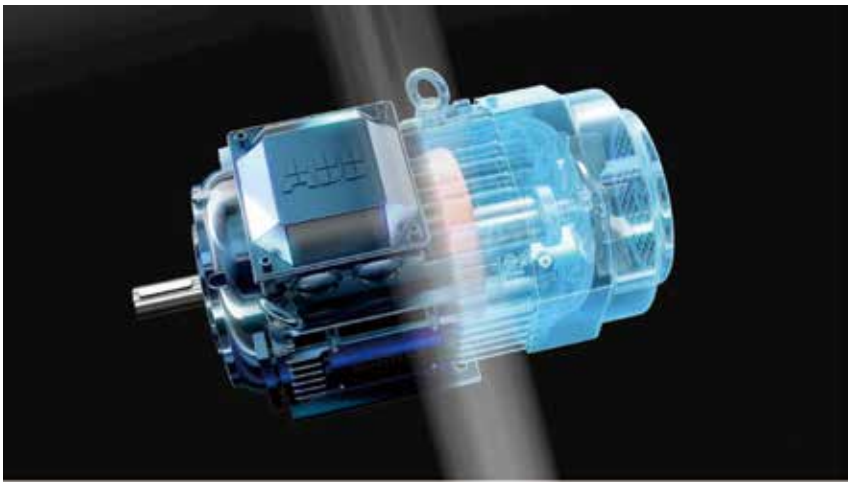
高黏度流體攪拌損耗 (Viscous Drag Loss)：單相合成烴與酯類冷卻油在常溫下的運動黏度 (通常 5 cSt ～ 20 cSt) 顯著高於傳統低黏度氟化液 (0.4 cSt ～ 2 cSt)。潛液電機轉子在油液中高速旋轉時，氣隙內的流體剪切摩擦損耗與流體黏度、角速度平方及轉子半徑四次方成正比；這要求浸沒式電機採用細長型 (小外徑、長軸向) 低阻轉子拓撲，以降低流體攪拌附加溫升。

工業自動化與高端裝備——超高速主軸與 IE5 節能改造

20,000 ～ 100,000 rpm 超高速精密主軸電機與非晶 / 奈米晶軟磁降損機制

在高精密五軸聯動數控機床 (CNC)、高階 AI 伺服器 HDI 與 IC 載板微孔鑽削設備，以及半導體 SiC 與矽晶圓減薄拋光、精密劃片機等高端裝備中，工作轉速 20,000 rpm 至 100,000 rpm (部分氣浮微鑽主軸延伸至 160,000 rpm 以上) 的超高速內置式電主軸 (Motorized Spindle) 是決定加工表面粗糙度與微米級形位公差的核心部件。在此轉速下定子繞組供電基波頻率高達 1,000 Hz 至 3,333 Hz，配合 SiC 或高頻矽基逆變器 32 kHz ～ 64 kHz 載波頻率，定子

圖說：ABB IE5 同步磁阻電機透視圖



圖片來源：ABB

鐵芯承受極其劇烈的交變磁場激勵。按 Bertotti 鐵損分離模型，千赫茲級高頻區間渦流損耗佔總鐵損 75% 以上；若沿用傳統 0.30 mm 或 0.20 mm 無取向矽鋼片，定子鐵芯將產生嚴重局部高頻發熱，熱量傳導至轉子後引發軸系微米級熱伸長，直接破壞刀尖定位精度。為攻克此瓶頸，國內外高端主軸廠商已規模化導入鐵基非晶合金 (帶材厚度僅 0.025 mm，飽和磁感應強度約 1.56 T) 與奈米晶軟磁材料 (帶材厚度 0.018 mm ～ 0.022 mm)。配合陶瓷混合角接觸球軸承油氣潤滑、靜壓氣浮軸承與軸心雙螺旋冷卻水套，昊志機電、科德數控等企業已加快晶圓磨划電主軸與高端 PCB 鑽孔主軸的替代進程。

針對高端泛半導體與精密光學裝備的特殊工況，多位資深工業自動化系統工程師與半導體設備架構師強調：「半導體前道晶圓加工與後道先進封裝設備對驅動電機提出了超低粉塵釋放、極低速度抖動 (Jitter) 與內置預測性維護 (PHM) 的三重嚴苛要求，驗收維度遠超通用工業伺服標準。」在 ISO Class 1 至 Class 3 級超潔淨環境中，電機任何微小磨損顆粒或絕緣漆揮發物都會造成晶圓表面致命缺陷，要求晶圓傳送機械手與旋轉卡盤 (Chuck) 電機必須採用非接觸式磁懸浮支承、迷宮式鐵磁流體密封或全密封不鏽鋼腔體設計，實現零微粒排放。其次，在晶圓光刻對準、光學缺陷檢測與高速引線鍵合過程中，運動平台整定時間需壓縮至毫秒級，勻速掃描速度波動率必須控制在 0.01% 以內，這對無鐵芯直線電機與直驅力矩電機的紋波抑制、奈米級光柵編碼器高階插補演算法及驅動器電流環路低延遲 (<1 us) 提出極限挑戰。再者，晶圓產線的非計劃停機損失高達每小時數萬至數十萬美

元，設備商已強制要求主軸與關鍵伺服軸具備毫秒級早期異常感知能力。

一體化集成伺服架構、IE5 同步磁阻節能改造與驅動器內置 PHM 落地

在通用工業自動化、智慧物流分揀 (AGV/AMR)、鋰電光伏整線裝備與紡織包裝機械領域，控制櫃空間緊縮與現場快速部署正推動伺服系統向「一體化集成伺服 (Integrated Servo System：伺服電機本體 + 高頻驅動器 + 23-bit/24-bit 高精度多圈絕對值編碼器深度合一)」演進。傳統分體式架構需在中央控制櫃內密集安裝數十台獨立驅動器，並為每顆電機鋪設數公尺至數十公尺的動力電纜與編碼器反饋線束，長距離 PWM 動力線更易產生高頻共模電磁干擾 (EMI) 與電纜拖鏈折斷故障。一體化伺服透過高導熱灌封製程與耐高溫車規 / 工業級功率模組，將驅動控制板直接集成於電機尾端或側面腔體，現場僅需透過一根直流母線與工業以太網通訊線 (EtherCAT、PROFINET、CANopen) 以菊花鏈拓撲串聯完成多軸組網，為整機節省 30% 至 45% 的電氣櫃體積與高達 50% 的配線人工成本。

與此同時，在佔據全球工業總用電量約 60% 的工廠通用流體機械 (離心風機、循環水泵、空氣壓縮機與中央空調冷卻塔) 存量市場中，依據 IEC 60034-30-2 定義的 IE5 超高效能等級，正引發「無永磁同步磁阻電機 (SynRM) 節能改造」浪潮。一台常規工業連續運行電機在 10 至 15 年服役期內，累計電費成本高達 95% 以上，初始採購成本僅佔 2% ～ 3%。傳統 IE2/IE3 異步感應電機 (IM) 的轉子鋁條 / 銅條依賴滑差切割磁感線產生感應電流，轉子鋁耗佔總損耗 20% ～ 30%，且在 50% 以下部分負載工況效率明顯跌落。IE5 無永磁 SynRM 則完全剔除轉子繞組與昂貴的稀土永磁體，僅靠高導磁矽鋼片衝壓的多層磁障與定子磁場同步旋轉，轉子基本無基波銅耗，溫升極低，軸承潤滑脂壽命延長一倍以上。在工廠風機水泵的變頻節能改造中，「IE5 SynRM + 專用變頻驅動器」方案較 IE3 系統降低總損耗 20% 至 40%，全負載與輕載區間綜合節電率達 8% ～ 18%；在年運行 6,000 至 8,000 小時的化工、冶金、造紙與半導體廠務水處理場景，改造成本靜態投資回收期普遍縮短至 1.2 年至 2.5 年，兼具電費節約經濟性與零稀土供應鏈風險。

此外，工業 4.0 預測性維護 (PHM) 正從早期的「外掛高價壓電加速度傳感器」轉向「伺服 / 變頻驅動器內置邊緣 PHM 與工廠製造執行系統 (MES) 直接打通」的務實落地。現代高端伺服驅動器與變頻器直接利用內置高採樣率相電流傳感器 (定子電流特徵分析法 MCSA)、直流母線電壓紋波監測與編碼器高頻位置殘差信號，在驅動器 MCU/DSP 內部實時提取軸承內外圈點蝕、齒輪箱斷齒、聯軸器不對中與定子繞組匝間絕緣老化的早期特徵頻率譜；健康度指標與剩餘使用壽命預警代碼透過 OPC UA 或 MQTT 工業物聯網協議上傳至工廠 MES 與設備管理系統 (EAM)，自動觸發備件申領與計劃性停機檢修工單。但該技術仍面臨工況泛化風險：負載劇烈隨機波動下，外部機械衝擊引起的電流諧波極易掩蓋微弱的早期軸承故障信號，導致誤報率上升；這要求驅動器廠商結合設備製程時序信號進行條件窗口濾波，方能確保預警具備高置信度。

綠色能源與極端環境裝備——直驅風電與光儲配套驅動

海上直驅 / 半直驅風電機組的去重稀土抗退磁設計與磁阻電機耐振

在以深遠海大型風力發電、荒漠集中式光伏電站與電網級新型儲能為代表的綠色能源賽道中，電機與發電機系統的設計邏輯徹底轉向「全年全工況綜合能效、-40°C 至

+85°C 寬溫域免維護高可靠性，以及大宗關鍵材料的供應鏈安全」。單機容量邁向 16 MW 至 26 MW 級別的海上直驅永磁 (DD-PMG) 與中速半直驅永磁 (MS-PMG) 發電機，單台風機消耗的燒結釹鐵硼永磁體重達數噸至十餘噸。海上風機長年處於高鹽霧高濕度環境，在滿發工況或電網突發低電壓穿越 (LVRT)、三相短路瞬間，定子繞組的巨大去磁電樞反應磁場疊加 120°C ～ 150°C 局部熱點溫升，極易引發永磁體不可逆高溫退磁，一旦在離岸數十公里海上發生退磁故障，吊裝返修成本高達數千萬元。為兼顧抗退磁能力與成本控制，金風科技、明陽智慧、東方電氣等整機龍頭已全面推進「少重稀土 (Low-HRE) 與無重稀土 (HRE-Free) 高矯頑力磁鋼」：透過晶界擴散技術 (Grain Boundary Diffusion, GBD)，僅在磁體表面塗覆微量重稀土 (鏑 Dy、鋱 Tb) 化合物並經高溫熱處理使其沿晶界向內滲透，形成富重稀土殼層而晶粒內部仍保持高剩磁的 Nd2Fe14B 相；結合雙主相合金細化晶粒製程，新一代風電專用磁鋼在維持內在矯頑力 Hcj >= 20 kOe ～ 25 kOe 前提下，將重稀土添加量削減 60% 至 100%，單噸磁材成本降低 15% ～ 25%，配合分段斜極磁極模組與定子閉口槽冷卻結構，將海上風機 25 年全生命周期內的不可逆退磁率控制在 1% 以內。

光伏跟蹤支架高自鎖低功耗減速電機與儲能

在集中式地面光伏電站中，為提升雙面組件全年發電量增益 (通常 8% ～ 15%)，平單軸與斜單軸光伏跟蹤支架 (Solar Tracker) 已成為新建電站主流配置，催生對支架專用高自鎖、低功耗一體化減速電機 (Slewing Drive & Gearmotor) 的大規模需求。單排支架迎風面積巨大，在戈壁與沿海地區極易遭遇 12 級至 14 級以上瞬時強陣風、沙塵暴與暴雪積載；若驅動機構反向剛度不足，強風誘發的氣動彈性顫振 (Aeroelastic Flutter) 將在數分鐘內扭斷支架主軸並撕裂組件。因此支架驅動總成普遍採用「24V/48V 無刷直流 (BLDC) 或永磁同步電機 + 多級精密行星減速 + 包絡蝸輪蝸桿迴轉支承」的一體化構型。由於組件每日僅需跟隨太陽軌跡緩慢旋轉約 90 度至 120 度，設計核心並非高速大功率，而是極高的靜態逆向自鎖力矩 (Holding Torque 達數千至數萬 N·m) 與極低待機功耗。當前主流一體化跟蹤電機由支架自帶的小型取電組件搭配磷酸鐵鋰備用電池供電，控制器待機靜態電流壓制在數毫安級別，單次大風緊急放平 (Stow Mode，在 2 ～ 5 分鐘內將組件快速轉至抗風安全角度) 的峰值功耗控制在 50 W ～ 150 W 以內，並全面通過 IP66/IP67 防塵防水與 -40°C 極寒油脂不凝固啓動驗證。

在與風光電站配套的電網級電化學儲能系統 (BESS) 中，單個 20 尺集裝箱儲能艙容量已從 3.44 MWh 演進至 5 MWh ～ 6.5 MWh 以上，其內置儲能變流器 (PCS) 與高密度電池包高度依賴寬電壓輸入液冷循環泵電機與防爆消防排煙風機電機維持熱安全邊界。與數據中心恆溫機房不同，戶外

圖說：Vestas 公司 V236-15.0 15 兆瓦風力發電機組



圖片來源：vestas.com

儲能艙直接暴露於高海拔極寒 (-40°C) 與沙漠酷暑 (+55°C)：在 -40°C 冷啓動瞬間，50% 乙二醇冷卻液運動黏度較常溫暴增數十倍，要求儲能液冷泵電機具備 2.5 倍以上的低速高扭矩破冰 / 高黏度推液啓動能力，且驅動器需支持 18V ～ 36V 或 36V ～ 75V 的超寬直流母線電壓波動範圍。此外，針對電池熱失控析出的氫氣 (H2)、一氧化碳 (CO) 與電解液可燃蒸汽，儲能艙的智慧排煙與消防聯動風機必須採用無電火花的高可靠外轉子 EC 無刷電機，並對定子繞組與控制 PCB 進行雙層防爆三防塗覆 (符合 ATEX 或 IECEx 認證)。當前的工程風險在於，部分儲能集成商為壓降初期 BOM 成本，混用車規乘用車水泵或普通商用空調風機替代工業長壽命液冷泵與防爆風機；乘用車水泵設計壽命通常僅 5,000 至 8,000 工作小時，遠無法匹配儲能電站 10 年至 15 年的長周期服役要求，已成為新型儲能電站後期運維的主要故障源。

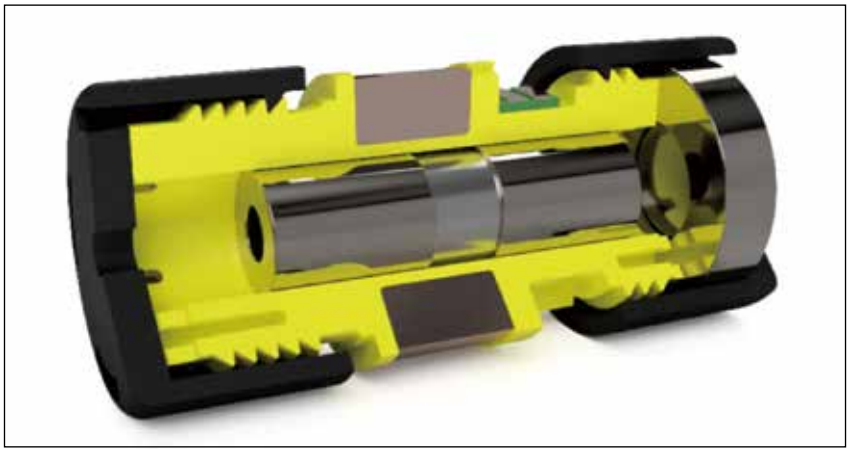
消費電子與沉浸式遊戲外設——寬頻 LMR 與多區觸覺回

無彈簧線性磁懸浮馬達 (LMR) 與多區獨立音圈馬達 (VCM) 的聲學觸覺重構

在智慧手機、次世代主機 / PC 遊戲手柄、掌上遊戲機與空間計算 (XR) 外設領域，人機交互正經歷從「視覺與聽覺單向輸出」向「高精度多維物理觸覺回饋 (HD Haptics)」的演進。早期轉子偏心馬達 (ERM) 存在啓動延遲長 (50 ～ 100 ms)、震感渾濁拖沓的缺陷；傳統線性諧振馬達 (LRA) 雖將啓停響應縮短至 10 ～ 15 ms，但依賴機械彈簧提供復位力，構成高 Q 值窄帶諧振系統 (有效頻寬僅 ±10 Hz)，無法同時還原低頻衝擊與高頻材質紋理。為突破此限制，TITAN Haptics (TITAN Echo 系列) 與瑞聲科技 (AAC Technologies) 等廠商推出新一代無彈簧線性磁懸浮馬達 (LMR)。LMR 徹底取消機械彈簧，改由對稱佈置的永磁體陣列與定子線圈產生非線性可控的磁懸浮復位力將動子懸浮於氣隙中央；消除機械彈簧的固有諧振束縛與摩擦阻尼後，LMR 實現 10 Hz 至 300 Hz 的超寬頻平坦頻率響應，階躍響應壓縮至 2 ms ～ 4 ms，既能在 15 Hz ～ 40 Hz 超低頻段模擬沉重的引擎轟鳴與胸腔共鳴感，又能無縫疊加 200 Hz 以上的清脆機械開關點擊感，且在數千萬次至上億次全振幅循環測試中實現「零機械疲勞衰減」。

除單顆馬達的寬頻化外，高端遊戲手柄與沉浸式外設正全面導入「多區獨立音圈馬達 (Voice Coil Motor, VCM) 協同陣列」架構。以飛智科技 (Flydigi) X-Haptics 全向微動與多區力回饋系統為典型代表，其摒棄傳統手柄「左大右小兩顆 ERM 偏心轉子馬達」的粗放佈局，在左右扳機鍵 (Triggers) 與左右握把 (Grips) 內部配置 4 顆獨立控制的寬頻 VCM 或複合力回饋執行器。音圈馬達基於洛倫茲力定律驅動動子或配合精密齒輪扇區運動，輸出力與電流高度線性正比且無齒槽效應。遊戲交互中，扳機處獨立馬達結合霍爾線性傳感器實時計算手指

圖說 :LMR 觸覺致動器是一種寬頻音圈觸覺馬達，它採用固態磁浮結構，而非彈簧或撓性元件。這項專利技術提供了同類領先的頻率響應、可靠性和觸覺輸出強度



圖片來源：titanhaptics.com

跨六大垂直應用賽道電機核心指標與技術主線

表 : 六大垂直應用電機核心關鍵績效指標與技術主線

1. 新能源電動汽車 (乘用車主驅 / 商用車電驅橋)	乘用車：扁線油冷 IPMSM、少稀土 PMaSynRM；商用車 / 超跑：軸向磁通 AFPM	峰值轉速 20,000–25,000 rpm；扁線滲透率 >80%；油冷定子配套率 >41.2%；功率密度 3.5–4.5kW/L；AFPM 樣機峰值 40–59kW/kg	8/10 層超薄扁線 +0.20 mm 低損矽鋼；空心軸直噴 ATF 油冷；重卡電驅橋減重 200–300 kg	PMaSynRM 低速 大扭矩轉矩脈動與 2–5 kHz 電磁嘯叫；軸向磁通乘用車連續額定散熱受限與雙氣隙良率	PMaSynRM 低速轉矩脈動與 2–5 kHz 電磁嘯叫；軸向磁通乘用車散熱受限與雙氣隙良率
2. 具身智慧機器人 (人形 / 四足 / 協作機器人)	大關節：第四代中空無框力矩 +QDD 行星模組；腕部：無框電機、微型軸向磁通；靈巧手：無刷空心杯	無框中空內徑 85mm 級；扭矩密度較前代 ~+30%(QDD >1.5 倍)；扭矩脈動 <1.0%；空心杯時間常數 2–5 ms	分數槽集中繞組 + 成型高槽滿率線圈 +Halbach 磁環；高電機常數 K_m 壓制堵轉溫升；8–16 mm 無鐵芯斜繞	微型軸向磁通受制於 SMC 製程與公差，預計 2027–2028 年方能放量；空心杯持續抓握堵轉的局部散熱與壽命一致性	微型軸向磁通受制於 SMC 製程與公差，2027–2028 年方放量；空心杯抓握堵轉散熱與壽命一致性
3. AI 數據中心液冷 (CDU 循環泵 / 機櫃散熱風機)	液冷二次側：全封閉永磁屏蔽泵 (Canned Motor)、磁力耦合無軸封；風冷：48V 外轉子高靜壓 EC 風機	機櫃功率 60–130+kW；MTBF 70,000–100,000 小時；EC 風機靜壓 800–1,500 Pa；變頻節電 35%–50%	316L/ 哈氏合金薄壁焊接屏蔽套 (0.3–0.5 mm) + SiC 陶瓷自潤滑軸承；因應 PFAS 限令採 PEEK/Kapton/ETFE 絕緣	金屬屏蔽套氣隙渦流損耗與換熱效率平衡；高黏度冷卻油引發轉子流體攪拌損耗與高分子溶脹風險	屏蔽套氣隙渦流損耗與換熱平衡；高黏度冷卻油致轉子攪拌損耗與高分子溶脹
4. 工業自動化與高端裝備 (超高速主軸 / 一體化伺服 / 廠務泵閥)	精密加工：20,000–100,000+ rpm 超高速主軸、無鐵芯直線電機；自動化：一體化集成伺服；廠務：IE5 無永磁 SynRM	主軸基波 1,000–3,333 Hz；非晶 / 奈米晶降鐵損 60%–75%；設備速度抖動 <0.01%；IE5 節電 ROI 1.2–2.5 年	0.018–0.025 mm 非晶 / 奈米晶定子鐵芯抑制高頻渦流與熱伸長；驅動 +23/24-bit 編碼器一體化封裝，省 30%–45% 機櫃空化間	超薄非晶 / 奈米晶高硬度脆性帶來的精密衝剪與疊壓難度；內置 MCSA 診斷在隨機強衝擊負載下的誤濾波泛報能力	超薄非晶 / 奈米晶脆性材料衝剪與疊壓難度；內置 MCSA 在強衝擊負載下的誤報濾波泛化
5. 綠色能源與極端環境 (海上風電 / 光伏跟蹤 / 儲能 PCS)	風電：16–26 MW 海上直驅 / 半直驅永磁發電機；光伏：SRM 水泵、高自鎖跟蹤減速電機；儲能：寬電壓防爆 EC 風機與液冷泵	戶外壽命 10–25 年免維護；-40°C 至 +85°C；風電機鋼重稀土削減 60%–100%；跟蹤支架抗 14 級陣風	GBD 少 / 無重稀土高矯頑力磁鋼 (H_cj ≥ 20–25 kOe)；蝸輪蝸桿 / 行星複合自鎖 + IP67/C5 防腐；消防風機 ATEX/IECEx 三防	儲能系統降本混用短壽命車規水泵 (5,000–8,000h)，無法匹配 10–15 年 (>60,000h) 服役週期致後期漏液停機；極寒 -40°C 高黏度冷卻液啓動堵轉防護	儲能降本混用短壽命車規水泵 (5,000–8,000h)，無法匹配 10–15 年 (>60,000h) 週期；極寒高黏度冷卻液啓動堵轉
6. 消費電子與遊戲外設 (觸覺手柄 / VR 手套 / 模擬賽車)	寬頻觸覺：無彈簧 LMR(TITAN Echo)；多維力控：多區獨立 VCM(飛智 X-Haptics 4 馬達)；模擬器：直驅力回饋基座	LMR 頻寬 10–300+ Hz；階躍 <2–4 ms；直驅方向盤扭矩 5–32 N·m(脈動 <1%)；彈簧疲勞衰減 0%	磁懸浮復位力取代 LRA 單頻彈片；扳機霍爾位移 + VCM 動態改變阻尼剛度 (dF/dx)；高極對數斜極無刷 1:1 直連	觸覺素材標準化滯後 (多數遊戲仍僅輸出傳統雙通道簡單幅值信號)；單純依賴音頻轉震動演算法易受背景音樂與語音干擾誤觸發	觸覺素材標準化滯後 (多數遊戲僅輸出雙通道幅值信號)；音頻轉震動演算法易受背景音樂干擾誤觸發
6. 消費電子與遊戲外設 (觸覺手柄 / VR 手套 / 模擬賽車)	●寬頻觸覺：無彈簧線性磁懸浮馬達 (LMR，如 TITAN Echo) ●多維力控：多區獨立音圈馬達 (VCM，如飛智 X-Haptics 4 馬達) ●模擬器：高扭矩無刷直驅方向盤基座	● LMR 有效頻寬：10–300+ Hz ●階躍響應延遲：<2–4 ms ●直驅方向盤扭矩：5–32 N·m (零機械間隙，脈動 <1%) ●機械彈簧疲勞衰減：0% (磁懸浮)	●磁懸浮復位力 (Magnetic Spring) 徹底取代傳統 LRA 易疲勞的單頻機械金屬彈片 ●扳機霍爾位移傳感 + 獨立 VCM 實時動態改變阻尼剛度 (dF/dx) ●高極對數斜極無刷力矩電機 1:1 直連快拆軸	寬頻平坦頻率響應與波形保真度 > 毫秒級超低啓停延遲 > 多通道獨立空間部位協同渲染	●遊戲與影視內容側觸覺素材標準化嚴重滯後 (多數遊戲仍僅輸出傳統雙通道簡單幅值信號) ●單純依賴音頻轉震動 (Audio-to-Haptics) 演算法易受背景音樂與語音干擾產生誤觸發

按壓行程，動態調節線圈電流改變等效剛度 (dF / dx)，精準模擬賽車油門踏板阻尼變化、ABS 防抱死剎車的高頻彈腳震動，或射擊遊戲不同槍械扳機的二段式擊發段落感；握把處兩顆寬頻 VCM/ 線性馬達則獨立渲染角色左右腳踏過碎石、泥濘或金屬甲板時的非對稱地形震動，透過 4 通道獨立音頻級 DAC 驅動晶片實現多維複雜波形的毫秒級相位疊加。

VR 觸覺手套微型執行器、直驅力回饋模擬賽車方向盤與內容生態瓶頸

在更高維度的空間計算 (VR/MR) 與專業模擬訓練領域，觸覺與力回饋電機呈現「極致微型化」與「大扭矩零間隙直驅化」的兩極分化。在 VR 觸覺手套與指端穿戴設備中，單根手指可承受的附加配重上限極為嚴苛 (單指執行器重量低於 8 g ～ 12 g)，工程界主要採用微型音圈馬達 (Micro-VCM)、多層壓電陶瓷執行器與微型空心杯絲槓腱繩機構的分工組合：微型 VCM 與壓電片貼合指腹，利用 100 Hz ～ 300 Hz 高頻微幅位移刺激皮膚的帕西尼氏小體，模擬虛擬物體的表面粗糙度與滑動摩擦；手背的微型無刷 / 空心杯電機則透過拉緊高分子腱繩或微流體氣囊，在用戶彎曲手指抓握虛擬物體時提供最高 10 N ～ 20 N 的反向運動阻滯力。在桌面與專業級模擬賽車 (Sim-Racing) 及飛行模擬器領域，高扭矩無刷直驅力回饋方向盤基座 (Direct-Drive Force Feedback Wheelbase) 已徹底完成對傳統皮帶傳動與斜齒輪減速方向盤的結構性替代：傳動鏈固有的齒隙 (Backlash)、皮帶彈性形變與摩擦死區會濾除賽車物理引擎輸出的高頻路感細節。新一代直驅基座 (代表廠商 Fanatec、魔爪 Moza Racing、Simucube、速魔 Simagic 等) 直接將方向盤快拆軸與一顆高極對數、斜極 / 分數槽集中繞組的無刷永磁同步力矩電機 (峰值扭矩覆蓋 5 N·m、9 N·m、12 N·m 直至專業級 20 N·m ～ 32 N·m) 同軸剛性直連，並配備 21-bit 至 24-bit 高分辨率絕對值編碼器。零減速比 (1:1 直驅) 架構下電機消除所有中間傳動間隙，配合 20 kHz ～ 40 kHz 的 FOC 電流環路與轉矩脈動前饋補償，將整機齒槽轉矩脈動壓制在 1% 以下，扭矩爬升率 (dT/dt) 高達 5 N·m/ms ～ 10 N·m/ms 以上，使物理引擎計算出的前輪抓地力極限流失、路肩鋸齒高頻衝擊與方向盤自動回正阻尼能以零延遲、零失真的純電磁力矩形式直接傳遞至車手雙手。

儘管底層執行器硬體 (寬頻 LMR、多區 VCM 與高扭矩直驅電機) 在物理頻寬與動態響應上已取得長足進步，但遊戲引擎開發者指出：當前沉浸式觸覺外設產業面臨的最大掣肘並非馬達硬體性能不足，而是遊戲與影視內容『觸覺素材標準化與原生開發工具鏈』的生態滯後。目前市面上超過 85% 的跨平台 PC 與主機遊戲，其物理引擎輸出的觸覺指令仍停留在二十年前為雙轉子偏心馬達 (ERM) 設計的「雙通道簡單幅值控制協議」，完全不包含頻率、相位、包絡波形與空間多聲道座標信息。為彌補原生內容缺失，許多外設廠商不得不依賴驅動軟體端的「實時音頻轉震動 (Audio-to-Haptics) 演算法」，截取遊戲背景音頻中的低頻鼓點或爆炸聲波轉化為馬達驅動信號；然而此種妥協方案極易受背景音樂 (BGM) 或隊友語音干擾而產生雜亂誤震，無法體現寬頻 LMR 與 4 區 VCM 的硬體潛力。未來三至五年，觸覺外設高附加值潛力的釋放，仍有賴於 OpenXR Haptics 標準、Android 動態觸覺 API，以及面向 Unreal Engine 與 Unity 的多軌觸覺設計中間件建立統一的跨硬體波形編碼格式，實現從「硬體單兵突進」向「軟硬協同標準化生態」的跨越。 CTA