

超算時代：半導體熱控技術演進、全球格局與未來趨勢

編輯部整理

散熱不再僅僅是伺服器與資料中心的輔助配套，而是決定算力晶片穩定運行、系統全生命週期 TCO、基礎設施能效上限的核心環節。熱管理的邊界，正從機房空調一步步向機架、封裝介面，最終向矽晶片內部持續收縮；與此同時，雲端智算成熟的熱控技術開始向外溢出，滲透至高階 PC、工作站、智慧汽車、人形機器人等

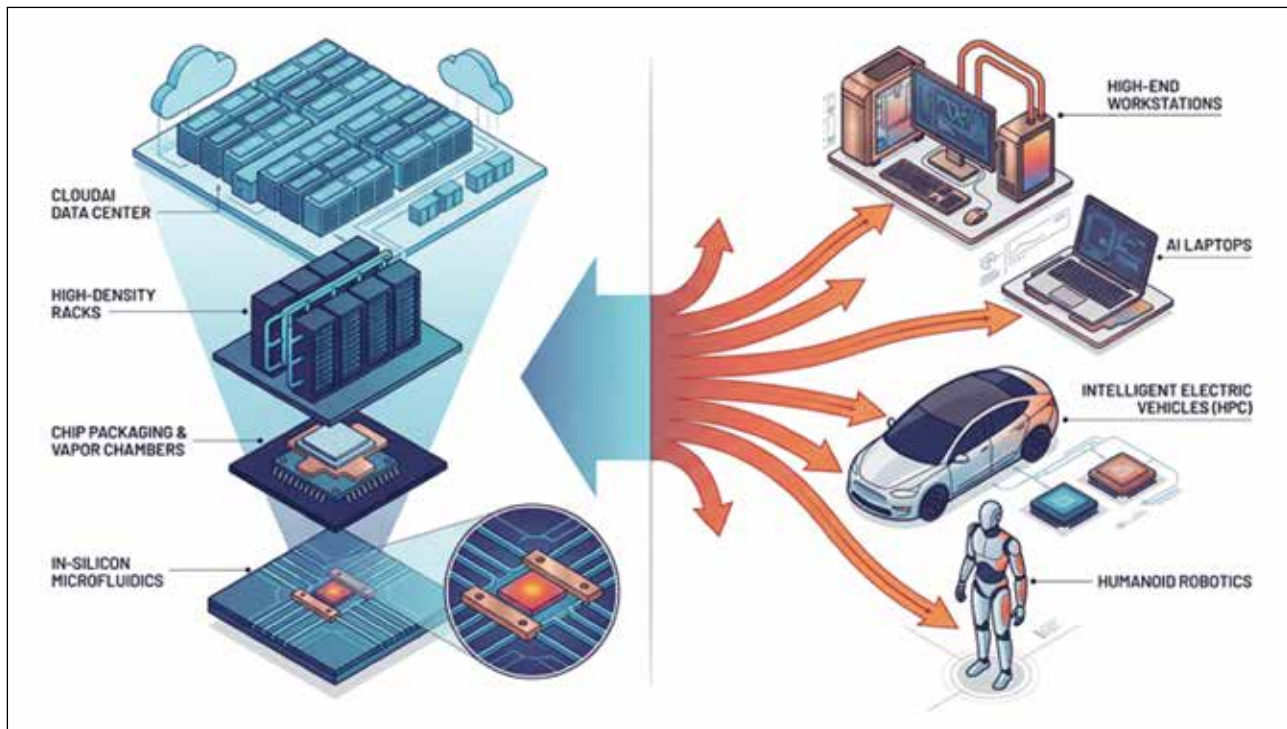
端側高密算力場景，形成完整的跨產業技術遷移路線。

熱控技術演進

在半導體製程逼近埃米 (angstrom) 尺度與人工智慧分散式訓練叢集規模呈幾何級數擴張的雙重推動下，散熱系統的工程角色已經完成根本性的定位重塑。回顧資料中心熱管理的技術演進歷程，散熱物理

邊界的空間幾何收縮展現出一條清晰且不可逆的物理收斂曲線：傳熱路徑的控制核心正從傳統的「機房外圍環境調控」，逐步向「機架與伺服器機箱內部」、「晶片封裝近端 (TIM/Heat Spreader)」，最終無可避免地向「矽片內部微通道」進行物理維度的極限收縮。這一演進過程並非單純的工程製程改良，而是受控於熱力學第

圖說：熱控技術外溢至高階 PC、工作站、智慧汽車、人形機器人等端側高密算力場景 (AI 製作)



一定律與傅立葉導熱定律的物理必然結果。

在傳統通用運算時代，伺服器單晶片熱設計功耗 (TDP) 普遍處於 150W 至 300W 之間，單機櫃功率密度極少超過 10kW。在該功率區間內，空氣作為冷卻介質展現出足夠的工程適用性。機房依賴大型電腦機房空調與高架地板建立宏觀的冷熱通道隔離區，透過大風量強制對流，將熱量自機箱表面與粗糙的鋁擠散熱鰭片帶走。然而，空氣的物理特性先天存在著低密度與低體積比熱容 (常壓下乾空氣體積比熱容僅約 1.2 kJ/(m³ * K)) 的硬性限制。根據對流傳熱公式 $Q = h * A * \Delta T$ ，在受限的 19 吋標準機櫃內部，擴展表面積 A 的空間極其有限，而空氣的對流傳熱係數 h 通常難以突破 100 W/(m² * K)。當單晶片功耗跨越 700W、單機櫃熱負荷突破 30kW 後，依賴空氣流動的宏觀散熱範式遭遇了嚴重的風阻阻力、巨額風扇能耗以及高達 100 分貝以上的氣動噪聲極限，迫使熱管理介面必須向熱源近端發生第一次大規模躍遷。

熱管理介面的第一次收縮催生了列間空調 (In-Row)、後門熱交換器 (RDHx) 以及冷板式直接晶片液冷 (Direct-to-Chip, D2C) 技術的普及。冷板式液冷的核心工程邏輯，是利用水或乙二醇水溶液高達空氣數千倍的體積比熱容，將換熱介面

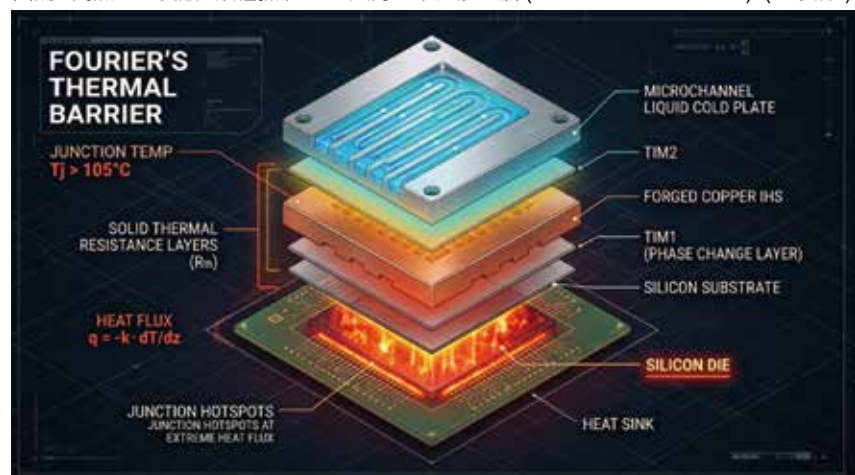
直接推進至距離發熱矽晶圓僅數公釐的金屬冷板底板。在此階段，散熱鏈路的瓶頸迅速轉移至晶片封裝級的介面接觸熱阻。為解決大尺寸異質整合封裝 (如台積電 CoWoS 架構) 因晶圓翹曲而造成的介面空隙問題，健策電子 (Jentech) 等廠商推動了高階鍛造均熱片 (Forged Heat Spreader) 與超薄均溫板 (Vapor Chamber) 的精密微結構設計，在極致機械鎖緊壓力下確保介面材料厚度 (Bond Line Thickness, BLT) 的微米級均勻性。與此同時，高柏科技 (T-Global) 等材料供應商透過導入高填充陶瓷粉體技術，開發出熱導率達 10 至 18 W/m*K 的 TG-A 系列高導熱墊片與超低熱阻相變材料 (PCM)，有效克服了交變冷熱衝擊下的介面泵出效應 (Pump-out)，使得發熱源至冷卻流體之間的傳熱溫差被壓縮至可控範圍。

然而，當單顆旗艦加速晶片 (如 NVIDIA Blackwell 世

代及預研架構) 的 TDP 突破 1,000W 至 1,500W，且運算核心局部熱點 (Hotspots) 的熱流密度超過 500 W/cm² 甚至逼近 1,000 W/cm² 時，傳統的冷板外置散熱範式再次遭遇了固體熱傳導的物理極限之牆。由傅立葉導熱定律 $q = -k * (dT/dx)$ 推導可知，即使外部冷板的對流傳熱係數 h 藉由微通道流體動態優化提升至數萬 W/(m² * K)，使得外部熱阻趨近於零，熱量從主動電晶體層傳導至冷板表面依然必須穿越數百微米的矽襯底、第一層導熱介面材料 (TIM1)、銅質均熱片以及第二層導熱介面材料 (TIM2)。在超過 500 W/cm² 的極端熱流密度下，僅固體材料本體熱阻與多層介面接觸熱阻所引發的溫度梯度降 (ΔT)，足以使晶片結溫 (Junction Temperature) 突破 105 °C 的物理耐受極限。

這種微觀熱流密度的物理約束，決定了散熱邊界向「矽片內部微通道 (In-Silicon

圖說：高熱流密度晶片微觀熱阻堆疊與傅立葉極限之牆 (Fourier's Thermal Wall) (AI 製作)



Microfluidic Cooling)」進行終極收縮的物理必然性。產業界與學術界的前沿技術驗證表明，未來的極限熱控方案將不再是在封裝完成後附加冷卻設備，而是透過半導體製程在晶圓背面或矽仲介層 (Silicon Interposer) 內部，直接利用深反應離子蝕刻 (DRIE) 刻蝕出深寬比極高、水力直徑在數十微米級別的微流道陣列。冷卻介質在矽片內部直接流動，將熱交換介面推進至發熱電晶體的主動層表面 (距離僅數微米)，徹底消除 TIM1、金屬均熱片以及 TIM2 等所有外部固體封裝熱阻層。這標誌著熱管理已從傳統的「機械電氣外掛輔助系統」，徹底進化為與電晶體架構、供電網格 (如背面供電網格 BSPDN 與垂直供電 VPD) 同等地位的「晶圓級原生架構第一物理約束」。

綜上所述，熱控技術的整體演進並非孤立部件的材料升級，而是整個散熱架構從宏觀環境向微觀矽原子尺度的立體收縮過程。從機房空調的宏觀對流，到機櫃管網的分流控制，再到冷板介面的微觀潤濕，最終收斂於矽片內部的微流體動力學。這種多尺度、立體交織的熱管理網絡，與 800V 高壓直流供電架構及第三代寬能隙功率半導體形成了深度的電熱共生效應，共同構成了超高密算力叢集得以持續擴展的物理基石。

GPU、伺服器、PC 與熱管理市場

全球人工智慧大模型參數量級的指數級膨脹與多模態推理應用的深度滲透，正在對底層計算硬體基礎設施產生強烈的拉動效應。在硬體算力端，以 NVIDIA Blackwell (如 GB200 NVL72、NVL36 機櫃系統) 為代表的旗艦加速叢集已進入大規模量產與實質部署階段，而預研中的 Rubin 平臺亦確立了更為激進的功率標準；與此同時，AMD Instinct MI325X、MI350 及次世代 MI400 系列加速晶片正加速推向市場，配合 Google TPU v6/v7、AWS Trainium2/3 以及 Meta MTIA 等大型雲端服務商 (CSP) 自研專用 ASIC 晶片的出貨放量，全球高密加速硬體的部署節奏顯著加快。硬體功耗的非線性爬升直接打破了傳統資料中心的機櫃供電與散熱規格，推動單機櫃功率密度主流區間從常規的 15kW 至 30kW，直接躍升至 100kW 至 140kW，部分旗艦訓練叢集運算甚至正在規劃 200kW 至 300kW 的極限機架。

這種算力硬體功耗密度的躍遷，對全球散熱產業鏈的價值結構產生了深遠的重構。Gartner 基礎設施與營運研究副總裁在科技趨勢峰會上的預測精闢指出了這一市場轉折點：

「液冷不再是超算中心的選配技術，而是新建 AI 訓練叢集

運算的強制准入門檻。全球散熱設備市場正在經歷由風冷冷水機組向高精度 CDU、冷板以及晶片級熱介面材料的價值鏈大遷移。」過去依賴中央冷凍機組、大型風管與精密空調的單一硬體採購格局正在瓦解，市場資金正集中轉向以冷量分配單元 (CDU)、二次側分流管網 (Manifold)、無滴漏盲插快速接頭 (QD)、晶片級微通道冷板 (MCL) 以及高效介面導熱材料為核心的液冷零組件生態。

IDC 全球 AI 基礎設施資深調研總監在市場分析報告中進一步指出：「伴隨每櫃 100kW 以上的高密智算中心密集動工，冷板液冷在未來三年將以超 35% 的年複合增長率擴張；同時，這股熱控技術標準正在快速下沉至邊緣工作站與高階 PC，推動先進導熱材料 (如相變片、高熱導墊片) 市場容量倍增。」根據 TrendForce 與 Yole Group 等機構的數據交叉驗證顯示，全球 AI 伺服器出貨量在 2025 至 2030 年間將維持高速擴張態勢，其中適用於超高密液冷機架的伺服器節點佔比將呈現爆發式提升。在 AI 智算中心這一核心增量市場中，液冷技術的整體滲透率預計將從傳統資料中心的不足 15%，迅速跨越至 70% 甚至 75% 以上，冷板式液冷憑藉其對現有伺服器架構的高相容性與相對可控的工程實施難度，佔據了整個液冷市場份額的 80% 以上。

在資料中心伺服器熱管理需求激增的同時，高熱流密度技術的溢出效應正在向高性能個人電腦與邊緣算力工作站市場深度擴散。在消費級與專業工作站領域，隨著 GPU (如單卡功耗達 450W 至 600W 的頂級顯示卡) 與高核心數 CPU 的運算功耗持續攀升，傳統的多熱管大型風冷散熱器在機箱物理空間、承重限制及噪聲抑制上面臨邊界。這推動了一體式水冷 (All-In-One, AIO) 散熱系統逐漸成為高階 PC 的標準配置，部分多卡深度學習工作站更廣泛轉向分體式定製水冷架構。

更為關鍵的是，原先專為工業級與伺服器級高密散熱開發的先進材料體系，正在大規模向高階 DIY 市場與邊緣專業工作站外溢。例如，健策電子在高階封裝均熱片領域累積的超高平整度精密沖壓與微流道鍛造技術，正被應用於消費級旗艦散熱模組的均溫底座中；高柏科技的 TG-A 系列 10 至

18 W/m²K 超高導熱矽膠墊片、工業級相變導熱片 (PCM) 以及微米級金屬燒結材料，亦逐步取代傳統矽脂，成為解決高階顯示卡視訊記憶體 (VRAM) 與供電模組 (VRM) 高溫降頻問題的核心方案。這種技術外溢不僅有效解決了邊緣高密硬體的散熱疲勞與長期運行泵出失效風險，更進一步放大了高階導熱材料的全球市場總量，形成了從雲端智算巨型資料中心到邊緣端高性能工作站協同發展的廣闊熱管理產業版圖。

綜合 TrendForce 與 IDC 產業調研基準顯示，2025 年冷板主導浸沒式處於小規模試點，2026 年 Blackwel 批量裝機，液冷跨過近半門檻；2027 年新建大模型訓練中心將全面標配冷板液冷，到 2028 年次世代平臺推動溫水冷成為絕大多數標準，而到 2030 年風冷基本退守邊緣機房與低功耗儲存節點。

綜合全球硬體出貨、資料中心架構轉型以及材料技術外

溢的綜合趨勢，熱管理產業鏈已徹底擺脫過去附屬、低附加價值的被動冷卻地位。在單櫃功率跨入百千瓦級別的全新時代，液冷與高階導熱介面材料已成為與高階算力晶片、高速光互連網絡並駕齊驅的戰略性核心硬體賽道，其市場規模的持續擴張與技術反覆運算速度將直接決定全球數位基礎設施的能效極限與算力落地節奏。

高密端側算力與熱管理的融合延伸

隨著具身智慧 (Embodied AI) 與高階智慧駕駛架構的加速演進，原本專屬於超大型雲端資料中心的超高密算力與極限熱管理技術，正呈現出顯著的「下沉與跨界外溢」特徵。在端側 (Edge Computing Power) 物理空間、載荷重量及供電能力受到嚴苛物理邊界限制的工況下，端側算力晶片的熱流密度與瞬態功率突波，已逼近甚至在局部維度超越了傳統伺服

表：2025—2030 全球 AI 伺服器出貨量、機架功率密度分佈與散熱市場規模預測表
(數據綜合參考 Gartner、IDC、TrendForce 與 Yole Group 官方預測模型)

年份與關鍵評估	2025 年	2026 年	2027 年 (預測)	2028 年 (預測)	2029 年 (預測)	2030 年 (預測)	複合年增長率 (CAGR)
全球 AI 伺服器出貨量 (萬台)	165.2	228.5	305.0	392.0	485.0	580.0	約 28.5%
單櫃功率 >100kW 機架滲透率	12.0%	26.5%	42.0%	58.0%	68.0%	76.0%	顯著上升趨勢
全球資料中心散熱總市場 (億美元)	125.4	162.8	210.5	268.0	335.0	412.0	約 26.9%
液冷整體市場規模 (億美元)	35.8	58.2	89.5	132.0	188.0	258.0	約 48.4%
冷板式液冷市場規模 (億美元)	30.5	49.8	75.2	109.5	152.0	204.0	約 46.2%
浸沒式液冷市場規模 (億美元)	5.3	8.4	14.3	22.5	36.0	54.0	約 59.1%
AI 智算中心液冷滲透率 (%)	28.5%	48.0%	65.0%	74.0%	79.0%	83.0%	高速替代風冷

器的水準。這種極端工程環境倒逼產業界將雲端資料中心驗證成熟的微觀封裝導熱材料、高頻寬能隙半導體以及微通道液冷技術，深度移植並重構於人形機器人與車載中央運算單元 (HPC) 之中。

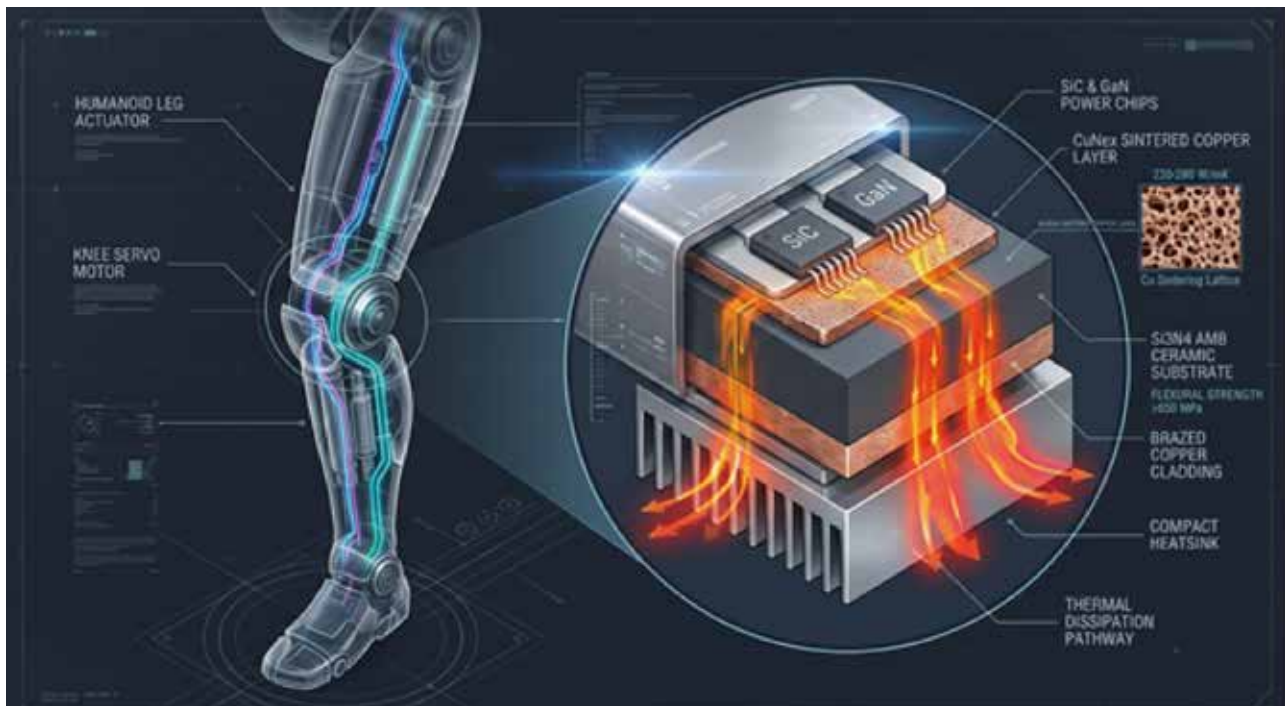
在人形機器人領域，主腦運算單元與關節伺服驅動器構成了兩大截然不同但熱物理挑戰極致的散熱場景。在機器人頭部或狹窄軀幹內部，主腦晶片(如具備2000 TFLOPS算力、基於先進架構的 NVIDIA DRIVE Thor 級別系統級晶片)必須在毫秒級週期內並行處理多模態視覺、雷達點雲融合、語言大模型推理與全身動力學運動規劃。在執行複雜動作或遭遇突發擾動時，主腦晶片的瞬態功耗會瞬間衝破千瓦級門檻，其

核心熱點的瞬態熱流密度急劇攀升至 300 W/cm^2 以上。然而，人形機器人軀幹空間極度緊湊，且具備 IP65 或 IP67 級別的嚴格防塵防水密封要求，傳統依賴大風量風扇對流的散熱路徑在物理上完全失效。工程實踐中，主腦單元普遍採用微型超薄均溫板 (Vapor Chamber, VC) 緊貼矽片，配合高柏科技等供應商提供的 TG-A 系列高導熱墊片或超低熱阻相變材料 (PCM)，將晶片瞬態熱突波透過潛熱吸收與面內極速均熱，迅速擴散至機器人的輕量化金屬骨架(如鎂鋁合金或鈦合金軀幹)進行結構散熱，實現無風扇環境下的穩態熱平衡。

相較於主腦的均熱需求，人形機器人關節旋轉執行器與線性推桿內部的空間限制則更

為嚴苛。關節內部的高度集成伺服驅動器必須在高壓、大電流下頻繁執行急加速、急停與大扭矩堵轉，逆變器 (Inverter) 中的功率開關管在數立方公分的極小空間內承受著數十安培的連續衝擊電流與高頻開關損耗。傳統基於氧化鋁 (Al_2O_3) 的覆銅陶瓷板 (DCB) 在長期高溫與交變機械震動衝擊下，極易因熱膨脹係數失配產生微裂紋並分層失效。為此，業界全面導入了氮化矽 (Si_3N_4) 活性金屬焊接 (AMB) 陶瓷基板。氮化矽 AMB 基板兼具大於 650 MPa 的超高抗彎強度與 90 W/mK 以上的高本體熱導率，其卓越的斷裂韌性可確保在數十萬次極限熱循環與強烈關節衝擊下不發生熱震破壞。在此基礎上，原先應用於高階伺服器

圖說：人形機器人關節執行器：氮化矽 AMB 基板與微米銅燒結封裝電熱架構 (AI 製作)



晶片封裝的抗氧化微米銅燒結技術 (如賀利氏 PE360 方案與 CuNex 方案) 被成功移植至關節模組鍵合製程中。微米銅燒結所形成的純銅連接層具備 220 至 280 W/mK 的高熱導率，不僅將介面接觸熱阻壓低 40%，徹底消除了傳統錫鉛錒料的熱疲勞蠕變問題，更相較於貴金屬銀燒結實現了 80% 的材料級成本節省，成為支撐人形機器人關節高頻大扭矩運行的關鍵底層材料。

在智慧汽車領域，電子電氣架構 (EEA) 由分散式 ECU 向中央運算單元 (Cockpit-Driving HPC) 的集中化演進，促成了艙駕一體運算架構的成型。車載中央運算平臺的功耗普遍由過往的數十瓦飆升至 500W 至 1,200W 區間。與常溫機房不同，車載硬體必須在引擎艙或座艙底板等環境溫度高達 65 至 85 攝氏度的極端工况下長期運

行，傳熱溫差被大幅壓縮。為應對這一挑戰，車載 HPC 廣泛借鑑了資料中心伺服器的冷板液冷經驗，並創新性地演進出雙面水冷 (Dual-Sided Cooling) 架構。雙面水冷技術透過在多晶片模組的頂部與 PCB 背部同時佈設高精度微流道冷板，配合整車熱管理系統的乙二醇冷卻液循環，使晶片上下兩側同時建立超短距離導熱路徑，將整體熱阻大幅降低 30% 以上。

此外，針對車輛在急加速、劇烈超車或連續極限避障時引發的瞬態運算負載暴增，板級相變材料 (PCM) 與超薄熱管陣列被深度嵌入車載主機板內部。板級相變材料在常溫下維持固態，當晶片在短時間內因超頻運算產生高於標稱 TDP 的熱量時，PCM 迅速發生相變吸收大量潛熱，有效抑制晶片表面溫度的瞬態陡升，避免了運算平臺因結溫觸碰上限而觸發保護

性降頻 (Thermal Throttling)。這種車載雙面液冷與微觀相變材料的協同設計，充分印證了資料中心高密熱控技術在極端移動終端場景中的成功演繹與跨界反哺。

未來技術主線與產業鏈核心

回顧半導體散熱與數位能源架構的長期演進趨勢，當前以宏觀冷板和板級導熱材料為核心的技術體系，將在未來三至五年內迎來多條前沿技術主線的縱深突破。熱管理不再僅是硬體層面的被動保溫與排熱，而是演進為高度數位化、電氣化與晶圓級微觀工程深度交織的複合體系。

第一條技術主線是晶圓級微流道冷卻 (In-Silicon Microfluidic Cooling / On-Chip Cooling) 向商業量產的推進。隨著多層 3D 晶片堆疊 (如 3D

表：高密度側算力 (人形機器人、車載 HPC) 散熱方案與伺服器技術對比

關鍵評估	AI 智算中心伺服器機架	人形機器人主腦與關節伺服	車載中央運算單元 (Cockpit-Driving HPC)
典型運算單元功耗	單晶片 1,000W~1,500W；單櫃 100kW+	主腦 300W~1,000W 瞬態；關節百瓦級	中央平臺 500W~1,200W 穩態與峰值
散熱物理空間與環境	標準 19 英吋機架，管路空間相對充足	極度受限，嚴苛防塵防水 (IP65/67)，無風扇	狹窄車載機箱，受限於車內冷卻液迴路
核心散熱技術路徑	微通道冷板 (MCL) 溫水冷、單相 / 雙相浸沒	微型 VC 均溫板、軀幹金屬骨架均熱、相變片	雙面水冷 (DSC)、微通道冷板整合整車水冷
功率模組封裝製程	常規 PCB 厚銅、熱過孔、部分銅燒結	氮化矽 (Si3N4) AMB 陶瓷基板、微米銅燒結	雙面散熱模組 (DSC)、高可靠性車規級燒結
瞬態熱衝擊對策	軟體定義電源 (SDP) 動態調相、CDU 變頻泵	板級 / 晶片級 PCM 潛熱吸收、微結構均熱板	板級相變儲熱、整車散熱系統冷量瞬態協同
環境溫度與震動要求	機房受控 (20~45 攝氏度)，低震動環境	環境溫度多變，高頻強烈機械衝擊與交變震動	引擎艙 / 座艙高溫 (-40~85 攝氏度)，強車載震動

SoIC 與高堆疊 HBM) 的普及，發熱源被深埋於封裝內部，任何外置散熱沉都無法穿越多層矽片的熱阻之牆。引用 IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems 關於晶圓內部微通道刻蝕熱阻的學術結論指出：透過在晶圓背面或矽仲介層 (Interposer) 直接利用深反應離子蝕刻 (DRIE) 製造水力直徑在 50 微米以下的微流道陣列，並直接通入冷卻流體，能將主動層電晶體至散熱介質的傳熱熱阻降低 60% 以上，並成功解鎖超過 1,000 W/cm² 的極限熱流密度。這項技術徹底消除了傳統 TIM1、銅均熱片與 TIM2 的介面接觸熱阻，代表著散熱介面向微觀原子尺度收縮的終極形態。

第二條技術主線是基於 AI 數位孿生的微秒級「算－熱－電」動態閉環調度。傳統資料中心的供電調節、伺服器排程與冷卻泵浦控制屬於相互割裂的控制迴路，響應延遲在秒級甚至分鐘級，無法應對大模型訓練中因矩陣計算突波引發的瞬態電壓驟降與局部熱點。未來的超高密智算平臺將透過部署於晶片內部的微型高精度溫度與電流感測網格，結合機房數位元元孿生模型，實現微秒級的協同調度。當大模型排程演算法預測到龐大的計算浪湧即將注入時，系統將毫秒級提升供電相位、微調自適應電壓

(AVS)，並同步向冷卻分配單元 (CDU) 的變頻水泵發送流量前饋訊號，在局部熱點尚未積聚之前完成流體增壓。

第三條技術主線是 800V 高壓直流微電網與虛擬電廠 (VPP) 的深度聯動。隨著單一大型智算中心功耗邁向數百兆瓦 (MW) 乃至吉瓦 (GW) 級別，資料中心已經轉變為城市電網的超大型負載節點。施耐德電機 (Schneider Electric) 執行長兼數位化轉型戰略長在世界經濟論壇上的發言精確指出：「未來的資料中心本質上是微電網與區域熱網的交匯節點。透過 AI 數位孿生實現算力負載、電力輸入與冷卻流量的毫秒級閉環，算力中心正由被動的電網消納者升級為主動調節電網頻率的虛擬電廠 (VPP)。」透過將 800V 直流母線直接整合本地儲能電池系統 (BESS)、屋頂分散式光伏以及氫燃料電池，智算中心能夠在毫秒級別響應電網的頻率微調指令，藉由彈性調節非關鍵算力負載或釋放儲能電能，將原本單純的電力消耗中心重塑為具備高經濟價值的虛擬電廠資源。

然而，在技術快速推進的同時，全球算力熱管理與能源產業鏈正面臨著三大難以規避的核心工程與風險：

首先是液冷微滲漏引發的電氣短路與保險責任歸屬風險。在高壓直流 (800V DC) 直

達機架的環境下，電解質流體的微量滴漏或滲透將瞬間誘發破壞性極強的高壓直流電弧 (DC Arc Flash)，不僅能於毫秒內燒毀價值數百萬美元的高密運算刀片，更可能引發全機櫃連鎖火災。目前，針對盲插快速接頭 (QD) 密封圈在長期高溫化學浸潤下的微觀形變疲勞，業界尚缺乏超過 10 年尺度的加速老化實測模型。

其次是冷卻介質 PFAS 全球環保法規限制帶來的材料淘汰危機。雙相浸沒式液冷以及部分冷板二次側特種流體高度依賴全氟和多氟烷基物質 (PFAS，如各類氟化液)。這類化學品因其優異的絕緣與不可燃性長期受到青睞，但其生物蓄積性與在自然界中幾乎不降解的特徵引發了嚴重的生態擔憂。歐盟化學品管理局 (ECHA) 關於全氟和多氟烷基物質 (PFAS) 限制法規工作組的法律專家明確表態：「液冷產業必須在政策視窗期內完成對 PFAS 類氟化冷卻液的替代研發；環保合規性將直接決定浸沒式液冷在歐美市場的准入命運。」隨著 3M 等國際化工巨頭全面退出 PFAS 製造，雙相液冷面臨無介質可用的斷供風險。產業界被迫將技術重心轉移至單相合成碳氫化合物 (合成油) 或新型無氟合成酯，但介質更替帶來的閃點防火要求、材料相容性重估與流體黏度增加，顯

著推高了系統的再研發成本。

最後是第三代半導體晶圓產能排程與戰略原材料供應鏈斷點風險。800V 高壓配電系統與兆赫茲級末端負載點 (POL) 供電架構，高度依賴碳化矽 (SiC) 與氮化鎵 (GaN) 功率器件。然而，8 吋 SiC 襯底晶圓的生長速度極為緩慢，晶格缺陷控制與微管密度依然受限，導致高壓大功率 SiC MOSFET 的綜合良率攀升不及預期。在材料源頭，高導熱微結構所需的關鍵原材料——包括超高純度球形氧化鋁、高導熱氮化鋁 / 氮化矽陶瓷粉體、半導體級合成金剛石襯底、微米級抗氧化銅粉，以及鎵 (Ga)、鍺 (Ge)、鉍 (Bi) 等戰略金屬，其提純專

利與精煉產能呈現高度的區域集中特徵。一旦地緣政治局勢引發出口管制或進出口關稅壁壘，全球功率半導體與高階導熱介面材料產業鏈將迅速面臨原材料斷點，直接阻礙超高密算力機房的規模化交付進程。

小結：

AI 算力帶來的熱流密度暴增，本質上是摩爾定律持續推進、登納德縮放失效帶來的必然物理後果，並非單純依靠部件改良就能徹底解決。熱控產業的升級，也不是簡單的「風冷換液冷」設備替換，而是一套從晶圓設計、封裝材料、板級結構、機房流體管網到電網能源調度的系統工程變革。

冷板式液冷當前正處於產業規模化放量的關鍵階段，浸沒式液冷、矽片內微流道冷卻仍分別面臨環保介質、製造成熟度等現實門檻，距離大規模商業量產尚有一段產業化驗證週期。與技術突破同步，產業也必須正視液冷微滲漏責任界定、PFAS 法規變革、第三代半導體與高階導熱材料供應鏈脆弱性等現實風險，在追求性能的同時完善可靠性標準、保險機制與替代材料體系。

未來算力基礎設施，將是算力、電力、熱力深度耦合的綜合樞紐。熱管理產業的價值，也將伴隨 AI 產業持續深化，從過去的邊緣配套走向數位基礎設施的戰略核心。CTA

表：全球算力熱管理產業鏈關鍵環節競爭格局與代表廠商矩陣

產業鏈核心	技術壁壘與製造關鍵	代表性國際廠商	代表性本土與亞太關鍵廠商 (奇鋐 / 健策 / 高柏 / 雙鴻 / 台達等)	供應鏈成熟度與自主可控程度
晶片級封裝均熱片 (Heat Spreader)	超大尺寸 CoWoS 平整度控制 (亞微米級)、超精密鍛造微流道	Boyd Corporation、Cooler Master	健策電子 (Jentech)：全球高階鍛造均熱片領先者，市佔率極高	極高。健策等亞太廠商已建立穩固的技術與產能壁壘
導熱介面材料 (TIM & PCM)	10~18 W/m*K 超高導熱率、微觀極限填縫、抗熱疲勞泵出 (Pump-out)	漢高 (Henkel)、信越 (Shin-Etsu)、杜邦 (Dow)	高柏科技 (T-Global)：TG-A 墊片與 PCM 佈局完善；傲川、飛榮達	高。材料配方與粉體改性進展顯著，逐步切入旗艦算力生態
微通道散熱冷板 (MCL)	微米級微鱗片削片 (Skiving)、高深寬比流道、極限耐壓與低流阻	CoolIT Systems、Boyd	奇鋐科技 (AVC)：伺服器微通道冷板全球龍頭；雙鴻科技 (Auras)	極高。具備深厚散熱研發底蘊與規模化精密製造優勢
冷量分配單元 (CDU) 系統	變頻大流量泵浦控制、板式換熱效率、N+1 系統冗餘可靠性	維諦技術 (Vertiv)、施耐德電機 (Schneider)	奇鋐科技 (AVC)、台達電子 (Delta)、雙鴻科技 (Auras)	中高。國產模組化 CDU 快速崛起，正全面進入北美及全球雲端供應鏈
盲插快速接頭 (Quick Coupling ;QD) 與管網	帶壓盲插「零滴漏」、公差容忍度、長期冷卻液耐化學腐蝕	CPC (Colder Products)、Staubli、Parker	奇鋐科技、台達電子 (深度客製化製件)、中航光電	中等。高階快速接頭專利與精密加工依然由歐美老牌流體巨頭主導
高壓直流 (800V) 電源系統	模組化高功率密度、SiC/GaN 高頻諧振 LLC 拓撲、效率 >98.5%	艾默生 (Emerson)、Vicor、ABB	台達電子 (Delta)：全球伺服器電源霸主；光寶科技 (Lite-On)	極高。在機櫃電源機框 (Power Shelf) 領域佔據全球統治地位