

AI 數據中心熱管理演進



David Stout
Systems engineer
Building automation - Data center thermal management



摘要

- **日益增加的熱負載**：人工智慧 (AI) 數據中心的機架功率密度已從約 5kW 提升至超過 100kW，部分 AI 叢集預計將達到 1.5MW。
- **冷卻架構演進**：當機架功率超過 100kW 時，數據中心正從空氣式冷卻轉向液體冷卻和浸沒式冷卻。
- **預測性熱管理**：伺服器托盤層級的液體流量控制和基於邊緣 AI 的感測器融合，將協助數據中心更快偵測漏液並預測故障。

簡介

過去幾年來，數據中心的運算機架功率不斷提升，這是因為大型語言模型和其他 AI 工作負載需要更先進的中央處理器 (CPU) 和圖形處理器 (GPU) 架構。因此，熱管理的重要性也日益提升。

任何**熱管理系統**的主要工作在概念上都很簡單：從不需要熱量的區域吸收熱量，並將其傳遞至可以安全散熱的地方。隨著運算機架產生更多熱量，為了讓機架內的處理器維持在可接受的溫度範圍內運作，需要採用不同的散熱管理技術來最佳化效能。本白皮書概述熱管理系統如何隨著功率等級提升而演進，並探討未來不久可能需要用來應對更高功率等級的熱管理系統。

延伸閱讀：「**數據中心產生的熱量達到前所未有的程度。散熱技術必須跟上腳步。**」

若要直觀瞭解運算機架的功率等級及其產生的熱量，可以將機架與家中常見的傳統木柴或燃氣壁爐進行比較。這類壁爐通常會在與運算機架大小大致相同的空間內產生約 10kW 的熱量，這樣的熱負載是一般空調系統都能輕鬆應對的。然而，在 50kW 的機架功率等級下，相當於在這個空間內放入 10 個壁爐，而空氣冷卻已無法應對如此大的熱負載來調節室內溫度。1.5MW 的機架相當於在這個空間內放入 150 個壁爐，更能凸顯資料中心散熱管理所面臨的挑戰。幸運的是，在相同體積下，液體冷卻的吸熱能力是空氣的 3,000 倍。

圖 1 說明冷卻挑戰的升級速度有多快，將過去、現在和未來的機架功率等級，與能夠應對這些功率等級的架構及各架構達到其極限的位置進行比較。AI 數據中心的機架功率密度已從約 5kW 提升至超過 100kW。目前部分 AI 叢集的每機架功率已

接近 200kW，預計未來幾年可能達到高達 1.5MW 的功率等級。因此，冷卻架構正從空氣冷卻轉向液體冷卻，以因應不斷提升的功率需求

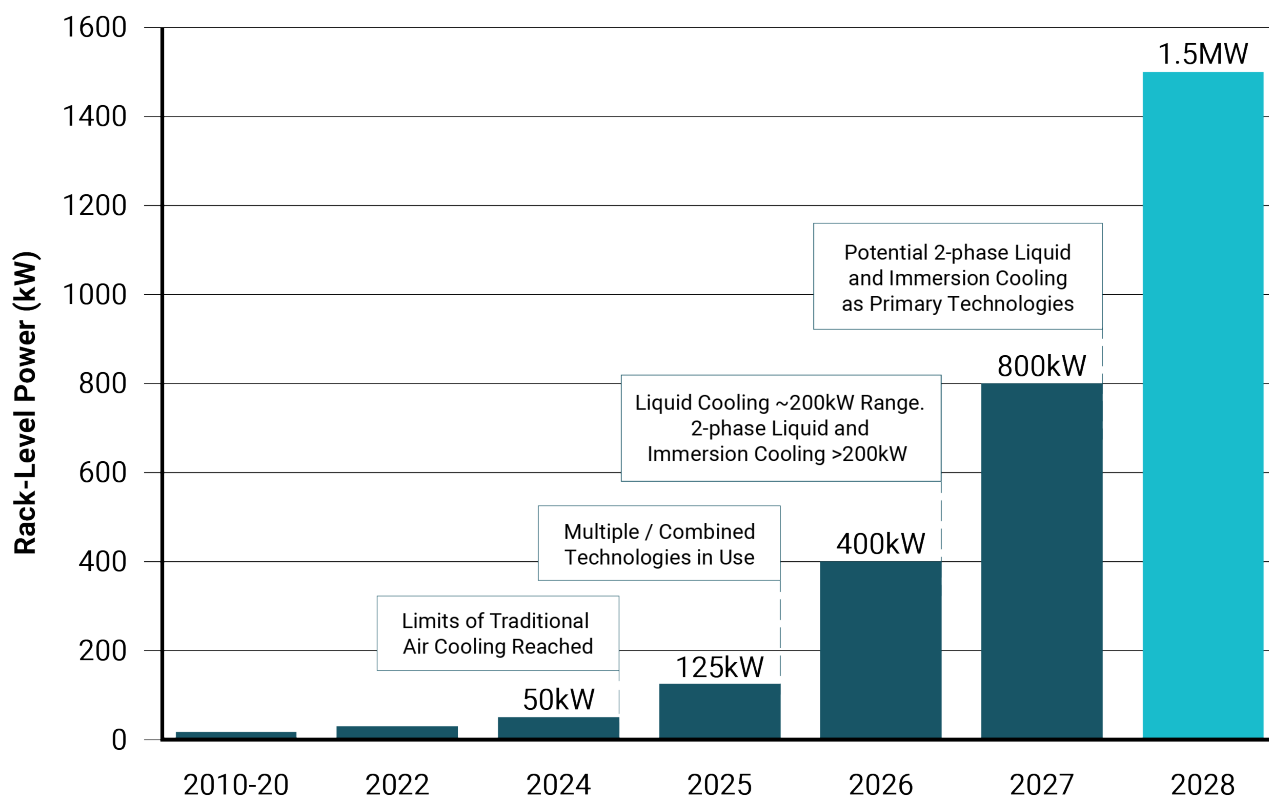


图 1. 機架層級功率預測與冷卻技術

比較現今的熱管理架構

雖然液體冷卻代表熱管理的未來，但混合式技術在未來數年仍將持續應用於業界。工程師通常會將最先進的液體冷卻系統保留給專用於 AI 運算的機架，而其他架構則處理標準工作負載。

數據中心有三種主要的空氣式冷卻架構，以下依可支援的機架功率密度由低至高列出。每種架構均說明用於吸收運算機架所產生熱量的介質，以及用於將熱量傳出數據中心的介質。

空氣對空氣

空氣對空氣冷卻架構的運作方式與家中的中央空調系統非常相似，不同之處在於，數據中心會讓冷空氣在運算機架中循環，以吸收產生的熱量。接著，熱空氣通過裝有冷媒的線圈，由冷媒吸收熱量並冷卻空氣，以便重新循環。冷媒將吸收的熱量傳遞至室外，在室外將熱量釋放至環境中，並透過壓縮、冷凝和蒸發重新冷卻。此流程可概括為吸熱、熱傳遞，以及放熱與冷卻的循環。為了控制氣流，機架通常安裝在架高地板上，並以背對背的方式排列成列，以形成冷通道和熱通道。

隨著功率位準提高，熱通道封閉可防止熱空氣逸散至冷通道，避免提高由電腦機房空調設備 (CRAC) 控制的冷通道溫度。電腦機房空氣處理機組 (CRAH) 負責管理氣流，以及將熱量傳遞至蒸發器線圈中的冷媒。熱負載增加時，需要更大型的鼓風機和蒸發器線圈，以及增加伺服器風扇的氣流量。在 20kW 至 50kW 的機架功率範圍內（假設電腦機房中的所有機架均相似），效率和運作需求需要採用不同的熱傳遞方式。

空氣對液體

空氣對液體冷卻架構採用與空氣對空氣冷卻架構相同的方法，但增加了圖 2 中所示的後門熱交換器 (RDHX)。RDHX 的用途是將流經運算機架的空氣中的熱量傳遞至冷液體，同時在空氣通過時將其冷卻。RDHX 可以是被動式或主動式，也就是不使用或使用額外風扇來協助氣流通過熱交換器。

冷卻液分配單元 (CDU) 使吸收 RDHX 熱量的液體循環，並利用泵浦將液體輸送至室外，在室外透過冷卻塔、乾式冷卻器或其他方式將熱量釋放至環境中，同時冷卻液體以便重新循環。CDU 通常包含熱交換器，可將流經電腦機房的液體與流向室外的液體隔離（通常為設施的供水）。這種隔離可讓運算機房使用的液體類型與室外使用的液體類型有所不同。

隨著功率等級持續提高，以空氣作為吸熱介質會成為瓶頸，促使散熱方式轉向冷板，讓冷板能直接從產生熱量的元件吸收熱量。

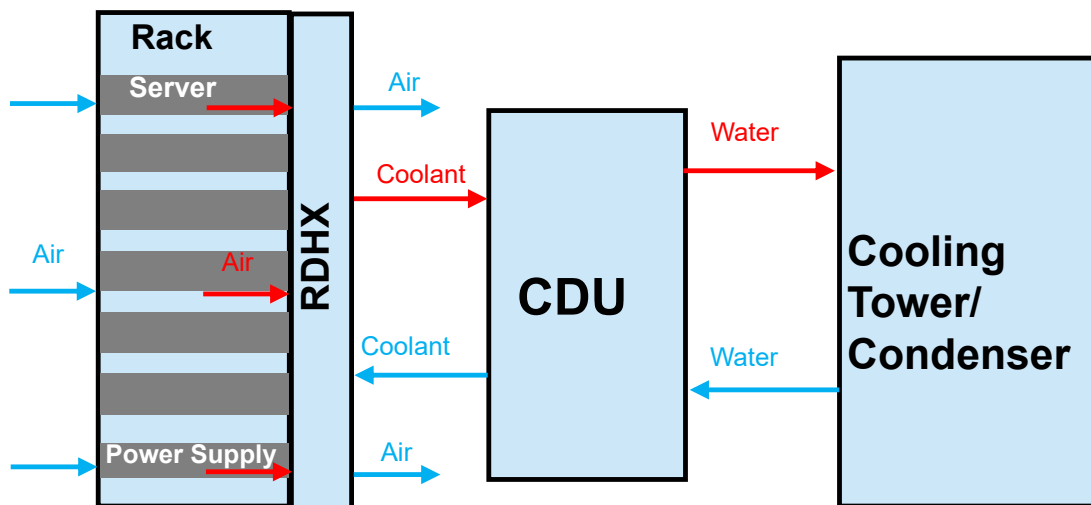


圖 2. 空氣對液體冷卻架構

液體對空氣

由於冷板可大幅提升吸熱效率，因此所需的熱傳空氣流量降低，使傳統的 CRAC/CRAH 裝置仍可繼續透過空氣傳遞熱量。如圖 3 所示，液體對空氣架構採用散熱單元 (HDU)，由 CDU 與主動式 RDHX 組成。在 HDU 中，CDU 使液體流經冷板。冷板安裝於機架各處的熱源旁，以盡可能靠近熱量產生的位置吸收熱量。液體流經主動式 RDHX 時，風扇會使較冷的機房空氣流過盤管，將熱量傳遞給流入熱通道的空氣。HDU 可根據功率等級配置於機架內、機架列內或作為側置式裝置。

當功率等級提升至 150kW 至 200kW 範圍時，以空氣作為熱傳遞方式再次成為瓶頸，因此目前液體對液體架構日益普及。

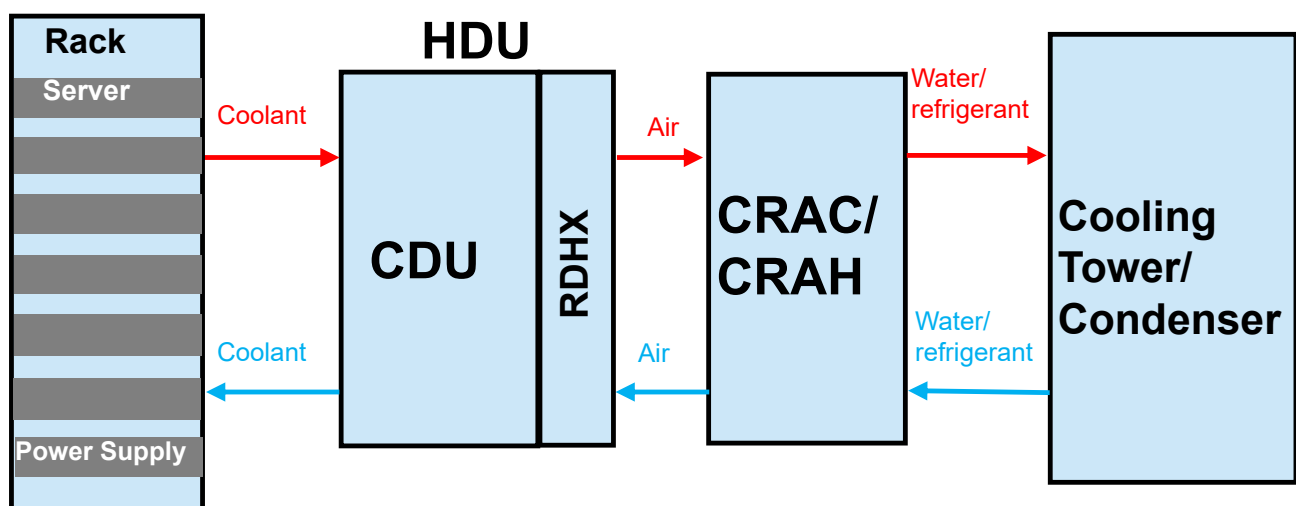


图3. 液體對空氣冷卻架構

除了熱性能外，工程師還必須考慮設施需求。空氣對液體架構需要設施具備供水基礎架構，並在白區內配置大量管路；相較之下，液體對空氣架構可適用於沒有現有供水系統的設施，因此成為改造舊型資料中心的理想選項。空氣對液體、液體對空氣及液體對液體架構合計構成目前大多數正在使用的散熱管理系統。

液體冷卻技術的演進

如圖4所示，液體對液體架構使用直接晶片冷板在熱源處吸收熱量，並透過冷卻液分配單元 (CDU) 循環液體，將熱量從一種液體傳遞至另一種液體，再從白區傳遞至室外並釋放。

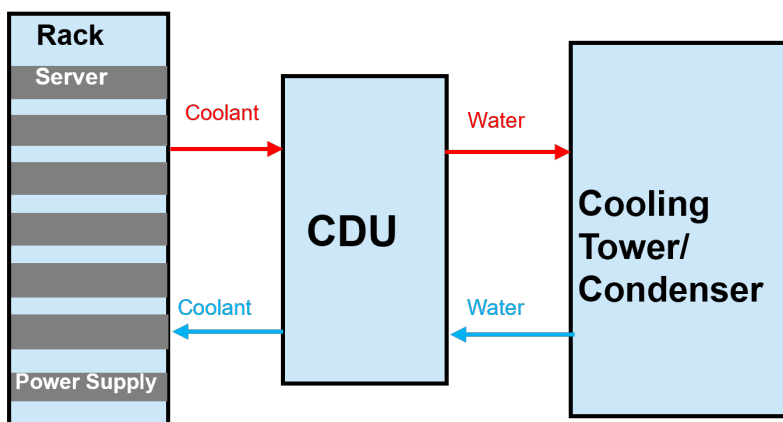


图4. 液體對液體冷卻架構

CDU 是液體對液體架構中最重要的元件，可維持液體流動，使熱量能有效吸收，並讓元件維持在預定的溫度範圍內。CDU 內的熱交換器同樣至關重要，可將從冷板吸收熱量的低雜質、高比熱液體，與室外冷卻系統使用的設施用水隔離。

漏液偵測的必要性

將液體引入如此靠近電子元件的位置，使漏液偵測變得極為重要。可靠地偵測漏液並將誤觸發降至最低，與能否偵測到漏液同樣重要，因為伺服器的正常運作時間取決於此。目前的機架安裝會使用開關閥，當感測器偵測到漏液時便停止液體流動，並關閉整個機架，直到技術人員找到並修復漏液源。對濕氣敏感的電阻式感測繩是最常見的漏液感測器類型，但其準確度問

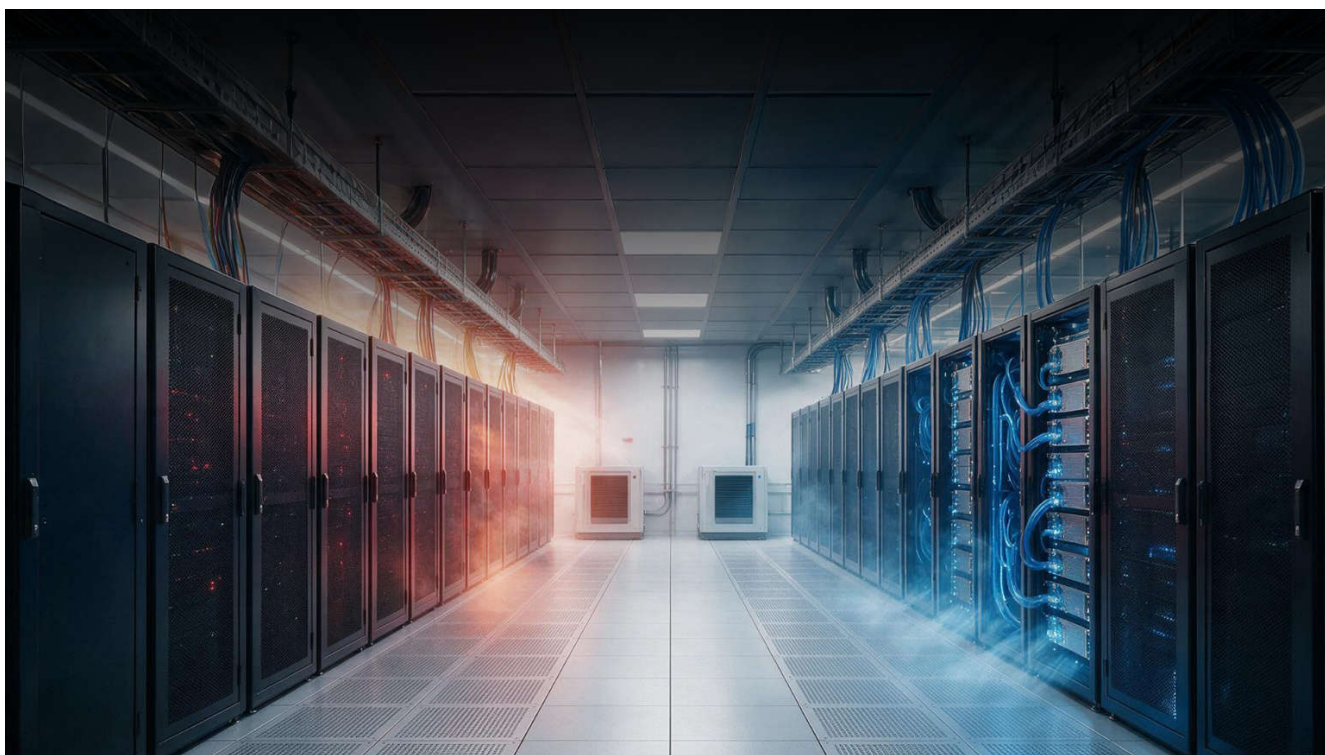
題廣為人知，安裝時也必須小心，避免感測繩受到擠壓或形成急彎。工程師正在研究替代方案，包括可偵測微量漏液的濕度感測器和電容式漏液感測器。

其他方法則從 CDU 層級處理漏液問題。其中一種方法是重新配置 CDU，使其在負壓下將液體吸過系統，而不是將液體推過系統。如此一來，系統會吸入空氣，而不是迫使液體從破損處或鬆脫的接頭逸出。另一種方法是使用非導電液體，使漏液只會造成髒亂，而不會在昂貴的設備上造成導電短路。

浸沒式冷卻

浸沒式冷卻可進一步簡化冷卻流程，並滿足專家預測的更高機架功率需求。此架構將傳統機架水平配置，並將其中的設備（不包括金屬框架）浸入裝有非導電液體的槽體中，從而完全避免因洩漏造成的停機時間。浸沒槽通常會整合熱交換器和較小型的泵浦，以維持液體循環，使此架構具有極高的空間效率，因為可省去傳統機架側面的歧管和管路。

由於內建泵浦和熱交換器，CDU 功能可實現自成一體。浸沒式冷卻的吸熱效率約為直接晶片冷卻的 2 至 3 倍，因此在較寒冷氣候、設施用水本身溫度較低的資料中心中，對於中等機架功率等級，可能無需使用外部冷卻塔。



未來 AI 數據中心冷卻趨勢

針對最高達 1.5MW 功率等級所建置的冷卻系統，幾乎可以確定將採用液體對液體和浸沒式冷卻架構。這兩種技術都可轉換為兩相冷卻，其中氟碳介電液體（例如冷媒）在低溫下蒸發，可提升吸熱和熱傳遞效率，進而延長這些架構在未來的使用壽命。

另外兩項趨勢旨在因應日益提高的功率密度，並讓控制系統的反應更加靈敏：

- 在伺服器托盤層級控制液體流量，可更精細地控制 GPU 和 CPU 晶粒溫度，並在發生漏液時，盡可能維持機架其他位置伺服器的正常運作。

- 邊緣 AI 運算可透過感測器融合，同時監測並處理系統中的所有感測器資料，提供更快的回應時間和更低的延遲，並偵測到監測個別感測器或參數時可能忽略的細微變化。邊緣 AI 運算開啟了各種可能性，包括提升漏液偵測的可靠性和速度，以及對關鍵機械元件進行預測性維護。

這些趨勢相結合，可讓數據中心營運商在問題演變為故障之前，就能清楚掌握正在形成的問題，朝向能夠感知狀況、預測問題並自動調整的冷卻系統發展。熱管理將成為數據中心運作的主動管理環節，而不再是發生問題後才處理的事項。

結論

各種冷卻架構共用許多相同的核心元件。溫度感測器在溫度控制中扮演重要角色。馬達控制同樣重要，可為這些系統中的風扇、泵浦、壓縮機和電子閥提供動力。微控制器和微處理器可讓所有元件協同運作。這些只是冷卻系統所需半導體的少數範例，而無論採用何種架構，TI 都能提供涵蓋冷卻系統各個層級的類比技術和嵌入式處理產品。如需瞭解這些冷卻架構所使用的特定產品領域詳情，請參閱「其他資源」一節。

作者簡介

David Stout 是一名系統工程師，專注於建築自動化系統，包括德州儀器的資料中心散熱管理。他擁有超過 30 年的類比、混合訊號和射頻電路與系統設計經驗，服務於工業半導體市場。David 擁有路易斯安那州立大學的電機工程學士學位，以及德州大學達拉斯分校的電機工程碩士學位。

其他資源

探索與數據中心熱管理系統相關的 TI 產品類別：

- 瞭解適用於逆變器和變頻驅動器的 [GaN 功率級](#)，以及適用於風扇、泵浦、壓縮機和電子閥的 [馬達驅動器](#)。
- 探索用於漏液偵測和熱監測的 [溫度及其他感測器](#)，以及 [精密類比轉數位轉換器](#)。
- 進一步瞭解可讓冷卻子系統保持協調運作並快速回應的 [微控制器和微處理器](#)。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

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](#) 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