

Technical Article

音訊技術的進步有助於人形機器人在真實世界中聽說自如



Jonathan Huang, Ramsey Foote, and Christian Greeff, Texas Instruments

人形機器人正從實驗室走向工廠、醫院和住家，但這些環境往往充滿噪音、雜亂且難以預測。讓機器人能可靠地聽取命令並自然地做出回應，是機器人設計中最艱鉅的工程挑戰之一。如今，麥克風陣列、波束成形和高效率放大技術的進步，正使音訊互動變得不再機械化，而是更具人性化。

透過麥克風的音訊輸入讓人形機器人能夠接收並執行語音命令，無需觸控螢幕或預先編程的例行程序，使人機互動更自然直觀。機載麥克風還能讓機器人監測環境音訊線索，如鈴聲警報、呼喊聲或碰撞警告，實現即時的情境感知行為。若要在如圖 1 所述的吵雜現實環境中達成此目標，需要使用麥克風陣列與波束成形技術。波束成形是一種能將收音集中於特定方向的訊號處理技術，用以隔離聲源並清晰地擷取遠場音訊。

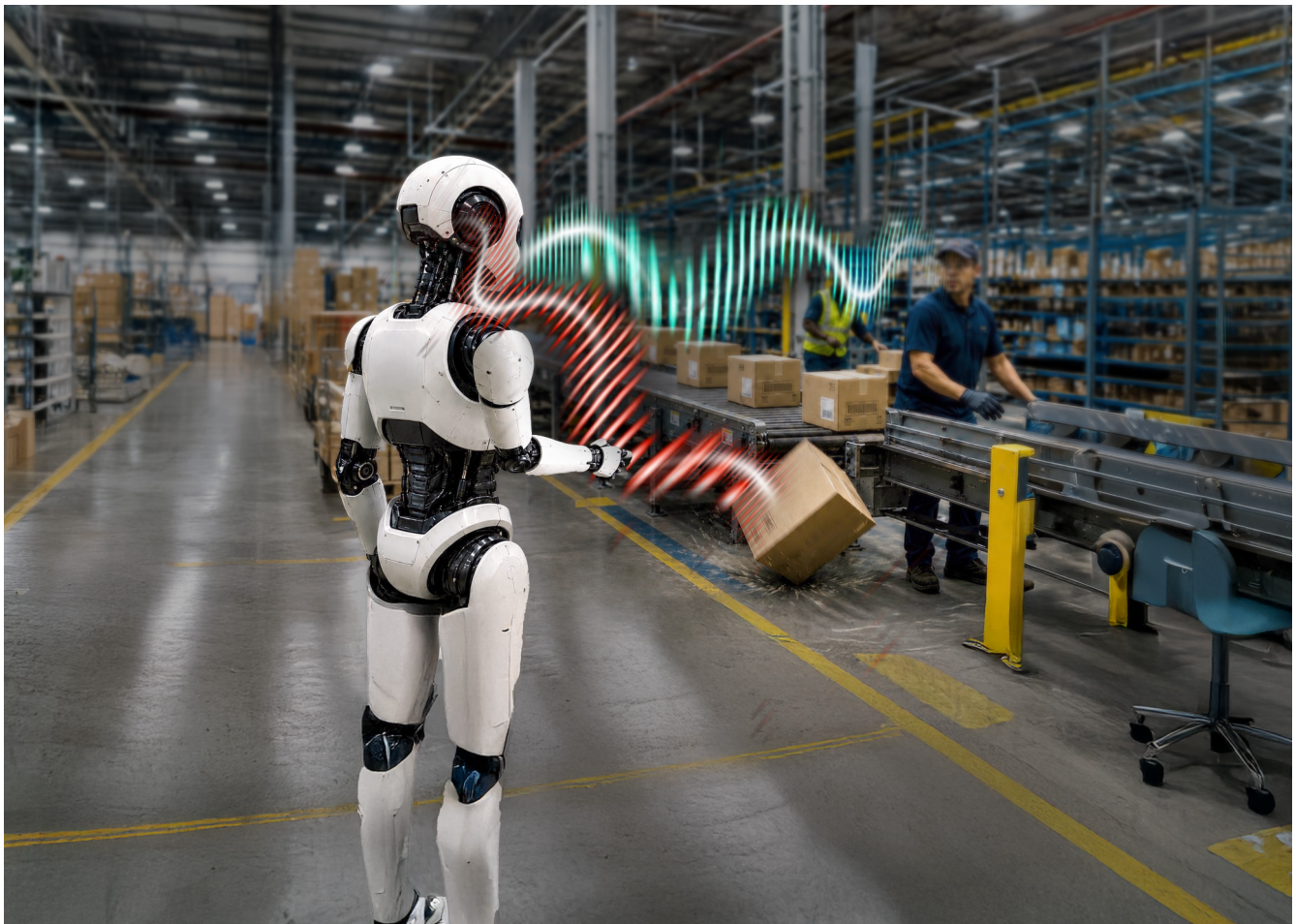


圖 1. 人形機器人透過聲音警告工廠工人注意不安全狀況

揚聲器輸出對安全同樣極為重要。無論是回應使用者、提供狀態更新還是廣播緊急警報，人形機器人必須發出清晰、高品質的語音，以便周圍人員能及時獲知資訊並做出適當回應。清晰、易懂的輸出也能讓雙向互動感覺更自然，進而在協作環境中與人類建立信任關係。為了讓機器人能夠同時聆聽和說話而不降低任何音訊訊號的品質，系統必須採用雜訊抑制和聲學回波消除技術，即使兩者同時進行，也能保持傳入音訊的清晰度和傳出音訊的可理解度。

提供這些功能需要完整的音訊訊號鏈，從支援類比與數位輸入的麥克風聚合器，到能在不耗盡電池的情況下最大化輸出功率的高效率 D 類放大器。

如何實現這些功能

錄音路徑演算法

在現實環境中能有效溝通的人形機器人通常仰賴波束成形技術，該技術將使用配置在機器人頭部周圍、由四個以上麥克風組成的陣列。波束成形演算法會處理來自每個麥克風的音訊資料，以識別最強音訊訊號的方向。一旦識別完成，演算法會對每個麥克風的輸入套用精確計算的時間延遲，進而在電子層面上將收音模式導向目標聲源。設計人員可進行額外調校，以針對特定特徵捕捉聲音，例如人類語音或其他定義的聲音。

波束成形讓麥克風陣列專注於特定方向的音訊，同時抑制來自其他位置的無用聲音。多麥克風方案還能透過加總各通道訊號來改善遠場音訊取得，這會強化所有麥克風共有的音訊，同時減少不相關的雜訊。在訊號到達主機處理器之前，套用於波束成形音訊訊號的雜訊抑制演算法可進一步提升整體音訊品質。

高功率、高效率

人形機器人通常在空間和散熱方面會受到限制。高功率馬達和處理器被封裝在氣流有限的狹小空間內，因此需要能在高溫下運作的高效率放大器。無需外部散熱器的積體電路 (IC) 在這些緊密的設計中具有明顯優勢，如圖 2 中所示。TI 的 **TAS6511-Q1** 是一款單聲道放大器，可提供 50W 輸出功率，並支援高達 125°C 的操作溫度，且採用 4mm x 4mm 的底部焊盤 QFN 封裝。針對使用類比輸入放大器的設計，**TPA3132D2** 類比輸入 D 類放大器支援 50W 至單聲道喇叭輸出，且不需要任何 I2C 配置。在需要較少輸出的情況下（如較小的機殼或環境噪音較低的環境），**TAS6501-Q1** 可支援 15W 的輸出功率。

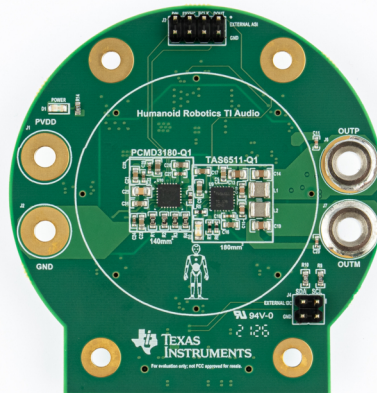


圖 2. TI 人形機器人音訊子系統參考設計 (TIDA-060054) 中的 PDM 轉 TDM 音訊轉換器與音訊放大器

目前這些功能如何實作？

麥克風陣列集總器

為了有效處理環境音訊，人形機器人必須將所有麥克風資料聚合為機載主機處理器可處理的統一格式。分時多工 (TDM) 音訊匯流排是典型的實作方式，可作為麥克風陣列和處理器之間的通用語言。

若要實現此目標，則需要彌合麥克風捕獲聲音的方式與主機處理器預期接收聲音的方式之間的差距。類比麥克風記錄類比資料；數位麥克風記錄脈衝密度調變 (PDM) 訊號，兩者皆非主機處理器要求的 TDM 格式。位於麥克風與處理器之間的音訊轉換器會聚合並將這些輸入轉換為 TDM，進而在系統層級實現流暢、即時的音訊處理，如圖 3 中所示。

TI 為這兩種訊號類型提供了解決方案。TLV320ADC3140 是適用於類比麥克風的高性能音訊 ADC，而 PCMD3180 則是適用於數位麥克風的 PDM 轉 TDM 音訊轉換器。兩者都能確保每個麥克風輸入以 TDM 格式送達主機處理器。

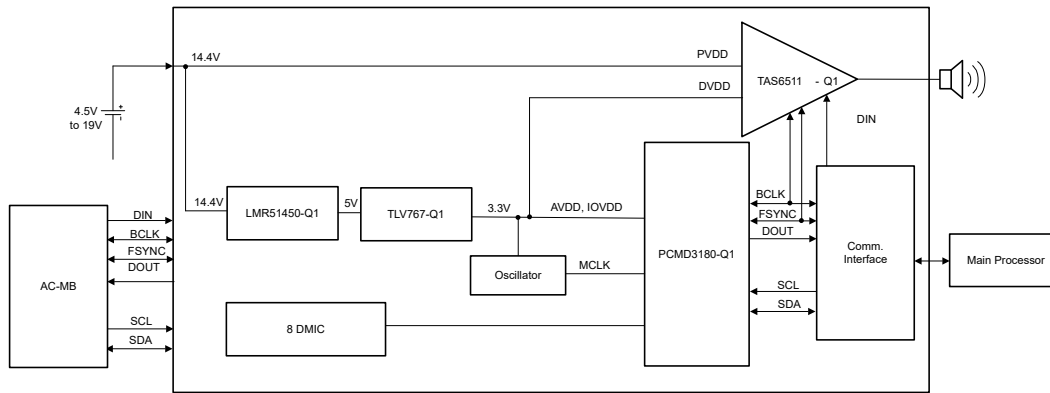


图 3. 人形機器人的典型音訊原理圖

小型解決方案尺寸和低 BOM 成本

在某些人形機器人中，音訊系統位於頭部單元，麥克風和喇叭必須容納在極其有限的空間內，然後再將資料傳輸至胸部附近的主機處理器。這種空間受限的環境對所選 IC 的尺寸和整合度提出了極高的要求。

尺寸小巧的 IC 封裝（如 PCMD3180 音訊轉換器、TAS6511-Q1 D 類放大器和 TAC5212 低雜訊音訊編解碼器所使用的 4mm x 4mm 四方扁平無引線 (QFN) 晶片）可以並排放置，而不會使電路板顯得擁擠。尺寸稍大一點的 5mm x 5mm QFN 裝置 TPA3132D2 D 類放大器則無需外部 I2C 配置即可運作。

採用底部焊盤（底部接觸）封裝即不需要笨重的散熱片，有助於裝置管理散熱並適應頭部單元的有限空間。TAS6511-Q1 以 2.1MHz 的切換頻率運作，這可將輸出濾波電感器的尺寸從 10μH 顯著縮小至 3.3μH，使整個音訊訊號鏈保持結構精巧，而無需犧牲效率或輸出品質。

高效率與低功耗

電池續航力是人形機器人設計中最關鍵的考量之一。馬達驅動器、主機處理器、感知感測器、音訊以及許多其他系統同時從同一電源汲取電力，因此每個元件都必須極力降低能耗。高效率 and 低待機功耗是使人形機器人具備現實運作可行性的基礎。

TI 在其音訊產品組合中直接解決了這個問題。PCMD3180 轉換器在待機時僅耗電 2.5mW，而 TAS6511-Q1 放大器在相同狀態下耗電小於 0.5W，在不需要全功率輸出時，將音訊系統的電池電量消耗降至最低。在全功率輸出時，TAS6511-Q1 在 50W 輸出功率下提供業界領先的 90% 效率，將電池負擔降至最低。

統包式解決方案

許多人形機器人公司的工程設計資源有限，無法直接投入大量精力於音訊開發。由於資源分散在運動控制、感知和人工智慧領域，音訊元件必須易於尋找且便於實作。

TI 在設計其音訊產品組合時充分考慮了這一點。每款 IC (包括 PDM 轉 TDM 轉換器、D 類放大器和音訊編解碼器) 均附帶應用說明、評估模組，並透過 TI 的音訊配置軟體 Pure Path Console 提供支援。設計人員可以利用這些資源快速配置、測試和偵錯其音訊系統，而無需具備深厚的音訊專業知識。

結論

隨著人形機器人從受控環境走向工廠、醫院和住家，精確的音訊品質將決定其與人類協作的成效。在現實世界的各種噪音中清晰聽取、智慧回應並安全溝通的能力，是機器人是否實用且可靠的基礎。TI 精巧、高效且易於整合的音訊技術為機器人設計團隊提供了能輕鬆因應挑戰的工具，且無需犧牲空間、電力或開發時間，讓設計人員能專注於下一個目標：打造能在人類生活與工作場所安全運作的機器人。

其他資源

- **尋找零件：**請瀏覽 [PCMD3180](#)、[TAS6511-Q1](#)、[TAC5212](#)、[TPA3132D2](#) 和 TI [機器人](#) 產品概覽的產品頁面。
- **最佳化設計：**請下載 [Pure Path Console](#) 並查閱 [TAC5212](#) 和 [PCMD3180](#) 的功耗應用說明。
- **詢問專家：**請在 [TI Audio E2E 論壇](#) 發布您的音訊設計問題。

作者簡介

Jonathan Huang

Jonathan Huang 是 TI 的產品行銷工程師，專注於音訊轉換器領域。Jonathan 擁有美國喬治亞理工學院 (Georgia Tech) 電機工程學士學位。他喜歡在閒暇時嘗試新的食譜和出國旅行。

Ramsey Foote

Ramsey Foote 是 TI 的系統工程師，專注於音訊轉換器領域。Ramsey 擁有美國伊利諾大學厄巴納-香檳分校 (University of Illinois Urbana Champaign) 電機工程碩士學位，業餘時間喜歡設計音訊設備和攀岩。

Christian Greeff

Greeff 是 TI 的機器人系統工程師，主要負責人形機器人解決方案。Christian 在美國佛羅里達農業機械大學 (Florida Agricultural and Mechanical University) 獲得電機工程學位。他設計的個人專案包括電動自行車、電動卡丁車、客製電動滑雪纜車絞車和 20kW 電動私人飛機。

註冊商標

所有商標皆屬於其各自所有者之財產。

重要聲明與免責聲明

TI 以「現狀」及所含一切錯誤提供技術與可靠數據 (包含產品規格書)、設計資源 (包含參考設計)、應用或其他設計建議、網頁工具、安全資訊和其他資源，且不承擔所有明示或默示保證，包括但不限於適銷性或用於特定用途之適用性的任何默示保證，或不侵害第三方智慧財產的任何默示保證。

所述資源可供專業開發人員應用 TI 產品進行設計使用。您應自行負責 (1) 選擇適合您應用的 TI 產品，(2) 設計、驗證與測試您的應用，與 (3) 確保應用符合適用標準，以及任何其他安全、安保、法規或其他要求。

這些資源得進行修改且無需通知。TI 對您使用所述資源的授權僅限於開發資源所涉及 TI 產品的相關應用。除此之外不得複製或展示所述資源，也不提供其它 TI 或任何第三方的智慧財產權授權許可。如因使用所述資源而產生任何索賠、賠償、成本、損失及債務等，TI 對此概不負責，並且您須賠償由此對 TI 及其代表造成的損害。

TI 的產品均受 [TI 的銷售條款](#)、[TI 的通用品質指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他適用條款，或連同這類 TI 產品提供之適用條款所約束。TI 提供此等資源並不會擴大或以其他方式改變 TI 對於 TI 產品的適用保證或保證免責聲明。除非 TI 明確將某產品指定為自訂或客戶指定型號，否則 TI 產品均為標準、類比、通用裝置。

TI 反對並拒絕您可能提出的任何附加或不同條款。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

上次更新 10/2025

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](https://www.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