

超越極限：智慧音訊放大器如何動態提升微型喇叭音效

Supriyo Palit

Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

Aditya Sundar

Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

簡介

在輕薄裝置上實現響亮且具沉浸感的音效極具挑戰性，因為微型喇叭面臨嚴格的響度上限。為了防止高電壓導致音圈燒毀或振膜撕裂，設計人員傳統上會將峰值音量限制在遠低於喇叭額定功率的範圍內，這也限制了可達到的聲壓等級 (SPL)。這種限制同樣影響了藍牙裝置與 Soundbar 中較大型的喇叭。智慧型音訊放大器透過整合高精密度 IV 感測類比數位轉換器 (ADC) 前端、即時數位訊號處理 (DSP) 與保護演算法來解決此問題。藉由在安全區域內短時間智慧化地超額驅動喇叭，智慧型放大器能讓硬體達到其真正的物理極限，進而提供高出 8dB 至 10dB 的感知響度以及更深沉的低音。

微型喇叭的脆弱本質

標準微型喇叭由懸浮於磁場中的音圈組成，音圈連接至振膜（或稱錐盆），並由懸吊系統固定。當電訊號通過音圈時，會產生電磁力推動振膜，進而振動空氣以產生聲音。請參閱 [圖 1](#)。

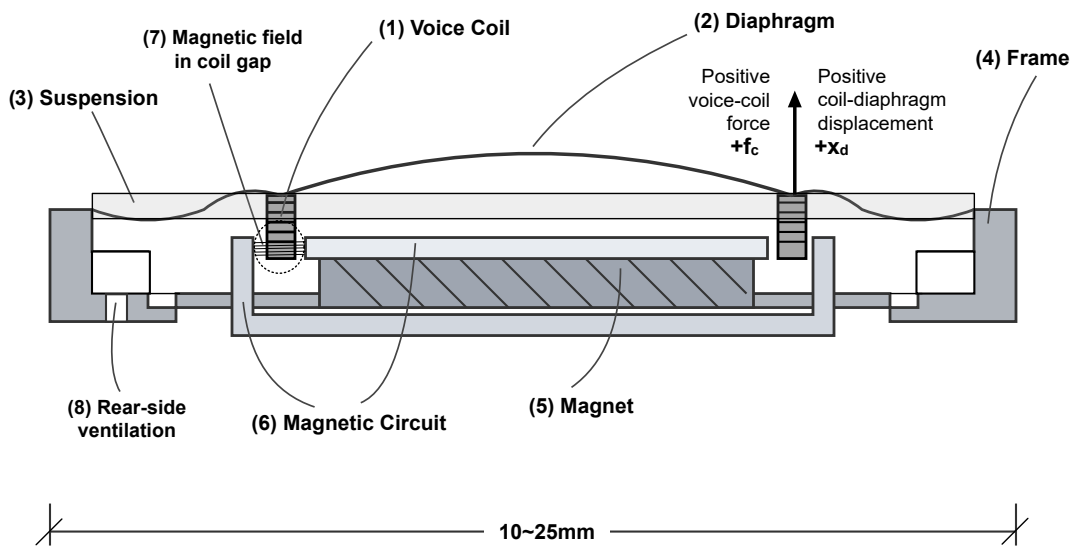


圖 1. 微型喇叭結構

當工程師為了產生更大的音量而增加這些微型元件的音訊輸出時，會面臨兩種災難性的失效機制：熱過載與機械過度位移。

從熱力學角度來看，喇叭的效率極低，約 95% 至 99% 的輸入電能會轉化為熱能而非聲音。因此，持續的高電壓訊號會使音圈溫度超過其額定溫度 (T_{max})，導致導線絕緣層熔化並造成電路短路。在機械層面，以高音量產生低音需要較大的振膜行程；若驅動電壓使振膜位移超過其物理行程極限 (x_{max})，懸吊系統可能會拉伸至超過其彈性限度，導致音圈撞擊磁鐵背板（即「撞底」現象），或使振膜與折環撕裂，進而造成失真、雜音或完全的聲學失效。

傳統與智慧型音訊設計方法的比較

在傳統音訊設計中，工程師為了確保安全性，會將峰值音訊功率限制在喇叭的額定連續功率之內。這種靜態電壓上限迫使整個訊號降至防禦性的基準位準，導致音量偏低且低音表現薄弱。

智慧型放大器會持續監測喇叭的狀態，並即時調整其輸出。透過精確掌握每一毫秒內音圈的溫度以及振膜的位移量，智慧型放大器能夠安全地以高電壓峰值驅動喇叭，而這類峰值在傳統系統下會立即導致喇叭損壞。

智慧型放大器演算法可動態調節響度，藉由確保喇叭的預估位移維持在 $X_{\max}$ 範圍內，且預估音圈溫度維持在 $T_{\max}$ 範圍內，使峰值響度 (SPL) 提升 8dB 至 10dB。該演算法僅在喇叭實際接近物理極限點時，才會調降能量輸出。請參閱 圖 2。

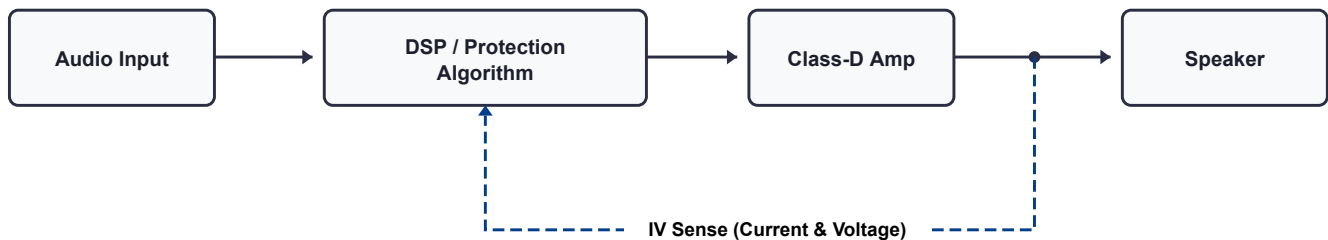


圖 2. 智慧型放大器系統架構

專用的感測硬體搭配執行於 DSP 上的聲學軟體模型，構成了一個即時回饋迴路，使放大器能夠即時動態調整其輸出。

整合式 IV 感測電路

智慧型放大器利用電流與電壓 (IV) 感測電路。在整合式類比數位轉換器 (ADC) 擷取施加於喇叭的精確電壓以及其消耗的精确電流後，系統會即時計算喇叭的電阻抗 ($Z = V / I$)。由溫度與機械運動驅動的動態阻抗變化，為保護演算法提供了原始感測輸入。

ADC 的轉換範圍經過設定，以確保能夠感測透過放大器播放的全刻度音訊訊號。高精度硬體確保了喇叭響度的最大化利用。任何電流或電壓感測誤差都會直接影響響度，因為喇叭保護演算法需要額外的誤差保護帶，以確保絕不超出最大位移 ($X_{\max}$) 與最大溫度 ($T_{\max}$) 限制。

典型的 $\pm 0.35\%$ 誤差會導致透過 IV 感測進行的音圈溫度估算產生 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的誤差。TI 的 **TAS2781**、**TAS2783** 與 **TAS2573** ADC 在 IV 感測方面實現了高準確度，進而將溫度與位移的保護帶需求降至最低。高訊號雜訊比 (SNR) 與動態範圍 (DNR) 可避免感測誤差，並透過喇叭以高傳真度重現音訊內容。請參閱 圖 3。

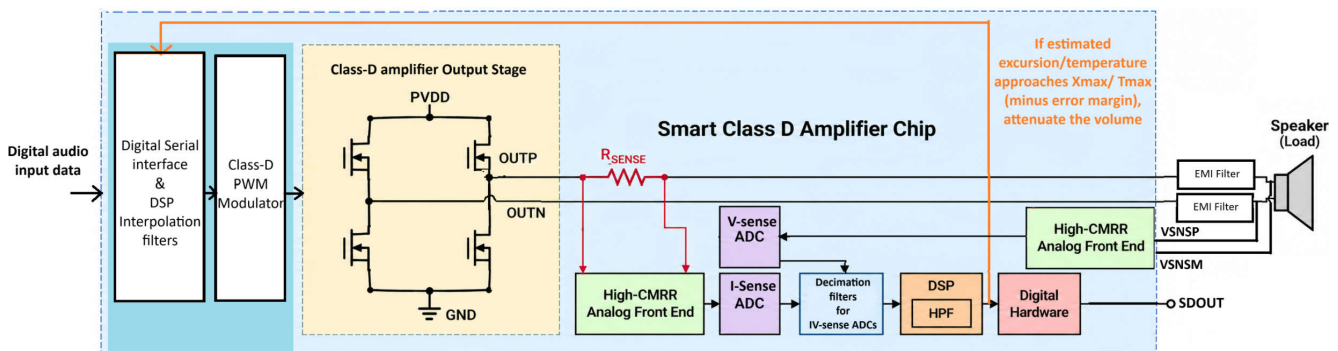


圖 3. 智慧型放大器中硬體與軟體的協作

裝置的 VSNP 和 VSNS 針腳會感測喇叭兩端的電壓。這些是感測線路，必須盡可能靠近喇叭終端連接，以確保測量準確。

由於 D 類放大器中喇叭兩端的電壓是高電壓切換節點，因此 IV 感測 ADC 需要具備高共模抑制比的類比前端電路，以便從切換電壓中提取音訊內容，並將高電壓轉換為較低電壓以進行精密感測。Σ-Δ (Sigma-delta) 或漸近法暫存器 ADC 電路會感測此低壓音訊內容，以提取精確的 IV 資訊。ADC 輸出頻率通常高得多（例如 3MHz），因為資料 ADC 經過過取樣以實現高 SNR 與 DNR。ADC 輸出資料會經過降取樣至音訊速率 (48KSPS)，並進行高通濾波以移除直流 (DC) 分量（若有），隨後才由於 TAS2781、TAS2783 或 TAS2573 整合式 DSP 中執行的 SmartAmp 演算法使用。

將 I 與 V 音訊通道進行高精度相位比對（在 $<\pm 1\mu\text{s}$ 內），可實現極其精確的喇叭阻抗即時估算。使用者亦可監控 IV 感測資料，並透過 TDM SDOOUT 針腳或 Soundwire 資料介面輸出。

DSP 是智慧型放大器的大腦。其承載喇叭保護演算法，執行喇叭的複雜數學模型以及即時預測濾波器。DSP 扮演守門員的角色，根據 IV 感測硬體提供的遙測數據，即時修改傳入的數位音訊串流。

智慧型放大器若要發揮作用，必須針對其驅動的特定喇叭進行校準。音訊工程師在消音室中使用專門的診斷工具來界定目標微型喇叭的特性。工程師會測量其熱阻 (R_E)、諧振頻率 (f_0)、機械阻尼 (Q_{ms}) 與磁力強度 (BI)。將這些參數編程至 DSP 中，可作為喇叭模型，以建立客製化的安全邊界。TI 的 PurePath™ Console 3 音訊工具套件提供校準、建模與終端系統調校支援。

溫度保護演算法

智慧型放大器中的熱保護機制仰賴於一項物理定律：金屬導體的電阻會隨溫度產生可預測的變化。這稱為電阻溫度係數 (α)。

當音圈發熱時，其電阻 R_E 會呈線性增加，而智慧型放大器的電流電壓感測硬體會從測得的阻抗中分離出此電阻值。**方程式 1** 演算法用於求解音圈的內部溫度：

$$R_{dc}(T) = R_E(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

其中 $R_E(T)$ 是目前時間 T 測得的電阻， $R_E(T_0)$ 為出廠校準的基準電阻，而 α 則是音圈材料（如銅）的電阻溫度係數。

如此便不再需要體積龐大，反應緩慢的實體熱敏電阻。

此測量僅定期執行（作為檢查點讀取而非連續串流），原因有二：首先，在低輸出位準或低功率向高功率轉換期間（受雜訊限制的訊號、穩定誤差與偏移），其可靠性較低；其次，持續運作感測類比數位轉換器 (ADC) 及其類比前端會消耗不必要的功率，特別是在電池供電且低音量聆聽的情況下。

熱建模與控制

由於 R_E 測量僅定期進行，演算法需要一種方法在兩次測量之間的時間持續得知音圈溫度。解決方案是採用預測性熱模型，這是一種多階電阻-電容熱網路（請參見圖 4）。此模型模擬從音圈到喇叭磁體結構，最後到裝置機殼與環境空氣的熱傳遞過程，並以完整的控制迴路速率運作。每當基於 IV 感測的新 R_E 讀數產生時，系統會重新校準模型，並修正自上次檢查點以來累積的任何漂移。

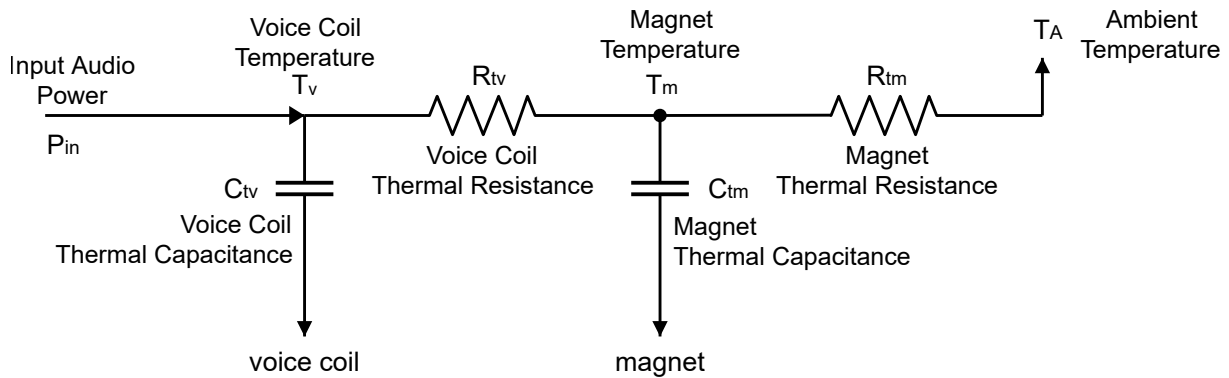


圖 4. 喇叭預測性熱模型

透過這種方式追蹤散熱路徑，演算法可以預測在即將到來的音訊峰值期間溫度上升的速度，以及在音訊停頓期間冷卻的速度。此估計值會提供給功率控制器，由其持續且不間斷地執行音訊訊號的安全操作限制。當估計的音圈溫度接近喇叭的 $T_{\max}$ 時，控制器會降低允許的功率限制，以保護喇叭免於過熱。當喇叭在音訊較弱的片段冷卻時，控制器則會允許向喇叭輸出更高的功率。

熱保護演算法根據熱控制器預測的功率限制來控制音訊訊號，應用平滑的寬頻增益衰減，降低傳輸到喇叭的整體均方根 (RMS) 功率，使音圈能夠冷卻，而不會產生突發且可察覺的音量下降。這種增益衰減採用較慢的起動與釋放時間；由於人類聽覺對整體音量的逐漸變化較不敏感，因此衰減過程會無縫地融入背景中，進而保留音訊的感知動態。請參閱 圖 5。

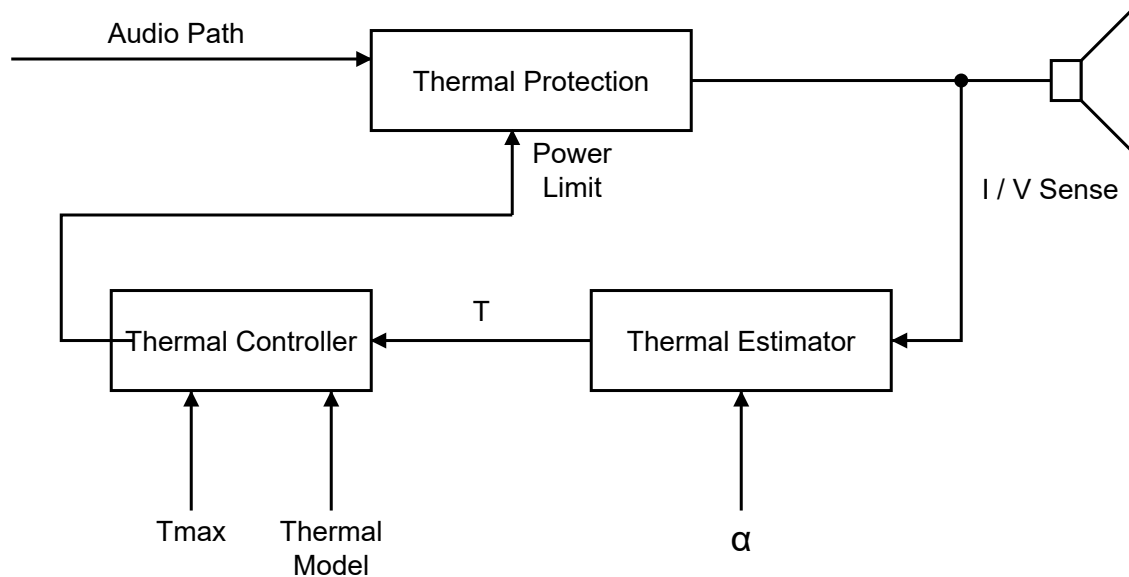


圖 5. 閉合迴路溫度保護

在 圖 6 中，藍色曲線代表智慧型放大器的預估溫度，而紅色線條則表示 $T_{\max}$ 限制。放大器會動態調變音訊訊號，以確保喇叭始終處於可靠的溫度範圍內（並預留一定的空餘空間以應對 IV 感測器的誤差）。

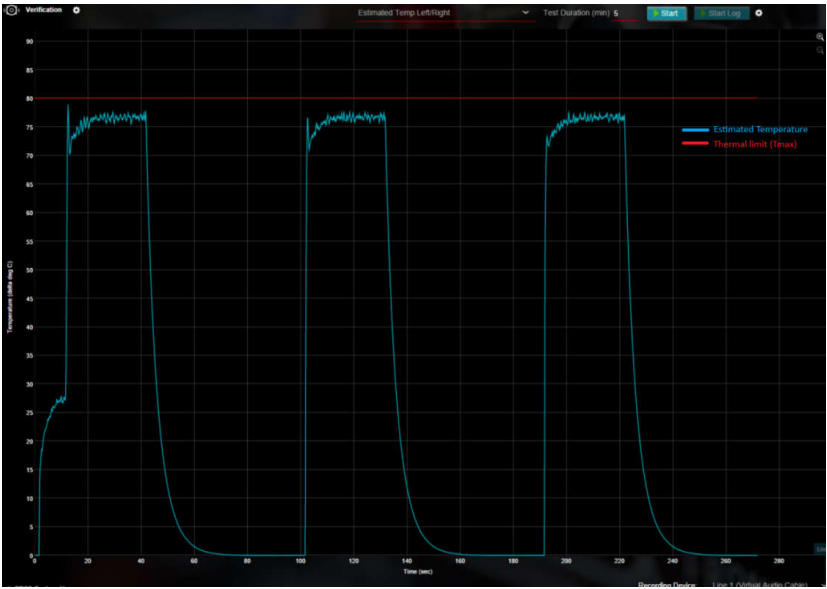


图 6. 智慧型放大器溫度估算與 T_{max} 限制的比較

位移保護演算法

與處理緩慢變化的熱質量和均方根 (RMS) 功率的熱保護不同，位移保護具有高度的瞬變性。喇叭振膜可能在不到一毫秒的單個波形週期內，從靜止狀態達到最大過位移。

由於無法在智慧型手機內部安裝實體雷射位移感測器來追蹤振膜運動，智慧型放大器需仰賴喇叭力學的數學模擬。這是基於換能器的 Thiele-Small 參數與線性狀態空間模型。請參閱 图 7 和 表 1。

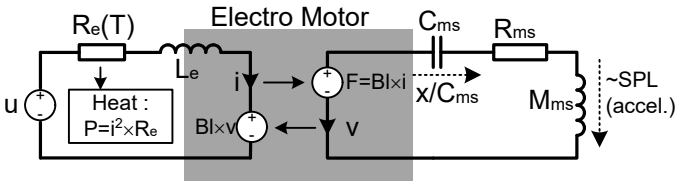


图 7. 喇叭的電動勢模型

電動勢參數	說明
R_{ms}	機械阻尼係數
M_{ms}	機械質量
C_{ms}	機械順從性
Bl	力因數
R_E	音圈的 DC 電阻
L_E	音圈電感
u	放大器電壓
i	音圈電流
v	振膜速度
F	磁場中的機械力
x	磁位移

表 1. 喇叭電動勢模型的主要參數

該演算法利用即時電流與電壓資料，計算由喇叭運動產生的反電動勢 (back-EMF)。在結合反電動勢資料與喇叭「數位分身」模型後，數位訊號處理器 (DSP) 會執行觀測器迴路（例如歸一化最小均方法濾波器），以即時更新模型。喇叭模型透過位移預測電壓轉位移濾波器，計算振膜的瞬時物理位移 (方程式 2)：

$$Z_{exc} \left(s \right) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{Bl}{M_{ms} R_E} \times \frac{1}{s^2 + s \times \left(\frac{R_{ms} + \frac{Bl^2}{R_E}}{M_{ms}} + \frac{1}{M_{ms} C_{ms}} \right)} \quad (2)$$

前瞻式限制器

當低頻低音暫態（例如小鼓擊打或電影中的爆炸聲）可能導致振膜位移超過其 X_{max} ，位移保護演算法會立即採取具針對性的應對措施。透過短暫的數位延遲緩衝（通常為幾毫秒），DSP 能夠在危險峰值實際到達放大器階段之前先行偵測，使演算法有足夠的時間對該特定波形週期進行精確的瞬時峰值衰減。請參閱 圖 8。

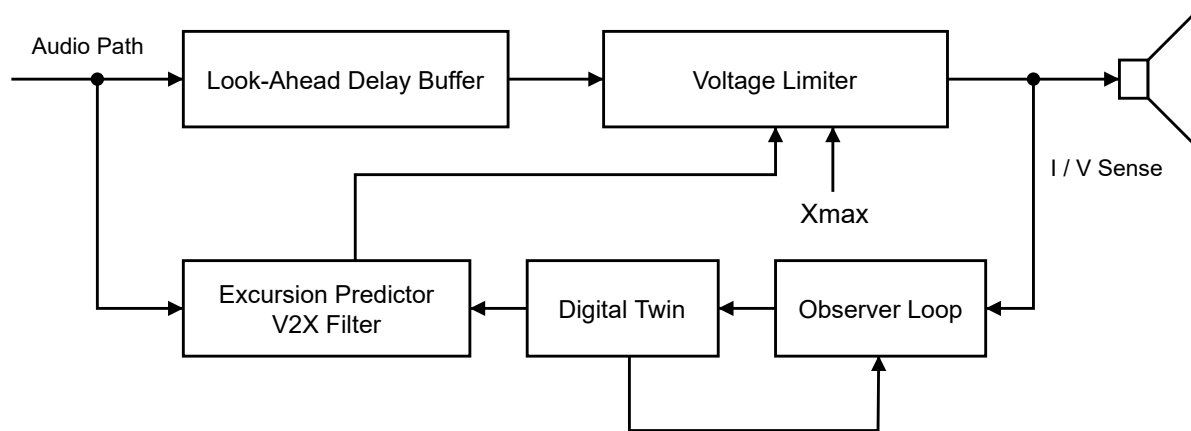


圖 8. 閉合迴路位移保護

在 圖 9 中，藍色曲線代表智慧型放大器的預估位移，而紅色線條則表示 X_{max} 限制。放大器會動態調變音訊，以確保喇叭始終保持在可靠的位移限制範圍內。

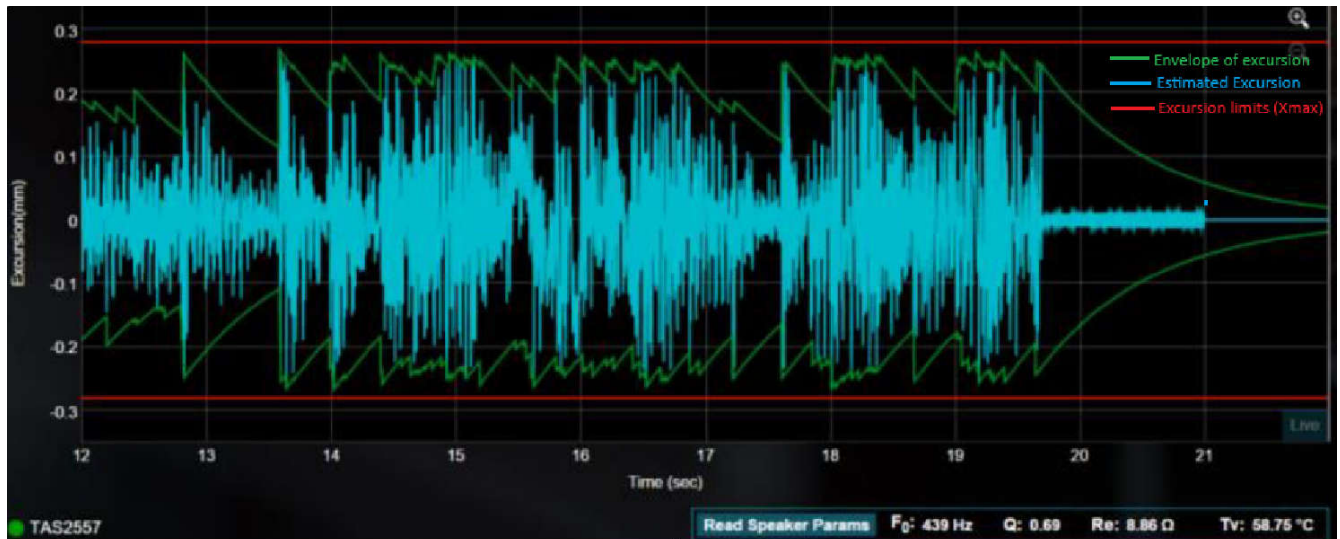


图 9. 相對於 X_{max} 限制的即時位移追蹤

整合音訊調校鏈

傳統音訊設計通常將等化器 (EQ) 與動態範圍壓縮器 (DRC) 作為強制的限制工具，以確保微型喇叭的安全；與之不同的是，智慧型放大器架構能實現音訊號鏈真正的藝術化調音。例如，調音工程師可以使用參數化 EQ 大幅提升低頻（低音擴展），使微小的智慧型手機喇叭聽起來像是體積更大的音箱。EQ 還能平滑響應峰值，以最佳化人聲清晰度。

智慧型放大器還採用與其保護模型一致的多頻段 DRC，將音訊劃分為獨立的低、中、高頻段。設計人員可以針對中高頻段進行最佳化，以實現最大的感知響度、清脆的對話以及寬廣的空間成像感。低頻段則與振幅模型緊密結合，根據振膜的實際物理位移提供最佳的低音響應。

智慧型放大器透過在安全範圍內最大化喇叭輸出，增強了響度與頻率響應，並在硬體性能、設計與可靠性方面展現優勢。具體優勢包括：

- 延伸低頻響應：智慧型放大器不再使用靜態硬體濾波器永久削減低音，而是採用智慧滑動式低音擴展策略。在低音量時，低音會延伸至更深的低頻。隨著音量增加，前瞻式限制器僅在必要時啟動以防止過度位移，進而在所有音量等級下保留最大可能的低音存在感。
- 元件最佳化與空間節省：由於保護功能由軟體處理，產品設計師可以選用更小、更薄的喇叭模組，進而在緊密的裝置機殼中騰出空間，用於容納更大的電池、先進的相機感測器或實現更纖薄的產品外型。
- 近乎零的市場返修率：智慧型放大器作為可靠的數位護盾，可防止音圈燒毀與振膜撕裂，進而大幅減少硬體故障，並節省數百萬美元的保固支援成本與市場退貨索賠。

图 10 顯示響度與頻率響應的對比，比較了智慧型放大器與傳統放大器。

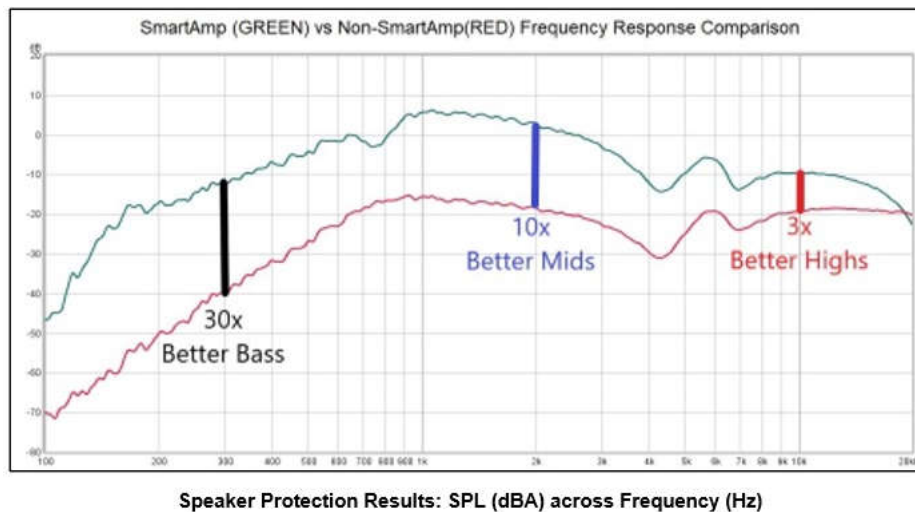


图 10. 智慧型放大器與傳統非智慧型放大器的響度與頻率響應比較

結論

透過將被動安全邊際替換為軟硬體協同驅動的主動監測，智慧型放大器彌合了脆弱微型聲學元件與消費者對強勁、高傳真音質需求之間的鴻溝。藉由即時電流與電壓感測、非線性熱能與機械建模以及音訊工程，這些系統成功地將微型喇叭推向其物理極限。最終，新一代的智慧型手機、筆記型電腦與智慧家庭裝置，能在維持元件可靠性的同時，呈現出極其響亮、豐富且飽滿的音效。

作者簡介

Aditya Sundar 是德州儀器消費性音訊放大器與觸覺回饋產品的系統工程師，在該公司任職超過 11 年。他曾擔任類比設計經理。Sundar 擁有印度果阿比拉理工學院 (Birla Institute of Technology & Science, Goa) 的電子與儀表工程學士學位。他專精於混合訊號 D 類音訊訊號鏈設計，並廣泛投入於混合訊號升壓型 D 類音訊放大器、壓電驅動器及喇叭保護技術的研究。

Supriyo Palit 是德州儀器消費性音訊放大器與觸覺回饋產品的系統工程師，在其 30 年的從業生涯中，有超過 27 年任職於德州儀器。他擁有印度班加羅爾印度理工學院 (Indian Institute of Science in Bangalore) 的電子通訊研究所學位。他的工作重點在於音訊訊號處理、喇叭保護技術、音訊電源管理、觸覺回饋以及語音演算法。

誌謝

作者感謝 Vallabha Hampiholi、Nilendra Gadre、Michael Kim、Jasjot Chadha 與 Mashkurahmed Badebade 在本文開發過程中所提供的技術貢獻。

其他資源

- 請參閱「[CES 2015 智慧型放大器簡報](#)」。
- 請參閱應用報告《[智慧型放大器調諧指南](#)》、《[智慧型放大器快速入門指南](#)》和《[智慧型放大器開發入門](#)》。

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。

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.
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