# 超越极限：智能音频放大器如何动态提升微型扬声器声音

**Supriyo Palit**
Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

**Aditya Sundar**
Systems engineer, consumer audio amplifiers and haptics

## 简介

从轻薄设备中提供响亮、沉浸式的声音具有挑战性，因为微型扬声器面临严格的响度上限。为防止高压导致音圈烧毁或振膜撕裂，设计人员传统上将峰值音量限制在远低于扬声器额定功率的水平，从而限制了可实现的声压级 (SPL)。这一限制也影响蓝牙设备和条形音箱中较大的扬声器。智能音频放大器通过将高精度 IV 检测模数转换器 (ADC) 前端与实时 DSP 和保护算法融合来解决这一问题。通过在安全区内短时间智能过驱动扬声器，智能放大器使硬件达到其真实物理极限，提供高 8dB 至 10dB 的感知响度和更深沉的低音。

## 微型扬声器脆弱性的物理原理

一个标准微型扬声器由悬置于磁场中的音圈组成，音圈连接在振膜（或锥盆）上，并由悬置系统固定。当电信号通过音圈时，会产生电磁力驱动锥盆运动，使空气振动从而产生声音。请参阅**图 1**。

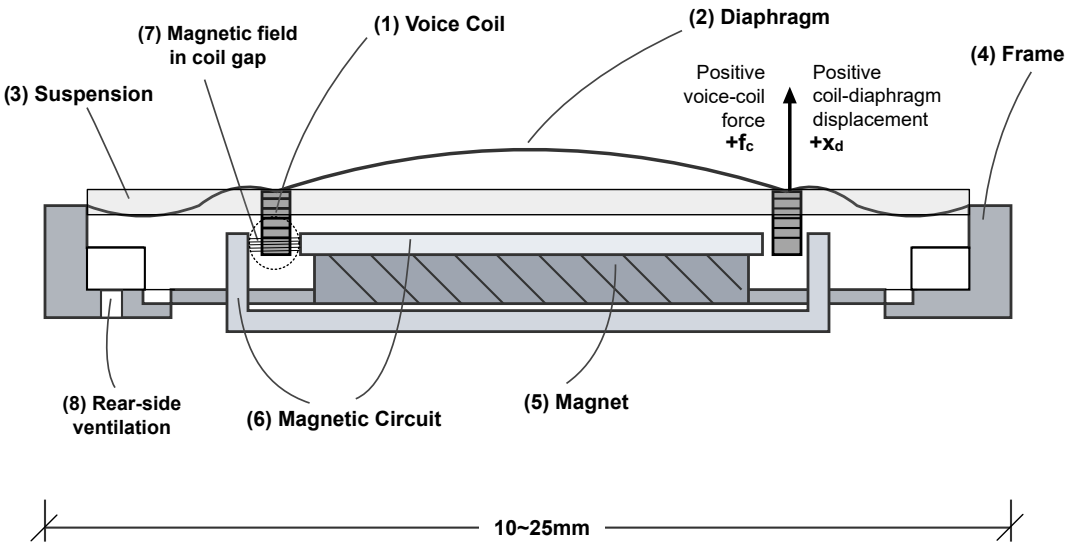



***图 1.** 微型扬声器构造*

当工程师提高这些微小元件的音频输出以产生更响亮的声音时，会遇到两种灾难性失效机制：热过载和机械过位移。

从热学角度看，扬声器效率极低，95% 至 99% 的输入电能变成热量而非声音。因此，持续的高压信号可能使音圈超过其额定温度 ($T_{max}$)，熔化导线绝缘层并导致电气短路。从机械角度看，高音量下产生低频需要大的锥盆位移；如果驱动电压使

锥盆超过其物理行程极限 ($X_{max}$)，悬置系统可能被拉伸超过弹性极限，使音圈撞击磁体背板（触底），或使振膜从折环上撕裂，导致失真、嗡嗡声或完全声学失效。

## 传统与智能音频设计方法对比

在传统音频设计中，工程师将峰值音频功率限制在扬声器的连续额定功率以确保安全。这种静态电压上限迫使整个信号降至防御性下限，导致音量低、低音弱。

智能放大器持续监测扬声器状态并实时调整其输出。通过准确了解音圈有多热，以及振膜在任意给定毫秒内移动了多远，智能放大器可以安全地用高压峰值驱动扬声器，而在传统系统下这会瞬间损坏扬声器。

智能放大器算法动态调制响度，通过确保扬声器估计位移保持在 $X_{max}$ 以内、估计音圈温度保持在 $T_{max}$ 以内，实现高 8dB 至 10dB 的峰值响度 SPL。该算法仅在扬声器实际接近真正的断裂点时才会回拉能量。请参阅**图 2**。

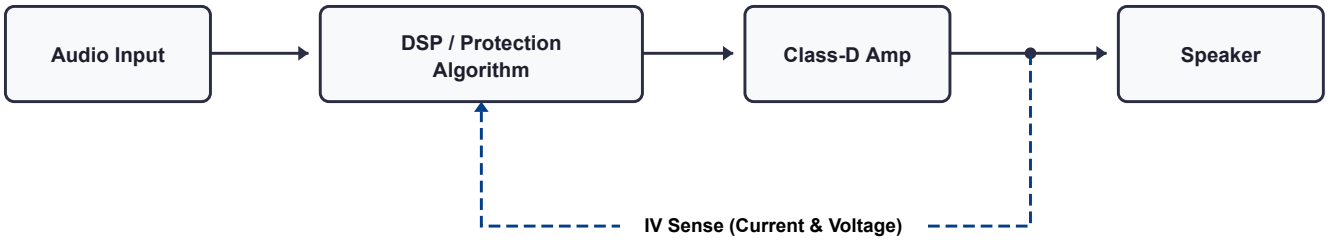



***图 2.** 智能放大器系统架构*

专用检测硬件与 DSP 上运行的声学软件模型一起构成实时反馈环路，使放大器能够即时调整其输出。

## 集成式 IV 检测电路

智能放大器利用电流和电压 (IV) 检测电路。集成式模数转换器 (ADC) 捕获施加到扬声器上的精确电压和扬声器所抽取的精确电流后，系统实时计算扬声器的电阻抗 (Z = V / I)。由温度和机械运动驱动的动态阻抗变化，为保护算法提供原始传感输入。

ADC 的转换范围被设定为确保能够检测通过放大器播放的满量程音频信号。高精度硬件确保扬声器响度得到最大化利用。任何电流或电压检测误差都会直接损害响度，因为扬声器保护算法需要同样多的额外误差保护裕量，才能确保永不突破 $X_{max}$ 和 $T_{max}$ 限制。

典型的 ±0.35% 误差会导致通过 IV 检测估计音圈温度时产生 ±1°C 的误差。德州仪器 (TI) 的 **TAS2781**、**TAS2783** 和 **TAS2573** ADC 在 IV 检测中实现高精确度，从而将温度和位移的保护裕量需求降至最低。高信噪比 (SNR) 和动态范围 (DNR) 可避免检测误差，并通过扬声器高保真地重现音频内容。请参阅**图 3**。

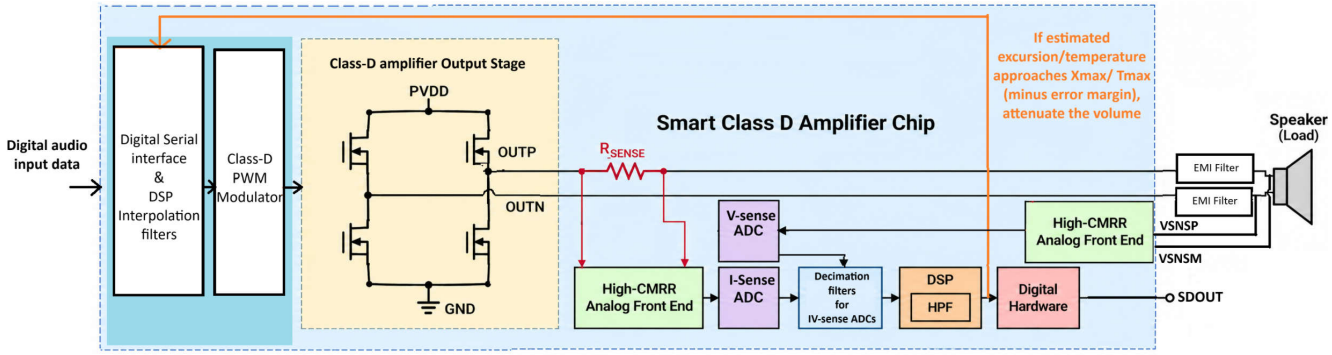



***图 3.*** *智能放大器中软硬件的协同工作*

器件的 VSNSP 和 VSNSN 引脚检测扬声器两端电压。这些是检测线，必须尽可能靠近扬声器端子连接以确保测量准确。

由于 D 类放大器中扬声器两端电压是高压开关节点，IV 检测 ADC 需要高共模抑制比的模拟前端电路，从开关电压中提取音频内容，并将高压转换为较低电压以进行精密检测。Σ-Δ 或逐次逼近寄存器 ADC 电路检测该低压音频内容，以提取精确的 IV 信息。ADC 输出通常处于高得多的频率，例如 3MHz，因为数据 ADC 被过采样以实现高 SNR 和 DNR。ADC 输出数据被抽取降采样至音频速率 (48KSPS)，并进行高通滤波以去除直流分量（如有），然后供 TAS2781、TAS2783 或 TAS2573 集成式 DSP 中运行的 SmartAmp 算法使用。

将 I 和 V 音频通道相位匹配到高精度（在 <±1µs 以内）可实现扬声器阻抗的高精度实时估计。IV 检测数据也可由用户监测，并通过 TDM SDOUT 引脚或 Soundwire 数据接口输出。

DSP 是智能放大器的大脑。它承载扬声器保护算法，运行扬声器的复杂数学模型以及实时预测滤波器。DSP 充当守门人，根据 IV 检测硬件提供的遥测数据即时修改输入数字音频流。

为使智能放大器工作，必须针对其所驱动的特定扬声器进行校准。音频工程师使用专用诊断工具在声学腔中对目标微型扬声器进行表征。他们测量其热阻 ($R_E$)、谐振频率 ($f_0$)、机械阻尼 ($Q_{ms}$) 和磁力强度 (Bl)。将这些参数编程到 DSP 中，作为扬声器模型，以创建定制的安全包络。TI 的 PurePath™ Console 3 音频工具套件提供校准、建模和终端系统调优支持。

## 温度保护算法

智能放大器中的热保护依赖于金属导体电阻随温度可预测变化的物理定律。这称为电阻的温度系数 (α)。

随着音圈升温，其 $R_E$ 线性增加，智能放大器的 IV 检测硬件从测得阻抗中分离出该电阻。**方程式 1** 求解音圈的内部温度：

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

其中 $R_E$ (T) 是当前时间 T 测得的电阻，$R_E$ ($T_0$) 是工厂校准的基线电阻，α 是音圈材料的电阻温度系数（如铜）。

这消除了对笨重、响应缓慢的物理热敏电阻的需求。

该测量仅周期性调用，是检查点读数而非连续数据流，原因有二：在低输出电平或低到高功率转换期间（噪声受限信号、建立误差和偏移），它不太可靠；持续运行检测 ADC 及其模拟前端会消耗不必要的功率，尤其是在电池供电、低音量聆听时。

## 热建模和控制

由于 $R_E$ 测量仅周期性到达，算法需要一种在测量间隔期间连续获知音圈温度的方法。解决方案是预测性热模型——一个多级电阻-电容热网络（参加见**图 4**）。该模型模拟热量从音圈传递到扬声器磁体结构，最终传递到设备机箱和环境空气的过程，并以完整控制环路速率运行。每次新的基于 IV 检测的 $R_E$ 读数到达时，重新锚定模型，并校正自上次检查点以来累积的任何漂移。

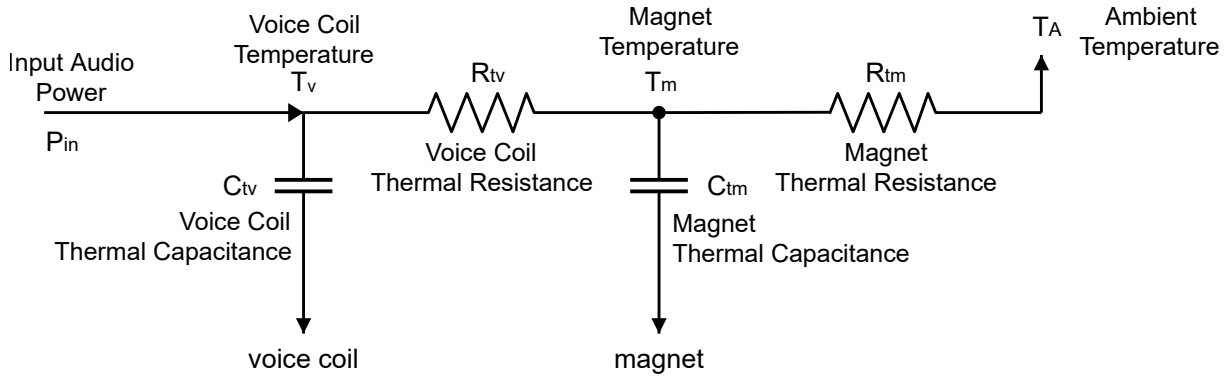



***图 4.** 扬声器预测性热模型*

通过以这种方式跟踪散热路径，算法可以预测在即将到来的音频峰值期间温度上升的速度，以及在暂停期间冷却的速度。该估计值馈入功率控制器，该控制器连续且无中断地执行音频信号的安全工作限制。当估计音圈温度接近扬声器的 $T_{max}$ 时，控制器降低允许限值以保护扬声器免于过热。当扬声器在柔和音频段期间冷却下来时，控制器将允许向扬声器输送更高功率。

热保护算法基于热控制器预测的功率限制来控制音频信号，施加平滑的宽带增益衰减，降低输送到扬声器的总均方根 (RMS) 功率，使音圈能够冷却而不会出现突然、可听见的音量下降。这种增益衰减使用缓慢的启动和释放时间；由于人耳对整体音量的逐渐变化不太敏感，衰减无缝融入背景，保持音频的感知动态。请参阅**图 5**。

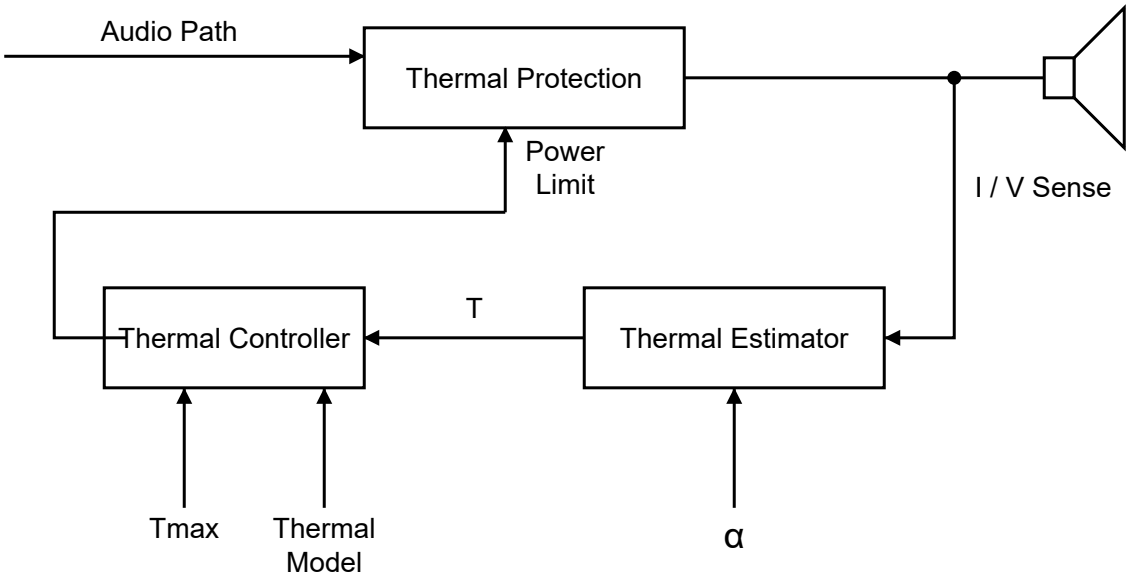



***图 5.** 闭环温度保护*

在图 6 中，蓝色曲线表示智能功放的估计温度，而红线表示 $T_{max}$ 限制。放大器动态调制音频，以确保扬声器始终处于可靠的温度限制内（为 IV 检测误差留出一些余量）。

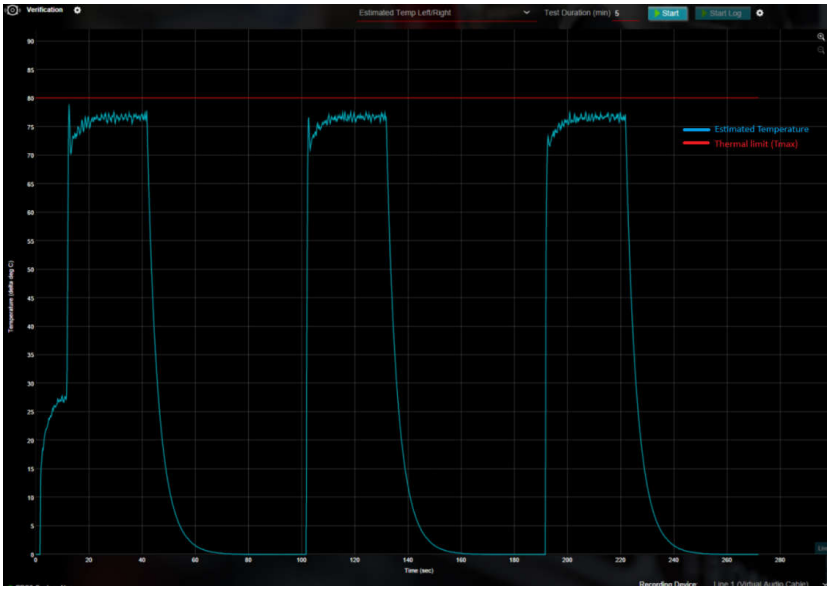



*图 6. 智能放大器温度估算与 $T_{max}$ 限制间的关系*

## 位移保护算法

与处理慢速热质量和 RMS 功率的热保护不同，位移保护具有高度快速变化的特性。扬声器锥盆可以在一个波形周期内、在几分之一毫秒内从静止运动到最大过位移。

由于不可能在智能手机内部放置物理激光位移传感器来跟踪扬声器锥盆运动，智能放大器依赖对扬声器力学的数学仿真。这基于 Thiele-Small 参数和传感器的线性状态空间模型。请参阅图 7 和表 1。

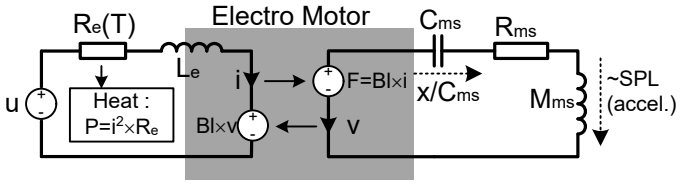



*图 7. 扬声器的电动势模型*

| 电动势参数 | 说明 |
|---|---|
| $R_{ms}$ | 机械阻尼系数 |
| $M_{ms}$ | 机械质量 |
| $C_{ms}$ | 力顺 |
| Bl | 力系数 |
| $R_E$ | DC 音圈电阻 |
| $L_E$ | 音圈电感 |
| u | 放大器电压 |
| i | 音圈电流 |
| v | 振膜速度 |
| F | 磁场中的机械力 |

| 电动势参数 | 说明 |
|---|---|
| x | 磁位移 |

*表 1. 扬声器电动势模型中的主要参数*

该算法使用实时电流和电压数据计算扬声器运动产生的反电动势 (back-EMF)。将反电动势数据与“数字孪生”扬声器模型结合后，DSP 运行观测器环路（例如归一化最小均方滤波器）以实时更新模型。扬声器模型用于通过位移预测器电压到位移滤波器（**方程式 2**）计算锥盆的瞬时物理位移 (x)：

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

## 前瞻限幅器

如果低频低音瞬态（例如军鼓敲击或电影中的爆炸声）可能将锥盆推过其 $X_{max}$，位移保护算法会部署快速、有针对性的对策。一个短暂的数字延迟缓冲区（通常为几毫秒）使 DSP 能够在危险峰值实际到达放大器级之前看到它，从而给算法时间对该特定波形周期施加精确的瞬时峰值衰减。请参阅**图 8**。

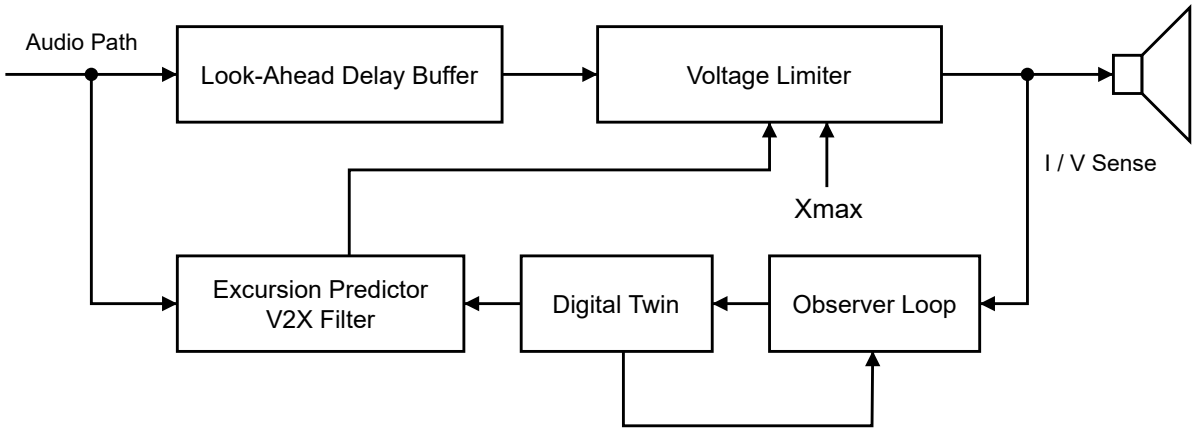



*图 8. 闭环位移保护*

在**图 9** 中，蓝色曲线表示智能放大器的估计位移，而红线表示 $X_{max}$ 限制。放大器动态调制音频，以确保扬声器始终处于可靠的位移限制内。

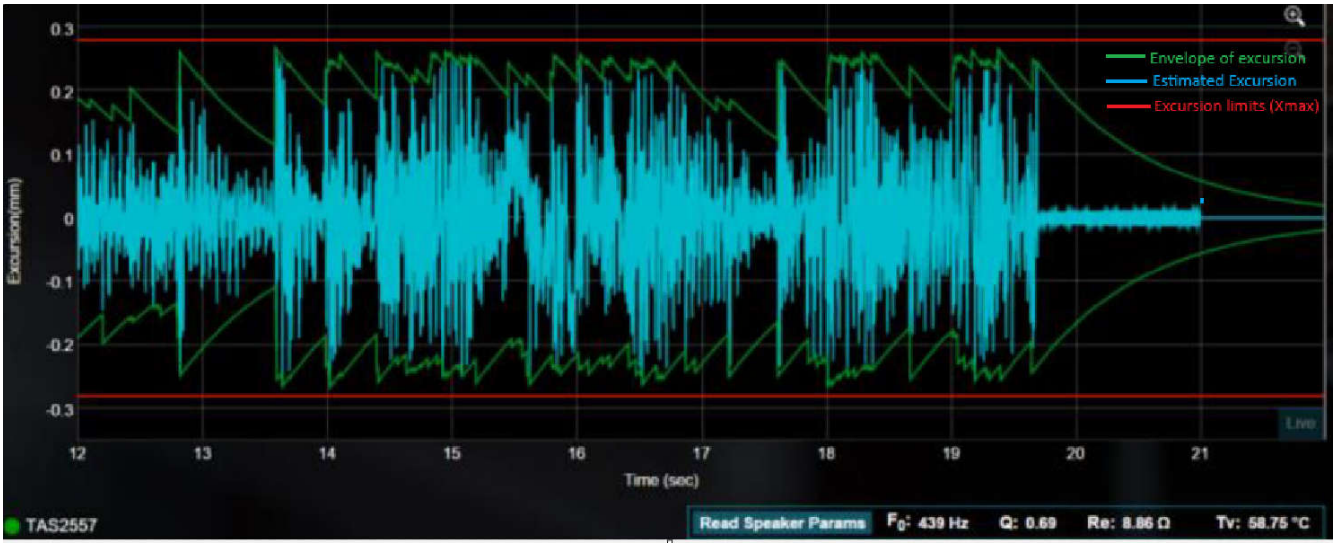



***图 9.*** *相对于 $X_{max}$ 限制的实时位移跟踪*

## 集成音频调优链

与传统音频设计使用均衡器 (EQ) 和动态范围压缩器 (DRC) 作为激进限制工具来确保微型扬声器安全不同，智能放大器范式支持对音频信号链进行真正的艺术性调优。例如，调优工程师可以使用参数均衡器大幅提升低频（低音扩展），使微小的智能手机扬声器听起来像大得多的声学箱体。均衡器还可以压平响应峰值，以优化人声清晰度。

智能放大器还使用与其保护模型对齐的多频段 DRC，将音频划分为不同的低频、中频和高频段。设计人员可以优化中频和高频段，以实现最大感知响度、清晰对白和宽广空间成像。低频段与位移模型紧密耦合，以便基于锥盆的实际物理位移提供最佳低音响应。

智能放大器通过安全地最大化扬声器输出来增强响度和频率响应，在硬件性能、设计和可靠性方面提供优势。具体优势包括：

- 扩展低频响应：智能放大器不采用静态硬件滤波器永久衰减低音，而是使用智能滑动式低音扩展策略。在低音量下，低音可深入扩展到更低频率。随着音量增加，前瞻限幅器仅按防止过位移所需的程度激活，从而在所有音量水平下保留最大可能的低音存在感。
- 元件优化与空间节省：由于保护由软件处理，产品设计人员可以选用更小、更薄的扬声器模块，从而在紧凑的设备外壳内释放空间，用于更大电池、先进摄像头传感器或更纤薄的产品外形。
- 接近零的现场返修率：智能放大器作为可靠的数字屏障，防止音圈烧焦和振膜撕裂，从而大幅减少硬件故障，并在保修支持成本和现场返修索赔方面节省数百万。

**图 10** 展示了响度和频率响应的比较，对比智能放大器与传统放大器。

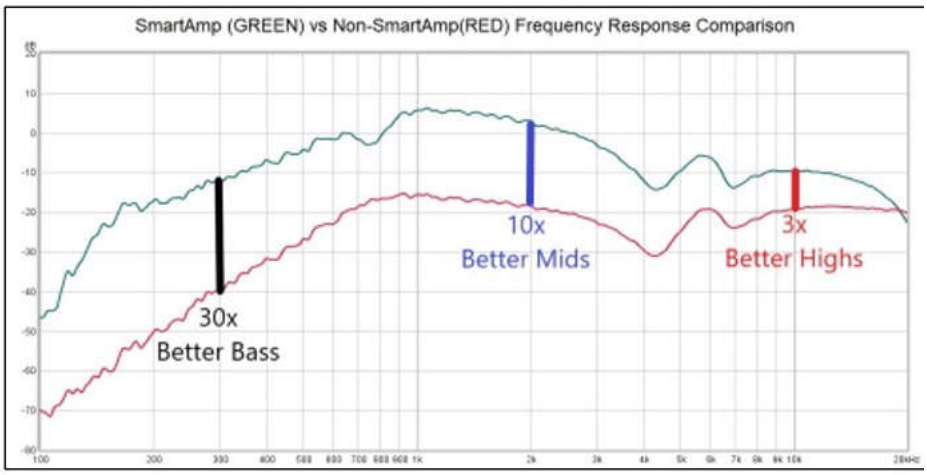



***图 10.** 智能放大器与传统非智能放大器的响度和频率响应比较*

## 结语

通过用主动的、软硬件协同驱动的监测取代被动安全裕量，智能放大器弥合了脆弱微型声学器件与消费者对强劲、高保真声音需求之间的差距。通过实时电流和电压检测、非线性热学和力学建模以及音频工程，这些系统成功地将微型扬声器推至其绝对物理边界。其结果是新一代智能手机、笔记本电脑和智能家居设备听起来异常响亮、丰富和饱满，同时保持元件可靠性。

## 关于作者

Aditya Sundar 是消费音频功放和触觉产品的系统工程师，已在德州仪器工作超过 11 年。他此前担任模拟设计经理。Sundar 拥有果阿 Birla 理工学院电子与仪器工程学士学位。他专长于混合信号 D 类音频信号链设计，并广泛从事混合信号升压 D 类音频放大器、压电驱动器和扬声器保护技术工作。

Supriyo Palit 是德州仪器消费音频放大器和触觉产品的系统工程师，在他 30 年行业生涯中有超过 27 年在德州仪器度过。他拥有班加罗尔印度科学学院电气通信研究生学位。他的工作聚焦于音频信号处理、扬声器保护技术、音频功率管理、触觉和语音算法。

### 鸣谢

作者谨感谢 Vallabha Hampiholi、Nilendra Gadre、Michael Kim、Jasjot Chadha 和 Mashkurahmed Badebade 在本文开发过程中做出的技术贡献。

## 其他资源

- 查看这份**来自 CES 2015 的智能放大器演示**。
- 阅读应用报告“**Smart Amp 调优指南**”、“**Smart Amp 快速入门指南**”和“**Smart Amp 开发入门**”。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated

# 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月