Application Note

SmartAmp 扬声器保护 — 简明指南

Supriyo Palit, Jasjot Singh Chadha

摘要

手机、平板电脑和笔记本电脑中使用的小型量产扬声器，尽管在振膜位移和功率承受能力方面都受到物理限制，仍需要呈现饱满、有力的声音。如果驱动扬声器超出这些限值，就会造成损坏 — 可能是振膜位移过大，也可能是音圈过热。因此，制造商通常采用一个固定的最坏情况限值来防范这两种故障模式。即使扬声器尚未接近危险状态，这种做法也会使其性能无法得到充分发挥。本文介绍 TI 的智能放大器扬声器保护技术。该技术通过持续实时追踪扬声器的实际振膜位移和温度，取代静态限值，使扬声器能够达到自身的安全限值，而不必受固定的最坏情况限值限制。这样一来，无需增加硬件，也不会增加风险，尺寸更小、成本更低的扬声器就能呈现更响亮、动态表现更出色的声音，尤其是低音表现。

内容

1 简介....2
2 扬声器的工作原理....2
3 智能放大器监测....3
4 智能放大器保护....3
4.1 位移保护....3
4.2 过热保护....4
5 生产线校准....6
6 建模精度....7
7 端口堵塞情况下的可靠性....7
8 智能放大器：完整系统....8
9 系统成本节约....9
10 总结....9
11 参考资料....9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

现代手机、平板电脑和笔记本电脑需要通过体积非常小的扬声器（有时甚至只比硬币大一点）呈现响亮、清晰且具备出色低音表现的声音。这是一个颇具挑战性的问题，因为扬声器的声音输出与振膜的实际位移量以及音圈能够承受的电功率密切相关。与大型扬声器相比，许多工业和个人电子终端设备中使用的小型扬声器，在上述两个方面都存在固有的限制。让小型扬声器发出更强劲声音的最直接方法，就是向其输入更多电功率，但功率过大就会损坏扬声器。

小型扬声器可能因两种截然不同的原因而受损：

1. *振膜位移过大*：振膜（实际振动并产生声音的部件）的设计位移范围有限，向任一方向移动都不能超出这一范围。如果振膜位移超出这一范围，就可能撞击框架、撕裂悬边，或发生永久性变形。这类损坏通常是突然发生的机械性损坏，类似于将弹簧拉伸至超出其自然活动范围。
2. *音圈过热*：驱动振膜的线圈（即“音圈”）在有电流流过时就会发热，其原理与烤面包机中的加热元件完全相同。持续的大音量意味着持续的电流，也就意味着持续的发热。热量过高会熔化导线的绝缘层或固定音圈的胶黏剂，导致扬声器损坏。

只需将最大音量限制在足够低的水平，就能避免这两种损坏，但即使扬声器尚未接近危险状态，这种做法也会限制其播放大音量内容的能力。智能放大器的作用，就是以智能动态调节取代这种保守的固定限值，使扬声器在条件允许时能够达到其实际安全限值，并仅在确有必要时才降低输出。

2 扬声器的工作原理

在介绍智能放大器如何保护扬声器之前，值得先了解扬声器的本质：它实际上是一种小型专用电机。



图 2-1. 扬声器如何将电信号转换为声音

放大器将变化的电信号传输至位于固定磁体内部的线圈。每当电流流经磁场中的导线时，都会基于使电动机旋转的相同原理，在导线上产生物理推拉力 — 在这种情况下，该力会推动线圈做直线运动，而不是带动轴旋转。振膜与线圈牢固粘接，因此振膜也会受到相同的作用力，从而推动和拉动其前方的空气。这些运动的空气就是我们听到的声音。

电信号的两个特性直接对应声音的两个特性：信号来回变化的速度决定音高（频率），而线圈摆动的幅度决定响度（振幅）。这就是为什么小型扬声器难以在保证安全的情况下再现响亮、低沉的低音：在相同的感知响度下，低音需要振膜在每个周期内进行比高音更长距离的物理运动。如此大的振膜位移存在风险，可能导致扬声器过度驱动并造成损坏；但固定的安全裕量又会使听众无法充分享受低音效果。

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 智能放大器监测

智能放大器无法直接测量振膜的位移量，也无法直接测量音圈的温度。量产小型扬声器内部没有足够的空间安装这类传感器，而且增加传感器既不切实际，也会增加成本。相反，智能放大器会利用在放大器端能够以较低成本持续测量的两个参数：发送至扬声器的电压和流经扬声器的电流。通过监测电压和电流，并结合对特定扬声器发声原理的了解，智能放大器便能通过数学计算推断出两个无法直接测量的量：

- 振膜当前的移动距离（即振膜位移），以及
- 音圈当前的温度。

不同型号的扬声器在振膜运动和升温方式上各不相同：刚度、振膜重量、散热能力及其他物理特性因设计而异，即使是同一生产线制造的不同单元，也可能存在差异。智能放大器会为其驱动的特定扬声器保留一个内部*特性模型*。该模型通过预先表征扬声器建立，并在设备使用过程中持续进行微调。所有这些功能都通过软件实现，并利用放大器内部的检测功能运行，无需外部传感器，也不会增加成本或占用额外空间。

4 智能放大器保护

智能放大器同时采用两种保护策略，因为前面介绍的两种故障模式具有不同的发生和发展特点。过大振膜位移可能在一次持续时间不足一秒的高响度瞬态中发生并造成损坏。相比之下，过热则会在数秒到数分钟内逐渐形成。下文将介绍每种保护机制的工作原理，以及这些机制对于选择标准放大器或智能放大器的客户所带来的优势。

4.1 位移保护



图 4-1. 智能放大器的位移保护如何决定何时降低信号

智能放大器利用扬声器的内部“特性模型”，每秒多次计算：如果输入信号不经调整直接通过，振膜将产生多大的位移。如果这种“预测”的移动将超出扬声器的安全限值，算法只会降低导致该移动的那部分信号 — 实际应用中，通常是频率最低的低音成分，因为它会导致最大的振膜位移。其他所有内容均会完全不受影响地通过，因此听众听到的是声音依然清晰，而不是明显的音量降低。

这里，“*预测*”一词非常重要。由于必须在造成损坏的运动发生之前进行校正，因此音频路径中包含一个极短的内置延迟：信号会暂缓几毫秒输出，同时并行副本用于预测由此产生的运动，并在延迟后的信号最终继续传输之前应用所需的校正。从概念上讲，这类似于汽车的自动制动系统，该系统需要一定的提前量来感知危险，并在碰撞前而非碰撞后进行制动。如果没有这种保护，过驱动的小型扬声器会开始发出嗡嗡声并产生杂音失真，最终可能造成永久性损坏，例如悬边撕裂、振膜变形，或音圈发生物理偏移，导致其与磁体不再对中。

优势：由于低音内容会使振膜产生最大的位移，因此固定的最坏情况安全裕量会产生显著影响。智能放大器会根据扬声器的工作状态持续重新计算该裕量，因此在大多数情况下可以安全地允许更大的低音输出，只有在响亮、低沉的音符可能使振膜位移超过安全限值时，才会恢复使用完整的安全裕量。

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

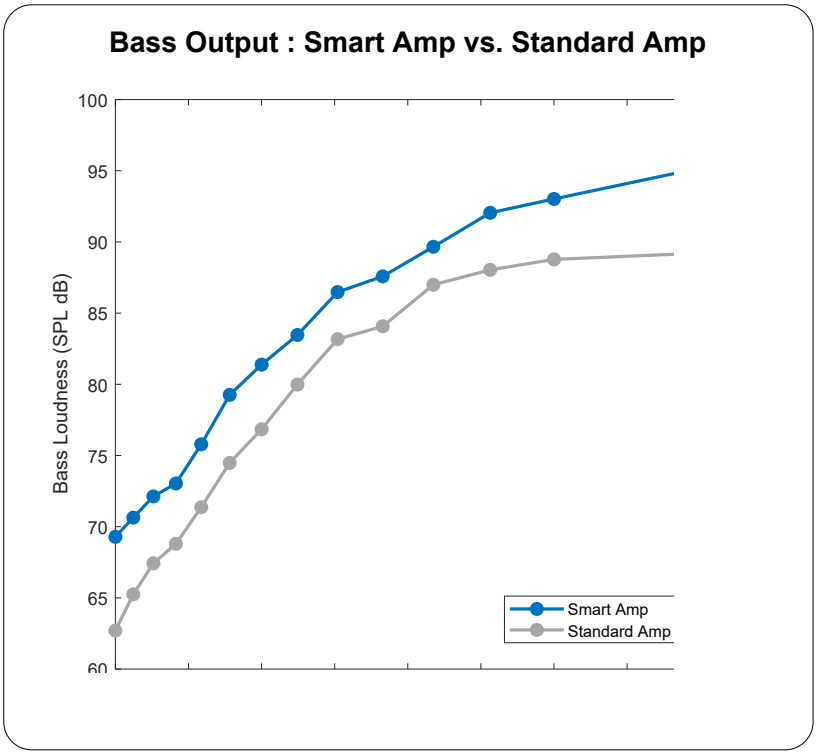

图 4-2. 低音响度与频率：智能放大器与标准放大器对比

上方示例图展示了低频低音区域的情况，其中智能放大器的响度始终高于标准放大器 — 响度采用声压级 (SPL) 测量值，单位为分贝 (dB)。低音本来就是小型扬声器最难实现的响度表现：对于任何给定的振膜尺寸，随着频率降低，SPL 输出会自然衰减，因此即使尚未应用任何安全裕量，小型扬声器在低频端的输出能力就已经最弱。固定的最坏情况安全裕量会进一步带来额外限制，因为在这一频率范围内，振膜位移最大，扬声器的余量也最小。因此，额外增加的低音 SPL 非常有价值：它能够弥补小型扬声器在最难处理的低频范围内的输出不足。额外增加几 dB 的低音余量，就能让小型扬声器在高音量下不再显得单薄，而是依然保持饱满的声音表现。

4.2 过热保护



图 4-3. 智能放大器过热保护如何管理音圈温度

热量的变化规律与运动截然不同。振膜可能在持续数毫秒的单次强烈瞬态信号中就超出其限值，但音圈升温或降温则需要时间 — 至少需要数秒，因为热量必须在相关材料中逐渐积聚或散发。正是由于两者的时间尺度不同，过热保护才不会像开关一样突然切断或接通。它的工作方式更像恒温器：如果估算温度逐渐接近限值，系统就会逐步降低功率；待温度降下来后，再逐步放宽限制，允许更大的功率输出。这种方式使扬声器能够尽可能长时间地以其最高的**安全**电平运行，而不会始终受到保守功率上限的限制。

如果没有这项保护，小型扬声器在持续大音量工作时就可能出现常见故障：声音质量下降、失真逐渐出现；最严重时，音圈绝缘层还会受损。与一次性的强烈瞬态信号不同，这种损坏是永久性的，在密封式消费类设备中无法修复。

其中一个值得关注的细节是：扬声器内部没有任何实体温度传感器，系统究竟如何估算温度。音圈导线的电阻会随着温度升高而以可预测的方式增大。这与白炽灯灯丝的工作原理相同：刚通电时，灯丝温度较低、电阻较小，

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

因此会产生较大的电流浪涌；持续发光一段时间后，灯丝温度升高、电阻增大，电流便趋于稳定。智能放大器会定期注入一个频率极低、幅度小到听众无法察觉的音调，以测量音圈的电阻，并据此推算温度。这是一种间接但可靠的测量方式，无需额外硬件。

优势：过热保护的真正价值在于为峰值信号提供性能余量。标准放大器必须将持续输出功率设定在足够低的水平，以确保扬声器在持续大音量使用时仍然安全，并且始终维持这一功率上限，即使面对扬声器完全能够承受不足一秒的单次强烈瞬态信号，也不会放宽限制。智能放大器会持续追踪音圈温度，因此一旦有可用的热余量，就能立即允许低音冲击或动态峰值信号以全强度通过，同时仍将扬声器的长期平均功率控制在其额定安全限值以内。

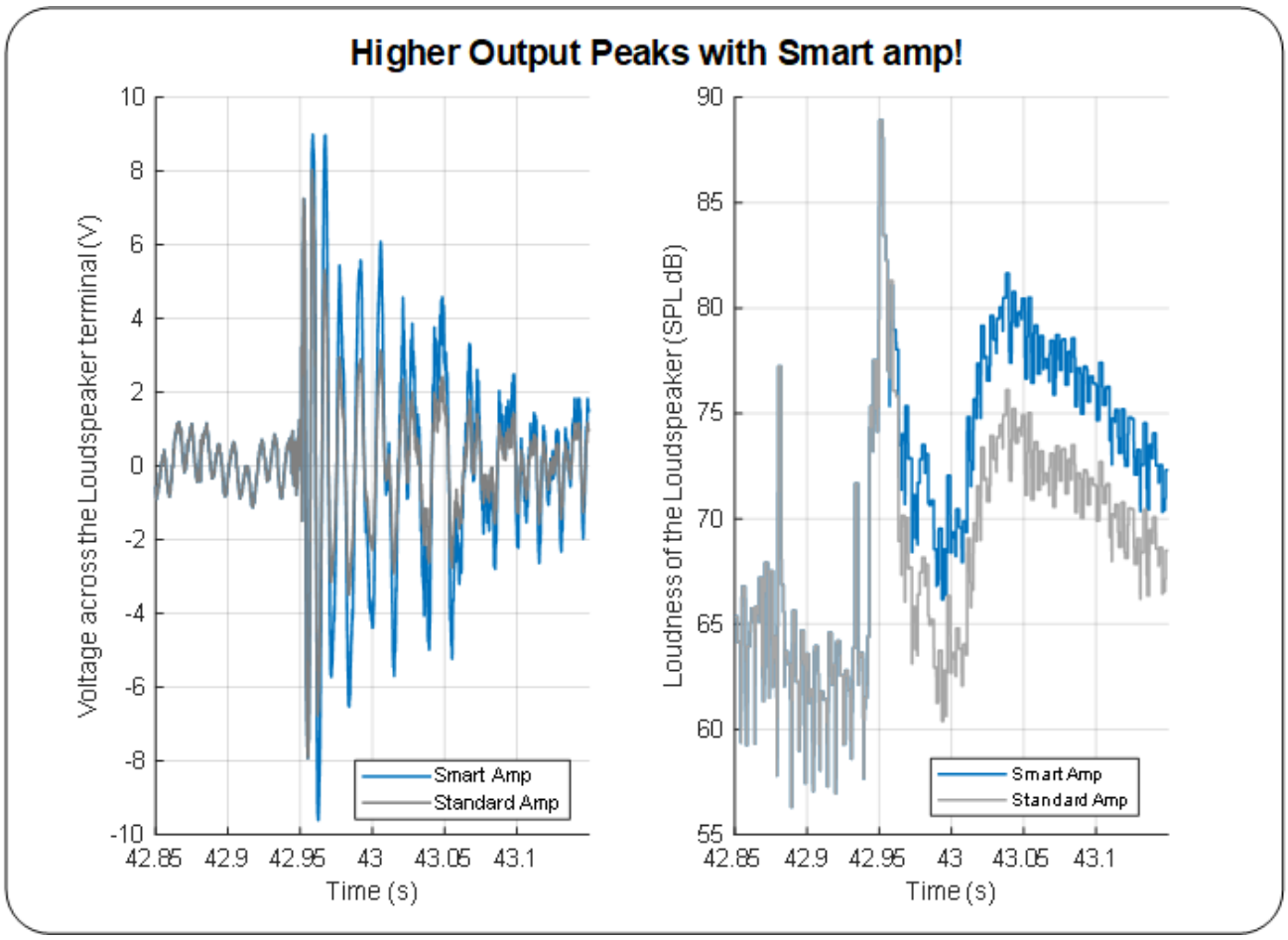

图 4-4. 借助智能放大器实现更高的输出峰值

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

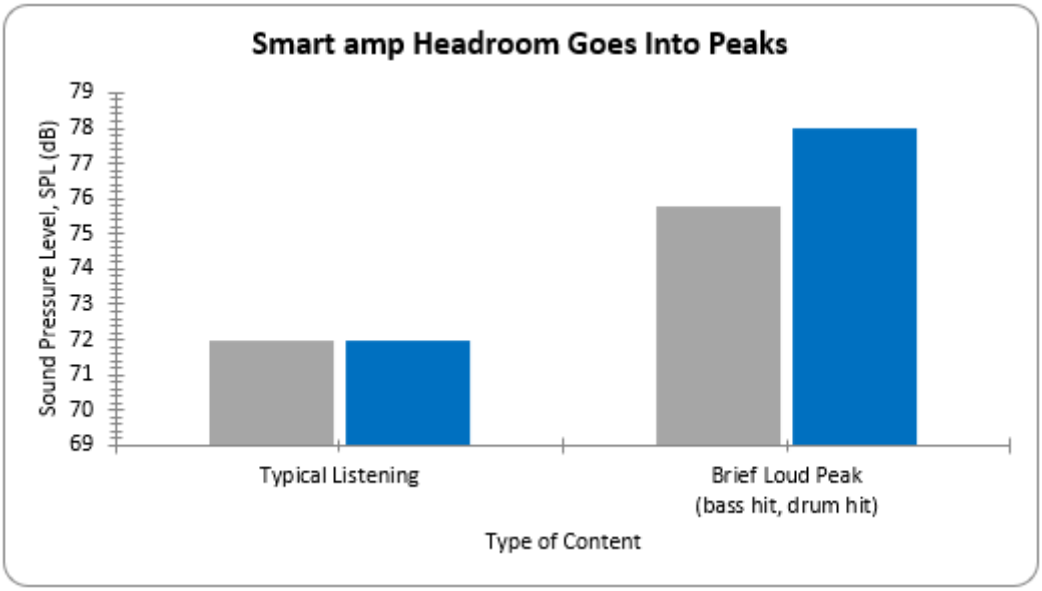

图 4-5. 智能放大器将功率性能余量用于提升峰值输出

上方的示例曲线图和柱状图展示了这一点。在初始阶段，即播放典型音频内容时，标准放大器和智能放大器的输出相同，因为音圈温度远低于安全限值。在约 42.95 秒时，出现一次低音/鼓声瞬态冲击。标准放大器会降低信号强度，以确保不超过固定的保守上限，而智能放大器则允许该瞬态信号以完整强度输出。左侧曲线图显示扬声器端子的输出电压；右侧曲线图显示由此产生的响度声压级 (SPL)。柱状图也展示了相同的对比结果。显然，与标准放大器相比，智能放大器在播放低音瞬态内容时能够保持更高的响度。

在实际使用中，这意味着播放效果更有冲击力、动态表现更出色 — 瞬态信号和低音冲击能够充分展现其力度，同时普通音频内容仍处于安全范围内。只有在真正极端且持续的情况下，系统才会进一步降低输出，例如设备已经连续以大音量播放数分钟。

5 生产线校准

基于电阻的过热保护技术要发挥作用，智能放大器需要了解该特定扬声器音圈的*正常温度* — 即用于测量变化的参考点。没有两个下线的音圈具有完全相同的电阻：导线长度、绕线紧密程度和材料批次等方面正常的细微差异，意味着即使是同一扬声器型号、同一生产批次的产品，其音圈电阻也会略有不同。单一的通用数据手册参考值可能足够接近某些产品的实际情况，但对于其他产品则可能存在明显偏差。

为解决这一问题，每台手机或消费电子设备在交付给客户之前，都会在生产线上进行一次校准。在最终测试期间，每台设备都会在生产环境温度已知且受控的条件下，测量其自身扬声器的电阻。随后，会将该设备特定音圈在已知初始温度下对应的电阻和温度值永久存储在设备内存中，作为该设备专属的参考点。

从那时起，智能放大器在实际使用过程中获取的每次电阻读数都会与该设备自身存储的参考值进行比较 — 这与称重前将厨房秤校零的原理相同。跳过这一步会导致该设备的温度估算始终存在同一方向的偏差：要么过于保守，不必要地降低扬声器的响度；要么过于宽松，使音圈的实际运行温度高于系统估算的温度。

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 建模精度

智能放大器的保护效果取决于扬声器内部特性模型的准确性。但扬声器并非一成不变的设备：正常的制造差异意味着没有两台扬声器完全相同，而且同一扬声器的工作特性也会随着使用时间、温度和整体磨损情况而发生变化。如果内部特性模型在不知不觉中与扬声器的实际物理特性产生偏差，基于该模型构建的预测机制（包括振膜位移估算、温度估算等所有功能）的可靠性就会降低。

智能放大器通过持续进行交叉校验来解决这一问题。它会将内部模型预测的扬声器电气特性与传感电路实际测量的结果进行比较。预测结果与测量结果之间的任何偏差都会被视为误差信号，系统会调整模型的内部参数，尽可能减小该误差。从概念上讲，这与汽车 GPS 导航系统不断利用最新的卫星信号重新核对自身位置的原理相同，而不是在整个行程中始终依赖最初的一次定位结果。通过持续进行小幅校正，系统能够及时更新自身状态，避免细微误差在数周或数月的使用过程中悄然累积。

扬声器的初始特性模型通过以下方式生成：使用测试音调在一系列频率范围内对扬声器进行扫频，测量其电阻抗和机械位移的变化情况，并绘制出一条曲线。该曲线在扬声器的*固有谐振点*附近出现明显峰值，也就是扬声器最容易振动的频率。偏离这一最佳点，无论频率升高还是降低，在相同输入信号下，扬声器的振动幅度都会自然减小。

通过向扬声器施加已知功率，并跟踪其在多次测试脉冲期间的温度升降情况，可以测量扬声器的发热特性。预测结果与上述测量结果相符是智能放大器技术的关键所在：该技术通过实际可测量的参数（电压、电流）推断无法直接测量的物理量（运动、热量），并确保其能够在真实硬件和实际产品中可靠运行，从而保护扬声器。

7 端口堵塞情况下的可靠性

振膜位移保护和过热保护涵盖了扬声器在正常使用过程中发生故障的两种典型情况。但实际产品的使用方式往往超出实验室测试所能完全预见的范围。许多小型扬声器依靠声学端口或格栅（外壳上的小型网状结构，用于排出空气）。如果该端口被手机壳、贴纸或灰尘堵塞，或者扬声器被放置在柔软的表面上，扬声器的声学负载就会发生变化，从而可能在原本完全安全的音量下产生足以造成损坏的过大振膜位移。

智能放大器采用与估算振膜位移和温度相同的方式来识别这种情况：端口堵塞会改变扬声器的电气特征，而系统能够识别这种变化，并自动收紧保护限值以进行补偿，从而保护扬声器免受实际使用中出现的风险影响。这样可以提高扬声器的工作可靠性，减少产品返修和保修索赔。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

8 智能放大器：完整系统

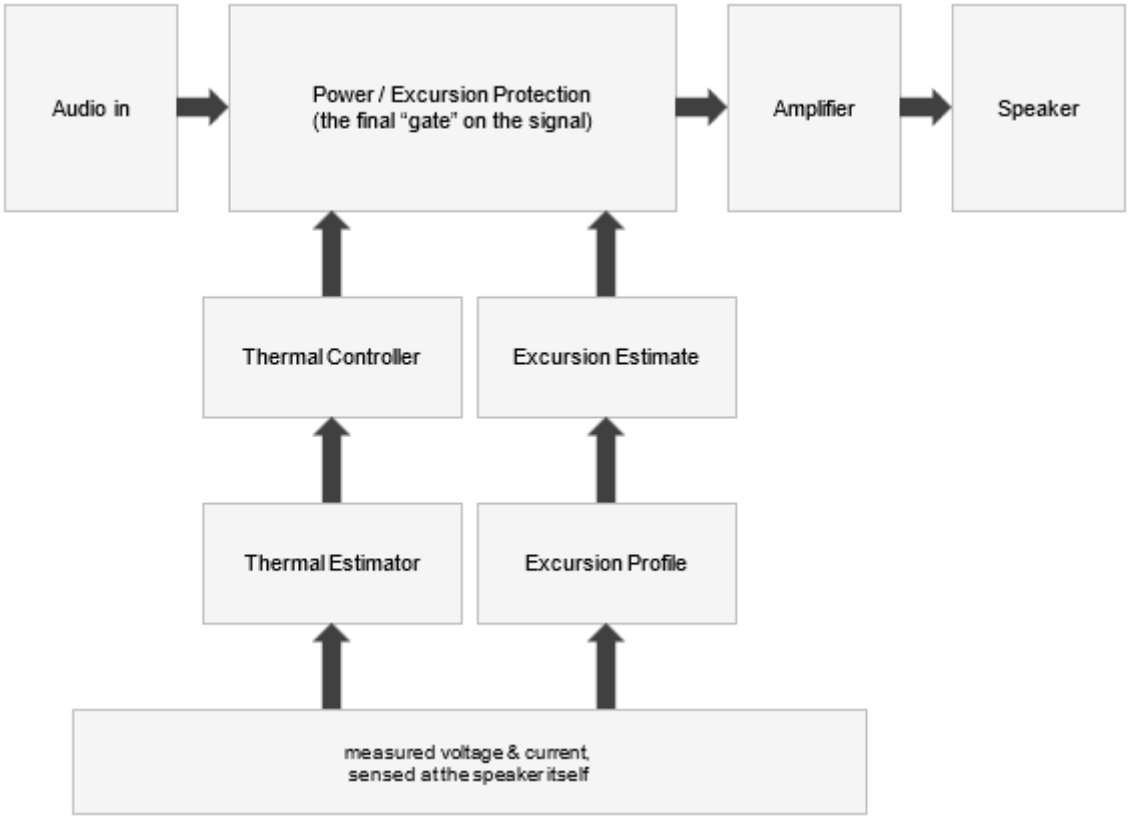

图 8-1. 智能放大器完整系统：振膜位移保护与过热保护协同工作

振膜位移保护和过热保护检查 — *振膜是否即将产生过大的位移？*以及*温度是否过高？*— 会持续将结果输入同一个最终控制关口，以决定允许通过多少输入信号才是安全的。智能放大器会持续比较特性模型预测的扬声器电气特性与传感电路实际测量的结果，将两者之间的任何偏差视为误差信号，并调整模型的内部参数以缩小这一差距。对于听众而言，最终效果就像是一个平稳统一的决策，尽管其底层实际上是两个独立的安全系统，以不同的时间尺度运行，并协同实现同一个目标：让扬声器在当前时刻安全地产生尽可能响亮、饱满的声音——既不会超过安全限值，也不会受到不必要的限制。

English Document: SDAA588
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

9 系统成本节约

智能放大器技术还能够帮助降低系统成本。这是因为智能放大器能够使平台将小型、低成本的扬声器驱动至更接近其实际安全限值的水平，因此，为了达到相同的响度和可靠性目标，不再需要购买尺寸更大、经过强化且价格更高的扬声器。从物料清单的角度来看（将放大器和扬声器合并计算），最终系统不仅性能出色、可靠性高，而且成本更低。

	成本		成本
大尺寸扬声器	$1.75	标准扬声器	$0.90
标准放大器	$0.10	智能放大器	$0.65
总成本 ($) — 传统方案	$1.85	总成本 ($) — 智能放大器方案	$1.55

在这个示例中，尽管智能放大器的成本有所增加，但每台设备的系统总成本仍可净节省约 $0.30，同时还能提升响度和可靠性。

10 总结

尺寸	标准放大器	智能放大器
低音峰值响度	受固定的最坏情况安全裕量限制	动态的扬声器专属限值
高温环境下的性能	无论温度高低，均采用相同的保守限值	根据实际温度实时调整
实际使用环境中的可靠性	无法检测端口堵塞或不当使用	自动检测并进行补偿
净系统成本	需要更大尺寸或经过强化的扬声器 物料成本较高	可搭配尺寸更小、成本更低的扬声器使用 降低系统成本

智能放大器技术不再采用固定的最坏情况安全裕量，而是针对最重要的音频内容进行动态保护：深沉的低音和动态峰值，这两者正是小型扬声器最难呈现的内容。智能放大器通过持续实时掌握扬声器的实际振膜位移和温度，以动态保护限值取代固定限值，无需增加硬件成本即可释放更多性能余量，同时还能降低系统总成本，并提高产品在实际使用环境中的可靠性。

TI 正在其丰富的放大器产品系列中推出智能放大器解决方案，涵盖最小型的移动设备设计以及更高功率的应用。TAS2563 和 TAS2573 是集成 DSP 和电压、电流检测 (IV-sense) 功能的升压型 D 类放大器，专为电池供电且空间受限的设计而打造。这两款产品可提供 6W 以上的功率，同时在芯片上运行 TI 的智能放大器扬声器保护算法，使紧凑型移动设备无需增加电路板空间或成本，即可获得全面的振膜位移保护和过热保护。对于需要进一步扩展功率的设计，TAS2781 将这一技术方案扩展至 24V D 类放大器，并集成实时智能放大器扬声器保护功能。

11 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*TI 音频产品*，网页。
2. 德州仪器 (TI)，*智能放大器视频系列*，视频。
3. 德州仪器 (TI)，*SmartPA 扬声器保护算法*，应用手册。

English Document: SDAA588
Copyright © 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