

Application Note

TAS5825M 智能放大器应用指南



Paul Li, Jesse Ji

Consumer Audio Amplifiers and Haptics

摘要

智能放大器技术可通过智能预测算法显著增强音质，最大限度地提高峰值功率输出，以及提高系统可靠性。本文简要介绍了笔记本电脑、智能扬声器和电视等如何应用 TAS5825M 智能放大器，并提供了详细的实施指南。

我们首先论述了智能放大器的基础知识，包括典型扬声器的基本原理和建模以及智能放大器算法。然后、本文阐明了实现智能放大器所需的准备工作。最后，本文还提供了有关扬声器特性表达以及智能放大器调谐和验证的详细指南，以帮助通过 TAS5825M 快速实现智能放大器功能。

内容

1 简介.....	2
2 智能放大器基础知识.....	3
2.1 扬声器基础知识和型号.....	3
2.2 智能放大器算法.....	6
3 准备工作.....	8
3.1 硬件准备.....	8
3.2 软件准备.....	8
3.3 扬声器信息.....	8
4 扬声器特性表达.....	9
4.1 特性表达设置.....	9
4.2 特性表达流程.....	9
4.3 扬声器特性表达指南.....	9
5 智能放大器调谐和验证.....	14
5.1 智能放大器调谐指南.....	15
5.2 智能放大器验证.....	24
6 总结.....	26
7 参考资料.....	27

商标

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在深入了解扬声器特性和行为后，TI 的智能放大器可提供先进、智能和可配置的处理流程，以产生比传统系统更强大、更丰富的声音，而不会因过热或偏移过大而对扬声器造成损坏。为了使用 TI 的智能放大器实现令人满意的音响效果和强大的扬声器保护，需要了解音频和扬声器基础知识，并适当进行扬声器特性表达和性能调谐。

因此，本文旨在全面介绍 TI 的智能放大器技术，并提供一份易用指南，以帮助用户快速实现使用 TAS5825M 的智能放大器方案。

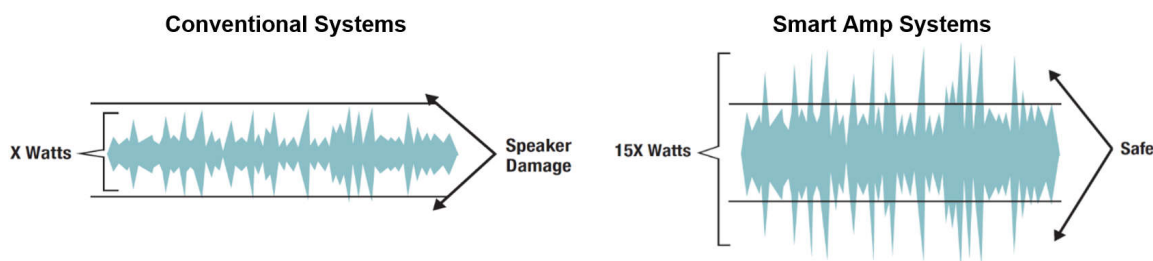


图 1-1. 传统与智能放大器系统的比较

在传统音频系统中（如 图 1-1 所示），为了防止扬声器在音频播放过程中损坏，放大器的输出通常被压缩机和高通滤波器限制在扬声器额定值范围内。然而，传统系统的调谐结果往往过于保守，从而导致较差的动态范围和低音性能。

相反，基于对扬声器机械、电气和热属性的精确建模，TI 的智能放大器可以动态监控扬声器的偏移和热行为，预测潜在的损坏情况，并及时采取预防措施，确保扬声器始终处于安全工作区（SOA）内。因此，可以充分利用扬声器和放大器的潜力，在不损坏扬声器的情况下提供令人惊叹的音质。同时，音频信号的瞬态峰值不再受到严格限制或压缩，从而可以扩展音乐的动态范围，并使低音性能更具深度和力度。

TI 智能放大器的典型实现方式可分为两个部分，即扬声器特性表达和智能放大器调优，而 图 1-2 显示了采用 TAS5825M 的智能放大器应用的一般步骤。

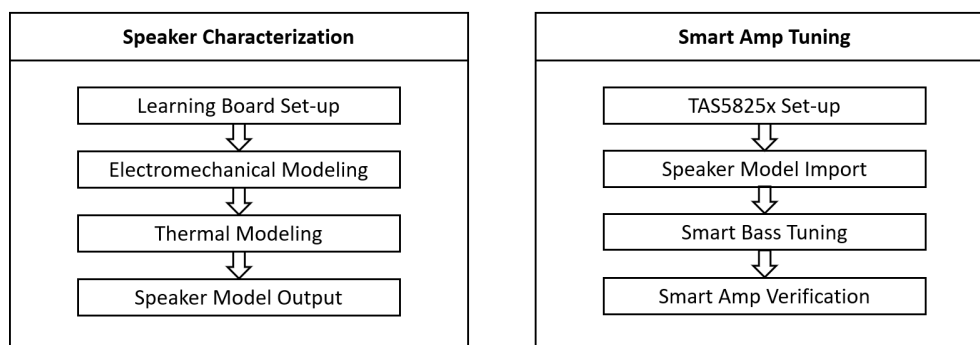


图 1-2. 采用 TAS5825M 的智能放大器应用步骤

如上所示，扬声器特性表达主要包括扬声器学习板和 PurePath™ Console 3 (PPC3) 软件的设置、扬声器机电模型和热模型的特性表达以及扬声器型号的输出。智能调谐过程包括 TAS5825M 和 PPC3 软件的设置、扬声器型号的导入、智能低音调谐和智能放大器验证。

2 智能放大器基础知识

2.1 扬声器基础知识和型号

扬声器的典型结构如图 2-1 所示。当向音圈施加一定频率的交流电时，磁体和音圈之间会产生磁力，并驱动连接的锥形膜（包括锥体、防尘盖、环绕物等所有活动部件）以相同的频率来回移动，从而产生声音。

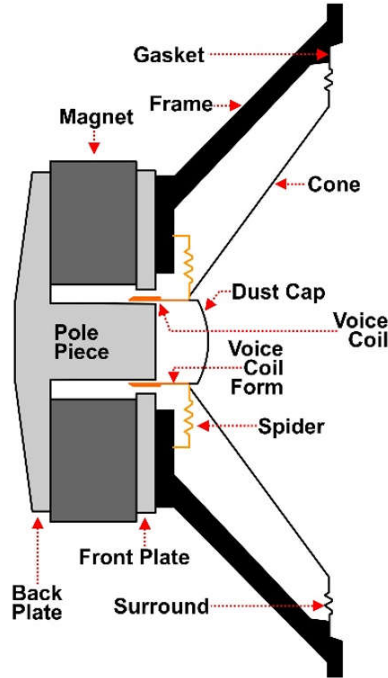


图 2-1. 典型的扬声器结构

为了更好地理解和分析扬声器的原理和行为，我们开发了多个数学模型，包括扬声器的机电模型和热模型。图 2-2 显示了典型扬声器的线性化机电模型，而表 2-1 列出了主要参数的说明。

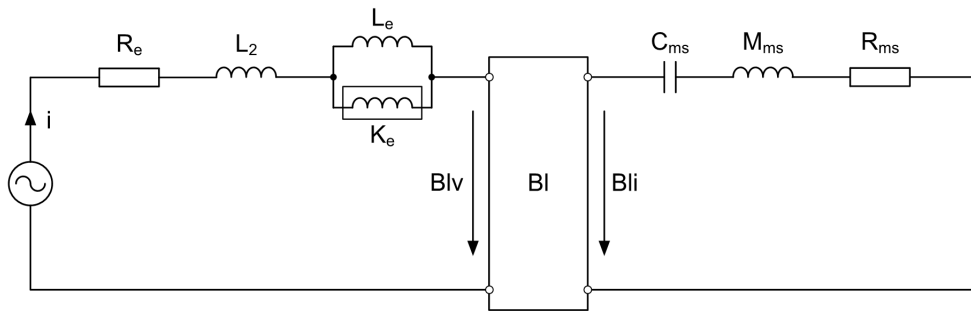


图 2-2. 扬声器的典型机电模型

表 2-1. 机电模型的参数

参数	单位	说明
R_e	Ω	DC 音圈电阻
S_d	cm^2	振膜面积
Bl	$\text{T}\cdot\text{m}$	力系数
R_{ms}	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$	机械阻尼系数
M_{ms}	g	机械质量
C_{ms}	m/N	力顺
L_e	mH	音圈的泄漏电感
L_2	mH	音圈电感
K_e	sH	音圈的半电感
u	V	输入电压
i	A	输入电流
v	m/s	振膜速度
X	m	振膜偏移

基于上述机电模型，可以推导出典型扬声器的传递函数。为简单起见，在进一步分析中可以省略具有较小值的寄生参数，例如 L_e 、 L_2 和 K_e 。因此，扬声器的输入电气阻抗可推导为：

$$Z_{in}(s) = \frac{u(s)}{i(s)} = R_e + \frac{(Bl)^2}{sM_{ms} + R_{ms} + 1/sC_{ms}} \quad (1)$$

从输入电压到偏移的传递函数可推导为：

$$H_{exc}(s) = \frac{X(s)}{u(s)} = \frac{Bl}{sR_e} \cdot \frac{1}{sM_{ms} + (R_{ms} + (Bl)^2/R_e) + 1/sC_{ms}} \quad (2)$$

此外，可以推导出典型扬声器机电模型的等效 Thiele/Small (T/S) 参数，详情如 表 2-2 所示。

表 2-2. 机电模型的 T/S 参数

参数	单位	说明
F_s	Hz	扬声器的共振频率
Q_{es}	-	F_s 处的电气品质系数
Q_{ts}	-	F_s 处的机械品质系数
Q_{ms}	-	F_s 处的总品质系数
V_{as}	公升	等效顺从性体积

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms}C_{ms}}} = \frac{\omega_s}{2\pi} \quad (3)$$

$$Q_{es} = \frac{R_e}{(Bl)^2} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \quad (4)$$

$$Q_{ms} = \frac{1}{R_{ms}} \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}} \quad (5)$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es}Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}} \quad (6)$$

$$V_{as} = 1000 \cdot \rho c^2 S_d^2 C_{ms} \quad (7)$$

在上表中， ρ 是空气密度 (25°C 条件下为 1.184kg/m^3)， c 是声速 (25°C 条件下为 346.1m/s)。在这种情况下，机电模型的传递函数可转换为以下公式。

输入电气阻抗：

$$Z_{in}(s) = R_e + \frac{(Bl)^2}{M_{ms}} \times \frac{s}{s^2 + s\omega_s/Q_{ms} + \omega_s^2} \quad (8)$$

偏移传递函数：

$$H_{exc}(s) = \frac{Bl}{M_{ms}R_e} \times \frac{1}{s^2 + s\omega_s/Q_{ts} + \omega_s^2} \quad (9)$$

同样，扬声器的热行为也可以用线性化数学模型 (即热模型) 来描述，详情如 图 2-3 所示。表 2-3 列出了典型扬声器热模型的相应参数。

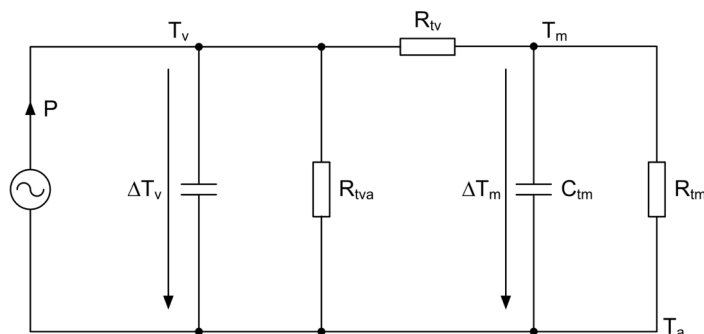


图 2-3. 扬声器的典型热模型

表 2-3. 热模型的参数

参数	单位	说明
R_{tv}	K/W	音圈到磁体的热阻
C_{tv}	J/K	音圈的热电容
R_{tm}	K/W	磁体到环境空气的热阻
C_{tm}	J/K	磁体的热电容
R_{tva}	K/W	音圈到气隙的热阻
P	W	音圈的功率损耗转化为热量
T_v	K	音圈温度
T_m	K	磁体温度
T_a	K	环境温度
ΔT_v	K	音圈与环境之间的温差
ΔT_m	K	磁体和环境之间的温差

为了更好地理解，热模型中耗散功率与温差之间的关系类似于电路中电流与电压之间的关系。因此，对于热阻：

$$\Delta T(s) = R_{thermal} \times P_{dissipated}(s) \quad (10)$$

对于热电容：

$$\Delta T(s) = \frac{1}{sC_{thermal}} \times P_{dissipated}(s) \quad (11)$$

因此，从耗散功率到音圈温度的传递函数应为：

$$H_{coil}(s) = \frac{\Delta T_v(s)}{P(s)} = \left(R_{tv} + \frac{1}{sC_{tm}} \parallel R_{tm} \right) \parallel \left(\frac{1}{sC_{tv}} \right) \parallel R_{tva} \quad (12)$$

同样，从耗散功率到磁体温度的传递函数为：

$$H_{mag}(s) = \frac{\Delta T_m(s)}{P(s)} = H_{coil}(s) \times \left(\frac{1}{sC_{tm}} \parallel R_{tm} \right) \times \left(R_{tv} + \left(\frac{1}{sC_{tm}} \right) \parallel R_{tm} \right)^{-1} \quad (13)$$

2.2 智能放大器算法

TAS5825M 集成了前馈智能放大器保护算法，用于实现目标扬声器的偏移和热保护，其可表述为 图 2-4。

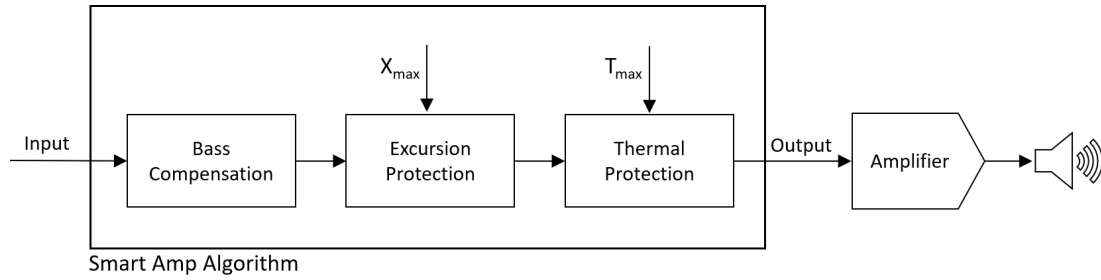


图 2-4. 智能放大器算法

为实现偏移保护，可以应用前瞻结构，以确保在将信号馈送到算法输出之前完成偏移估算和信号限制。图 2-5 显示了偏移保护算法的方框图。

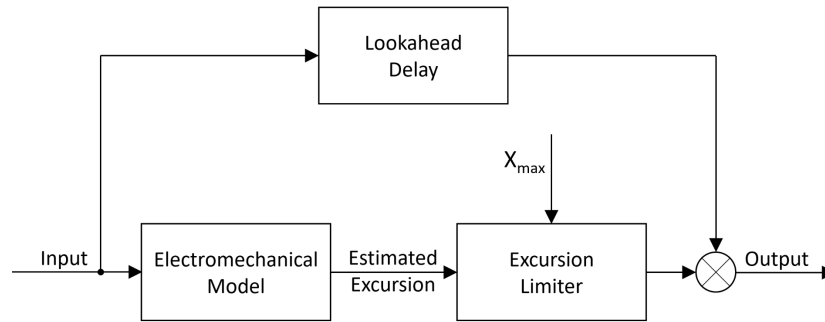


图 2-5. 智能放大器偏移保护算法

如 图 2-5 所示，首先使用音频信号和衍生的偏移传递函数之间的卷积运算来估算扬声器膜的偏移：

$$X(t) = u(t) \times \mathcal{L}^{-1}[H_{exc}(s)] \quad (14)$$

然后在确定保护是否生效之前，将该偏移与最大偏移限值进行比较。一旦估算的偏移超过限值 X_{max} ，输入信号就会衰减，以实现扬声器保护，否则输入信号将保持不变。

图 2-6 显示了智能放大器热保护算法的方框图。考虑到热系统的缓慢响应特性，此处采用了实时处理结构。

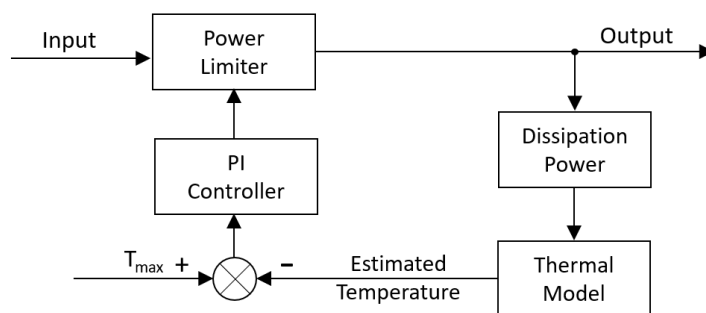


图 2-6. 智能放大器热保护算法

首先使用扬声器的耗散功率和热模型来估算音圈的温度，相关公式如下所示：

$$T_v(t) = T_a(t) + P(t) \times \mathcal{L}^{-1}[H_{coil}(s)] \quad (15)$$

然后将估算的温度与音圈的温度限值进行比较，并生成参考信号发送给 PI 热控制器。然后将热控制器的输出发送到功率限制模块，以在必要时减弱音频信号，从而使音圈温度保持在热限制范围内。

3 准备工作

为了正确实现扬声器特性表达并使用智能放大器器件进行调谐，请根据以下详细信息进行必要的准备。

3.1 硬件准备

扬声器特性表达所需的硬件包括：

- 智能放大器学习板 (PP-SALB-EVM-XMOS)
- 带音箱的目标扬声器
- 直流电源 (支持 24V/3A 输出)
- USB 电缆 (micro-USB 转 Type-A)
- 万用表
- 麦克风
- 粘合油灰
- 称重秤
- 连接线

智能放大器调谐和验证所需的硬件：

- 带 TAS5825M 的开发板
- 带音箱的目标扬声器
- 直流电源 (支持 24V/3A 输出)
- USB 电缆 (micro-USB 转 Type-A)
- 万用表
- 激光设备
- 精密音频设备

3.2 软件准备

运行搭配 TAS5825M 的智能放大器需要以下软件：

- PurePath™ Console 3 :
 - PP-SALB-EVM-XMOS 的学习板模块
 - TAS5825M 模块
- MATLAB® 编译器运行时 :
 - 与 PurePath™ Console 3 一起安装

3.3 扬声器信息

了解扬声器参数很重要，在使用智能放大器开始音频设计时也要确保准确性，建议向扬声器供应商索取数据表中的以下详细信息：

- 振膜面积 :
 - 扬声器振膜的面积或直径
- 偏移限制 :
 - $X_{\max}$: 扬声器隔膜/线圈的最大线性偏移
- 热限制 :
 - $T_{\max}$: 扬声器线圈的最高温度
 - $P_{\max}$: 扬声器的最大峰值功率
- Thiele/Small (T/S) 参数 :
 - 建议使用目标扬声器的 T/S 参数进行验证。

4 扬声器特性表达

4.1 特性表达设置

使用学习板 (PP-SALB-EVM-XMOS) 进行扬声器特性表达的硬件设置，详情如 图 4-1 所示。

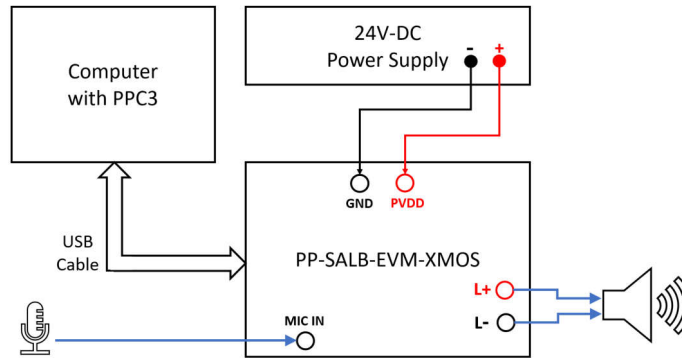


图 4-1. 智能放大器学习板的硬件设置

4.2 特性表达流程

图 4-2 显示了使用学习板确定扬声器特性表达的流程。

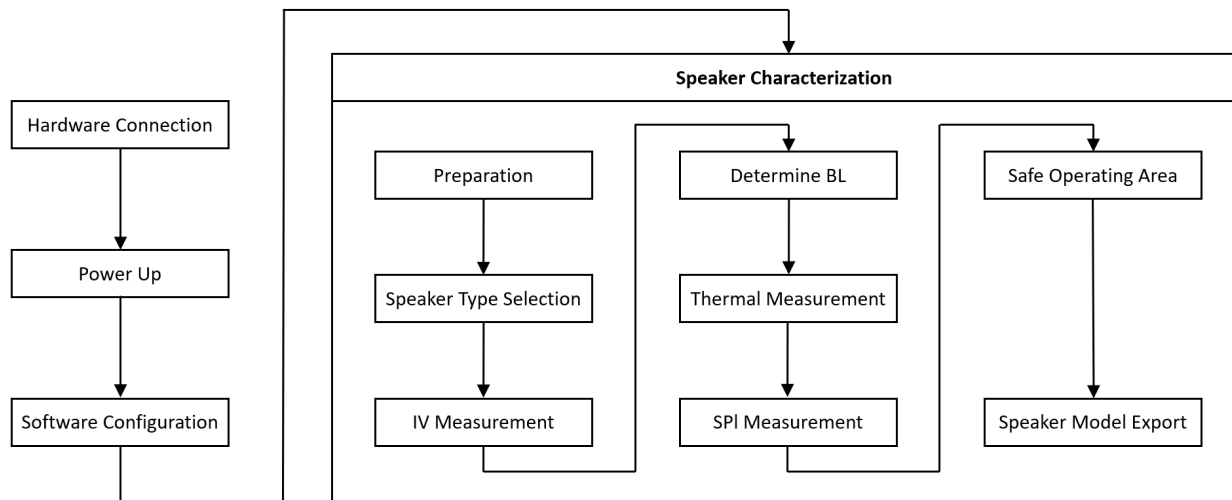


图 4-2. 扬声器特性表达流程

4.3 扬声器特性表达指南

4.3.1 硬件连接

关闭直流电源，并根据 图 4-1 所示的硬件设置在学习板、计算机和直流电源之间建立正确的硬件连接。在此步骤中，扬声器可以保持断开状态。

4.3.2 上电

将直流电源的输出电压设置为 24V/3A，然后打开电源。

4.3.3 软件配置

- 打开 Windows 的声音设置，并确保在声音设置中选择正确的输出和输入器件：
 - 输出：扬声器 (2-TI USB 音频 UAC2.0)
 - 输入：线路 (2-TI USB 音频 UAC2.0)
- 检查输出和输入的音量是否设置为 100%。

- 打开输出设备和输入器件的附加器件属性，并检查 **Advanced** 项中器件的采样率。正确的配置需要如 图 4-3 所示。
- 打开 PPC3 软件，进入 **Learning Board** 模块。
- 点击 **New** 以创建新文件，然后点击左下角的 **Connect** 按钮，以将 PPC3 与学习板连接，详情如 图 4-4 所示。

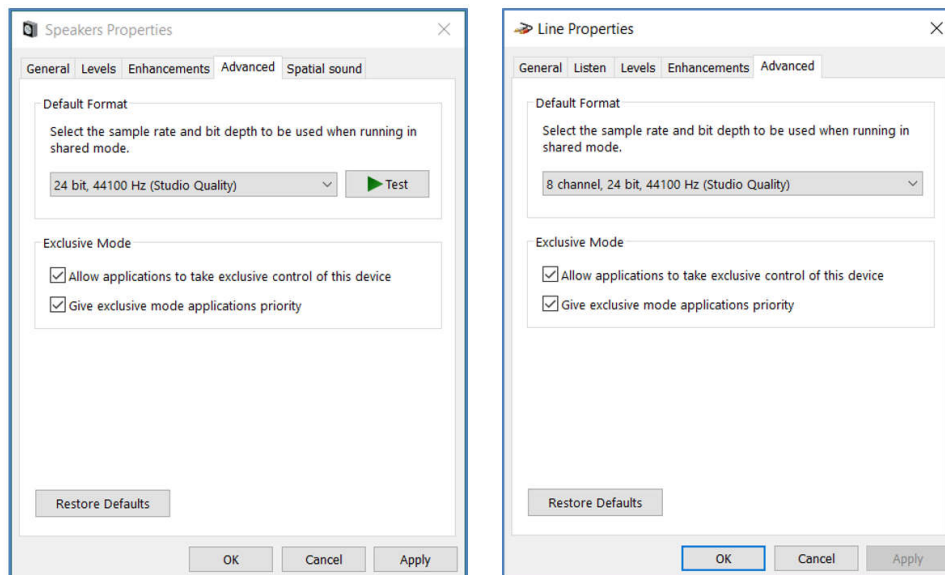


图 4-3. 学习板的聲音設置

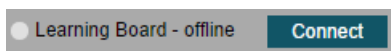


图 4-4. PPC3 连接按钮

4.3.4 扬声器特性表达

点击 PPC3 页面上的 **Characterization** 模块，如 图 4-5 所示。

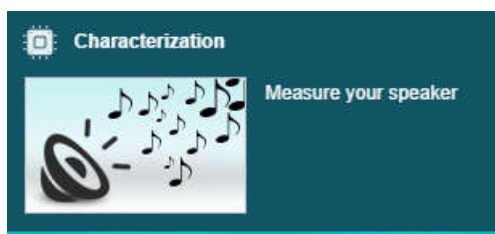


图 4-5. PPC3 中的特性表达模块

4.3.4.1 准备

仔细检查以确保直流电源正常，然后点击 **Hardware Setup** 页面中的 **Supply is connected** 按钮。然后点击 **Start Checks** 按钮，以开始硬件检查。正确完成硬件检查后，PPC3 需要显示如 图 4-6 所示的检查结果。

接下来，在 **System Gain Calibration** 页面中，点击 **Start Gain Calibration** 按钮，以开始系统增益校准过程。使用万用表的直流模式测量 PVDD 和 GND 上的直流电源电压，并使用万用表的交流模式测量学习板的 L+ 和 L- 引脚上的输出交流电压 (RMS)。

在 **System Gain Calibration** 页面的相应框中键入测量结果，然后点击 **Next** 按钮以进入下一步操作。

Run Hardware Checks

- Download successful ✓
- Audio sound card detected and unambiguous ✓
- Audio sound card sampling frequency is good ✓
- Power supply is connected and in range ✓
- Audio record is successful ✓
- Audio playback is successful ✓

图 4-6. 硬件检查结果

4.3.4.2 扬声器类型选择

在 *Choose your Speaker Type* 页面上，根据您的目标扬声器的属性选择正确的类型。有三种类型的扬声器可供选择：封闭式音箱、端口音箱和无源散热器。例如，对于配备端口音箱的单个扬声器，您可以选择 *Single Driver Ported Box*，如 图 4-7 所示。请注意，有时无源散热器扬声器无法成功进行建模，在这种情况下，您需要选择端口音箱，以替代无源散热器扬声器型号。

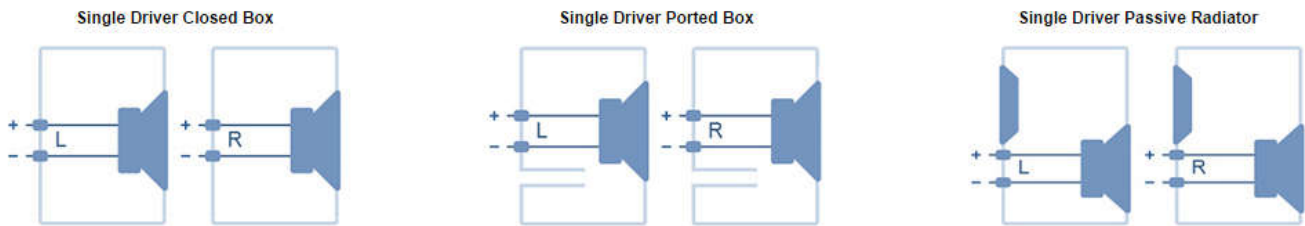


图 4-7. 扬声器类型选择

4.3.4.3 IV 测量

将目标扬声器连接到学习板的 L+ 和 L- 引脚，并确保扬声器保持稳定（可能使用一些粘合油灰）。然后点击 *Start IV Measurement* 按钮，以启动 IV 测量过程。请注意，在测量过程中可以听到一定程度的噪声。

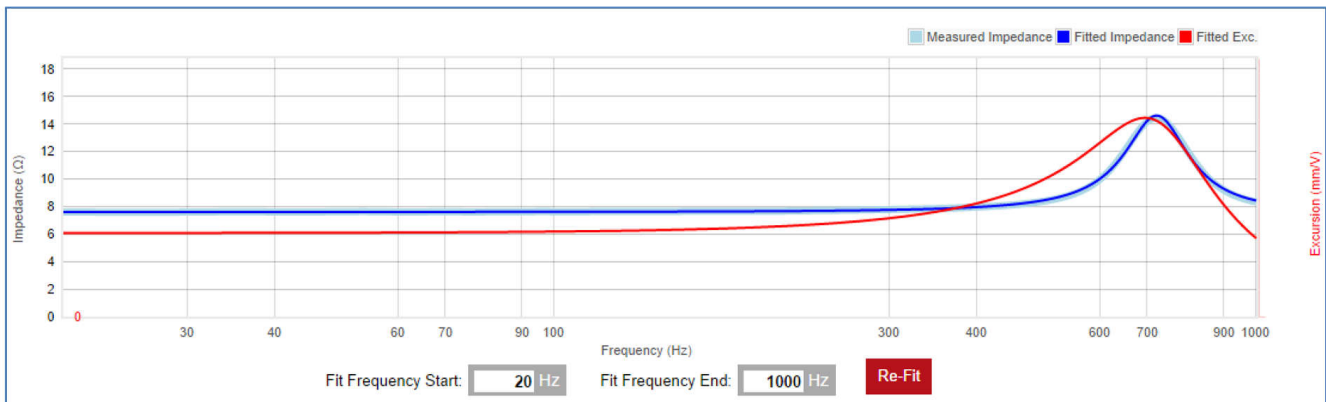


图 4-8. 型号拟合结果示例

等待 *Model Fit* 过程完成，然后观察 *Review Speaker Model* 页面上的拟合结果，浅蓝色曲线（测得的阻抗）需要与深蓝色曲线（已拟合阻抗）相一致，详情如 图 4-8 所示。如果一致，您可以点击 *Accept* 按钮以继续下一步操作。如果不一致，您需要检查硬件和软件配置，然后点击 *Re-run IV Measurement* 按钮，以重新执行 IV 测量过程。

4.3.4.4 确定 BL

在 *Speaker Details* 页面上，键入扬声器振膜的面积或直径（如第 2 部分所述），然后点击 *Next* 按钮。

在 *Force Factor (BL)* 页面上，建议使用 *Added Mass Method*，而不是 *Enter BL Method*，以获取 BL 参数。单击 *Added Mass Method* 按钮以继续特性表达操作。

根据 *Added Mass Specification* 页上的说明，取一些粘合油灰作为 *mass*，然后使用称重秤测得该质量的准确重量，并键入测量值。建议将该质量保持为大约 20% 的扬声器移动质量。如果未提供移动质量，请使用一个直径约为扬声器直径 1/5 的油灰球。

如 图 4-9 所示，按照 *Added Mass Specification* 页面中的说明，将该质量添加到扬声器的目标隔膜上，然后点击 *Mass Added* 按钮，开始 BL 测量过程。



图 4-9. 新增质量方法示例

等待 *Added Mass IV Measurement* 和 *Find BL by Added Mass* 步骤完成，然后移除该质量，并点击 *Remove Added Mass* 页面上的 *Next* 按钮。

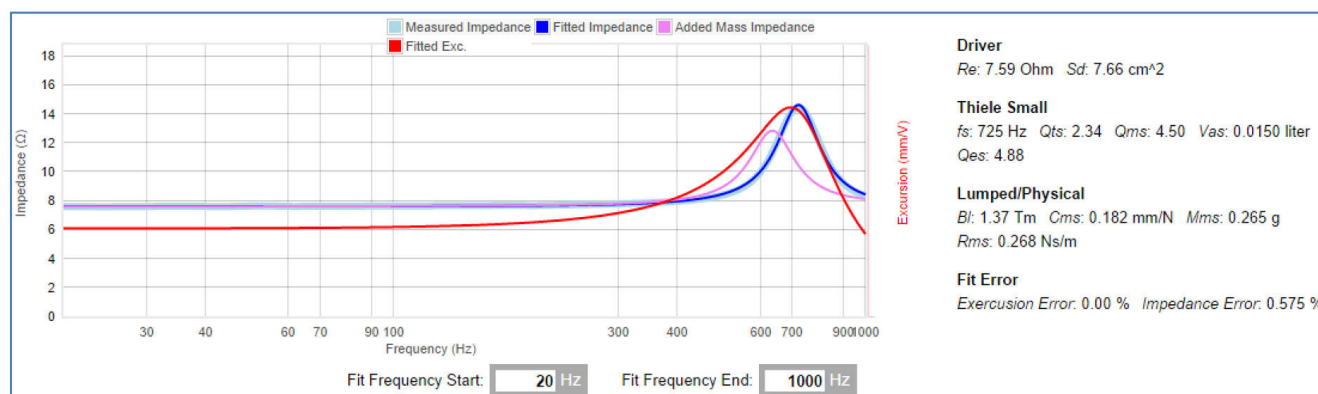


图 4-10. 机电模型拟合结果

等待 *Run Model Fit* 步骤完成，然后请在 *Review Speaker Model* 页面上审查已拟合型号，详情如 图 4-10 所示。

首先，确保浅蓝色曲线（测得的阻抗）与深蓝色曲线（已拟合阻抗）保持一致。

接下来，将建模结果的 *Re* 和 *FS* 值与您的扬声器的 Thiele/Small 参数进行比较。建模值和额定值之间不应存在巨大差异。

最后，检查 *Impedance Error in Fit Error* 部分，建议将阻抗误差保持在 1% 以下。如果模型拟合良好，请点击 *Accept* 按钮以继续下一步操作。如果模型拟合不佳，建议您检查硬件和软件配置，检查新增质量和相关数据，然后点击相关按钮重新进行 BL 测量。

4.3.4.5 热性能测量

在 *Thermal Parameters* 页面上，通读文本并点击 *Thermal Characterization* 按钮，然后移至下一页。

接下来，根据 *Thermal Characterization: Caution* 页面上的建议输入激励频率。例如，如 图 4-11 所示，输入 995Hz 作为激励频率。

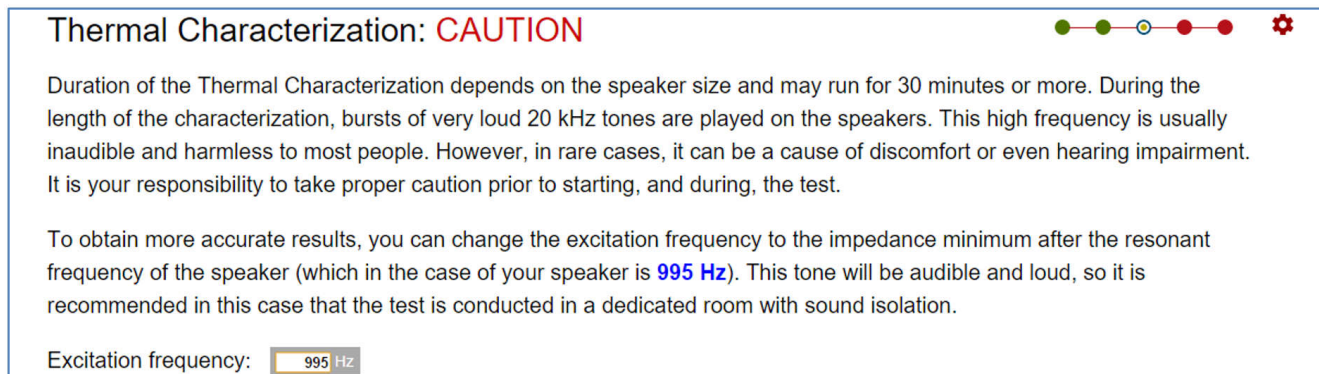


图 4-11. 输入激励频率

然后，点击 **Next** 按钮开始热性能测量过程。整个过程大约需要 10-20 分钟。

热性能测量过程完成后，在 *Review Temperature Model* 页面上查看目标扬声器的热模型。

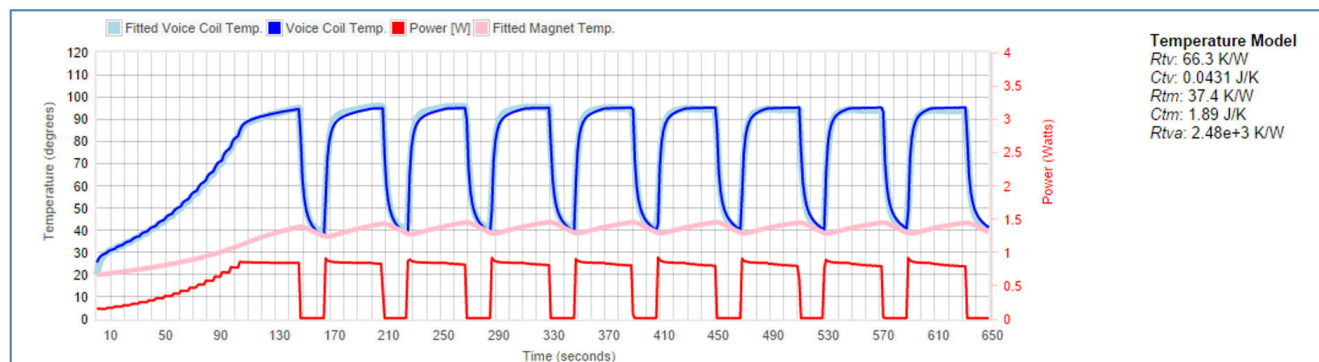


图 4-12. 扬声器热建模结果

如 图 4-12 所示，浅蓝色曲线（音圈温度）应与深蓝色曲线（拟合音圈温度）相一致，您可以点击 **Accept** 按钮，以完成目标扬声器的热建模。

否则，如果线圈温度的两条曲线不一致，或者热性能测量过程在 PPC3 软件中报告故障，则建议检查您的硬件和软件配置，并等待扬声器的音圈冷却下来（大约 20 分钟）。然后，请点击 **Run Temperature Characterization** 按钮，重新运行温度特性表达。

4.3.4.6 SPL 测量

要测量扬声器的 SPL 特性，请将麦克风连接到学习板，并按照 *Speaker Acoustic Response* 页面上的说明进行 SPL 测量。

图 4-13 显示了 *Review SPL Model* 页面上 SPL 特性表达的典型结果。根据目标扬声器数据表中的信息检查 SPL 结果，然后点击 **Accept** 按钮继续进行特性表达操作。

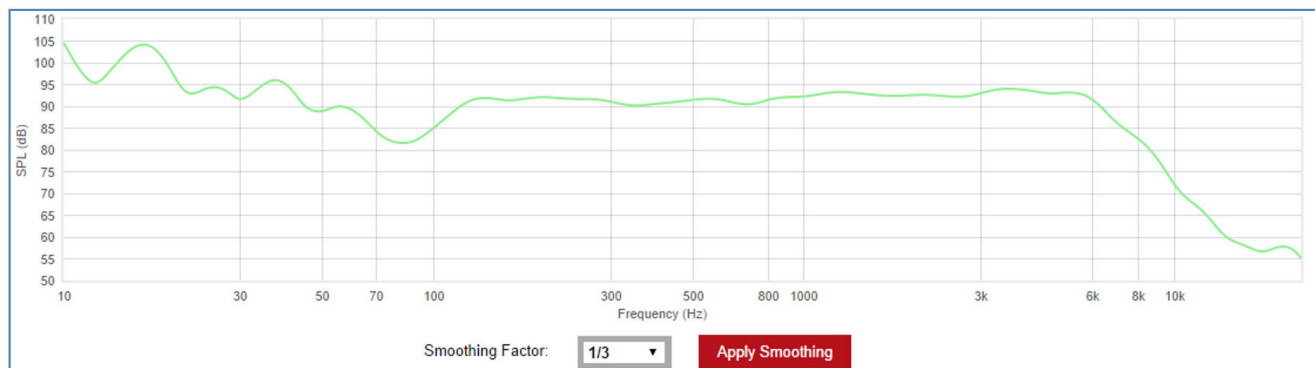


图 4-13. 典型的 SPL 建模结果

4.3.4.7 安全工作区

在 **Safe Operating Area** 页面上 (如 图 4-14 所示)，根据前面章节所述的数据，输入偏移峰值限值、热限值或功率限值。温度数据的热限值被设置为 $T_{\max} - T_{\text{ambient}}$ 。

Safe Operating Area

Before you can begin using the Smart Bass algorithm, you need to specify the safe operating area (SOA) of the speaker for both excursion and thermal limits.

Peak Excursion Limit:

2.5 mm

Thermal Limit:

100 °C

Power limit:

1.58 Watt Cont.

CAUTION: It is extremely critical that System Gain, Excursion Limit and Thermal Limit are set correctly and according to the system specifications. With improper settings Smart Bass can potentially overload the system causing permanent failure.

图 4-14. 安全工作区页面

4.3.4.8 扬声器型号导出

通过点击 **Safe Operating Area** 页面上的 **Accept** 按钮，即可完成扬声器的特性表达。

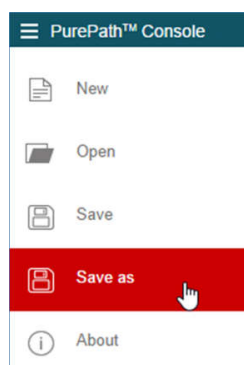


图 4-15. 使用 PPC3 软件导出扬声器型号

要导出扬声器型号，请点击 PPC3 左上角的按钮，然后点击 **Save As** 以导出 ppc3 文件，详情如 图 4-15 所示。当您想要使用扬声器型号时，可以方便地将特性表达数据与保存的 ppc3 文件一起导入。

5 智能放大器调谐和验证

5.1 智能放大器调谐指南

TAS5825M 具有强大的 DSP 音频处理内核，支持多种不同的音频处理流程。与传统放大器相比，内置的智能放大器处理流程有助于显著改善峰值功率输出、音量和音质。PPC3 软件 GUI 可帮助开发人员了解扬声器在系统中的表现，然后进行调整，以提高音频性能。该算法、特性表达和调谐工具使开发人员能够克服各种音频挑战。智能放大器调谐过程如下所示：

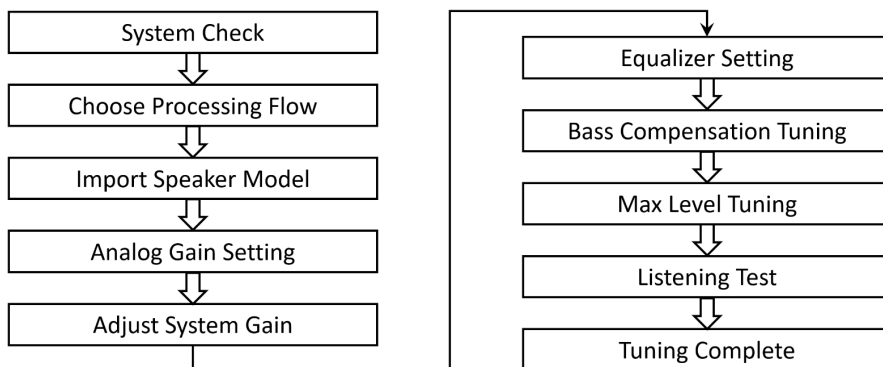


图 5-1. TAS5825M 智能放大器调谐过程

5.1.1 系统检查

在调谐之前，点击 **System Check** 以检测整个系统是否可以正常工作，并如 图 5-2 所示校准系统增益，这可能会影响智能放大器算法的准确性。

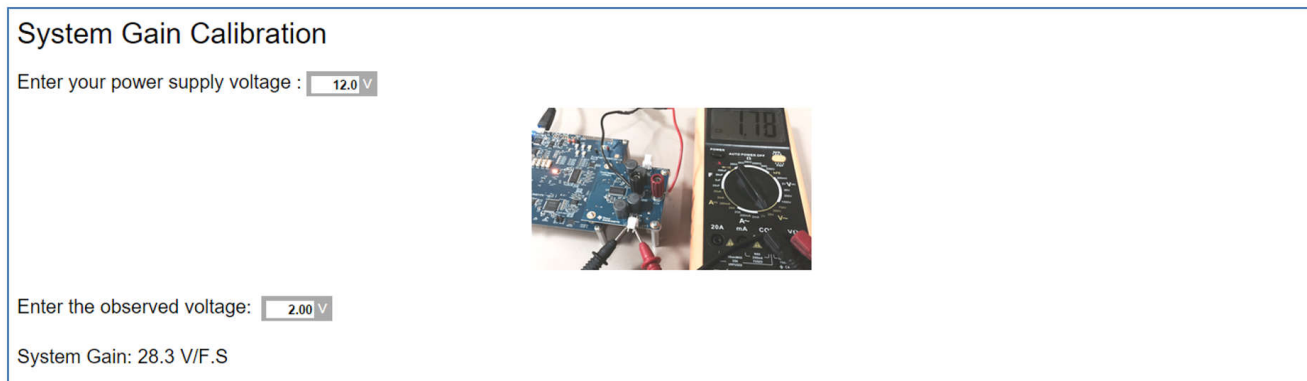


图 5-2. 系统检查

5.1.2 选择处理流程

TAS5825M 提供多种 DSP 处理流程，建议如 图 5-3 所示，将智能放大器前瞻处理流程用于智能放大器应用。该算法使用一种前瞻结构，该结构会延迟 128 个样本，并为算法提供足够的时间进行计算。两种智能放大器处理流程的最大区别在于内部 DSP 采样率。例如，对于 48k 智能放大器前瞻处理流程，前瞻延迟时间为：

$$LookAhead_time = 128 \times \frac{1}{48k} \approx 2.67ms \quad (16)$$

App Center > TAS5825M Home > Audio processing

Feature	2 Band DRC & AGL (2.0 96k)	SmartAmp LookAhead (2.0 96k)	Base/Pro (2.0 48k)	SmartAmp LookAhead (2.0 48k)	Base/Pro Hybrid (2.0 48k)	FIR (2.0 48k)	Housekeeping (2.0)
	Select	Select	Select	Select	Select	Select	Select
Maximum Internal Sample Rate	96k	96k	48k	48k	48k	48k	192k
SRC and Auto-detect	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Supported Input Sample Rates 16k, 32k, 44.1k, 48k, 88.2k, 96k	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Support for Input Sample Rate 192k	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Biquads for EQ filtering (Individual left/right)	15	13	15	13	15	15	✗
Additional Biquad Bank (44.1/88.2 KHz)	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Input Mixer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Click & Pop Free Volume	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Spatializer (Stereo Widening)	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Dynamic Biquad	4th Order	✗	4th Order	✗	✗	✗	✗
DRC	2 Band 2nd Order Crossover	✗	3 Band 4th Order Crossover	✗	3 Band 4th Order Crossover	3 Band 4th Order Crossover	✗
Automatic Gain Limiter	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Smart Excursion, Smart Thermal and Smart Bass Tuning	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Smart EQ	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Output Clipper	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
PVDD Tracking / Thermal Foldback	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Hybrid PWM Mode	✗	✗	✗	✗	✓	✗	All Sample Rates Except 192k

图 5-3. TAS5825M 处理流程

对于 96K 智能放大器前瞻处理流程，信号延迟为 1.33ms，因此与 48K 处理流程相比，延迟更低。客户需要根据系统音频信号采样率选择正确的处理流程。

5.1.3 导入扬声器型号

完成系统检查和处理流程选择后，进入 *Tuning and Audio Processing* 视图。

Characterization Data

Warning: You are using the default data!

Speaker Type : Closed box

Re : 3.57 Ohm

Fs : 205 Hz

Import Characterization data of Speaker :

Import Char Data

Note: Characterization data is shared across all Smartamp process flows.

图 5-4. 特性表达数据块

如图所示，图 5-4 是 *Characterization Data* 块，您可在由学习板建模中 *Import Char Data*，或点击右上角的按钮，手动输入您的扬声器关键参数。TI 建议导入由 TI 学习板捕获的扬声器型号。

5.1.4 模拟增益设置

TAS5825M 的模拟增益需要根据实际 PVDD 电源电压进行修改，以避免模拟 PVDD 削波。有关更多信息，请参阅应用手册《TAS58xx 系列一般调谐指南》。请使用以下公式来计算模拟增益的设计值：

$$\text{Analog_gain} \approx 20 \times \log_{10} \left(\frac{V_{\text{speaker_max}}}{29.5V} \right) \text{dB} \quad (17)$$

$$V_{\text{speaker_max}} \approx PVDD \times \frac{R_{\text{speaker}}}{R_{\text{speaker}} + 2 \times (R_{\text{ds_on}} + Z_{\text{DC}})} \quad (18)$$

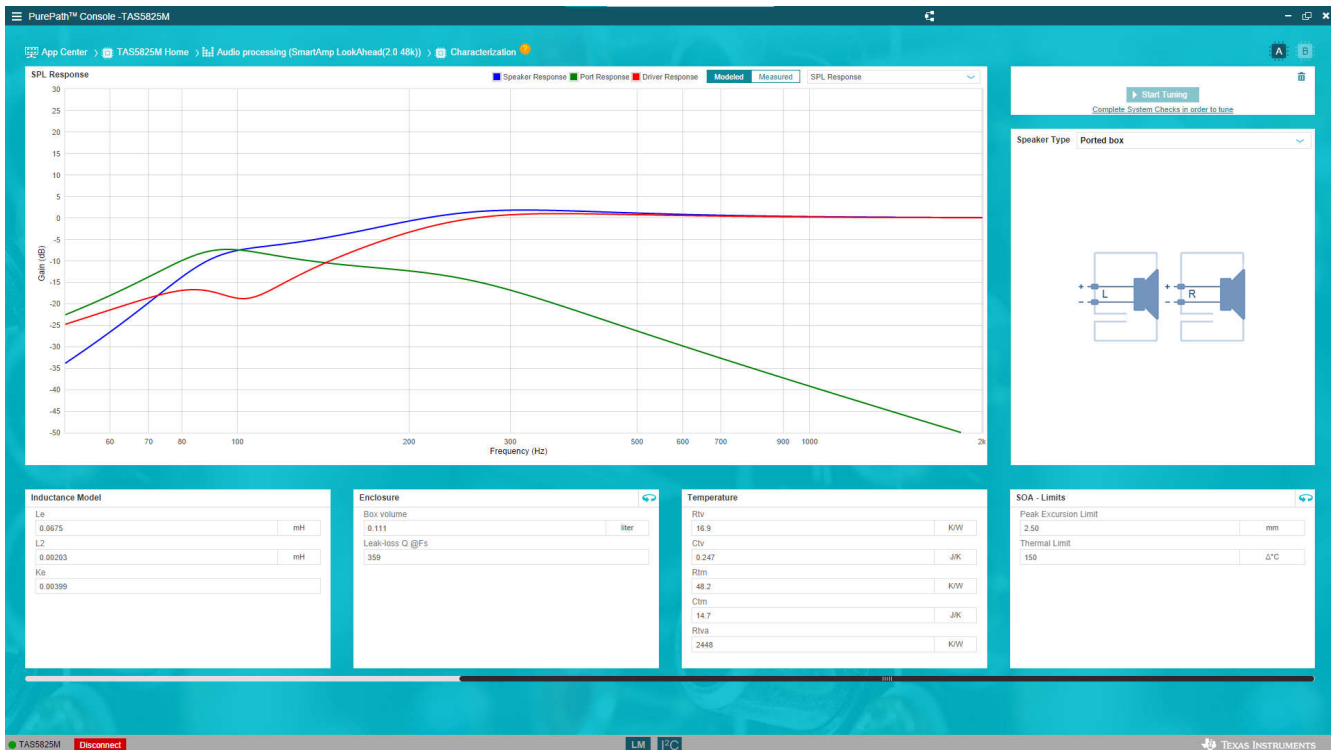


图 5-5. 特性表达视图

例如、如果使用 12V PVDD 作为 TAS5825M 的电源：

$$V_{speaker_max} \approx 12V \times \frac{4}{4 + 2 \times (0.18 + 0.023)} = 10.89V \quad (19)$$

$$Analog_gain \approx 20 \times \log_{10}\left(\frac{10.89V}{29.5V}\right)dB \approx -8.7dB \quad (20)$$

对于 TAS5825M，模拟增益步阶跃为 0.5dB。因此在本示例中，如 图 5-6 所示，模拟增益需要设置为 -9dB，以避免 PVDD 削波。

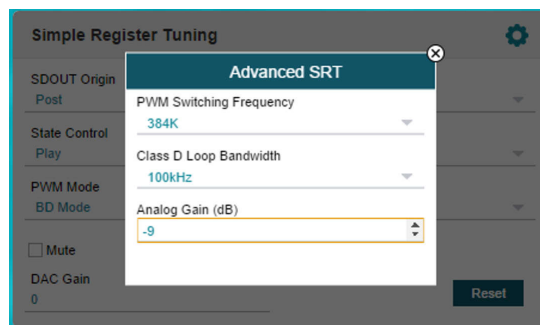


图 5-6. 模拟增益设置

5.1.5 调整系统增益

在设置模拟增益后，请返回 *Characterization* 视图，相应调整系统增益和电源电压。如 图 5-7 所示，首先需要设置电源电压，然后需要根据实际模拟增益以及从 *System Check* 步骤中测得的原始系统增益来设置系统增益。

$$System_gain = Original_system_gain \times 10^{\frac{Analog_gain}{20}} \quad (21)$$

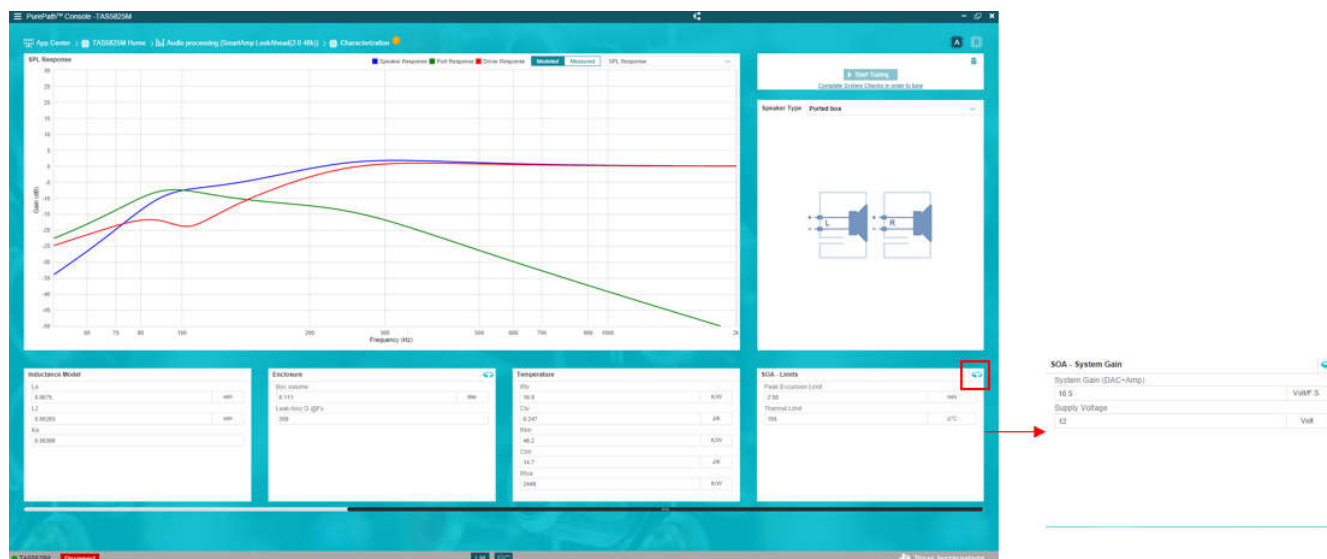


图 5-7. 特性表达视图中的 SOA 设置

例如，如果在 *System Check* 步骤中配置的原系统增益为 19.5V/fs，且模拟增益设置为 -9dB，则需要将系统增益调整为：

$$System_gain = 19.5 \times 10^{-9} V/ Fs \approx 6.92 V/ Fs \quad (22)$$

5.1.6 均衡器设置

在 TAS5825M 中，智能放大器处理流程为两个 L/R 通道提供 10 个 BQ，可以手动配置这些 BQ 以进行调谐。

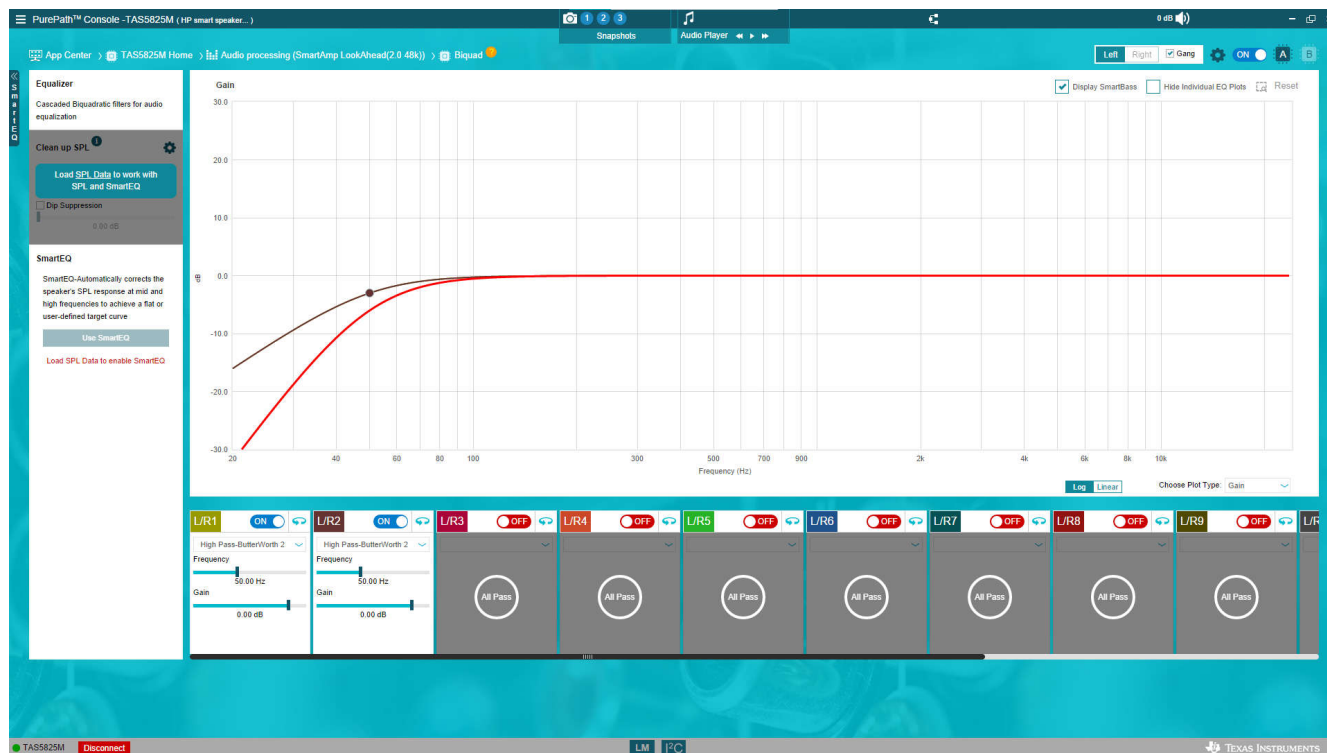


图 5-8. 均衡器设置

通常，建议在开始时设置两个高通滤波器以绕过极低频信号，因为在极低频率范围内，扬声器会消耗过多功率，但无法生成较大的音频输出，而这会降低系统效率。通常可将 50Hz 至 100Hz 频率用作此高通滤波器的截止频率。

该器件还支持智能 EQ 功能。通过使用 Smart EQ 功能，PPC3 软件可以帮助根据扬声器 SPL 数据自动配置 EQ 参数，以提供平坦响应或方便地匹配目标曲线。要使用此智能 EQ 功能，需要首先导入扬声器 SPL 数据。

5.1.7 智能低音调谐

智能低音是配置智能放大器算法的关键保护模块，包含四个主要功能模块：低音补偿、偏移保护、热保护和抗削波器。为了实现理想且令人满意的音频效果，可以根据实际要求打开或关闭每个功能模块。

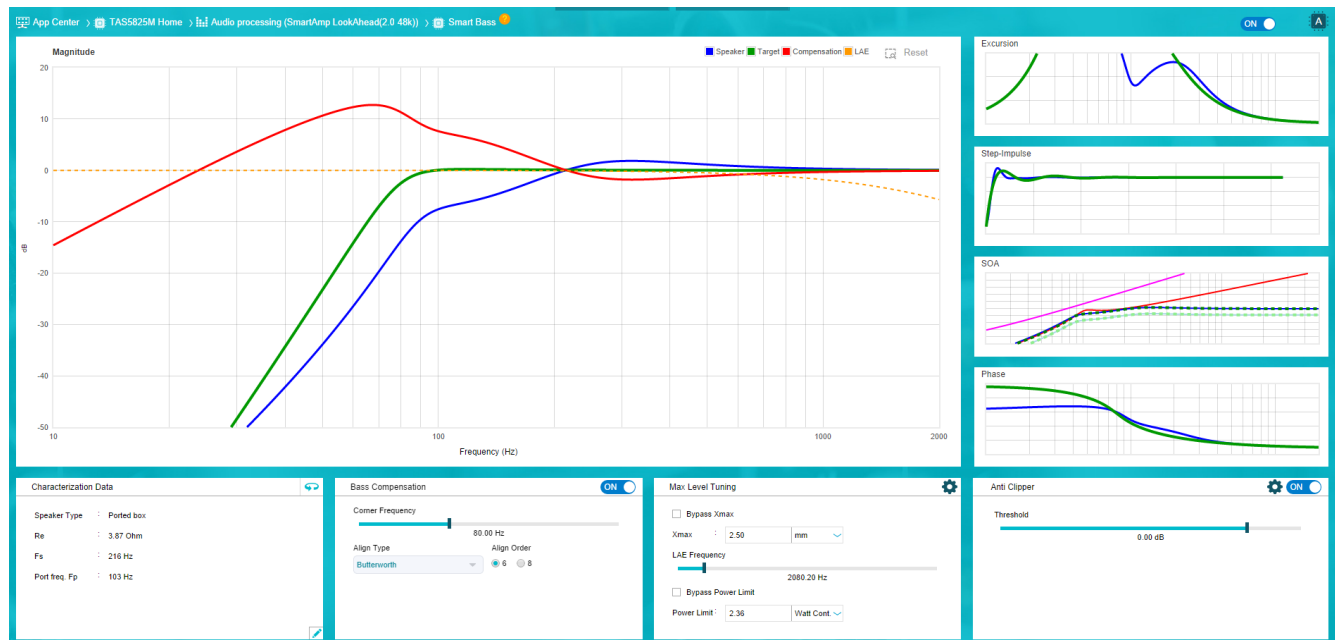


图 5-9. 智能低音配置

5.1.8 低音补偿

藉由低音补偿功能，该算法可以自动调整音频响应，以提高基准性能。

5.1.8.1 转角频率

转角频率表示目标量级响应的 -3dB 点（由图 5-9 中的绿色曲线表示）。选择合适的转角频率对于系统的整体性能而言非常重要。如果转角频率过高，扬声器的低音响应可能会受到限制。如果转角频率过低，则在尝试驱动扬声器无法很好响应的低频时就会造成电能浪费，并且还会使偏移保护过于灵敏。

5.1.8.2 对齐顺序和类型

顺序和类型设置决定了目标量级响应的低音信号衰减速度，这可能会对低于转角频率的信号音频响应产生显著影响，并且对于大多数应用，此设置可保持默认值。如果扬声器非常灵敏且无法承受较大的偏移，则建议选择较高的对齐顺序。可以选择较低的对齐顺序设置，以保留更多的低频信号，并改善音频低音性能。

调整这些设置时，需要执行一系列收听测试，以下是一些实用建议：

1. 调节 **Corner Frequency**，同时观察响应曲线窗口中的补偿曲线（红色曲线）。
2. 10dB 到 20dB 之间的补偿（红色曲线）通常可以提供良好的性能。
3. 切勿超过 20dB 线（至少在调谐开始时）。

图 5-10 和 图 5-11 显示了带和不带低音补偿时的扬声器量级响应曲线。

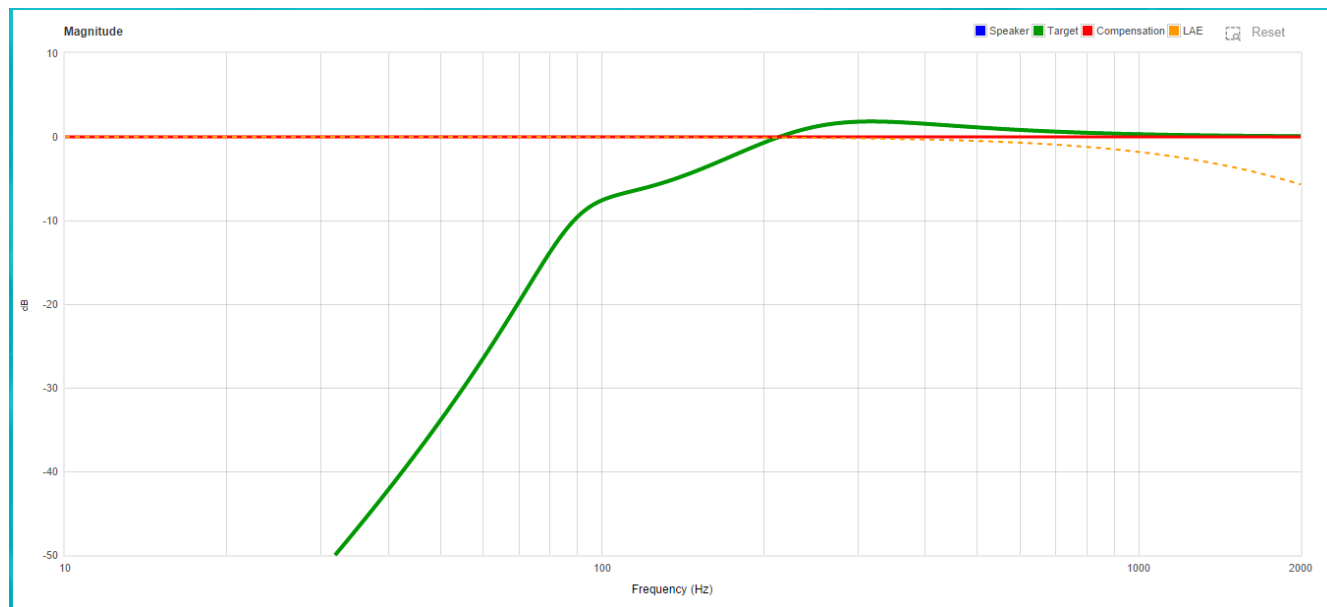


图 5-10. 禁用带低音补偿的扬声器响应

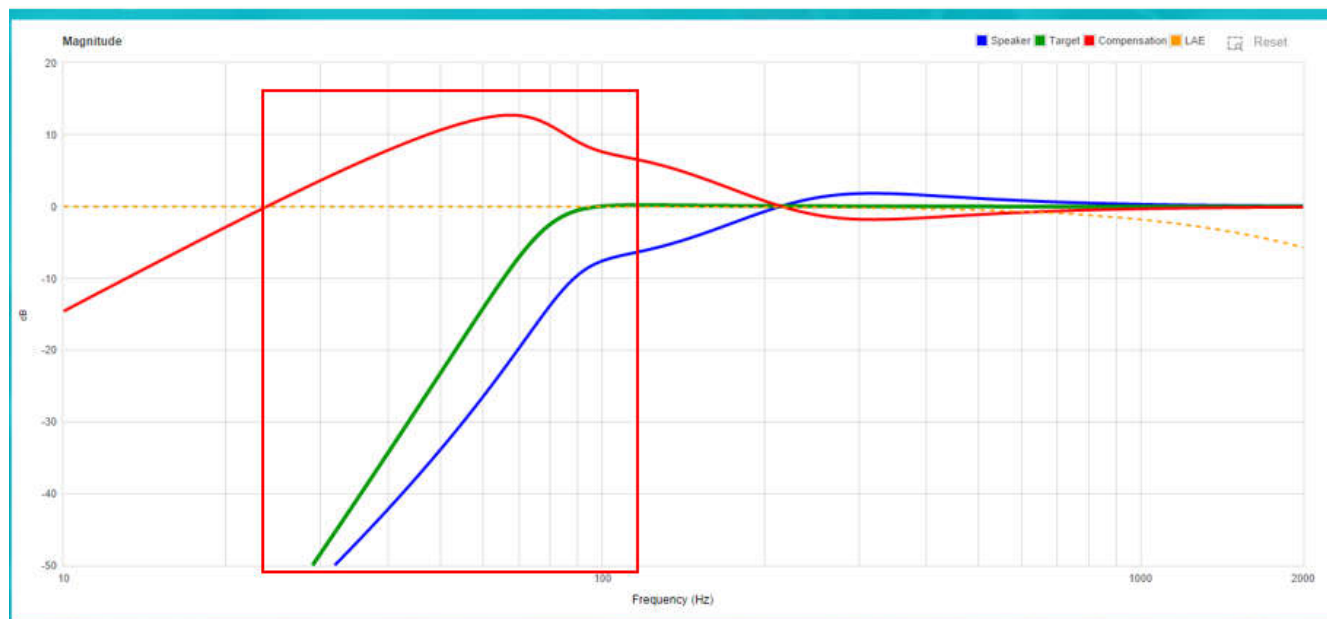


图 5-11. 启用带低音补偿的扬声器响应

5.1.9 最大电平调谐

最大电平调谐包括扬声器偏移保护 (Xmax) 和扬声器热保护 (功率限制)，可确保扬声器在 SOA 范围内工作。可以通过点击 **BYPASS** 按钮，轻松独立地启用或禁用这两项保护功能。由于保护算法和扬声器型号可能出错，因此需要根据实际收听测试和算法保护情况仔细调整设置。

5.1.9.1 Xmax

xmax 是指扬声器偏移限制，可根据扬声器供应商提供的规格进行设置。

5.1.9.2 LAE 频率

LAE 频率是指前瞻偏移频率，其是偏移保护算法的有效范围。如 图 5-13 所示，扬声器偏移峰值通常发生在低频范围内，而扬声器在高频范围内的偏移非常小。因此，扬声器偏移损坏主要发生在大振幅低频信号上，因此偏移保护算法并不考虑高频信号。

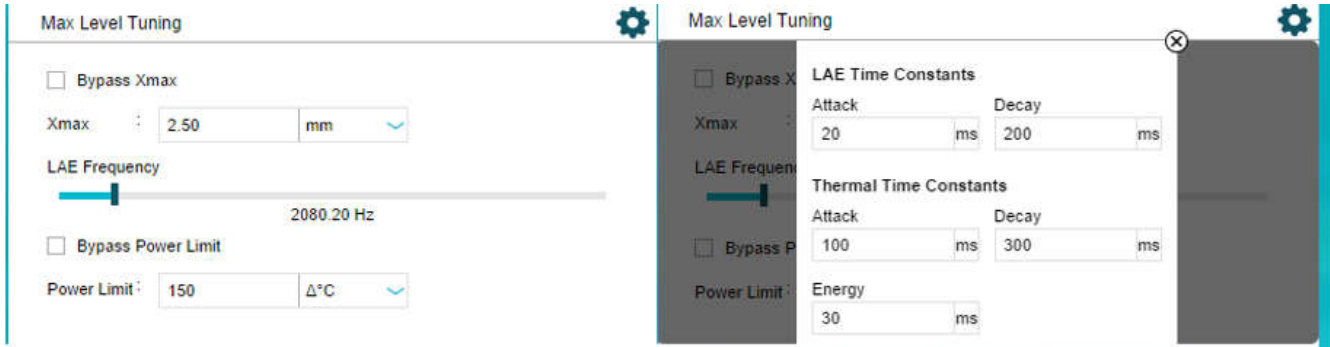


图 5-12. 最大电平调谐设置

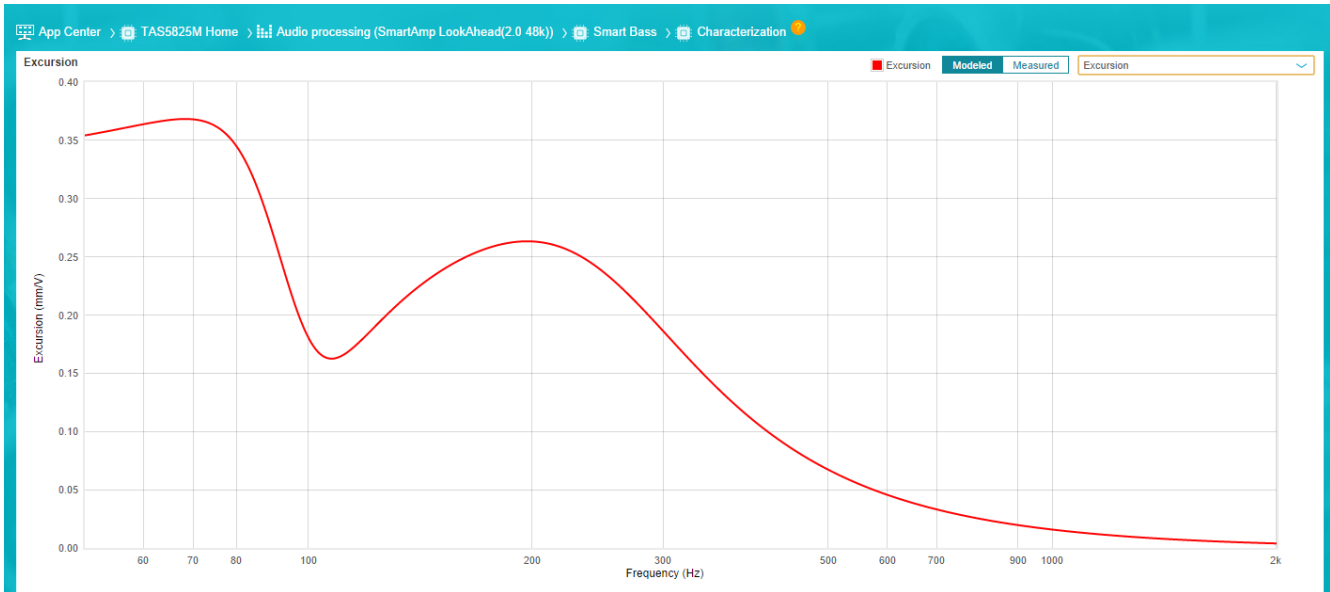


图 5-13. 扬声器偏移与频率关系图

如 图 5-14 中的橙色虚线所示，LAE 频率是低通滤波器的截止频率，用于降低高频信号，然后将该信号发送到偏移保护算法中进行计算和保护。

如果 LAE 频率的值过高，算法有效范围可能包含过多的高频信号，这可能会导致保护行为过于活跃。相反，如果 LAE 频率的值过低，保护算法会漏掉过多的低频信号，并可能导致扬声器偏移超过限值。通常建议将该值调整为扬声器型号拟合频率范围的 1-3 倍（例如，在 图 5-14 中，我们将 LAE 频率设置为大约 2000Hz，与型号拟合范围相似）。

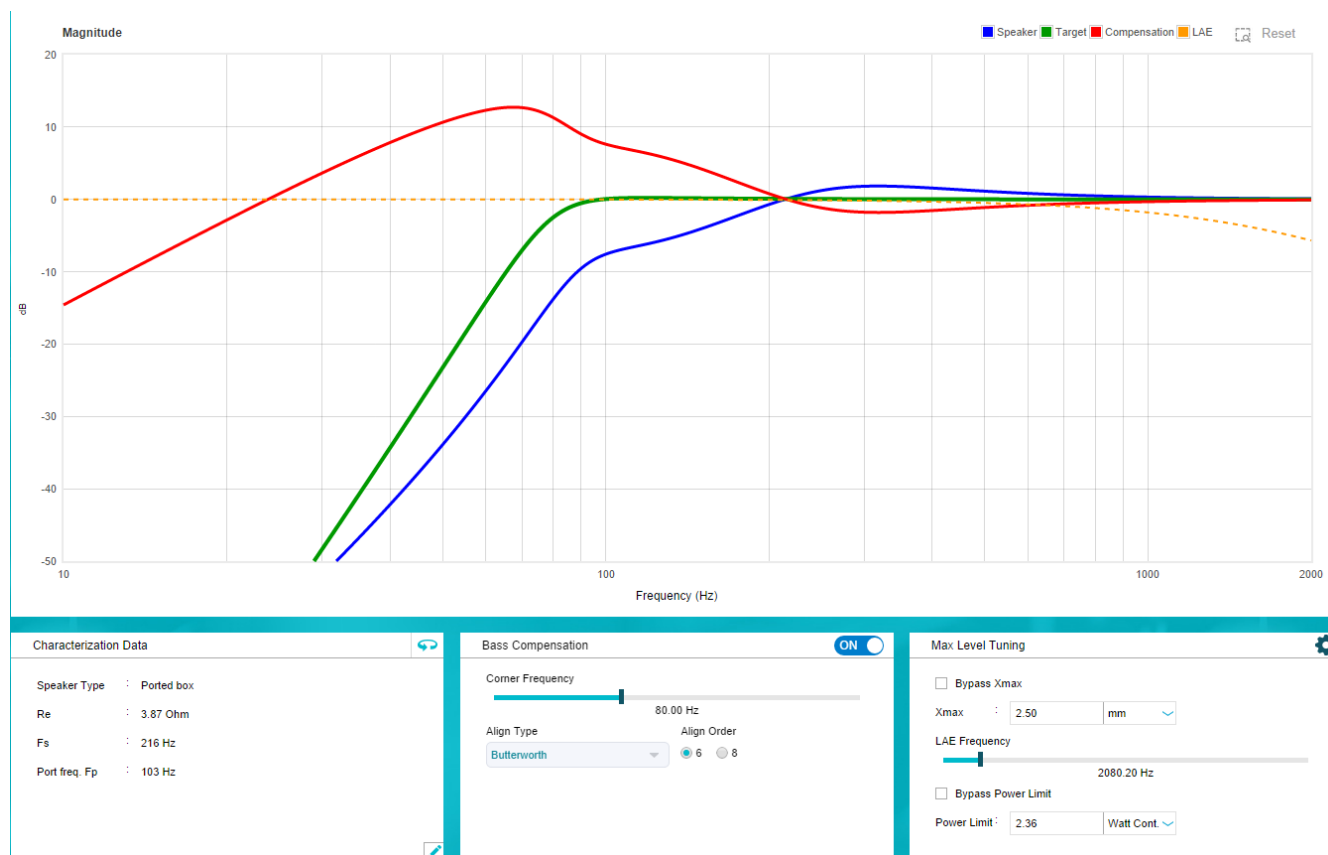


图 5-14. LAE 频率设置

5.1.9.3 功率限制

功率限制是指触发扬声器过热保护的算法的阈值。可以通过不同的方法输入该阈值（即功率阈值或温度阈值，根据扬声器型号而言，两者彼此等效）。

5.1.9.4 启动、衰减、能量

与 TAS5825M 典型处理流程中的 DRC 块相同（请参阅应用手册《TAS58xx 系列一般调谐指南》），启动和衰减时间是指保护算法生效和解除的时间。能量时间是指算法检测输入信号能量的时间。

通常建议将启动和能量时间设置在算法的前瞻时间附近（例如，对于 48K 处理流程，前瞻时间约为 2.67ms），而衰减时间可以设置得稍大于启动时间。较短的启动时间可以使算法更快地响应音频信号，而这也会在播放具有较大动态特性的音乐时导致音量损失。如果能量时间非常短，则算法可能会更灵敏并导致更多压缩，而这也也会影响音乐音量。

下图显示了具有不同启动和能量时间设置以及相同扫描正弦波信号的扬声器偏移（用激光设备测量）的示例情况。调整这些设置时，建议执行一系列收听测试。为了获得最佳配置以获得出色的收听和保护效果，还建议选择多个扬声器进行收听测和保护测试。

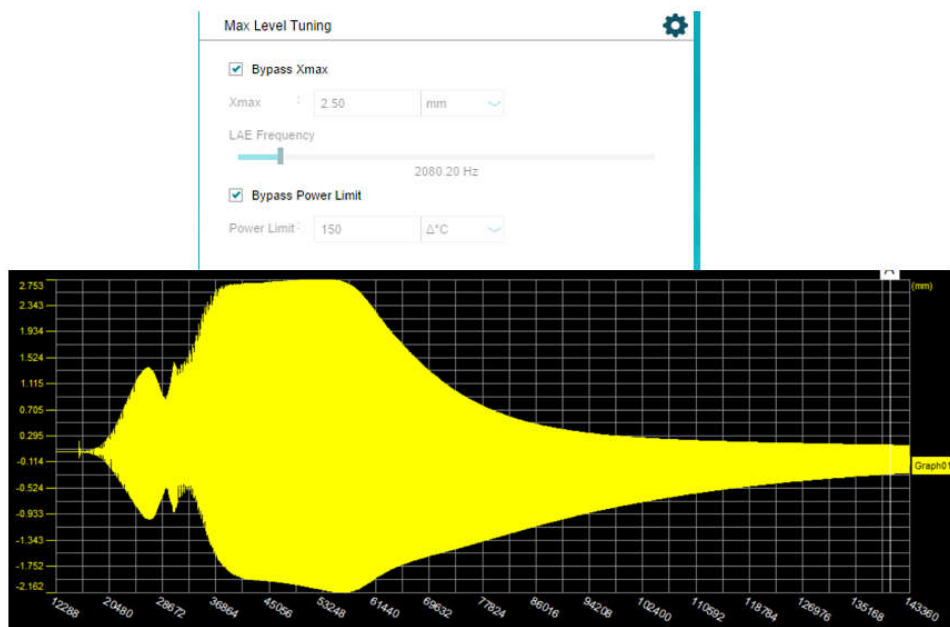


图 5-15. 无保护的扬声器偏移 ($X_{\max} = 2.75\text{mm}$)

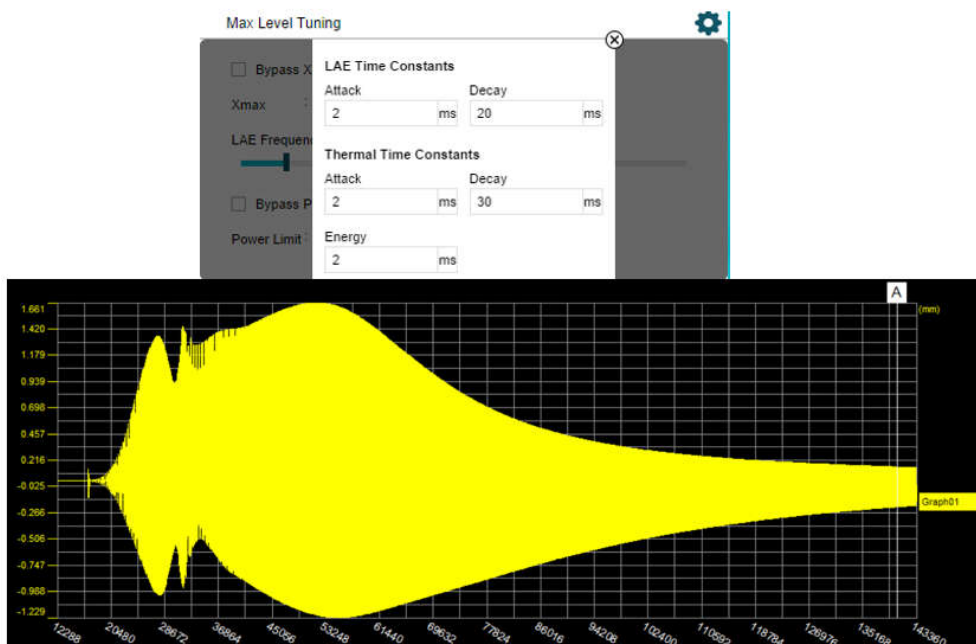


图 5-16. 带保护的扬声器偏移 ($X_{\max}=1.66\text{mm}$)

5.1.10 反削波器

抗削波器是一个全频带 AGL 块，其是整个处理流程中的最后一个信号限制块，旨在为调谐和保护提供更多灵活性。

5.2 智能放大器验证

5.2.1 SPL 响应验证

在本节中，我们测量了粉色噪声 SPL 响应，以展示应用智能放大器算法时的性能改进。如 图 5-17 所示，当打开智能放大器算法时，TAS5825M 可以提供更多低音、更响亮的中频和高频效果，因为偏移和热保护可以在不损坏扬声器的情况下实现令人印象深刻的音频改善。

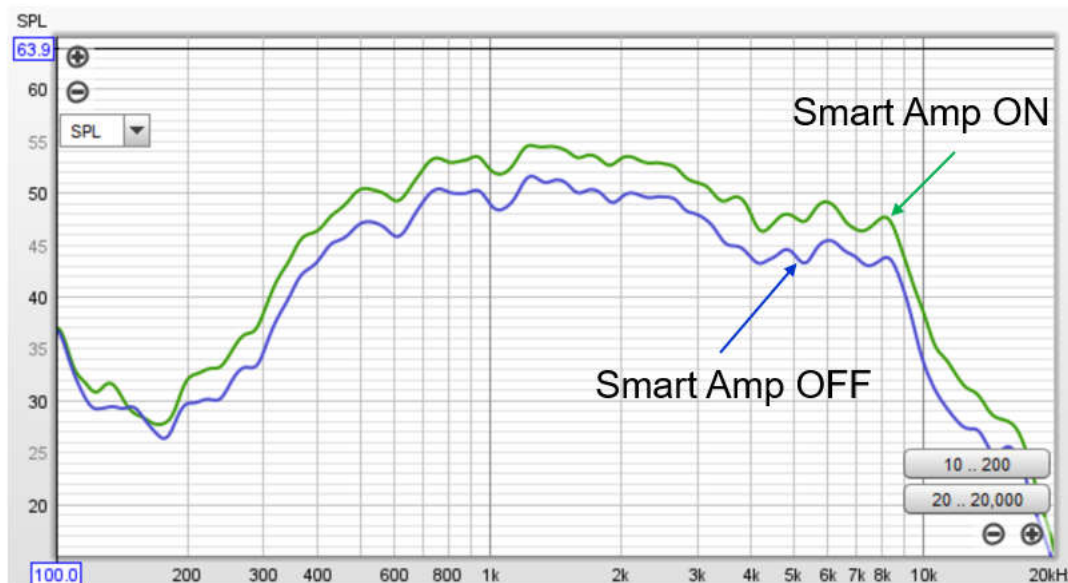


图 5-17. SPL 响应比较 (TI 智能放大器调谐与正常调谐对比)

5.2.2 热保护验证

在具有扬声器 I/V 检测功能的音频系统中，可以实时测量扬声器电阻 R_e ，同时还可以计算环境温度。TAS5825M 不支持 I/V 检测功能，因此无法使用实时 IV 数据自动捕获扬声器 R_e 。但 TAS5825M 智能放大器算法可以使用音频数据和扬声器型号来预测扬声器音圈的温度，并保留一定裕度以实现热保护。

表 5-1 和 图 5-18 显示了采用单频音频信号的 TAS5825M 热保护功能的保护验证。通过不同的功率限制设置（温升裕度），该算法可以自动限制 TAS5825M 的输出功率，以避免对扬声器音圈造成热损坏。在实际应用中，TAS5825M 使用 25°C 条件下的扬声器 R_e 来计算进入扬声器音圈的输出有功功率，不考虑 R_e 随音圈温度上升而增加，因此实际输出功率可能低于保护算法的预期，这可能会导致温度升高时保护行为更加激进。因此，如 表 5-1 所示，音圈的实际温升低于热限设置，并且间隙会在温度升高时增加，从而导致更保守的保护机制。

表 5-1. 热保护验证结果

功率限制 (W)	热限制 (K)	输出 RMS (V)	R_e (Ω)	测得的温度变化 (K)	误差 (K)
3	122.96	4.608	7.64	113.91	-9.05
2	81.97	3.767	7.12	81.66	-0.31
1	40.99	2.66	6.73	43.09	2.1

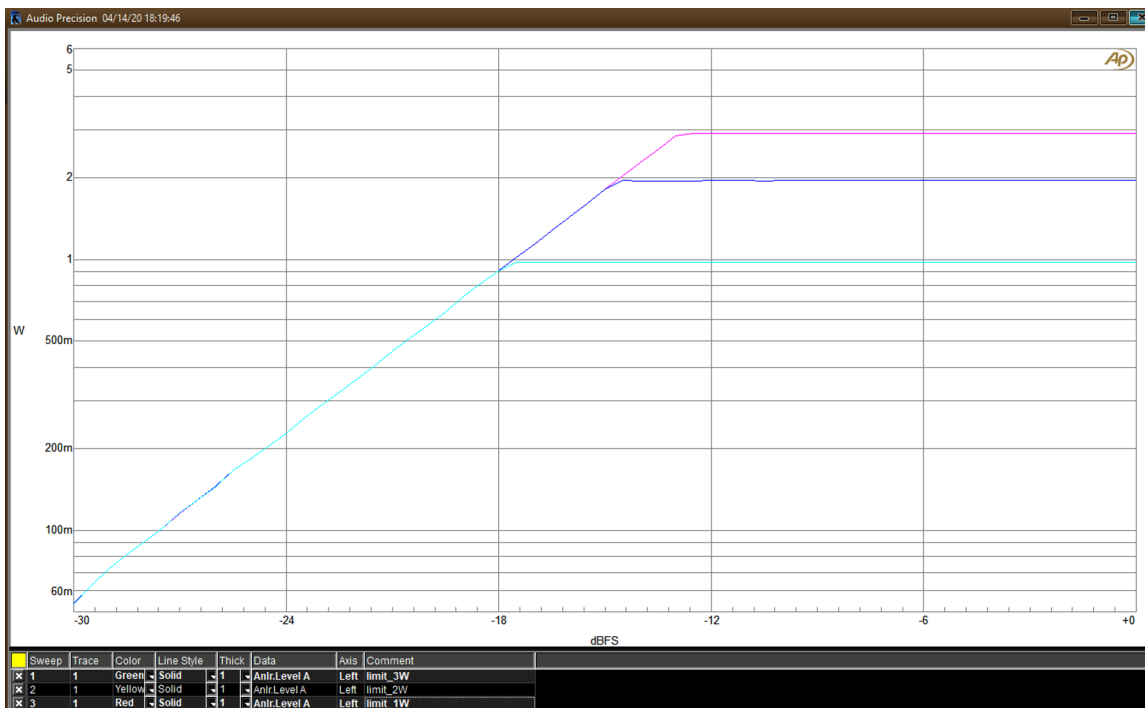


图 5-18. 热保护验证结果

6 总结

本文全面概述了如何使用 **TAS5825M** 音频放大器实施智能放大器技术。智能放大器技术可通过使用预测算法来监控和控制扬声器的行为，从而提高音质，最大限度地提高音频功率输出，并保护扬声器。

本文首先介绍了扬声器建模的基本原理和智能放大器算法的基本准则。本文概述了 **TI** 的智能放大器如何根据扬声器偏移和温度动态调节音频输出，以防止损坏，同时提供比传统系统更好的低音和动态范围。然后，本文详细介绍了如何准备硬件和软件，以实现采用 **TAS5825M** 的智能放大器应用方案。最后，本文详细介绍了扬声器特性表达以及智能放大器调谐和验证，以帮助用户快速实现使用 **TAS5825M** 的智能放大器方案。我们还提供了验证实验，以验证智能放大器技术的优势和音频性能改善情况。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TAS58xx 系列一般调谐指南](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [智能放大器调谐指南](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [智能放大器快速入门指南](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [智能放大器开发入门指南](#), 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [SmartPA 扬声器保护算法](#), 应用手册。

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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司