参考資料

Application Note

スマート アンプ スピーカの保護 — 簡易ガイド

Supriyo Palit, Jasjot Singh Chadha

概要

携帯電話、タブレット、ノートパソコンに使用される大量生産の小型スピーカは、コーンの動きと電力処理の両方が物理的に制限されているにもかかわらず、迫力のある豊かなサウンドが求められます。このような制限を超えてスピーカに電力をかけると、コーンの過剰な変位またはボイス コイルの過熱によって損傷が発生します。そのため、メーカーでは従来、最悪のケースを想定した単一の固定値による制限をもうけてどちらの障害からも保護してきました。しかし、その結果、スピーカが危険な状態になっていないにもかかわらず、本来の性能が発揮されないままになっています。この資料では、TI のスマート アンプ スピーカの保護技術について説明します。この技術では、固定された制限値に代わり、スピーカの実際のエクスカーションや温度の継続的なリアルタイム追跡を採用することで、最悪のケースを想定した固定値に従うのではなく、安全な上限値までスピーカを駆動できるようにします。その結果、小型で安価なスピーカであっても、特に低音でより大音量でダイナミックなサウンドが得られます。ハードウェアの追加が不要で、リスクも増加しません。

目次

1 概要....2
2 スピーカの動作....2
3 スマート アンプの監視....3
4 スマート アンプの保護....3
4.1 エクスカーション保護機能....3
4.2 過熱保護....4
5 生産ラインのキャリブレーション....6
6 モデルの正確性....7
7 ブロックされたポートの信頼性....7
8 スマート アンプ:フル システム....8
9 システムのコスト削減....9
10 まとめ....9
11 参考資料....9

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 概要

現代の携帯電話、タブレット、ノートパソコンは、物理的に小さいスピーカ (場合によっては、硬貨よりもわずかに大きいもの) から、大きくクリアな低音を出すことが期待されています。これは難しい問題です。サウンド出力は、スピーカのコーンが物理的にどれだけ動くことができるか、コイルがどれだけの電力を扱うことができるかに密接に関係しているからです。多くの産業用機器や個人向けエレクトロニクス最終製品で使用されている小型スピーカは、大型スピーカと比べて、上記のどちらの要因においても本質的に制限されています。小型スピーカのサウンドを大きくする最も直接的な方法は、スピーカにより多くの電力を供給することですが、供給電力が大きすぎるとスピーカが損傷します。

小型スピーカは、明確に異なる以下の 2 つの方法で損傷します。

1. 過度に押される動作:コーン (実際にサウンドを生み出す動く面) は、どちらの方向にも限られた距離だけ動くように設計されています。それ以上に押すと、コーンはフレームに当たるか、サスペンションを破壊するか、恒久的に変形する可能性があります。この種の損傷は通常、突然、機械的に発生するもので、スプリングが自然な動きの範囲を超えて過度に伸びるのと似ています。
2. 過熱:コーンを動かすワイヤのコイル (「ボイス コイル」) は、トースターの発熱体と同様に、電流が流れるたびに加熱されます。大音量が続くということは、電流が持続し、熱が持続することを意味します。高温により、ワイヤの絶縁体や、コイルを保持している接着剤が溶かされ、スピーカが故障します。

最大音量を小さくするだけで、両方のタイプの障害を防止できますが、スピーカが危険領域に近付いていない場合でも、大音量のコンテンツを再生できなくなります。スマート アンプの役割は、この固定の控え目な制限から脱し、スマートで動的な調整を行えるようにすることで、許容されるときはスピーカを安全な制限値まで直接駆動し、実際に必要なときのみ制限できるようにすることです。

2 スピーカの動作

スマート アンプでのスピーカの保護方法について見ていく前に、スピーカが実際にどのようなものかを確認しておく必要があります。それは小型の専用モーターです。



図 2-1. スピーカが電気信号を音に変換する方法

アンプは、固定磁石の中にあるワイヤのコイルにさまざまな電気信号を送ります。電流が磁界内のワイヤに流れると、電気モーターが回転するのと同じ原理で、ワイヤに物理的な押す力と引く力が発生します。この場合、力によってシャフトを回転させるのではなく、コイルがまっすぐに押されます。コーンはコイルにしっかりと接着されているため、コーンにも同じ力がかかり、そのコーンの前の空気が押されたり引かれたりします。この動いている空気が、音として聞こえます。

電気信号の 2 つの特性は、音の 2 つの特性に直接対応していいます。つまり、信号の行き来の動きの速さがピッチ (周波数) になり、コイルの動きの幅がラウドネス (振幅) になります。そのため、小型スピーカでは大きな深い低音を安全に再現することは困難です。同じ大きさの音として聞こえるようにするには、音程の低いベース音は、高音の音よりも、1 サイクルあたりのコーンの物理的な動きが大きくなければなりません。このような大きなコーンのエクスカーションはリスクが高く、過度に駆動してスピーカの損傷を招く可能性があります。ただし、安全マージンを固定すると、聴き手は低音を楽しむことができなくなります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 スマート アンプの監視

スマート アンプには、コーンの動きの程度やボイス コイルの温度を直接測定する方法はありません。量産された小型スピーカ内には、このようなセンサを設置できるだけのスペースがなく、センサの追加は実用的でなくコストもかかります。その代わり、スマート アンプは、アンプ側で安価かつ連続的に測定できる 2 つの数値を使用します。スピーカに印加される電圧と、スピーカを流れる電流です。スマートアンプでは、電圧と電流を監視し、特定のスピーカでのサウンドの生成状況を把握することで、直接には観測できない次の 2 つの事項を数学的に推測できます。

- コーンの現在の動きの程度 (エクスカーション)
- ボイス コイルの現在の温度。

動きや温度の上昇がまったく同じであるスピーカ モデルはありません。剛性、コーンの重量、放熱、その他の物理的特性は設計ごとに異なり、同じラインからユニット間でも異なります。スマート アンプは、駆動する特定のスピーカの内部「プロファイル」を保持します。このプロファイルは、スピーカの特性を事前に評価することで構築され、構築後もデバイスの使用中に継続的に微調整することができます。これらすべてが内蔵アンプ センシングを使用したソフトウェアで動作するため、外部センサとそのためのコストやスペースを追加する必要がありません。

4 スマート アンプの保護

スマートアンプでは、2 つの保護戦略を並行して実行します。これは、前述の 2 つの障害モードでは挙動が異なるからです。過剰なエクスカーションが発生し、1 回の一瞬の大音量で損傷を引き起こす可能性があります。それに対して、過熱は数秒から数分の間に徐々に蓄積します。以下に、各メカニズムの動作について説明します。また、標準アンプとスマートアンプを選択する場合のそれぞれの利点についても説明します。

4.1 エクスカーション保護機能



図 4-1. スマート アンプのエクスカーション保護機能によって信号をオフにするタイミングが決定される方法

スマート アンプは、スピーカの内部「プロファイル」を使用して、受信信号が変更されずに通過した場合にコーンがどれだけ移動するかを 1 秒間に複数回計算します。その「予測された」動きがスピーカの安全限界を超える場合、アルゴリズムは原因となる信号の部分のみを停止します。事実上、コーンの最大の動きは最も深い低音によって発生するためです。それ以外はすべてそのまま通過するため、聴き手は音量がカットされることなく、クリーンなサウンドが維持されていると感じます。

ここでは、「予測」という言葉が重要です。動作への影響が発生する前に補正が行われる必要があるため、オーディオ パスには非常に短い遅延が組み込まれます。信号は数ミリ秒さかのぼって保持され、パラレル コピーにより結果の動作が予測され、遅延信号が最終的に先に送信される前に必要な補正が適用されます。これは概念的には自動車の自動ブレーキ システムに似ています。そこでは、衝突後ではなく、衝突前に危険を感知してブレーキをかけるためのリード タイムが必要です。この保護機能がないと、小型スピーカに過度な負荷がかかってブザーが鳴動し始め、歪みが発生します。その結果、サスペンションの破壊、コーンの歪み、ボイス コイルでの磁石との物理的な位置合わせのずれなど、恒久的な損傷が発生します。

利点：低音によりコーンが最も大きく押されるため、最悪のケースを想定した固定の安全マージンでは、音質に大きな影響が及びます。スマート アンプは、スピーカの動作に基づいてこのマージンを継続的に再計算します。そのため、ほとんどの場合で低音を安全に出力でき、より大きく深い低温により安全な制限範囲を超えてコーンが押される可能性がある場合にのみ、最大限のマージンに切り替えることができます。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

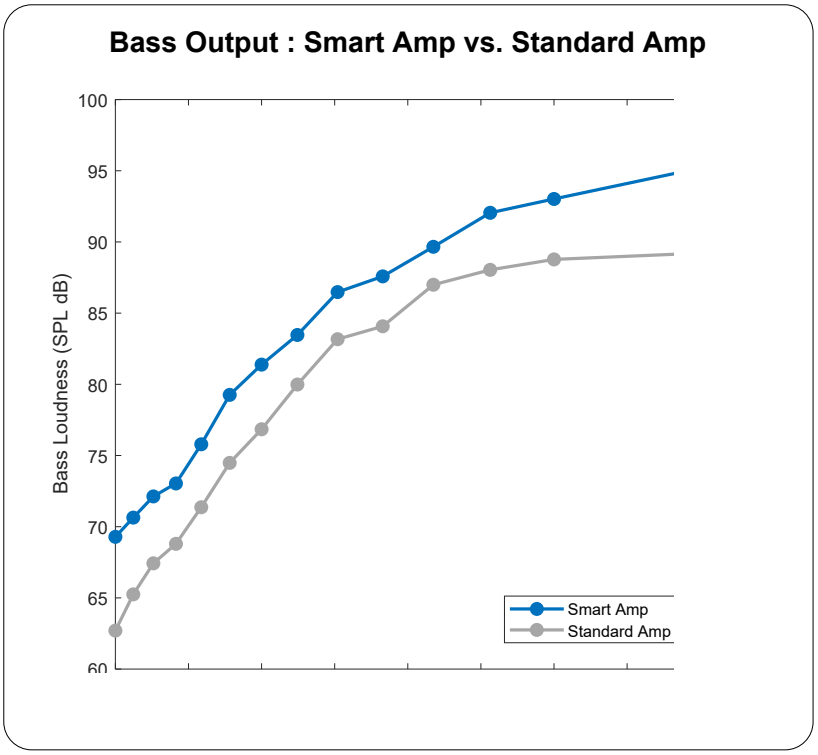


図 4-2. 低音のラウドネスと周波数との関係：スマート アンプと標準アンプの比較

上に、低周波低音領域のグラフの例を示します。ラウドネスは音圧レベル (SPL) 測定値でデシベル (dB) 単位で表されており、スマート アンプは標準アンプよりも常に音量が大きくなっています。低音は、小型スピーカにとって表現するのが最も難しい種類のラウドネスです。一般的なコーン サイズでは、周波数が低下すると SPL 出力が自然に低下するため、小型スピーカでは安全マージンが適用される前に、下限側がすでに弱く聞こえます。最悪のケースを想定した固定マージンを設ける場合、さらに追い打ちの制限が重なることになります。この部分こそがコーンの動きが大きく、スピーカの余裕が最小になる周波数範囲であるためです。そのため、追加の低音 SPL が非常に重要となります。これにより、小さなスピーカで困難が生じる周波数範囲が改善されます。低音の出力時にわずか数 dB の余裕のあることが、大音量時のサウンドに厚みのない小型スピーカと、フルサウンドが得られる小型スピーカとの違いを生み出します。

4.2 過熱保護



図 4-3. スマート アンプの過熱保護によるコイル温度の管理方法

熱のふるまいは物理的な動きとは大きく異なります。1 回の一時的な大音量で、それが数ミリ秒であってもコーンの動きは限界を超えることがあります。しかし、ボイス コイルの過熱または冷却には少なくとも数秒の時間がかかります。熱が物理的に蓄積し、周囲の素材を通じて放散する必要があるためです。このようなタイム スケールの違いがあるため、過熱保護においては、急激にオンとオフを切り替えるカットオフの動作は行われません。過熱保護はサーモスタットのように動作します。推定温度が限界に向かって上昇している場合、徐々に電力が制限されます。温度が低下すると、徐々に再び流れるようになります。このようなアプローチによって、スピーカは常に一定の控え目な電力上限に抑えられるのではなく、**安全な**水準の中で最も高い熱温度で可能な限り長時間再生できるようになります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

こうした保護機能がない場合、保護されていない小型スピーカを持続的に大音量で使用した場合に発生する既知の障害が起こるリスクがあります。つまり、音質が低下し、歪みが生じ、最悪の場合、コイルの絶縁が損傷します。これは、1 回限りの一時的な大音量とは異なり、密閉されたコンシューマ デバイス内で永続的なものとなり、修復できません。

では、スピーカの内部に物理的な温度センサーがない状態で温度をどのように推定するのでしょうか。コイルのワイヤの電気抵抗は、温度の上昇に伴って予測可能な方法で上昇します。白熱電球のフィラメントがスイッチをオンにした瞬間 (低音、低抵抗、大電流サージ) と、しばらく光った後 (高温、高抵抗、電流が安定) とで異なる動作をする理由と同じです。スマート アンプは、定期的に聴き手には聞こえない程度の非常に低い周波数の音を注入してコイルの抵抗を測定し、そこから温度を推定します。これは、間接的でありながらも信頼性の高い測定値であり、ハードウェアの追加も不要です。

利点:過熱保護には、ピーク音に対応できる余裕を確保できるという特筆すべき利点があります。標準的なアンプでは、連続電力供給を十分低く抑えて、大音量での持続的な使用でも安全性を確保できるようにします。スピーカが 1 秒間なら容易に吸収できるような一時的な大音量が 1 回発生した場合でも、常にその上限に抑えなければなりません。スマート アンプでは、コイルの温度を継続的に追跡するため、温度的な余裕がある瞬間には、低音の打撃音や瞬間的な大音量をそのままの強さで発生させることができます。また、スピーカの長期平均電力を定格安全制限内に維持することが可能です。

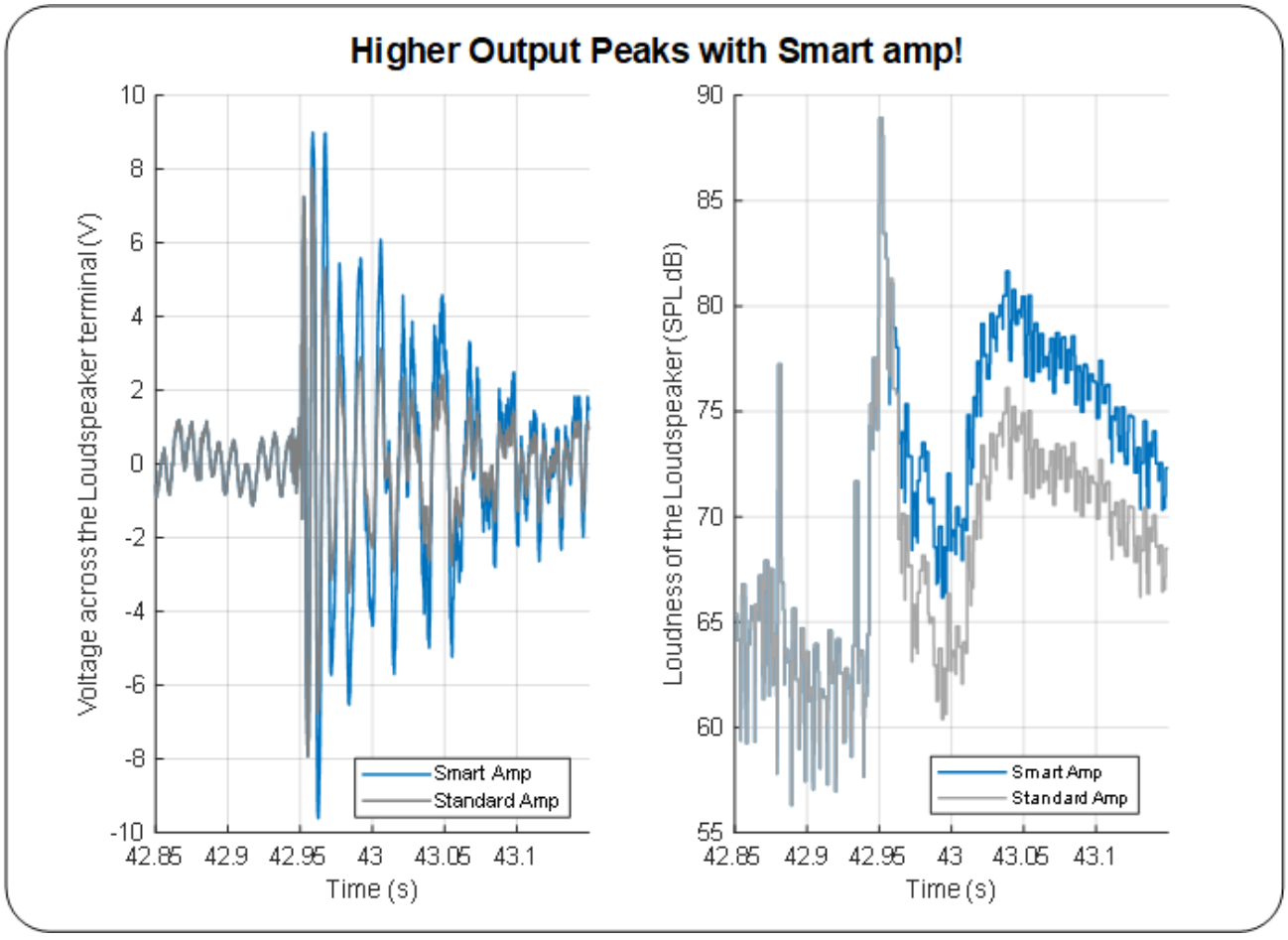


図 4-4. スマート アンプ使用時のより高い出力ピーク

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

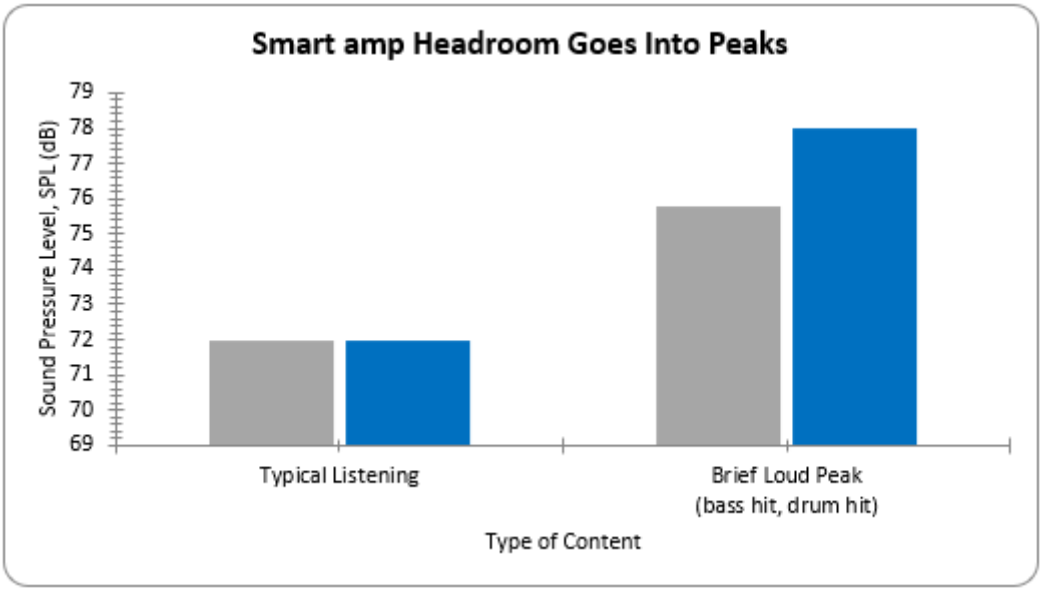


図 4-5. スマート アンプによる余裕はピーク音に使用可能

上に、グラフと棒グラフの例を示します。最初の部分では、一般的な聴取区間では、コイルが安全な温度範囲内にあるため、標準アンプとスマートアンプのどちらも同じ出力を供給します。約 42.95 秒でベース / ドラムの一時的なヒットが発生し、標準アンプでは固定の控え目な上限に従って信号が制限されますが、スマート アンプでは最大強度で一時的な大音量を通過させます。左のグラフはスピーカ端子の電圧出力を示し、右のグラフはその結果生じるラウドネス SPL を示しています。同じ比較を棒グラフにも示しています。スマート アンプは、標準アンプと比較して、一時的な低音の発生中に大きなラウドネスを維持できているのが明らかです。

実際には、より迫力のある音がダイナミックに再生されることになります。瞬間的な低音が本来の迫力を維持しつつ、通常の音は安全領域内に十分に収まります。システムで通常よりも抑制されるのは、本当に極端で持続的なケースだけです。たとえば、すでに数分間にわたってデバイスが大音量で再生されている場合などです。

5 生産ラインのキャリブレーション

過熱保護に使用される抵抗ベースの手法が機能するのは、スマート アンプがこの特定のスピーカ コイルの「通常の温度」、つまり変化を測定するための基準点を認識している場合です。コイルがまったく同じ抵抗値を持って製造ラインから出荷されることはありません。ワイヤの長さ、巻線の締まり、材料のバッチに多少のバラツキがあるため、同じスピーカ モデルで、同じ工場のバッチ内であっても、個々のユニットが少しずつ異なります。単一の汎用リファレンス データシートの数字が、実際の値に十分に近いユニットもあれば、明らかに違ってるユニットもあります。

これを修正するために、個々の携帯電話やコンシューマ エレクトロニクスは、顧客に届けられる前に、生産ラインで一度キャリブレーションされます。最終テスト中、工場内の既知の制御された温度に保持された状態で、各ユニットは自らのスピーカの電気抵抗を測定します。この特定のユニットのコイルの抵抗と温度のペアは、既知の開始温度で、ユニットに固有の個人基準点として装置のメモリに永久的に保存されます。

その時点から、スマート アンプが現場で読み取るすべての抵抗値は、そのユニットの保存されている参照値と比較されます。これは、計量前にキッチン スケールをゼロに調整するのと同じ考え方です。このステップを省略すると、そのユニットの温度推定値が一貫して一方向に外れていきます。キャリブレーションが厳格すぎると、スピーカが実際に除外する必要のないラウドネスまで除外することになり、緩慢すぎると、コイルがシステムでの想定よりも高温で動作することになります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 モデルの正確性

スマート アンプの有効性は、スピーカの内部プロファイルの正確さによって決まります。しかし、スピーカは静的なものではなく、通常の製造のバラツキのため、完全に同じユニットはなく、個別のスピーカーの動作は、使用期間、温度、一般的な摩耗に応じて変化する可能性があります。内部プロファイルが実際の物理的なスピーカと同期していない状態でドリフトすると、その上に構築される予測メカニズム (エクスカーション推定、温度推定など) の信頼性が低下します。

スマート アンプでは、アンプ自体が継続的にクロスチェックすることにより、この問題に対処します。内部モデルで予測されるスピーカの電気的挙動と、センシング回路により実際に測定する内容を比較します。予測と測定との不整合は誤差信号として扱われ、モデルの内部パラメータはその誤差を可能な限り低減するように調整されます。これは概念的には、車の GPS ナビゲーションにおいて移動の全行程で最初の 1 回の読み取りを信頼するのではなく、新しい衛星信号に対して常に位置を再確認するのと同じ考え方であり、わずかなエラーが数週間、数か月の使用のうちに気付かれずに蓄積されるのではなく、小さな継続的な修正によりシステムを更新し続けます。

スピーカの初期プロファイルを生成するために、周波数範囲にわたってテスト トーンでスピーカをスイープし、その電気インピーダンスと物理的な動きの変化を測定して、スピーカーの自然共鳴の「スイート スポット」周辺に明確なピークのある曲線、最も振動しやすい周波数をトレースします。そのスイート スポットから離れると、スピーカの動きは同じ入力に対してどちらの方向にもより小さくなります。

スピーカの熱に対する挙動は、既知の電力でスピーカを駆動し、テスト バーストを繰り返したときの温度の上昇と下降を追跡することで測定されます。予測と測定結果の一致することが、スマート アンプ技術の重要なポイントです。実際に測定できるもの (電圧、電流) から測定不可能な隠れた量 (動き、熱) を推論することで、実際の製品やハードウェアにおいて高い信頼性で動作して、スピーカを保護しています。

7 ブロックされたポートの信頼性

通常の使用で一般的に発生するスピーカの故障には、エクスカーションと過熱保護で対応できます。しかし、製品は実際には、ラボテストで十分に予測されてしていない方法で使用されます。多くの小型スピーカでは、アコースティック ポートまたはグリル (空気を押し出すためのエンクロージャ内の小さなメッシュ) が使用されています。そのポートが (携帯電話ケース、ステッカー、ほこり、または柔らかい面に置かれている状況により) ブロックされると、スピーカの音響負荷が変化し、それ以外の場合には問題のなかったはずのボリュームで損傷を与えるレベルのエクスカーションが発生する可能性があります。

スマート アンプでは、エクスカーションや温度を推測するのと同じ方法でこれを検出します。つまり、ブロックされたポートは、システムが認識する方法でスピーカの電気的シグネチャを変化させ、自動的に補正の保護限度を狭め、実際の使用によって引き起こされる危険からスピーカを保護します。これにより、スピーカのパフォーマンスが信頼性の高いものになり、フィールド返品や保証請求が少なくなります。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

8 スマート アンプ：フル システム

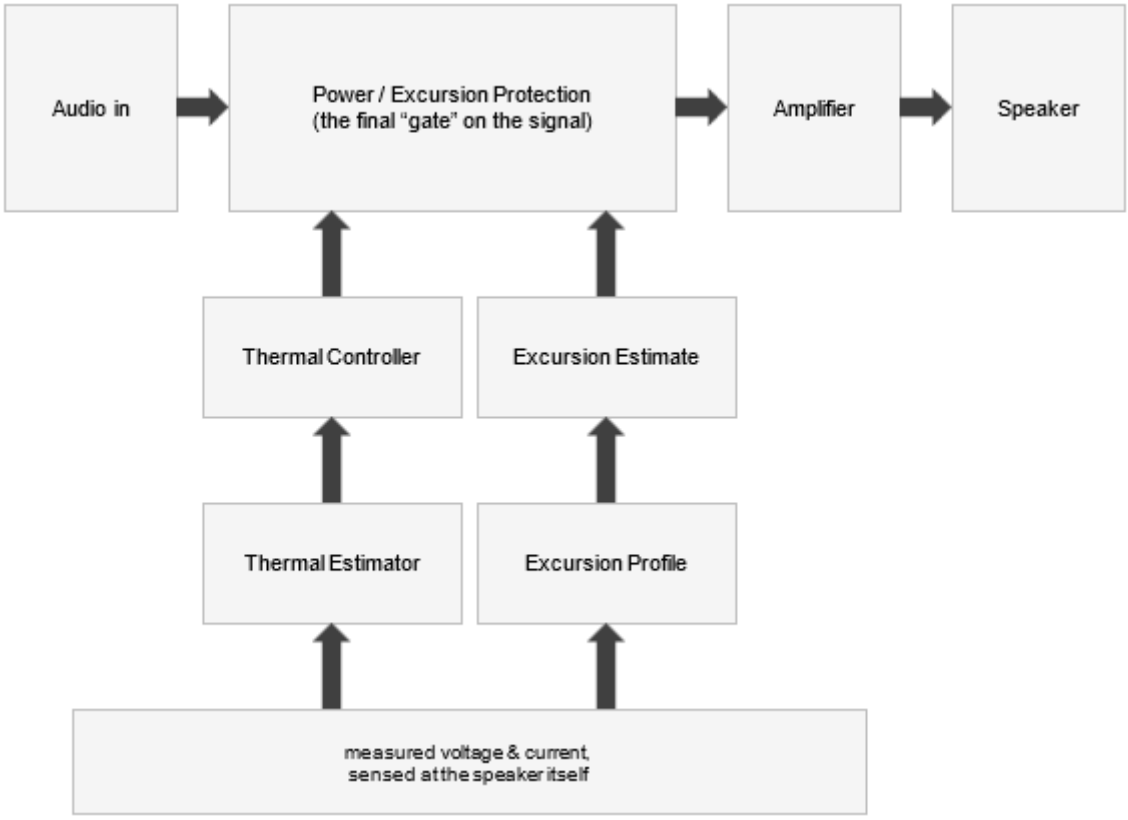


図 8-1. スマートアンプのフル システム：エクスカーションと過熱保護が連携

エクスカーションと過熱保護の両方のチェック (大きく動きすぎていないか、高温になりすぎていないか) が、同じ最終ゲートで連続的に行われ、受信信号の安全な通過量が決定されます。スマート アンプは、プロファイルで予測されるスピーカの電気的挙動と、センシング回路が実際に測定したものとを継続的に比較し、不整合を誤差信号として扱い、プロファイルの内部パラメータを調整してギャップを埋めます。聴き手にとっては単一の処理がスムーズに決定されたかのような結果になりますが、内部では 2 つの独立した安全システムが異なるタイムスケールで実行され、1 つの共通の目的のために働いています。つまり、スピーカがその瞬間に安全に生成できる最大の音、それ以上でもなく以下でもない最適な音を聴き手に届けられるようにしているのです。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

9 システムのコスト削減

スマート アンプ技術を採用すると、システムのコストを削減できます。これは、スマート アンプを使用すれば、小型で安価なスピーカを安全上の本当の限界付近で動かせるためです。同じラウドネスと信頼性の目標を達成するために、大型で強化された高価なスピーカを購入する必要はなくなります。アンプとスピーカを組み合わせた部品表に注目すると、最終的なシステムは高性能で信頼性が高いものの、安価であることがわかります。

	コスト		コスト
特大のスピーカ	$1.75	標準スピーカ	$0.90
標準アンプ	$0.10	スマート アンプ	$0.65
合計 ($) - 従来型	$1.85	合計 ($) - スマート アンプ	$1.55

この例では、ラウドネスと信頼性の向上に加えて、スマート アンプ分のコストの増加にもかかわらず、ユニットあたりのシステムの正味の節約額が約 0.30 ドルとなります。

10 まとめ

寸法	標準アンプ	スマート アンプ
低音のピーク ラウドネス	最悪のケースを想定した固定マージンにより上限を設定	個々のスピーカに合わせた動的な制限
熱に関する性能	固定の控え目な制限、高温または低温	実際の温度にリアルタイムで適応
フィールドでの信頼性	ブロックされたポート / 誤用は検知不能	自動的に検出して補正
システムの正味コスト	大型 / 強化スピーカが必要 構成部品全体ではコスト高	安価な小型スピーカで動作 システム コストが低減

スマート アンプ技術により、最悪のケースを想定した固定の安全マージンを設けるのではなく、深い低音と動的なピーク音に合わせることができます。この 2 つの要素は、小型スピーカでは実現の難しい、最も重要なオーディオ コンテンツです。固定の制限ではなく、スピーカの実際の変位と温度に関する連続的なリアルタイムの情報に依拠することで、スマート アンプは実際の使用条件下でのフィールドの信頼性を確保しながら、パフォーマンスの余裕を生み出します。追加のハードウェア コストは不要で、システムの正味節約額も増加させられます。

TI は最小のモバイル設計から大出力アプリケーションまで、幅広いアンプ製品ラインアップを網羅したスマート アンプ ソリューションを提供しています。TAS2563 と TAS2573 は、DSP と IV センス機能が搭載された昇圧型の Class-D アンプで、バッテリ駆動でスペースに制約のある設計向けに特化して設計されています。6W 以上の電力を供給すると同時に TI のスマート アンプ スピーカ保護アルゴリズムをオンチップで動作させることができるため、コンパクトなモバイル デバイスでも基板面積やコストを増やすことなく、総合的なエクスカーションおよび過熱保護を提供します。さらに大きなスケーリングが必要な設計には、TAS2781 を用意しています。同じアプローチを、リアルタイムのスマート アンプ スピーカ保護機能を内蔵した 24-V Class-D アンプにまで拡張しています。

11 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、「TI のオーディオ製品」、Web ページ。
2. テキサス・インスツルメンツ、「スマート アンプ ビデオ シリーズ」、ビデオ。
3. テキサス インスツルメンツ、*『SmartPA S スピーカー保護アルゴリズム』*、アプリケーション ノート

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとします。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、 TI の販売条件 、 TI の総合的な品質ガイドライン 、 ti.com または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。 TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月