

## Application Note

## Class-D アンプ外部負荷診断回路



Derek Janak, Clancy Soehren, Damian Lewis

Mixed Signal Automotive

## 概要

本アプリケーション ノートでは、オーディオアンプの出力とターゲット スピーカとの間における電氣的故障を検出および識別するための外部負荷診断回路の設計情報を提供します。本アプリケーション ノートでは、TPA3111D1-Q1 Class-D アンプを例に取り上げていますが、この設計手法は、ほとんどの Class-D アンプの外部故障診断にも適用可能です。

## 目次

1 はじめに.....	1
2 概要.....	2
3 回路図と設計.....	2
4 回路図と部品表.....	7
5 まとめ.....	8
6 改訂履歴.....	9

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

車載用アプリケーションにおいては、組込み電子システムがますます多用されるようになり、特にドライバのリスク低減手段として重要度が高まっています。電子システムへの依存度が高まるにつれて、重大なエラーを検出するために、これらのシステムの動作を監視する必要性も高まっています。負荷診断回路の目的は、自動車全体の電気回路で発生する可能性のある故障を診断することです。

この回路の応用例の 1 つは、eCall システム機能のサポートです。緊急通報 (eCall) システムは、事故発生時に、車載電話を通じて緊急対応機関に即座に通知する新しいアプリケーションです。緊急対応者は、車両に組み込まれたオーディオシステムを通じて、被害者と会話することができます。事故発生時には、車両のオーディオシステムの深刻な損傷により、eCall システムを通じた緊急対応者からの指示を、被害者が聞き取ることができない場合があります。

事故後には、スピーカシステムの故障の原因となるさまざまな故障が発生する可能性があります。重大な事故による損傷により、バッテリーやグラウンドへの短絡、スピーカ端子間の短絡、またはオーディオアンプとスピーカ間の断線などが発生することがあります。障害が発生した場合は、被害者が緊急対応者の声を聞くことができないことを、対応者に対して通知することが重要です。そのためには、システムの稼働レベルを確認するために、想定される故障状態を検出するための負荷診断機能が必要になります。

表 1-1. 故障電位検出

故障状態	外部診断回路なしで検出可能	外部診断回路なしで特定可能
グラウンドへの短絡	あり	なし
バッテリー短絡	あり	なし
負荷短絡	あり	なし
開路	なし	なし

多くのオーディオ アンプは内部診断回路を備えていますが、TPA3111D1-Q1 などのアンプに搭載された故障検出システムでは、短絡状態を検出することしかできません。このようなアンプでは、短絡以外の故障を詳細に特定するために外

部回路を必要とします。本アプリケーション ノートで紹介する設計の目的は、内部故障診断機能を備えた IC に代わる外部故障診断回路トポロジを提供することです。

本アプリケーション ノートで紹介する回路と設計は、業界標準に基づく試験を一切受けていません。本設計の一部または全体をいかなる形であっても使用する場合は、その安全性を確保するために必要な業界標準試験を、利用者自身の責任で実施してください。テキサス インストルメンツは、本設計の安全性について、書面または黙示を問わず、一切保証しません。

## 2 概要

本アプリケーション ノートでは、さまざまな短絡状態を識別し、スピーカの検出も行うことを目的とした外部故障診断回路の設計について説明します。評価システムは、TPA3111D1-Q1 Class-D アンプで駆動する出力スピーカと、スピーカラインにシャント接続された負荷診断回路で構成されています。本アプリケーション ノート全体を通して TPA3111D1-Q1 を例に解説していますが、本設計手法は、故障診断機能を内蔵していないほとんどすべての Class-D アンプにも同様に有効です。

## 3 回路図と設計

本アプリケーション ノートに記載されている故障診断回路は、スピーカ出力ラインで発生する可能性のある 4 つの主要な故障タイプに対処することを目的としています。記載されている回路は、アンプの出力を高インピーダンス状態で駆動する手動シャットダウン制御機能を備えたアンプであれば、ほぼすべてのアンプ回路に適用できます。

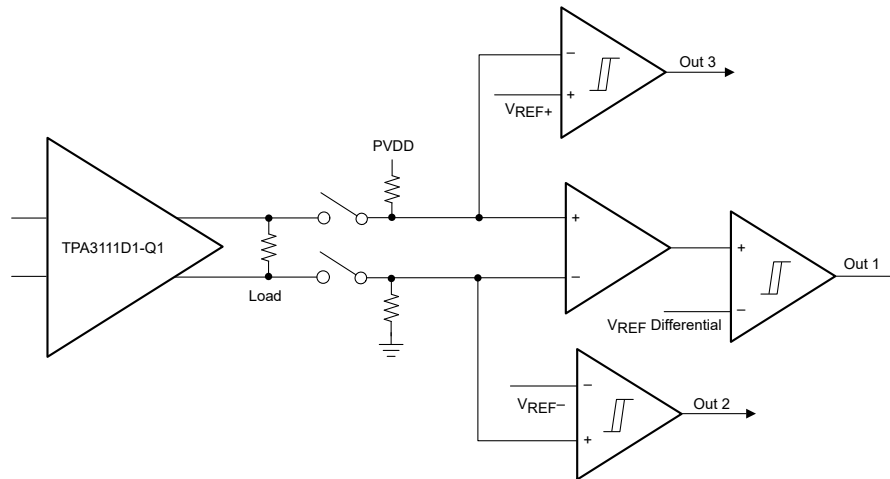


図 3-1. 診断回路の概要

コンパレータは、抵抗分圧回路で設定した電圧しきい値と、負荷の両端の各電圧を比較するために用いられます。さらに、一対のオペアンプを使用して、負荷にかかる差動電圧を測定します。電圧がしきい値を超えるとコンパレータの出力ラインが **Low** にプルされ、故障の発生を示します。ピンの出力を解析することで、どのタイプの故障が発生したのかを判断できます。次の真理値表に、各種出力状態が示すさまざまな故障条件を示します。

各故障検出機構は設計上、共通した構造を有しています。診断回路動作時のアンプ出力は高インピーダンス状態に設定されます。出力回路が PVDD に短絡した場合、アンプ出力が高インピーダンス状態で電流が流れない限り、回路全体の電圧は PVDD レベルまで上昇する可能性があります。同様に、GND に短絡した場合も、アンプ出力が高インピーダンス状態であれば、回路内の全電圧がグランドレベルまで引き下げられます。これらのケースでは、診断回路内の電圧がそれぞれ抵抗分圧回路で設定された基準電圧スレッシュホールドを上回る(または下回る)ため、対応するコンパレータの出力が **GND** にプルされ、故障状態を示します。開放回路が発生した場合、診断回路内のプルアップ抵抗およびプルダウン抵抗により、両方の電圧がそれぞれのスレッシュホールドを超えてプルされ、PVDD および GND 検出ピンがともに **Low** にプルされます。一方、短絡診断では、差動アンプを用いて負荷の両端の差動電圧とスレッシュホールド電圧を比較します。増幅された差動電圧がこのスレッシュホールドを下回ると、対応するピンの出力が **Low** にプルされます。

さらに、デュアル PMOS スwitchング回路(図 3-2 参照)を採用し、スピーカ使用時には診断時に診断回路をスピーカ回路から分離します。これにより消費電力が低減し、診断回路内のバイアスによるスピーカポップノイズの発生を防止しま

す。また、診断機能が使われていないときには診断回路を絶縁することで、オーディオ信号に追加の THD やノイズが追加されることを防止します。

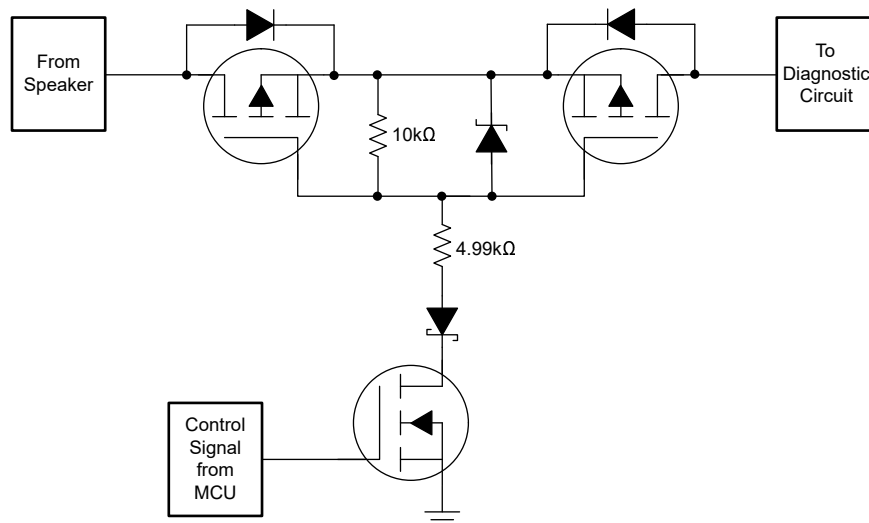


図 3-2. 診断回路絶縁

### 3.1 診断回路の一部

診断回路は、大きく 2 つの部分に分けることができます。開放負荷、GND への短絡、PVDD への短絡の各状態はすべて、図 3-3 に示す回路のものです。コンパレータの出力は、MCU のロジックレベルに応じて、抵抗分圧器によるレベル変換が必要な場合がある点に注意してください。

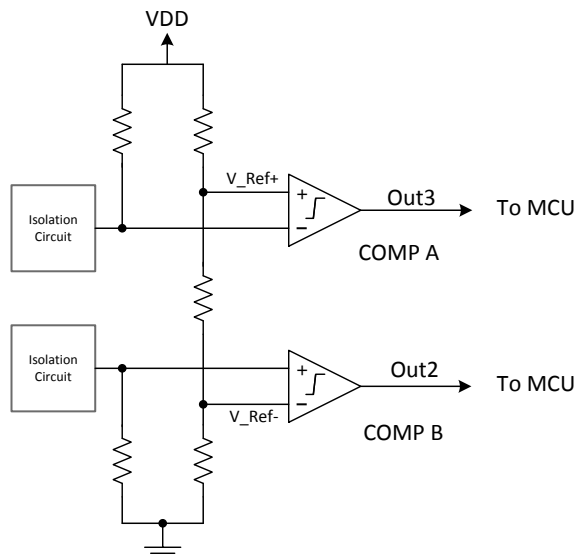


図 3-3. GND への短絡、バッテリーへの短絡、開放状態を対象とする診断回路の一部

これに対し、負荷側の短絡は、負荷両端の電圧差を測定することで検出されます。この機能は、図 3-4 に示す別の診断回路によって実現されています。

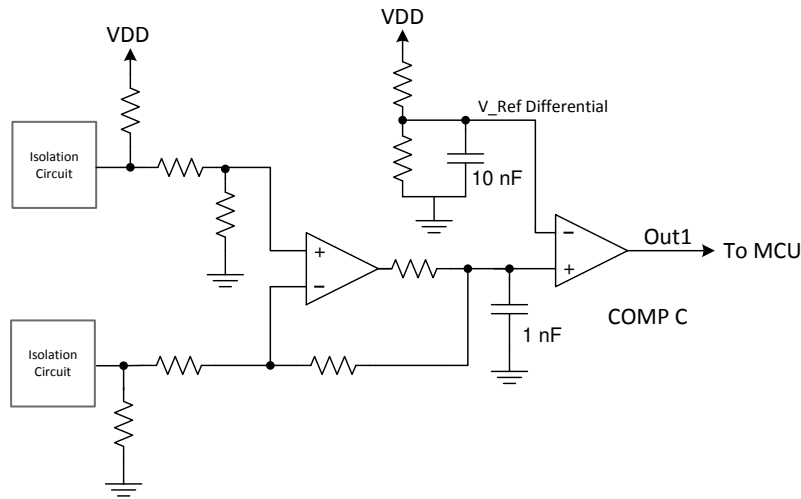


図 3-4. 短絡負荷を対象とする診断回路の一部

アンプが内部故障検出機能を備えている場合、外部診断回路で重複部分を削除することで、よりシンプルな回路設計が可能になります。たとえば、TPA3111D1-Q1 は短絡検出機能を備えています。そのため、負荷短絡検出回路は省略可能であり、開放回路の検出と、GND および PVDD への短絡診断機能を残したまま、Fault ピンを負荷短絡の指標として機能させることができます。

### 3.2 回路の調整

所定の設計に適した抵抗値を選定するには、診断回路の調整が必要になる場合があります。多くのアンプは、出力にプルダウン抵抗と場合によってはプルアップ抵抗を備えています(図 3-5 参照)。これにより、アンプ出力をハイインピーダンス状態にした際の動作に影響が生じます。このため、TI では、それぞれのアプリケーションで適切な抵抗値を選定できるように、本回路のプロトタイプ作成による検証を推奨しています。

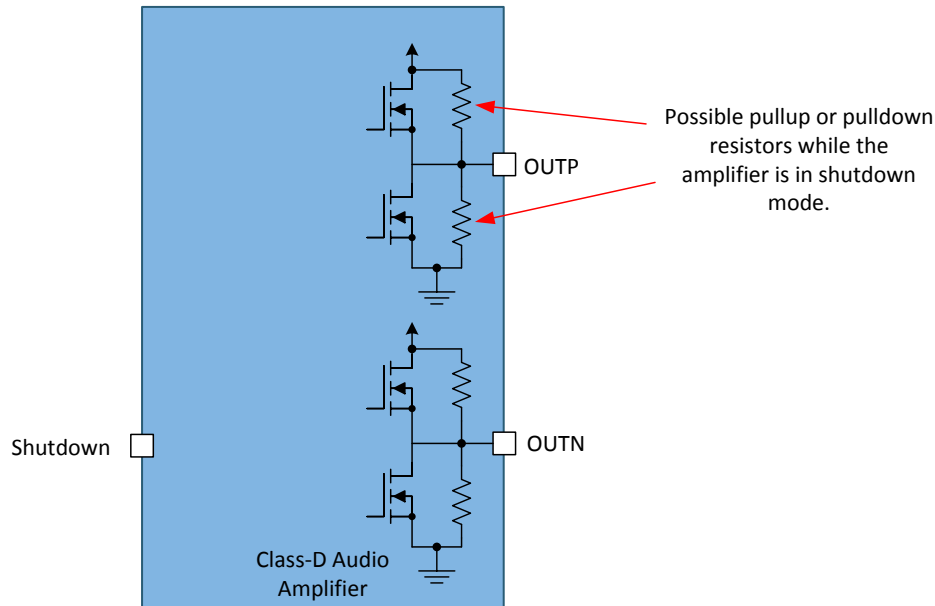


図 3-5. シャットダウンモード時の Class-D アンプのインピーダンス

本実装で要求される設計パラメータに基づき、例示回路(図 4-1 参照)に示す抵抗値が選定されています。デュアル PMOS スイッチ内部の抵抗は回路をオンにするために必要な電流を制御し、分圧回路に用いる抵抗はコンパレータのスレッシュホールド電圧を設定します。オペアンプと組み合わせて使用する抵抗は、差動信号の所望の増幅率を設定します。この診断回路の設計は柔軟性が高く、さまざまなアプリケーションの仕様に対応できますが、最適な動作を得るためには個別の調整が不可欠です。調整手順を以下に示します。

1. 診断回路をオーディオアンプの出力に負荷と並列に接続します。
2. NMOS ゲートを High に駆動して診断回路をオンにします。
3. 4 タイプの故障状態それぞれについて診断ラインの電圧を測定します。
4. 各種の故障状態に対応するスレッシュホールド電圧を設定するため、抵抗分圧器の値を調整します。
5. 設定パラメータの動作を確認します。

調整プロセスでは、設計者が特定の故障を検出する際の感度や許容誤差を指定できます。たとえば、短絡故障については、アンプ出力間の抵抗が  $2\Omega$  を下回ったときに検出するように設定したり、 $4\Omega$  をスレッシュホールドとするように設定することも可能です。これにより、さまざまなインピーダンスのスピーカに対応した調整が可能になります。 $8\Omega$  スピーカ駆動用の回路と  $4\Omega$  スピーカ駆動用の回路では適切なスレッシュホールドが大きく異なる場合があります。抵抗分圧回路は、特定のスレッシュホールド電圧に合わせて調整可能であり、診断回路に関連するプルアップ抵抗およびプルダウン抵抗の値も必要に応じて変更できます。さらに、差動オペアンプに関連する抵抗を調整し、差動アンプのゲインを変化させることで、短絡検出回路の感度を上げたり下げたりすることが可能です。

再度言及すると、選択される受動部品の値は、使用されるアンプモデル、出力回路のトポロジ、そして各故障の定義方法に大きく依存します。表 3-1 に、TPA311D1-Q1 の本設計で用いられた具体的な故障の定義を示します。

表 3-1. 故障の定義

故障	説明
PVDD への短絡	PVDD に対する抵抗値 $< 16k\Omega$
GND への短絡	GND に対する抵抗値 $< 1.8k\Omega$
負荷間短絡	負荷間の抵抗値 $< 0.5\Omega$
開放回路 (負荷未接続)	出力端子間の抵抗値 $> 16k\Omega$

### 3.3 回路パラメータ

表 3-2 に、データ取得時に使用された電源電圧、および各コンパレータについて測定したスレッシュホールド電圧を示します。

表 3-2. データ収集時の供給電圧

パラメータ	値 (V)
電源電圧	12.033
V_Ref+	6.86
V_Ref-	5.157
V_Ref Differential	2.76

表 3-2 のパラメータを用い、各種故障状態において診断回路を有効にした場合に測定されたバイアス電圧を以下に示します。また、故障がない状態で診断回路を有効にした場合のバイアスポイント電圧についても付記します。

表 3-3. 診断回路のバイアスポイント

故障	スピーカ端子 + (V)	スピーカ端子 - (V)	コンパレータ出力 (V)	出力
GND への短絡	2.43	0.017	10.79	101
負荷短絡	5.95	5.94	0.5	110
PVDD への短絡	12.03	11.73	10.85	011
開放回路	11.8	0.159	10.79	001
故障なし	5.88	5.85	5.33	111

スピーカ端子間の差動電圧を測定するコンパレータの Low 状態時の出力値は 1V である点に留意してください。他の 2 つのコンパレータは Low 状態で 0V ですが、このコンパレータのみ値が異なります。この違いは、追加部品を使用せず、LM2904 パッケージ内の第 2 オペアンプをコンパレータとして流用していることに起因します。

また、回路の消費電力は、回路が消費する電流値としても定量化されています。表 3-4 に、回路の消費電流測定値を示します。

表 3-4. 測定値(消費電流)

診断回路の状態	代表値 (mA)
有効(故障なし)	40
有効(故障あり)	36-56
非アクティブ	15

これらの値は本サンプル回路における消費電流を示すものであり、抵抗値が本設計と異なる他の実装においては、必ずしも当てはまらない場合がある点に留意してください。

### 3.4 動作

故障診断を実行するためには、デバイスの  $\overline{SD}$  ピンを **Low** に駆動してシャットダウン状態にする必要があります。これにより、アンプ出力が確実にハイインピーダンス状態になります。次に、N チャネル MOSFET のゲートを **High** に駆動して診断機能を有効にします。その後、3 つの出力の値を読み出すことで既存の故障状態を検出し、故障の内容を診断できます。

表 3-5. 故障状態出力の論理表

条件	Out3	Out2	Out1
GND への短絡	High	Low	High
負荷短絡	High	High	Low
PVDD への短絡	Low	High	High
開放回路	Low	Low	High
故障なし	High	High	High

## 4 回路図と部品表

図 4-1 に、回路図を示します。

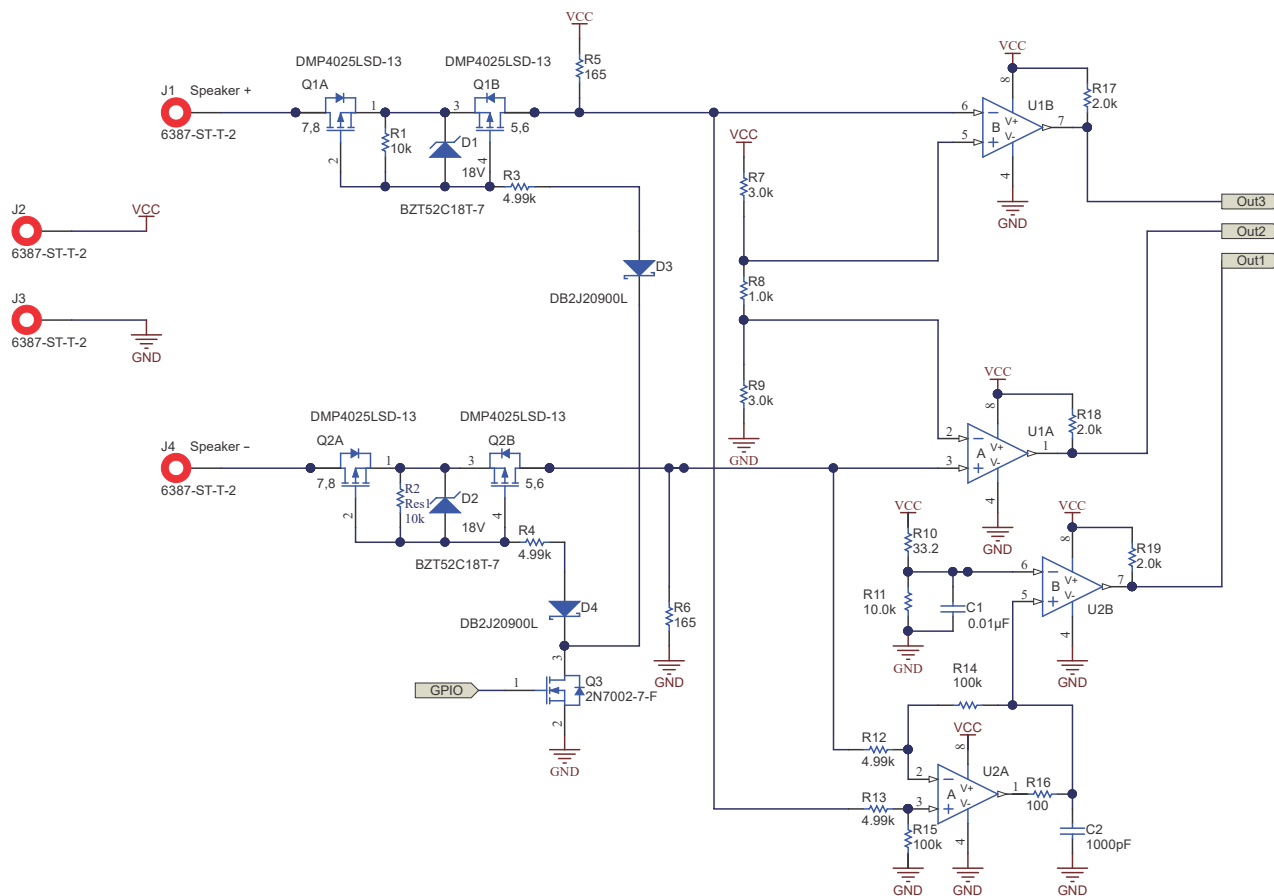


図 4-1. 回路図

表 4-1 に、部品表を示します。

**表 4-1. 部品表 (BOM)**

記号	部品番号	説明	数量
C1	06031C103JAT2A	コンデンサ、セラミック、0.01 $\mu$ F、100V、 $\pm$ 5%、X7R、0603	1
C2	06035A102KAT2A	コンデンサ、セラミック、1000pF、50V、 $\pm$ 10%、C0G/NP0、0603	1
D1, D2	BZT52C18T-7	ダイオード、ツェナー、18V、300mW、SOD-523	2
D3, D4	DB2J20900L	ダイオード、ショットキー、20V、0.5A、SOD-323F	2
J1, J2, J3, J4	6387-ST-T-2	シース付きバナナプラグ用バナナジャック、4mm、スルーホール	4
Q1, Q2	DMP4025LSD-13	MOSFET、P-CH、-40V、-6.9A、SOIC-8	2
Q3	2N7002-7-F	MOSFET、N-CH、60V、0.17A、SOT-23	1
R1	CRCW060310K0JNEA	RES、10k、5%、0.1W、0603	1
R2	RC0603FR-0710KL	RES、10.0k、1%、0.1W、0603	1
R3, R4, R12, R13	CRCW06034K99FKEA	RES、4.99k、1%、0.1W、0603	4
R5, R6	CRCW0603165RFKEA	RES、165、1%、0.1W、0603	2
R7, R9	CRCW06033K00JNEA	RES、3.0k、5%、0.1W、0603	2
R8	CRCW06031K00JNEA	RES、1.0k、5%、0.1W、0603	1
R10	CRCW060333R2FKEA	RES、33.2、1%、0.1W、0603	1
R11	RCG060310K0FKEA	RES、10.0k、1%、0.1W、0603	1
R14, R15	CRCW0603100KJNEA	RES、100k、5%、0.1W、0603	2
R16	CRCW0603100RJNEA	RES、100、5%、0.1W、0603	1
R17, R18, R19	CRCW06032K00JNEA	RES、2.0k、5%、0.1W、0603	3
U1	LM2903AVQPWRQ1	車載デュアル コンパレータ、PW0008A	1
U2	LM2904AVQPWRQ1	車載 デュアル低消費電力オペアンプ、PW0008A	1

## 5 まとめ

用途に応じて適切に調整した場合、本回路は指定された故障状態を正確に識別できます。部品の追加や改変によって回路のロバスト性は向上しますが、本設計では回路解析の容易さと明確さを重視し、最小限の部品のみを使用しています。結果的に、本設計例は、オーディオ アンプの設計における故障診断機能として十分な実用性をもつことを実証しています。



## 6 改訂履歴

<b>Changes from Revision * (January 2017) to Revision A (July 2025)</b>	<b>Page</b>
• ドキュメント全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	1
• 更新:P-FET の方向を変更するため、 <i>診断回路絶縁部</i> の画像を更新.....	2

## 重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated

## 重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかるテキサス・インスツルメンツ製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、テキサス・インスツルメンツはそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated