

Application Note

D 类放大器外部负载诊断



Derek Janak, Clancy Soehren, Damian LewisMixed Signal Automotive

摘要

本应用手册提供了外部负载诊断电路的设计信息，该电路用于检测和识别音频放大器输出端与目标扬声器之间的电气故障。虽然本应用手册以 TPA3111D1-Q1 D 类放大器为例，但这种设计方法适用于大多数 D 类放大器，可用于提供外部故障诊断功能。

内容

1 简介.....	1
2 概述.....	2
3 原理图和设计.....	2
4 原理图和物料清单.....	7
5 总结.....	8
6 修订历史记录.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

嵌入式电子设备在汽车应用中越来越常见，尤其是作为一种降低驾驶员风险的手段。随着对电子系统依赖程度的加深，对这些系统进行监测以识别潜在关键错误的需求也与日俱增。负载诊断电路的作用是对汽车电气系统中可能出现的各类故障进行诊断。

这类电路的典型应用之一是支持 eCall 系统。紧急呼叫 (eCall) 系统是一种新兴应用，车辆发生事故后，能通过车载电话立即向紧急救援人员报警。之后，救援人员可借助汽车内置的音频系统与受困者通话。但事故中，汽车音频系统可能遭受严重损坏，致使受困者无法听到紧急救援人员通过 eCall 系统发出的指令。

事故发生后，会出现各类故障，导致扬声器系统无法正常工作。严重事故造成的损坏可能导致以下情况：电池短路或接地短路、扬声器两端短路，或扬声器与音频放大器断开连接。若发生故障，关键是要让紧急救援人员知道：受困者听不见他们。这种情况下，就需要借助负载诊断来检测潜在故障，以确认系统的功能状态。

表 1-1. 潜在故障检测

故障条件	无需外部诊断即可检测	无需外部诊断即可识别
接地短路	是	否
电池短路	是	否
负载短路	是	否
开路	否	否

尽管许多音频放大器配备了内部诊断电路，但像 TPA3111D1-Q1 这类放大器仅具备检测短路情况的基本故障检测系统。对于这些放大器而言，必须依靠外部电路才能判断已发生故障的具体类型。本应用手册中介绍的设计方案，旨在提供一种可行的外部故障诊断电路拓扑结构，作为具备内部故障诊断功能芯片的替代方案。

本应用手册中展示的电路及设计并未依据任何行业标准进行测试。读者有责任进行行业标准测试，以确保在以任何形式部分或全部使用该设计时的安全性。德州仪器 (TI) 不对该设计的安全性提供任何明示或暗示的保证。

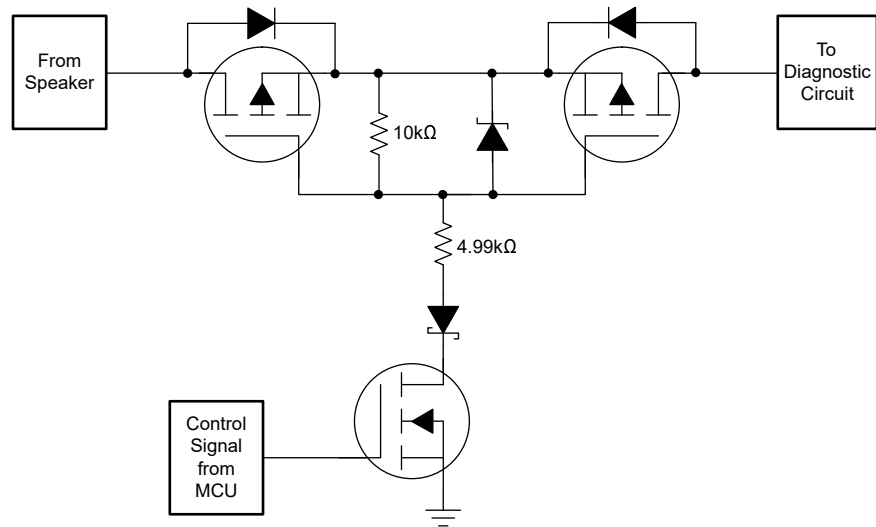


图 3-2. 诊断电路隔离

3.1 部分诊断电路

诊断电路可分为两个主要部分。开路负载、GND 短路和 PVDD 短路这几种情况，均依赖于图 3-3 所示的电路。需要注意的是，根据 MCU 的逻辑电平，比较器的输出需通过电阻分压器进行电平转换。

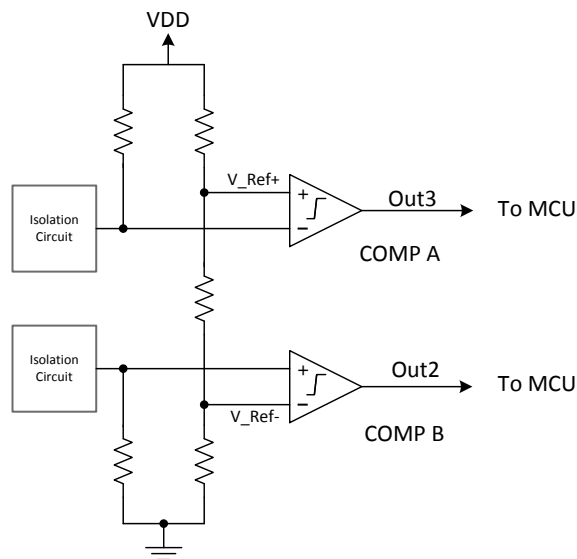


图 3-3. 涵盖 GND 短路、电池短路和开路负载的部分诊断电路

相比之下，负载短路的检测是通过测量负载两端的电压差来实现的。该功能依赖于另一种不同的诊断电路，如图 3-4 所示。

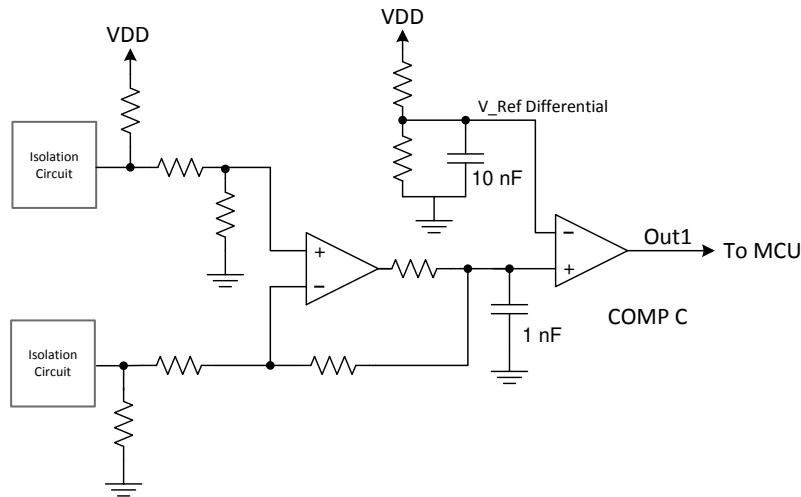


图 3-4. 涵盖负载短路的部分诊断电路

若放大器内置故障检测功能，则可通过移除外部诊断电路中的冗余部分，实现更简单的电路设计。例如，TPA3111D1-Q1 具有内部短路检测功能。因此，用于检测负载短路状态的电路可以省去，仅保留用于检测开路的电路，以及具备检测 GND 短路和 PVDD 短路状态诊断功能的电路，同时让故障引脚充当负载短路的指示器。

3.2 电路调试

为特定设计选定恰当电阻时，可能需要对诊断电路进行调试。许多放大器的输出端都配有下拉电阻，部分还带有上拉电阻，如图 3-5 所示。当输出端处于高阻态时，这些电阻就会影响放大器的表现。因此，TI 建议对该电路进行原型设计，以此验证针对具体应用所选的电阻值是否正确。

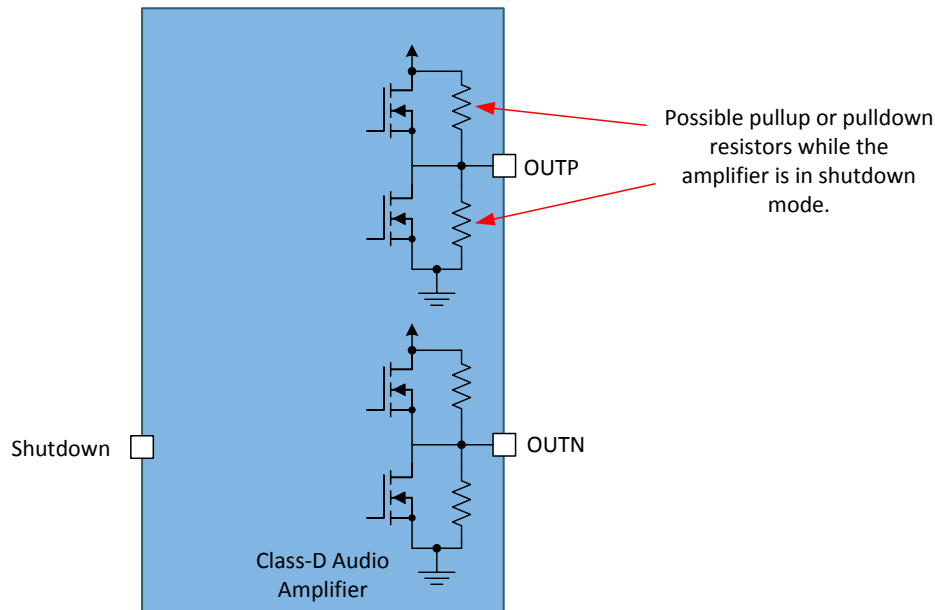


图 3-5. 关断模式下的 D 类放大器阻抗

示例原理图 (参见图 4-1) 中所示电阻是根据此特定实现所需的设计参数而选定的。双路 PMOS 开关内的电阻用于控制开启电路所需的电流，而分压器中使用的电阻器用于设置比较器的阈值电压。与运算放大器结合使用的电阻器用于设定差分信号的期望放大倍数。这种诊断电路设计具备高度灵活性，需根据应用的具体规范进行调试。调试过程如下：

1. 将诊断电路连接到音频放大器的输出端，并与负载并联。
2. 通过拉高 NMOS 栅极开启诊断电路。
3. 针对四种可能的故障状态，分别测量诊断线路的电压。

4. 调整电阻分压器的参数值，以设定各种故障状态的电压阈值。
5. 验证所用各设置是否正常工作。

通过这一调试过程，设计人员可设定检测特定故障时的灵敏度及误差范围。例如，可设定当放大器输出端电阻降至 $2\ \Omega$ 以下时，触发短路故障报警；也可将触发阈值设为 $4\ \Omega$ 。这也便于针对不同阻抗的扬声器进行调整：用于驱动 $8\ \Omega$ 扬声器的电路，其相关阈值可能与驱动 $4\ \Omega$ 扬声器的电路有显著差异。电阻分压器电路可根据特定电压阈值进行调整；诊断电路所关联的上拉电阻和下拉电阻参数，则可根据需要进行修改。此外，通过调整差分运算放大器的相关电阻器，可改变其增益，从而提高或降低短路检测电路的灵敏度。

同样，所选无源元件的参数很大程度上取决于所用放大器的型号、输出电路的拓扑结构以及各种故障的定义方式。表 3-1 列出了本设计中针对 TPA311D1-Q1 所采用的具体故障定义。

表 3-1. 故障定义

故障	说明
短路至 PVDD	与 PVDD 间电阻 $< 16\text{k}\ \Omega$
短路至 GND	与 GND 间电阻 $< 1.8\text{k}\ \Omega$
负载端短路	负载端电阻 $< 0.5\ \Omega$
开路 (负载断开)	输出端之间的电阻 $> 16\text{k}\ \Omega$

3.3 电路参数

表 3-2 展示了数据采集时所用的电源电压，以及每个比较器测得的阈值电压。

表 3-2. 数据采集电源电压

参数	值 (V)
电源电压	12.033
V_Ref +	6.86
V_Ref -	5.157
V_Ref 差分	2.76

通过使用表 3-2 中的参数，在诊断电路启动且存在各类故障的情况下，测得如下偏置电压。此外，还提供了诊断电路启动且无故障时的偏置点电压。

表 3-3. 诊断电路偏置点

故障	扬声器正极端子 (V)	扬声器负极端子 (V)	比较器输出 (V)	输出
短接至 GND	2.43	0.017	10.79	101
负载短路	5.95	5.94	0.5	110
短接至 PVDD	12.03	11.73	10.85	011
开路负载	11.8	0.159	10.79	001
无故障	5.88	5.85	5.33	111

请注意，测量扬声器端子间差分电压的比较器，在低电平状态下的输出值为 1V，而另外两个比较器的输出则为 0V。这是因为该比较器实际上是 LM2904 封装中的第二个运算放大器，将其配置为比较器使用，可避免额外增加元件。

电路的功耗也通过其消耗的电流大小来量化。表 3-4 中展示了测定的电路电流消耗。

表 3-4. 测得的电流消耗

诊断电路状态	电流典型值 (mA)
激活-无故障	40
激活-故障	36-56
无效	15

需要注意的是，这些数值仅反映该特定电路的电流消耗情况，对于电阻器值与本示例设计不同的其他实施方案，可能并不适用。

3.4 运行

要运行故障诊断，需将器件的 $\overline{\text{SD}}$ 引脚拉低以启动关断状态，这能确保放大器输出端进入高阻态。接下来，必须将 N 沟道 MOSFET 的栅极驱动为高电平，以激活诊断功能。随后即可读取三个输出端的数值，从而检测是否存在故障状态，并判断故障的具体类型。

表 3-5. 故障状态输出的逻辑表

条件	Out3	Out2	Out1
短接至 GND	高	低	高
负载短路	高	高	低
短接至 PVDD	低	高	高
开路负载	低	低	高
无故障	高	高	高

4 原理图和物料清单

图 4-1 展示了原理图。

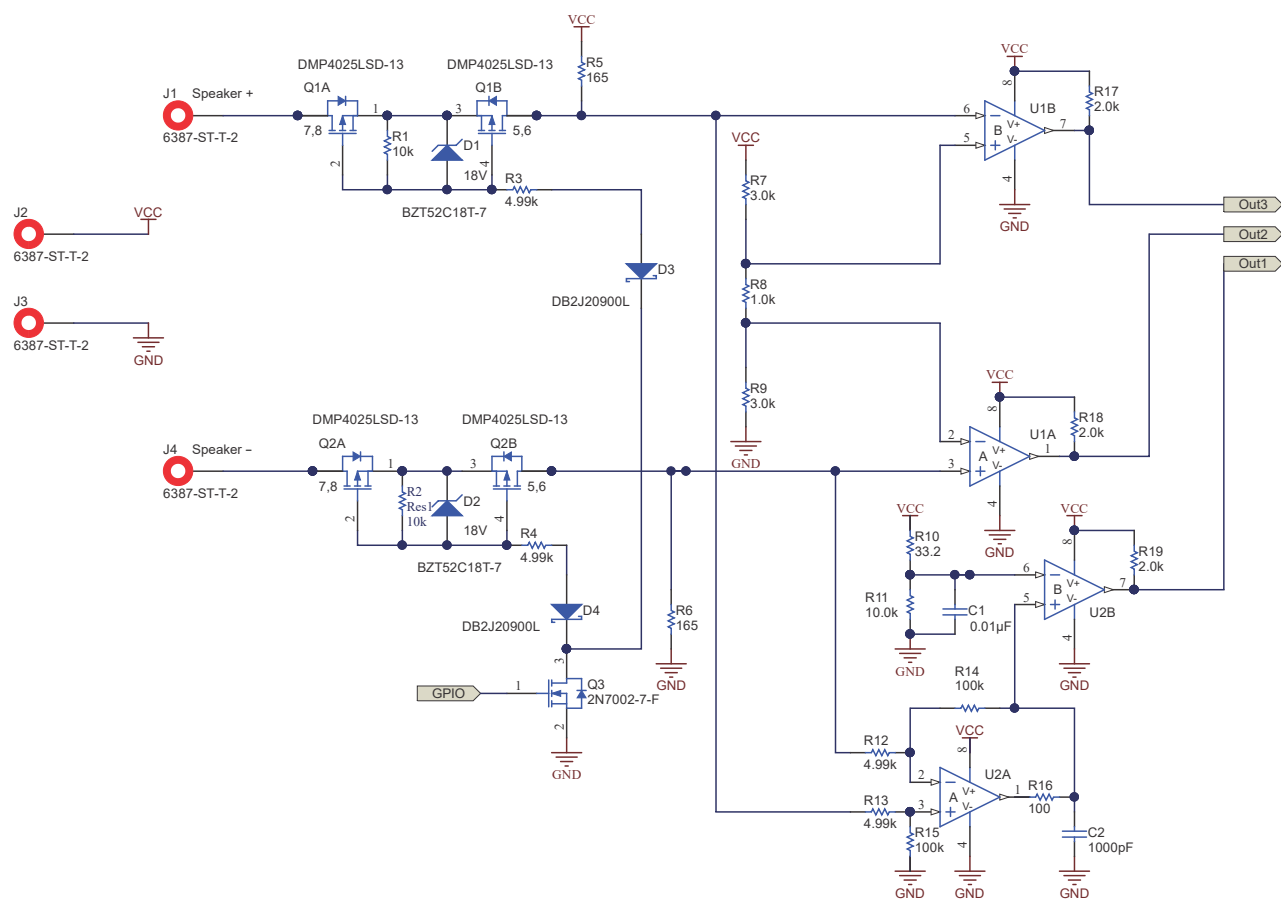


图 4-1. 原理图

表 4-1 列出了物料清单。

表 4-1. 物料清单

位号	器件型号	说明	数量
C1	06031C103JAT2A	电容, 陶瓷, 0.01 μ F, 100V, +/-5%, X7R, 0603	1
C2	06035A102KAT2A	电容, 陶瓷, 1,000pF, 50V, +/-10%, C0G/NP0, 0603	1
D1、D2	BZT52C18T-7	二极管, 齐纳, 18V, 300mW, SOD-523	2
D3、D4	DB2J20900L	二极管, 肖特基, 20V, 0.5A, SOD-323F	2
J1、J2、J3、J4	6387-ST-T-2	带护套香蕉插头用香蕉插孔, 4mm, TH	4
Q1、Q2	DMP4025LSD-13	MOSFET, P 沟道, -40V, -6.9A, SOIC-8	2
Q3	2N7002-7-F	MOSFET, N 沟道, 60V, 0.17A, SOT-23	1
R1	CRCW060310K0JNEA	电阻, 10k, 5%, 0.1W, 0603	1
R2	RC0603FR-0710KL	电阻, 10.0k, 1%, 0.1W, 0603	1
R3、R4、R12、R13	CRCW06034K99FKEA	电阻, 4.99k, 1%, 0.1W, 0603	4
R5、R6	CRCW0603165RFKEA	电阻, 165, 1%, 0.1W, 0603	2
R7、R9	CRCW06033K00JNEA	电阻, 3.0k, 5%, 0.1W, 0603	2
R8	CRCW06031K00JNEA	电阻, 1.0k, 5%, 0.1W, 0603	1
R10	CRCW060333R2FKEA	电阻, 33.2, 1%, 0.1W, 0603	1
R11	RCG060310K0FKEA	电阻, 10.0k, 1%, 0.1W, 0603	1
R14、R15	CRCW0603100KJNEA	电阻, 100k, 5%, 0.1W, 0603	2
R16	CRCW0603100RJNEA	电阻, 100, 5%, 0.1W, 0603	1
R17、R18、R19	CRCW06032K00JNEA	电阻, 2.0k, 5%, 0.1W, 0603	3
U1	LM2903AVQPWRQ1	汽车级双路比较器, PW0008A	1
U2	LM2904AVQPWRQ1	汽车级双路低功耗运算放大器, PW0008A	1

5 总结

针对具体应用进行适当调试后, 所提供的电路能够准确识别特定的故障状态。虽然增加元件或修改设计能提高电路的稳健性, 但这里展示的设计使用了最少的元件, 同时还保持了分析的清晰简洁。最终, 所示设计体现了其在音频放大电路故障诊断功能中的实用性。

6 修订历史记录

Changes from Revision * (January 2017) to Revision A (July 2025)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 更新了 诊断电路隔离图像以更改 P-FET 方向.....	2

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