



Xiaoxiang Liu
Peter Xu

摘要

TAS6424E-Q1 是德州仪器 (Texas Instruments) 专为汽车音频应用设计的四通道高性能数字输入 D 类音频功放芯片, 符合 AEC-Q100 车规级标准。芯片工作电压范围为 4.5V 至 26.4V, 能够适应汽车电气系统的电压波动, 集成了 I²S/TDM 数字音频接口, 支持高达 192kHz 采样率, 并通过 I²C 接口实现灵活的参数配置和控制。AC 诊断 (AC Load Diagnostics) 功能通过在音频播放期间注入人耳不可闻的高频信号, 实时检测扬声器负载状态, 如开路、短路或阻抗异常, 从而实现无干扰、高可靠性的故障诊断, 显著提升汽车音频系统的安全性与可维护性。本文主要针对 AC 诊断的原理和常见问题以及解决方法进行梳理和说明。旨在帮助开发者更快地分析问题以及设计出更合计的功放系统。

内容

1 AC 诊断的原理.....	2
1.1 什么是 AC 诊断.....	2
1.2 AC 诊断的实现原理.....	2
2 AC 诊断流程.....	3
2.1 AC 诊断流程梳理.....	3
2.2 AC 诊断参考代码.....	3
3 AC 诊断常见问题和 Debug 思路.....	4
3.1 AC 诊断因激励信号导致的不准确问题.....	4
3.2 因连接器不稳定导致的测量误差问题.....	4
3.3 TAS6424E-Q1 状态寄存器异常.....	6
3.4 TAS6424E-Q1 AC 诊断 Debug 流程.....	7
4 结语.....	7
5 参考文献.....	7

插图清单

图 1-1. AC 诊断原理示意.....	2
图 3-1. TAS6424E-Q1 手动测试快速插拔图.....	5
图 3-2. 通道 1 正常 4ohm 电阻 AC 诊断结果.....	5
图 3-3. 通道 1 开路时 AC 诊断结果.....	6
图 3-4. 通道 1 快速插拔连接器时 AC 诊断结果.....	6
图 3-5. 系统读取到 DC 诊断状态.....	7

1 AC 诊断的原理

1.1 什么是 AC 诊断

AC 诊断 (AC Load Diagnostics) 功能通过在音频播放期间注入人耳不可闻的高频信号，检测扬声器负载状态，如开路、短路或阻抗异常，从而实现无干扰、高可靠性的故障诊断，显著提升汽车音频系统的安全性与可维护性。其中 AC 诊断用于识别高音扬声器是否正确连接。它通过测量 OUTP 和 OUTN 引脚之间的阻抗和相移来实现。TAS6424 系列功放需要外部正弦波作为激励信号来执行 AC 测量，且阻抗和相移会在相关寄存器得到。用户需要自行判断测量值是否表明扬声器已正确连接。

1.2 AC 诊断的实现原理

TAS6424 系列进行 AC 诊断时，芯片会通过内部的开关切换 (S1 断开，S2 和 S3 闭合) 进入 AC 测试模式，如下图 1-1 所示。测试开始前，需要先输入一个 19 kHz 的 0 dBFS 正弦波作为基准，驱动内部 DAC 产生电流信号。信号发出并经过 20 毫秒的稳定期后，内部 10 位 ADC 会对输出端的 64 个周期信号进行采样。采样结果经内部算法处理，最终会自动存入 I2C 寄存器中供开发者读取。

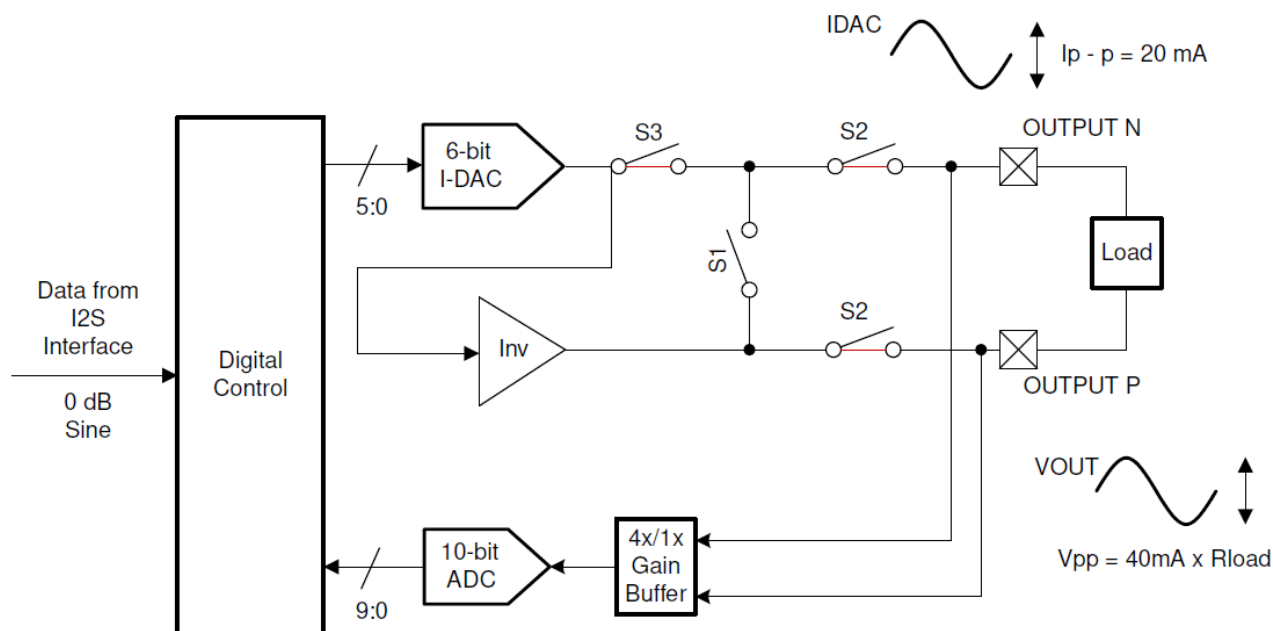


图 1-1. AC 诊断原理示意

2 AC 诊断流程

2.1 AC 诊断流程梳理

AC 诊断流程分为四个关键阶段：首先是前置准备，确保芯片处于 Hi-Z 状态并输入 19 kHz, 0-dBFS 正弦波；接着进入相位参考校准，通过开启内部回环 (0x16 Bit 7) 测量系统固有误差；随后进行负载实测，此时必须关闭回环以连接外部扬声器，芯片会对输出电流进行 32/64 点采样，若在此刻插拔负载会直接导致采样电流波动及阻抗值飙升；最后在数据读取与计算阶段，从 I2C 寄存器获取相位、激励强度及阻抗原始数据，带入规格书公式完成分析后退出诊断模式。

阻抗公式 (Impedance) :

$$Impedance_{CHx(ohm)} = \frac{(IMP_{CHx} * 2.37(mV))}{(Gain * Idac(mA))} \quad (1)$$

相位公式 (Phase) :

$$Phase_{CHx(degree)} = 360 * \frac{PHASE_{CHx(LBK)} - PHASE_{CHx(LDM)}}{STI_{CHx(LDM)}} \quad (2)$$

2.2 AC 诊断参考代码

以通道 1 为例，参考代码如下：

```
w d4 04 55      Set ch to Hiz mode
w d4 16 80      Step 1: configure to loop back mode
w d4 15 08      Enable ch1 loop back test
r d4 0f 01      Read 0x0f register, and wait until it go to Hiz mode
r d4 1b 01      Read phase value
r d4 1c 01
w d4 15 00      Disable AC diag
w d4 16 00      Disable loop back test mode
w d4 15 08      Enable ch1 load impedance and phase test
r d4 0f 01      Read 0x0f register, and wait until it go to Hiz mode
r d4 1b 01      Read phase value
r d4 1c 01
r d4 1d 01      Read stimulus value
r d4 1e 01
r d4 17 01      Read impedance value
w d4 15 00      disable AC diag
```

3 AC 诊断常见问题和 Debug 思路

在掌握了 TAS6424E-Q1 AC 诊断的基本原理后，实际应用中的调试细节往往决定了系统的稳定性。下文将针对该芯片在交流诊断 (AC Load Diagnostics) 过程中，工程师最常遇到的几类典型问题及调优策略进行深度解析。

3.1 AC 诊断因激励信号导致的不准确问题

在进行 AC 诊断时，TAS6424E-Q1 必须接收到一个稳定的 19kHz 正弦波信号，0dBFS 作为激励源。如果前端 DSP 或主控 SoC 输出的信号频率存在偏差，或者包含过多的谐波噪声，将直接导致芯片内部算法无法正确锁定阻抗特征。使用者需确保通过 SOC/DSP 给出 19kHz 信号通过 I2S/TDM 接口输入给到 TAS6424E-Q1。19kHz 激励信号的幅度必须控制在合理范围内。若信号过弱，可能因信噪比 (SNR) 不足导致阻抗计算出现大幅波动；若信号过强，则可能导致输出削波 (Clipping)，使诊断逻辑失效。

必须确保激励源频率精确且幅度严格对齐 0dBFS，同时通过匹配 I2S/TDM 时序 (如 Offset 设置) 来消除位偏移诱发的数码畸变，从源头保障信号的完整性。

解决办法：通过在 TAS6424E-Q1 的 AC 诊断调试初期，建议使用 4.0 ohm 无感水泥电阻 (或精密功率电阻) 替代真实扬声器进行校准，是确保诊断算法准确性的关键步骤。开发者通过精准校验芯片回读数值与实际欧姆值之间的换算系数，调整 DSP 给的信号频率和幅值，从而锁定系统级的增益精度。正确测试结果如下表：

TI bench result (for customer reference)	Load cases	DC load diag	AC load diag		
			Measured impedance	Measured phase in deg	Load impedance(ohm)
	Open load	Open	17.5	-82	110
	4ohm resistor load	Normal	4.3	4	4.3
	Woofer only (tweeter open)	Normal	19.9	-75	56.8
	Tweeter only (woofer open)	Open	5	0	5.1
	Woofer + tweeter	Normal	5	7	4.8
	Woofer + tweeter short	Normal	0.9	0	1.3

Table1_TI AC 诊断测试结果 (19kHz 正弦波信号，0dBFS 作为激励源)

3.2 因连接器不稳定导致的测量误差问题

在 AC 诊断过程中，尤其是汽车生产线等环境，如果扬声器连接器接触不良或线束压接不实会导致 AC 诊断出现偏差。原因是 AC 诊断会对外部阻抗进行 32 或者 64 个点的采样，这种不稳定的连接会引入额外的接触电阻，且在 64 次采样中被采集，并在取均值过程中带入计算，对于 TAS6424E-Q1 这种通过感知微弱电流信号来计算阻抗的精密芯片而言，有可能导致回读的 AC 阻抗值明显偏大。

利用 TAS6424E-Q1 EVM 开发板进行模拟测试，在启动 AC 诊断的同时快速手动插拔 4.0 ohm 标准负载连接器，通过人为制造不稳定的瞬时接触电阻干扰芯片的 32/64 点电流采样，从而成功复现回读阻抗值远大于标称 4.0 ohm 的异常结果，以此验证连接不良对精密 AC 诊断准确性的直接影响。

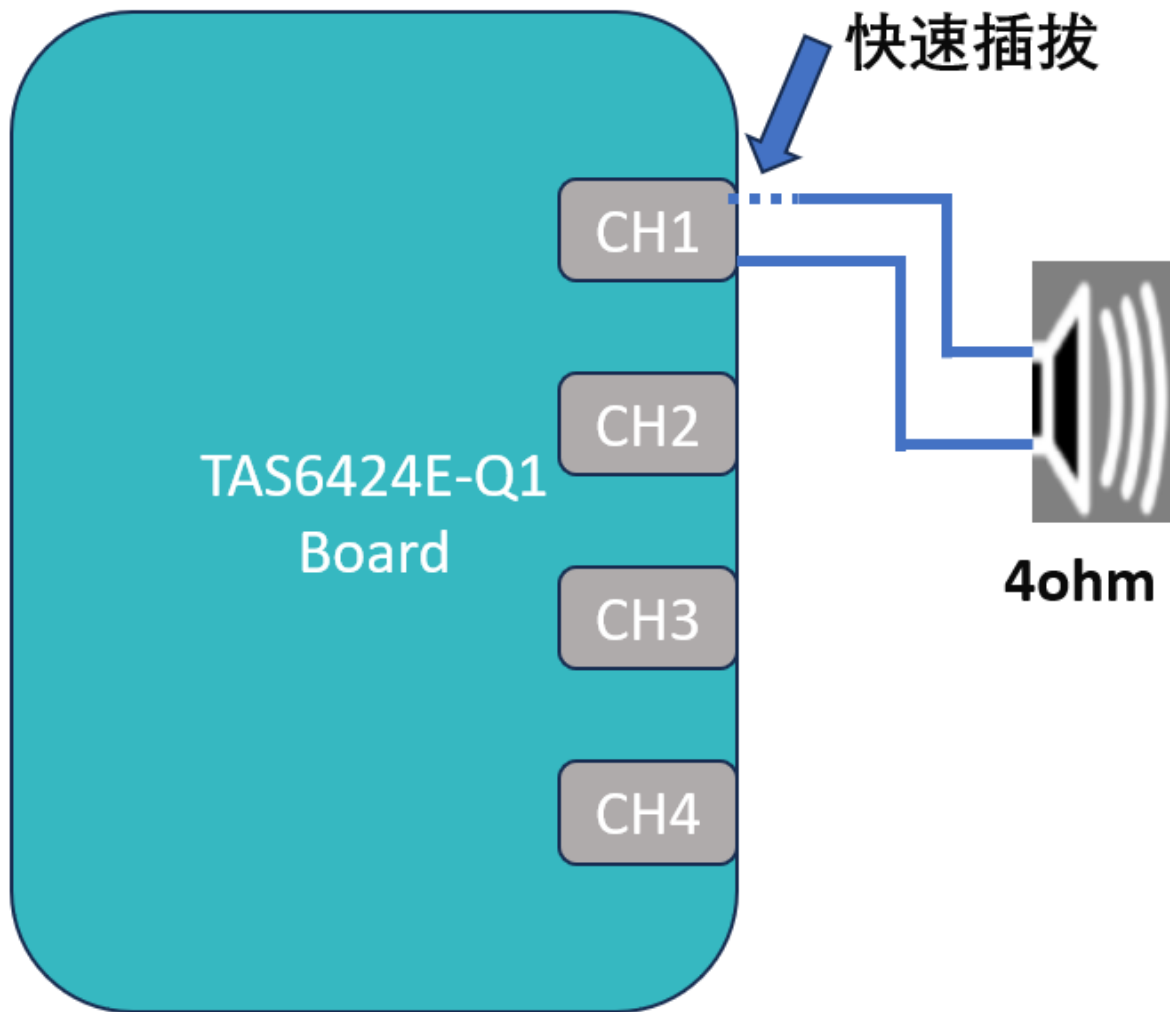


图 3-1. TAS6424E-Q1 手动测试快速插拔图

AC Load Diagnostics Report							
	Gain	AC LD Enable	Load at Device Output		Load at Filter Output		
			Impedance	Phase	Impedance	Phase	
CH1	1	✓	4.3 Ω	7 °	4.2 Ω	11.0 °	
CH2	1	✗	0.0 Ω	-	-	-	
CH3	1	✗	0.0 Ω	-	-	-	
CH4	1	✗	0.0 Ω	-	-	-	

图 3-2. 通道 1 正常 4ohm 电阻 AC 诊断结果

AC Load Diagnostics Report						
	Gain	AC LD Enable	Load at Device Output		Load at Filter Output	
			Impedance	Phase	Impedance	Phase
CH1	1	✓	17.5 Ω	-81 °	100.8 Ω	34.3 °
CH2	1	✗	0.0 Ω	-	-	-
CH3	1	✗	0.0 Ω	-	-	-
CH4	1	✗	0.0 Ω	-	-	-

图 3-3. 通道 1 开路时 AC 诊断结果

AC Load Diagnostics Report						
	Gain	AC LD Enable	Load at Device Output		Load at Filter Output	
			Impedance	Phase	Impedance	Phase
CH1	1	✓	16.8 Ω	-13 °	14.0 Ω	37.7 °
CH2	1	✗	0.0 Ω	-	-	-
CH3	1	✗	0.0 Ω	-	-	-
CH4	1	✗	0.0 Ω	-	-	-

图 3-4. 通道 1 快速插拔连接器时 AC 诊断结果

图 3-1 为测试方法；图 3-2 为正常 4.0 ohm 的电阻，通道 1 能够测到 4.2 ohm 的阻抗；图 3-3 为开路时，通道 1 会读到 > 70.0 ohm 的阻抗；

图 3-4 为测试为快速插拔通道 1 连接器时得到的结果。可以看到，通道 1 原本读到 4.0 ohm，但是在快速插拔时，阻抗达到了 14.0 ohm。不同的插拔频率有概率得到不同的值，但是其 AC 诊断均大于实际测量的阻抗值。

需要说明的是，这并不是芯片的缺陷，而是正是因为 AC 诊断，帮助开发者识别到了连接器接触不良等问题。

3.3 TAS6424E-Q1 状态寄存器异常

部分使用者并不只是在上电初始化的时候做 AC 诊断，而是在系统检测到无声或者运行中看到其他异常的时候进行 AC 诊断。此时所有通道的初始状态并不是 HiZ，而是 Play 模式。由于 TAS6424E-Q1 的模式切换需要一定时间，为确保 AC 诊断能正常运行，建议在设定通道为 HiZ 以后等待 10ms，并通过状态寄存器回读确认模式切换到 HiZ 后再开始 AC 诊断流程。对于器件来说，AC 诊断流程的前置条件是所有通道必须处于 HiZ 状态。

如果没有进行状态验证，可能导致器件在 Play 模式或 DC 诊断模式下进入 AC 诊断流程，此时器件进入错误状态，AC 诊断流程失败。在部分情况下，系统甚至会出现通道状态被错误识别为 DC 诊断模式的情况，如图 3-5 所示。

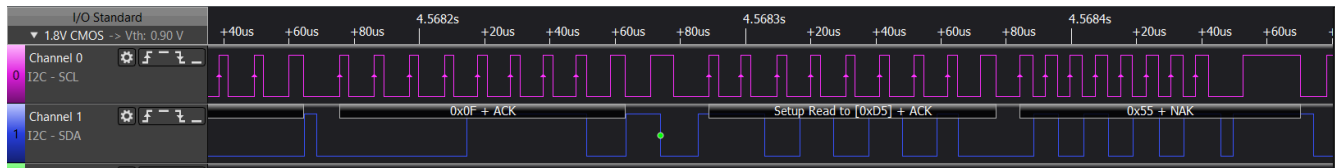


图 3-5. 系统读取到 DC 诊断状态

3.4 TAS6424E-Q1 AC 诊断 Debug 流程

如果按照章节 2 中的操作发现读出的数值有异常，梳理常规的 Debug 思路，便于开发者快速查找问题，步骤如下：

1. 信号源校验

将通道设为 Play 状态，首先核实 19kHz, 0dBFS 的正弦波激励信号是否准确，必须严格检查其频率与幅度的一致性。激励检查完毕后，确保在整个 AC 诊断期间信号保持持续输入。

2. 标准负载校准

移除实际扬声器负载，接入精度较高的 4.0 ohm 功率电阻进行校准，以排除扬声器电感特性或频率响应造成的干扰，验证系统底层测量精度。

3. 寄存器数据验证

读取 CH1 等通道的原始寄存器数值，将其填入官方配套的计算表格（如黄色标注区域）。通过表格内内置的算法（如绿色区域）自动计算阻抗值，并对比计算结果与 4.0 ohm 标准负载的偏差。

4. 算法逻辑核对

若计算值与实际值仍有偏差，需核对寄存器值读取顺序是否正确，并联系 TI 确认计算公式中的系数是否与当前硬件平台匹配。

4 结语

本文深入解析了 TAS6424E-Q1 的 AC 诊断功能，从 19kHz 信号注入原理到，AC 诊断的标准流程，详尽梳理了确保阻抗与相位测量准确的关键要素，并针对信号畸变、连接不稳定及状态切换等常见问题提供了解决思路和方法，旨在帮助开发者构建高可靠性的汽车音频负载监测系统。

5 参考文献

1. [TAS6424E-Q1 具有负载突降保护和 I2C 诊断功能的 45W、2MHz 数字输入 4 通道汽车用 D 类音频放大器 数据表 \(Rev. A\)](#)
2. [Understanding DC and AC Load Diagnostics in Automotive Class-D Amplifiers\(SLOA286\)](#)

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、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