

Application Note

集成 TI DRV2605L 以在游戏手持设备中获得音频转触觉反馈



摘要

本应用手册介绍了一种使用德州仪器 (TI) DRV2605L 触觉驱动器在音频转触觉模式下为游戏手持设备增加沉浸式触觉反馈的实用方法。在现代手持设备中，即使没有明显的触觉事件，游戏音频也非常丰富 - DRV2605L 利用它实时地自动将音频信号转换为线性谐振传动器 (LRA) 的振动驱动。本应用手册介绍了音频转触觉模式 (例如闭环谐振跟踪) 的优势、用于评估此优势的硬件配置，以及演示各种音频频率和振幅下的 LRA 响应的波形结果。本应用手册还详细介绍了在游戏播放期间如何在 *音频驱动型触觉* 和手动触觉控制 (使用 DRV2605L 的实时播放或效果库模式) 之间无缝切换。我们的测试证实，DRV2605L 通过游戏音频以极小的延迟产生有意义的触觉效果，并在系统以特定的触觉提示超控时平稳转换。本文档提供了将 DRV2605L 集成到手持设备的指南，包括触觉输出的配置技巧和示波器屏幕截图。这种方法只需要增加少量硬件 (DRV2605L 驱动器和 LRA)，但可利用现有音频内容提供触觉反馈，显著增强用户的沉浸式体验。

内容

1 简介.....	2
2 DRV2605L 音频转触觉模式概述和优势.....	3
3 硬件测试设置和配置.....	5
4 波形测试结果和分析 (音频转触觉模式).....	8
5 模式切换行为 (音频转触觉与实时播放).....	17
6 DRV2605L 中的集成和切换模式：音频转触觉和内置库模式.....	19
7 有关模式切换的观察结果和建议.....	21
8 摘要和未来应用.....	22
9 参考资料.....	23

商标

Smart-Loop™ is a trademark of Keystone Technologies International, LLC.

TouchSense® is a registered trademark of Immersion Corporation.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

现代游戏手持设备致力于提供沉浸式触觉反馈。通常，震动或振动事件由游戏软件直接触发（例如，当屏幕上发生爆炸时的预定义振动模式）。如果游戏未明确提供此类触觉提示，则有些设备会尝试从音频输出中获得振动反馈。一种常见的方法是在声音管道中使用音频处理对象 (APO) 以及嵌入式微控制器算法来根据音频驱动振动电机。这种 **APO+EC** 方法可以监视游戏的声音是否有低音或撞击提示，并相应地激活触觉电机。但是，仅依靠音频存在一些局限性：如果音频缺少明显的低频分量（爆炸、低沉的击打声等），振动反馈可能会感觉很弱或不存在。仅使用音频流来生成触觉时，还会出现明显的延迟和不一致的强度。

为了弥补这些不足，在游戏手持设备环境中实现了 TI DRV2605L 触觉驱动器的音频转触觉模式。在音频转触觉模式下，DRV2605L 会持续监控模拟音频输入（例如游戏的耳机输出），并根据音频的频率和振幅特性自动驱动 LRA。低频音频内容（低音节拍、爆炸、环境噪音）智能地转换为振动模式，这意味着即使游戏不编程任何隆隆声，背景音频也会产生触觉效果。转换算法（已获得 Immersion TouchSense® 许可）可确保这些振动与音频保持自然和同步，而不仅仅是随机发出蜂鸣声。

在我们的实现中，手持设备的音频编解码器输出左右音频通道，每个通道都馈送到扬声器（或耳机）以及配置为音频转振动模式的 DRV2605L。器件上的嵌入式控制器 (EC) 还可以通过 I²C 与每个 DRV2605L 对接，以进行配置并在需要时触发特定的触觉效果。图 1-1 展示了双输入触觉配置：音频路径（绿线）和 EC 控制路径（蓝线）都会影响 DRV2605L 触觉驱动器。

编解码器和基于 EC 的左右通道路由到双 DRV2605L 驱动器，以便在游戏手持设备中实现触觉反馈。每个 DRV2605L 都可以接收来自嵌入式处理器的模拟音频输入（绿色）和 I²C 控制信号（蓝色），从而支持同步音频驱动和直接触觉反馈。

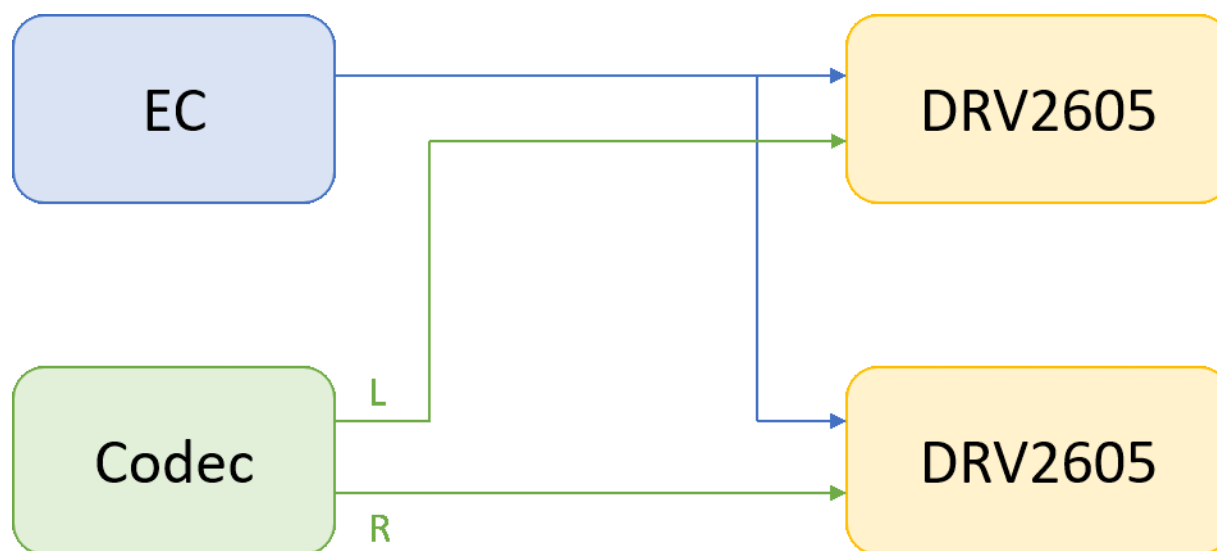


图 1-1. 通过编解码器和 EC 实现双路 DRV2605L 触觉路由

本文档的结构如下：

- 概述了 DRV2605L 的音频转触觉模式及其优势
- 介绍硬件测试设置以及使用音频转触觉功能的主要配置步骤。
- 提供了从实验室测试中获得的波形结果，用于分析 LRA 在不同音频频率和音量下的响应。
- 分享 *切换模式*（例如在音频驱动型触觉和手动回放模式之间切换）时的行为，以及如何确保平稳转换。
- 关于在产品设计中集成这些模式的建议

2 DRV2605L 音频转触觉模式概述和优势

DRV2605L 是一种专用触觉驱动器，同时适用于线性共振传动器 (LRA) 和偏心旋转质量电机 (ERM)。这包括闭环控制架构以及触觉效果内部库。本文档重点介绍音频转触觉功能，这是一种 *自动将音频输入信号转换为有意义的触觉效果* 的功能。使用 DRV2605L 音频转触觉模式的主要优势包括：

- **自动音频到触觉转换**：在音频转触觉模式下，DRV2605L 会持续监控模拟音频输入，并在 LRA 上生成相应的驱动输出。检测到音频中的低频分量（例如，50 – 200Hz 的低音节奏或碰撞声）并将其转化为振动。这些实时发生，因此即使游戏没有明确发出隆隆声命令，*音频也会产生触觉响应*。对转换算法进行了调优，使振动感觉与内容相关 – 尖锐的瞬态声音产生清晰的音调，持续的低音调产生嗡嗡声或隆隆声 – 而非千篇一律的嗡嗡声。
- **谐振跟踪和 Smart-Loop™ 闭环控制**：DRV2605L 采用闭环控制系统，能够对 LRA 进行 *自动谐振跟踪*。LRA 具有自然谐振频率（通常为大约 170 – 200Hz）；在谐振条件下驱动该频率可最大限度地提高效率 and 振动强度，但谐振频率会因温度、老化或器件未精确安装而略有变化。DRV2605L 的 Smart-Loop™ 算法不断地调整以保持 LRA 的谐振，并在需要时应用主动制动。这可以获得更一致的加速度和更短的振动上升/下降时间。在实践中，闭环控制可防止 LRA 在音频信号停止时出现 *振铃* 或过冲，并确保每个脉冲清晰。（相比之下，开环驱动会使 LRA 振铃，因而增加稳定所需的时间。）
- **内置振动效果库**：除了音频转触觉模式外，DRV2605L 还具有内部 ROM 库，其中包含 100 多个预定义触觉波形和效果（已获得 Immersion 许可）。虽然不是本应用手册的重点，但是当游戏确实提供特定的触觉事件时，该库会非常有用 – 主机处理器可以通过 I²C 触发库波形（例如，播放 *双击* 振动或爆炸隆隆声）。将该库集成到芯片上后，开发人员无需再为常见效果定制振动波形。这种设计主要使用音频转触觉来实现自动背景反馈，但 *库效果* 可用于按需事件（如游戏菜单选择或特殊的游戏内动作）。本文档后面的部分演示了如何在音频转触觉和库效果之间切换。

请注意，DRV2605L 的音频转触觉引擎驱动专为触觉设计的 LRA，这并非总是完全模拟输入音频波形。目标是最大限度地提高振动相关性，而不是逐字复制音频频率（尤其是考虑到 LRA 无法很好地响应非常高的频率）。该器件有效地提取音频的振幅包络，并以谐振频率驱动 LRA，从而调制强度。这样可确保即使音频频率高于或低于 LRA 的设计范围，也能提供强大的反馈。

为了说明闭环 Smart-Loop 控制的优点，图 2-1 显示了 *开环驱动* 场景的示波器屏幕截图。此处对 LRA 播放了内置库波形（*双击* 效果），同时禁用了驱动器的闭环功能。上部迹线显示了驱动器对 LRA 的原始 PWM 输出，下部迹线显示了 LRA 上的实际电压。如果没有自适应控制，LRA 的响应不会受严格控制；您可以在每个脉冲后观察到振幅的一些变化和较慢的振动阻尼。启用 DRV2605L 的 Smart-Loop 闭环模式后，可以更一致地描绘这些脉冲（此图中未显示，但在测试中曾观察到）。

双击 触觉效果的开环 LRA 驱动器波形（使用 DRV2605L 的内部库）。上部波形（黄色/品红色）是驱动器的差分输出，下部波形（红色）是 LRA 上产生的电压。如果没有闭环阻尼和谐振控制，LRA 运动在脉冲之间会表现出轻微的过冲和不一致的振幅。



图 2-1. 双击效果的开环 LRA 波形

总的来说，DRV2605L 的音频转触觉模式利用现有的音频简化了环境触觉的添加，而闭环控制和效果库可确保高质量的振动，并且特定的触觉事件仍可根据需要播放。

3 硬件测试设置和配置

为了评估音频转触觉性能，我们使用 DRV2605L 和代表性 LRA 传动器设置了一个测试台。硬件包括连接到主机控制器的 TI DRV2605LEVM-MD 评估模块（包含小电路板上的 DRV2605L 驱动器和 LRA）。在实际产品中，主机可以是手持控制台中的应用处理器或微控制器。音频馈送到 DRV2605L 中，并在各种条件下观察 LRA 的振动输出。设置和配置的主要方面包括：

- **音频输入和耦合：**音频编解码器或信号发生器向 DRV2605L 的 IN 引脚提供模拟音频信号。输入通过串联的 $1\mu\text{F}$ 电容器进行交流耦合（按照建议），以阻断任何直流失调电压，并允许交流音频通过。DRV2605L 的输入阻抗（约 $100\text{k}\Omega$ ）和 $1\mu\text{F}$ 电容器构成一个截止频率为 1.6Hz 的高通滤波器，它可轻松传递相关音频频率，但会滤除直流信号。音频信号振幅保持在 DRV2605L 的可接受范围内（不超过约 $1.8\text{V}_{\text{peak-to-peak}}$ ）。在实践中，我们的 **100% 音量** 测试级别对应于 1.0VRMS （约 2.8Vp-p ），从该值开始缩小到较低的百分比。DRV2605L 的内置噪声门保留为默认设置，可忽略几毫伏以下的任何音频 - 这可防止在需要静音时意外触发传动器而出现背景嘶嘶声或非常微弱的声音。
- **I²C 控制和模式配置：**主机控制器连接到 DRV2605L 的 I²C 接口（SCL、SDA）。通过 I²C 命令，DRV2605L 的寄存器配置为音频转触觉模式。重要的寄存器设置包括选择模式 $0x04$ （音频转振动）、启用 LRA 驱动器（与 ERM 模式相反）、启用具有交流耦合的模拟输入（这涉及设置 DRV2605L 的控制寄存器：例如，在相应的控制寄存器中， $\text{AC_COUPLE} = 1$ 且 $\text{N_PWM_ANALOG} = 1$ ）。还为 LRA 设置了额定电压和过驱钳位，但自动校准（下文介绍）可以在需要时进行调整。图 3-1 显示了该设置的简化版原理图，突出显示了主机（应用处理器）、DRV2605L 和 LRA 之间的连接。
- **自动校准：**在使用音频转触觉模式之前，运行 DRV2605L 的 LRA 自动校准例程。这是一次性（或不频繁）的步骤，可帮助驱动器测量 LRA 的谐振频率、额定驱动电压和其他参数。为此，将 DRV2605L 置于校准模式（模式寄存器 = $0x07$ ），并通过 I²C 切换 GO 位。驱动器会短暂驱动 LRA 并测量响应。几百毫秒后，会有一个状态位校准已完成且成功。自动校准设置针对驱动参数（例如 LRA 的有效电阻和反电动势常数）设计，以便对我们的特定传动器实现精确的闭环控制。首次使用新 LRA 时进行校准很重要；校准后，这些值存储在寄存器中，并用于后续的音频转触觉操作。
- **测量仪器：**为了观察触觉行为，我们使用带有多个探头的数字示波器（Rigol DS 系列）。一个差分探头连接在 LRA 端子上，用于监测 DRV2605L 施加到 LRA 的电压（此差分电压与 LRA 的力输出相关）。另一个通道连接到音频输入信号，以便于看到音频与产生的振动驱动之间的关系。为了评估模式切换，示波器设置为较慢的时基（每个分度数百毫秒）以捕获模式切换的时刻。为了捕获稳态波形（例如给定频率和振幅下的 LRA 响应），使用更快的时基（微秒到毫秒标度）来查看 PWM 波形和包络的详细信息。

DRV2605L 通过 I²C（带有上拉电阻的 SCL、SDA 线路）连接到应用处理器。模拟音频输入通过耦合电容器 C（IN）馈入 IN/TRIG 引脚（如果不使用，可以选择将其短接至地）。DRV2605L 通过差分输出（OUT+ 和 OUT-）驱动 LRA（或 ERM）；显示了稳压器和电源轨的电源去耦电容器（C(REG)、C(VDD)）。EN 引脚可用于启用/禁用驱动器（为常开状态连接高电平）。 $1\mu\text{F}$ 输入电容器与 IN 引脚阻抗形成一个高通滤波器（截止频率约为 1.6Hz ），在阻断直流信号的同时允许低频音频通过。

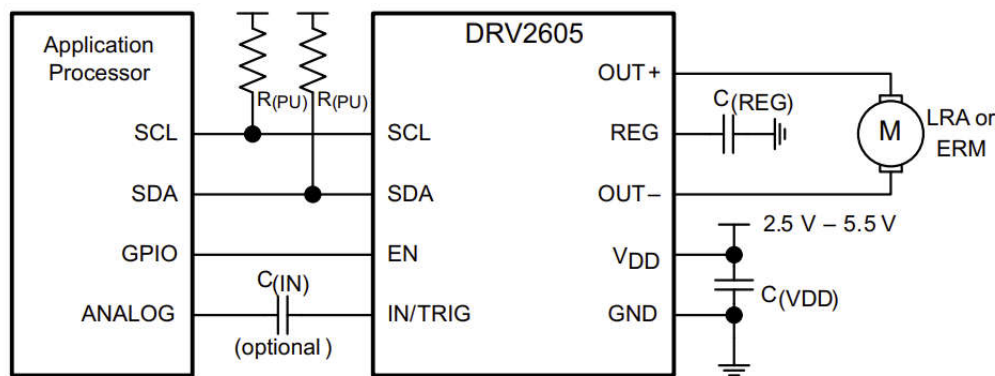


图 3-1. 音频转触觉模式测试的硬件设置

使用该设置进行了两组主要实验：

1. **稳态音频转触觉性能**：在音频转触觉模式下使用各种音频频率和振幅驱动 LRA，以表征 LRA 的响应方式。
2. **模式切换测试**：使用不同的条件（存在和不存在音频），在音频转触觉模式和实时播放模式之间切换 DRV2605L，以确保平稳转换。下一节将介绍第一组测试的波形结果（音频转触觉模式性能）。

初始 I²C 配置

在操作 DRV2605L 之前，必须通过 **DRV2605LEVM-MD GUI** 应用初始配置。请按照以下步骤操作：

1. 打开 **DRV2605LEVM-MD GUI**，并通过 USB 连接 EVM。
2. 选择 **Import Settings**，并加载提供的配置文件 (initial table.txt)。

下列寄存器设置对于正确的初始化至关重要：

表 3-1. 安装寄存器设置

寄存器	值	说明
0x01	0x04	模式（音频转触觉）
0x03	0x06	库选择
0x04	0x06	波形序列发生器 1
0x0C	0x00	GO
0x11	0x00	音频转振动控制
0x12	0x02	ATH 最低输入级别
0x13	0x8D	ATH 最高输入级别
0x14	0x4C	ATH 最小输出驱动
0x15	0xFF	ATH 最大输出驱动
0x16	0x2C	额定电压
0x17	0x2C	过驱钳位电压
0x1A	0xB6	反馈控制（LRA 闭环）
0x1B	0xBB	Control1（启用交流耦合）
0x1C	0xF5	Control2
0x1D	0xA3	Control3（启用模拟输入）
0x1E	0x20	Control4
0x1F	0x80	Control5
0x20	0x3F	LRA 开环周期

这些设置可确保优化的性能、适当的校准以及音频转触觉功能的模式配置。

模式切换程序

初始化后，DRV2605L 可以在**音频转触觉模式**和**内置库模式**之间动态切换。通过 GUI 的寄存器写入功能或微控制器 I²C 脚本使用下列 I²C 命令：

- **切换到音频转触觉模式：**

写入寄存器 0x01 = 0x04

- **切换到内置库模式（游戏模式）：**

写入寄存器 0x01 = 0x00

写入寄存器 0x0C = 0x01 //触发振动事件

为了确保平稳运行并避免连续触发，请遵循以下时序建议：

- 触发振动事件后等待大约 **20ms**。如果没有其他事件发生：

写入寄存器 0x01 = 0x04 // 返回音频转触觉模式

该时序可确保在显式事件停止时器件平稳转换回连续的音频衍生触觉反馈。

GUI 用法 (DRV2605LEVM-MD)

1. 连接评估板后，打开 **DRV2605LEVM-MD GUI**。
2. 使用 GUI 的 **Import Settings** 按钮导入提供的初始配置 (initial table.txt)。
3. 手动切换模式：
 - 使用 GUI 中的 **Write** 选项：
 - 对于**音频转触觉模式**，输入 Reg= 0x01, Val = 0x04。
 - 对于**内置库模式**，输入 Reg= 0x01, Val = 0x00。
 - 单击 **Write** 按钮确认并执行。

这提供了一种直接的方法来确认 DRV2605L 正确运行并快速评估不同模式下的触觉反馈性能。

自动化测试的 I²C 脚本示例

为了快速进行自动化测试，您可以通过主机微控制器（伪代码示例）实施以下脚本：

```
// 初始化 DRV2605L ( 从初始表加载设置 )  
I2C_Write(0x5A, 0x01, 0x04); // 默认采用 ATH 模式  
// 发生游戏事件时 ( 用户按下按钮或游戏触发事件 )  
I2C_Write(0x5A, 0x01, 0x00); // 库模式  
I2C_Write(0x5A, 0x0C, 0x01); // 触发触觉事件  
Delay(20ms); // 等待事件振动完成  
// 如果没有其他事件，则恢复为 ATH  
I2C_Write(0x5A, 0x01, 0x04); // 音频转触觉模式
```

此脚本可集成到游戏手持设备固件中，以实现有效、无缝的触觉体验控制。

4 波形测试结果和分析 (音频转触觉模式)

首先，使用受控音频输入来检查 DRV2605L 在音频转触觉 (A-V) 模式下的输出。目的是了解驱动器将不同频率的音频信号转换为 LRA 振动的效率，以及振动幅度随音频幅度变化的缩放关系。使用了三种测试音调 (100Hz、200Hz 和 300Hz)，它们表示低于、处于和高于典型 LRA 谐振频率 (约 180Hz) 的音频内容。这些可以视为低频隆隆声 (100Hz)、近共振峰鸣声 (200Hz) 和 高频持续嗡鸣声 (300Hz)。每个音调都在四个振幅水平下进行了测试：25%、50%、75% 和 100% (其中 100% 对应于系统音量设置为最大)。例如，25% 对应于将系统音量设置为 25，50% 对应于音量级别 50，依此类推。这种配置让我们能够观察 DRV2605L 输出在不同输入音量水平下的线性度，并确定振动响应中是否发生任何饱和。

在每次测试中，音频都在 A-V 模式下播放，并捕获 LRA 驱动器 (差分输出) 和音频输入的稳态波形。示波器屏幕截图 (图 4-1 至图 4-12) 显示了相关结果。在所有这些图中，蓝色迹线 (标记为 C2) 是音频输入电压，品红色或黄色迹线 (C1 和 C3，或数学差值 M3) 表示由 DRV2605L 驱动的 LRA 两端的差分电压。本质上，每个图形上的彩色 PWM 波是驱动器输出，包络或振幅对应于振动强度。在图标题中显示了每种情况下测得的音频输入振幅 (以毫伏 RMS 为单位) 以供参考。

100Hz 输入 (低于谐振)：在 100Hz 下，LRA 被驱动到低于谐振频率。与谐振时相比，在给定电压下的振动预计会更弱，但 DRV2605L 仍可依据音频幅度按比例驱动。

在 25% 音量 (2.1mV) 下 100Hz 正弦波输入的 DRV2605L 输出。在这种低音频级别下，施加到 LRA 的差分电压很小，产生非常轻微的振动。波形显示驱动器输出端的 PWM 脉冲 (粉色或黄色)；这些脉冲的振幅很低，只够产生勉强可察觉的蜂鸣。



图 4-1. 25% 音量下的 100Hz 输入 - 微弱振动

在 50% 音量 (7.1mV) 下 100Hz 输入的 DRV2605L 输出。在中等音频级别下，驱动器向 LRA 提供更高的电压 (振幅大约是 25% 情况下的两倍)。LRA 的振动现在很明显。示波器迹线显示在 LRA 驱动电压中有清晰的 100Hz 包络 (蓝色迹线以 100Hz 的频率振荡，并且 PWM 输出在该包络之后)。振动幅度大约比 25% 的情况增加了一倍，表示此范围内大致存在线性响应。



图 4-2. 50% 音量下的 100Hz 输入 - 明显振动

在 75% 音量 (14.1mV) 下 100Hz 输入的 DRV2605L 输出。在这种较高的音频级别下，驱动器的输出 PWM 摆幅更大，从而以更大的力驱动 LRA。振动很强，并且仍然符合 100Hz 音频波形包络。



图 4-3. 75% 音量下的 100Hz 输入 - 强烈振动

在 100% 音量 (21.8mV) 下 100Hz 输入的 DRV2605L 输出。使用最大音频输入时，驱动器输出满量程差分电压 (黄色或品红色 PWM 迹线)。LRA 接收强烈的 100Hz 驱动振动。驱动器成功地驱动 LRA 而无需削波。



图 4-4. 100% 音量下的 100Hz 输入 - 满量程振动

200Hz 输入 (近谐振) : 200Hz 接近我们测试的 LRA 谐振频率。LRA 预计在此频率附近的响应最强，因而在较低的输入电压下产生更大的振动。

在 25% 音量 (2.1mV) 下 200Hz 正弦波输入的 DRV2605L 输出。M3 迹线上没有 PWM 输出。

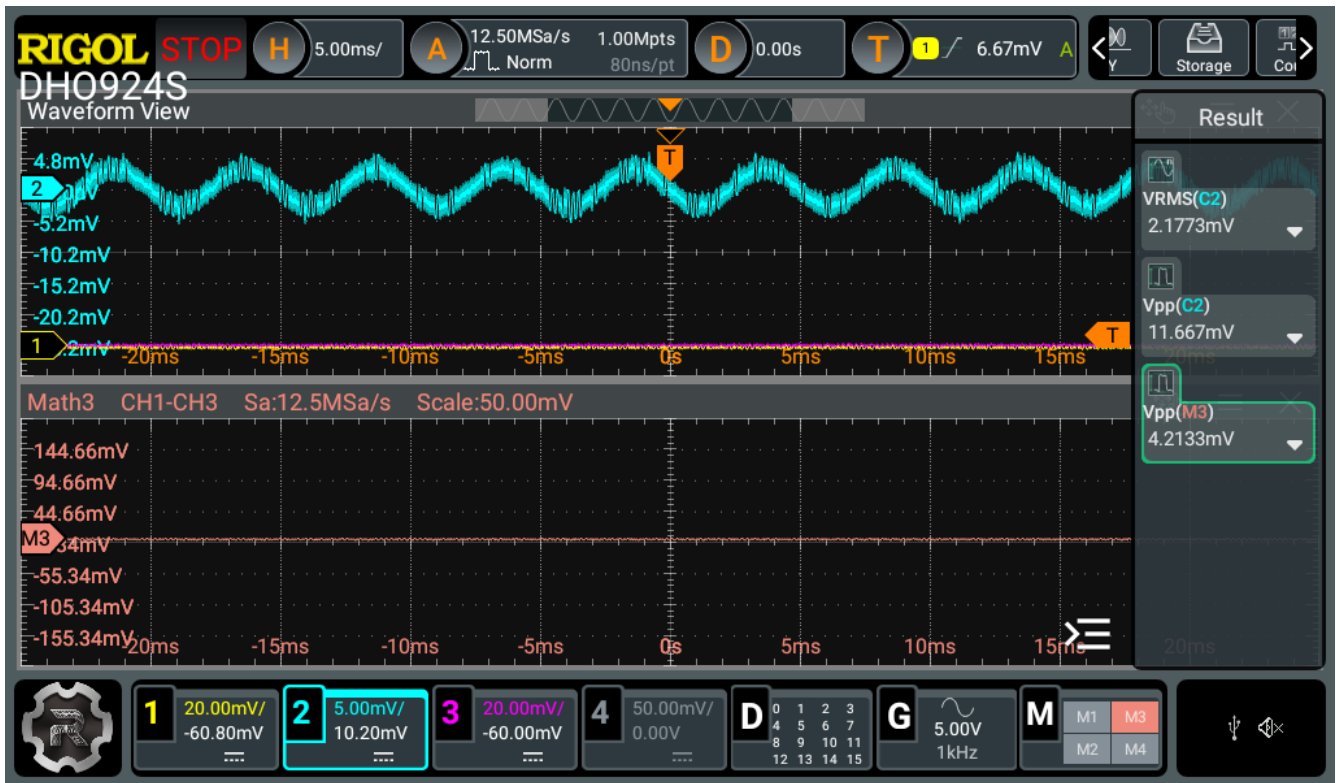


图 4-5. 25% 音量下的 200Hz 输入 - 无 PWM 输出

在 50% 音量 (7.1mV) 下 200Hz 输入的 DRV2605L 输出。在谐振状态下输入半量程音频信号时，LRA 驱动器（黄色或品红色）的振动特性更加明显。蓝色迹线表示 200Hz 音频波形。

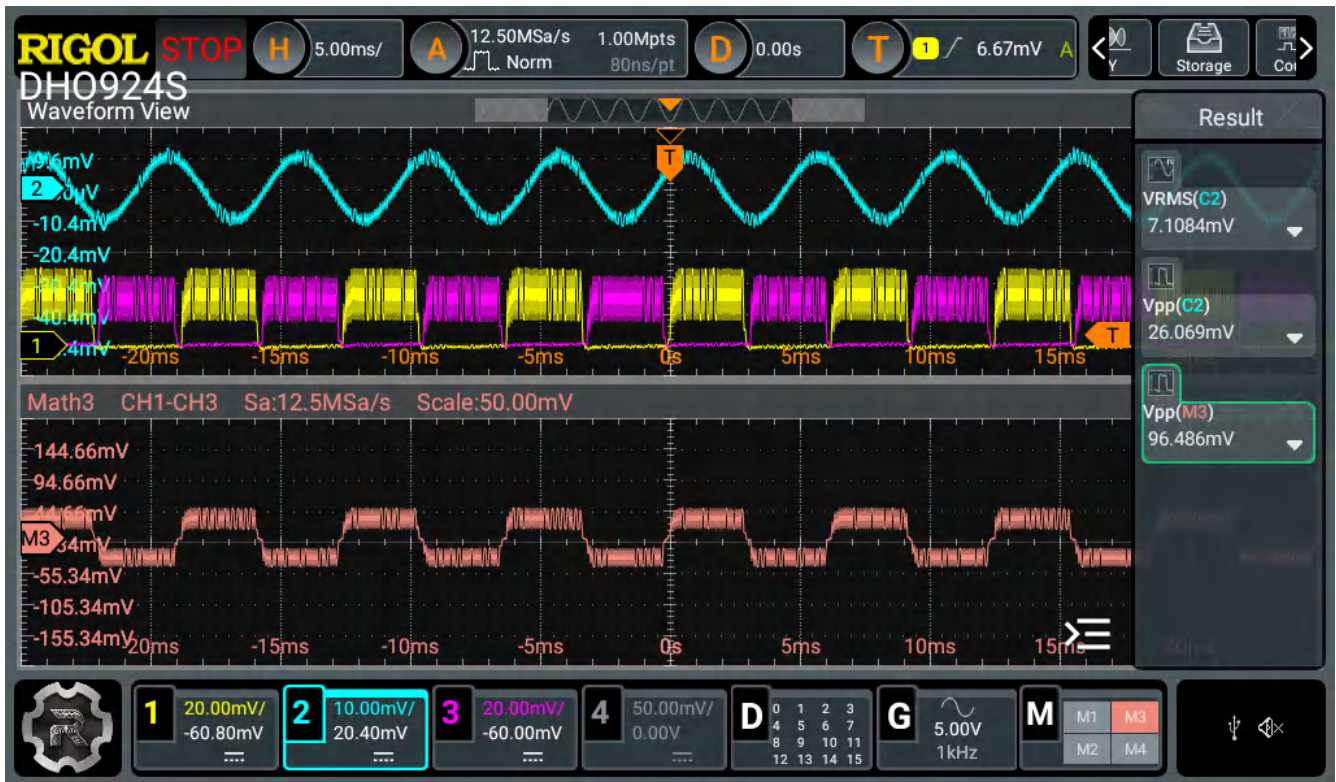


图 4-6. 50% 音量下的 200Hz 输入 - 中等振动

在 75% 音量 (14.1mV) 下 200Hz 输入的 DRV2605L 输出。在 75% 音频级别下，输出波形显示较大的 PWM 摆幅。



图 4-7. 75% 音量下的 200Hz 输入 - 高 PWM 活动

在 100% 音量 (21.8mV) 下 200Hz 输入的 DRV2605L 输出。谐振状态下的满量程输入以最大强度驱动 LRA。输出波形 (品红色或黄色) 显示观察到最高脉冲的振幅，蓝色迹线确认 200Hz 音频是连续的。LRA 的运动达到了峰值 - 这对应于很强烈的振动 (深沉蜂鸣)。

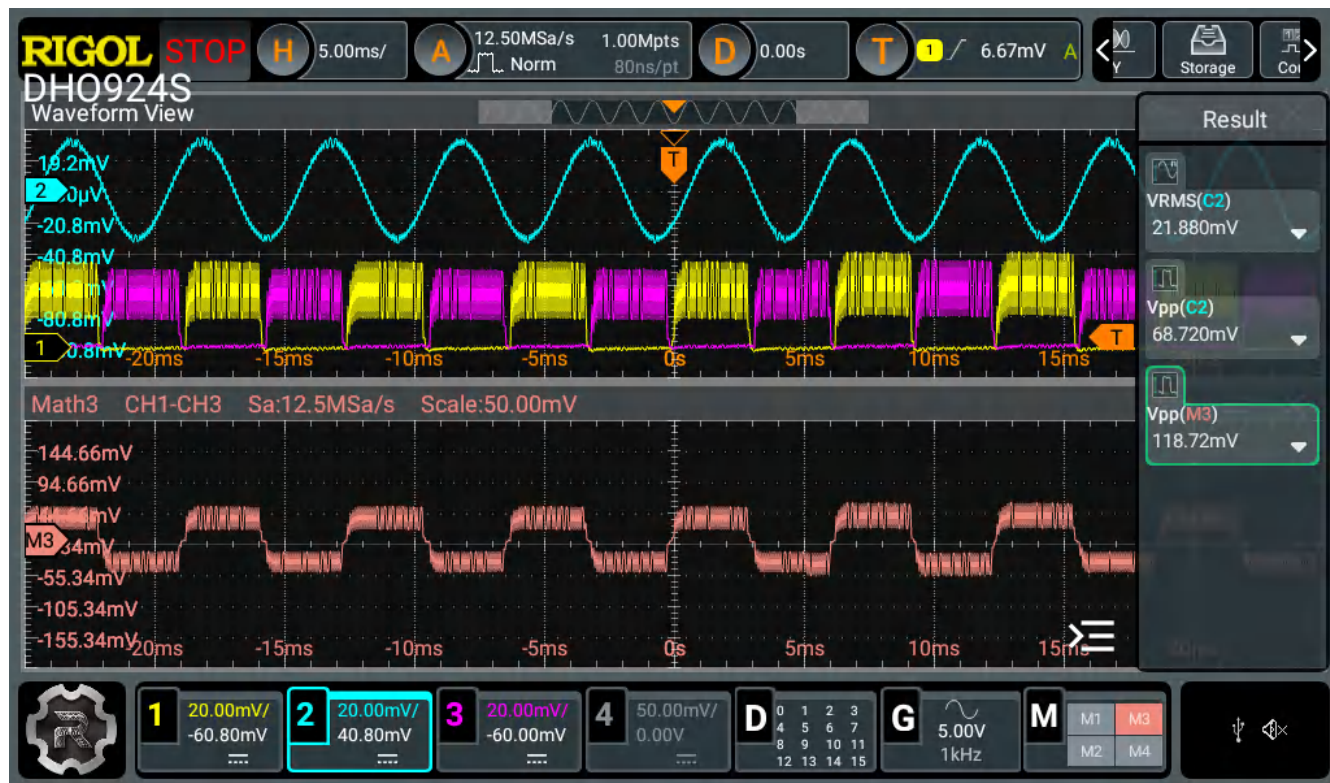


图 4-8. 100% 音量下的 200Hz 输入 - 最大振动

在谐振状态下，DRV2605L 的闭环控制特别有价值。随着 LRA 的运动增强，LRA 的反电动势也会增大 (当 LRA 运动时 LRA 会产生电压)。

300Hz 输入 (高于谐振)：300Hz 是较高的频率。在这种情况下，驱动器对 LRA 的推力不那么强，因此振动输出预计会下降。

在 25% 音量 (2.1mV) 下 300Hz 输入的 DRV2605L 输出。在四分之一的音量下，音频是 300Hz 音调，但 LRA 的差分电压 (M3，红色迹线) 为零。

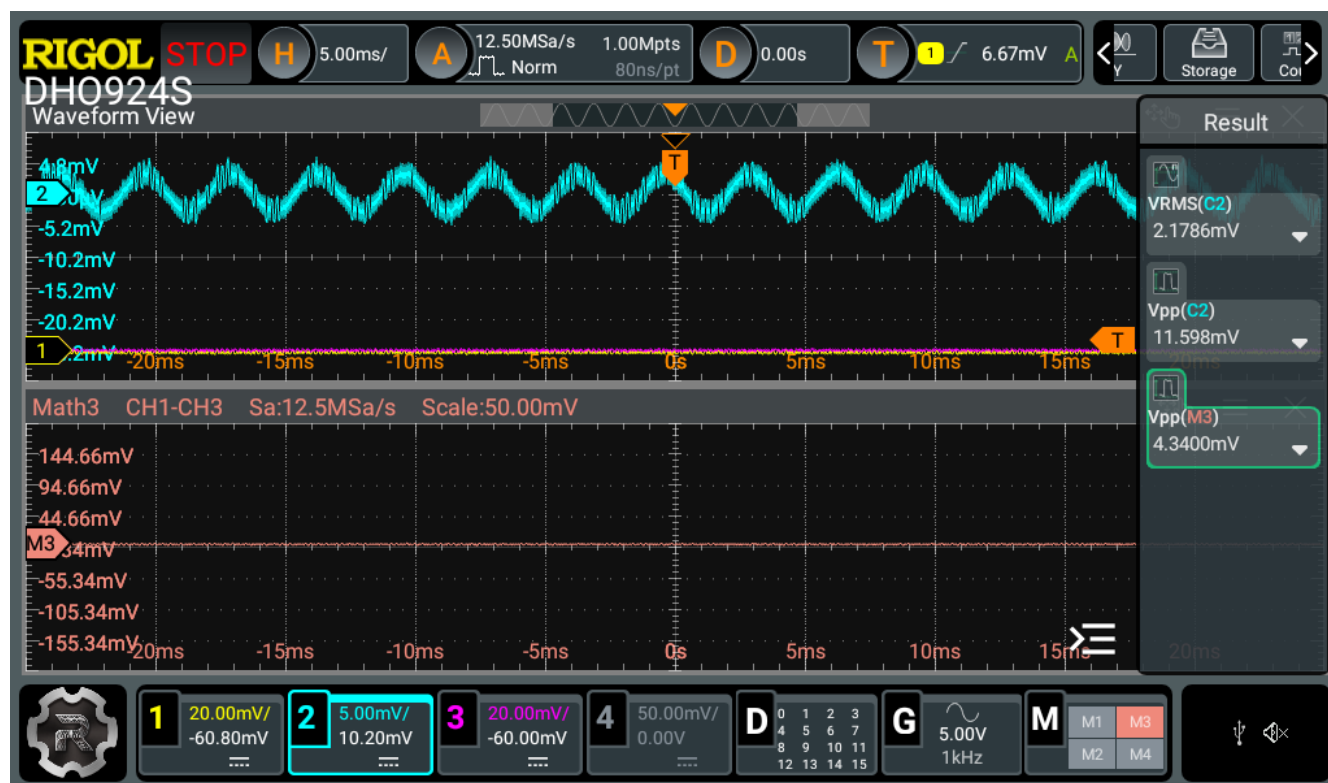


图 4-9. 25% 音量下的 300Hz 输入 - 无振动

在 50% 音量 (7.0mV) 下 300Hz 输入的 DRV2605L 输出。在中等的 300Hz 输入下，驱动器输出还是无振动。

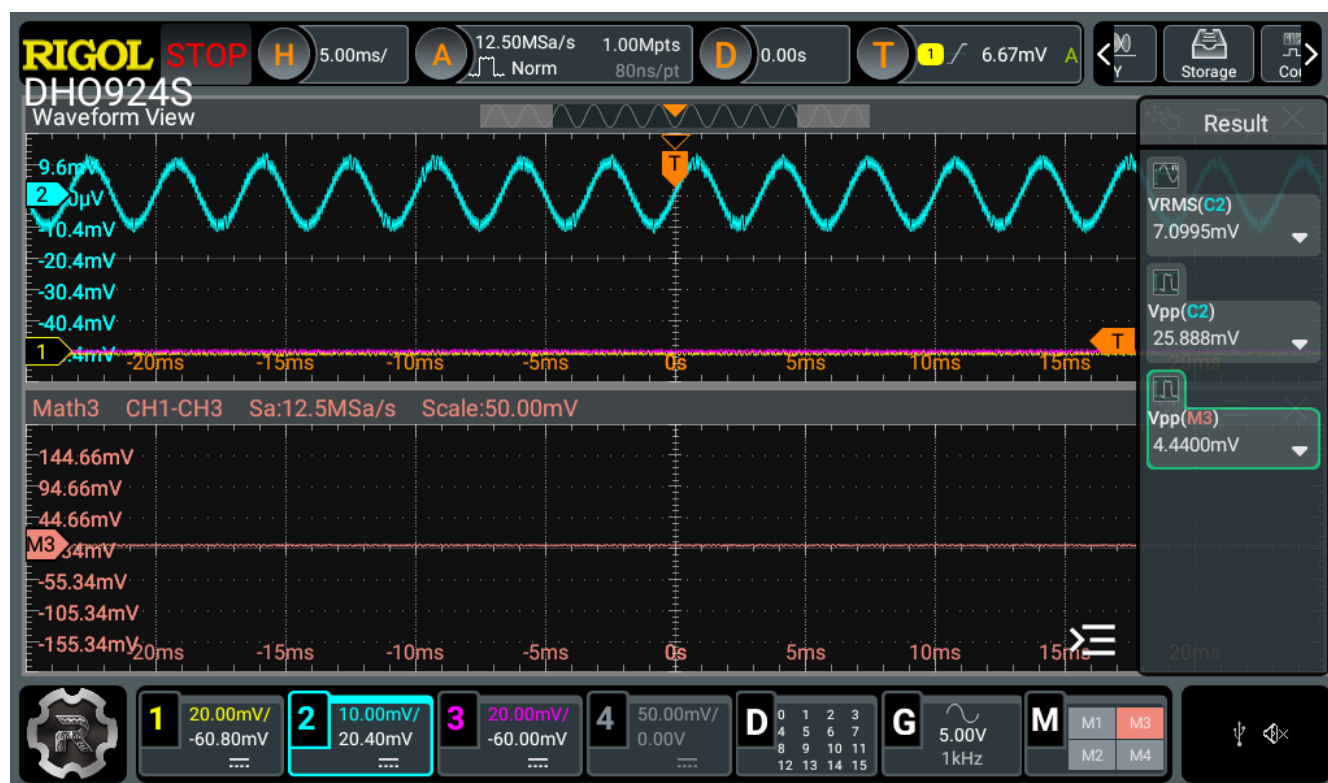


图 4-10. 50% 音量下的 300Hz 输入 - 无振动

实际上，在 300Hz 时，振动相当弱。DRV2605L 处理输入的方式看上去是将其转换为低频振动，但其振幅反映了 300Hz 激励的难度。随着振幅增加：

在 75% 音量 (14.1mV) 下 300Hz 输入的 DRV2605L 输出。当 75% 音量下，示波器显示大量的 PWM 活动。LRA 确实会振动，但是感觉比 200Hz 下的等效 75% 音量的振动更柔和。输出波形表现良好（无不稳定行为），表明驱动器处于受控状态 - 驱动器只是无法在该频率下产生同样强烈的振动。



图 4-11. 75% 音量下的 300Hz 输入 - 柔和振动

在 100% 音量 (21.0mV) 下 300Hz 输入的 DRV2605L 输出。在 300Hz 时的最大音频振幅下，驱动器产生其可达到的最大输出。示波器显示音频中的高频内容（蓝色），但 LRA 驱动器（品红色或黄色）表现为主要发生在 LRA 谐振处的调幅波形。产生的振动存在并与音频的强度大致相关，但这明显弱于 100Hz 或 200Hz 全音量的情况。



图 4-12. 100% 音量下的 300Hz 输入 - 弱振动响应

频率较高时，仍会产生一些触觉反馈 - 该控制功能可确保波形在所有情况下都保持干净（无意外失真或长时间振铃）。请注意，如果低于人的触觉阈值，极短的音频突发信号（小于大约 10-20ms）不会产生太多的触感。DRV2605L 的算法可能包含滤波功能，它可以忽略非常短暂的音频尖峰，以避免出现虚假节拍。

总体而言，这些稳态测试表明 DRV2605L 能够有效地将音频输入转换为 LRA 振动，尤其是在 LRA 的谐振频率附近。该器件对超出限值的音频振幅提供大致成比例的振动响应，并保持稳定性。

5 模式切换行为 (音频转触觉与实时播放)

单独表征音频转触觉模式后，研究了在音频转触觉 (A-V) 模式和手动驱动模式之间切换时的行为。在许多应用中，系统通常可以在音频转触觉模式下运行以提供环境反馈，但在发生具有专用隆隆声模式的特定事件时，会临时切换到直接触觉模式 (例如实时播放或播放库效果)。DRV2605L 支持通过模式寄存器进行动态模式切换，但这对于管理转换以避免任何不良伪影 (例如瞬时颤动或振动暂停) 非常重要。

测试了多种场景：在有和没有持续音频输入的情况下，从 A-V 模式切换到实时播放 (RTP) 模式，或者相反。主要观察结果如下：

了解模式：在音频转触觉 (A-V) 模式下，只要存在音频，DRV2605L 就会从音频输入自主驱动 LRA - 无需显式 I²C 命令即可产生振动。在实时播放 (RTP) 模式下，DRV2605L 采用直接命令：主机随时向 RTP 输入寄存器 (0x02) 写入一个 8 位值，以指定所需的驱动强度 (有效地控制 LRA 上的 PWM 输出)。RTP 模式对于在主机控制下生成任意波形或回放效果非常有用。还有一种波形序列发生器/库模式，在该模式下，主机可以触发预定义的效果序列 (通过为序列写入寄存器 0x04 - 0x0B 并设置模式 0x00)，但这在概念上与 RTP 类似，用于切换目的 (在这种情况下，驱动器不使用音频输入)。

- **不存在音频的情况下从 A-V 切换到 RTP：**如果在切换到 A-V 模式时音频输入已静音，则实际上不会发生任何情况 (驱动器会进入音频模式，但由于没有音频，因此不会输出任何信号)。当系统从 A-V 模式切换到 RTP 模式时，如果未发出手动驱动命令，振动会保持关闭状态。这种场景很简单，因为没有冲突 - 一旦音频启动或写入 RTP 值，相应的输出就会生效。
- **存在音频的情况下从 A-V 切换到 RTP：**这是一种更有趣的情况。假设器件处于 A-V 模式并存在一些连续的背景音频，那么系统希望接管并通过 RTP 或库播放特定的触觉效果。在 A-V 模式下，DRV2605L 根据音频主动驱动 LRA。在切换到 RTP 模式时，如果驱动器立即停止驱动 (因为尚未设置 RTP 值)、LRA 可能会突然停止，这可能会导致不连续。为了避免突然停止，必须小心地处理转换。

例如 图 5-1 捕获的一个场景，其中器件最初处于 RTP 模式 (无振动输出命令)，然后我们在 DRV2605L 中已在播放音量为 50% 的 100Hz 音频音调时切换到音频转触觉模式。示波器迹线的上半部分显示了穿过切换事件的蓝色音频波形。底部 (红色) 迹线是 LRA 输出。您可以看到，启用 A-V 模式后 (在切换时刻附近)，输出开始振荡，并在 1 个周期内达到该音频输入的预期振幅。这证明器件平稳地开始音频驱动运行 (由于算法的稳定，只是出现了轻微的初始下降)。

播放 100Hz 音频音调时从 RTP 模式切换到音频转触觉模式的示波器屏幕截图。水平轴上的时间 0 是模式切换的时刻。蓝色迹线 (CH2) 是在切换之前和之后的连续音频输入 (14.2mV RMS，约 50% 音量)。品红色/黄色迹线 (LRA 差分输出) 在 RTP 模式期间保持平坦 (无驱动命令)，然后在音频转触觉模式启用后开始振荡。随着 DRV2605L 的音频算法接管，在 t=0 后会立即观察到短暂的振幅斜升。切换后约 40 - 50ms 时，振动输出已达到稳定状态，与音频的振幅相匹配。转换很平顺，没有较大的尖峰或不连续的情况。



图 5-1. 播放 100Hz 音频音时从 RTP 模式切换到音频转触觉模式



图 5-2. 使用切换时调零驱动器的技术，从音频转触觉模式切换到 RTP 模式

总之，为了在自动音频触觉和手动控制之间实现无干扰转换，主机需要在切换时管理 RTP 寄存器值（匹配电流电平或将其设置为零以实现有意暂停），并注意短路模式切换延迟。借助这些实践，DRV2605L 可以无缝移交控制，而不会让用户感到振动不连续性。

6 DRV2605L 中的集成和切换模式：音频转触觉和内置库模式

根据上述探索结果，将音频转触觉模式与 DRV2605L 的其他模式进行集成时需要考虑以下几个因素：

1. **初始器件配置：**启动时，DRV2605L 可以自动校准（如果使用新 LRA 或条件发生显著变化），然后进入音频转触觉模式（模式 0x04）。同时，主机需要准备好在需要时通过 I²C 切换模式。这对于根据预期的音频适当地配置 DRV2605L 的控制寄存器（例如噪声门和滤波器）也很有用。在此设计中，默认值效果很好，但这些寄存器允许自定义音频的滤波和缩放方式。
2. **切换到手动模式：**当需要特定的触觉效果时（例如，游戏明确知道的武器后坐力或爆炸），系统可以通过将 DRV2605L 切换为手动模式来超控音频驱动的振动。例如，为了播放 ROM 库效果，器件可置于波形序列发生器模式（模式 0x00），并将所需的效果索引加载到波形序列发生器寄存器中。或者，对于自定义效果，可以使用实时回放模式（模式 0x05），主机可以通过写入 RTP 寄存器来流式传输波形。
3. **返回音频模式：**事件触觉完成后（效果完成或自定义命令完成），将模式切换回 0x04（音频转触觉），以使正在进行的游戏音频恢复控制。如果音频在后台连续播放，振动可以自动回弹。测试证实了这种方法效果良好。DRV2605L 能够在模式之间可靠地切换，向用户提供的触觉效果是始终有某种东西在驱动着触觉电机 - 无论是游戏的音频还是游戏的显式触觉命令。使用库效果很方便，因为它们是针对常见事件（如单击、双击、逐渐增强的蜂鸣等）调整的波形。例如，可以在一般氛围中使用音频转振动，但在玩家发射武器或游戏显式触发爆炸时，可以使用更强大的库效果（虽然可能需要暂时将 DRV2605L 的音频输入静音，但通常甚至不需要静音操作 - 切换模式功能可自动忽略音频）。

一条重要的建议是，在可能的情况下协调音频和触觉事件。如果游戏事件带有声音（如爆炸音效），并且也为此触发了库效果，请考虑此时将馈送到 DRV2605L 中的音频静音或降低音量，以避免双重驱动 LRA。在实践中，上面的方法实际上会切换模式，在播放库效果时不使用音频输入，因此不会发生冲突。但是，如果使用多个 DRV2605L 驱动器（例如，一个用于连续音频触觉，另一个用于事件效果）、请确保音频驱动器不会与显式效果驱动器同时振动，以防止振动重叠。在所述的单驱动器方法中，就避免了这种情况。

为了进一步简化开发，使用 TI 的 PC GUI（基于 USB 的控制台）对模式切换进行实验，并在编码前对参数进行调优。强烈建议这样做：使用 EVM 或类似的工具进行初始开发可以加快理解速度，并提供更有吸引力的开发流程。例如，GUI 可以快速切换模式并调整设置，而无需重新编译固件，因此更容易微调行为。

该工具提供了寄存器映射和按钮来配置 DRV2605L 的设置，如图 6-1 所示。

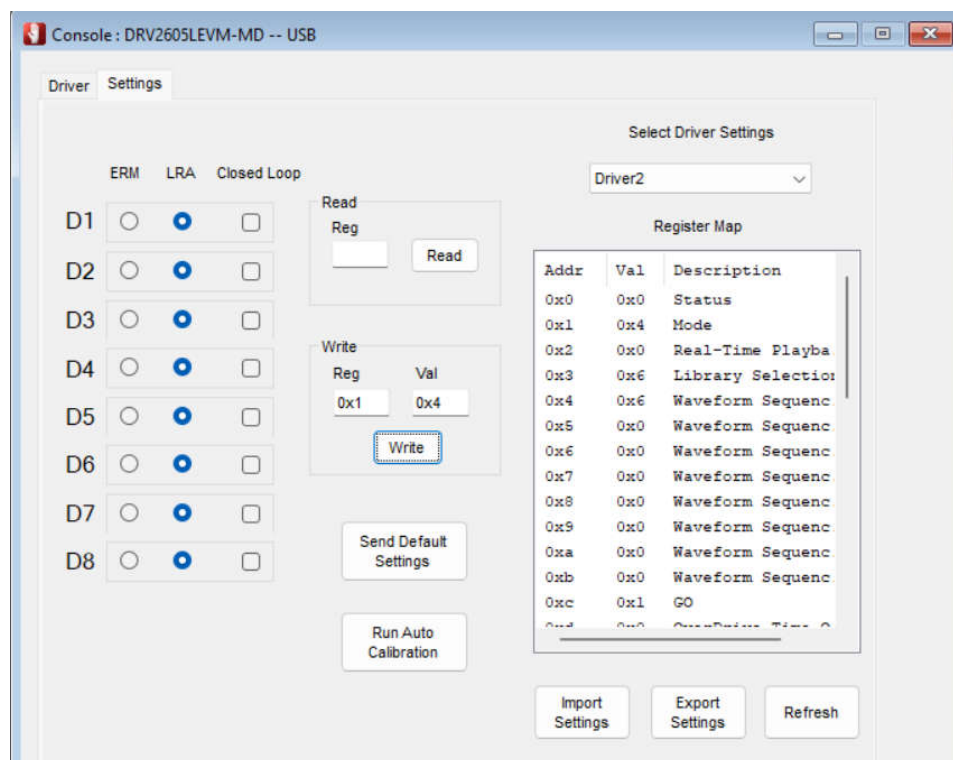


图 6-1. 开发中使用的 DRV2605LEVM-MD 控制台 GUI (USB 套件)

7 有关模式切换的观察结果和建议

从这些体验中吸取了一些重要的教训。在此实现过程中的主要观察结果和建议包括：

- **使用闭环 (LRA) 模式：**使用 LRA 时，务必配置 DRV2605L 以实现闭环 LRA 驱动。Smart-Loop 控制对于获得良好的性能至关重要。开环模式下的测试显示振动较弱且不太一致。闭环可确保在谐振条件下驱动 LRA，并在收到变为 0 的命令时快速停止，这在模式切换期间（无残余抖动）特别有用。
- **尽可能减少模式切换：**模式切换应当不频繁，并需要有意地进行。切换模式时，等待几毫秒的延迟时间以使 DRV2605L 稳定下来。如果模式变化过于频繁（例如，在音频模式和手动模式之间快速切换），LRA 没有足够的时间稳定下来，导致结果不理想。在实践中，即使每个游戏事件切换一次通常也没问题，只需避免不必要的快速切换即可。
- **分组触觉操作：**通常建议将噪声门保持在默认值（大约几 mV 的阈值），以防止超低电平音频产生意外振动。在规划触觉反馈时，尽可能将触觉操作分组。例如，如果正在运行没有玩法的过场动画，请使用音频转触觉来播放背景音乐；当过场动画结束并且游戏以显式事件恢复时，请切换到手动模式。围绕游戏的逻辑片段将模式切换聚类，可避免持续地切换，并提高触觉的可预测性。
- **适当地使用自动校准：**确保驱动器闭环参数的准确性。在此设计中，校准后就不需要在每次引导时都重新校准（这些值可以存储，或者只要不断电就一直保留在驱动器中）。但是，至少执行一次自动校准（或者在环境条件发生变化时偶尔执行）是保持设计性能的良好做法。实践证明，让器件保持未校准状态可能会导致反馈低于标准，因此建议进行校准。
- **监测状态标志：**在测试期间，监测状态寄存器（包括故障标志）以确保未触发任何故障条件 - 这些测试中均未触发。建议将此监测功能纳入最终设计中，尤其是在硬驱动 LRA 时，以捕获任何过流或其他故障情况。

如果采纳上述建议（尤其是谨慎地处理转换），工程师就可以在手持设备上实现音频转触觉和手动触觉控制的无缝集成。该方法利用游戏的现有音频输出实时生成沉浸式振动，同时仍允许根据需要提供显式触觉效果。

DRV2605L 通过自动将音频信号转换为触觉反馈提供了一种强大的方法，而闭环控制可使这些振动保持清晰、精确。针对各种音频频率和音量进行的测试表明，器件可以有效地将音频输入转换为有意义的振动 - 尤其是在反馈最强的 LRA 谐振频率附近。此外，当特定事件需要独特的触觉响应时，系统可以临时切换模式并提供所需效果，而不会引起用户抖动或引入延迟。

在此特定测试场景之外，音频转触觉反馈的概念具有广泛的适用性。任何具有音频输出的消费类设备都可能利用此技术来增强用户体验。例如，VR 控制器可使用音频转触觉功能从游戏音频产生环境振动（风、远处的爆炸），从而增加沉浸感。家庭影院椅或可穿戴背心可以将电影或游戏的音轨转换为振动，获得简单的 4D 体验。

DRV2605L 小巧而灵活，非常适合这些应用。未来，可以想象一下智能手机、平板电脑或汽车娱乐系统等设备使用音频驱动型触觉来丰富内容，而无需开发人员为每种媒体显式编码触觉轨道。

8 摘要和未来应用

本应用手册演示了如何在游戏手持设备的音频转触觉模式下集成和使用 **TI DRV2605L** 触觉驱动器。我们的方法是游戏的现有音频输出实时生成沉浸式振动，同时仍允许根据需要提供显式触觉效果。**DRV2605L** 通过自动将音频信号转换为触觉反馈提供了一种强大的设计，而闭环控制可确保这些振动清晰、精确。我们针对各种音频频率和音量进行的测试表明，器件可以有效地将音频输入转换为有意义的振动 - 尤其是在反馈最强的 **LRA** 谐振频率附近。实验还表明，该器件可以在音频驱动型触觉和直接命令驱动触觉 (**RTP** 或库模式) 之间平稳转换，这对于在混合了环境触觉和脚本化触觉事件的游戏中进行实际使用至关重要。提供的控制方案 (包括 **I²C** 命令和模式切换策略) 可作为工程师复制和微调工程的参考。

在我们特定测试场景之外，音频转触觉反馈的概念具有广泛的适用性。任何具有音频输出的消费类设备都可能利用此技术来增强用户体验。例如，**VR** 控制器可使用音频转触觉功能从游戏音频产生环境振动 (风、远处的爆炸)，同时仍使用特定的触觉提示进行直接交互。同样，游戏座椅或可穿戴背心可以将电影或游戏的音轨转换为振动，获得简单的 **4D** 体验。**DRV2605L** 小巧而灵活，非常适合这些应用。然而，即使采用目前的技术，以所述方式实施 **DRV2605L** 也可以显著弥合缺少显式触觉内容的差距，从而以极少的软件开销丰富用户沉浸式体验。

总之，将 **DRV2605L** 集成到游戏手持设备中以提供音频转触觉反馈是一种可行且有效的设计。这可利用游戏自己的音频提供连续的上下文感知振动，需要适度的硬件更改，并且高度可配置以匹配所需的感觉。遵循本应用手册中提供的指南和示例，工程师和现场应用团队可以加快开发速度并提供更具吸引力的产品。实时音频驱动型触觉和按需自定义效果的组合 (所有这些都由 **DRV2605L** 实现) 为游戏玩家及其他用户开启了一个全新的交互式反馈维度。

9 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [MSP430FR573x 混合信号微控制器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [DRV2605L ERM 和 LRA 触觉驱动器评估套件](#) 数据表。
3. 美国国家医学图书馆, [Temporal Summation in Vibrotactile Sensitivity](#), R T Verrillo, 1965 年

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