

# TI 参考设计

## 压电扬声器频闪灯通知参考设计



### TI 参考设计

本 TI 参考设计使用德州仪器 (TI) 的工业压电驱动器、闪光灯发光二极管 (LED) 驱动器和超低功耗铁电随机存取存储器 (FRAM) 微控制器 (MCU) 演示声音和视觉通知子系统，主要应用于火灾警报终端设备系统。

### 设计资源

<a href="#">TIDA-00376</a>	设计文件夹
<a href="#">DRV2700</a>	产品文件夹
<a href="#">LM3550</a>	产品文件夹
<a href="#">MSP430FR5969</a>	产品文件夹
<a href="#">LMR14030</a>	产品文件夹
<a href="#">LMV344</a>	产品文件夹
<a href="#">CSD15571Q2</a>	产品文件夹
<a href="#">TPD1E10B06</a>	产品文件夹
<a href="#">TPD6F003</a>	产品文件夹



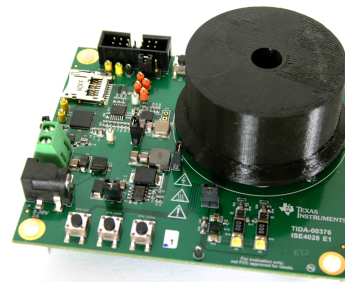
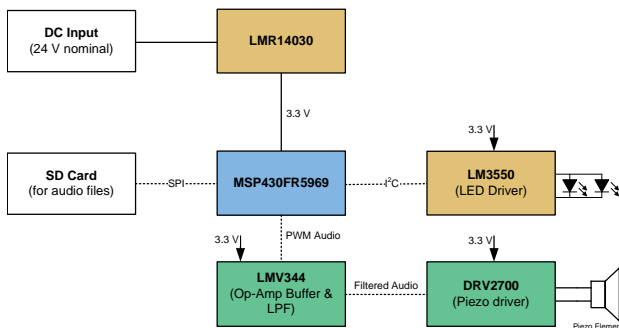
请咨询我们的 E2E 专家  
WEBENCH® 设计中心

### 设计特性

- 符合 NFPA 72 法规要求针对声音和视觉通知器件的要求
- 86.5dBA @ 3m (520Hz 方波)
- 80.5dBA @ 3m (2.84kHz 正弦波)
- 77.5dBA @ 3m (预录语音)
- 300 坎德拉 @ 3m (闪光灯模式)
- 1.44W 功耗 (声音和视觉通知)
- 6.432mW 功耗 (待机模式)

### 典型应用

- 工业
- 楼宇自动化
- 火警
- 安全警报
- 通知设备
- 音响
- 扬声器频闪灯
- 蜂鸣器频闪灯
- 语音评估



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

## 1 系统主要技术规范

**表 1. 系统主要技术规范**

参数	技术规格	详细信息
输入电压	8V 至 28.8V 直流电压	<a href="#">2.5 节</a>
经稳压的电压轨	3.3V $\pm$ 10%，3A 最大输出电流	<a href="#">2.5 节</a>
视觉通知元件	2 个欧司朗 2W LED（4000K 色温）	<a href="#">2.3 节</a>
视觉输出选项	充电模式、手电筒模式、闪光灯模式	<a href="#">4.3 节</a>
视觉输出电平	300 坎德拉	<a href="#">节 6.3.2</a>
视觉输出标准	NFPA 72 第 18.5.3 节 NFPA 72 第 18.5.5.6 节	<a href="#">节 4.2.4</a>
声音通知元件	PUI 音频压电传感器	<a href="#">节 4.1.1</a>
声音输出选项	520Hz 方波、2.84kHz 正弦波、预编程语音文件、白噪声	<a href="#">4.3 节</a>
声音输出电平	86.5dBA @ 3m（520Hz 方波） 80.5dBA @ 3m（2.84kHz 正弦波） 77.5dBA @ 3m（预录语音）	<a href="#">节 6.2.3</a>
声音输出标准	NFPA 72 第 18.4.1.5 节 NFPA 72 第 18.4.3.1 节	<a href="#">节 4.1.4</a>
工作温度	-30°C 至 70°C（受 LM3550 和超级电容的限制）	<a href="#">节 3.1.2</a>
外形	3.45 x 4.0 英寸矩形印刷电路板 (PCB)	<a href="#">5.1 节</a>

## 2 系统简介

许多工业和楼宇自动化系统需要使用视觉和声音通知器件提醒接近某种事件的人员。许多传统通知器件分别使用氙闪光灯和动态扬声器进行视觉频闪通知和声音通知。然而，工业趋势正逐步向将发光二极管 (LED) 和压电传感器应用于通知器件的方向发展，旨在缩小系统尺寸并降低功耗。

此外，全世界出台了法规标准，规定了视觉和声音通知器件的性能要求。本 TI 参考设计使用管理火警和信号的美国国家消防协会 (NFPA) 规范指导设计决策。

凭借德州仪器 (TI) 的工业压电驱动器、闪光灯 LED 驱动器、超低功耗 MCU、模拟信号调节和电源管理技术，TI 的压电扬声器频闪灯通知参考设计演示了根据 NFPA 法规针对火警通知器件的要求发出视觉和声音通知的方法。

从较高层次看，压电扬声器频闪灯通知参考设计系统由高电压压电驱动器、压电传感器、脉宽调制 (PWM) 信号调节、闪光灯 LED 驱动器、高电流 LED、系统 MCU 和电源管理组成。

系统 MCU 使用多个按钮控制视觉和声音通知子系统。演示了多种声音模式，包括 520Hz 方波、2.84kHz 正弦波、预录语音文件和白噪声。闪光灯 LED 驱动器在正常的高电流闪光灯模式和低电流手电筒模式下工作。

本设计指南介绍了此 TI 参考设计系统的组件选择、设计理论和测试结果。本设计指南旨在引导系统设计人员抢先了解在终端设备系统中集成 TI 工业压电驱动器、闪光灯 LED 驱动器、超低功耗 MCU、模拟信号调节和电源管理技术的相关信息。

后续子章节介绍该 TI 参考设计系统中的各模块以及实现相应功能最关键的特性。

### 2.1 高电压压电驱动器和压电传感器

压电扬声器频闪灯通知参考设计将压电传感器选定为声音通知的主要方法。与动态扬声器相比，压电传感器的功耗通常较低，尤其是对于需要高声压等级 (SPL) 以符合法规要求的窄带宽报警信号。为了驱动压电传感器，选择德州仪器 (TI) 的高电压工业压电驱动器。TI 的工业压电驱动器技术高度集成，最大限度缩减了终端设备尺寸，能够驱动高电压，支持使用成本降低、但电压升高的压电传感器。

通过直接驱动 200V<sub>pp</sub> 的压电电压，德州仪器 (TI) 的 DRV2700 器件成为驱动高电压压电传感器的理想选择。此外，1.5ms 的短暂启动时间可实现针对命令进行快速系统响应，从而开始发出警报通知。

AT-5205-TT-R 压电传感器的（由 PUI Audio Inc. ([www.PUIAudio.com](http://www.PUIAudio.com)) 提供）非常适用于声音通知终端设备系统，原因是其专用于在两种常用警报通知频率下提供谐振峰。此外，该压电传感器的电容较低，与其低功耗特性相对应。

有关高电压压电驱动器和压电传感器的相关系统原理和详细设计信息，请参见节 4.1.1 和节 4.1.2。

## 2.2 PWM 信号调节

在压电扬声器频闪灯通知参考设计中，通过生成 PWM 信号的方式发出声音音调和通知。为了防止 PWM 载波频率进入 DRV2700 器件，需要使用模拟信号调节。此外，DRV2700 具有四种固定增益设置，需要控制最高输入电压，以防输出信号发生削波。

通过 TI 广泛的通用放大器产品组合，可轻松调节 PWM 信号。本参考设计采用三级方法：第一级为一个分压器，后接一个运算放大器缓冲器控制输入信号幅值，然后使用两级低通滤波电路消除 PWM 载波频率。在保持极高成本敏感性的同时，LMV344 四路运算放大器非常适用于执行此类 PWM 信号调节。

有关 PWM 信号调节的相关系统原理、详细设计信息以及仿真结果，请参见节 4.1.3。

## 2.3 闪光灯 LED 驱动器和高电流 LED

压电扬声器频闪灯通知参考设计的电流消耗保持恒定，仍可凭借 TI 的闪光灯 LED 驱动器技术使用高电流 LED 提供高强度视觉通知。所选驱动器在闪光事件过程中使用超级电容作为 LED 的主电源。这支持相对较低的恒定输入电流，可减少整个警报通知器件电源中的电压跌落，同时仍允许超高电流闪光灯脉冲。

选择 LM3550 闪光灯 LED 驱动器对高电流 LED 进行供电和控制。此 LED 驱动器对超级电容进行充电和控制，同时控制驱动高电流 LED 的外部 N 沟道场效应晶体管 (FET)。

由于光输出较高，选择欧司朗光电半导体公司 ([www.osram-os.com](http://www.osram-os.com)) 的 GW CSSRM1.PC-MTNP-5L7N-1 紧凑型 2W 高功率 LED。凭借 2A 最大浪涌电流以及 120° 宽广视角，此类 LED 非常适用于视觉频闪灯通知应用。

有关闪光灯 LED 驱动器和高电流 LED 的相关系统原理和详细设计信息，请参见 4.2 节。

## 2.4 系统 MCU

压电扬声器频闪灯通知参考设计针对微控制器提出了多项要求。LM3550 器件通过 I<sup>2</sup>C 与系统 MCU 通信，还可使用两个通用输入/输出 (GPIO) 引脚。DRV2700 器件由三个 GPIO 引脚控制，其中两个用于控制增益，另一个用于启用整个器件。DRV2700 器件由基于 PWM 的音频源驱动。该音频源需要 Timer\_B 模块实现最优性能。为了实现合适的音频保真度水平，需要采用 8MHz 最低处理器时钟频率。本 TI 参考设计提供三种用户按钮，使用三个 GPIO 引脚在各种工作模式间循环。

由于本 TI 参考设计旨在展示 TI 技术，因此选择 MSP430FR5969 器件作为系统 MCU。该器件满足本 TI 参考设计系统的所有要求，并且功耗超低。

有关系统 MCU 的相关系统原理、详细设计信息和固件说明，请参见 4.3 节。

## 2.5 电源管理

通知终端设备系统最为常用的两种电源配置是由线路供电的电源（100V 至 240V 交流电压，具体取决于所在地区）或预先经过稳压的直流电压，通常为 24V。压电扬声器频闪灯通知参考设计的标称电源为 24V 直流电压轨。指定该电压轨的目的是为采用 TI 技术的视觉和声音通知实施方案提供通用评估平台。

由 24V 直流电压轨供电的终端设备系统的额定电压容差通常较大，原因是 24V 直流电源通常为冗长电线回路中相连的众多节点供电。因此，本 TI 参考设计较为谨慎，输入电压范围为 8V 至 28.8V。

本 TI 参考设计中的所有组件均可由 3.3V 电源供电，因此将其选定为主要稳压电源轨。由于声音和视觉通知子系统可能消耗大量电流，因此需要使用 DC-DC 降压转换器维持高效电源转换。最大电流定义为较为保守的 3A，确保为 TI 参考设计系统提供足够大的负载点电源。

使用 [WEBENCH 设计工具](#)，选择 LMR14030 器件作为兼顾效率和总成本的理想折衷方案。然而，如需将本参考设计展示的技术集成到终端设备，需要采用其他电源管理配置。WEBENCH 设计工具性能优异，可方便快捷地探索 TI 广泛的电源管理产品组合，从而制定理想解决方案。

## 2.6 电磁干扰 (EMI) 保护

压电扬声器频闪灯通知参考设计旨在有效抵御电磁干扰 (EMI)，尤其是输入电力线中的电磁干扰。由于不同终端设备系统采用不同电源架构，因此需要采取不同防护措施抵御 EMI。本 TI 参考设计展示了构建的一种实际系统，符合多种 EMI 标准 (IEC61000)。EMI 测试结果使我们确信，如果系统设计正确，TI 技术能够符合 EMI 标准。

主 EMI 保护电路位于电源输入连接器和 JTAG 编程连接器附近。主电源输入网具备分立器件保护网络。其中包含接地的高电压 (2kV) 分流电容、瞬态电压抑制 (TVS) 器件、共模扼流器和快速旁路电容。该网络可保护系统免受主电源输入端瞬态电压和瞬态电流的影响，还能降低差模和共模 RF 瞬变。

选择 TPD1E10B06 单通道 ESD 保护器件保护 JTAG 编程接口。选择集成 ESD 保护器件的 TPD6F003 6 通道 EMI 滤波器保护可选 microSD 卡的数据引脚。

### 3 框图

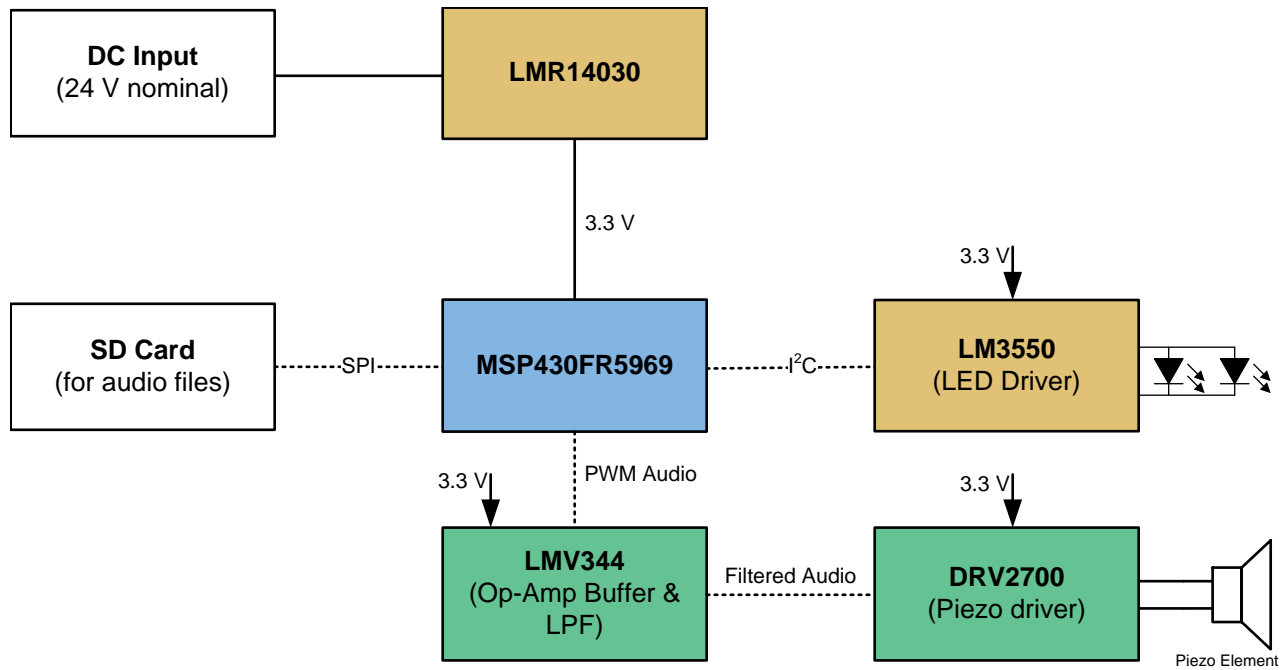


图 1. 压电扬声器频闪灯通知参考设计系统框图

#### 3.1 重点产品

压电扬声器频闪灯通知参考设计 采用 以下器件：

- **DRV2700**: 集成升压转换器的工业压电驱动器
- **LM3550**: 具有自动 Vf 和 ESR 检测功能的闪光灯 LED 驱动器
- **MSP430FR5969**: 采用 64KB FRAM、2KB SRAM 及 40 IO 的 16MHz 超低功耗微控制器
- **LMR14030**:  $I_Q$  为  $40\mu\text{A}$  的 Simple Switcher® 40V、3.5A、2.2MHz 降压转换器
- **LMV344**: 具有关断功能的四路轨到轨输出 CMOS 运算放大器
- **CSD15571Q2**: 20V N 通道 NexFET™ 功率 MOSFET
- **TPD1E10B06**: 电容为 10pF 电容、击穿电压为 6V、采用 0402 封装的单通道 ESD
- **TPD6F003**: 具有集成 ESD 保护的 6 通道 EMI 滤波器

如需了解有关这些器件的详细信息，请参见 [www.ti.com](http://www.ti.com) 上对应的产品文件夹。

### 3.1.1 DRV2700

DRV2700 是一款单芯片压电驱动器，此驱动器具有集成的 105V 升压开关、集成功率二极管以及集成的全差分放大器。这款多用途器件能够驱动高压和低压压电负载。输入信号既可以是差分信号，也可以是单端信号，而且交流或直流耦合均支持。DRV2700 器件支持四种 GPIO 控制的增益：28.8dB、34.8dB、38.4dB 和 40.7dB。

升压电压通过两个外部电阻进行设置。升压电流限值可通过  $R_{(REXT)}$  电阻进行编程。升压转换器架构可防止电源电流超出由  $R_{(REXT)}$  电阻设置的限值，这样用户便可以根据目标性能需求针对给定电感来优化 DRV2700 电路。此外，该升压转换器基于滞后架构，可最大程度降低开关损耗，从而提高效率。

DRV2700 器件的启动时间典型值为 1.5ms，从退出休眠模式的速度方面来讲是一款理想的压电驱动器。该器件具有热过载保护，可在过驱动时免遭损坏。

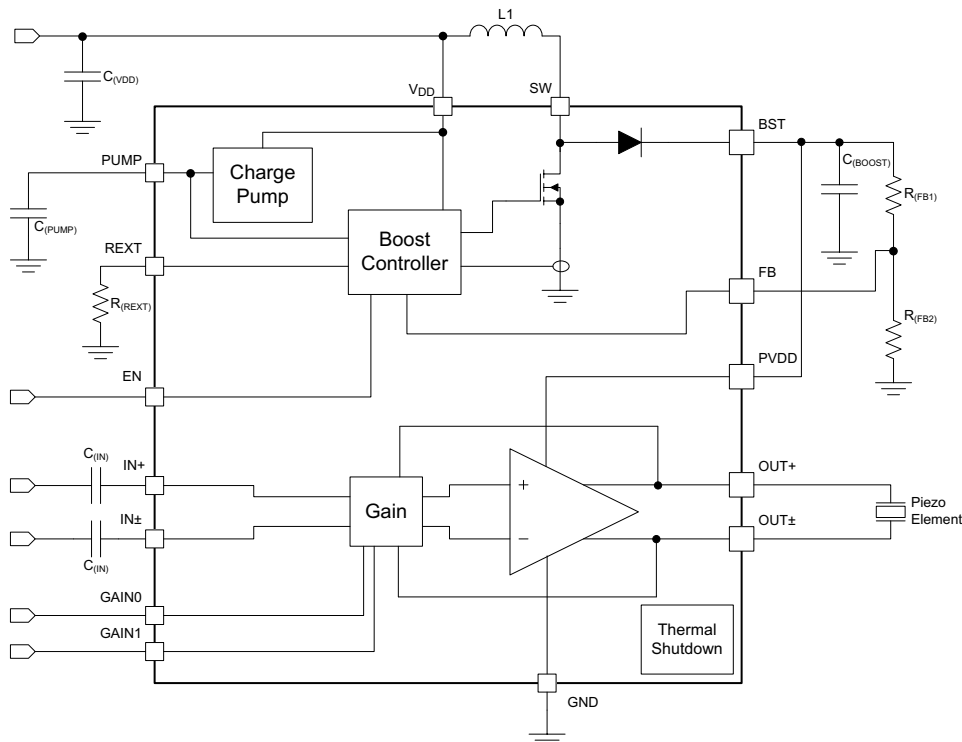


图 2. DRV2700 功能框图

特性：

- 100V 升压或 1kV 反激配置
- 采用升压 + 放大器配置的  $\pm 100V$  压电驱动器
  - 4 种可通过 GPIO 调节的增益
  - 差分或单端输出
  - 低电压控制
  - 交流和直流输出控制
- 采用反激配置的 0kV 至 1kV 压电驱动器
  - 低电压控制
  - 交流和直流输出控制
- 集成升压或反激转换器
  - 可调节电流限值
  - 集成功率场 FET 和二极管
- 快速启动时间：1.5ms
- 3V 至 5.5V 宽电源电压范围
- 4mm x 4mm x 0.9mm 超薄四方扁平无引线 (VQFN) 封装
- 1.8V 兼容数字引脚
- 过热保护



### 3.1.2 LM3550

LM3550 是一款低噪声、开关电容 DC-DC 转换器，设计作为电流受限和可调节（最高可达 5.3V）超级电容充电器。LM3550 具有可由用户选择的超级电容充电终止电压和最优充电终止模式，通过应对闪光元件损耗最大限度提升闪光能源效率。此外，该器件提供了可调节恒流输出（最高可达 200mA）及一个 NFET 控制器，非常适用于在高功率闪光灯模式或低功率手电筒模式下驱动一个或多个高电流 LED。

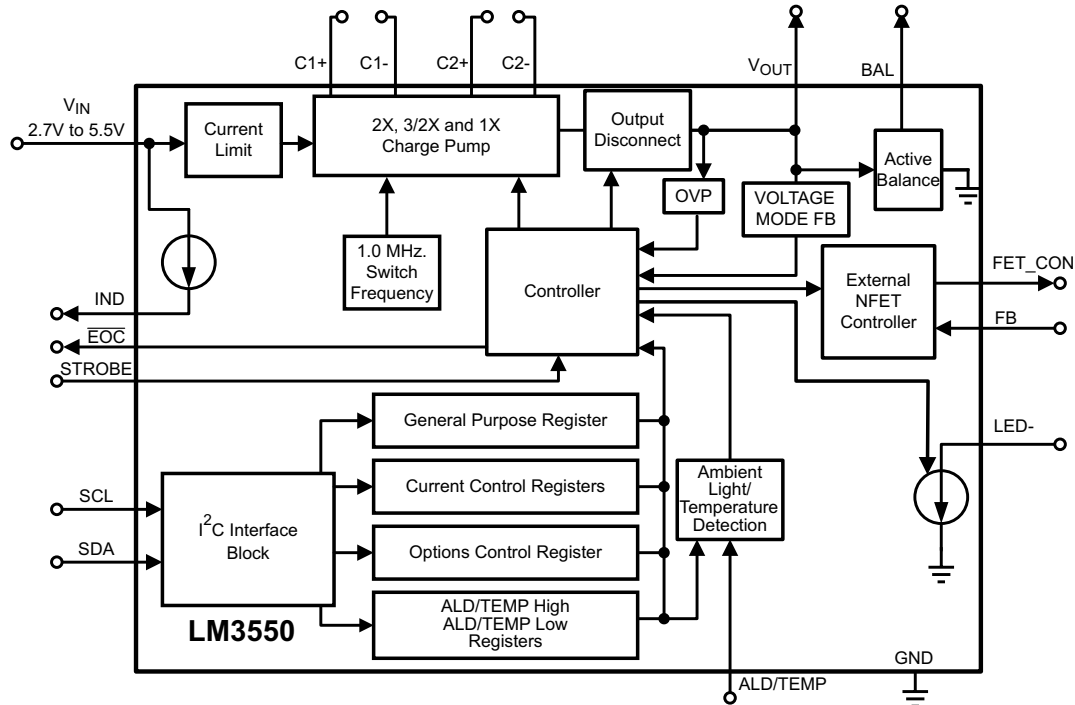


图 3. LM3550 功能框图

特性:

- 闪光电流高达 5A
- 四个可选超级电容充电电压（4.5V、5.0V、5.3V、经优化的电压）
- 闪光优化的充电模式，可实现最高效率
  - 最优模式下的充电时间缩短 33%
  - 最优充电模式下的电流源功耗降低 49%
- 输入电流限值为 500mA 的快速超级电容充电器
- 可调节手电筒电流（60mA 至 200mA）
- 电流下降的环境光或 LED 热感应
- 充电结束输出 ( $\overline{EOC}$ )
- 专用 LED 指示灯电流源
- 无需电感
- 通过频闪灯引脚输入支持手动闪光灯
- 可编程闪光灯脉冲持续时间，以及流经 I<sup>2</sup>C 兼容接口的手电筒和闪光灯电流
- 实现真正关断（LED 断开连接）
- 闪光超时保护



- LED 过热保护或环境光感测引脚
- 薄型 20 引脚超薄塑封四方扁平无脚 (UQFN) 封装 (3.0mm × 2.5mm × 0.8mm)

### 3.1.3 MSP430FR5969

MSP430™ 超低功耗 FRAM 平台将独特的嵌入式 FRAM 和整体超低功耗系统架构相结合，支持创新人员以较低能源预算提升性能。FRAM 技术完美融合了静态随机存取存储器 (SRAM) 的速度、灵活性和耐用性与闪存稳定性和可靠性，功耗极低。

MSP430 超低功耗 FRAM 产品组合由多种采用 FRAM 的器件集合、超低功耗 16 位 MSP430 CPU 和针对不同应用的智能外设 组成。超低功耗架构特有 7 种低功耗模式，针对在能量受限应用中延长电池使用寿命进行了优化。

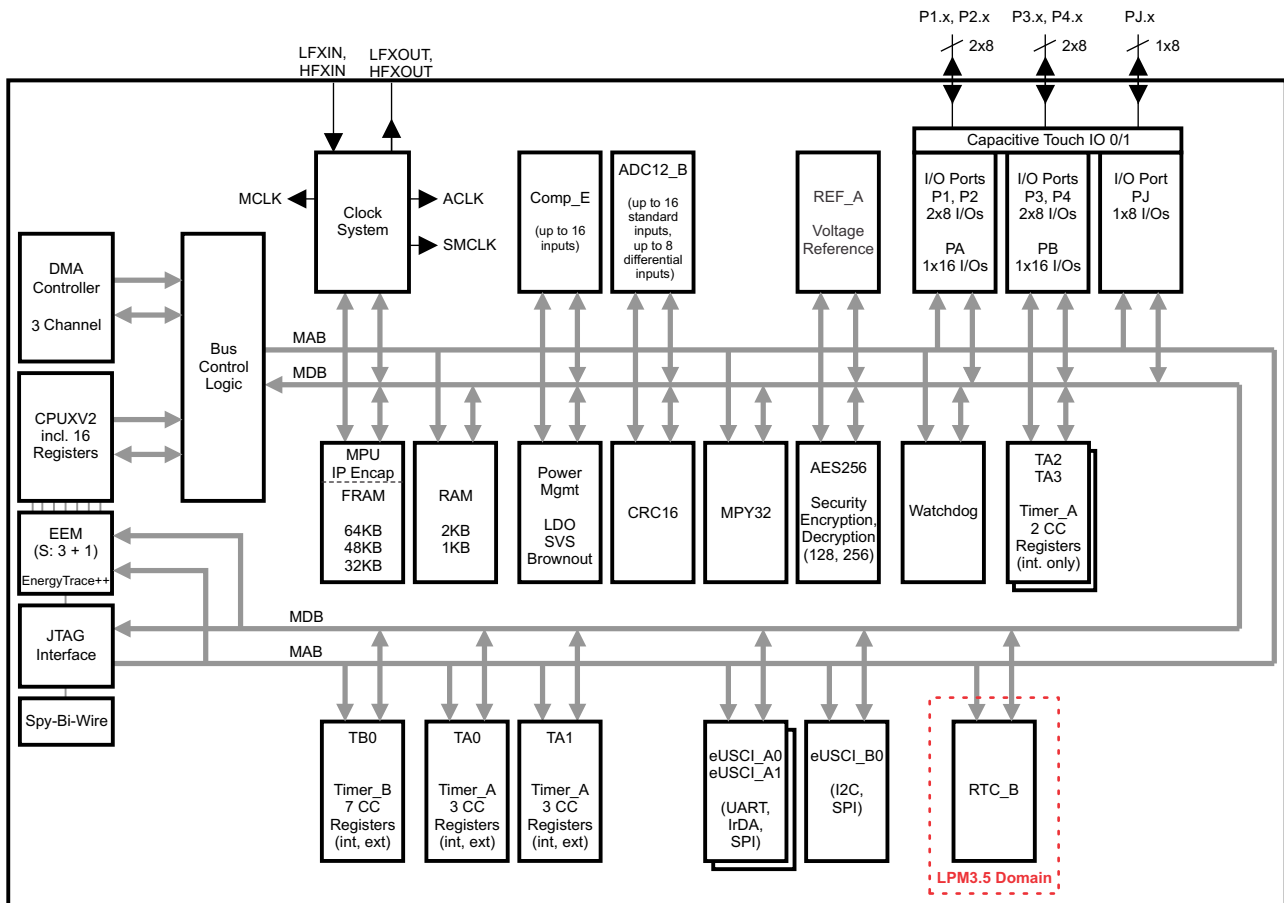


图 4. MSP430FR5969 功能框图

特性:

- 嵌入式微控制器
  - 时钟频率高达 16MHz 的 16 位精简指令集计算机 (RISC) 架构
  - 宽电源电压范围 (1.8V 至 3.6V) <sup>(1)</sup>
- 优化的超低功耗模式
  - 工作模式: 大约 100µA/MHz
  - 待机 (采用低功耗振荡器 (VLO) 的 LPM3): 0.4µA (典型值)
  - 实时时钟 (RTC; LPM3.5): 0.25µA (典型值) <sup>(2)</sup>
  - 关断 (LPM4.5): 0.02µA (典型值)

<sup>(1)</sup> 最低电源电压受 SVS 电平限制。

<sup>(2)</sup> 实时时钟 (RTC) 由 3.7pF 晶振提供。

- 超低功耗铁电 RAM (FRAM)
  - 容量高达 64KB 的非易失性存储器
  - 超低功耗写入
  - 支持 125ns/字的快速写入 (4ms 内写入 64KB)
  - 统一标准存储器 = 程序 + 数据 + 存储都处于单个空间
  - 耐写次数达  $10^{15}$  次
  - 抗辐射和非磁性
- 智能数字外设
  - 32 位硬件乘法器 (MPY)
  - 三通道内部直接存储器访问 (DMA)
  - 带有日历和报警功能的 RTC
  - 5 个 16 位定时器, 每个定时器具有多达 7 个捕捉/比较寄存器
  - 16 位循环冗余校验器 (CRC)
- 高性能模拟
  - 16 通道模拟比较器
  - 12 位模数转换器 (ADC), 具有内部基准、采样保持功能以及多达 16 条外部输入通道
- 多功能 I/O 端口
  - 所有引脚都支持电容触控功能, 无需外部组件
  - 可按位、字节和字进行访问 (成对访问)
  - 所有端口均可从 LPM 进行边沿可选唤醒
  - 所有端口均具有可设定的上拉电阻或下拉电阻
- 代码安全性和加密
  - 128 位或 256 位高级加密标准 (AES) 安全加密和解密协处理器
  - 用于随机数生成算法的随机数种子
- 增强型串行通信
  - eUSCI\_A0 和 eUSCI\_A1 支持
    - 支持自动波特率检测的 UART
    - IrDA 编码和解码
    - 数据传输速率高达 10Mbps 的串行外设接口 (SPI)
  - eUSCI\_B0 支持
    - 支持多从器件寻址的 I<sup>2</sup>C
    - 数据传输速率高达 8Mbps 的 SPI
  - 硬件 UART 和 I<sup>2</sup>C 引导加载程序 (BSL)
- 灵活的时钟系统
  - 具有 10 个可选厂家调整频率的固定频率数控振荡器 (DCO)
  - 低功耗低频内部时钟源 (VLO)
  - 32kHz 晶振 (LFXT)
  - 高频晶振 (HFXT)

- 开发工具和软件
  - 采用 EnergyTrace++™ 技术的免费专业开发环境
  - 开发套件 ([MSP-TS430RGZ48C](#))
- 产品系列成员
- 如需获得完整的模块说明, 请参见《*MSP430FR58xx*、*MSP430FR59xx*、*MSP430FR68xx* 和 *MSP430FR69xx* 系列器件用户指南》(文献编号: [SLAU367](#))

### 3.1.4 LMR14030

LMR14030 器件是一款 40V、3.5A 降压稳压器，集成了一个高侧 MOSFET。凭借 4V 至 40V 宽输入电压范围，该器件适用于调节从工业到汽车等各类应用中的非稳压电源。该稳压器在休眠模式下的静态电流为 40 $\mu$ A，非常适合电池供电类系统。它在关断模式下具有 1 $\mu$ A 的超低电流，可进一步延长电池使用寿命。该稳压器的可调开关频率范围较宽，这使得效率或外部元件尺寸能够得到优化。内部环路补偿意味着用户不用承担设计环路补偿组件的枯燥工作。并且还能够以最大限度减少器件的外部元件数。精密使能输入简化了稳压器控制和系统电源排序。此外，该器件还内置多种保护功能：逐周期限流保护、应对功耗过大的热感测和热关断保护以及输出过压保护。

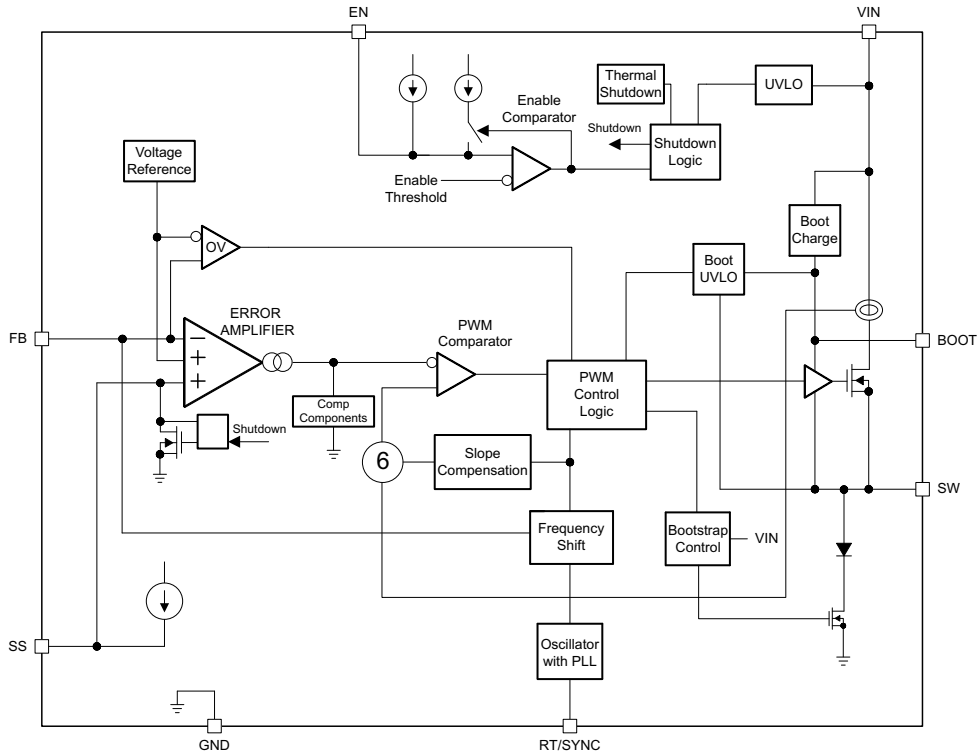


图 5. LMR14030 功能框图

特性:

- 4V 至 40V 输入范围
- 3.5A 持续输出电流
- 40 $\mu$ A 超低静态工作电流
- 90m $\Omega$  高侧金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)
- 最短导通时间: 75ns
- 电流模式控制
- 与外部时钟频率同步
- 可调节开关频率范围: 200kHz 至 2.5MHz
- 内置补偿功能, 便于使用
- 支持高占空比运行
- 精密使能输入
- 1 $\mu$ A 关断电流
- 外部软启动
- 过热保护、过压保护和短路保护
- 采用带 PowerPAD™ 的 8 引脚 HSOIC 封装

### 3.1.5 LMV344

LMV341、LMV342、LMV344 器件分别为单通道、双通道和四通道互补金属氧化物半导体 (CMOS) 运算放大器。这些器件均具备低电压、低功耗和轨到轨输出摆动功能。P 型金属氧化物半导体 (PMOS) 输入级具有 1pA (典型值) 超低输入偏置电流和 0.25mV (典型值) 偏移电压。单电源放大器专门针对低压 (2.7V 至 5V) 运行而设计, 其宽共模输入电压范围通常为“正电源轨电压 - 0.2V”至“正电源轨电压 + 0.8V”。此外, LMV341 (单通道) 还提供了可用于禁用器件的关断 (SHDN) 引脚。在关断模式下, 电源电流可降至 33nA (典型值)。其他功能包括 20nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  电压噪声 (10kHz 时)、1MHz 单位增益带宽、1V/ $\mu\text{s}$  转换率以及每通道 100 $\mu\text{A}$  的电流消耗。

LMV341 提供 SOT-23 封装和较小的 SC-70 封装, 适用于大多数空间受限类应用。LMV342 双通道器件采用标准的 SOIC 和 MSOP 封装。这些器件可在 -40°C 至 125°C 的扩展工业温度范围内运行, 适用于各种商业和工业环境。

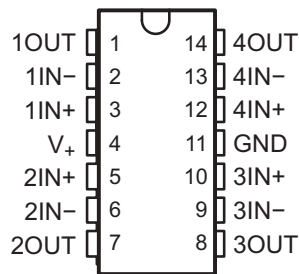


图 6. LMV344 器件配置

特性:

- 2.7V 和 5V 性能
- 轨到轨输出摆幅
- 输入偏置电流: 1pA (典型值)
- 输入偏移电压: 0.25mV (典型值)
- 低电源电流: 100 $\mu\text{A}$  (典型值)
- 低关断电流: 45pA (典型值)
- 增益带宽: 1MHz (典型值)
- 转换率: 1V/ $\mu\text{s}$  (典型值)
- 从关断到导通的时间: 5 $\mu\text{s}$  (典型值)
- 输入相关电压噪声 (频率为 10kHz 时): 20nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- 静电放电 (ESD) 保护性能超过 JESD 22 规范要求:
  - 2000V 人体模型 (A114-A)
  - 200V 机器模型 (A115-A)

### 3.1.6 CSD15571Q2

NexFET™ 功率 MOSFET 旨在最大限度地降低功率转换和负载管理应用中的 损耗。其采用的 2mm × 2mm SON 封装具有出色的散热性能。

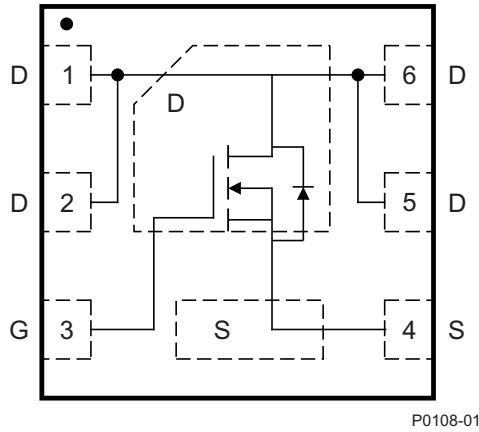


图 7. CSD15571Q2 器件配置

特性:

- 超低  $Q_g$  和  $Q_{gd}$
- 低热阻
- 雪崩级
- 无铅引脚镀层
- 符合 RoHS
- 无卤素
- SON 2mm × 2mm 塑料封装



### 3.1.7 TPD1E10B06

TPD1E10B06 器件是一款采用小型 0402 封装的单通道 ESD TVS 二极管。这款 TVS 保护产品提供  $\pm 30\text{kV}$  接触 ESD 和  $\pm 30\text{kV}$  IEC 气隙保护，并具有一个带背靠背 TVS 二极管的 ESD 钳位电路，用于支持双极或双向信号。该 ESD 保护二极管的线路电容为 12pF，适用于支持数据传输速率高达 400Mbps 应用。0402 封装符合行业标准，便于将元件安装到空间受限型应用。

ESD 保护产品的典型应用是为音频线路（麦克风、耳机和扬声器）、SD 接口、键盘或其他按钮、USB 端口的 VBUS 引脚和 ID 引脚以及通用 I/O 端口等提供电路保护。该 ESD 钳位有利于为电子书、平板电脑、远程控制器、可穿戴设备、机顶盒以及电子销售点等终端设备提供保护。



图 8. TPD1E10B06 功能框图

特性：

- 可为低压 I/O 接口提供系统级静电放电 (ESD) 保护。
- IEC 61000-4-2 4 级
  - >  $\pm 30\text{kV}$  (气隙放电)
  - >  $\pm 30\text{kV}$  (接触放电)
- IEC 61000-4-5 (浪涌) : 6A (8/20 $\mu\text{s}$ )
- I/O 电容: 12pF (典型值)
- $R_{\text{DYN}}$ : 0.4 $\Omega$  (典型值)
- 直流击穿电压:  $\pm 6\text{V}$  (最小值)
- 超低泄漏电流: 100nA (最大值)
- 钳位电压: 10V ( $I_{\text{pp}} = 1\text{A}$  时的最大值)
- 工业温度范围:  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $125^{\circ}\text{C}$
- 采用节省空间的 0402 封装 (1 × 0.6 × 0.5mm)

### 3.1.8 TPD6F003

TPDxF003 系列属于高集成度器件，旨在为所有遭受 EMI 的系统提供 EMI 滤波。该系列滤波器还配有 TVS 二极管电路以提供 ESD 保护，从而保证应用在承受远远超过 IEC 61000-4-2（4 级）ESD 应力的情况下完好无损。

TPDxF003 系列的额定工作温度范围为  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $85^{\circ}\text{C}$ 。此外，该系列滤波器还采用节省空间的 0.4mm 间距 DQD 封装。

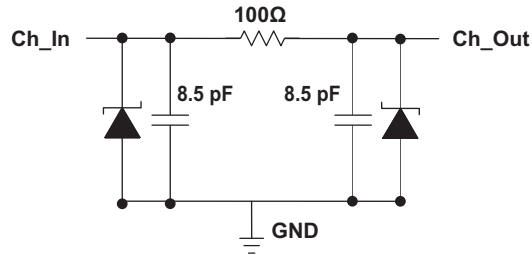


图 9. TPD6F003 功能框图

特性：

- 可为数据端口提供四通道、六通道和八通道 EMI 滤波
- -3dB 带宽为 200MHz
- 1GHz 频率下的衰减大于 25dB
- IEC 61000-4-2 4 级 ESD 保护：
  - $\pm 12\text{kV}$  接触放电
  - $\pm 20\text{kV}$  气隙放电
- Pi 型 (C-R-C) 滤波器配置  
( $R = 100\Omega$ ,  $C_{\text{TOTAL}} = 17\text{pF}$ )
- 泄漏电流低至 10nA
- 简易直通布线

## 4 系统设计理论与注意事项

TI 压电扬声器频闪灯通知参考设计演示了一套可为报警终端设备系统提供视觉和声音通知的低功耗集成方案。DRV2700 工业压电驱动器用于驱动已针对声音警报通知系统进行优化的压电传感器。LM3550 闪光灯 LED 驱动器用于驱动高电流 LED，同时在闪光灯模式下保持恒定的输入电流。MSP430FR5969 超低功耗 MCU 控制该系统并实现视觉和声音通知子系统的效果演示。

### 4.1 声音通知子系统设计理论

#### 4.1.1 压电传感器设计理论

为了以具有成本效益的方式满足声音通知子系统的最新要求，压电传感器的选择至关重要。

对于该 TI 设计，主要有两种警报音：520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波。这两种信号频率是比较常见的警报频率，特别是在火灾报警终端设备系统中。因此，采用的压电传感器在这些所需的警报音处必须具有谐振频率，从而提高功率效率和 SPL 输出。

借助在约 2.7kHz 频率时达到谐振峰值的压电弯片与在 520Hz 频率时发生共振的亥姆霍兹室，PUI Audio 公司的 AB5027B-3-LW100-R 压电弯片符合该 TI 设计的规范。

此外，PUI Audio 公司的传感器具有低电容（约 40nF）的特性，能够满足压电驱动器的低功耗需求。此外，选定的传感器还可在较高的峰峰值频率 (120 V<sub>PP</sub>) 下运行，因此能够输出多种警报音以及预录语音通知。

#### 4.1.2 高电压压电驱动器设计理论

基于对 PUI Audio 公司的 AB5027B-3-LW100-R 压电弯片的选择，要对来自 MSP430FR5969 器件的经滤波 PWM 信号进行放大，DRV2700 工业压电驱动器是比较理想的选择。DRV2700 可在 120 V<sub>PP</sub> 下轻松驱动选定的传感器（频率高达 4kHz），同时还能保持在指定的工作范围内。DRV2700 器件与 PUI Audio 传感器搭配使用，能够在所需的警报频率下以最大限度提高 SPL 输出。

DRV2700 器件是一款集成有高压升压转换器的高压放大器。升压转换器为放大器提供高压电源轨，在本 TI 参考设计中经过配置以不同方式驱动压电传感器。

本 TI 参考设计将 DRV2700 器件的升压电压设定为 65V，这是针对 60V 输出峰值电压或 120V<sub>PP</sub> 的推荐设置。由于本 TI 参考设计用于在 120 V<sub>PP</sub> 的最大电压下驱动压电传感器，并且 DRV2700 器件的最大增益设置为 40.7dB 或 108.4V/V，DRV2700 器件输入引脚允许的最大输入电压可通过公式 1 计算：

$$\text{Maximum Input Voltage} = \frac{120 \text{ V}_{PP}}{108.4} = 1.107 \text{ V}_{PP} \quad (1)$$

因此，为防止 DRV2700 器件输出发生削波，节 4.1.3 中所述的 PWM 信号调节电路的输出电压不得高于 1.107 V<sub>PP</sub>。由于终端设备系统通常并不注重音频保真度而是关注总 SPL 输出，因此输出信号中存在一些削波也是可以接受的。

DRV2700 电路中其余所有组件的选型根据 [www.ti.com](http://www.ti.com) (SLOS861) 上相应器件数据表中所述的设计流程来完成。

### 4.1.3 PWM 信号调节设计理论

本 TI 参考设计使用 MSP430FR5969 系统 MCU 中的脉宽调制 (PWM) 输出生成音频信号。生成的信号有以下几种：520Hz 方波、2.84kHz 正弦波、预录语音输出和白噪声。

520Hz 方波通过使用 Timer\_B 模块直接输出 50% 占空比的 520Hz PWM 信号来生成。2.84kHz 正弦波、预录语音输出和白噪声信号通过使用 32kHz 的 PWM 信号并根据需要修改 PWM 占空比来生成。预录语音文件的采样率为 8ksps，这意味着最大原始信号带宽为 4kHz。

为使 DRV2700 器件处于指定工作限值范围内，从而与所选压电传感器搭配使用，需要消除频率高于 4kHz 的所有内容。此外，为避免 DRV2700 器件输出发生削波，需要确保 DRV2700 的最高输入电压为  $1.107 V_{PP}$ 。

实现了一种两级方法，确保符合这两项设计要求。MSP430FR5969 PWM 输出的峰峰值电压为  $V_{DD} - GND$ ，由于本 TI 参考设计的  $V_{DD} = 3.3V$ ，因此使用分压器和运算放大器缓冲器将 PWM 输出降至约  $1.1 V_{PP}$ 。为了确保没有频率高于 4kHz 的内容到达 DRV2700 器件，将分压后的 PWM 输出传送至使用两个截止频率为 4kHz 的运算放大器的 3 极点巴特沃斯低通滤波器 (LPF)。该 LPF 通过 WEBENCH 设计工具设计而成，整个 PWM 信号调节电路则使用 TINA-TI 进行仿真。

针对 PWM 信号调节电路进行仿真的 TINA-TI 电路如图 10 所示。

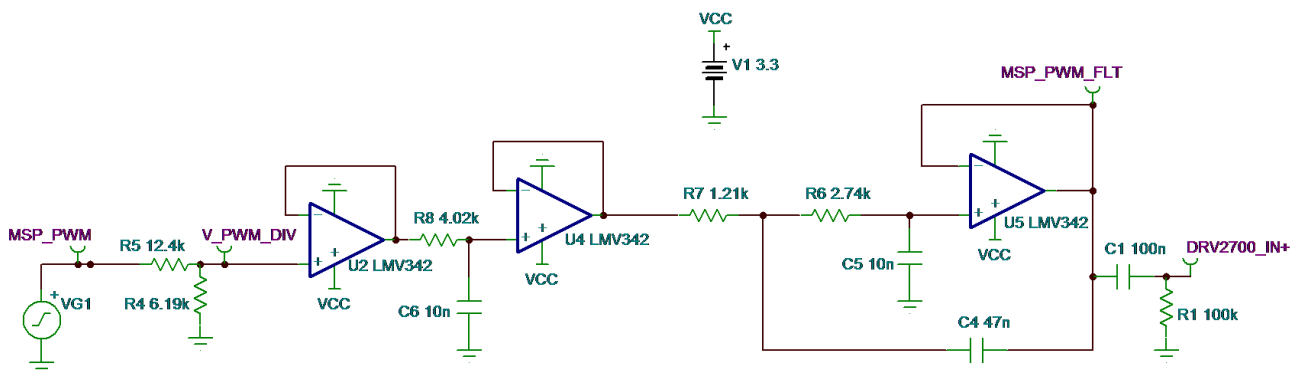


图 10. TINA 仿真电路

为验证 PWM 信号调节电路的频率响应，生成了交流传输特性。仿真结果如图 11 所示。该响应在低频下存在轻微衰减，原因是 DRV2700 器件 IN+ 引脚上的输入电容结合了同一器件的输入阻抗。低通滤波器的 3dB 频率为 4kHz。

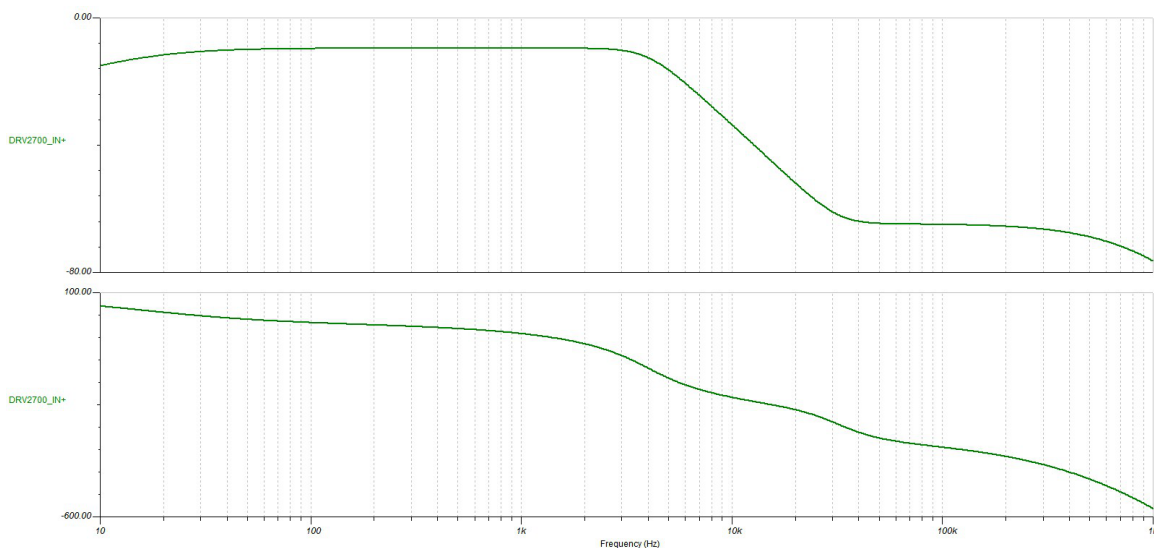


图 11. TINA-TI 仿真结果 — 交流传输特性仿真

520Hz PWM 输入和叠加 2.84kHz 正弦波的 32kHz PWM 的 TINA-TI 瞬态仿真结果如 图 12 和图 13 所示。这两个仿真结果显示了原始输入信号以及随后馈入 DRV2700 器件高电压放大器的最终输出信号。

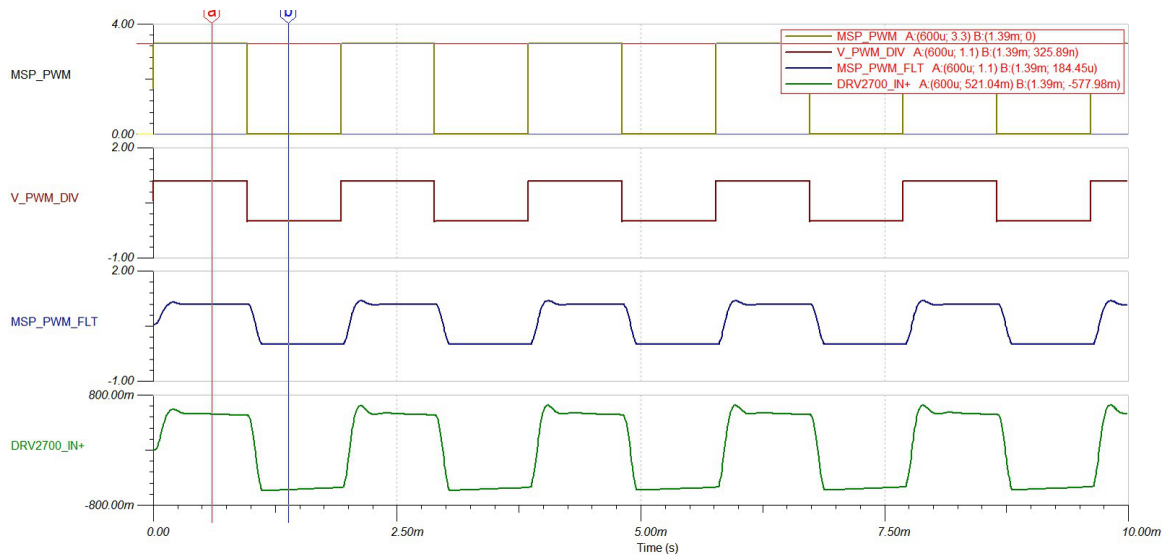


图 12. TINA-TI 仿真结果 — 输入 520Hz 方波的瞬态仿真

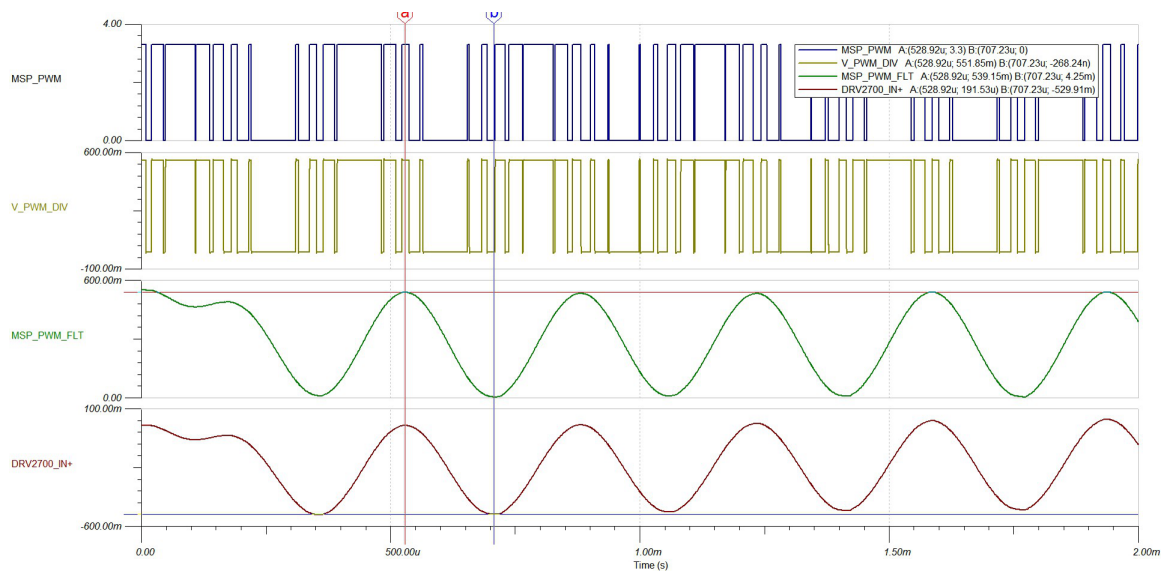


图 13. TINA-TI 仿真结果 — 输入 2.84kHz 正弦波的瞬态仿真

#### 4.1.4 适用的 NFPA 法规要求

NFPA 72 国家火警和信号规范的多个章节涉及声音通知子系统。第 18 章，第 4 节介绍了针对火警应用中声音通知器件的所有要求。

本 TI 参考设计符合 NFPA 72 规范中的以下几项主要工程规范，现总结如下：

- 最短听闻距离下的最大总 SPL 为 110dBA
- 在地面以上 5 英尺 (1.5m) 测得的 SPL 至少高于环境 15dBA
- 睡眠区的声音报警信号必须为方波，基频为 520Hz  $\pm$ 10%
- 预录消息应具有语音清晰度，但应无需通过量化测量来确定

6.2 节 所示为声音通知子系统测试结果，证明了本 TI 参考设计符合 NFPA 72 规范列出的最低标准。

## 4.2 视觉通知子系统设计原理

为了符合针对视觉通知器件的要求，高电流 LED 和闪光灯 LED 驱动器的选择至关重要。

### 4.2.1 LED 设计原理

该应用中高电流 LED 的主要选择参数是光照强度（单位：坎德拉），其定义为每个单位立体角的光功率。

为了首先估算所需 LED 数量和 LED 电流幅值，需要查看 LED 制造商数据表中的相对光通量曲线。在本参考设计所用欧司朗 LED 的数据表中，2A 下的光通量增益约为 700mA 下输出光通量的 2.1 倍。根据该信息以及 Brightness Group 关于此 LED 的信息，可确定该 LED 在 700mA 下的典型光照强度为 79cd。将在 2A 下实现的 2.1 倍增益施加于 700mA 下的典型光照强度会导致单个 LED 在

2A 下的光强为 158cd。为确保本 TI 参考设计符合 NFPA 72 标准中的 185cd 光源要求，选择在 2A 电流下并行驱动两个 LED。由于本参考设计依赖 LED 自身的辐射特性且不额外使用光学器件，因此目标典型值为 320cd 的较大总光照强度有助于确保在工作角度增大后仍然符合 NFPA 法规要求。

### 4.2.2 LED 驱动器设计原理

为实现 4A LED 总电流，必须使用存储和放电方法，原因是多数系统将不允许幅值为 4A 的峰值浪涌电流在任何给定时间下拉。为最大限度降低峰值电流损耗，本 TI 参考设计将超级电容与 LM3550 充电器和闪光控制器搭配使用。在充电阶段，LM3550 使用输入电流受限的多增益开关电容升压转换器对超级电容充电，使其达到目标电压。本参考设计中选用 5.3V，以最大限度提升可用能量。充电后，LM3550 的电流源控制器通过调节外部 N 沟道 FET 的栅极驱动控制流经 LED 的电流并监测串联电流设置电阻的电压。脉冲时序可通过外部频闪灯引脚或内部 I<sup>2</sup>C 寄存器设置进行控制。为了增加流经两 LED 的电流精度，使用两组相同的反馈电阻和灌电流 FET，但仅有一个反馈节点连接回到器件。该方法将 LED 电流稳定至可接受水平并最大限度降低单个离散 N 沟道 FET 产生的功耗。



### 4.2.3 超级电容和驱动器设计原理

为了支持 4A 闪光电流并确保在时长为 1 秒的闪光脉冲周期内针对超级电容正确进行再充电，选择正确电容值至关重要。如果电容过低，则将再次快速充电，但可能无法在目标闪光脉冲持续时间内支持完整 LED 电流。如果电容过大，其物理尺寸可能不够理想并且不具备成本效益。选择电容时，应在确定电容值前首先了解各项参数，例如目标电流、脉冲持续时间、可用电容值及电容的相关等效串联电阻 (ESR)。

在启动期间，假设超级电容在 LM3550 转换过程中通过多种电压增益完全放电，从而使电容在充电后达到目标电压。作为器件转换增益，充电电流将随电压比发生变化。如果电容较大，则将耗费更长时间来完成初始充电。

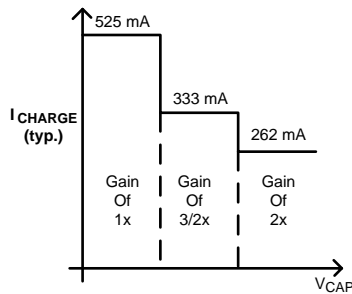


图 14. LM3550 充电电流曲线

充电后，必须计算闪光期间所容许的电容下降量。

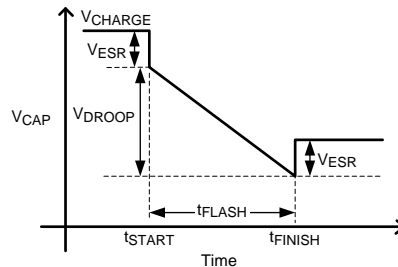


图 15. LM3550 超级电容电压与时间的关系

从充电后的超级电容获取恒定负载电流时，电容的电压将发生变化。电容 ESR 和电容均会影响放电曲线。在闪光开始阶段 ( $t_{\text{START}}$ )，超级电容的电压将因其 ESR 而下降。下降幅度等于闪光电流 ( $I_{\text{FLASH}}$ ) 与 ESR ( $R_{\text{ESR}}$ ) 的乘积。

$$V_{\text{ESR}} = I_{\text{FLASH}} \times R_{\text{ESR}} \quad (2)$$

产生初始压降 ( $V_{\text{ESR}}$ ) 后，超级电容电压将在闪光结束前 ( $t_{\text{FINISH}}$ ) 以恒定速率衰减。闪光事件过程中的压降 ( $V_{\text{DROOP}}$ ) 等于闪光电流 ( $I_{\text{FLASH}}$ ) 与闪光持续时间 ( $t_{\text{FLASH}}$ ) 的乘积除以超级电容值 ( $C_{\text{SC}}$ )。

$$V_{\text{DROOP}} = \frac{(I_{\text{FLASH}} \times t_{\text{FLASH}})}{C_{\text{SC}}} \quad (3)$$

闪光事件结束后，由于没有电流流经超级电容的 ESR，超级电容的电压将增大。升值  $V_{\text{ESR}} = I_{\text{FLASH}} \times R_{\text{ESR}}$ 。

为了保持外部电流源的稳压状态，

$$V_{\text{DROOP}} < V_{\text{CHARGE}} - V_{\text{ESR}} - V_{\text{LED}} - (I_{\text{FLASH}} \times R_{\text{DSONNFET}}) - V_{\text{FB}} \quad (4)$$

将上述公式代入  $V_{\text{DROOP}}$  并针对  $C_{\text{SC}}$  求解公式 5:

$$C_{\text{SC}} > \frac{(I_{\text{FLASH}} \times t_{\text{FLASH}})}{\left( V_{\text{CHARGE}} - V_{\text{LED}} - (R_{\text{ESR}} \times I_{\text{FLASH}}) - V_{\text{FB}} - \left( \frac{(I_{\text{FLASH}} \times R_{\text{DSON}})}{\text{Number LEDs}} \right) \right)} \quad (5)$$

在本 TI 参考设计中， $I_{\text{FLASH}} = 4\text{A}$ ， $t_{\text{FLASH}} = 16\text{ms}$ ， $R_{\text{SDON}} = 16\text{m}\Omega$ ， $V_{\text{LED}} = 3.3\text{V}$ ， $V_{\text{CHARGE}} = 5.3\text{V}$ ， $V_{\text{FB}} = 100\text{mV}$ 。使用本 TI 参考设计所用 Murata 超级电容的规范时， $R_{\text{ESR}} = 50\text{m}\Omega$ 。

$C_{\text{SC}}$  需要大于 38mF，以实现 16ms 闪光。如果  $t_{\text{FLASH}}$  增至 100ms， $C_{\text{SC}}$  应等于 240mF。根据上述结果，选择 Murata 470mF (DMF3Z5R5H474M3DTA0, [www.murata.com](http://www.murata.com)) 超级电容实现闪光持续时间调节能力。

#### 4.2.4 适用的 NFPA 法规要求

NFPA 72 国家火警和信号规范的多个章节涉及视觉通知子系统。第 18 章，第 5 节介绍了针对火警应用中视觉通知器件的所有要求。

本 TI 参考设计符合 NFPA 72 规范中的以下几项主要工程规范，现总结如下：

- 闪光速率范围：1Hz 至 2Hz
- 最长闪光脉冲持续时间：200 毫秒
- 最大闪光脉冲占空比：40%
- 闪光灯颜色清晰或以白色为常规颜色，最大有效光照强度为 1000 坎德拉
- 安装于天花板时，70 × 70 英尺 (21.3m × 21.3m) 房间的有效光照强度不得低于 185 坎德拉
  - 或者光输出不得低于 0.0375 流明/ft<sup>2</sup> (0.4036 流明/m<sup>2</sup>)

6.3 节 所示为视觉通知子系统测试结果，证明了本 TI 参考设计符合 NFPA 72 规范列出的最低标准。

### 4.3 固件控制

本 TI 参考设计的固件基于 **TI-RTOS**，这是一款适用于 TI 器件的实时操作系统。本 TI 参考设计的第一作者选择 **TI-RTOS** 作为固件平台，旨在获得有关 **RTOS** 基本原理的经验。使用 **TI-RTOS** 缩短了固件开发时间。

该程序主要用于演示视觉和声音通知子系统。因此，主界面由三枚用户按钮组成。

**BTN\_LED** 控制视觉通知子系统的演示模式。在系统上电过程中，视觉通知模式设为“充电模式”。每次按下 **BTN\_LED**，系统将在以下模式之间循环运行：

- 充电模式
- 手电筒模式
- 闪光灯模式

充电模式命令 **LM3550** 器件对超级电容充电，使其电压达到预定义值 **5.3V** 并保持充电状态。

手电筒模式命令 **LM3550** 器件进入手电筒模式，在低电流模式下为两 **LED** 供电，当前设置为 **100mA**。该模式可旁路外部 **FET** 并使 **LED** 电流完全流经 **LM3550** 器件。

闪光灯模式命令 **LM3550** 器件在 **1Hz** 频率下触发闪光事件。这是 **LM3550** 器件的主模式，可控制外部 **FET** 传输由超级电容流经两 **LED** 的高电流脉冲。

**BTN\_GAIN** 控制声音通知子系统的音量。按下 **BTN\_GAIN** 后，**DRV2700** 器件将在四种增益设置之间循环：**28.8dB**、**34.8dB**、**38.4dB** 和 **40.7dB**。在系统上电过程中，**DRV2700** 器件的增益设置为最低音量设置 **28.8dB**。

BTN\_AUDIO 控制声音通知子系统的演示模式。按下 BTN\_AUDIO 将在以下模式间循环：

- 无音频输出
- 520Hz 方波输出
- 2.84kHz 正弦波输出
- 预录语音文件输出
- 白噪声输出

无音频输出模式可确保 MSP\_PWM 引脚不产生任何 PWM 信号，还可确保禁用 DRV2700 器件，从而最大限度节约能耗。

520Hz 方波输出模式将 MSP\_PWM（连接至 Timer\_B0, CCR1）设置为生成 520Hz 方波。将 Timer\_B 模块配置为生成 520Hz 方波后，继续该模式不再需要其他固件的干预。

2.84kHz 正弦波输出模式将 MSP\_PWM 设置为生成 2.84kHz 正弦波。Timer\_B 模块的 PWM 频率配置为 32kHz，占空比以正弦方式变化。

预录语音文件输出模式也将 Timer\_B 模块的 PWM 频率设置为 32kHz。然而，占空比不以正弦方式变化，而是通过读取预录语音文件中的 16 进制值发生变化，该文件在 MSP430FR5969 器件的非易失性存储器中进行预编程。预录语音文件的内容为第一作者的语音“Hello, Texas Instruments”。预录语音文件将在该模式下循环播放，直到所选模式发生变化。

白噪声输出模式将 Timer\_B 模块的 PWM 频率设置为 32kHz。使用伽罗华线性反馈移位寄存器算法在每个 PWM 周期内将伪随机占空比值馈入 Timer\_B 模块。这会产生伪白噪声的音频输出。该输出用于生成系统级音频频率响应测试数据。

整个固件使用硬件中断 (Hwis) 的标准 TI-RTOS 对象、任务、信号量和时钟。查看 [Code Composer Studio™ \(CCS\)](#) 中 TI 参考设计固件的 .cfg 文件可轻松评估系统级固件结构。

## 5 使用入门

### 5.1 硬件概览

TI 压电扬声器频闪灯通知参考设计硬件如图 16 所示。该 PCB 的外形为 3.45 × 4.0 英寸矩形，配有 0.5 英寸尼龙支架，以确保执行实验测量过程中的稳定性和易用性。

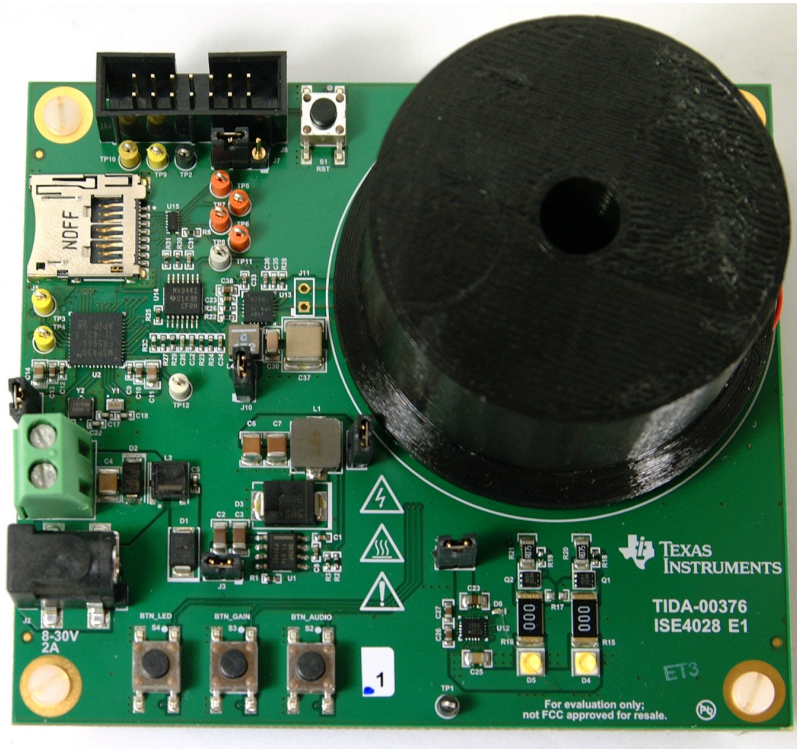


图 16. 压电扬声器频闪灯通知参考设计硬件

所有主要集成电路（DRV2700、LM3550、MSP430FR5969、LMV344 和 LMR14030）均位于 PCB 顶侧。超级电容及若干无源组件焊接到 PCB 背面。

切换 TI 参考设计多种演示模式的三枚用户按钮位于 PCB 左下边缘。



## 5.2 加载固件

本 TI 参考设计所用固件通过 CCS 版本 6.1.0 进行开发。该固件基于 TI-RTOS 版本 2.12.01.33 进行构建。为了针对本 TI 参考设计的硬件进行编程或调试，如果由外部电源供电，请使用跳线短接 J7 的引脚 2-3。如果运行 EnergyTrace™ 或基于其他原因使用调试器为 MCU 供电，请使用跳线短接 J7 的引脚 1-2 并使 J6 处于开路状态。应短接其他所有双引脚跳线（J1、J3、J9 和 J10）以确保正常运行。

根据连接器可用性，使用 J2 或 J4 提供的 24V 电压为电路板供电。

注： 请参见图 17 了解正确设置 TI 设计硬件编程或调试的指导图。

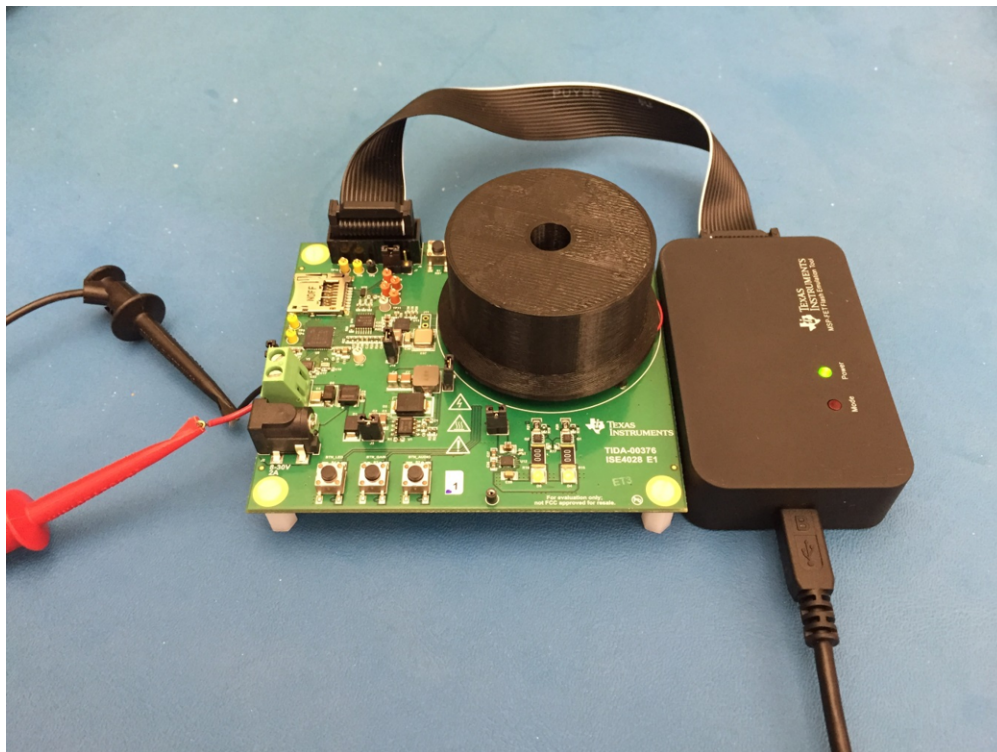


图 17. 跳线配置和编程及调试供电

使用 14 引脚 JTAG 带状电缆将 J8 与 MSP-FET MSP430 闪存仿真工具相连，通过 CCS 针对 TI 参考设计硬件进行编程。

## 5.3 演示 TI 参考设计硬件

如 4.3 节所述，TI 参考设计硬件通过使用三枚用户按钮进行演示。为了演示 TI 参考设计，需要根据连接器可用性为 J2 或 J4 提供 24V 直流电压。

在默认情况下，TI 参考设计硬件以最低音频音量设置启动，无音频播放和直观指示。按下 BTN\_LED、BTN\_GAIN 和 BTN\_AUDIO 将在 TI 参考设计的各演示模式之间循环，如 4.3 节所述。

## 6 测试数据

---

注：除非另有说明，后文中的测试数据均为系统在室温下测得的数据。

---

注：本节所有测量结果都是使用校准过的实验设备测得的。

---

### 6.1 概述

TI 压电扬声器频闪灯通知参考设计的特性是用途广泛，包括声音通知性能、视觉通知性能和功耗。测试结果和测量特性在后文介绍。

### 6.2 声音通知性能

由于本 TI 参考设计的两个主要用途之一是支持警报终端设备系统发出声音通知，因此声音性能对于本参考设计至关重要。

如 4.1 节所述，本 TI 参考设计旨在生成以下音频输出信号：

520Hz 方波、2.84kHz 正弦波、预录语音和白噪声。520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波视为警报音，其 SPL 必须至少超出环境 SPL 15dBA，以符合 NFPA 72 法规要求。但是，环境 SPL 根据通知器件的安装环境有所不同。因此，本 TI 参考设计的目标是尽可能实现最高 SPL。

为了完全说明声音通知性能的特性，收集了以下测试数据：

- PWM 信号调节电路的交流传输特性
- PWM 信号调节电路针对 520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波的瞬态响应
- 使用 MCU 生成的白噪声作为音频源的总体声音频率响应
- 使用 MCU 生成的警报音（520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波）的声音频率响应
- 520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波警报音的总 SPL
- 预录语音输出语音清晰度评估



### 6.2.1 PWM 信号调节性能

为了验证 PWM 信号调节电路是否按照预期工作，执行了多项测试。第一项测试是 10Hz 至 20kHz 交流传输特性的生成。移除了 MSP430FR5969 器件和 MSP\_PWM 网络之间的  $0\Omega$  跳线电阻并原位连接跳线。将惠普 (Keysight, <http://www.keysight.com>) 33120A 函数和任意波形发生器与 MSP\_PWM 网络相连并配置为输出直流分量为 1.65V ( $3.3V / 2$ ) 且峰峰值电压为 3.3V 的正弦波。信号发生器的信号频率随后配置为 10Hz。使用 LeCroy (<http://www.teledynelecroy.com>) WaveJet 354A 500MHz 示波器记录 MSP\_PWM 和 MSP\_PWM\_FLT 测试点的峰峰值电压。频率提升至 20kHz，记录各步骤的输入和输出电压。交流传输特性结果如图 18 所示。根据仿真预测结果，3dB 对应的截止频率为 4kHz，交流传输特性每十倍频下降 60dB。

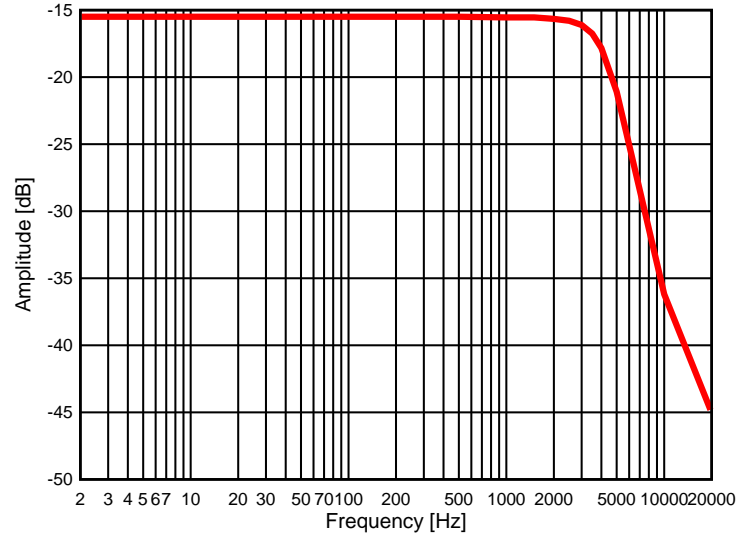


图 18. PWM 信号调节电路交流传输特性

第二项测试旨在验证器件是否正常工作，测试对象为 PWM 信号调节电路针对 520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波输入信号的瞬态响应。该电路针对 520Hz 方波的瞬态响应如图 19 所示。方波输出发生一定失真。原因是 LPF 的截止频率为 4kHz，这意味着方波的高频谐波大幅降低，进而导致失真。然而，对于声音通知应用，由于其主要目标是发出响亮警报音，因此该失真可以接受。

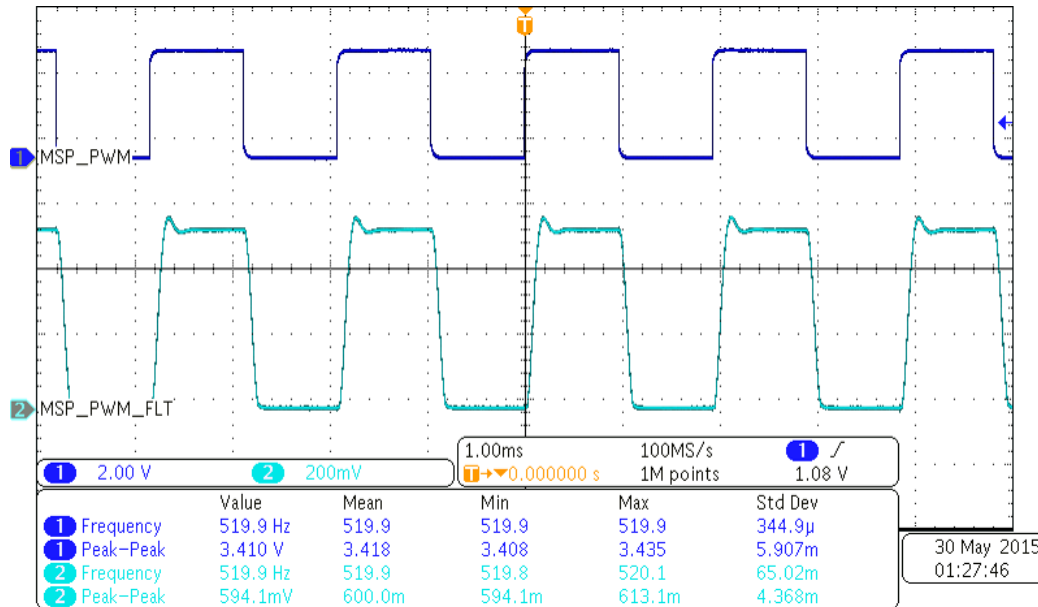


图 19. PWM 信号调节电路瞬态响应 — 520Hz 方波输入

该电路针对 32kHz PWM 信号叠加的 2.84kHz 正弦波响应如图 20 所示。

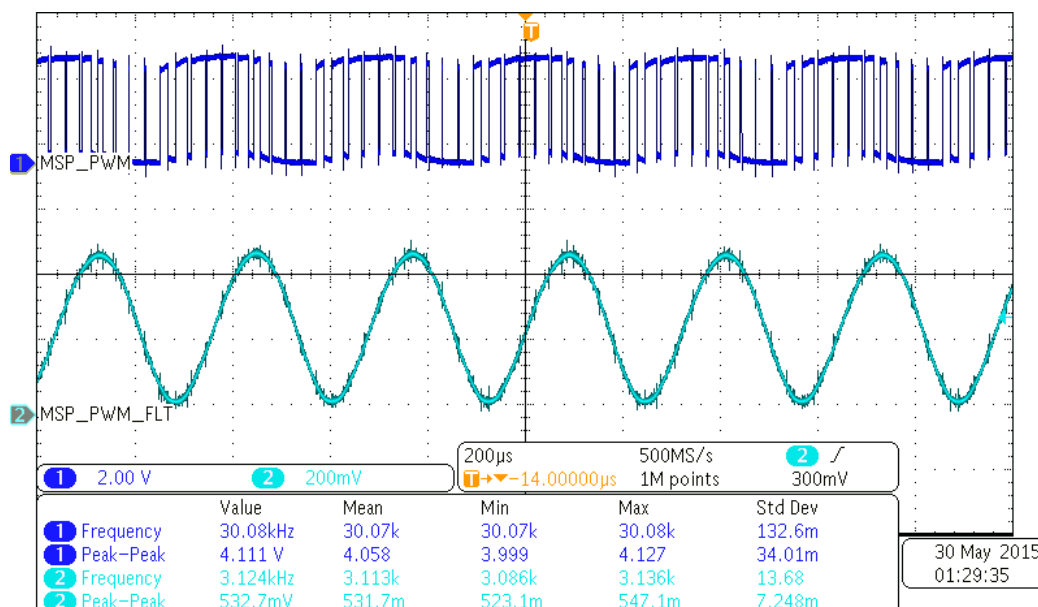


图 20. PWM 信号调节电路瞬态响应 — 2.84kHz 正弦波输入

## 6.2.2 声音频率响应

为了正确评估整个 TI 参考设计系统的声音性能，记录了系统针对白噪声信号源的总体频率响应。该频率响应的作用是识别压电传感器中出现的谐振峰。确定谐振峰所处频率可确保警报音尽可能高效地工作。

白噪声源通过以伪随机方式改变 MSP430FR5969 器件传输的 32kHz PWM 信号的占空比生成。更多详细信息，请参见 4.3 节。将 Brüel & Kjær (<http://www.bksv.com/>) 4191 ½ 英寸自由场麦克风与 Listen (<https://www.listeninc.com>) 的 SoundCheck® 系统结合使用，测量本 TI 参考设计在音频试验箱内的总系统频率响应。

声音频率响应和 SPL 测量的测试装置如图 21 所示。

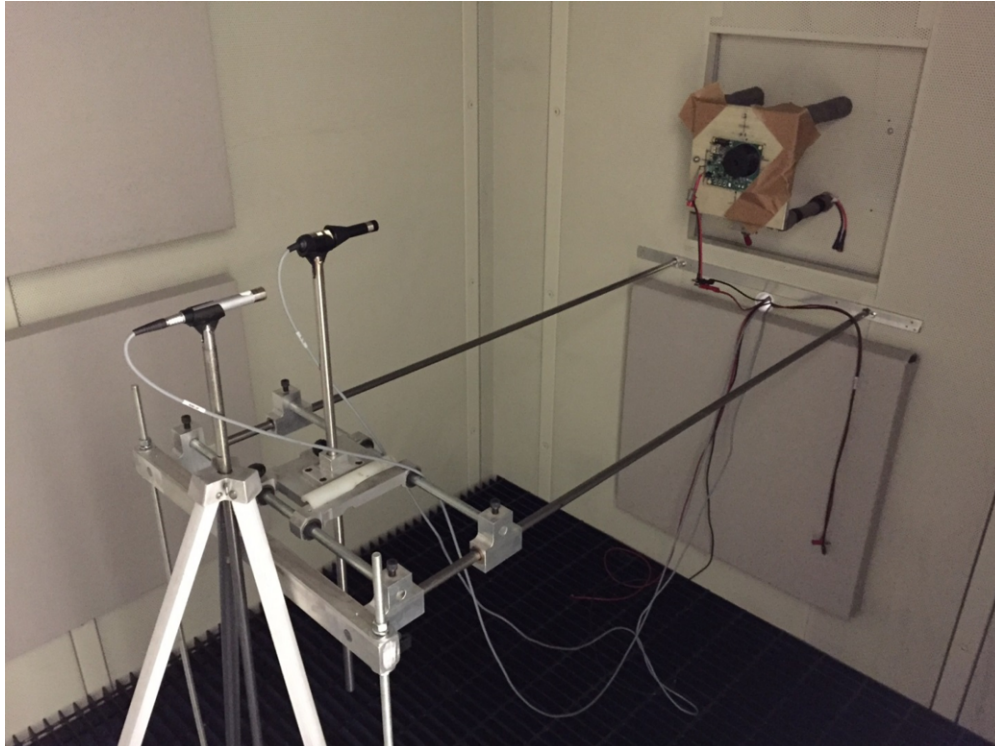


图 21. 总声音频率响应测试装置

总系统频率响应如图 22 所示。520Hz 和 2.7kHz 频率附近出现明显谐振峰。向压电传感器馈入 520Hz 方波信号和 2.84kHz 正弦波信号时，这些谐振峰可确保生成最高 SPL。亥姆霍兹试验箱的设计导致 520Hz 处出现谐振峰，而

2.7kHz 处产生谐振峰的原因是压电弯片在该频率下发生固有谐振。

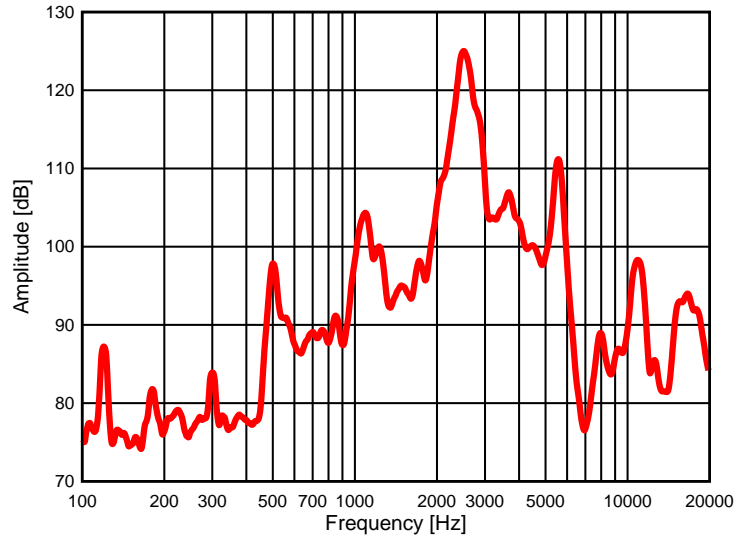


图 22. 总声音频率响应 — 白噪声输入

当 520Hz 方波和

2.84kHz 正弦波警报音处于激活状态时，同样测量了总系统频率响应。测试结果如图 23 和图 24 所示。根据预期结果，警报音的基频和相应谐波中均存在频率峰值。

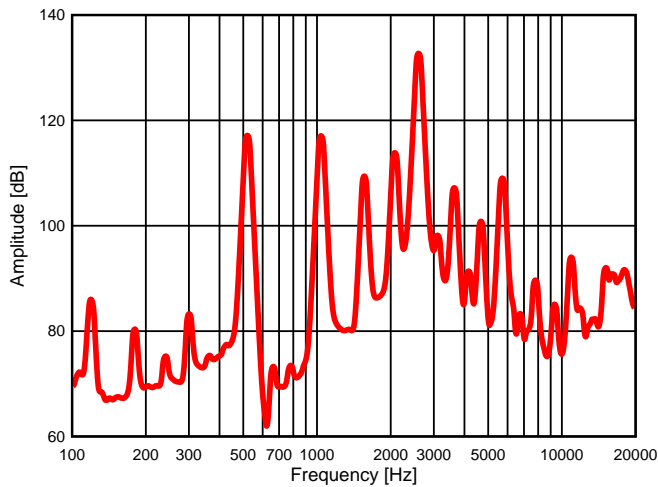


图 23. 总声音频率响应 — 520Hz 方波输入

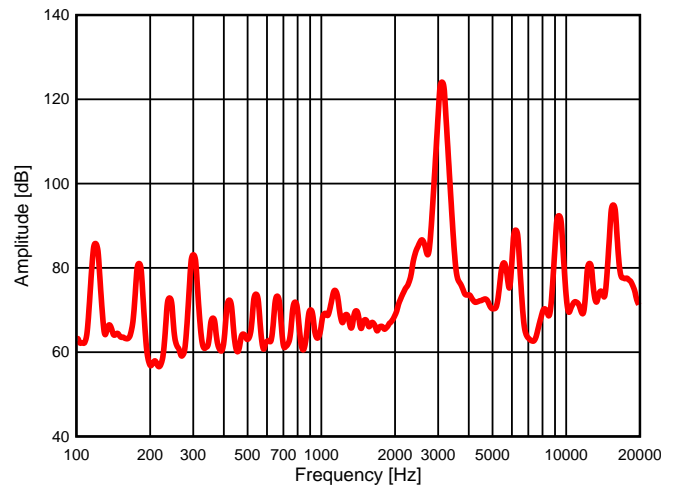


图 24. 总声音频率响应 — 2.84kHz 正弦波输入

### 6.2.3 声压等级 (SPL) 特性

在音频试验箱内使用 Brüel & Kjær 2237 声压计和 4137 麦克风，针对 520Hz 方波和 2.84kHz 正弦波警报音以及预录语音输出的总声压等级进行了测量。将麦克风放置于距离 TI 参考设计硬件 10cm 处，以减少声音反射所导致的意外测量误差。

以上测量结果如表 2、表 3 和表 4 所示。根据监听距离加倍后，SPL 下降 6dB 的原理计算 3m 距离所对应的 SPL。确定 3m 距离所对应 SPL 的公式如下所示：

$$\text{SPL @ 3 m} = \text{SPL @ 0.1 m} - \left| 20 \times \log_{10} \frac{0.1 \text{ m}}{3 \text{ m}} \right| \quad (6)$$

表 2. SPL 测试结果 — 520Hz 方波信号

	SPL @ 10cm (dBA)	计算得出的 SPL @ 3m (dBA)
DRV2700 增益 = 28.8dB	102.0	72.5
DRV2700 增益 = 34.8dB	108.4	78.9
DRV2700 增益 = 38.4dB	113.6	84.1
DRV2700 增益 = 40.7dB	116.0	86.5

表 3. SPL 测试结果 — 2.84kHz 正弦波信号

	SPL @ 10cm (dBA)	计算得出的 SPL @ 3m (dBA)
DRV2700 增益 = 28.8dB	100.5	71.0
DRV2700 增益 = 34.8dB	106.3	76.8
DRV2700 增益 = 38.4dB	107.9	78.4
DRV2700 增益 = 40.7dB	110.0	80.5

表 4. SPL 测试结果 — 预录语音信号

	SPL @ 10cm (dBA)	计算得出的 SPL @ 3m (dBA)
DRV2700 增益 = 28.8dB	94.0	64.5
DRV2700 增益 = 34.8dB	100.0	70.5
DRV2700 增益 = 38.4dB	104.0	74.5
DRV2700 增益 = 40.7dB	107.0	77.5

### 6.2.4 预录语音播放性能

TI 参考设计硬件针对语音文件进行了预编程，内容为第一作者的语音“Hello, Texas Instruments”。这一语音文件将在该模式下自动循环播放。针对语音清晰度不进行定量测量，但在语音输出的监听过程中，录制的消息清晰可闻。

滤波后的语音输出文件波形如图 25 所示。

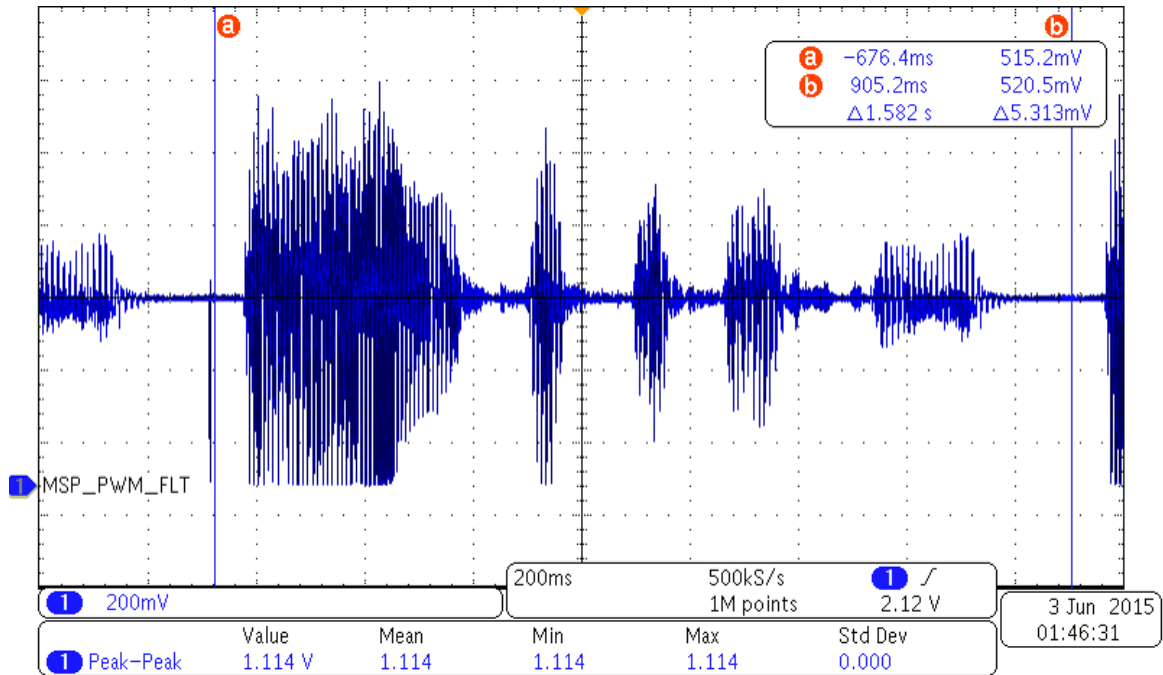


图 25. 预录语音输出波形

## 6.3 视觉通知性能

由于本 TI 参考设计另一主要用途是支持警报终端设备系统发出视觉通知，因此视觉报警性能对于本参考设计至关重要。

如 4.2 节所述，本 TI 参考设计用于在低功耗手电筒模式和高光输出闪光灯模式下工作。NFPA 72 规范规定了视觉通知器件必须满足或超出最低光输出水平。闪光工作模式符合 NFPA 72 规范。

### 6.3.1 视觉通知占空比和脉冲宽度特性化

NFPA 72 第 18 章，第 5.3 条规定，闪光速率必须介于 1Hz 至 2Hz 范围内。脉冲持续时间不得超过 200ms，而闪光脉冲占空比不得超过 40%。

LM3550 器件的超时持续时间可通过编程设定，能够有效控制闪光脉冲宽度。闪光速率由系统 MCU 控制。为了降低系统功耗，使用 16ms 最短超时持续时间以及 1Hz 闪光速率。

图 26 和图 27 分别显示了视觉通知子系统闪光脉冲宽度和闪光频率的示波器屏幕截图。该数据通过探测 LM3550 器件的 LED 引脚进行采集。这些图片清晰显示了脉冲宽度为 15.8ms，闪光频率为 1.051Hz，二者均符合 NFPA 72 法规要求。

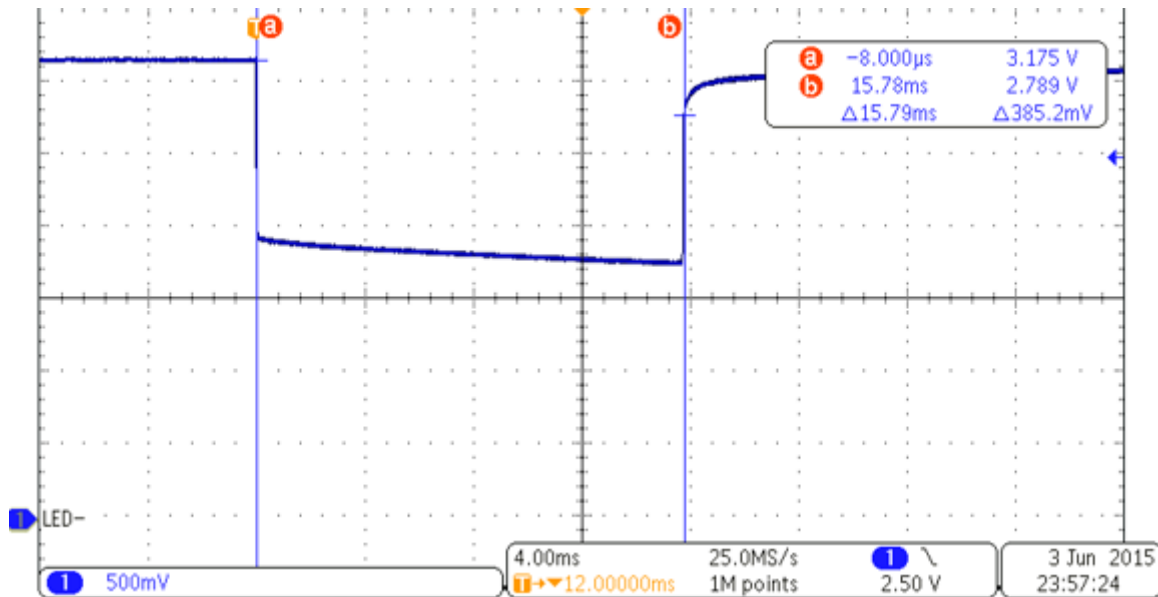


图 26. 闪光脉冲宽度

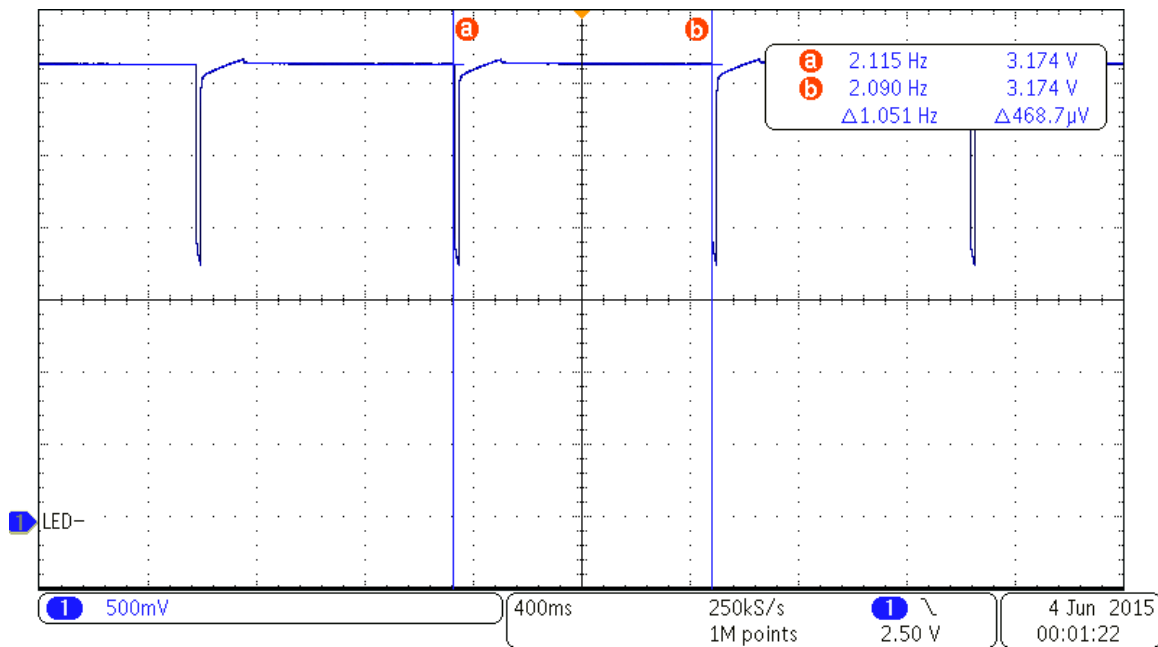


图 27. 闪光频率

### 6.3.2 总光输出

使用 Extech ([www.extech.com](http://www.extech.com)) 407026 测光计记录 2 分钟内的最大照度值，总光输出的测量结果如表 5 所示。如照度栏 ( $\text{lm}/\text{ft}^2$ ) 所示，本 TI 参考设计远超 NFPA 72 法规要求针对光输出的要求。

表 5. 视觉通知子系统光输出

测试条件				双 LED 输出测量			
深度 (ft)	宽度 (ft)	角度 (°)	距离 (ft)	测得的发光度 (lux)	计算得出的照度 ( $\text{lm}/\text{ft}^2$ )	计算得出的 NFPA72 要求 ( $\text{lm}/\text{ft}^2$ )	计算得出的光照强度 (坎德拉)
10	0	0.0	10.00	29	2.694	1.850	269.4
10	5	26.6	11.18	25	2.322	1.368	290.3
10	10	45.0	14.14	15	1.394	0.694	278.0
15	0	0.0	15.00	16	1.486	0.822	334.5
15	5	18.4	15.81	14	1.300	0.690	325.0
15	10	33.7	18.02	10	0.929	0.430	301.0
15	15	45.0	21.13	7	0.650	0.308	290.4

### 6.4 电源特性

在最终用户系统中集成 TI 压电扬声器频闪灯通知参考设计时，其中一项关键设计注意事项为系统的总电流消耗。由于存在多种不同的工作模式，已采集测试数据，以显示以各个模式工作期间系统整体的电流消耗。



### 6.4.1 声音通知子系统功耗性能

如前文所述，声音通知子系统提供多种模式。DRV2700 器件也具备四种增益设置。针对声音通知子系统的所有模式和 DRV2700 增益组合的系统总功耗进行了记录。输入电压轨设为 24V 直流电压。结果在表 6 中进行了汇总。

表 6. 输入电流 — 声音通知子系统

声音通知子系统模式	I <sub>INPUT</sub> (mA)	P <sub>INPUT</sub> (mW)
520Hz 方波, 增益 = 28.8dB	10.2	244.8
520Hz 方波, 增益 = 34.8dB	21.9	525.6
520Hz 方波, 增益 = 38.4dB	34.3	823.2
520Hz 方波, 增益 = 40.7dB	46.3	1111.2
2.84kHz 方波, 增益 = 28.8dB	22.4	537.6
2.84kHz 方波, 增益 = 34.8dB	45.7	1096.8
2.84kHz 方波, 增益 = 38.4dB	73.2	1756.8
2.84kHz 方波, 增益 = 40.7dB	104.3	2503.2
预录语音输出, 增益 = 28.8dB	1.5	36.0
预录语音输出, 增益 = 34.8dB	3.7	89.8
预录语音输出, 增益 = 38.4dB	5.4	128.6
预录语音输出, 增益 = 40.7dB	6.8	162.2
白噪声, 增益 = 28.8dB	13.4	321.6
白噪声, 增益 = 34.8dB	26.3	631.4
白噪声, 增益 = 38.4dB	41.1	986.4
白噪声, 增益 = 40.7dB	56.2	1348.8

根据功耗数据可知，系统功耗将随增益的增加而升高。此外，提升警报音频率也将增加系统功耗。这是意料之中的结果，原因是声音通知子系统的输入功耗与输入信号频率、压电传感器电容和输出电压呈线性关系。

### 6.4.2 视觉通知子系统功耗性能

如前文所述，视觉通知子系统提供两种模式：手电筒模式和闪光灯模式。针对视觉通知子系统所有模式的系统总功耗进行了记录。输入电压轨设为 24V 直流电压。结果在表 7 中进行了汇总。即使闪光灯模式的总光输出更高，其总功耗也低于手电筒模式，原因是闪光灯模式是一种周期性操作模式。

表 7. 输入电流 — 视觉通知子系统

视觉通知子系统模式	I <sub>INPUT_AVG</sub> (mA)	P <sub>INPUT</sub> (mW)
手电筒模式 (I <sub>LED</sub> = 100mA)	38.9	933.6
闪光灯模式 (t <sub>FLASH</sub> = 16ms, f <sub>FLASH</sub> = 1Hz)	15.5	372.5

在闪光灯模式下，每当发生闪光事件，24V 直流输入引脚均产生输入电流脉冲。当脉冲持续时间为 16ms 时，LM3550 将耗费约 171ms 对超级电容进行再充电。此时，输入流耗将降至极低水平，如图 28 所示。这些电流脉冲在每次闪光事件前后发生，频率约为 1Hz，如图 29 所示。

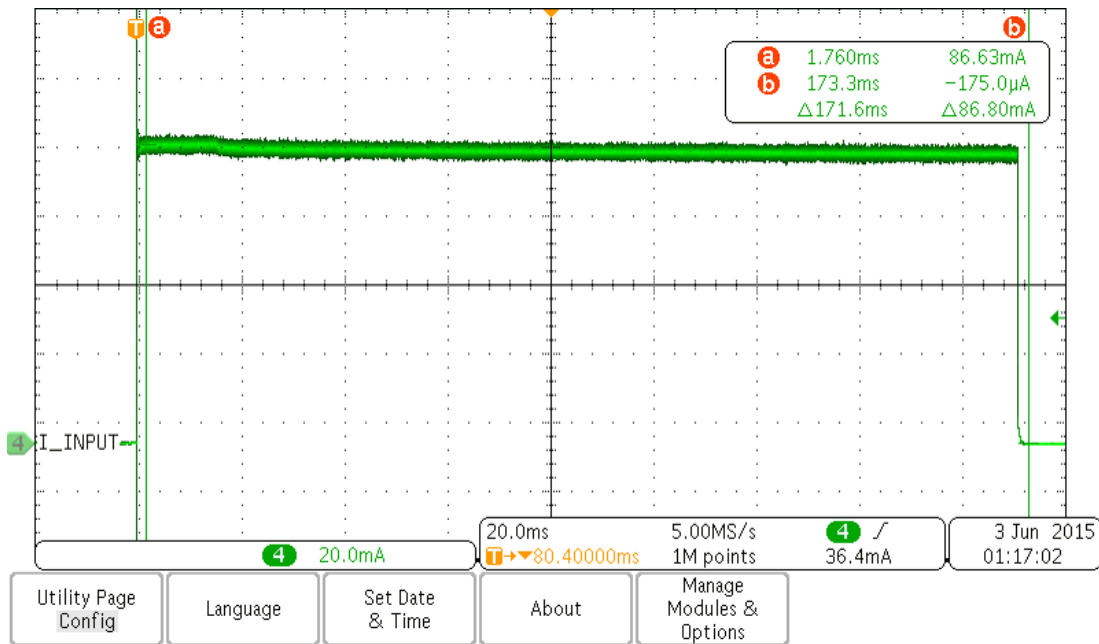


图 28. 视觉通知闪光灯模式过程中的输入电流 — 显示电流脉冲宽度

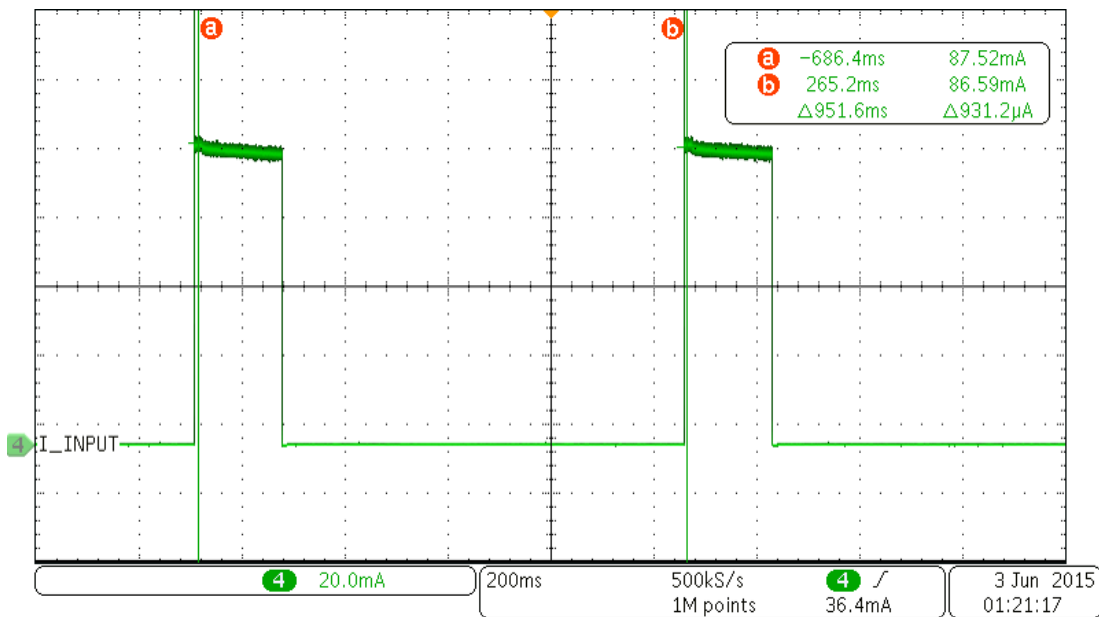


图 29. 视觉通知闪光灯模式过程中的输入电流 — 显示 1Hz 频率

### 6.4.3 系统总功耗

当声音通知子系统在 520Hz 方波模式下以 DRV2700 全增益工作，同时视觉通知子系统以闪光灯模式工作时，输入电源的平均总功耗为 60.17mA。每次 LED 闪光事件过程中均存在一些可见电流脉冲，如图 30 所示。使用 24V 直流输入电压时的系统总功耗为 1.44W。

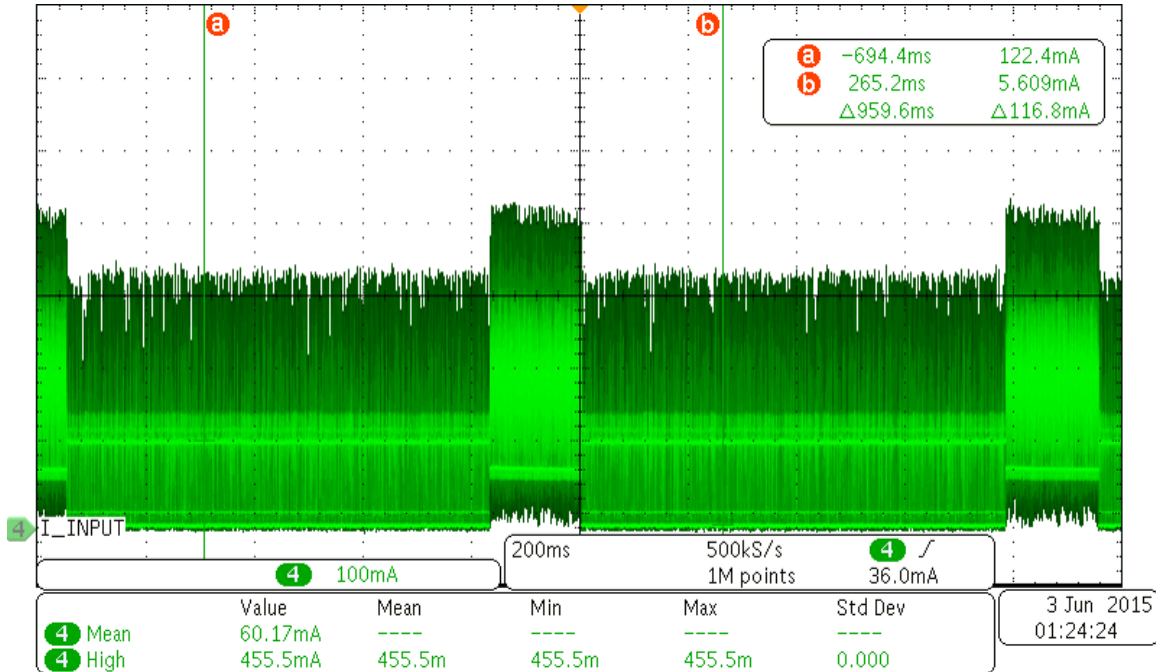


图 30. 声音和视觉通知事件过程中的输入电流

### 6.4.4 系统待机功耗性能

禁用声音和视觉通知子系统后，系统视为进入待机模式。待机模式下的主要功耗源为 TI 参考设计系统中各集成电路（DRV2700、LM3550、MSP430FR5969、LMV344 和 LMR14030）的关断和待机电流。

本 TI 参考设计子系统在待机模式下的总电流消耗为 268 $\mu$ A（来源于 24V 直流输入电源）。将 LM3550 器件置于与待机模式相对的完全关断模式可降低该电流；然而，超级电容在这种关断模式下的充电损耗可能导致初始闪光灯模式延迟激活。

## 7 设计文件

### 7.1 电路原理图

要下载电路原理图，请参见 [TIDA-00376 电路原理图](#) 设计文件。

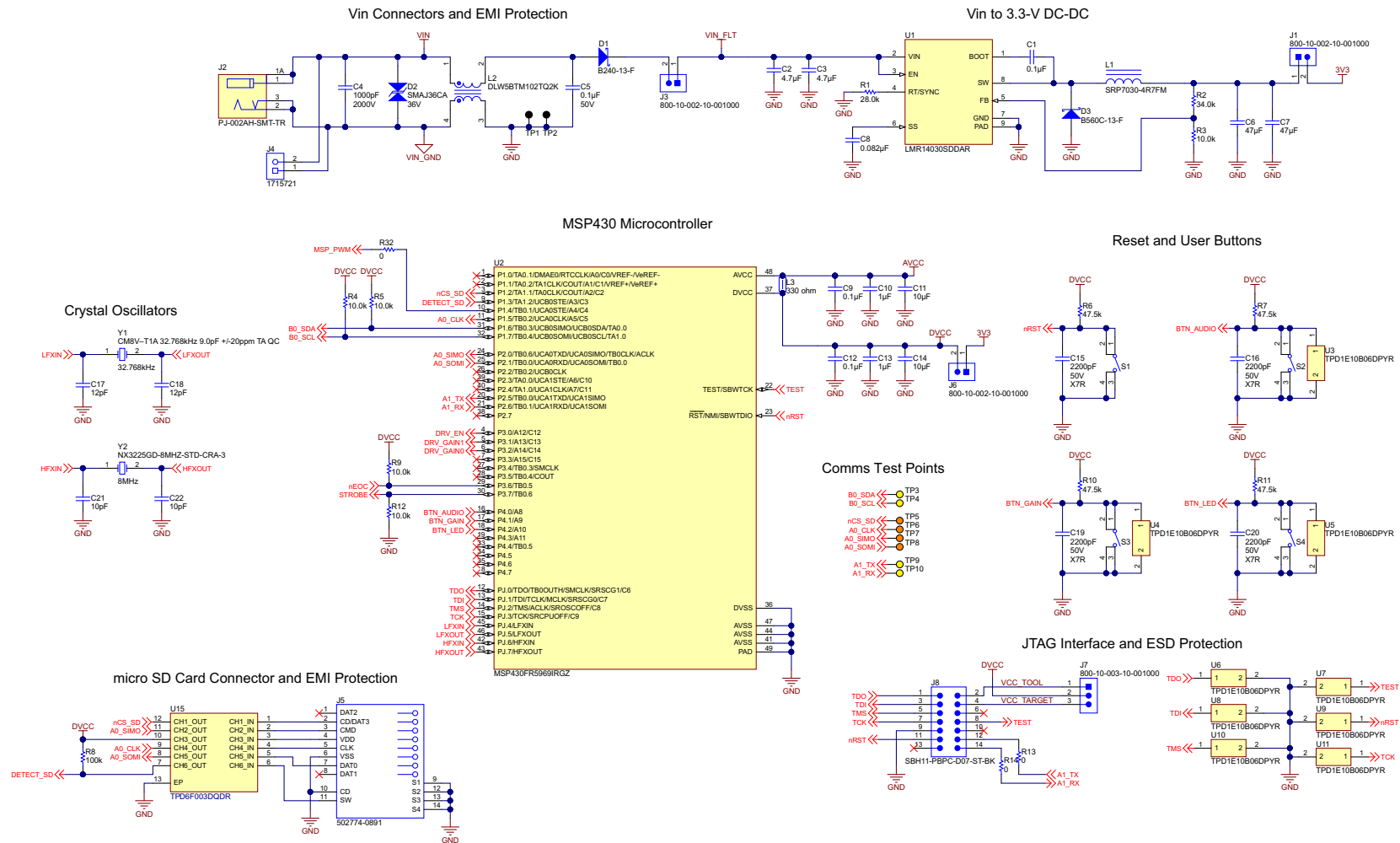


图 31. PWR MCU 电路原理图

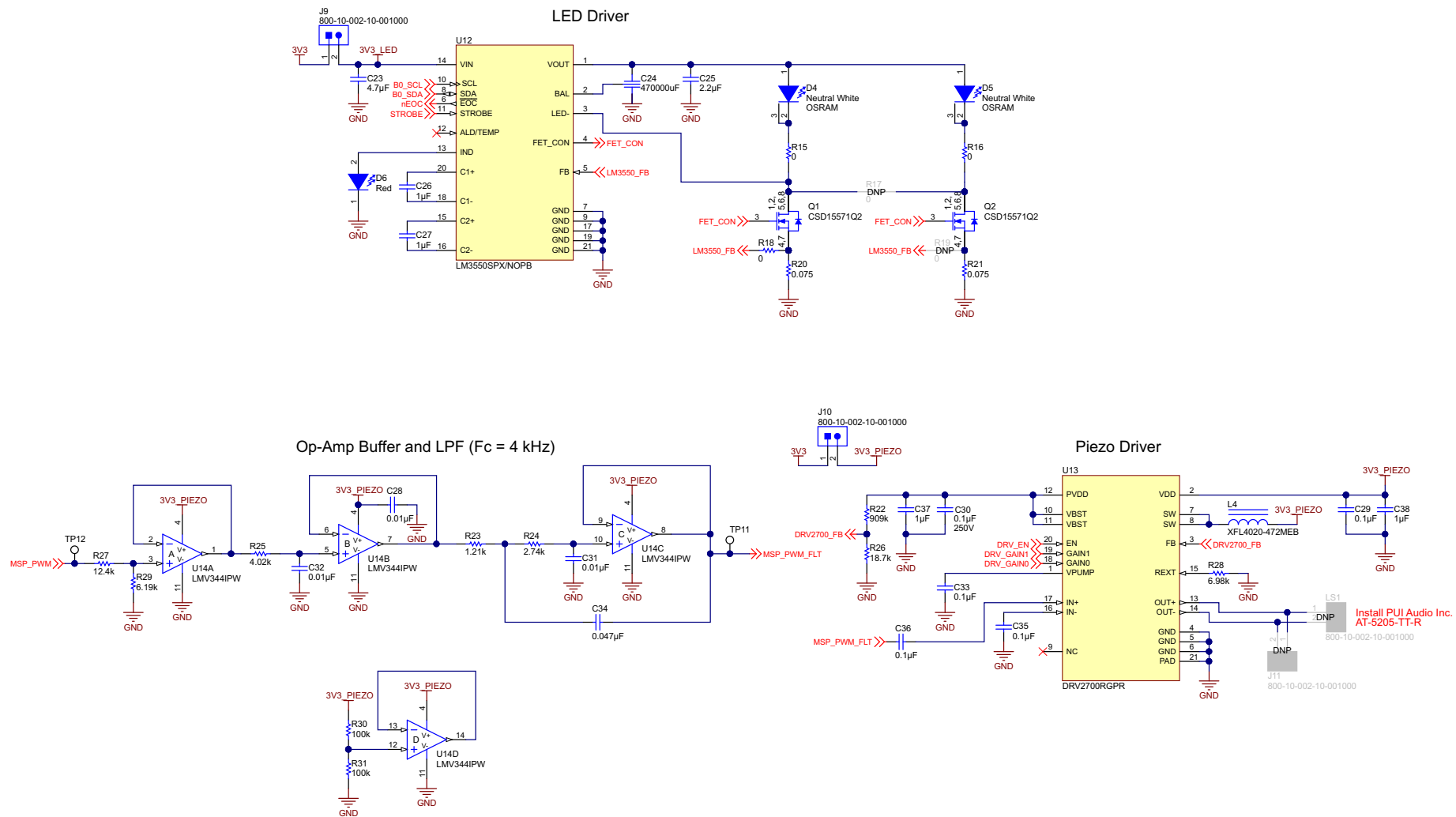


图 32. 压电 LED 电路原理图

## 7.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM), 请参见 [TIDA-00376 BOM](#) 的设计文件。

## 7.3 板层图

要下载板层图, 请参见 [TIDA-00376 板层图](#) 的设计文件。

## 7.4 Altium 项目文件

要下载 Altium 项目文件, 请参见 [TIDA-00376 Altium](#) 的设计文件。

## 7.5 布局指南

为了确保高性能, TI 压电扬声器频闪灯通知参考设计使用四层 PCB 布局。第二层为固态 GND 覆层, 第三层用于电源轨布线, GND 分布在未使用区域。顶层和底层用于一般信号布线, GND 也分布在未使用区域。

对于本 TI 参考设计中使用的全部 TI 产品, 请遵循相关数据表提供的布局布线指南。

## 7.6 光绘文件

要下载光绘文件, 请参见 [TIDA-00376 光绘文件](#) 的设计文件。

## 7.7 装配图

要下载装配图, 请参见 [TIDA-00376 装配图](#) 的设计文件。

## 7.8 软件文件

要下载软件文件, 请参见 [TIDA-00376 固件](#) 的设计文件。

## 8 参考资料

如需更多参考信息，请参见以下文档：

1. 德州仪器 (TI) DRV2700 数据表 《DRV2700 集成升压转换器的工业压电驱动器》，（文献编号：SLOS861）
2. 德州仪器 (TI) LM3550 数据表 《LM3550 适用于移动摄像机系统的具有自动 VLED 和 ESR 检测功能的 5A 闪光灯 LED 驱动器》（文献编号：SNVS569）
3. 德州仪器 (TI) MSP430FR5969 数据手册 《MSP430FR59xx 混合信号微控制器》（文献编号：SLAS704）。
4. 德州仪器 (TI) LMR14030 数据表 《LMR14030  $I_Q$  为 40 $\mu$ A 的 Simple Switcher® 40V/3.5A、2.2MHz 降压转换器》（文献编号：SNVSA81）
5. 德州仪器 (TI) LMV344 数据表 《具有关断功能的轨到轨输出 CMOS 运算放大器》（文献编号：SLOS447）
6. 德州仪器 (TI) CSD15571Q2 数据表 《20V N 沟道 NexFET™ 功率 MOSFET》（文献编号：SLPS435）
7. 德州仪器 (TI)，采用 0402 封装的单通道 ESD 保护器件，TPD1E10B06 数据表（文献编号：SLLSEB1）
8. 德州仪器 (TI) 《TPDxF003 集成 ESD 保护功能的四通道、六通道和八通道 EMI 滤波器》，TPD6F003 数据表（文献编号：SLLS907）

## 9 关于作者

**EVAN D. CORNELL** 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。Evan 在系统级模拟、混合信号和电源管理设计方面具有丰富经验。Evan 拥有印第安纳州泰瑞豪特罗斯霍曼理工学院的电气和计算机工程硕士 (ME) 学位和电气工程理学学士 (BS) 学位。Evan 是电气电子工程师协会 (IEEE) 的成员。

**GREG LUBARSKY** 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，任职于硅谷模拟、移动照明和电源小组。他于 2002 年在加利福尼亚大学戴维斯分校获得电气工程理学学士学位。Greg 在支持和定义白色 LED 背光驱动器、LED 闪光灯驱动器及其他电源管理电子器件方面拥有 13 年的经验。

**RODNEY MIRANDA** 是德州仪器 (TI) 的触觉和压电系统应用工程师，负责开发面向汽车和工业市场的应用、EVM 和参考设计并为该领域的客户提供支持。Rodney 在使用各种各样的器件（包括定制专用集成电路 (ASIC)、开关模式电源 (SMPS)、AD/DA 转换、传感器产品及其他相关器件）进行汽车质量和汽车产品/测试工程设计方面拥有丰富的经验。Rodney 拥有德克萨斯大学达拉斯分校的 RF 和模拟电路设计专业电子工程硕士学位 (MSEE) 以及电子工程学士学位 (BSEE)。



## 修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

<b>Changes from Original (June 2015) to A Revision</b>	<b>Page</b>
• 已更改 AB5027B-3-LW100-R 压电弯片 .....	3
• 已更改 AT-5205-TT-R 压电传感器 .....	18
• 已更改 AT-5205-TT-R 压电传感器 .....	18

## 关于 TI 参考设计的重要声明

德州仪器 (“TI”) 公司的参考设计仅供协助设计人员 (“设计人员”) 开发包含 TI 产品的系统。TI 未执行任何测试, 在已发布的文档中针对特定参考设计所专门描述的测试除外。

TI 提供参考设计以及任何其他技术、应用或设计建议、质量特性、可靠性数据或其他信息或服务并不会扩展或更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明, TI 提供此类参考设计或其他信息, 也不会产生任何额外的义务或责任。

TI 保留对其参考设计或其他信息进行更正、增强、改进以及其他更改的权利。

设计人员理解并同意, 设计人员仍要对设计其系统和产品时运用的独立分析、评估和判断负责, 同时全权负责保证其产品的安全性以及其产品 (以及用于设计人员此类产品的所有 TI 产品) 符合适用的所有法律法规以及适用的其他要求。设计人员表示, 对于其应用, 已具备创建或实施相关防护措施所需的所有专业知识, 能够 (1) 预料故障引发的危险后果; (2) 监视故障及其后果; (3) 降低可能引发危害的故障的几率并采用适当的措施。设计人员同意, 在使用或分发包含 TI 产品的任何系统之前, 设计人员应对此类系统进行全面测试, 并按此类 TI 产品在此类系统中的预期用途对 TI 产品的功能进行全面测试。设计人员不可将任何 TI 产品用于关乎性命的医疗设备, 除非已由各方获得授权的管理人员签署专门的合同对此类应用专门作出规定。关乎性命的医疗设备是指出现故障会导致严重身体伤害或死亡的医疗设备 (例如生命保障设备、心脏起搏器、心脏除颤器、人工心脏泵、神经刺激器以及植入设备)。此类设备包括但不限于, 美国食品药品监督管理局认定为 III 类设备的设备, 以及在美国以外的其他国家或地区认定为同等类别设备的所有医疗设备。

设计人员仅在开发包含 TI 参考设计中确定的 TI 产品的最终产品时, 才有权使用、复制及修改独立的 TI 参考设计。然而, 不会明示或暗示地以禁止反言或其他任何方式授予其他任何 TI 知识产权的许可, 也不会授予 TI 或其他任何第三方的任何技术或知识产权的许可, 包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何组合设备、机器或流程相关的其他知识产权。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息不能构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用参考设计或前述的其他信息可能需要获得第三方专利权或其他知识产权的许可, 或 TI 的专利权或 TI 其他知识产权的许可。

TI 参考设计及其他前述信息均按“原样”提供, 并且可能包含错误。对于参考设计或参考设计的使用, TI 拒绝作出任何明示或暗示的担保或保证, 包括但不限于对准确性或完整性、所有权、任何常见故障担保以及试销性的任何暗示担保、对特定用途的适用性以及不侵犯任何第三方的知识产权进行保证。

对于任何索赔, 包括但不限于任何关于 TI 参考设计中所述产品的任何组合或基于此组合的侵权索赔, TI 不应承担任何责任, 也不应为设计人员提供辩护或赔偿。对于与参考设计或使用参考设计相关或由参考设计或使用参考设计而造成的任何实际、直接、特殊、附带、间接、惩罚性、偶发、从属或惩戒性损害, 不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害, TI 概不负责。

TI 半导体产品标准销售条款 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>) 适用于封装的集成电路产品的销售。其他条款可能适用于其他类型 TI 产品及服务的使用或销售。

对于因设计人员不遵从本声明所述条款和内容导致的任何损害、成本、损失和/或债务, 设计人员应承担全部责任, TI 及其代表不承担任何责任。

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼, 邮政编码: 200122  
Copyright © 2016 德州仪器半导体技术 (上海) 有限公司

## 重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	<a href="http://www.ti.com.cn/audio">www.ti.com.cn/audio</a>	通信与电信	<a href="http://www.ti.com.cn/telecom">www.ti.com.cn/telecom</a>
放大器和线性器件	<a href="http://www.ti.com.cn/amplifiers">www.ti.com.cn/amplifiers</a>	计算机及周边	<a href="http://www.ti.com.cn/computer">www.ti.com.cn/computer</a>
数据转换器	<a href="http://www.ti.com.cn/dataconverters">www.ti.com.cn/dataconverters</a>	消费电子	<a href="http://www.ti.com.cn/consumer-apps">www.ti.com.cn/consumer-apps</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>	能源	<a href="http://www.ti.com.cn/energy">www.ti.com.cn/energy</a>
DSP - 数字信号处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/dsp">www.ti.com.cn/dsp</a>	工业应用	<a href="http://www.ti.com.cn/industrial">www.ti.com.cn/industrial</a>
时钟和计时器	<a href="http://www.ti.com.cn/clockandtimers">www.ti.com.cn/clockandtimers</a>	医疗电子	<a href="http://www.ti.com.cn/medical">www.ti.com.cn/medical</a>
接口	<a href="http://www.ti.com.cn/interface">www.ti.com.cn/interface</a>	安防应用	<a href="http://www.ti.com.cn/security">www.ti.com.cn/security</a>
逻辑	<a href="http://www.ti.com.cn/logic">www.ti.com.cn/logic</a>	汽车电子	<a href="http://www.ti.com.cn/automotive">www.ti.com.cn/automotive</a>
电源管理	<a href="http://www.ti.com.cn/power">www.ti.com.cn/power</a>	视频和影像	<a href="http://www.ti.com.cn/video">www.ti.com.cn/video</a>
微控制器 (MCU)	<a href="http://www.ti.com.cn/microcontrollers">www.ti.com.cn/microcontrollers</a>		
RFID 系统	<a href="http://www.ti.com.cn/rfidsys">www.ti.com.cn/rfidsys</a>		
OMAP应用处理器	<a href="http://www.ti.com.cn/omap">www.ti.com.cn/omap</a>		
无线连通性	<a href="http://www.ti.com.cn/wirelessconnectivity">www.ti.com.cn/wirelessconnectivity</a>	德州仪器在线技术支持社区	<a href="http://www.deyisupport.com">www.deyisupport.com</a>

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated