

Design Guide: TIDA-060054

人形机器人音频子系统参考设计



说明

该参考设计针对人形机器人的音频子系统，集成了八通道数字麦克风接口，通过高性能 PDM 至 TDM 转换器 PCMD3180-Q1 将其合成为单路 TDM 数据流，同时包含数字输入 D 类音频放大器 TAS6511-Q1，能够为 2Ω 负载输出 50W 功率。

资源

TIDA-060054	设计文件夹
PCMD3180-Q1	产品文件夹
TAS6511-Q1	产品文件夹
LMR51450-Q1	产品文件夹
TLV767-Q1	产品文件夹

特性

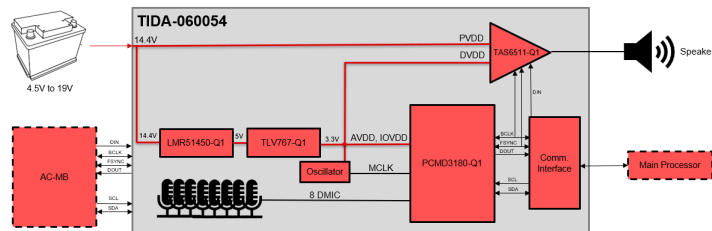
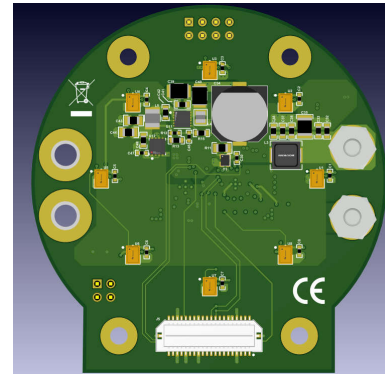
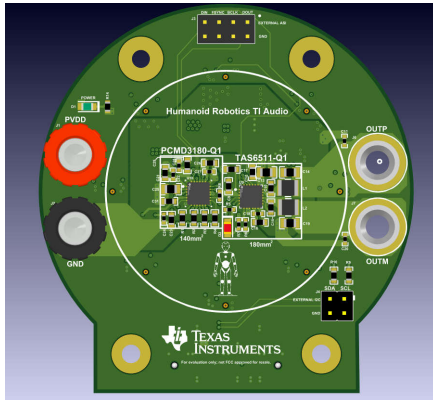
- 输入电压范围为 4.5V 至 19V
- 8 通道脉冲密度调制 (PDM) 麦克风同步转换
- 通过 2Ω 负载提供 50W 输出功率
- 可编程数字音量控制
- 用于连接系统处理器的外部 ASI 和 I2C 接头
- 与音频转换器主板集成，支持 PC 音频及编程功能
- 物料清单 (BOM) 尺寸小巧，作为设计亮点

应用

- [人形机器人传感器模块](#)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

TIDA-060054 使用 PCMD3180-Q1 PDM 至 TDM 数据转换器对八个板载数字 PDM 麦克风进行音频录制，并使用数字输入 D 类音频放大器 TAS6511-Q1 进行音频播放，可以通过 $2\ \Omega$ 负载提供 50W 输出功率。TDM 音频通过音频转换器主板 (AC-MB) 或另一个与外部 ASI 和 I2C 接头连接的处理器在外部进行处理。

1.1 主要系统规格

参数	规格	最小值	典型值	最大值	单位
输入电压	电池	4.5	14.4	19	V
待机电流	PCMD3180-Q1， AVDD 关断		5		μ A
	PCMD3180-Q1， IOVDD 关断		0.1		
	TAS6511-Q1， PVDD 关断		2		
	TAS6511-Q1， DVDD 关断		1		
电流消耗	PCMD3180-Q1， AVDD 电流为 3.3V，启用 8 个 PDM 通道		11.9		mA
	PCMD3180-Q1， IOVDD 电流为 3.3V，启用 8 个 PDM 通道		0.7		
	TAS6511-Q1， PVDD 空闲电流，F _{SW} = 2.048MHz，无音频输入		35		
	TAS6511-Q1， DVDD 电流，播放 -60dB 信 号		8		
扬声器负载		2	4		Ω
输出功率	2 Ω 负载，10% THD+N		50		W
	2 Ω 负载，1% THD+N		40		
	4 Ω 负载，10% THD+N		30		
	4 Ω 负载，1% THD+N		24		
SNR	PCMD3180-Q1 5 阶 PDM 调 制器		128		dB
	TAS6511-Q1		108		
音频输入/输出格式		TDM8、TDM16			
封装尺寸	PCMD3180-Q1	4.00mm × 4.00mm			
	TAS6511-Q1	4.00mm × 4.00mm			
解决方案尺寸	PCMD3180-Q1	140mm ²			
	TAS6511-Q1	180mm ²			

2 系统概述

在人形机器人中集成音频系统是至关重要的一步，可实现与人类用户的实时通信和自然交互、语音处理与响应以及空间感知。音频系统充当人形机器人的耳朵和嘴巴，使用头部周围的麦克风阵列收听周围环境，并使用扬声器发出语音或声音响应。音频系统通常安装在人形机器人的头部单元中，以便靠近其所模拟的人体部位。

TIDA-060054 参考设计集成了人形机器人完整音频子系统所需的所有组件，只需连接扬声器和电源，并将音频串行接口信号 (BCLK、FSYNC、DOUT 和 DIN) 及 I2C 控制信号 (SCL 和 SDA) 连接至主系统处理器，即可轻松集成到更大规模的人形机器人设计中。PCMD3180-Q1 将来自八个 PDM 麦克风的数字麦克风数据转换为单个 TDM 音频流，该音频流直接馈送到主处理器，以处理回声消除、波束形成和语音识别等复杂算法。为了使人形机器人能够做出响应，主处理器的音频播放通过 DIN 引脚直接发送到 TAS6511-Q1 数字输入音频放大器，以驱动高达 50W 的扬声器，从而在紧凑的设计中提供出色的功率密度。

2.1 方框图

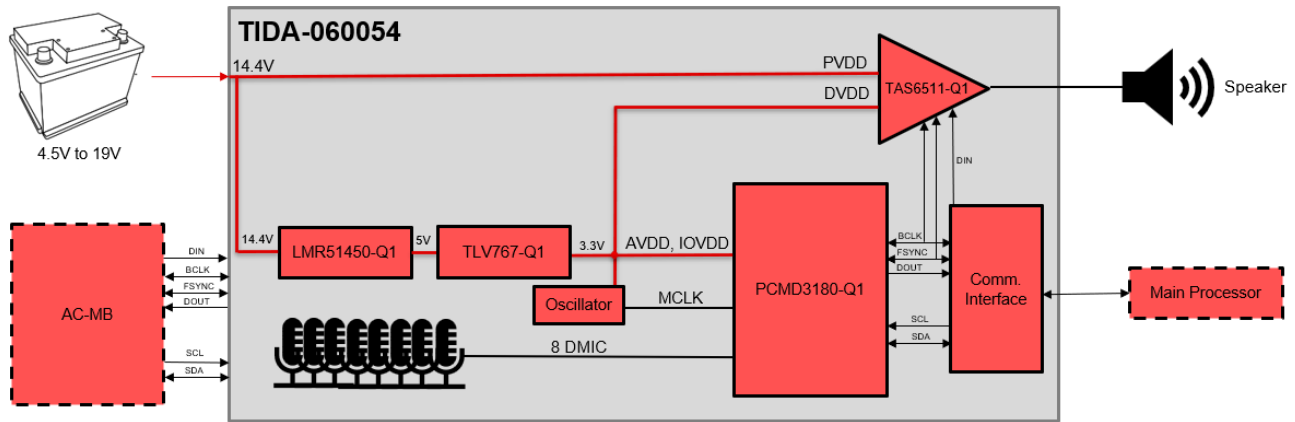


图 2-1. TIDA-060054 方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 编解码器设计

为了更自然地再现类人行为，人形机器人在响应时必须实际转向检测到的声源方向，并面朝该方向。这要求音频系统收集人形机器人周围所有角度的数据，以估算声源的位置。人形机器人系统依赖麦克风的设计与布局，以支持波束成形、主动降噪、语音识别或空间感知等算法，这些算法需要对机器人周围音频实现完整的 360° 覆盖。

TIDA-060054 参考设计通过八个 PDM 麦克风阵列围绕印刷电路板 (PCB) 边缘的圆形排列实现了这种全向灵敏度。这种布局非常灵活，因为根据系统要求，麦克风可以重新放置在靠近或远离 PCMD3180-Q1 音频转换器的位置。

麦克风放置方式的缺点是，较大的圆形区域会增加可精确收集的声音的距离和频率，而较高的麦克风密度会产生更好的声音定位。麦克风阵列位于大约相当于人头尺寸的圆形区域周围，是人形机器人所需音频处理的合适折衷方案。

大多数应用使用最多八个麦克风，这使得 PCMD3180-Q1 非常适合人形机器人音频子系统。在人形机器人应用中，数字麦克风通常优于模拟麦克风，因为它们具有出色的抗噪性能，可以在各种嘈杂的实际环境 (例如户外或制造车间) 中进行可靠的音频处理。TIDA-060054 上的八个 PDM 麦克风由 PCMD3180-Q1 的 MICBIAS 电压输出供电。

此外，TIDA-060054 具有板载振荡器，可向 PCMD3180-Q1 的 GPIO1 引脚提供 12.288MHz MCLK 输入。因而在控制器模式下运行，BCLK 和 FSYNC 音频时钟由 PCMD3180-Q1 生成并发送到 TAS6511-Q1 和外部处理

器。在控制器模式下运行时，请勿提供外部 BCLK 或 FSYNC 信号。ASI 接头上提供 DOUT、BCLK 和 FSYNC 输出，而输入数据 DIN 仍必须提供给 TAS6511-Q1。

TDM 数据和 ASI 时钟信号通过外部 ASI 接头路由到主处理器。或者，对于开发和测试，可选的音频转换器主板 (AC-MB) 可以将 TIDA-060054 与 PC 连接，以提供音频处理和 I2C 编程支持。AC-MB 并非运行所必需。电路板完全由 14.4V 电池输入供电，因为板载转换器会为音频设备生成 3.3V 电源轨。

2.2.2 D 类放大器设计

TAS6511-Q1 D 类放大器输出方波信号，其占空比与音频信号的幅度成正比。LC 解调滤波器用于恢复音频信号。该滤波器衰减音频频带外的输出信号的高频分量。解调滤波器的设计会显著影响功率放大器的音频性能。因此，为了满足系统 THD+N 要求，在选择输出滤波器中使用的电感器时，必须仔细考虑。应用手册 [LC 滤波器设计](#) 和 [D 类 LC 滤波器设计器](#) 计算器将提供设计 LC 滤波器所需的工具。TIDA-060054 对放大器输出端的 LC 滤波器使用桥接负载配置，如图 2-2 所示， $L_{BTL} = 3.3\mu\text{H}$ ， $C_g = 1\mu\text{F}$ 。

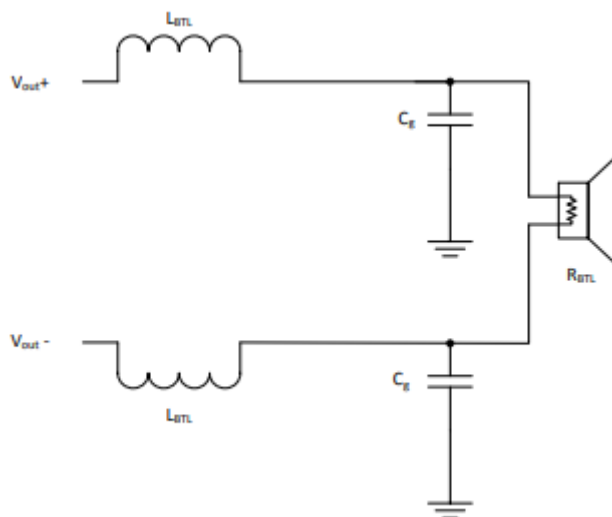


图 2-2. 桥接式负载 (BTL) D 类放大器 LC 滤波器

图 2-3 显示了此 LC 滤波器对 2Ω 负载的频率响应。

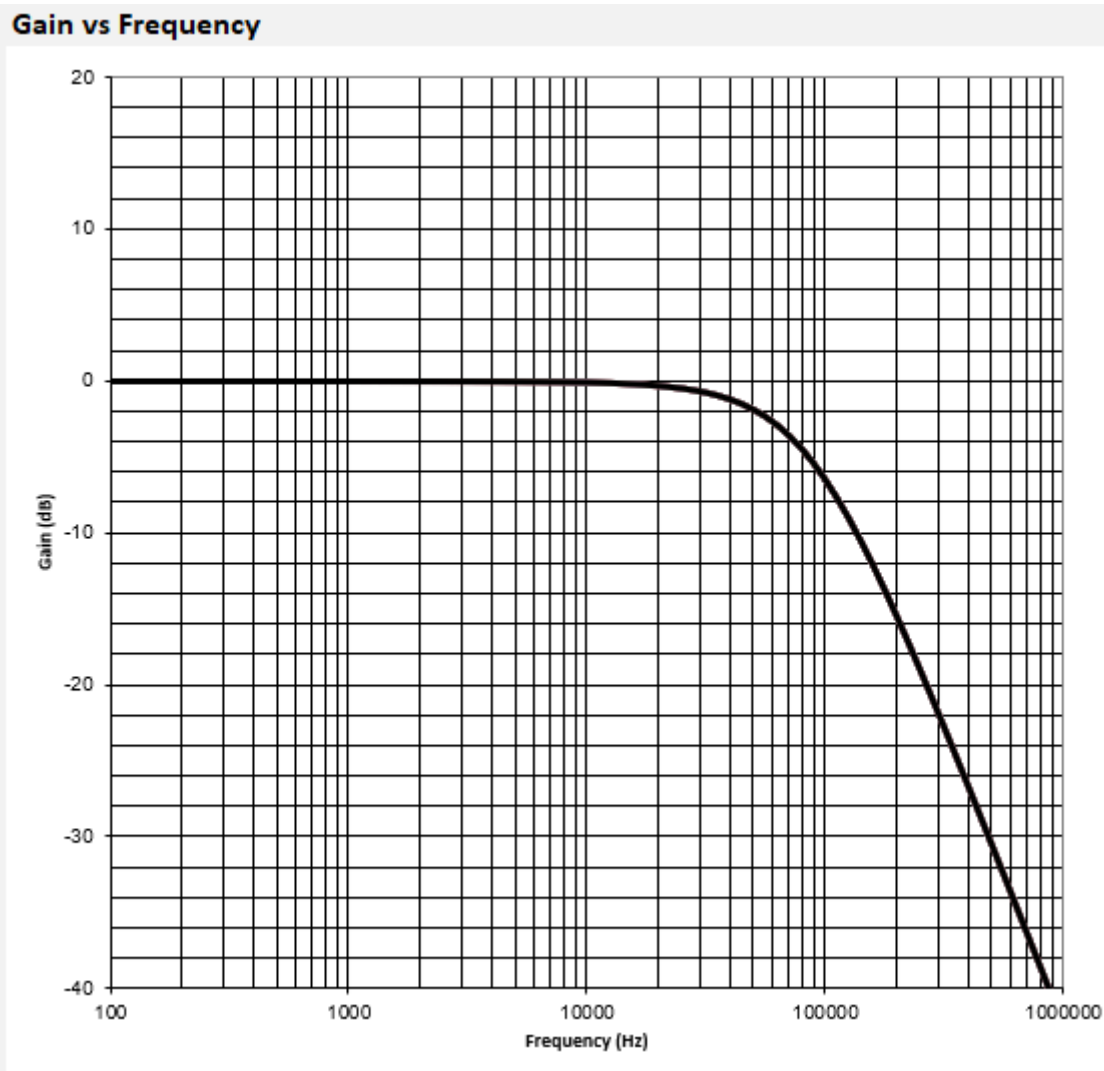


图 2-3. TIDA-060054 D 类输出 LC 滤波器的频率响应

TIDA-060054 还包含故障指示灯 LED D2。红色 LED 会监测 TAS6511-Q1 的故障引脚，默认情况下在以下任何条件下导通：

- 过热关断 (OTSD) - 锁存和非锁存
- 过流限制和关断事件 - 锁存
- 直流检测 - 锁存

如果需要，也可以将 FAULT 引脚配置为报告实时负载诊断事件，以在放大器音频操作期间检测短路负载、开路负载，电源短路和接地短路情况。

2.2.3 电源设计

电池续航是类人机器人设计最关键的考量指标之一。高效率与待机低功耗，是类人机器人能够稳定投入实际应用的基础。

选择的稳压器用于支持从 3.3V 电源导轨获取高达 1A 的电流。PCMD3180-Q1 经过优化，可在 AVDD 和 IOVDD 引脚上使用单一 3.3V 电源供电运行。在启用八个 PDM 通道的情况下录音时，AVDD 和 IOVDD 引脚的电流消耗小于 20mA。表 2-1 和表 2-2 显示了 PCMD3180-Q1 在采样率、启用通道和 PDM 时钟频率的不同组合下的功耗。不同使用场景下的 TLV320ADCx140 功耗矩阵应用手册讨论了有关如何在低功耗模式下使用数字麦克风时配置和使用器件的更多细节和信息。

表 2-1. 使用外部 PDM 4 阶调制器时的 PDM 典型电流消耗

PDM 时钟		6.144MHz	3.072MHz	1.536MHz	0.768MHz
采样率 (kHz)	数字麦克风通道	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)
8	8	7.85	7.93	7.89	7.87
16	8	8.97	9.23	9.19	-
24	8	8.92	8.99	8.99	-
32	8	9.71	9.92	-	-
48	8	11.26	11.69	-	-
96	4	11.87	-	-	-

表 2-2. 使用外部 PDM 5 阶调制器时的 PDM 典型电流消耗

PDM 时钟		6.144MHz	3.072MHz	1.536MHz	0.768MHz
采样率 (kHz)	数字麦克风通道	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)	3.3V 时的 AVDD 电流 (mA)
8	8	7.93	7.92	7.88	7.80
16	8	9.25	9.20	9.15	-
24	8	9.04	8.98	8.91	-
32	8	9.93	9.83	9.77	-
48	8	11.71	11.60	-	-
96	4	12.14	12.05	-	-
192	4	11.96	-	-	-

TAS6511-Q1 由 DVDD 数字逻辑 3.3V 电源和 PVDD 电压输入供电，该输入可直接连接至电压高达 19V 的电池。DVDD 引脚通常会消耗 10mA 电流，PVDD 引脚在空闲时通常会消耗 35mA 电流。在满功率输出时，TAS6511-Q1 在 50W 输出功率下可实现 90% 效率，从而最大限度地降低电池功耗。

两个稳压器需要输入电容器来提高瞬态性能和噪声抑制能力，并需要输出电容器来实现电压稳定性。这里选择了一个降压转换器，以高效地将输入电压降至 5V，而 3.3V 电源轨由 LDO 生成，以尽可能降低音频器件电源引脚处的噪声。

LMR514500-Q1 器件建议使用两个 4.7μF 输入电容，以降低纹波电流并将开关噪声与周边电路隔离。额定电压必须至少是最大输入电压的两倍，因此使用了 50V 的电容器。建议使用两个 33μF 电容器来改善瞬态响应并提高 5V 输出的稳定性。输出电感器和电阻器反馈网络专为 5V 和 440kHz 开关频率而设计。尽管并非必需，但 TLV767-Q1 器件建议使用一个 1μF 输入电容，以改善瞬态响应、输入纹波和 PSRR。使用输出电容可改善器件的动态性能，为确保稳定性，建议使用 2.2μF 的电容值。

2.3 重点产品

2.3.1 PCMD3180-Q1

PCMD3180-Q1 是一款高性能、低功耗、灵活且具有广泛功能集成的 8 通道脉冲密度调制 (PDM) 输入至时分多路复用 (TDM) 或 I2S 音频输出转换器。该器件适用于声控系统、便携式计算、通信和娱乐应用。该器件具有低功耗，因此适用于电池供电的便携式音频系统。该器件集成了多种功能，可在空间受限、电池供电的消费类、家庭和工业应用中降低成本、布板空间和功耗。

PCMD3180-Q1 包含以下模块：

- 配备高性能抽取滤波器的八通道脉冲密度调制 (PDM) 数字麦克风接口
- 为数字麦克风供电的低噪声麦克风偏置输出
- 具有线性相位或低延时滤波器的可编程抽取滤波器
- 用于每个通道的可编程数字音量控制、双二阶滤波器
- 每个通道都具有分辨率超高的可编程相位和增益校准
- 可编程高通滤波器 (HPF) 和数字通道混频器

- 支持多种系统时钟的集成低抖动锁相环 (PLL)
- 集成数字和模拟稳压器，用于支持单电源运行

PCMD3180-Q1 支持使用 I2C 或 SPI 进行通信以配置控制寄存器。该器件支持高度灵活的音频串行接口 (时分多路复用 [TDM]、I2S 或左对齐 [LJ])，以在系统中各个器件之间无缝传输音频数据。通过在器件之间共享公共 I2C 和 TDM 总线，该器件可以支持多个器件。此外，该器件还具有菊花链功能和辅助音频串行输出数据引脚。但是，这些功能需要使用 GPIO 引脚。连接 8 个 PDM 麦克风后，唯一可用的 GPIO 引脚是 GPIO1，该引脚在 TIDA-060054 中用作 MCLK 输入。

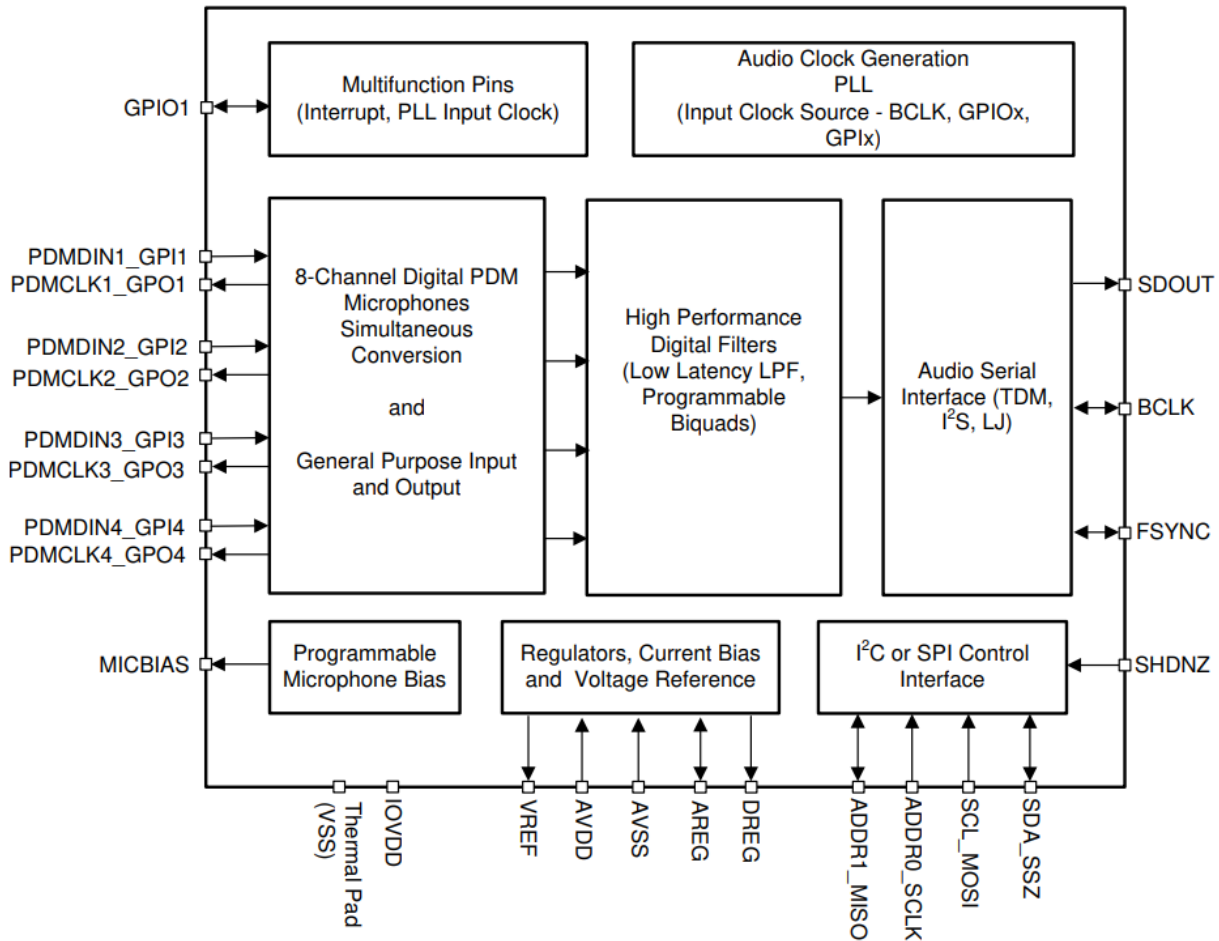


图 2-4. PCMD3180-Q1 功能框图

2.3.2 TAS6511-Q1

TAS6511-Q1 是一款单通道、数字输入、D 类音频放大器，支持 2MHz 开关频率，可实现成本和尺寸优化的单通道音频放大器设计。该器件的工作电压为 4.5V 至 19V，可提供高达 30W (14.4V, 4Ω, 10% THD+N) 和高达 50W (14.4V, 2Ω, 10% THD+N) 的功率。该器件集成了直流和交流负载诊断功能，可在启用输出级之前确定所连接负载的状态。此外，该器件还可以在 PLAY 模式下使用实时负载诊断 (无论是否有音频) 来监控输出负载状况，该诊断独立于主机和音频输入运行。利用实时负载诊断 (RTLDDG)，可以在放大器音频操作期间检测负载短路 (SL)、负载开路 (OL)、对电源短路 (S2P) 和接地短路 (S2G) 情况。

该器件采用焊盘朝下的小型 TSSOP 和 QFN (具有可湿性侧面) 封装，可实现无散热器的音频放大器设计。

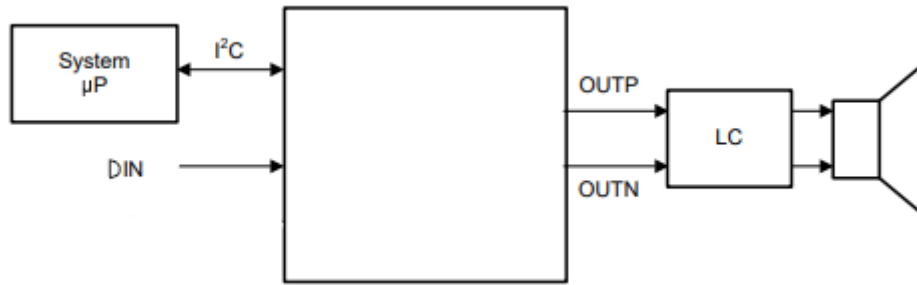


图 2-5. TAS6511-Q1 简化方框图

2.3.3 LMR51450-Q1

LMR514x0-Q1 转换器是一款简单易用的同步直流/直流降压转换器，工作电源电压为 4V 至 36V。该器件能够以非常小的设计尺寸提供高达 4A 或 5A 的直流负载电流。LMR514x0-Q1 具有可调开关频率，该频率可以通过外部电阻在 200kHz 至 1MHz 范围内调节，这提供了优化效率或外部元件尺寸的灵活性。该系列具有适用于各种应用的多个版本。LMR514x0-Q1 采用固定频率峰值电流模式控制。脉冲频率调制 (PFM) 版本在轻载时进入 PFM 模式，以实现高效率。提供了强制脉宽调制 (FPWM) 版本，可在轻载条件下实现低输出电压纹波、严格的输出电压调节以及恒定的开关频率。本参考设计使用 PFM 版本。该器件具有内部补偿功能，可节约设计时间并只需少量外部元件。精密使能和内部软启动等其他特性为各种应用提供了灵活且易于使用的设计。保护特性包括热关断、VIN 欠压锁定、逐周期电流限制和断续模式短路保护。该系列器件需要极少外部元件，引脚排列的设计可实现简单且优化的 PCB 布局。

2.3.4 TLV767-Q1

TLV767-Q1 是一款具有宽输入范围的线性稳压器，支持 2.5V 至 16V 的输入电压和高达 1A 的负载电流。输出范围为 0.8V 至 12V，在可调节版本中输出可高达 14.6V。该器件具有宽输入电压范围，因而非常适合由变压器次级绕组以及 10V 或 12V 等稳压轨供电。此外，该器件具有宽输出电压范围，因此能够为碳化硅 (SiC) 栅极驱动器和麦克风产生偏置电压，以及为微控制器 (MCU) 和处理器供电。TLV767-Q1 具有 1% 的输出精度，可为电源要求严格的数字负载供电。内部软启动电路可减小启动期间的浪涌电流，从而降低输入电容。高带宽 PSRR 性能在 1kHz 时大于 70dB，在 1MHz 时大于 46dB，因此有助于衰减上游直流/直流转换器的开关频率，并更大限度减少后置稳压器滤波。该器件具有 20Hz 至 20kHz 的高纹波抑制，是为音频组件供电的理想选择。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

硬件设计包括前面讨论的各模块以及一个 AC-MB，用于向 PCMD3180-Q1 和 TAS6511-Q1 发送 I2C 命令和音频信号。在最终系统中，AC-MB 控制器被兼容的 MCU 取代。评估此设计时，可以通过在 SCL 和 SDA 接头引脚处连接来使用任何 I2C 控制器。

3.2 软件

PPC3 GUI 用于发送 I2C 命令。脚本格式为：

R/W I2C 地址寄存器地址数据

3.2.1 示例脚本

以下 I2C 命令显示了如何设置 PCMD3180-Q1 以处理 8 通道 PDM 麦克风阵列，并设置 TAS6511-Q1 以进行音频播放。

```
## PCMD3180-Q1 Device Setup ##
#####
# PDM 8-channel: PDM DIN1 - Ch1 and Ch2, PDM DIN2 - Ch3 and Ch4,
# PDM DIN3 - Ch5 and Ch6, PDM DIN4 - Ch7 and Ch8
# PDMCLKx = 2.8224MHz
# FSYNC = 48kHz (Output Data Sample Rate), BCLK = 12.288MHz (BCLK#FSYNC = 256)
#####
w 98 00 00 # Select Page 0
w 98 01 01 # Software Reset
w 98 00 00 # Select Page 0
w 98 02 81 # Exit Sleep Mode
w 98 00 00 # Select Page 0
w 98 07 30 # TDM, 32-bit
w 98 0B 00 # Channel 1 to TDM slot 0
w 98 0C 01 # Channel 2 to TDM slot 1
w 98 0D 02 # Channel 3 to TDM slot 2
w 98 0E 03 # Channel 4 to TDM slot 3
w 98 0F 04 # Channel 5 to TDM slot 4
w 98 10 05 # Channel 6 to TDM slot 5
w 98 11 06 # Channel 7 to TDM slot 6
w 98 12 07 # Channel 8 to TDM slot 7
w 98 13 81 # Controller mode with MCLK = 12.288MHz
# w 98 13 01 # Replace the command above for Target Mode
w 98 14 48 # FSYNC = 48kHz, BCLK/FSYNC = 256
w 98 1F 40 # PDMCLK is 2.8224MHz or 3.072MHz
w 98 20 00 # PDMCLK Channel 1/3/5/7 latch on negative edge, Channel 2/4/6/8 latch on positive edge
w 98 21 A0 # GPIO1 configured as MCLK input
w 98 22 41 # GPO1 = PDMCLK1
w 98 23 41 # GPO2 = PDMCLK2
w 98 24 41 # GPO3 = PDMCLK3
w 98 25 41 # GPO4 = PDMCLK4
w 98 2B 45 # GPI1 = PDM DIN1, GPI2 = PDM DIN2
w 98 2C 67 # GPI3 = PDM DIN3, GPI4 = PDM DIN4
w 98 3C 40 # Enable Channel 1 as PDM input
w 98 41 40 # Enable Channel 2 as PDM input
w 98 46 40 # Enable Channel 3 as PDM input
w 98 4B 40 # Enable Channel 4 as PDM input
w 98 50 40 # Enable Channel 5 as PDM input
w 98 55 40 # Enable Channel 6 as PDM input
w 98 5A 40 # Enable Channel 7 as PDM input
w 98 5F 40 # Enable Channel 8 as PDM input
w 98 6C 20 # 1 biquad per channel
w 98 73 FF # Enable input channels 1-8
w 98 74 FF # Enable output slots 1-8
w 98 75 E0 # Enable MICBIAS, PLL, and all PDM channels
r 98 76 02 # Read device status

## TAS6511-Q1 Device Setup ##
#####
w B0 00 00 # Page switching (1st 00) to page 0 (2nd 00)
w B0 7F 00 # Change to book 0
w B0 01 19 # Device reset
w B0 00 00 # Page switching (1st 00) to page 0 (2nd 00)
w B0 7F 00 # Change to book 0
w B0 7D 11 # Enter setup mode (1 of 2)
```

```
w B0 7E FF # Enter setup mode (2 of 2)
w B0 00 01 # Page switching (00) to page 1 (01)
w B0 28 40 # Set DIG deglitch
w B0 57 01 # Enable Isense in Hi-Z
w B0 7D 00 # Exit setup mode (1 of 2)
w B0 7E 00 # Exit setup mode (2 of 2)
w B0 00 00 # Page switching (1st 00) to page 0 (2nd 00)
w B0 21 15 # TDM mode
w B0 23 0C # 32-bit word length
w B0 25 0C # 32-bit word length
w B0 61 05 # Enable SS
w B0 62 08 # SS period from 1/FSS to 8/FSS
w B0 00 00 # Page switching (1st 00) to page 0 (2nd 00)
w B0 03 40 # Set device to play mode
```

3.3 测试设置

设备：

- 音频精度 APx555 音频分析仪
- 音频转换器主板 (AC-MB)
- 电源引脚 - 5V 至 19V , 3A
- 2Ω 负载

工作台测试设置：

- PVDD = 14.4V
- 2Ω 负载

3.4 测试结果

总谐波失真+噪声 (THD + N) 是不需要的失真和背景噪声相对于纯原始信号的比率。这可以相对于输入信号以 dBFS 或 % 为单位进行测量。图 3-1 显示了 PCMD3180-Q1 记录路径在整个频率范围内的 THD + N 性能，而图 3-2 显示了通过 TAS6511-Q1 的播放路径的 THD + N 性能。

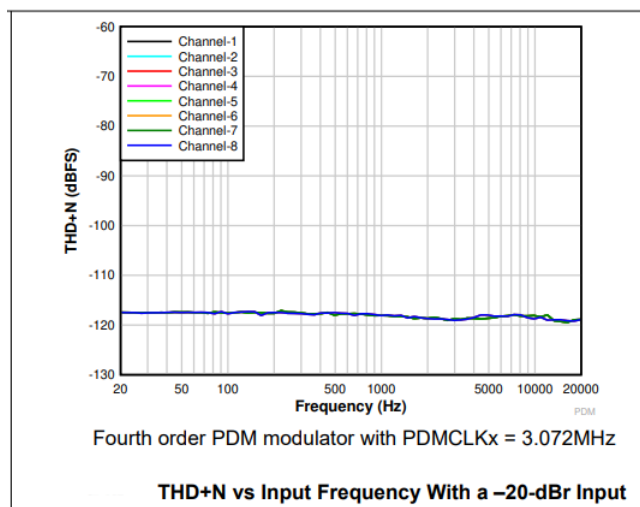


图 3-1. 记录 THD+N 与输入频率的关系

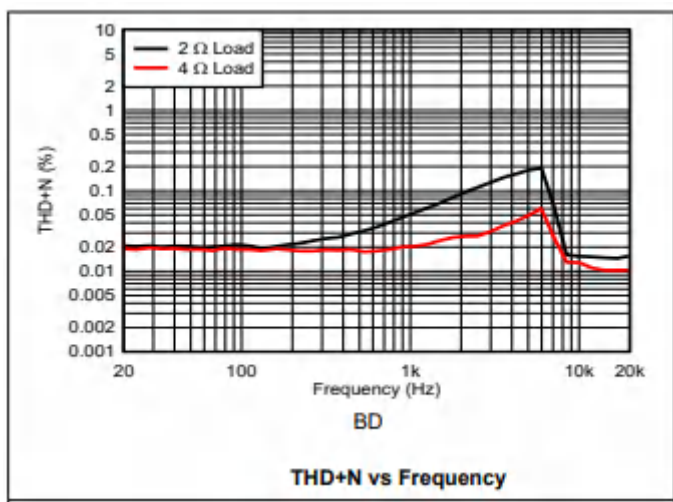


图 3-2. 回放 THD+N 与频率的关系

图 3-3 显示了 PCMD3180-Q1 记录路径上 PDM 输入的 FFT。该测量使用四阶 PDM 调制器，因为这在典型的 PDM 数字麦克风更常见。然而，PCMD3180-Q1 采用五阶 PDM 调制器，其动态范围性能提升了 10dB。

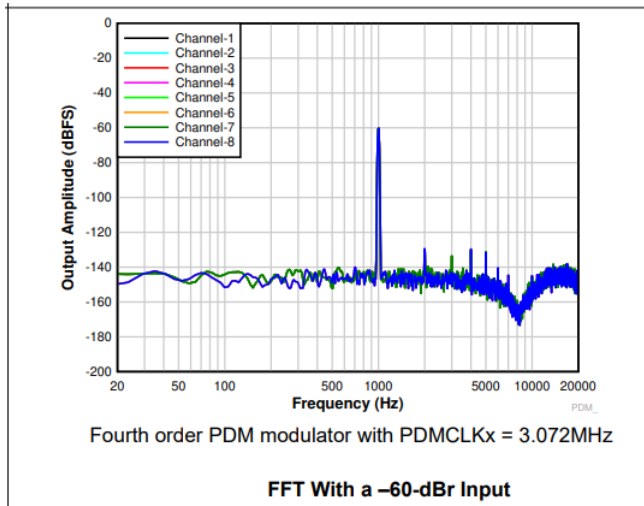


图 3-3. PDM FFT

对于 14.4V THD，本设计可以在 $2\ \Omega$ 负载上以 10% PVDD +N 电平驱动高达 50W 的功率，如图 3-4 中的深蓝色线所示。

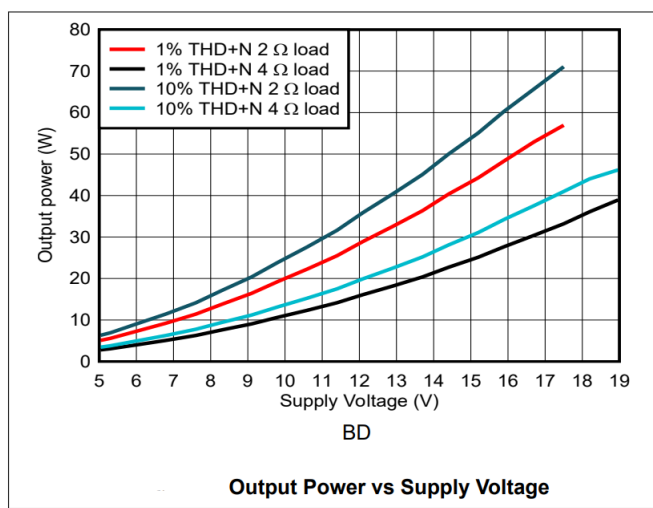


图 3-4. 输出功率与 PVDD 电压间的关系

图 3-5 展示了回放路径 THD + N 如何随输出功率而变化。

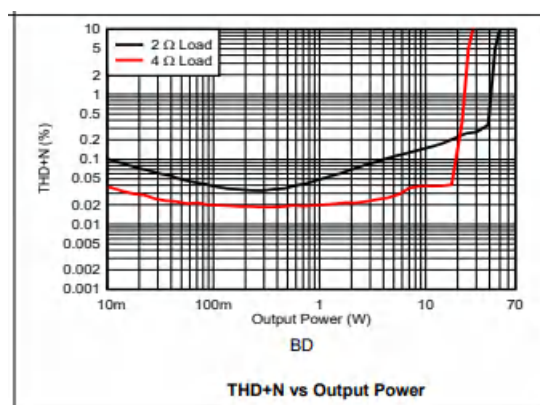


图 3-5. 回放 THD+N 与输出功率的关系

D 类放大器旨在提高高输出功率下的效率。图 3-6 显示了 TIDA-060054 的效率与输出功率之间的关系。

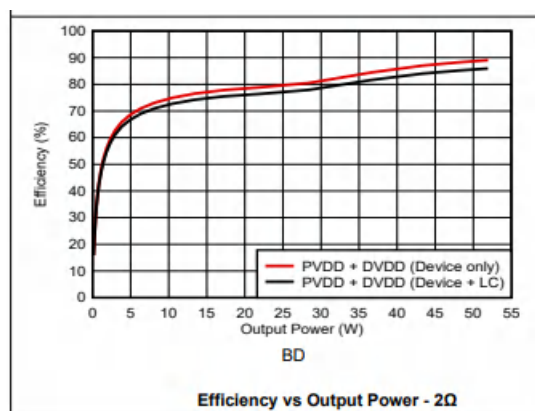


图 3-6. 效率与输出功率间的关系， $2\ \Omega$ 负载

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-060054](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-060054](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

以下指南可以优化器件性能：

- 将散热焊盘连接至地。采用过孔阵列将器件散热焊盘 (即器件正下方的区域) 连接至接地平面，以帮助器件散热。
- 电源的去耦电容器必须放置在靠近器件引脚的位置。
- 电源去耦电容器必须使用具有低 ESR 的陶瓷类型。
- 必须使用外部电容器对器件内部基准电压进行滤波。将滤波电容器放置在 VREF 引脚附近以获得峰值性能。
- 直接将 VREF 和 MICBIAS 外部电容器接地端子短接至 AVSS 引脚，无需为该连接引线使用任何过孔。
- 将 MICBIAS 电容器 (具有低等效串联电阻) 放置在靠近具有最小引线阻抗的器件处。
- 使用接地平面为器件和去耦电容器之间的电源和信号电流提供最低阻抗。将器件正下方的区域视为器件的中心接地区域，所有器件接地必须直接连接到该区域。
- LC 滤波器中电容器的接地连接具有直接路径，可返回至器件以及 TAS6511-Q1 所在 PCB 同一层上的接地回路。该直接路径可以改善共模 EMI 抑制。
- PVDD 上的去耦电容器非常靠近器件，接地回路靠近接地引脚。
- 与器件引脚位于同一侧的接地平面能够为高频开关电流提供极低的环路阻抗，有助于降低 EMI。在该平面区域放置多个接地过孔，以实现低阻抗接地返回路径并改善散热能力。
- 必须尽可能缩短从输出引脚到电感器的布线，以便允许开关电流的最小环路。

4.2 工具与软件

4.2.1 工具

[PCMX140Q1EVM-PDK](#)，PCMD3180-Q1 评估板

[TAS6511-Q1-DESIGN](#)，TAS6511-Q1 技术文档申请表

[TAS6511Q1EVM](#)，TAS6511-Q1 评估板

4.2.2 软件

该参考设计利用 [PurePath Console 3](#) 的 I2C 主设备进行 I2C 编程。

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[PCMD3180-Q1 汽车八通道脉冲密度调制输入至 TDM 或 I²S 输出转换器](#)，数据表
2. 德州仪器 (TI)，[TAS6511-Q1 具有电流检测和实时负载诊断功能的 50W、2MHz 数字输入单通道汽车级无散热器 D 类音频放大器](#)，数据表
3. 德州仪器 (TI)，[LMR514x0-Q1 具有低 IQ 的 36V、4A/5A 汽车级同步降压转换器](#)，数据表
4. 德州仪器 (TI)，[TLV767-Q1 1A、16V 线性稳压器](#)，数据表

4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或自行提出问题，以获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的 [使用条款](#)。

商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

GARRET GODFREY 是德州仪器 (TI) 音频转换器团队的应用工程师。他于 2025 年从佛罗里达大学毕业后，开始在 TI 工作。

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (May 2026) to Revision A (August 2026)	Page
• 修复了示例脚本中的小问题.....	9

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