

TPA6404-Q1 具有负载突降保护与 I²C 诊断功能的 45W 2MHz 模拟输入四个通道 车用 D 类音频放大器

1 特性

- 高级负载诊断
 - 交流诊断功能，可通过阻抗与相位响应实现高频扬声器检测
 - 集成正弦波发生器
- 轻松满足 CISPR25-L5 电磁兼容性规范
- 符合面向汽车应用的 AEC-Q100 标准：
 - 温度等级 1：-40°C 至 125°C T_A
 - 器件 HBM ESD 分类等级：3A
 - 器件 CDM ESD 分类等级：C4B
- 音频输入
 - 四通道差分模拟输入
 - 四个 I²C 控制的增益选项
 - 适用于低值交流耦合电容器的高输入阻抗
- 音频输出
 - 四个通道桥式负载 (BTL)，可选并联 BTL (PBTL)
 - 高达 2.1MHz 的输出开关频率
 - 14.4V 时，为 4Ω 负载提供 27W 10% 的总谐波失真，
 - 14.4V 时，为 2Ω 负载提供 45W 10% 的总谐波失真
 - 14.4V PBTL 时，为 1Ω 负载提供 85W 10% 的总谐波失真，
- 14.4V，1kHz 时，4Ω 负载的音频性能
 - THD+N < 0.01%
 - 42μV_{RMS} 输出噪声
 - 90dB 串扰
- 负载诊断
 - 输出开路与短路负载
 - 输出对电池短路或对地短路
 - 线路输出检测高达 6kΩ
 - 无需输入时钟即可运行
- 保护
 - 输出电流限制
 - 输出短路保护
 - 40V 负载突降
 - 偶然接地开路与电源容错
 - 直流失调电压
 - 在温度范围内
 - 欠压和过压
- 常规运行
 - 4.5V 至 18V 的电源电压
 - I²C 控制，具有 4 个地址选项
 - 削波检测与热折返

2 应用

- 汽车音响主机
- 汽车外部放大器模块

3 说明

TPA6404-Q1 器件是一款采用 2.1MHz PWM 开关频率的四通道模拟输入 D 类音频放大器，能够以非常小的 PCB 尺寸 (4.5cm²) 实现已进行成本优化的解决方案，可以在低至 4.5V 的电压下全面运行启动/停止事件，并且能够在高达 100kHz 的音频带宽下提供出色音质。

TPA6404-Q1 D 类音频放大器采用可用于入门级汽车音响主机的最佳设计，能够作为系统设计的一部分，提供模拟音频输入信号。

相较于传统的线性放大器解决方案，D 类拓扑结构能够显著提高效率。

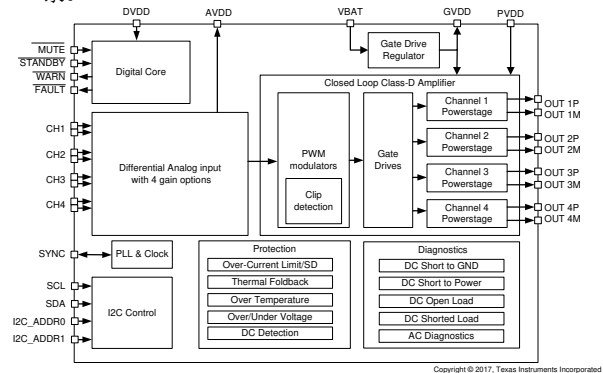
输出开关频率可以高于 AM 频带 (能够消除 AM 频带干扰，降低输出滤波器尺寸与成本)。

该器件采用带外露散热焊盘的 56 引脚 HSSOP 封装。

器件信息

器件型号	封装 ⁽¹⁾	封装尺寸 (标称值)
TPA6404-Q1	HSSOP (56)	18.41mm × 7.49mm

(1) 如需了解所有可用封装，请参阅数据表末尾的可订购产品附录。



方框图



内容

1 特性	1	8 寄存器	25
2 应用	1	8.1 寄存器映射.....	25
3 说明	1	9 应用和实施	43
4 引脚配置和功能	3	9.1 应用信息.....	43
5 规格	5	9.2 典型应用.....	45
5.1 绝对最大额定值.....	5	9.3 电源相关建议.....	48
5.2 ESD 等级.....	5	9.4 布局.....	48
5.3 建议运行条件.....	6	10 器件和文档支持	51
5.4 热性能信息.....	6	10.1 文档支持.....	51
5.5 电气特性.....	7	10.2 接收文档更新通知.....	51
5.6 典型特性.....	10	10.3 静电放电警告.....	51
6 参数测量信息	13	10.4 术语表.....	51
7 详细说明	13	10.5 支持资源.....	51
7.1 概述.....	13	10.6 商标.....	51
7.2 功能方框图.....	13	11 修订历史记录	51
7.3 特性说明.....	14	12 机械、封装和可订购信息	53
7.4 器件功能模式.....	21	12.1 封装选项附录.....	54
7.5 编程.....	22		

4 引脚配置和功能

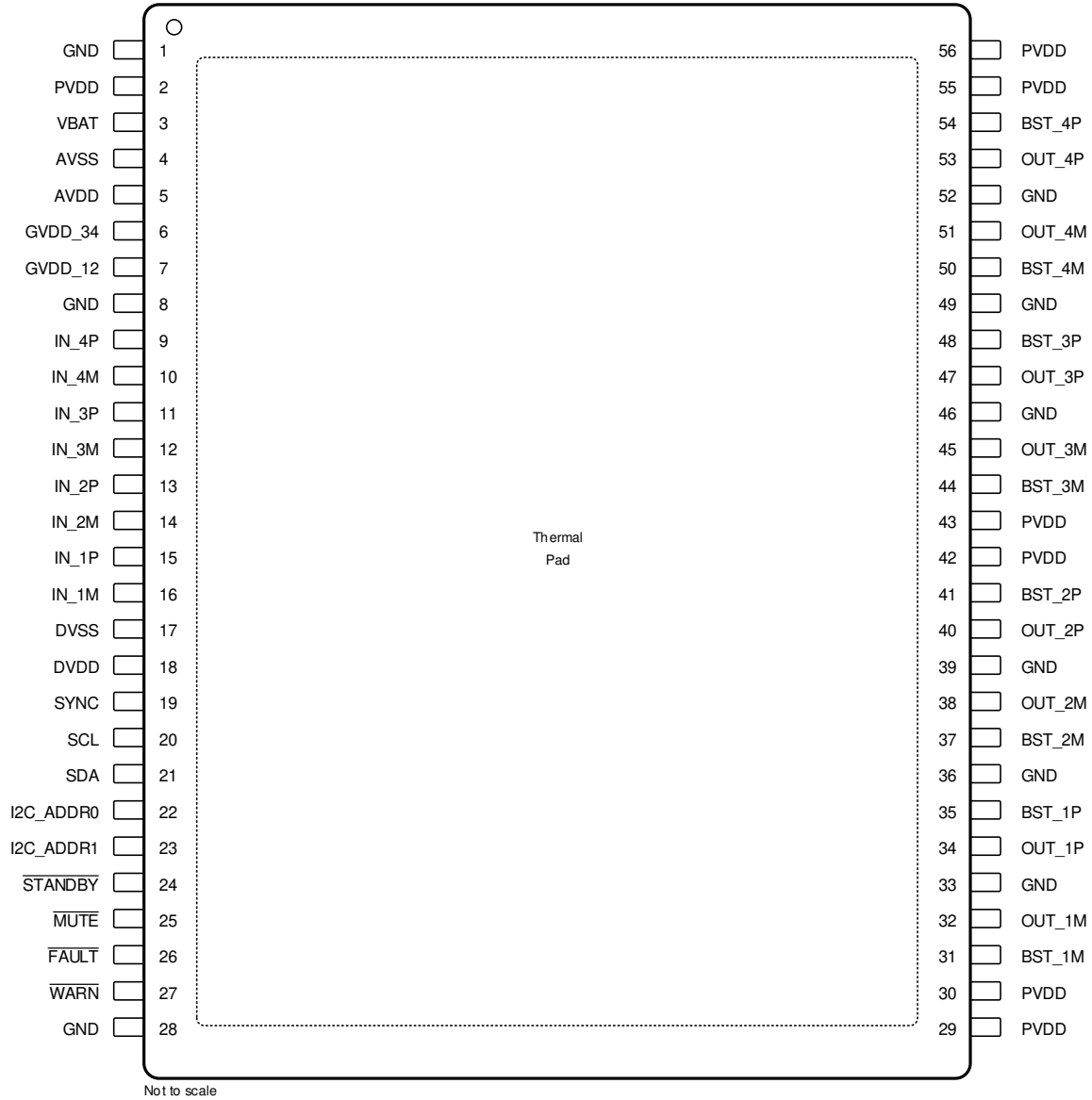


图 4-1. DKQ 封装 56 引脚 HSSOP (带有外露散热焊盘) 俯视图

表 4-1. 引脚功能

引脚		类型 ⁽¹⁾	说明
名称	编号		
AVDD	5	PWR	电压稳压器旁路。在 AVDD 与 AVSS 之间连接一个 1 μ F 电容器
AVSS	4	PWR	AVDD 旁路电容器回路
BST_1M	31	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_1P	35	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_2M	37	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_2P	41	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_3M	44	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_3P	48	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚

表 4-1. 引脚功能 (续)

引脚		类型 ⁽¹⁾	说明
名称	编号		
BST_4M	50	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
BST_4P	54	PWR	高侧栅极驱动器的自举电容器连接引脚
DVDD	18	PWR	DVDD 电源输入。在 DVDD 与 DVSS 之间连接一个 1 μ F 电容器
DVSS	17	GND	DVDD 接地基准
FAULT	26	DO	报告故障 (低电平有效, 漏极开路), 100-k Ω 内部上拉电阻器
GND	1、8、28、 33、36、 39、46、 49、52	GND	接地
GVDD_34	6	PWR	通道 3 与通道 4 的栅极驱动稳压器, 源自 VBAT 输入引脚。将 2.2 μ F 电容器连接至 GND
GVDD_12	7	PWR	通道 1 与通道 2 的栅极驱动稳压器, 源自 VBAT 输入引脚。将 2.2 μ F 电容器连接至 GND
I2C_ADDR0	22	DI	I ² C 地址引脚。请参阅表 7-7
I2C_ADDR1	23		
IN_1M	16	AI	通道负输出
IN_1P	15	AI	通道正输出
IN_2M	14	AI	通道负输出
IN_2P	13	AI	通道正输出
IN_3M	12	AI	通道负输出
IN_3P	11	AI	通道正输出
IN_4M	10	AI	通道负输出
IN_4P	9	AI	通道正输出
MUTE	25	DI	将器件输出静音 (低电平有效), 100k Ω 内部下拉电阻器
OUT_1M	32	否	通道的负输出
OUT_1P	34	PO	通道的正输出
OUT_2M	38	否	通道的负输出
OUT_2P	40	PO	通道的正输出
OUT_3M	45	否	通道的负输出
OUT_3P	47	PO	通道的正输出
OUT_4M	51	否	通道的负输出
OUT_4P	53	PO	通道的正输出
PVDD	2、29、30、 42、43、 55、56	PWR	PVDD 电压输入 (可连接至电池)
SCL	20	DI	I ² C 时钟输入
SDA	21	DI/O	I ² C 数据输入和输出
STANDBY	24	DI	启用低功耗待机状态 (低电平有效), 1M Ω 内部下拉电阻器
SYNC	19	DI/O	同步时钟输入或输出
VBAT	3	PWR	电池电压输入
WARN	27	DO	削波与过热警告 (低电平有效、漏极开路), 100k Ω 内部上拉电阻器
散热焊盘	—	GND	为器件提供电气与热连接。散热器必须连接到 GND。

(1) AI=模拟输入, GND=接地, PWR=电源, PO=正输出, NO=负输出, DI=数字输入, DO=数字输出, DI/O=数字输入与输出, NC=无连接

5 规格

5.1 绝对最大额定值

在自然通风条件下的工作温度范围内测得 (除非另有说明) ⁽¹⁾

		最小值	最大值	单位
PVDD、VBAT	相对于 GND 的直流电源电压范围	-0.3	30	V
V _{MAX}	瞬态电源电压范围 - PVDD, VBAT t ≤ 400ms 暴露	-1	40	
V _{RAMP}	电源电压斜坡速率 - PVDD、VBAT		75	V/ms
V _{IN}	音频差分输入引脚: IN _{xP} , IN _{xM}	-0.3	6.5	V
DVDD	相对于 GND 的直流电源电压范围	-0.3	3.5	V
I _{MAX}	每个引脚的最大电流 (PVDD, VBAT, Out xP, Out xM, GND)		±8	A
I _{MAX_PULSED}	每个 PVDD 引脚的脉冲电源电流 (单次触发) t < 100 ms		±12	
V _{LOGIC}	逻辑引脚输入电压 (SCL, SDA, 静音, 待机, I2C ADDR _x)	-0.3	DVDD + 0.5	V
V _{GND}	GND 引脚之间的最大电压		±0.3	
T _J	最大工作结温范围	-55	150	°C
T _{stg}	贮存温度范围	-55	150	

(1) 超出“绝对最大额定值”运行可能会对器件造成永久损坏。绝对最大额定值并不表示器件在这些条件下或在建议运行条件以外的任何其他条件下能够正常运行。如果超出“建议运行条件”但在“绝对最大额定值”范围内使用, 器件可能不会完全正常运行, 这可能影响器件的可靠性、功能和性能并缩短器件寿命。

5.2 ESD 等级

		值	单位	
V _(ESD)	静电放电	人体放电模型 (HBM), 符合 AEC Q100-002 标准 ⁽¹⁾	±4000	
		充电器件模型 (CDM), 符合 AEC Q100-011 标准	所有引脚	±500
			转角引脚 (1、28、29 和 56)	±1000

(1) AEC Q100-002 指示应当按照 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 规范执行 HBM 应力测试。

5.3 建议运行条件

			最小值	典型值	最大值	单位
PVDD	输出 FET 电源电压范围	相对于 GND	4.5	14.4	18	V
VBAT	电池电源电压输入	相对于 GND	4.5	14.4	18	V
DVDD	直流逻辑电源	相对于 GND	3.0	3.3	3.5	V
T _A	环境温度		-40		125	°C
T _J	结温	需要进行充分的散热设计	-40		150	
R _L	标称扬声器负载阻抗	BTL 模式	2	4		Ω
		PBTL 模式	1	2		
R _{PU_I2C}	SDA 和 SCL 引脚上的 I ² C 上拉电阻		1	4.7	10	kΩ
C _{Bypass}	旁路引脚上的外部电容	引脚 2、引脚 3、引脚 5 与引脚 18		1		μF
C _{GVDD}	GVDD 引脚上的外部电容	引脚 6 与引脚 7		2.2		μF
C _{OUT}	OUT 引脚上连接到 GND 的外部电容	按直流诊断时序设置的限值		1	3.3	μF
L _O	输出滤波器电感 - I _{SD}	I _{SD} 电流电平下的最小输出滤波器电感。适用于接地短路保护或对电源短路保护。	1			μH
L _O	输出滤波器电感 - I-LIMIT	ILIMIT 电流电平下的最小输出滤波器电感。适用于电流限制。	2			μH

5.4 热性能信息

热指标 ⁽¹⁾		TPA6404-Q1 ⁽²⁾	单位
		DKQ (HSSOP)	
		56 引脚	
R _{θJA}	结至环境热阻	-	°C/W
R _{θJC(top)}	结至外壳 (顶部) 热阻	0.7	°C/W
R _{θJB}	结至电路板热阻	-	°C/W
Ψ _{JT}	结至顶部特征参数	-	°C/W
Ψ _{JB}	结至电路板特征参数	10	°C/W
R _{θJC(bot)}	结至外壳 (底部) 热阻	-	°C/W

(1) 有关新旧热性能指标的更多信息，请参阅 [半导体和 IC 封装热性能指标](#) 应用报告。

(2) JEDEC 标准 4 层 PCB。

5.5 电气特性

测试条件 (除非另有说明) : $T_C=25^{\circ}\text{C}$, $PVDD=VBAT=14.4\text{V}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $R_L=4\Omega$, $P_{\text{out}}=1\text{W/ch}$, $f_{\text{out}}=1\text{kHz}$, $F_{\text{sw}}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器, 使用重建滤波电感器: Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M, 默认 I²C 设置, 参阅应用图

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
工作电流						
I_{PVDD_IDLE}	PVDD 空闲电流	所有通道播放, 无音频输入		65	80	mA
$I_{PVDD+VBAT_IDLE}$	PVDD+VBAT 空闲电流	所有通道播放, 无音频输入		155	190	mA
I_{VBAT_IDLE}	VBAT 空闲电流	所有通道播放, 无音频输入		90	110	mA
I_{PVDD_STBY}	PVDD 待机电流	待机激活, $DVDD=0\text{V}$		0.08		μA
I_{VBAT_STBY}	VBAT 待机电流	待机激活, $DVDD=0\text{V}$		3.0		μA
$I_{\text{TOTAL_STBY}}$	PVDD+VBAT 待机电流	待机激活, $DVDD=0\text{V}$		3.0	7.0	μA
I_{DVDD}	DVDD 电源电流	所有通道播放, -60dB 信号		6.2	7.0	mA
输出功率						
P_{O_BTL}	每通道输出功率, BTL	4 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	20	22		W
		4 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	24	27		
P_{O_BTL}	每通道输出功率, BTL	2 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	31	38		W
		2 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	40	45		
P_{O_BTL}	每通道输出功率, BTL	4 Ω , $PVDD=18\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	32	35		W
		4 Ω , $PVDD=18\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	40	44		
P_{O_PBTL}	并行模式下每通道输出功率、PBTL	2 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	40	44		W
		2 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	50	54		
P_{O_PBTL}	并行模式下每通道输出功率、PBTL	1 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	62	70		W
		1 Ω , $PVDD=14.4\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	78	85		
P_{O_PBTL}	并行模式下每通道输出功率、PBTL	2 Ω , $PVDD=18\text{V}$, $\text{THD+N}=1\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	63	68		W
		2 Ω , $PVDD=18\text{V}$, $\text{THD+N}=10\%$, $T_C=75^{\circ}\text{C}$	78	83		
EFF_P	电源效率	四通道工作, 每通道输出功率 25W, 4 Ω 负载, $PVDD=14.4\text{V}$, $T_C=25^{\circ}\text{C}$ (包括输出滤波器损耗)		86%		
音频性能						
V_n	输出噪声电压	零输入, A 加权, 10dB 增益, $PVDD=14.4\text{V}$		42		μV
		零输入, A 加权, 16dB 增益, $PVDD=14.4\text{V}$		48		
		零输入, A 加权, 22dB 增益, $PVDD=18\text{V}$		58		
		零输入, A 加权, 28dB 增益, $PVDD=18\text{V}$		79		
串扰	通道串扰	$PVDD = 14.4\text{Vdc} + 1V_{\text{RMS}}$, $f = 1\text{kHz}$		90		dB
PSRR	电源抑制比	$PVDD = 14.4\text{Vdc} + 1V_{\text{RMS}}$, $f = 1\text{kHz}$		75		dB
THD+N	总谐波失真 + 噪声			0.01		%
G	增益	1 级	9.0	9.5	10.0	dB
		2 级	15.0	15.5	16.0	
		3 级 (默认)	21.0	21.5	22.0	
		4 级	27.0	27.5	28.0	
G_{CH}	通道间增益变化		-0.5	0	0.5	dB
G_{MUTE}	输出衰减	将 MUTE 置为有效并且与向 4 Ω 负载播放 1W 音频的放大器进行比较	100	110		dB
V_{CLICK}	卡嗒和爆裂	零输入, ITU 滤波器, 22dB 增益, $PVDD=14.4\text{V}$		5		mV
线路输出播放性能						
V_n_{LINEOUT}	线路输出噪声电压	零输入, A 加权, 通道设置为线路模式, $PVDD=14.4\text{V}$, $R_L=600\Omega$		42		μV
THD+N	线路输出总谐波失真+噪声	$V_O=2\text{Vrms}$, 通道设置为线路模式, $PVDD=14.4\text{V}$		0.02		%
模拟输入引脚						
R_{IN}	输入阻抗	10dB 增益		80		k Ω
		16dB 增益		40		k Ω
		22dB 增益		20		k Ω
		28dB 增益		10		k Ω

TPA6404-Q1

ZHCSHH7B - JANUARY 2018 - REVISED JANUARY 2025

 测试条件 (除非另有说明) : $T_C=25^{\circ}\text{C}$, $PVDD=VBAT=14.4\text{V}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $R_L=4\Omega$, $P_{out}=1\text{W/ch}$, $f_{out}=1\text{kHz}$, $F_{sw}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器, 使用重建滤波电感器: Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M, 默认 I²C 设置, 参阅应用图

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V _{IN}	最大输入电压摆幅 (单端)			1		V _{RMS}
	最大输入电压摆幅 (差动)	正输入等于负输入		2		
I _{IN}	最大输入电流				±1	mA
数字输入引脚						
V _{IH}	输入逻辑高电平		70			%DVDD
V _{IL}	输入逻辑低电平				30	
I _{IH}	输入逻辑电流	V _I = DVDD			15	uA
I _{IL}		V _I = 0			-15	
PWM 输出级						
R _{DS(on)}	FET 漏源电阻	25°C, 包括键合线和封装电阻		120		mΩ
R _{DS(on)}	FET 漏源电阻	25°C, 不包括键合线和封装电阻		90		mΩ
过压 (OV) 保护						
V _{PVDD_OV}	PVDD 过压关断		18.5	21	23	V
V _{PVDD_OV_HYS}	PVDD 过压关断迟滞			0.5		V
V _{VBAT_OV}	VBAT 过压关断		18.5	21	23	V
V _{VBAT_OV_HYS}	VBAT 过压关断迟滞			0.5		V
欠压 (UV) 保护						
VBAT _{UV_SET}	VBAT 欠压关断设置			4	4.5	V
VBAT _{UV_CLEAR}	VBAT 欠压关断清除			4.2		
PVDD _{UV_SET}	PVDD 欠压关断设置			4	4.5	
PVDD _{UV_CLEAR}	PVDD 欠压关断清除			4.2		
旁路电压						
V _{GVDD}	栅极驱动旁路引脚电压			7		V
V _{AVDD}	模拟旁路引脚电压			6		
上电复位 (POR)						
V _{POR}	POR 的 DVDD 电压			1.8	2.1	V
V _{POR_HY}	DVDD POR 恢复迟滞电压			0.5		
过热 (OT) 保护						
OTW(i)	通道过热警告			150		°C
OTSD(i)	通道过热关断			175		
OTW	全局连接过热警告	通过寄存器 0x01 第 5-6 位设置, 默认值		130		
OTSD	全局连接过热关断			160		
OT _{HYS}	过热迟滞			15		
负载过流保护						
I _{LIM}	过流限值	OC 级别 1, 负载电流		4.8		A
		OC 级别 2, 负载电流	6	6.5		
I _{SD}	过流关断	OC 级别 1, 电源、接地或其他通道的任何短路		7		
		OC 级别 2, 电源、接地或其他通道的任何短路		9		
直流检测						
DC _{FAULT}	输出直流故障保护	PVDD = 14.4V		2	2.5	V
数字输出引脚						
V _{OH}	逻辑高电平的输出电压	I = ±2mA		90		%DVDD
V _{OL}	逻辑低电平的输出电压				10	
SYNC						
f _{sync}	支持的同步频率, 控制器模式	寄存器 0x02 第 6-4 位: 101		1.8		Mhz
		寄存器 0x02 第 6-4 位: 110		2.1		Mhz
		寄存器 0x02 第 6-4 位: 111		2.3		Mhz
Δf _{sync}	支持的同步频率偏差, 目标模式		-10		10	%
D _{sync}	支持的同步占空比, 目标模式		45%	50%	55%	

测试条件 (除非另有说明) : $T_C=25^\circ\text{C}$, $PVDD=VBAT=14.4\text{V}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $R_L=4\Omega$, $P_{out}=1\text{W/ch}$, $f_{out}=1\text{kHz}$, $F_{sw}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器 , 使用重建滤波电感器 : Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M , 默认 I²C 设置 , 参阅应用图

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
负载诊断					
S2P	用于检测 OUT 引脚与 PVDD 之间短路的最大电阻			500	Ω
S2G	用于检测 OUT 引脚与接地之间短路的最大电阻			200	
SL	负载短路检测容差	$R_L=4\Omega$, Hi-Z 中的其他通道	±0.5		
OL	检测到开路负载的最小阻抗	Hi-Z 中的其他通道	70		
T _{DC_DIAG}	直流诊断时间	4 通道 , 无故障	231		ms
LO	线路输出最大可检测阻抗	如果负载电阻低于该值 , 器件将报告 LO 负载		6	kΩ
T _{LINE_DIAG}	线路输出诊断时间		40		ms
AC _{IMP}	交流阻抗精度	VBB=19V , $R_L=4\Omega$	±0.75		Ω
		Z _{OUT} (包括 LC 滤波器) , $f=19\text{kHz}$	25%		
T _{AC_DIAG}	交流诊断时间	4 个通道 , $f=19\text{kHz}$	550		ms
F _{AC}	交流诊断测试频率	默认值	18.75		kHz
I²C_ADDR PINS					
t _{I2C_ADDR}	I ² C 地址设置所需延长时间	从待机引脚释放到地址设置	300		μs
I²C 控制器端口					
t _{BUS}	启动条件和停止条件之间的总线空闲时间		1.3		μs
t _{HOLD1}	SCL 至 SDA 的保持时间		0		ns
t _{HOLD2}	启动条件至 SCL 的保持时间		0.6		μs
t _{START}	DVDD 上电复位后的 I ² C 启动时间			12	ms
t _{RISE}	SCL 和 SDA 的上升时间			300	ns
t _{FALL}	SCL 和 SDA 的下降时间			300	ns
t _{SU1}	SDA 到 SCL 的建立		100		ns
t _{SU2}	SCL 到启动条件的建立		0.6		μs
t _{SU3}	SCL 到停止条件的建立		0.6		μs
t _{W(H)}	SCL “高电平”所需的脉冲持续时间		0.6		μs
t _{W(L)}	SCL “低电平”所需的脉冲持续时间		1.3		μs

5.6 典型特性

$T_A=25^{\circ}\text{C}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $V_{BAT}=PVDD=14.4\text{V}$, $R_L=4\Omega$, $f_{IN}=1\text{kHz}$, $f_{SW}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器, 默认 I²C 设置, 使用重建滤波电感器: 对于 Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M, 参阅 节 9.2.1.4 图 9-2 中的应用图 (除非另有说明)

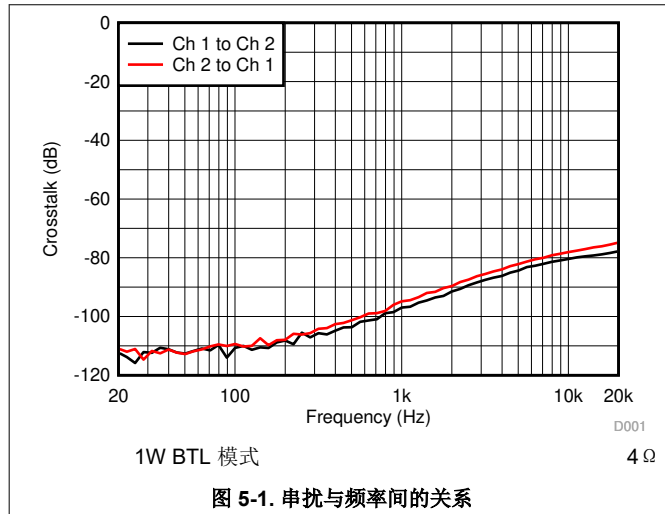


图 5-1. 串扰与频率间的关系

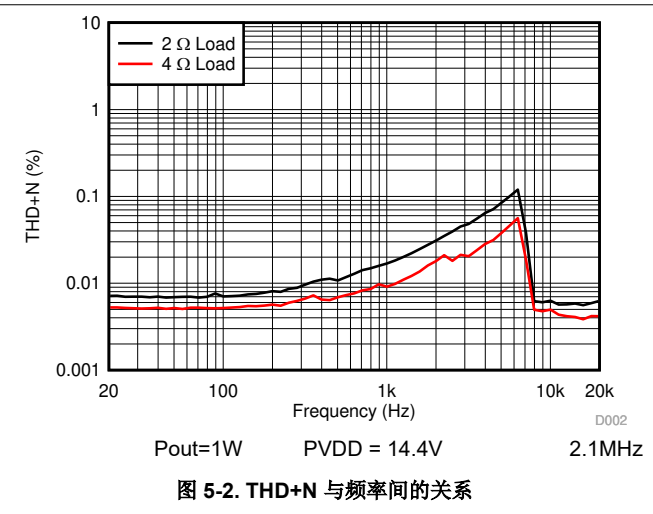


图 5-2. THD+N 与频率间的关系

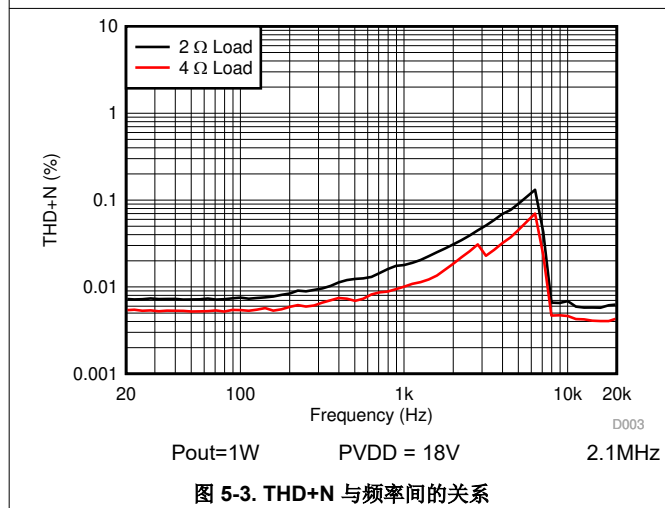


图 5-3. THD+N 与频率间的关系

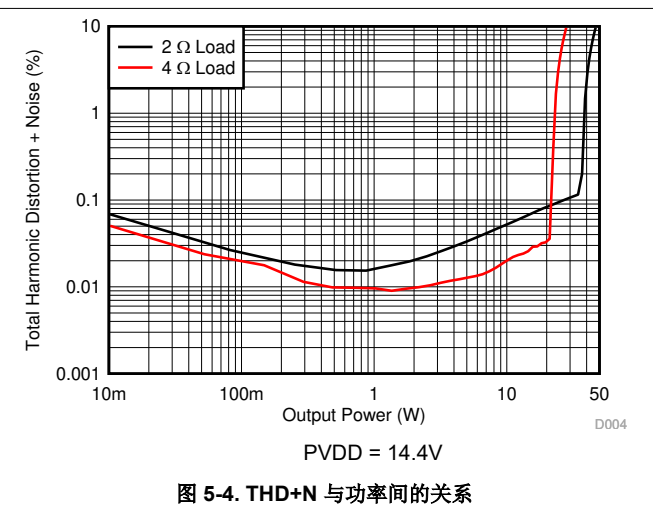


图 5-4. THD+N 与功率间的关系

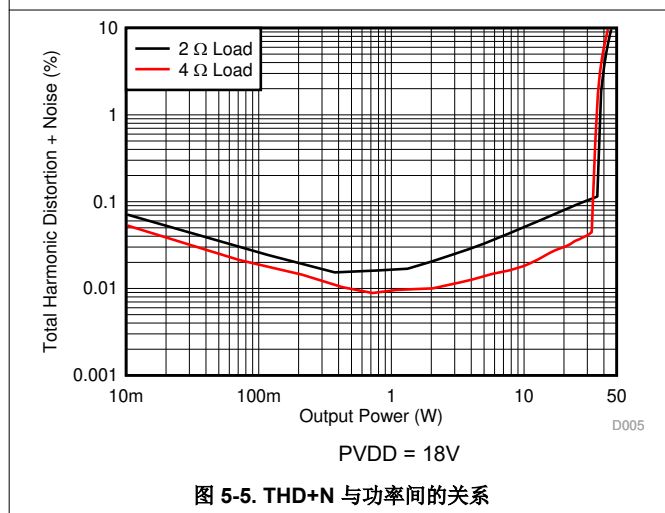


图 5-5. THD+N 与功率间的关系

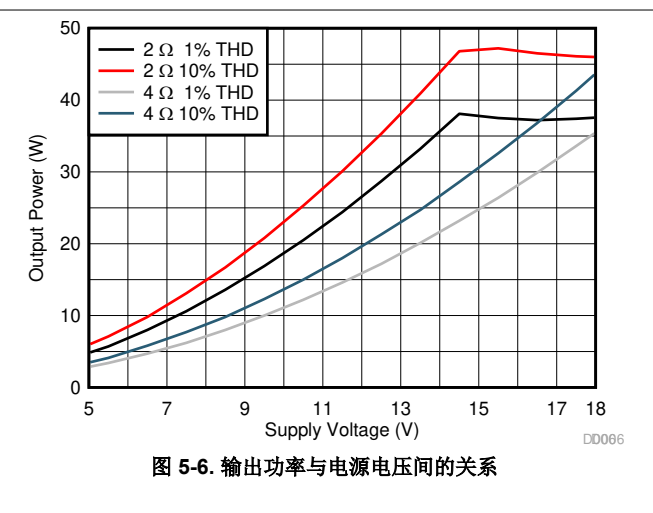


图 5-6. 输出功率与电源电压间的关系

5.6 典型特性 (续)

$T_A=25^{\circ}\text{C}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $V_{BAT}=PVDD=14.4\text{V}$, $R_L=4\ \Omega$, $f_{IN}=1\text{kHz}$, $f_{SW}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器, 默认 I²C 设置, 使用重建滤波电感器: 对于 Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M, 参阅 节 9.2.1.4 图 9-2 中的应用图 (除非另有说明)

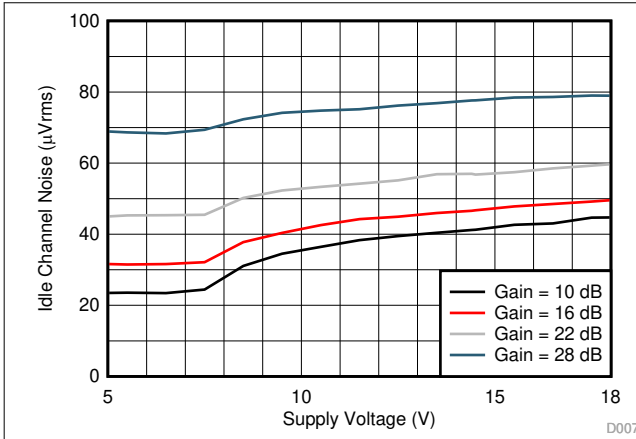


图 5-7. 噪声与电源电压间的关系

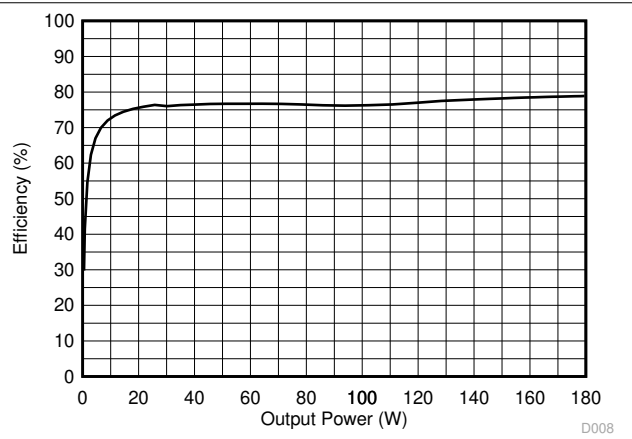


图 5-8. 效率与输出功率间的关系

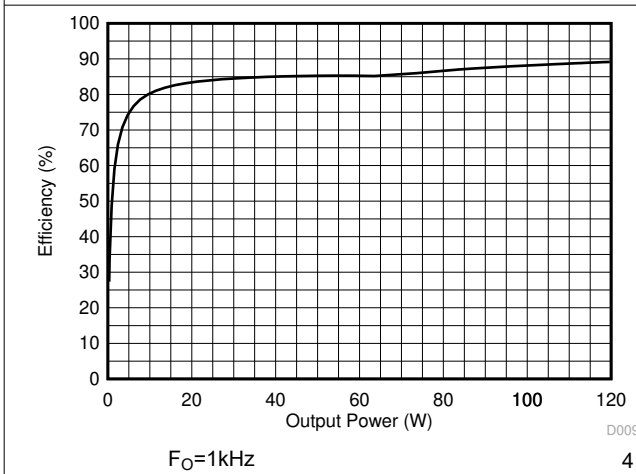


图 5-9. 效率与输出功率间的关系

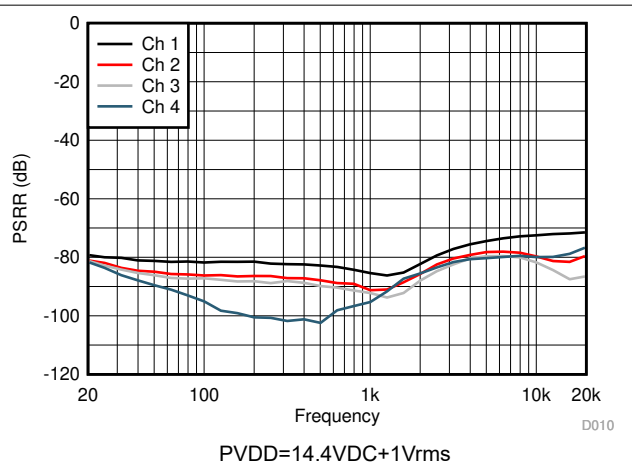


图 5-10. PVDD PSRR 与频率间的关系

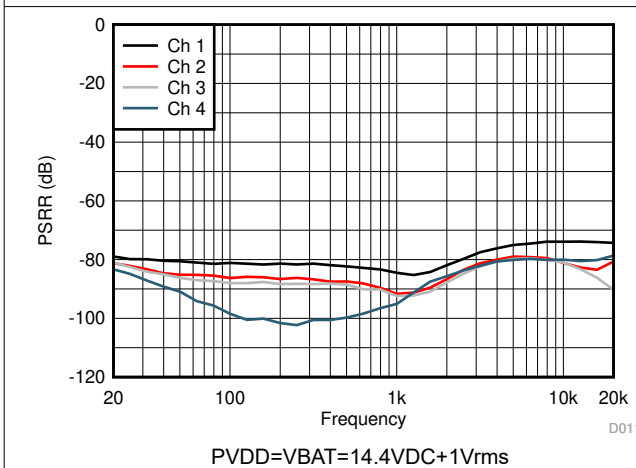


图 5-11. PVDD+VBAT PSRR 与频率之间的关系

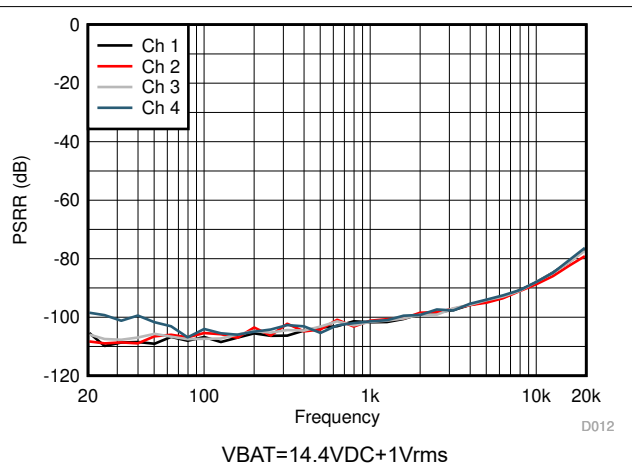


图 5-12. VBAT PSRR 与频率间的关系

5.6 典型特性 (续)

$T_A=25^{\circ}\text{C}$, $DVDD=3.3\text{V}$, $VBAT=PVDD=14.4\text{V}$, $R_L=4\ \Omega$, $f_{IN}=1\text{kHz}$, $f_{SW}=2.1\text{MHz}$, AES17 滤波器, 默认 I²C 设置, 使用重建滤波电感器: 对于 Murata Toko 的 DFEG7030D-3R3M, 参阅 节 9.2.1.4 图 9-2 中的应用图 (除非另有说明)

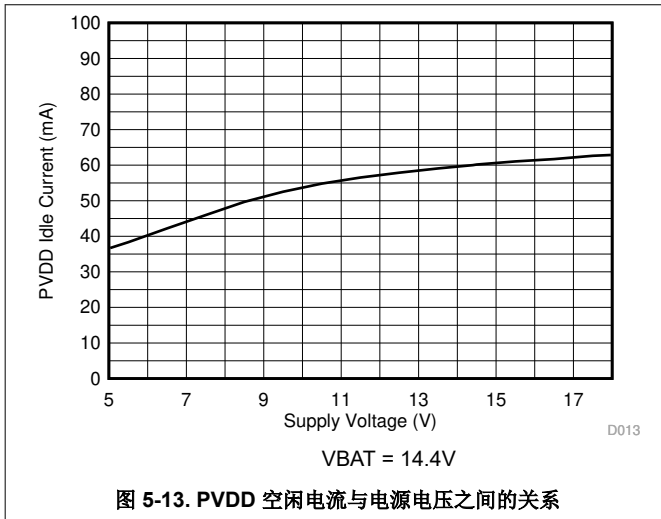


图 5-13. PVDD 空闲电流与电源电压之间的关系

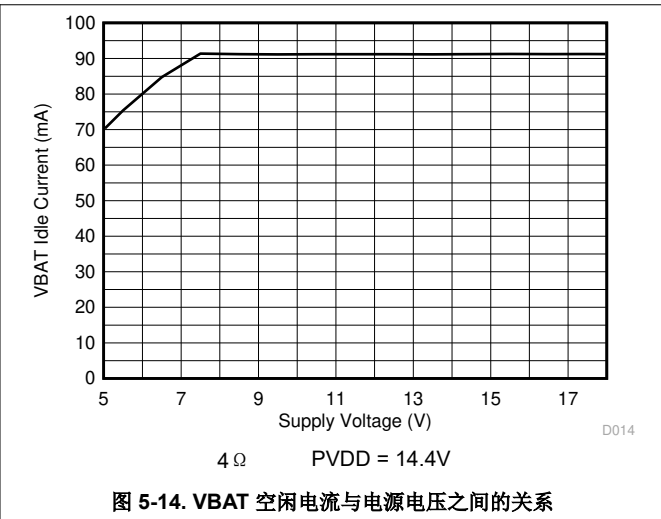


图 5-14. VBAT 空闲电流与电源电压之间的关系

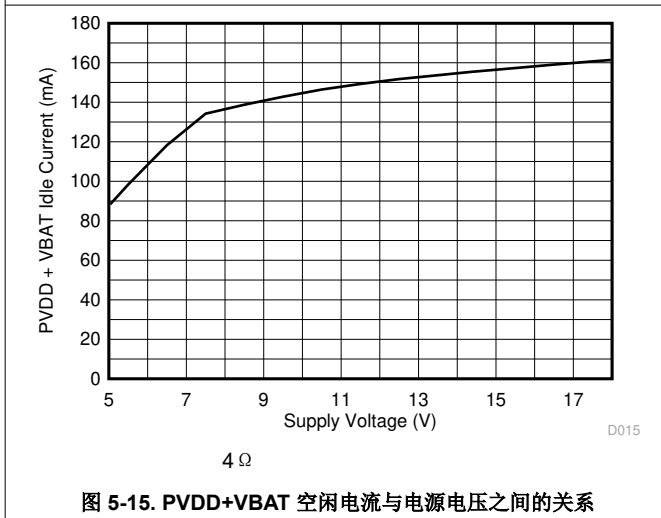


图 5-15. PVDD+VBAT 空闲电流与电源电压之间的关系

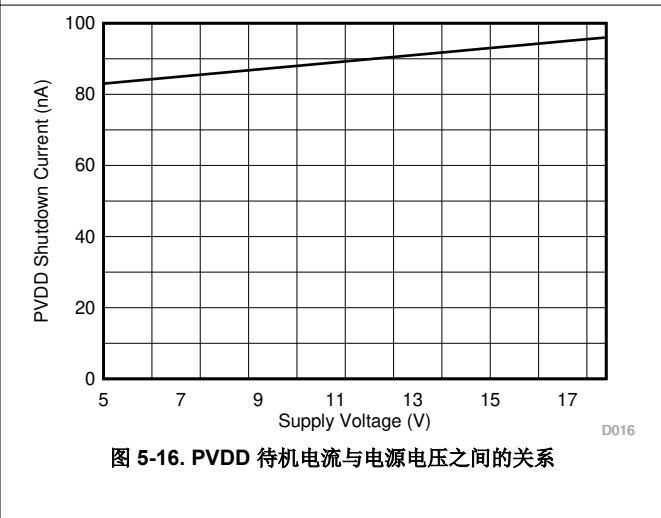


图 5-16. PVDD 待机电流与电源电压之间的关系

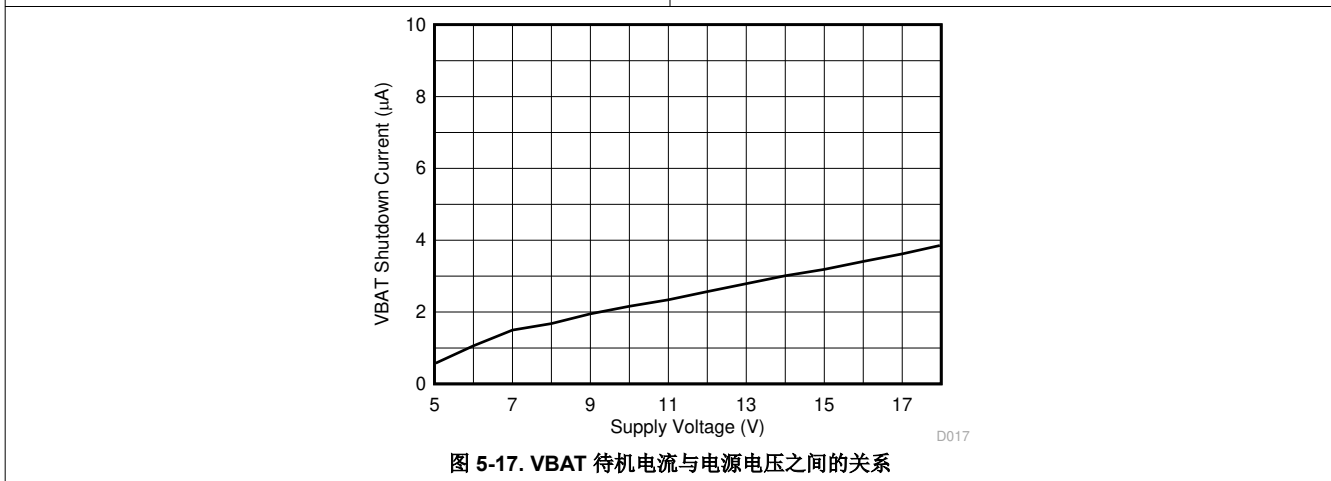


图 5-17. VBAT 待机电流与电源电压之间的关系

6 参数测量信息

对于 TPA6404-Q1 器件的参数，利用 节 9.2.1 中的电路进行测量。

7 详细说明

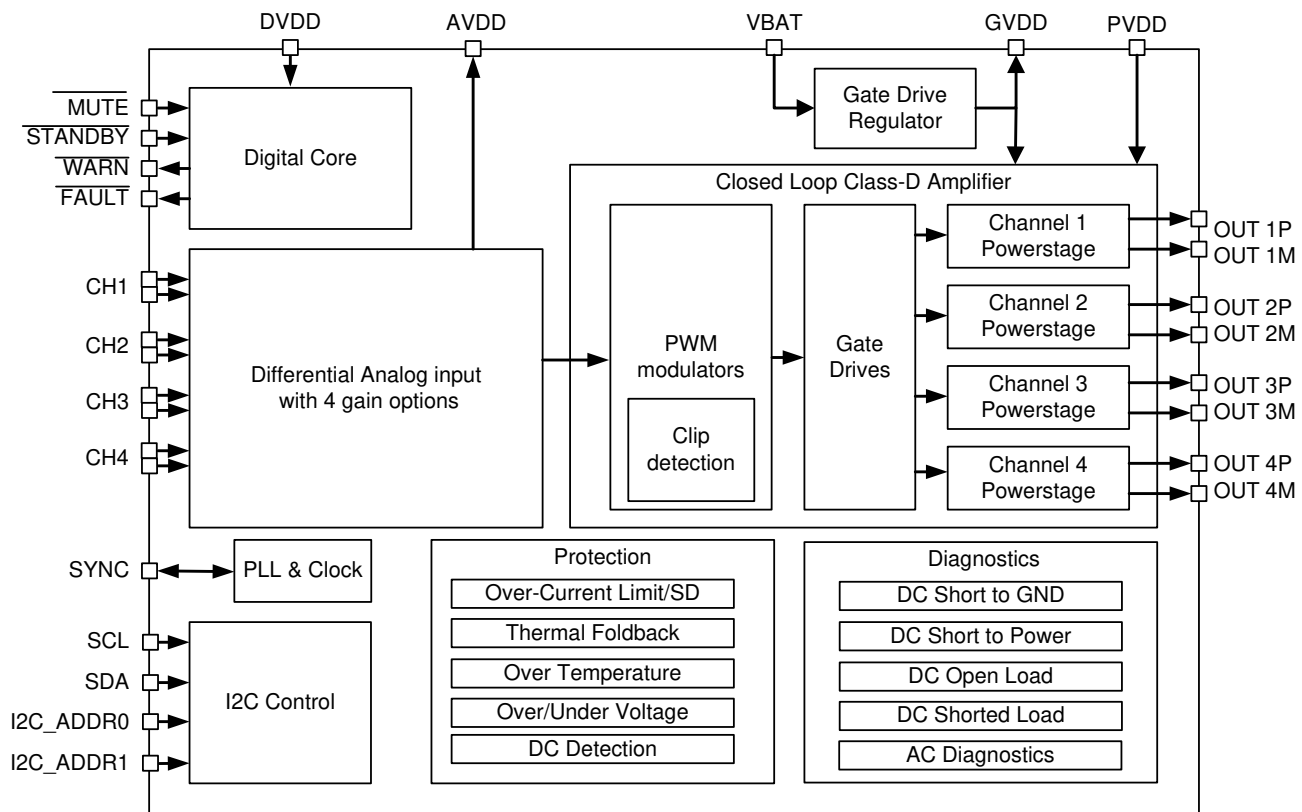
7.1 概述

TPA6404-Q1 器件是一款专为汽车行业定制的，具有四个通道模拟输入的 D 类音频放大器。该器件专为汽车电池操作而设计。超高效的 D 类技术能够降低功耗，减少电气系统的 PCB 面积、热量以及峰值电流。相较传统的 AB 类解决方案，该器件具有更小体积、更轻量级的音频系统设计。

核心设计块包括：

- 差分模拟输入
- 时钟管理
- 具有输出级反馈的脉宽调制器 (PWM)
- 栅极驱动
- 功率 FET
- 诊断
- 保护
- 电源
- I²C 串行通信总线

7.2 功能方框图



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

7.3 特性说明

7.3.1 差分模拟输入

TPA6404-Q1 具有能够优化音频性能的平衡的模拟音频输入。差动输入能够最大限度抑制嗡嗡声与噪声。

对于单端模拟输入，建议将输入连接为伪平衡输入，以便获得最佳的嗡嗡声与噪音抑制效果。图 7-1 显示了建议的平衡连接与单端连接。

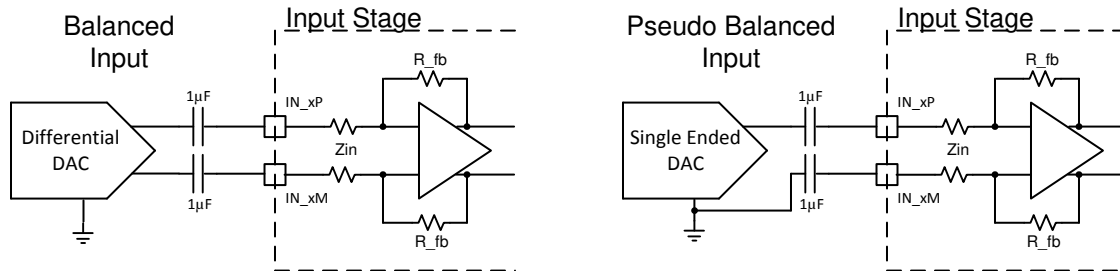


图 7-1. 差分模拟输入连接

7.3.2 增益控制与交流耦合

对于 TPA6404-Q1 的增益，可通过 I²C，在增益控制寄存器中进行配置。存在 10dB、16dB、22dB 以及 28dB 四种增益设置。默认设置为 22dB。建议针对预期的 PVDD 操作与输入电压范围选择尽可能低的增益，以便最大限度降低输出噪声，进行动态范围性能优化。

输入电压范围与电源电压的组合决定了所选增益设置相应要求。表 7-1 显示了示例：

表 7-1. 输入电压增益设置

输入电压	电源电压	增益
0.5Vrms 单端	14.4V	28dB
1Vrms 单端	14.4V	22dB
1Vrms 差动	14.4V	16dB
2Vrms 单端	14.4V	16dB
2Vrms 差动	14.4V	10dB
1Vrms 单端	18V	28dB
1Vrms 差动	18V	22dB
2Vrms 单端	18V	22dB
2Vrms 差动	18V	16dB

输入阻抗是所选增益的函数，参阅表 7-2。

表 7-2. 输入阻抗

增益	输入阻抗	输入电容器	高通滤波器
10dB	80k Ω	1 μ F	2Hz
16dB	40k Ω	1 μ F	4Hz
22dB	20k Ω	1 μ F	8Hz
28dB	10k Ω	1 μ F	16Hz

输入需要进行交流耦合，以便最大限度降低输出直流偏移，确保上电与断电期间输出电压的正确斜坡。输入交流耦合电容器与输入阻抗共同构成具有以下截止频率的高通滤波器：

$$f = \frac{1}{2 \pi R_{in} C_{in}}$$

图 7-2. 输入高通滤波器计算

如果需要低至 20Hz 的平坦频率响应，那么建议的截止频率为该频率的十分之一（即：2Hz）。表 7-2 列出了使用 1 μ F 交流耦合电容器时的高通滤波器频率。如果需要较低的高通滤波器频率，则应使用较大的电容值。

建议使用具有低漏电流的交流耦合电容器（例如：陶瓷、薄膜或优质电解电容器）。

TPA6404-Q1 具有输出直流检测功能，能够在输入交流耦合电容器发生故障或漏电流过高时为连接的扬声器提供保护。

7.3.3 高频脉宽调制器 (PWM)

PWM 能够将输入音频数据转换为具有不同占空比的开关信号。PWM 调制器采用先进设计，具有高带宽、低噪声、低失真和出色的稳定性。

对于输出开关速率，可通过 I²C 寄存器 0x02 进行选择，并且在目标模式下与同步时钟输入进行同步。控制器模式下，同步时钟为输出。

当器件在目标模式下运行时，同步引脚用于在“静音”或“播放”模式下，控制输出级开关频率。对于外部时钟，必须在退出高阻态模式以前进行应用，并应一直保持至再次进入高阻态模式。在高阻态模式期间，外部时钟信号是可选的。

对于四个通道，可设置为四个不同的相位相互切换：0、30、45 以及 60 度。默认设置为 45 度，除非需要不同的相位设置，否则应使用该设置。30、45 以及 60 度时，电源纹波电流最小。由于电源纹波较低，因此可使用尺寸更小、成本更低的外部滤波元件。

7.3.4 栅极驱动

栅极驱动器接受低压 PWM 信号并对其进行电平转换以驱动高电流全桥功率 FET 级。该器件使用专有技术来优化 EMI 和音频性能。

栅极驱动器电源电压 GVDD 是内部生成的，必须在引脚 6 与引脚 7 处连接一个去耦电容器。

7.3.5 功率 FET

每个通道的 BTL 输出包含四个 90m Ω N 沟道 FET，可实现高效率，将最大功率传输至负载。该等 FET 旨在处理负载突降期间的大电压瞬变。

7.3.6 负载诊断

该器件集成了直流与交流负载诊断功能，可用于确定负载状态。默认情况下，直流诊断处于开启状态。但是，如果需要在不进行诊断的情况下快速启动，则可以通过 I²C 绕过诊断。当任何通道从“高阻态”状态切换为“静音”或“播放”状态时，直流诊断就会运行。即使其他通道正在播放音频，也可以手动启用诊断，以便在任何或所有通道上运行。可以从任何工作条件开始诊断，但如果通道处于“播放”状态，则会因器件必须进入“高阻态”状态，导致需要更长的诊断时间。只要器件电源处于建议的工作范围以内，就可以进行诊断。诊断不依赖音频输入信号或同步频率，因为内部振荡器用于诊断块。对于每个通道的诊断结果，将通过 I²C 寄存器单独报告。

7.3.6.1 直流负载诊断

直流负载诊断用于验证负载是否正确连接。直流诊断包括四项测试：电源短路 (S2P)、接地短路 (S2G)、开路负载 (OL) 以及短路负载 (SL)。如果接地阻抗或电源阻抗低于 节 5 部分规定数值，就会触发 S2P 与 S2G 测试。当电源升压时，诊断程序还会检测车辆电池是否短路。SL 测试具有一个可配置的 I²C 阈值，具体取决于预期连接的负载。由于连接到每个通道的扬声器和电缆阻抗可能不同，因此为每个通道分配的阈值可能是唯一的。OL 测试会报告所选通道的负载阻抗是否大于 节 5 部分规定的限值。

直流负载诊断的持续时间可短至 250ms，也可长至 600ms，具体取决于故障情况。时间延长用于重新测试故障条件，以便减少误报情况。通过更改寄存器 0x09 的缓冲时间或稳定时间参数，能够增加额外时间。缓冲时间表示测试开始前的延迟长短。可以在 S2G 与 S2P 测试之前增加缓冲时间，也可以在 SL 与 OL 测试之前增加缓冲时间。斜坡时间表示在 SL 与 OL 测试中输出上升与下降的时间。稳定时间表示 SL 与 OL 测试的持续时间。

7.3.6.1.1 自动直流负载诊断

当待机引脚被拉高时，直流负载诊断会自动运行。这里假定器件的 3.3Vdc (DVDD) 已施加。直流诊断将会在全四个通道上运行。如果一个或多个通道出现故障，该测试将会在大约一秒钟以后再次运行。在故障已消除，待机引脚被拉低或通过 I²C 控制关闭诊断功能以前，这会无限期重复。通道故障后，也将运行该功能。

7.3.6.1.2 I²C 控制型直流负载诊断

自动直流负载诊断可能并非上电时需要的功能，因此，可以通过将寄存器 0x09 第 0 位写入 1 的方式绕过它。必须在待机引脚被拉高以前，写入该寄存器。

直流诊断可用于测试所有四个通道：

1. 对于直流诊断，必须通过将 0x55 写入寄存器 0x04 的方式，将输出配置为高阻态模式。这样，能够将所有四个通道配置为高阻态模式
2. 在寄存器 0x09 中写入用于直流负载诊断的任何控制参数
3. 在寄存器 0x04 中写入 0xFF，以便将所有通道配置为负载诊断模式
4. 持续监控 (读取) 寄存器 0x0F，直到从 0xFF 变为 0x55，以便说明已完成负载诊断
5. 负载诊断结果存储在寄存器 0x0C 与 0x0D 中

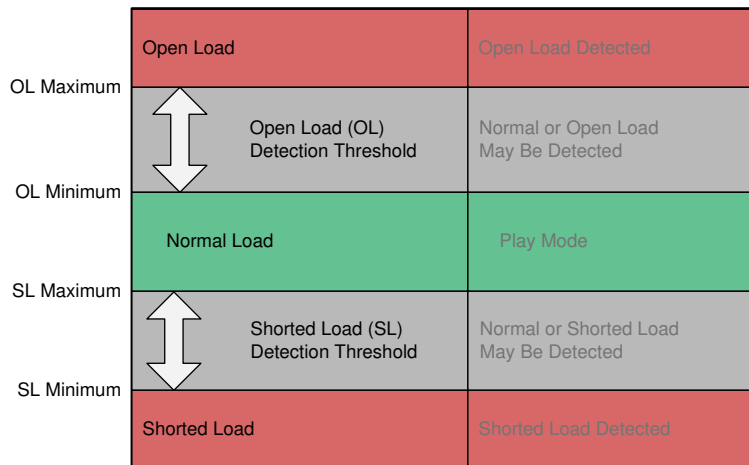


图 7-3. 直流负载诊断报告阈值

7.3.6.2 线路输出诊断

该器件还包含用于检测线路输出负载的可选测试。线路输出负载是高于开路负载 (OL) 阈值的高阻抗负载，因此直流负载诊断会报告 OL 情况。如果线路输出检测位被设置为 1，那么如果在直流诊断测试期间检测到 OL 情况，系统还会测试是否存在线路输出负载。该测试可能不会出现爆裂音，因此，如果连接了外部放大器，则应将其静音。

7.3.6.3 交流负载诊断

交流负载诊断用于确定与无源分频器一起使用时容性耦合扬声器或高音扬声器是否正确连接。交流负载诊断通过 I²C 进行控制。TPA6404-Q1 提供了确定交流阻抗所需的信号源，并且向 I²C 寄存器报告了近似负载阻抗与相位。I²C 选择的测试频率应产生流过目标扬声器的电流，以正确地进行检测。如果要测试多个通道，就必须在每个通道中分别运行诊断程序，因为结果共享同一个 I²C 报告寄存器。如果需要多次测试某一通道，那么在同一通道上重新运行交流负载诊断以前，至少需要等待 200ms。

备注

如果在交流诊断期间出现欠压、过压或过热故障，就会停止交流诊断。执行直流诊断以前，不允许再次执行交流诊断。这是为了确保该故障不会在交流诊断期间导致潜在危险。

对于负载阻抗检测，必须执行三组独立的过程。

- 阻抗相位参考测量
- 负载阻抗相位测量与计算
- 阻抗幅度测量与计算

7.3.6.3.1 阻抗相位参考测量

第一阶段是利用内置的环回模式确定相位测量的基准值。该基准能够消除器件中的任何相位偏移，仅测量负载的相位。该测量值仅针对通道 1 与通道 3。通道 2 将利用通道 1 的结果进行计算。通道 4 将利用通道 3 的结果进行计算。依次测量通道 1 与通道 3，不能同时测量。

对于环回延迟检测，请使用以下测试程序：

BTL 模式

1. 将 AC_DIAGS_LOOPBACK 位 (寄存器 0x16 第 7 位) 设置为 1，以便启用环回模式
2. 在寄存器 0x2A 中设置适当的测试频率，默认值为 18.75kHz
3. 对于通道 1，将寄存器 0x15 第 3 位设置为 1。对于通道 3，将寄存器 0x15 第 1 位设置为 1
4. 读取十六进制值的 AC_LDG_Phase1 值。寄存器 0x1B 存储高字节 (MSB)，寄存器 0x1C 存储低字节 (LSB)
5. 对于通道 1，将寄存器 0x15 第 3 位设置为 0。对于通道 3，将寄存器 0x15 第 1 位设置为 0

PBTL 模式

1. 将 AC_DIAGS_LOOPBACK 位 (寄存器 0x16 第 7 位) 设置为 1，以便启用 AC 环回模式
2. 将 PBTL CH12 与 PBTL CH34 位 (寄存器 0x00 第 5 与 4 位) 设置为 0。必须在器件处于待机状态时执行该操作，以便进入 BTL 模式，仅进行负载诊断
3. 在寄存器 0x2A 中设置适当的测试频率，默认值为 18.75kHz
4. 对于通道 1，将寄存器 0x15 第 3 位设置为 1。对于通道 3，将寄存器 0x15 第 1 位设置为 1
5. 读取十六进制值的 AC_LDG_Phase1 值。寄存器 0x1B 存储高字节 (MSB)，寄存器 0x1C 存储低字节 (LSB)
6. 设置 PBTL CH12 与 PBTL CH34 位 (寄存器 0x00 第 5 与 4 位) 为 1，以便返回 PBTL 模式，进行负载诊断
7. 对于通道 1，将寄存器 0x15 第 3 位设置为 0。对于通道 3，将寄存器 0x15 第 1 位设置为 0

测试完成后，通道报告寄存器 (0x0F) 将指示从交流诊断模式到高阻态的状态变化。当器件转换为高阻态时，检测到的基准相位将存储在相应的 I²C 寄存器中。

7.3.6.3.2 阻抗相位测量

执行相位基准测量后，测量扬声器负载的相位。除了禁用寄存器 0x16 第 7 位环回功能外，该测量与基准测量的方法相同。之前，在通道 1 与通道 3 上进行相位基准测量，但在本测试阶段，对所有四个通道进行测量。由于不能同时测量，因此应按顺序测量各通道。

1. 将待测通道设置为高阻态状态
2. 将 AC_DIAGS_LOOPBACK 位 (寄存器 0x16 第 7 位) 设置为 0
3. 在寄存器 0x2A 中设置适当的测试频率，默认值为 18.75kHz
4. 将器件设置为交流诊断模式 (根据需要需将寄存器 0x15 第 3 位至第 0 位设置为 1，以便将 CH1 设置为 1，将 CH4 设置为 1。 (PBTL 模式下，对于 PBTL12，测试通道 1，对于 PBTL34，测试通道 3))
5. 读回 16 位十六进制 AC_LDG_PHASE 值。寄存器 0x1B 存储高字节 (MSB)，寄存器 0x1C 存储低字节 (LSB)
6. 读回十六进制刺激值 STI。寄存器 0x1D 存储高字节 (MSB)，寄存器 0x1E 存储低字节 (LSB)

7. 禁用交流诊断模式 (根据需要将寄存器 0x15 第 3 位至第 0 位设置为 , 以便将 CH1 设置为 0 , 将 CH4 设置为 。 (PBT1 模式下 , 对于 PBT12 , 禁用通道 1 , 对于 PBT134 , 禁用通道 3))

测试完成后, 通道报告寄存器将会指示从交流诊断模式到高阻态的状态变化。当器件转换为高阻态时, 检测到的相位存储在相应的 I2C 寄存器中。

利用以下公式, 计算交流相位 (单位 : °C) :

$$Phase_CHx = 360 \left(\frac{Phase_CHx(LBK) - Phase_CHx(LDM)}{STI_CHx(LDM)} \right)$$

图 7-4. 交流相位计算

其中 :

Phase_CHx(LBK) 为基准相位测量值

Phase_CHx(LDM) 为负载的相位测量值

STI_CHx(LDM) 为刺激值

7.3.6.3.3 阻抗幅度测量

阻抗幅度值是在第二阶段或相位测量阶段测量的。这些值存储在寄存器 0x17 到 0x1A 中, 每个通道一个寄存器。必须将十六进制值转换为十进制, 并且利用以下公式计算阻抗幅度 :

$$Channelx\ Impedance = \frac{Impedance_CHx \times 2.371mV}{(Gain)(I\ mA)} \quad (Ohms)$$

图 7-5. 交流幅度计算

其中 :

增益表示寄存器 0x15 中选择的值

i 表示寄存器 0x16 中选择的电流

另一种方是使用 表 7-3 中的数值, 通过欧姆/代码值确定阻抗幅度。进行该计算时, 将代码更改为十进制。

表 7-3. 交流阻抗代码转换为幅度

设置	18.75kHz 时的增益, 欧姆/代码 (十进制)	I (mA)	阻抗范围	欧姆/代码 (十进制)
寄存器 0x15 第 7 位与第 5 位 = 1 寄存器 0x16 第 2 位 = 1	4	20	0 到 6Ohms	0.029643
寄存器 0x15 第 7 位与第 5 位 = 1 寄存器 0x16 第 2 位 = 0	4	10	0 到 12Ohms	0.059287
寄存器 0x15 第 7 位与第 5 位 = 0 寄存器 0x16 第 2 位 = 1	1	20	0 到 24Ohms	0.11857
寄存器 0x15 第 7 位与第 5 位 = 0 寄存器 0x16 第 2 位 = 0	1	10	0 到 48Ohms	0.23714

7.3.7 保护和监控

7.3.7.1 过流限值 (I_{LIMIT})

当超过电流限值 (I_{LIMIT}) 时, 过流限值会终止每个 PWM 脉冲, 以便限制输出电流。功率会受到限制, 但运行不会中断, 并且能够防止在发生瞬态音乐事件时, 出现意外关断情形。

如果在 200ms 时间窗口内, 电流限值达到 45% 的 PWM 周期, 就会报告 I_{LIMIT_WARN} 。如果电流限值警告触发时间达到 400ms, 就会报告 I_{LIMIT_FAULT} , 并且将通道设置为高阻态。

每个通道受到独立监控和限制。其他控制 1 寄存器 0x01 第 4 位可设置两个可编程级别。电流限值如 节 5.5 所示。

7.3.7.2 过流关断 (I_{SD})

如果输出负载电流达到 I_{SD} (例如: 输出对 GND 短路或对电源短路), 就会出现峰值电流限制, 进而导致通道关闭。关闭通道的时间因短路情况的严重程度而异。受影响通道配置为高阻态状态, 将故障报告给寄存器, 并且触发故障引脚。器件将保持该状态, 直到其他控制 3 寄存器 0x21 第 7 位设置清除故障位。清除该位后, 如果启用了诊断功能, 器件会自动开始进行通道诊断, 如果未发现负载故障, 器件会重新启动。如果发现负载故障, 器件会继续每秒重新运行一次诊断。由于该断续模式采用诊断功能, 因此不会产生高电流。如果禁用诊断功能, 器件会将该通道的状态设置为高阻态, 并且需要 MCU 采取适当操作, 故障消除后, 设置清除故障位, 以便返回“播放”状态。

其他控制 1 寄存器 0x01 第 4 位可设置两个可编程级别。

7.3.7.3 直流检测

在“播放”模式下正常运行期间, 该电路会在放大器输出端连续检测直流偏移。如果直流偏移超过阈值, 该通道将处于高阻态状态, 相应故障会报告给 I²C 寄存器, 触发故障引脚。可利用寄存器位屏蔽向故障引脚发送报告 (如有必要)。

7.3.7.4 削波检测

削波检测报告级别可设置为 1%、2%、5% 或 10%, 并且可通过 I²C 对报告进行编程。如果任何通道处于削波状态, 就会向内部 I²C 通道寄存器报告, 并且对寄存器报告进行锁存。默认情况下, 还会向警告引脚报告所有通道。它可以分为两个部分: 警告引脚上的通道 1 与通道 2 以及故障引脚上的通道 3 与通道 4。所有引脚报告均可设置为锁存状态或非锁存状态。此外, 也可以通过 I²C 屏蔽引脚削波报告。

举例来说, 如果正弦波信号在报告级别的总谐波失真 (THD) 处被削波, 就会在波形每一部分产生一个脉冲。当总谐波失真达到报告级别时, 该脉冲的占空比将会介于 2% 和 6% 之间。这假定了通过将寄存器 0x27 第 0 位设置为 0 的方式, 禁用削波报告锁存。

7.3.7.5 全局过热警告 (OTW)、过热关断 (OTSD) 以及热折返 (TFB)

器件具有四个可供选择的过热警告级别 (参阅 节 8.1 部分, 了解阈值信息)。当结温超过警告级别时, 警告引脚会被触发 (除非设置了掩码位禁用相应报告)。达到 OTSD 值以前, 器件会一直工作, 此时, 所有通道处于“高阻态”状态, 并且会触发故障引脚。结温恢复正常水平后, 器件会自动恢复, 将所有通道配置为通道状态控制寄存器 (地址= 0x04) 中相应数值指定的状态。警告级别的容差和 OTSD 温度相互跟踪。

启用热折返 (TFB) 寄存器 0x28 第 5 位后, 当全局热警告 OTW 或通道热警告 OTW(i) 发出过热信号时, 器件会自动降低增益, 导致输出功率降低。对于 TFB 的启动与释放时间, 可通过寄存器 0x28 进行编程。增益以 1dB 步长步进, 最大衰减为 12dB。

7.3.7.6 通道过热警告 [OTW(i)] 与关断 [OTSD(i)]

除了全局过热警告以外, 每个通道还具有单独的过热警告与关断功能。如果通道超过 OTW(i) 阈值, 就会设置警告寄存器位, 因为会触发警告引脚 (除非已设置屏蔽位, 以便禁用报告)。如果通道温度超过 OTSD(i) 阈值, 该通道会进入高阻态状态, 直到温度降至 OTW(i) 阈值以下, 此时, 通道会根据状态控制寄存器指示更改相应状态。

7.3.7.7 热折返

热保护 (TFB) 电路的设计目的是避免 TPA6404-Q1 受到芯片温度过高的影响。之所以这样，可能是因为工作温度超过推荐值，或使用的热系统低于推荐值。当温度超过 TFB 温度规格时，TFB 会以 1.0dB 的步长降低闭环增益，进一步降低芯片。增益会随着温度以相同的增益步长降低而增加。对于增益减低 (启动) 速率，通过寄存器 0x28 第 2 位与第 3 位控制。对于增益增加或恢复 (释放) 速率，通过寄存器 0x28 第 0 位与第 1 位控制。通过启用过零检测器，控制无爆裂声增益变化，寄存器 0x28 第 4 位默认启用过零检测器。增益发生变化前，过零有一个等待时间。默认值为 20 μ s，可通过寄存器 0x28 第 7 位与第 8 位增加。TFB 默认启用，可通过寄存器 0x28 第 5 位禁用。

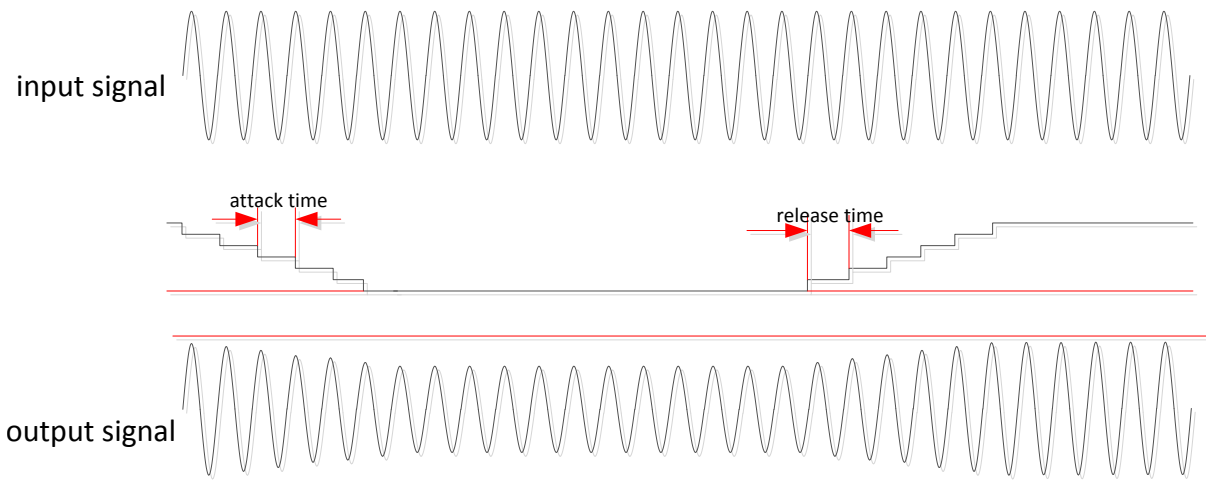


图 7-6. 热折返启动和释放

7.3.7.8 欠压 (UV) 和上电复位 (POR)

欠压 (UV) 保护能够检测 DVDD 与 VBAT 引脚上的低电压。如果出现欠压情况，会触发故障引脚，更新 I²C 寄存器。DVDD 引脚上的 POR 会导致 I²C 进入高阻抗 (高阻态) 状态，所有寄存器都会重置为默认值。上电时或发生 POR 事件以后，会触发 POR 警告位与警告引脚。

7.3.7.9 过压 (OV) 与负载突降

过压保护能够检测 DVDD 引脚上的高电压。如果 PVDD 引脚达到过压阈值，就会触发故障引脚，更新 I²C 寄存器。该器件能够承受 40V 的负载突降电压尖峰。

7.3.8 电源

该器件有三个电源输入：DVDD、PVDD 以及 VBAT，说明如下：

- DVDD - 该引脚是一个向数字电路供电的 3.3V 电源引脚
- VBAT - 该引脚是一个可连接汽车电池或连接升压系统受控电压轨的大电压电源，但需符合建议的限值。为了达到出色性能，该电源导轨的电压应为 10V 或更高。参阅 节 5.3 表，了解最大电源电压。该电源轨用于电压较高的模拟电路，但不适用于输出 FET
- PVDD - 该引脚是一个可连接汽车电池或升压系统另一电压轨的大电流电源。PVDD 引脚能够在建议的工作限值范围内为输出 FET 供电 (即使低于 VBAT 电源)，以便用于动态电压系统

包含能够产生栅极驱动电路所需 GVDD_X 电压的多个片上稳压器。对于 GVDD 电源引脚，仅供旁路电容器进行电源滤波，不得用于为其他电路供电。

该器件能够在器件 节 5.1 额定值范围以内，承受偶然接地开路与各类电源条件。当扬声器导线接地短路时，通常会发生偶然的接地开路，从而允许通过输出 FET 中的体二极管形成第二条接地路径。

7.3.8.1 电源序列

无需特殊的电源时序控制。

7.3.9 硬件控制引脚

该器件有两个控制引脚：静音引脚与待机引脚，以及两个状态引脚：警告引脚与故障引脚。

7.3.9.1 FAULT

故障引脚报告故障事件，并且在以下任何条件下低电平有效：

- 任何通道故障（过流或直流检测）
- 过热关断
- VBAT 或 PVDD 引脚上的过压或欠压条件
- 时钟错误
- 削波检测指示器也可以连接至故障引脚。该指示器可配置为锁存或非锁存状态。

故障引脚被锁存，可通过向寄存器 0x21 第 7 位写入的方式清除。

寄存器位可用于屏蔽向 $\overline{\text{FAULT}}$ 引脚报告故障类别。这些位仅屏蔽引脚的设置，不影响寄存器报告或器件保护。默认情况下，所有故障都会报告给引脚。如需了解屏蔽设置相应描述，可参阅 [节 8.1](#) 部分。

也可以对故障引脚进行编程，以便显示通道 3 与通道 4 的削波检测。

该引脚属于漏极开路输出，具有一个连接 DVDD 的 100k Ω 内部上拉电阻器。

7.3.9.2 WARN

该低电平有效输出引脚能够报告音频削波、过热警告以及 POR 事件。

- 如果任何通道的总谐波失真超过阈值，则会报告削波检测
- 如果设置了一般温度或任何通道温度警告，就会报告过热警告（OTW）。对于警告温度，可通过寄存器 0x01 第 5-6 位设置
- 对于寄存器位，可用于屏蔽向引脚报告削波检测或 OTW。该等位仅屏蔽引脚设置，不会影响寄存器报告或器件保护。默认情况下，会报告削波检测与 OTW
- 该引脚属于漏极开路输出，具有一个连接 DVDD 的 100k Ω 内部上拉电阻器

7.3.9.3 MUTE

该低电平有效输入引脚可用于对所有通道的静音与取消静音功能进行硬件控制。当静音引脚设置为低电平时，所有通道停止切换，配置为高阻态模式。偏置并启用所有内部模拟电路，对输入交流耦合电容器充电。

I²C 静音功能正常运行时，硬件静音功能进行“或”运算。如果设置任一功能，均会触发静音功能。

该引脚具有 100k Ω 内部下拉电阻器。

7.3.9.4 STANDBY

待机引脚低电平有效。当输出引脚配置为高阻态状态时，器件在 PVDD 与 VBAT 引脚上处于低电平电流模式。所有内部模拟偏置均被禁用。待机状态下以及存在 DVDD 时，I²C 总线有效，内部寄存器有效。

该引脚具有 1M Ω 内部下拉电阻器。

7.4 器件功能模式

7.4.1 工作模式和故障

表 7-4、表 7-5 以及表 7-6 列出了操作模式与故障。

表 7-4. 工作模式

状态名称	输出 FET	振荡器	I ² C
STANDBY	高阻态	停止	激活
高阻态	高阻态	激活	激活
MUTE	高阻态	激活	激活
播放	音频开关	激活	激活

表 7-5. 全局故障与操作

故障/事件	故障/事件类别	监视模式	报告方法	操作结果
POR	电压故障	全部	I ² C + 警告引脚	待机
VBAT UV		高阻态、静音、播放	I ² C + FAULT 引脚	高阻态
PVDD UV				
VBAT 或 PVDD OV				
OTW	热警告	高阻态、静音、播放	I ² C + 警告引脚	无
OTSD	热关断	高阻态、静音、播放	I ² C + FAULT 引脚	高阻态
无效时钟 ⁽¹⁾	同步时钟故障	静音与播放	I ² C + FAULT 引脚	高阻态

(1) 仅当器件配置为目标模式时才受监控

表 7-6. 通道故障与操作

故障/事件	故障/事件类别	监视模式	报告方法	操作类型
削波	警告 (可以锁存或取消锁存)	静音与播放	警告 引脚+ 故障 引脚	无
过流限值	保护		WARN 引脚	电流限制
过流故障	输出通道故障		I ² C + FAULT 引脚	高阻态
直流检测				

7.5 编程

7.5.1 I²C 串行通信总线

该器件作为仅 I²C 目标器件，通过 I²C 串行通信总线与系统处理器进行通信。处理器可以通过 I²C 轮询器件，以便确定运行状态，配置设置或运行诊断。如需了解所有 I²C 控件的完整列表与说明，可参阅 节 8.1 部分。

该器件包含两个 I²C 地址引脚，因此，无需额外的总线切换硬件，系统能够最多同时使用四个器件。如 表 7-7 所示，可以通过 I²C ADDR_x 引脚设置器件目标地址。

表 7-7. I²C 地址

说明	I ² C ADDR1	I ² C ADDR0	I ² C 写入	I ² C 读取
器件 0	0	0	0x54	0x55
器件 1	0	1	0x56	0x57
器件 2	1	0	0x58	0x59
器件 3	1	1	0x5A	0x5B

7.5.2 I²C 总线协议

该器件拥有一个与内部 IC (I²C) 总线协议相兼容的双向串行控制接口，并且支持 100kbps 与 400kbps 的数据传输速率，能够进行随机与顺序写入与读取操作。作为目标器件，该器件不支持多控制器总线环境或等待状态插入。控制接口用于对设备寄存器进行编程以及读取设备状态。

I²C 总线使用 SDA (数据) 和 SCL (时钟) 这两个信号在系统中的集成电路之间进行通信。数据在总线上串行传输，一次传输一位。地址与数据以字节 (8 位) 格式传输，最高有效位 (MSB) 首先传输。此外，总线上传输的每个字节都由接收器件通过一个响应位进行响应。每次传输操作从控制器器件在总线上驱动启动条件开始，到控制器器件在总线上驱动停止条件结束。当时钟处于高电平时，总线使用数据终端 (SDA) 上的转换来指示启动和停止条件。SDA 上从高电平转换到低电平表示启动，而从低电平转换到高电平表示停止。正常的的数据位转换必须发生在时钟周期的低电平时间内。控制器生成 7 位目标地址和读取/写入 (R/W) 位，以打开与另一个器件的通信，然后等待确认条件。器件会在确认时钟期间将 SDA 保持为低电平以指示确认。当发生这种情况时，控制器会传输序列的下一个字节。对于每个器件，都通过一个唯一的 7 位目标地址加上 R/W 位 (1 个字节) 进行寻址。所有兼容

器件均使用线与连接，通过双向总线共享相同的信号。对于 SDA 与 SCL 信号，必须利用外部上拉电阻器，设置总线高电平。在启动与停止条件之间传输的字节数没有限制。当最后一个字传输时，控制器生成停止条件以释放总线。

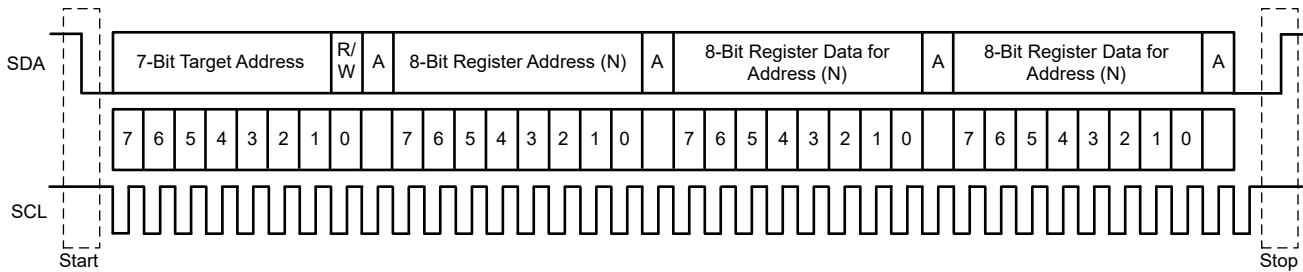


图 7-7. 典型的 I²C 序列

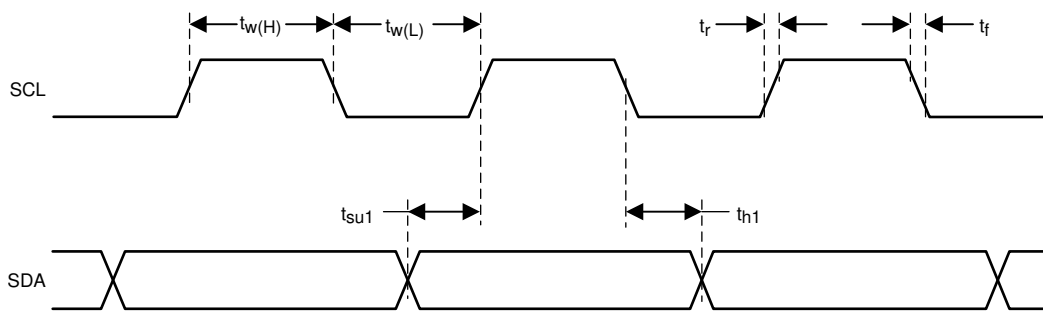


图 7-8. SCL 和 SDA 时序

利用 I²C ADDR_x 引脚，对器件目标地址进行编程。可利用单字节或多字节数据传输方式，传输各类读写数据。

7.5.3 随机写入

如 图 7-9 所示，单字节数据写入传输开始时，控制器器件会发送一个启动条件，随后是 I²C 器件地址与读取/写入位。读/写位决定数据传输的方向。对于写入数据传输，读取/写入位为 0。在接收到正确的 I²C 器件地址和读取/写入位后，该器件会以一个确认位进行响应。接下来，控制器传输对应于正在访问的内部存储器地址的地址字节。收到地址字节之后，器件会再次用一个确认位进行响应。接下来，控制器器件传输要写入正在访问的存储器地址的数据字节。收到数据字节之后，器件会再次用一个确认位进行响应。最后，控制器器件发送停止条件以完成单字节数据写入传输。

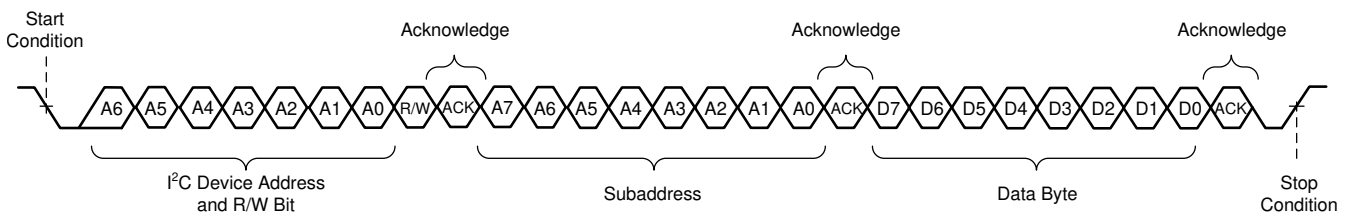


图 7-9. 随机写入传输

7.5.4 顺序写入

顺序数据写入传输与单字节数据写入传输完全相同，唯一的例外是控制器将多个数据字节传输到器件，如 图 7-10 所示。接收到每个数据字节后，器件会以一个应答位进行响应，并且 I²C 子地址会自动递增 1。

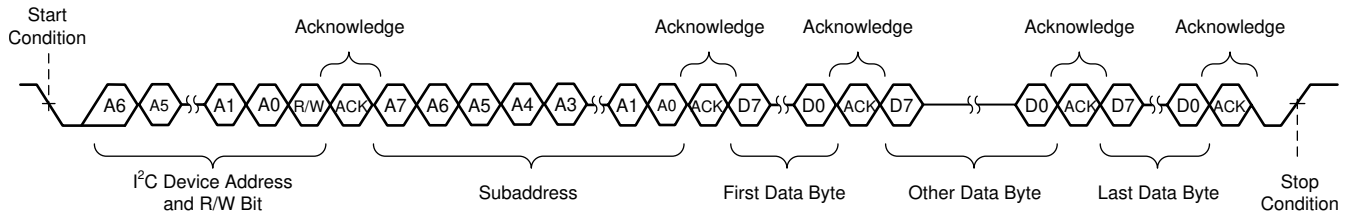


图 7-10. 顺序写入传输

7.5.5 随机读取

如图 7-11 所示，单字节数据读取传输始于控制器器件发送启动条件，后跟 I²C 器件地址和读取/写入位。对于数据读取传输，实际上先后完成了写入和读取操作。最初，执行写入以传输要读取的内部存储器地址的地址字节。因此，读取/写入位为 0。在接收到地址和读取/写入位后，器件会以一个确认位进行响应。此外，发送内部存储器地址字节后，控制器器件会再次发送另一个启动条件，后跟地址和读取/写入位。这次，读取/写入位为 1，指示读取传输。在接收到地址和读取/写入位后，器件会再次以一个应答位进行响应。接下来，该器件从正在读取的存储器地址传输数据字节。接收到数据字节后，控制器器件发送一个无应答信号，然后是一个停止条件，以完成单字节数据读取传输。

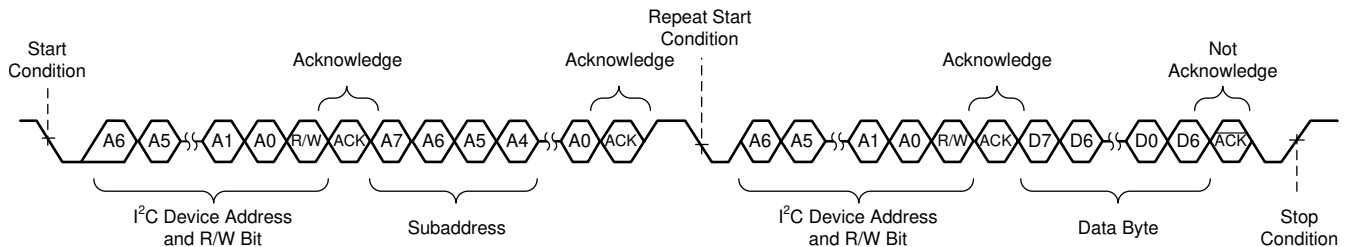


图 7-11. 随机读取传输

7.5.6 顺序读取

顺序数据读取传输与单字节数据读取传输完全相同，唯一的例外是器件将多个数据字节传输到控制器器件，如图 7-12 所示。除最后一个数据字节外，控制器器件在接收到每个数据字节后都会以一个确认位进行响应，并自动将 I²C 子地址递增 1。收到最后一个数据字节后，控制器器件发送一个无应答信号，然后是一个停止条件，以完成传输。

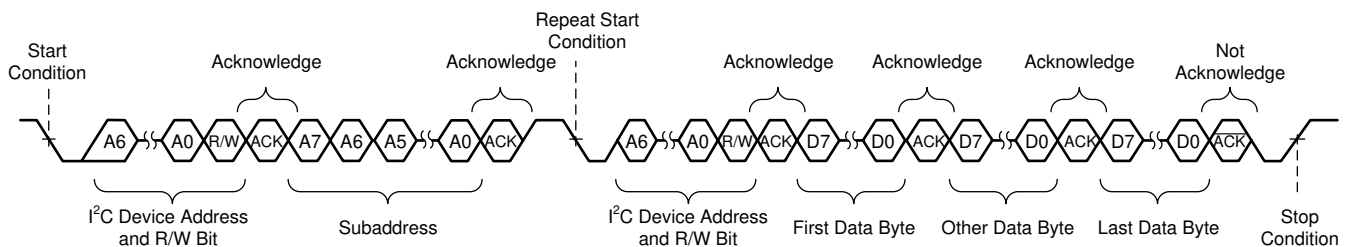


图 7-12. 顺序读取传输

8 寄存器

8.1 寄存器映射

表 8-1. I²C 地址寄存器定义

地址	类型	寄存器说明	部分
0x00	R/W	模式控制	模式控制
0x01	R/W	其他控制 1	其他控制 1
0x02	R/W	其他控制 2	其他控制 2
0x03	R	RESERVED	
0x04	R/W	通道状态控制	通道状态控制
0x05	R	RESERVED	
0x06	R	RESERVED	
0x07	R	RESERVED	
0x08	R	RESERVED	
0x09	R/W	直流诊断控制 1	直流诊断控制 1
0x0A	R/W	直流诊断控制 2	直流诊断控制 2
0x0B	R/W	直流诊断控制 3	直流诊断控制 3
0x0D	R	直流负载诊断报告通道 3 与通道 4	直流诊断报告通道 3 与通道 4
0x0E	R	直流负载诊断报告：线路输出	直流诊断报告 LO
0x0F	R	通道状态报告	通道状态报告
0x10	R	通道故障（过流、直流检测）	通道故障
0x11	R	全局故障 1	全局故障 1
0x12	R	全局故障 2	全局故障 2
0x13	R	警告	警告
0x14	R/W	引脚控制	引脚控制
0x15	R/W	交流负载诊断控制 1	交流诊断控制 1
0x16	R/W	交流负载诊断控制 2	交流诊断控制 2
0x17	R	交流负载诊断报告通道 1	交流诊断报告通道 1
0x18	R	交流负载诊断报告通道 2	交流诊断报告通道 2
0x19	R	交流负载诊断报告通道 3	交流诊断报告通道 3
0x1A	R	交流负载诊断报告通道 4	交流诊断报告通道 4
0x1B	R	交流负载诊断相位高电平	交流诊断相位高电平
0x1C	R	交流负载诊断相位低电平	交流诊断相位低电平
0x1D	R	交流负载诊断 STI 高电平	交流诊断 STI 高电平
0x1E	R	交流负载诊断 STI 低电平	交流诊断 STI LO
0x1F	R	RESERVED	
0x20	R	RESERVED	
0x21	R/W	其他控制 3	其他控制 3
0x22	R/W	削波控制	削波控制
0x23	R	RESERVED	
0x24	R/W	削波警告	削波警告
0x25	R/W	电流限值状态	电流限值状态
0x26	R	RESERVED	
0x27	R/W	故障与警告引脚控制	故障/警告引脚控制

表 8-1. I²C 地址寄存器定义 (续)

地址	类型	寄存器说明	部分
0x28	R/W	热折返控制	热折返控制
0x29	R	RESERVED	
0x2A	R/W	交流诊断频率控制	交流诊断频率控制
0x2B	R/W	同步引脚控制	同步引脚控制

8.1.1 模式控制寄存器 (地址 = 0x00) [默认值 = 0x00]

模式控制寄存器如 图 8-1 所示，相应说明如 表 8-2 所述。

图 8-1. 模式控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
复位	RESERVED	PBTL_34	PBTL_12	CH1 LO MODE	CH2 LO MODE	CH3 LO MODE	CH4 LO MODE
R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-2. 模式控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	复位	R/W	0	0 : 正常运行 1 : 复位器件
6	RESERVED	R	0	
5	PBTL_34	R/W	0	0 : BTL 模式 1 : PBTL 模式
4	PBTL_12	R/W	0	0 : BTL 模式 1 : PBTL 模式
3	CH1 LO MODE	R/W	0	0 : 通道 1 处于正常/扬声器模式 1 : 通道 1 处于线路输出模式
2	CH2 LO MODE	R/W	0	0 : 通道 2 处于正常/扬声器模式 1 : 通道 2 处于线路输出模式
1	CH3 LO MODE	R/W	0	0 : 通道 3 处于正常/扬声器模式 1 : 通道 3 处于线路输出模式
0	CH4 LO MODE	R/W	0	0 : 通道 4 处于正常/扬声器模式 1 : 通道 4 处于线路输出模式

8.1.2 其他控制 1 寄存器 (地址 = 0x01) [默认值 = 0x32]

其他控制 1 寄存器如 图 8-2 所示，相应说明如 表 8-3 所述。

图 8-2. 其他控制 1 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
PI_EN	OTW 控制		OC 控制	RESERVED		增益	
R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W

表 8-3. 其他控制 1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	PI_EN	R/W	0	0 : 脉冲注入器已禁用 1 : 脉冲注入器已启用
6 - 5	OTW 控制	R/W	01	00 : 全局过热警告设置为 140°C 01 : 全局过热警告设置为 130°C 10 : 全局过热警告设置为 120°C 11 : 全局过热警告设置为 110°C
4	OC 控制	R/W	1	0 : 过流为 1 级 1 : 过流为 2 级
3 - 2	RESERVED		00	

表 8-3. 其他控制 1 字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
1-0	增益	R/W	10	00 : 10dB 01 : 16dB 10 : 22dB 11 : 28dB

8.1.3 其他控制 2 寄存器 (地址 = 0x02) [默认值 = 0x62]

其他控制 2 寄存器如 图 8-3 所示, 相应说明如 表 8-4 所述。

图 8-3. 其他控制 2 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED	PWM 频率			RAMP_SYNC_PHASE_SEL		输出相位	
R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-4. 其他控制 2 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	RESERVED	R	0	
6-4	PWM 频率	R/W	110	000 : RESERVED 001 : RESERVED 010 : RESERVED 011 : RESERVED 100 : RESERVED 101 : 1.8MHz 110 : 2.1MHz 111 : 2.3MHz
3-2	控制器模式下的斜坡同步相位选择 (斜坡相位以所选通道为基准)	R/W	00	00 : CH 4 01 : CH 3 10 : CH 2 11 : CH 1
1-0	PWM 输出相位	R/W	10	00 : 0 度输出相位开关偏移 01 : 30 度输出相位开关偏移 10 : 45 度输出相位开关偏移 11 : 60 度输出相位开关偏移

8.1.4 通道状态控制寄存器 (地址 = 0x04) [默认值 = 0x55]

通道状态控制寄存器如 图 8-4 所示, 相应说明如 表 8-5 所示。

图 8-4. 通道状态控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH1 STATE CONTROL		CH2 STATE CONTROL		CH3 STATE CONTROL		CH4 STATE CONTROL	
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-5. 通道状态控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-6	CH1 STATE CONTROL	R/W	01	00 : 播放 01 : 高阻态 10 : MUTE 11 : 直流负载诊断

表 8-5. 通道状态控制字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
5 - 4	CH2 STATE CONTROL	R/W	01	00 : 播放 01 : 高阻态 10 : MUTE 11 : 直流负载诊断
3 - 2	CH3 STATE CONTROL	R/W	01	00 : 播放 01 : 高阻态 10 : MUTE 11 : 直流负载诊断
1-0	CH4 STATE CONTROL	R/W	01	00 : 播放 01 : 高阻态 10 : MUTE 11 : 直流负载诊断

8.1.5 直流负载诊断控制 1 寄存器 (地址 = 0x09) [默认值 = 0x00]

直流诊断控制 1 寄存器如 图 8-5 所示，相应说明如 表 8-6 所述。

图 8-5. 直流负载诊断控制 1 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
直流 LDG 中止	斜坡	稳定	缓冲		报告	LDG LO 已启用	LDG BYPASS
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-6. 直流负载诊断控制 1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	直流 LDG 中止	R/W	0	0 : 默认状态，中止后清除 1 : 中止正在进行的负载诊断
6	斜坡时间 - 直流诊断	R/W	0	0 : 默认斜坡时间=10ms 1 : 半斜坡时间=5ms
5	稳定时间 - 直流诊断	R/W	0	0 : 默认稳定时间=15ms 1 : 双倍稳定时间=30ms
4 - 3	缓冲时间 - 直流诊断	R/W	00	00 : 1ms 01 : 10ms 10 : 5ms
2	报告	R/W	0	0 : 不报告故障引脚上的直流诊断故障 1 : 报告故障引脚上的直流诊断故障
1	LDG LO 已启用	R/W	0	0 : 线路输出诊断已禁用 1 : 线路输出诊断已启用
0	LDG BYPASS	R/W	0	0 : 离开高阻态时与通道故障后自动诊断 1 : 诊断不会自动运行

8.1.6 直流负载诊断控制 2 寄存器 (地址 = 0x0A) [默认值 = 0x11]

直流诊断控制 2 寄存器如 图 8-6 所示，相应说明如 表 8-7 所述。

图 8-6. 直流负载诊断控制 2 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH1 DC LDG SL				CH2 DC LDG SL			

图 8-6. 直流负载诊断控制 2 寄存器 (续)

R/W	R/W
-----	-----

表 8-7. 直流负载诊断控制 2 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7 - 4	CH1 DC LDG SL	R/W	0001	直流负载诊断负载短路阈值 0000 : 0.5 Ω 0001 : 1 Ω 0010 : 1.5 Ω ... 1001 : 5 Ω
3-0	CH2 DC LDG SL	R/W	0001	直流负载诊断负载短路阈值 0000 : 0.5 Ω 0001 : 1 Ω 0010 : 1.5 Ω ... 1001 : 5 Ω

8.1.7 直流负载诊断控制 3 寄存器 (地址 = 0x0B) [默认值 = 0x11]

直流诊断控制 3 寄存器如 图 8-7 所示，相应说明如 表 8-8 所述。

图 8-7. 直流负载诊断控制 3 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH3 DC LDG SL				CH4 DC LDG SL			
R/W				R/W			

表 8-8. 直流负载诊断控制 3 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7 - 4	CH3 DC LDG SL	R/W	0001	直流负载诊断负载短路阈值 0000 : 0.5 Ω 0001 : 1 Ω 0010 : 1.5 Ω ... 1001 : 5 Ω
3-0	CH4 DC LDG SL	R/W	0001	直流负载诊断负载短路阈值 0000 : 0.5 Ω 0001 : 1 Ω 0010 : 1.5 Ω ... 1001 : 5 Ω

8.1.8 直流负载诊断报告 1 寄存器 (地址 = 0x0C) [默认值 = 0x00]

直流负载诊断报告 1 寄存器如 图 8-8 所示，相应说明如 表 8-9 所述。

图 8-8. 直流负载诊断报告 1 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH1 S2G	CH1 S2P	CH1 OL	CH1 SL	CH2 S2G	CH2 S2P	CH2 OL	CH2 SL
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-9. 直流负载诊断报告 1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	CH1 S2G	R	0	0: 未检测到接地短路 1: 检测到接地短路
6	CH1 S2P	R	0	0: 未检测到对电源短路 1: 检测到对电源短路
5	CH1 OL	R	0	0: 未检测到开路负载 1: 检测到开路负载
4	CH1 SL	R	0	0: 未检测到短路负载 1: 检测到短路负载
3	CH2 S2G	R	0	0: 未检测到接地短路 1: 检测到接地短路
2	CH2 S2P	R	0	0: 未检测到对电源短路 1: 检测到对电源短路
1	CH2 OL	R	0	0: 未检测到开路负载 1: 检测到开路负载
0	CH2 SL	R	0	0: 未检测到短路负载 1: 检测到短路负载

8.1.9 直流负载诊断报告 2 寄存器 (地址 = 0x0D) [默认值 = 0x00]

直流负载诊断报告 2 寄存器如 图 8-9 所示，相应说明如 表 8-10 所述。

图 8-9. 直流负载诊断报告 2 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH3 S2G	CH3 S2P	CH3 OL	CH3 SL	CH4 S2G	CH4 S2P	CH4 OL	CH4 SL
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-10. 直流负载诊断报告 2 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	CH3 S2G	R	0	0: 未检测到接地短路 1: 检测到接地短路
6	CH3 S2P	R	0	0: 未检测到对电源短路 1: 检测到对电源短路
5	CH3 OL	R	0	0: 未检测到开路负载 1: 检测到开路负载
4	CH3 SL	R	0	0: 未检测到短路负载 1: 检测到短路负载
3	CH4 S2G	R	0	0: 未检测到接地短路 1: 检测到接地短路
2	CH4 S2P	R	0	0: 未检测到对电源短路 1: 检测到对电源短路
1	CH4 OL	R	0	0: 未检测到开路负载 1: 检测到开路负载
0	CH4 SL	R	0	0: 未检测到短路负载 1: 检测到短路负载

8.1.10 直流负载诊断报告 3 (线路输出) 寄存器 (地址=0x0E) [默认值=0x00]

直流负载诊断报告 (线路输出) 如 图 8-10 所示, 相应说明如 表 8-11 所述。

图 8-10. 直流负载诊断报告 3 (线路输出) 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				CH1 LO LDG	CH2 LO LDG	通道 3 LO LDG	通道 4 LO LDG
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-11. 直流负载诊断报告 3 (线路输出) 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7 - 4	RESERVED	R	0000	
3	CH1 LO LDG	R	0	0: 未检测到通道 1 线路输出 1: 检测到通道 1 线路输出
2	CH2 LO LDG	R	0	0: 未检测到通道 2 线路输出 1: 检测到通道 2 线路输出
1	CH3 LO LDG	R	0	0: 未检测到通道 3 线路输出 1: 检测到通道 3 线路输出
0	CH4 LO LDG	R	0	0: 未检测到通道 4 线路输出 1: 检测到通道 3 线路输出

8.1.11 通道状态报告寄存器 (地址 = 0x0F) [默认值 = 0x55]

通道状态报告寄存器如 图 8-11 所示, 相应说明如 表 8-12 所示。

图 8-11. 通道状态报告寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH1 STATE REPORT		CH2 STATE REPORT		CH3 STATE REPORT		CH4 STATE REPORT	
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-12. 状态报告字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7 - 6	CH1 STATE REPORT	R	01	00: 播放 01: 高阻态 10: MUTE 11: 直流负载诊断
5 - 4	CH2 STATE REPORT	R	01	00: 播放 01: 高阻态 10: MUTE 11: 直流负载诊断
3 - 2	CH3 STATE REPORT	R	01	00: 播放 01: 高阻态 10: MUTE 11: 直流负载诊断
1-0	CH4 STATE REPORT	R	01	00: 播放 01: 高阻态 10: MUTE 11: 直流负载诊断

8.1.12 通道故障 (过流, 直流检测) 寄存器 (地址=0x10) [默认值=0x00]

通道故障 (过流, 直流检测) 如图 8-12 所示, 相应说明如表 8-13 所述。

图 8-12. 通道故障寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH1 OC	CH2 OC	CH3 OC	CH4 OC	CH1 DC	CH2 DC	CH3 DC	CH4 DC
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-13. 通道故障字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	CH1 OC	R	0	0: 未检测到过流故障 1: 检测到过流故障
6	CH2 OC	R	0	0: 未检测到过流故障 1: 检测到过流故障
5	CH3 OC	R	0	0: 未检测到过流故障 1: 检测到过流故障
4	CH4 OC	R	0	0: 未检测到过流故障 1: 检测到过流故障
3	CH1 DC	R	0	0: 未检测到直流故障 1: 检测到直流故障
2	CH2 DC	R	0	0: 未检测到直流故障 1: 检测到直流故障
1	CH3 DC	R	0	0: 未检测到直流故障 1: 检测到直流故障
0	CH4 DC	R	0	0: 未检测到直流故障 1: 检测到直流故障

8.1.13 全局故障 1 寄存器 (地址 = 0x11) [默认值 = 0x00]

全局故障 1 寄存器如图 8-13 所示, 相应说明如表 8-14 所述。

图 8-13. 全局故障 1 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			无效时钟	PVDD OV	VBAT OV	PVDD UV	VBAT UV
R			R	R	R	R	R

表 8-14. 全局故障 1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7 - 5	RESERVED		0	0
4	无效时钟	R	0	0: 未检测到同步时钟故障 1: 检测到时钟故障
3	PVDD OV	R	0	0: 未检测到 PVDD 过压故障 1: 检测到 PVDD 过压故障
2	VBAT OV	R	0	0: 未检测到 VBAT 过压故障 1: 检测到 VBAT 过压故障
1	PVDD UV	R	0	0: 未检测到 PVDD 欠压故障 1: 检测到 VPVDD 欠压故障

表 8-14. 全局故障 1 字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
0	VBAT UV	R	0	0: 未检测到 VBAT 欠压故障 1: 检测到 VBAT 欠压故障

8.1.14 全局故障 2 寄存器 (地址 = 0x12) [默认值 = 0x00]

全局故障 2 寄存器如 图 8-14 所示, 相应说明如 表 8-15 所述。

图 8-14. 全局故障 2 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			OTSD	CH1 OTSD	CH2 OTSD	通道 3 OTSD	通道 4 OTSD
R			R	R	R	R	R

表 8-15. 全局故障 2 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	RESERVED	R	0	
4	OTSD	R	0	0: 未检测到全局过热关断 1: 检测到全局过热关断
3	CH1 OTSD	R	0	0: 未检测到通道 1 过热关断 1: 检测到通道 1 过热关断
2	CH2 OTSD	R	0	0: 未检测到通道 2 过热关断 1: 检测到通道 2 过热关断
1	CH3 OTSD	R	0	0: 未检测到通道 4 过热关断 1: 检测到通道 3 过热关断
0	CH4 OTSD	R	0	0: 未检测到通道 4 过热关断 1: 检测到通道 4 过热关断

8.1.15 警告寄存器 (地址 = 0x13) [默认值 = 0x20]

警告寄存器如 图 8-15 所示, 相应说明如 表 8-16 所述。

图 8-15. 警告寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED		DVDD POR	OTW	OTW CH1	OTW CH2	OTW 通道 3	OTW 通道 4
R		R	R	R	R	R	R

表 8-16. 警告字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-6	RESERVED	R	00	
5	DVDD POR	R	0	0: 未发生 DVDD POR 1 发生 DVDD POR
4	OTW	R	0	0: 未检测到全局过热警告 1: 检测到全局过热警告
3	OTW CH1	R	0	0: 未检测到通道 1 过热警告 1: 检测到通道 1 过热警告
2	OTW CH2	R	0	0: 未检测到通道 2 过热警告 1: 检测到通道 2 过热警告

表 8-16. 警告字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
1	OTW CH3	R	0	0: 未检测到通道 3 过热警告 1: 检测到通道 3 过热警告
0	OTW CH4	R	0	0: 未检测到通道 4 过热警告 1: 检测到通道 4 过热警告

8.1.16 引脚控制寄存器 (地址 = 0x14) [默认值 = 0x00]

图 8-16 展示了引脚控制寄存器，表 8-17 对其进行了说明。

图 8-16. 引脚控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
过流掩码	过温关断掩码	欠压掩码	过压掩码	直流掩码	电流限值掩码	削波掩码	过热警告掩码
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-17. 引脚控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	过流掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的过流故障 1: 不报告故障引脚上的过流故障
6	过温关断掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的过热故障 1: 不报告故障引脚上的过热故障
5	欠压掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的欠压故障 1: 不报告故障引脚上的过压故障
4	过压掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的过压故障 1: 不报告故障引脚上的欠压故障
3	直流掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的直流故障 1: 不报告故障引脚上的直流故障
2	电流限值掩码	R/W	0	0: 报告故障引脚上的电流限值故障 1: 不报告故障引脚上的电流限值故障
1	削波检测掩码	R/W	0	0: 报告警告引脚上的削波检测 1: 不报告警告引脚上的削波检测
0	过热警告掩码	R/W	0	0: 报告警告引脚上的过热警告 1: 不报告警告引脚上的过热警告

8.1.17 交流负载诊断控制 1 寄存器 (地址 = 0x15) [默认值 = 0x00]

交流负载诊断控制 1 寄存器如 图 8-17 所示，相应说明如 表 8-18 所述。

图 8-17. 交流负载诊断控制 1 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
通道 1 /通道 2 增益	RESERVED	通道 3 /通道 4 增益	RESERVED	CH1 ENABLE	CH2 ENABLE	通道 3 启用	通道 4 启用
R/W	R	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-18. 交流负载诊断控制 1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	通道 1 与通道 2 增益	R/W	0	0: 增益 1 1: 增益 4

表 8-18. 交流负载诊断控制 1 字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
6	RESERVED	R	0	
5	通道 3 与通道 4 增益	R/W	0	0 : 增益 1 1 : 增益 4
4	RESERVED	R	0	
3	CH1 ENABLE	R/W	0	0 : 交流诊断已禁用 1 : 交流诊断已启用
2	CH2 ENABLE	R/W	0	0 : 交流诊断已禁用 1 : 交流诊断已启用
1	CH3 ENABLE	R/W	0	0 : 交流诊断已禁用 1 : 交流诊断已启用
0	CH4 ENABLE	R/W	0	0 : 交流诊断已禁用 1 : 交流诊断已启用

8.1.18 交流负载诊断控制 2 寄存器 (地址 = 0x16) [默认值 = 0x00]

交流负载诊断控制 2 寄存器如 图 8-17 所示，相应说明如 表 8-19 所述。

图 8-18. 交流负载诊断控制 2 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
交流诊断环回	RESERVED			驱动	RESERVED		
R/W	R			R/W	R		

表 8-19. 交流负载诊断控制 2 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	交流诊断环回	R/W	0	0 : 禁用环回。测量负载与信号路径的相位延迟。 1 : 启用环回。仅测量信号路径的相位延迟
6-3	RESERVED	R	0000	
2	驱动	R/W	0	0 : 10mA 1 : 20mA
1-0	RESERVED	R	00	

8.1.19 交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至通道) 寄存器 (地址=0x17 - 0x1A) [默认值=0x00]

交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至) 寄存器如 图 8-19 所示，相应说明如 表 8-20 所述。

图 8-19. 交流负载诊断报告通道 x 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
通道 x 阻抗							
R							

表 8-20. 通道 x 交流 LDG 阻抗报告字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	通道 x 阻抗	R	00000000	每个通道 8 位交流负载诊断阻抗报告。参阅 表 7-3，了解阻抗计算 0x00 : 0 Ω 0x01 : 0.059 Ω ... 0xFF : 15.045 Ω

8.1.20 交流负载诊断报告相位高电平寄存器 (地址=0x1B) [默认值=0x00]

交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至) 寄存器如 图 8-19 所示，相应说明如 表 8-21 所述。

图 8-20. 交流负载诊断报告相位高电平寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
相位高电平							
R							

表 8-21. 交流 LDG 报告相位高电平寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	相位高电平	R	00000000	位 15:8

8.1.21 交流负载诊断报告相位低电平寄存器 (地址=0x1C) [默认值=0x00]

交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至) 寄存器如 图 8-21 所示，相应说明如 表 8-22 所述。

图 8-21. 交流负载诊断报告相位低电平寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
相位低电平							
R							

表 8-22. 交流 LDG 报告相位低电平寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	相位低电平	R	00000000	位 7:0

8.1.22 交流负载诊断报告 STI 高电平寄存器 (地址=0x1D) [默认值=0x00]

交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至) 寄存器如 图 8-22 所示, 相应说明如 表 8-23 所述。

图 8-22. 交流负载诊断报告 STI 高电平寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
STI 高电平							
R							

表 8-23. 交流 LDG 报告 STI 高电平字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	STI 高电平	R	00000000	位 15:8

8.1.23 交流负载诊断报告 STI 低电平寄存器 (地址=0x1E) [默认值=0x00]

交流负载诊断报告通道 1 (通道 4 至) 寄存器如 图 8-23 所示, 相应说明如 表 8-24 所述。

图 8-23. 交流负载诊断报告 STI 低电平寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
STI 低电平							
R							

表 8-24. 交流 LDG 报告 STI 低电平寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	STI 低电平	R	00000000	位 7:0

8.1.24 其他控制 3 寄存器 (地址 = 0x21) [默认值 = 0x00]

其他控制 3 寄存器如 图 8-24 所示, 相应说明如 表 8-25 所述。

图 8-24. 其他控制 3 寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CLEAR FAULT	RESERVED	屏蔽电流限值警告	RESERVED	OTSD 自动恢复	RESERVED		
R/W	R	R/W	R	R/W	R		

表 8-25. 其他控制 3 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	CLEAR FAULT	R/W	0	0: 正常运行 1: 清除故障
6	RESERVED	R	0	

表 8-25. 其他控制 3 字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
5	屏蔽电流限值警告	R/W	0	0 : 报告警告引脚上的电流限值 当在 200 ms 窗口内, 在大于 45% 的密度下, 出现内部电流限值标志时, 就会发出电流限值警告。如果警告窗口持续时间超过四个 200ms 窗口, 就会发出电流限值故障, 所有通道将会进入高阻态状态 1 : 不报告故障引脚上的电流限值故障
4	RESERVED	R	0	
3	OTSD 自动恢复	R/W	0	0 : 过热故障锁存 1 : 自动过热保护恢复
2-0	RESERVED	R	000	

8.1.25 削波控制寄存器 (地址 = 0x22) [默认值 = 0x01]

削波检测寄存器如 图 8-25 所示, 相应说明如 表 8-26 所示。

图 8-25. 削波控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED		报告		RESERVED	等级		CLIPDET_EN
R		R/W		R	R/W		R/W

表 8-26. 削波控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	RESERVED	R	000	
4	报告	R/W	0	0 : 向警告引脚发送通道 1 至通道 4 削波检测报告 1 : 向警告引脚发送通道 1 至通道 2 削波检测报告, 向故障引脚发送通道 3 至通道 4 削波检测报告
3	RESERVED	R	0	
2-1	等级	R/W	00	00 : 2% THD 01 : 5% THD 10 : 10% THD 11 : 1% THD
0	CLIPDET_EN	R/W	1	0 : 禁用削波检测 1 : 启用削波检测

8.1.26 削波警告寄存器 (地址 = 0x24) [默认值 = 0x00]

图 8-26 展示了削波窗口寄存器, 表 8-27 对其进行了说明。

图 8-26. 削波警告寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				CH4_CLIP	CH3_CLIP	CH2_CLIP	CH1_CLIP
R				R	R	R	R

表 8-27. 削波警告字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-4	RESERVED		0	0
3	CH4_CLIP	R	0	0 : 无削波检测 1 : 削波检测

表 8-27. 削波警告字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
2	CH3_CLIP	R	0	0: 无削波检测 1: 削波检测
1	CH2_CLIP	R	0	0: 无削波检测 1: 削波检测
0	CH1_CLIP	R	0	0: 无削波检测 1: 削波检测

8.1.27 电流限值状态寄存器 (地址=0x25) [默认值=0x00]

电流限值状态寄存器如 图 8-27 所示，相应说明如 表 8-28 所述。

图 8-27. 电流限值状态寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
CH4 I-LIMIT_FAULT	CH3 I-LIM_FLT	CH2 I-LIM_FLT	CH1 I-LIM_FLT	CH4_I_LIM_W N	CH3_I_LIM_W N	CH2_I_LIM_W N	CH1_I_LIM_W N
R	R	R	R	R	R	R	R

表 8-28. 电流限值状态字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	CH4_I_LIMIT_FAULT	R	0	0: 未检测到电流限值故障 1: 检测到电流限值故障
6	CH3_I_LIMIT_FAULT	R	0	0: 未检测到电流限值故障 1: 检测到电流限值故障
5	CH2_I_LIMIT_FAULT	R	0	0: 未检测到电流限值故障 1: 检测到电流限值故障
4	CH1_I_LIMIT_FAULT	R	0	0: 检测到电流限值故障 1: 检测到电流限值故障
3	CH4_I_LIMIT_WARN	R	0	0: 未检测到电流限值警告 1: 检测到电流限值警告
2	CH3_I_LIMIT_WARN	R	0	0: 未检测到电流限值警告 1: 检测到电流限值警告
1	CH2_I_LIMIT_WARN	R	0	0: 未检测到电流限值警告 1: 检测到电流限值警告
0	CH1_I_LIMIT_WARN	R	0	0: 未检测到电流限值警告 1: 检测到电流限值警告

8.1.28 故障与警告引脚控制寄存器 (地址=0x27) [默认值=0x7F]

图 8-28 展示了警告引脚控制寄存器，表 8-29 对其进行了说明。

图 8-28. 故障与警告引脚控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED	OT_FAULT_LA TCH_ENABLE	I_LIMIT_STATU S_LATCH_ENA BLE	DVDD_UV_LAT CH_ENABLE	POR_LATCH_E N	OTW_LATCH_ EN	I_LIMIT_WARNI NG_LATCH_EN	CLIP_WARNIN G_LATCH_ENA BLE
R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-29. 故障与警告引脚控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	RESERVED	R	0	
6	OT_FAULT_LATCH_ENABLE	R/W	1	0 : 禁用故障引脚上的过热报告锁存 1 : 启用故障引脚上的过热报告锁存
5	I_LIMIT_STATUS_LATCH_ENABLE	R/W	1	0 : 禁用故障引脚上的电流限值故障报告锁存 1 : 启用故障引脚上的电流限值故障报告锁存
4	DVDD_UV_LATCH_ENABLE	R/W	1	0 : 禁用警告引脚上的 DVDD 欠压报告锁存 1 : 启用警告引脚上的 DVDD 欠压报告锁存
3	POR_LATCH_EN	R/W	1	0 : 禁用警告引脚上的 DVDD POR 报告锁存 1 : 启用警告引脚上的 DVDD POR 报告锁存
2	OTW_LATCH_EN	R/W	1	0 : 禁用警告引脚上的过热警告报告锁存 1 : 启用警告引脚上的过热警告报告锁存
1	I_LIMIT_WARNING_LATCH_EN	R/W	1	0 : 禁用警告引脚上的电流限值警告报告锁存 1 : 启用警告引脚上的电流限值警告报告锁存
0	CLIP_WARNING_LATCH_ENABLE	R/W	1	0 : 禁用削波报告的引脚锁存 1 : 启用削波报告的引脚锁存

8.1.29 热折返控制寄存器 (地址=0x28) [默认值=0x00]

热折返控制寄存器如 图 8-29 所示，相应说明如 表 8-30 所述。

图 8-29. 热折返控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
ZC_WAIT_TIME	BYPASS	ZC_BYPASS	启动		RELEASE		
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-30. 热折返控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-6	ZC_WAIT_TIME	R/W	00	00 : 20 μ S 系统在这一时间段内等待过零，然后改变增益。 01 : 80 μ S 10 : 320 μ S 11 : 1280 μ S
5	BYPASS	R/W	0	0 : 启用热折返 1 : 禁用热折返
4	ZC_BYPASS	R/W	0	0 : 启用电压过零检测 1 : 禁用电压过零检测。一旦满足热条件，增益会立即变化，无需等待过零检测。
3-2	启动	R/W	00	00 : 1dB/100mS 01 : 1dB/200mS 10 : 1dB/400mS 11 : 1dB/800mS
1-0	RELEASE	R/W	00	00 : 1dB/200mS 01 : 1dB/400mS 10 : 1dB/800mS 11 : 1dB/1600mS

8.1.30 交流诊断频率控制寄存器 (地址=0x2A) [默认值=0x32]

交流诊断频率控制寄存器如 图 8-30 所示，相应说明如。

图 8-30. 交流诊断频率控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
STIMULUS FREQUENCY							
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

表 8-31. 交流诊断频率控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	刺激频率 (375Hz/位)	R/W	00110010	00000000 - 00000010 : 保留 00000011 : 1125Hz 00110010 : 18.75kHz 00111100 : 22.50kHz 00111101 - 11111111 : 保留

8.1.31 同步引脚控制寄存器 (地址=0x2B) [默认值=0x02]

同步引脚控制寄存器如 图 8-31 所示，相应说明如 表 8-32 所述。

图 8-31. SYNC PIN 控制寄存器

7	6	5	4	3	2	1	0
同步错误检测旁路	RESERVED		同步时钟错误屏蔽	RESERVED		同步时钟错误锁存	控制器/目标
R/W	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W

表 8-32. 同步引脚控制字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	同步错误检测旁路	R/W	0	0 : 同步时钟错误检测 1 : 绕过同步时钟错误检测 - 此设置可能导致器件出现异常行为
6-5	RESERVED	R	00	
4	同步时钟错误屏蔽	R/W	0	0 : 报告同步时钟错误 1 : 屏蔽同步时钟错误
3-2	RESERVED	R	00	
1	同步时钟错误锁存	R/W	1	0 : 非锁存同步时钟错误 1 : 锁存同步时钟错误
0	控制器/目标	R/W	0	0 : 目标模式 - 需要向同步引脚提供外部时钟 1 : 控制器模式

9 应用和实施

备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 器件规格的范围，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客户应负责确定器件是否适用于其应用。客户应验证并测试其设计，以确保系统功能。

9.1 应用信息

TPA6404-Q1 是一款具有四个通道模拟输入的 D 类音频放大器设计，适用于在汽车音响主机与外部放大器模块中使用。TPA6404-Q1 集成了需要在要求严苛的 OEM 应用中执行的必要功能。

9.1.1 AM 无线电回避

通过将器件的开关频率设置在 AM 频段之上，可以避免 AM 无线电干扰。可用开关频率选项为 1.8MHz、2.1MHz 与 2.3MHz。

9.1.2 并行 BTL 运行 (PBTL)

该器件能够将两个通道进行并联配置，为低阻抗负载提供两倍的电流驱动能力。BTL 与 PBTL 模式可以混合使用。可以将通道 1 与通道 2 配置为 PBTL，或将通道 3 与通道 4 配置为 PBTL，或将两对通道均配置为 PBTL。根据 [典型应用示意图](#)，正确连接两对 PBTL 配置的输入和输出。对于扬声器输出连接，必须设置在 LC 滤波器扬声器侧。在 LC 输出滤波器负载侧并联 BTL 通道，能够驱动更大的电流。通道 2 与通道 4 上的输入连接应接地。

必须在待机引脚有效时，进行适当的 I2C 寄存器设置。（[模式控制字段说明](#)中显示的）寄存器 0x00 有两位（即：第 4 位与第 5 位），需要设置为 PBTL 操作。通过第 4 位将通道 1 与通道 2 设置为 PBTL，通过第 5 位将通道 3 与通道 4 设置为 PBTL。

BTL 与 PBTL 模式可以混合使用。PBTL 模式下通道 1/通道 2，或 PBTL 模式下通道 3/通道 4，或 PBTL 模式下通道 1/通道 2 与通道 3/通道 4。

并行 BTL 通道支持负载诊断。

9.1.3 重构滤波器设计

放大器输出由 H 桥配置中的高电流 LDMOS 晶体管驱动。这些晶体管要么完全关断，要么完全导通。结果是方波输出信号，其占空比与音频信号的幅度成正比。LC 重建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。重建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，应仔细考虑。

9.1.4 线路驱动器应用

在很多汽车音响应用中，同一音响主机必须驱动一个扬声器（阻抗为几 Ω ）或一个外部放大器输入（阻抗为几千 Ω ）。该设计能够支持这两种应用，并且具有特殊的线路驱动增益与诊断功能。此外，该器件还具有高开关频率，非常适合此类应用。通过模式控制 I2C 寄存器 0x00，在线路驱动器模式下设置所需通道，对于外部连接的放大器，需要在 600 Ω 与 4.7k Ω 之间具有差分阻抗，以便确保直流线路诊断能够检测连接的外部放大器。下图显示了建议的外部放大器输入配置（平衡电容器耦合）。

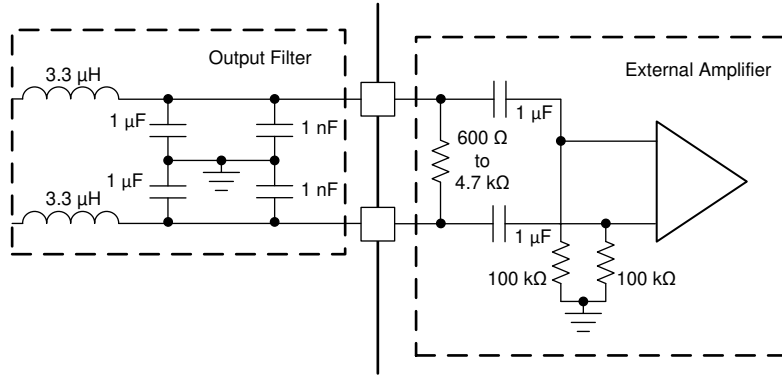


图 9-1. 线路驱动器外部放大器输入配置

9.2 典型应用

9.2.1 BTL 应用

图 9-2 为音响主机应用的典型四通道解决方案示意图。

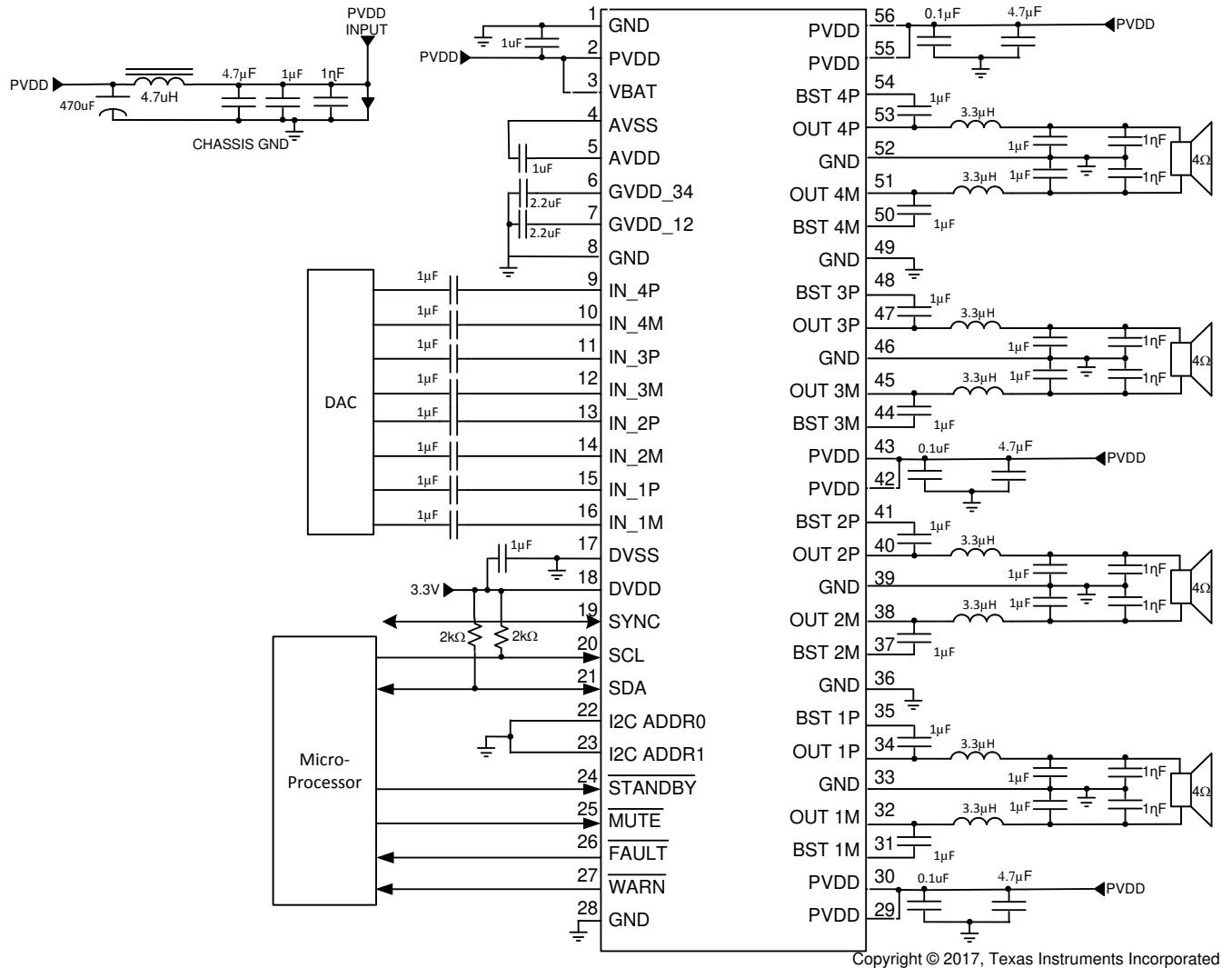


图 9-2. 典型 4 通道 BTL 应用原理图

9.2.1.1 设计要求

本音响主机示例的重点是在采用 14.4V 电池电源的情况下，向 4Ω 负载提供 4 倍 25W 输出功率的最小解决方案。

开关频率设置为高于 AM 频带，开关频率为 2.1MHz。

通过选择 2.1MHz 的开关频率，能够使用较小的 (3.3µH) 输出电感值，进而实现极小的占用空间。

9.2.1.2 详细设计过程

9.2.1.2.1 硬件设计

请按照以下过程，进行硬件设计：

- 确定输入模式。输入模式可以为平衡模式，也可以为单端模式。对于耦合电容器的数值，根据使用的增益设置与所需的频率响应进行确定。

- 确定负载所需输出功率。输出功率要求决定了所需电源电压与电流。对于所需输出重建滤波器元件，也由输出电源驱动。
- 根据相应要求，调整图 9-2 中的典型应用原理图。

9.2.1.2.2 自举电容器

自举电容器提供上部 N 沟道 FET 的栅极驱动电压。这些电容器的大小必须符合系统规格。对于典型应用，请使用 1 μ F 电容器。

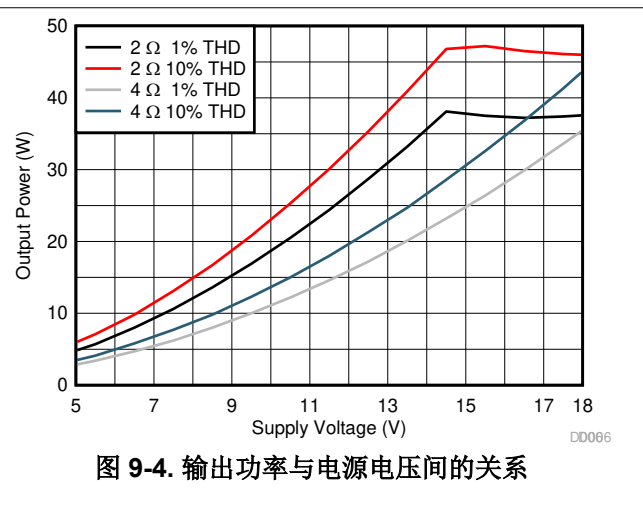
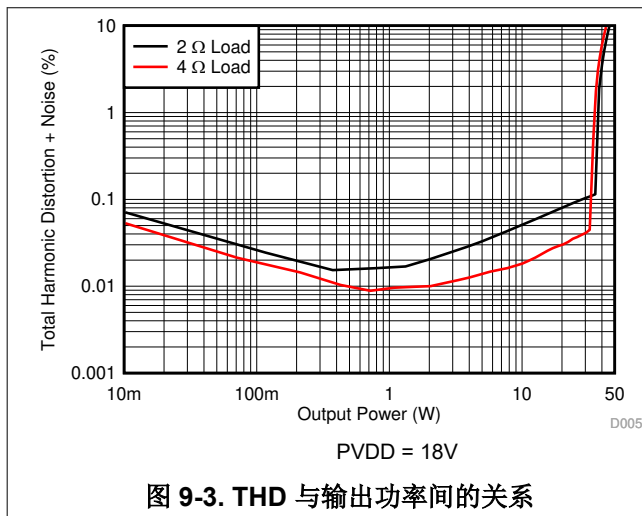
9.2.1.2.3 输出重构滤波器

输出 FET 能够驱动 H 桥配置中的放大器输出。这些晶体管要么完全关断，要么完全导通。结果是方波输出信号，其占空比与音频信号的幅度成正比。放大器输出需要一个由每个输出端的串联电感器与接地电容器共同组成的重建滤波器，通常称为 LC 滤波器。LC 滤波器可用于降低 PWM 频率，减少电磁辐射，进而确保重建的音频信号能够传递至扬声器。参阅 D 类 LC 滤波器设计 (SLAA701A) 应用报告，了解基于指定负载与频率响应的 LC 滤波器的正确组件描述与设计的详细说明。

LC 滤波器的建议低通截止频率取决于所选开关频率。PWM 频率为 2.1MHz 时，低通截止频率可高达 100kHz。

要选用合适的电感器，必须了解特定规范。如需了解合适电感器选择相关信息，可参阅应用说明《TAS6424-Q1 电感器选择指南 (SLOA242)》。所给电感值为零电流下测得的电流值，但当 TPA6404-Q1 向负载供电时，会有电流流过电感器。使用电感器的电感与电流关系曲线，确保在正常工作期间，在系统设计的最大电流下，电感值不会低于 2 μ H ($f_{sw}=2.1\text{MHz}$)。电感器的 DCR 会直接影响系统设计的输出功率。DCR 越低，扬声器的功率也就越大。对于 4 Ω 系统，典型电感器的 DCR 为 40 至 50m Ω ；对于 2 Ω 系统，典型电感器的 DCR 为 15 至 25m Ω 。

9.2.1.3 应用曲线



9.2.1.4 PBTL 应用

图 9-5 显示了适用于 (需要为 2Ω 负载提供高功率的) 音响主机或外部放大器应用的典型双通道解决方案原理图。

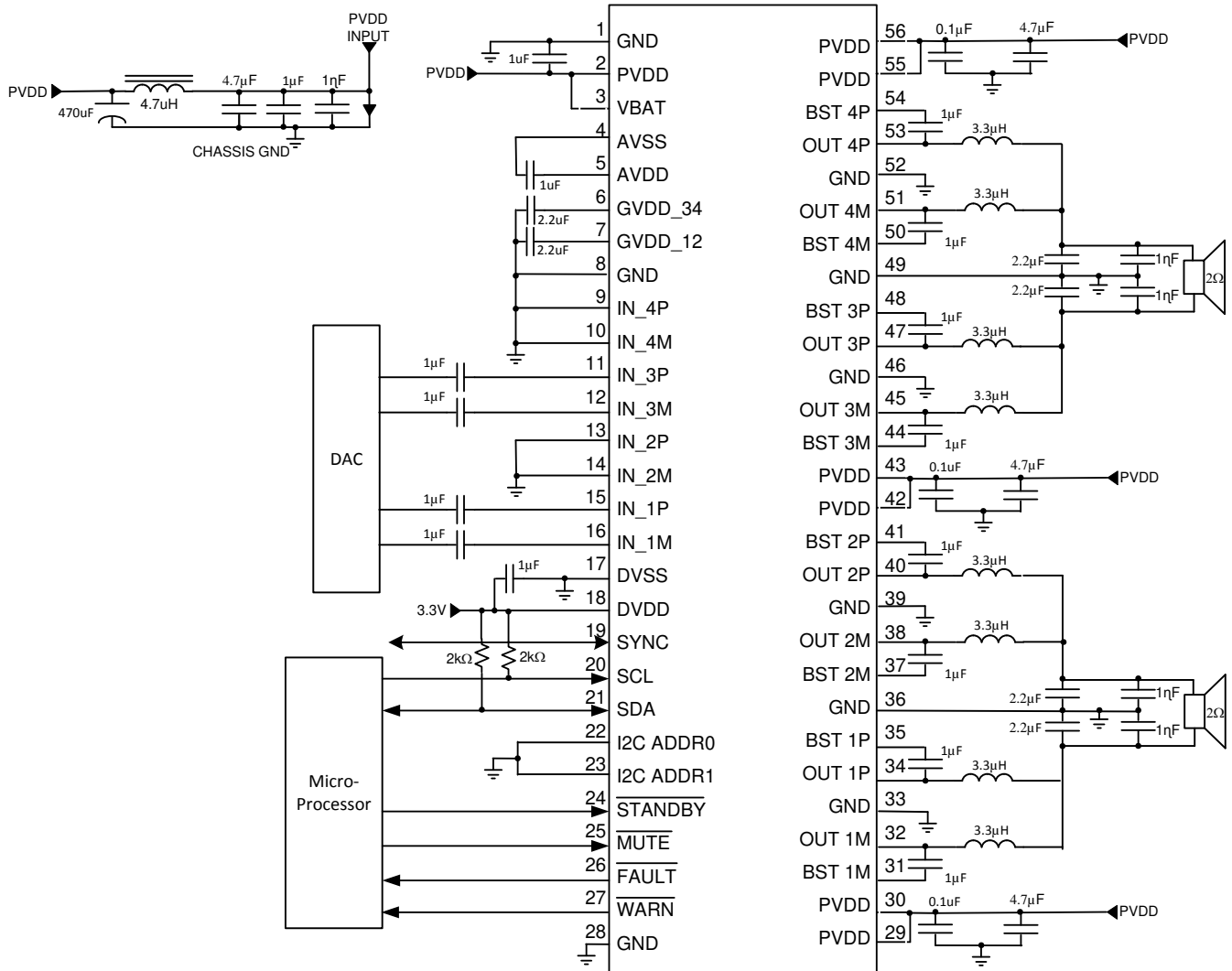


图 9-5. 双通道 PBTL 应用原理图

9.2.1.4.1 设计要求

本音响主机示例的重点是在采用 14.4V 电池电源的情况下，向 2Ω 负载提供 2 次 50W 输出功率的最小解决方案。

开关频率设置为高于 AM 频带，开关频率为 2.1MHz。

通过选择 2.1MHz 的开关频率，能够使用较小的 ($3.3\mu\text{H}$) 输出电感值，进而实现极小的占用空间。

9.2.1.4.2 详细设计过程

9.2.1.4.2.1 硬件设计

请按照以下过程，进行硬件设计：

- 确定输入模式。输入模式可以为平衡模式，也可以为单端模式。对于耦合电容器的数值，根据使用的增益设置与所需的频率响应进行确定。

- 确定负载所需输出功率。输出功率要求决定了所需电源电压与电流。对于所需输出重建滤波器元件，也由输出电源驱动。
- 根据相应要求，调整图 9-5 中的典型应用原理图

9.2.1.4.3 应用曲线

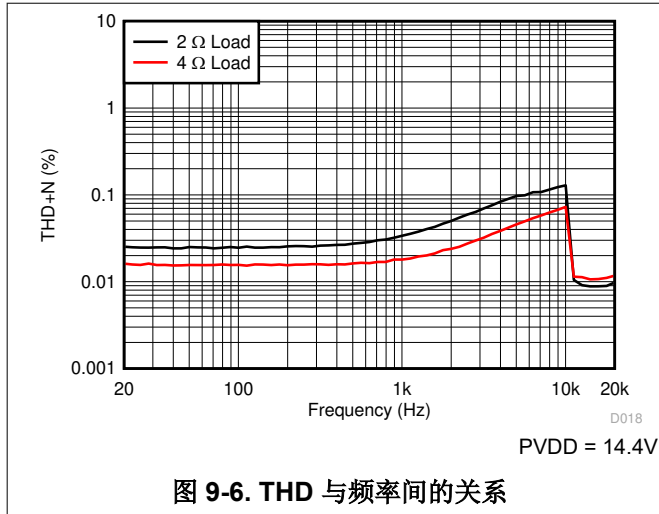


图 9-6. THD 与频率间的关系

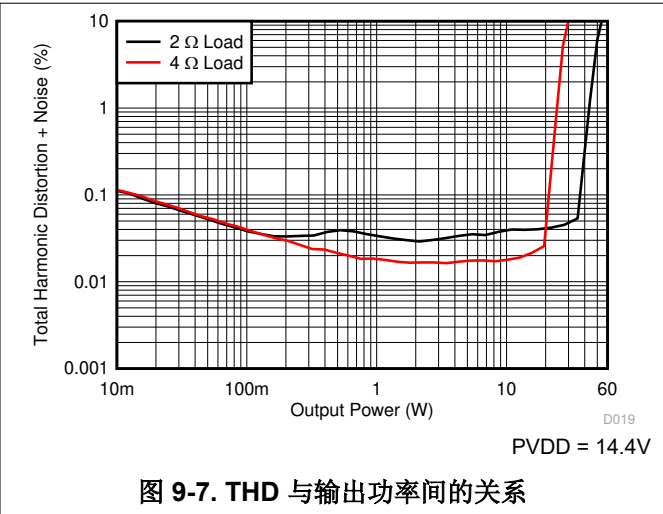


图 9-7. THD 与输出功率间的关系

9.3 电源相关建议

TPA6404-Q1 需要两个电源轨。PVDD 电源是建议的电源电压范围内的大电流电源。VBAT 电源电流较小，必须处于建议的电源范围以内。如果 VBAT 建议的电源范围保持不变，PVDD 与 VBAT 引脚可以连接至同一电源。DVDD 电源是 3.3V 逻辑电源，必须保持在 节 5.3 所示的容差范围以内。

9.4 布局

9.4.1 布局指南

TPA6404-Q1 引脚排列的选择能够提供直通式布局，所有高功率连接位于右侧，所有低功率信号与电源去耦位于左侧。

节 9.4.2 显示了应用示例中的元件区域（参阅 节 9.2 部分）。该布局示例取自 EVM PCB。

TPA6404-Q1 EVM 采用四层印刷电路板（PCB）。铜厚度选择为 70 μm ，以便优化功率损耗。

输出滤波器数值较小，因此尺寸较小，这种情况下，电感器高度较低，因此能够实现双面安装

9.4.1.1 散热焊盘和散热器的电气连接

对于 DKQ 封装，连接到器件散热焊盘的散热器应连接到 GND。不得将散热片连接到任何其他电气节点。

9.4.1.2 EMI 注意事项

汽车级 EMI 性能取决于集成电路设计是否仔细以及系统级设计是否良好。控制电磁干扰 (EMI) 源是设计的所有方面的主要考虑因素。由于封装上的引线较短，因此该设计具有极小的寄生电感。这能够降低电流从芯片流向系统 PCB 期间产生的 EMI。每个通道还以不同相位工作。该设计还采用了针对导致 EMI 的输出转换进行针对性优化的电路。

为了进行 EMI 优化，建议使用实心接地层平面，如需符合 CISPR25 5 级要求的 PCB 设计，可参阅 TPA6404-Q1 EVM 布局。

9.4.1.3 一般注意事项

针对低噪声与 EMC 性能，对 EVM 布局进行了针对性优化。

TPA6404-Q1 拥有一个远离 PCB 的外露散热焊盘。布局必须考虑外部散热器。

对于以下步骤，可参阅 图 9-8：

- (与器件引脚位于同一侧的) 接地平面 A 能够为高频开关电流提供极低的环路阻抗, 有助于降低 EMI。
- (PVDD 上的) 去耦电容器 B 非常靠近器件, 接地回路靠近接地引脚。
- (LC 滤波器中的) 电容器接地连接 C 具有返回至器件的直接路径, 并且每个通道的接地回路是共用的。该直接路径可以改善共模 EMI 抑制。
- 应当尽可能缩短从输出引脚到电感器的布线 D, 以便允许大开关电流的最小环路。
- 散热器安装螺钉 E 应靠近器件, 以便保持从封装到接地的环路短路。
- (将接地平面拼接在一起的) 许多过孔 F 能够形成一个屏蔽层, 以便将放大器与电源隔开。

9.4.2 布局示例

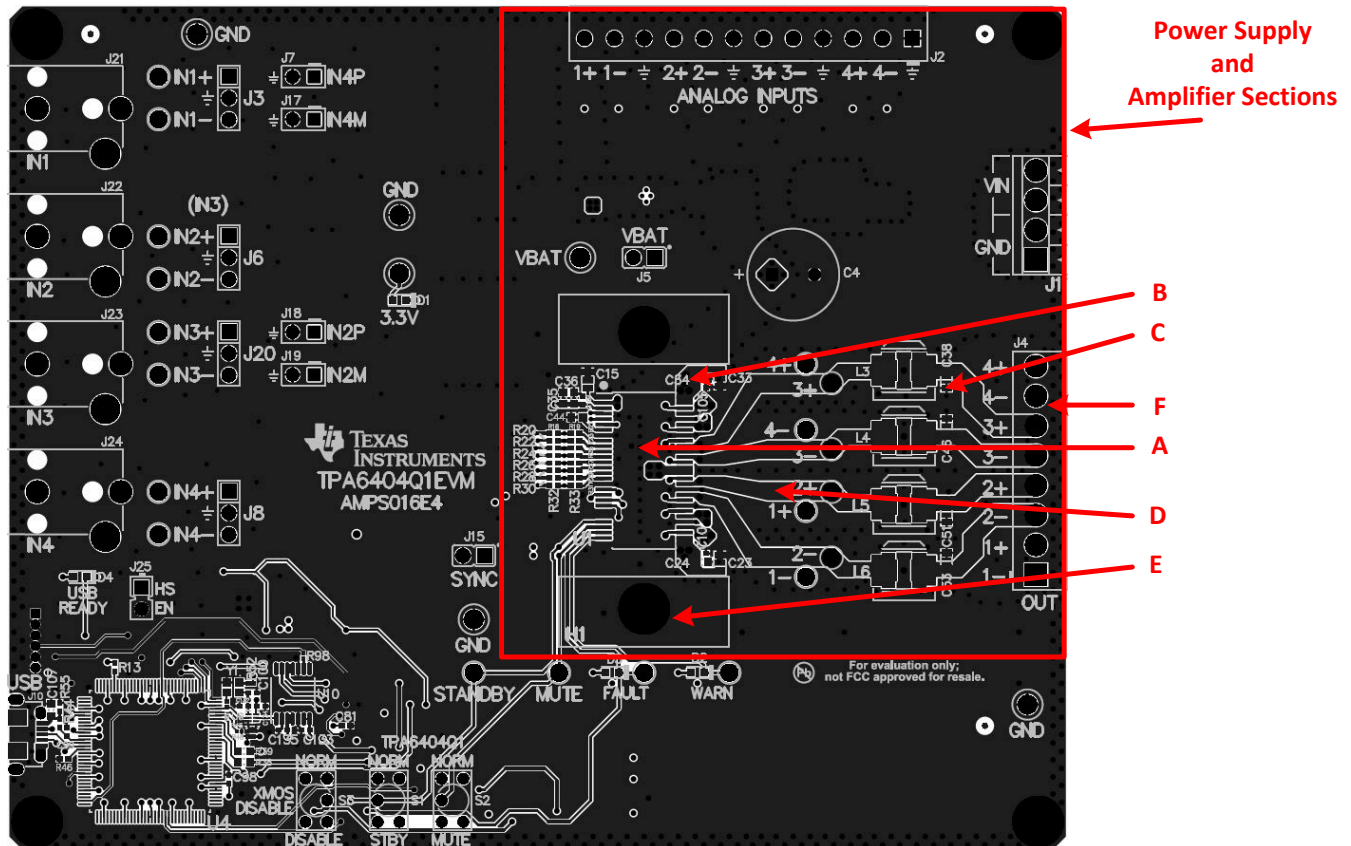


图 9-8. 布局示例

9.4.3 散热注意事项

热增强型 PowerPAD 封装具有外露焊盘, 用于连接到散热器。任何放大器的输出功率均由放大器的热性能以及系统对其施加的限制 (例如: 环境工作温度) 决定。散热器从 TPA6404-Q1 吸收热量后传递到空气中。通过适当的热管理, 该过程可以达到平衡, 热量可以持续从器件中传递出来。由于 D 类放大器效率出众, 因此其散热器较之于传统的线性放大器的散热器, 设计更为紧凑。该器件旨在与散热器配合使用, 因此可将 $R_{\theta JC}$ 用作从结至外露金属封装的热阻。该热阻在热管理中起到主导地位, 因此不考虑其他热传递方式。要确定完整的热解决方案, 需要 $R_{\theta JA}$ (结温至环境温度) 的热阻。热阻由以下部分组成:

- TPA6404-Q1 的 $R_{\theta JC}$
- 热界面材料的热阻
- 散热器的热阻

对于热界面材料的热阻，可根据制造商提供的面积热阻值（单位： $^{\circ}\text{C}/\text{mm}^2\text{W}$ ）与裸露金属封装的面积确定。例如，厚度为 0.0254mm （ 0.001 英寸）的典型白色导热硅脂的热阻约为 $4.52^{\circ}\text{Cmm}^2/\text{W}$ 。DKQ 封装中 TPA6404-Q1 的外露面积为 47.6mm^2 。通过将面积热阻除以外露的金属面积，能够确定导热硅脂的热阻。导热硅脂的热阻为 $0.094^{\circ}\text{C}/\text{W}$

表 9-1 列出了散热器上一个器件的建模参数。假设结温为 115°C ，同时向 4Ω 负载提供每通道 10 瓦的平均功率。热界面材料采用了之前描述的导热硅脂示例。利用公式 1 设计热系统。

$$R_{\theta JA} = R_{\theta JC} + \text{thermal interface resistance} + \text{heat sink resistance} \quad (1)$$

表 9-1. 热量模型

说明	值
环境温度	25°C
负载平均功率	40W ($4 \times 10\text{w}$)
功率耗散	8W ($4 \times 2\text{w}$)
结温	115°C
封装内部 ΔT	5.6°C ($0.7^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 8\text{W}$)
通过热界面材料 ΔT	0.75°C ($0.094^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 8\text{W}$)
所需散热器热阻	$10.45^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ($[(115^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} - 5.6^{\circ}\text{C} - 0.75^{\circ}\text{C}) / 8\text{W}]$)
系统对环境的热阻 $R_{\theta JA}$	$11.24^{\circ}\text{C}/\text{W}$

10 器件和文档支持

10.1 文档支持

10.1.1 相关文档

请参阅以下相关文档：

[PurePath™ 控制台 3 图形开发套件](#)

10.2 接收文档更新通知

要接收文档更新通知，请导航至 ti.com 上的器件产品文件夹。点击右上角的 *提醒我* 进行注册，即可每周接收产品信息更改摘要。有关更改的详细信息，请查看任何已修订文档中包含的修订历史记录。

10.3 静电放电警告



静电放电 (ESD) 会损坏这个集成电路。德州仪器 (TI) 建议通过适当的预防措施处理所有集成电路。如果不遵守正确的处理和安装程序，可能会损坏集成电路。

ESD 的损坏小至导致微小的性能降级，大至整个器件故障。精密的集成电路可能更容易受到损坏，这是因为非常细微的参数更改都可能会导致器件与其发布的规格不相符。

10.4 术语表

[TI 术语表](#) 本术语表列出并解释了术语、首字母缩略词和定义。

10.5 支持资源

10.6 商标

PurePath™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

11 修订历史记录

Changes from Revision A (February 2018) to Revision B (January 2025)	Page
• 首次公开发布数据表.....	1
• 在绝对最大额定值下增加了免责声明.....	5
• 更新了增益值，以便更准确地反映器件性能.....	7
• 增加了 VBATUV_SET 的最小值.....	7
• 增加了目标模式操作相关信息.....	15
• 将去耦电容器引脚连接更新为正确值.....	15
• 从“250ms 时”改为“最短负载诊断持续时间 250ms”.....	15
• 增加了有关 200ms 等待时间要求的信息.....	16
• 增加了故障类型说明.....	16
• 增加了适用于 BTL 与 PBTl 模式的额外步骤.....	17
• 增加了关于清除故障位的信息.....	19
• 增加了在设备处于“播放”模式下进行直流检测的说明.....	19
• 更新了内部下拉电阻器值.....	21
• 更新了内部下拉电阻器值.....	21
• 增加了第 7 位信息.....	27
• 更新了第 3 位说明，以便显示正确数值.....	38
• 更新了第 0 位说明，以便进一步说明.....	40
• 更新了封装信息表.....	55

Changes from Revision * (January 2018) to Revision A (February 2018)

Page

- 作为“生产数据”发布的数据表..... [1](#)
-

12 机械、封装和可订购信息

以下页面包含机械、封装和可订购信息。这些信息是指定器件可用的最新数据。数据如有变更，恕不另行通知，且不会对此文档进行修订。有关此数据表的浏览器版本，请查阅左侧的导航栏。

12.1 封装选项附录

12.1.1 封装信息

可订购器件	状态 ⁽¹⁾	封装类型	封装图	引脚	包装数量	环保计划 ⁽²⁾	铅/焊球镀层 ⁽⁴⁾	MSL 峰值温度 ⁽³⁾	工作温度 ^(°C)	器件标识 ^{(5) (6)}
TPA6404QDKQRQ1	运行	HSSOP	DKQ	56	1000	绿色环保 (RoHS, 无镉/溴)	CU NIPDAU	Level-3-260C-1 68 HR	-40 至 125	TPA6404

(1) 销售状态值定义如下：

正在供货：建议用于新设计的产品器件。

限期购买：TI 已宣布器件即将停产，但仍在购买期限内。

NRND：不推荐用于新设计。为支持现有客户，器件仍在生产，但 TI 不建议在新设计中使用此器件。

PRE_PROD：器件未发布，尚未量产，未向大众市场供货，也未在网上供应，未提供样片。

预发布：器件已发布，但未量产。可能提供样片，也可能无法提供样片。

已停产：TI 已停止生产该器件。

(2) 环保计划 - 规划的环保分级包括：无铅 (RoHS)，无铅 (RoHS 豁免) 或绿色环保 (RoHS, 无镉/溴) - 如需了解最新供货信息及更多内容详情，请访问 <http://www.ti.com/productcontent>。

待定：无铅/绿色环保转换计划尚未确定。

无铅 (RoHS)：TI 所说的“无铅”或“无 Pb”是指半导体产品符合针对所有 6 种物质的现行 RoHS 要求，包括要求铅的重量不超过同质材料总重量的 0.1%。因在设计时就考虑到了高温焊接要求，因此 TI 的无铅产品适用于指定的无铅作业。

无铅 (RoHS 豁免)：该元件在以下两种情况下可享受 RoHS 豁免：1) 芯片和封装之间使用铅基倒装芯片焊接凸点；2) 芯片和引线框之间使用铅基芯片粘合剂。否则，元件将根据上述规定视为无铅 (符合 RoHS)。

绿色环保 (RoHS, 无镉/溴)：TI 将“绿色环保”定义为无铅 (符合 RoHS 标准)、无溴 (Br) 和无镉 (Sb) 基阻燃剂 (Br 或 Sb 在同质材料中的质量不超过总质量的 0.1%)

(3) MSL, 峰值温度-- 湿敏等级额定值 (符合 JEDEC 工业标准分级) 和峰值焊接温度。

(4) 铅/焊球镀层 - 可订购器件可能有多种镀层材料选项。各镀层选项用垂直线隔开。如果铅/焊球镀层值超出最大列宽，则会折为两行。

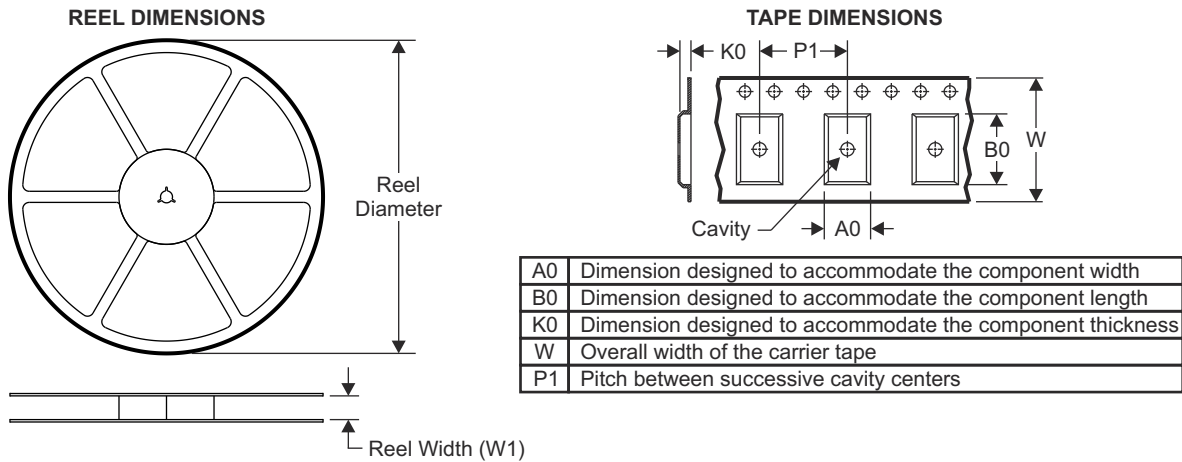
(5) 器件上可能还有与标识、批次跟踪代码信息或环境分级相关的标记

(6) 如有多个器件标识，将用括号括起来。不过，器件上仅显示括号中以“~”隔开的其中一个器件标识。如果某一行缩进，说明该行续接上一行，这两行合在一起表示该器件的完整器件标识。

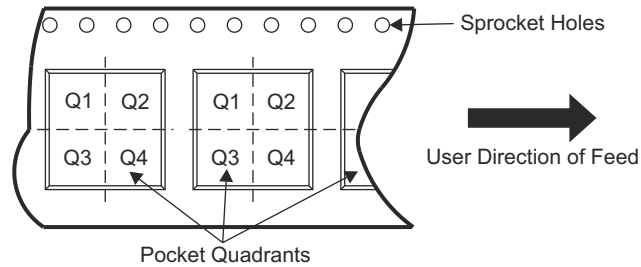
重要信息和免责声明：本页面上提供的信息代表 TI 在提供该信息之日的认知和观点。TI 的认知和观点基于第三方提供的信息，TI 不对此类信息的正确性做任何声明或保证。TI 正在致力于更好地整合第三方信息。TI 已经并将继续采取合理的措施来提供有代表性且准确的信息，但是可能尚未对引入的原料和化学制品进行破坏性测试或化学分析。TI 和 TI 供应商认为某些信息属于专有信息，因此可能不会公布其 CAS 编号及其他受限制的信息。

在任何情况下，TI 因此类信息产生的责任决不超过 TI 每年向客户销售的本文档所述 TI 器件的总购买价。

12.1.2 卷带包装信息

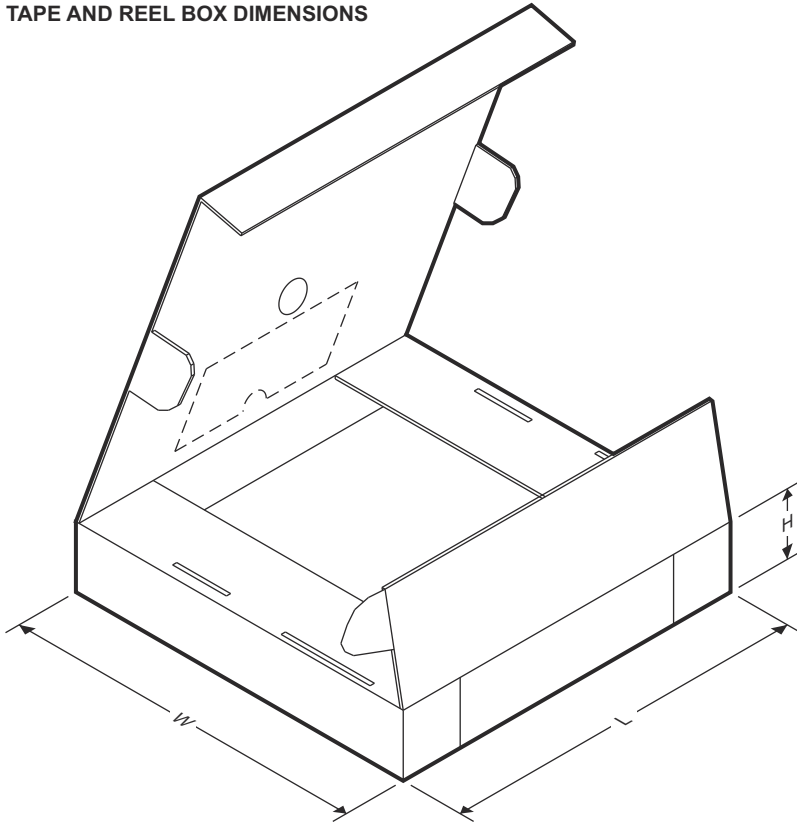


QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



器件	封装类型	封装图	引脚	SPQ	卷带直径 (mm)	卷带宽度 W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 象限
TPA6404QDKQRQ1	HSSOP	DKQ	56	1000	330.0	32.4	11.35	18.87	3.1	16.0	32.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



器件	封装类型	封装图	引脚	SPQ	长度 (mm)	宽度 (mm)	高度 (mm)
TPA6404QDKQRQ1	HSSOP	DKQ	56	1000	367.0	367.0	55.0

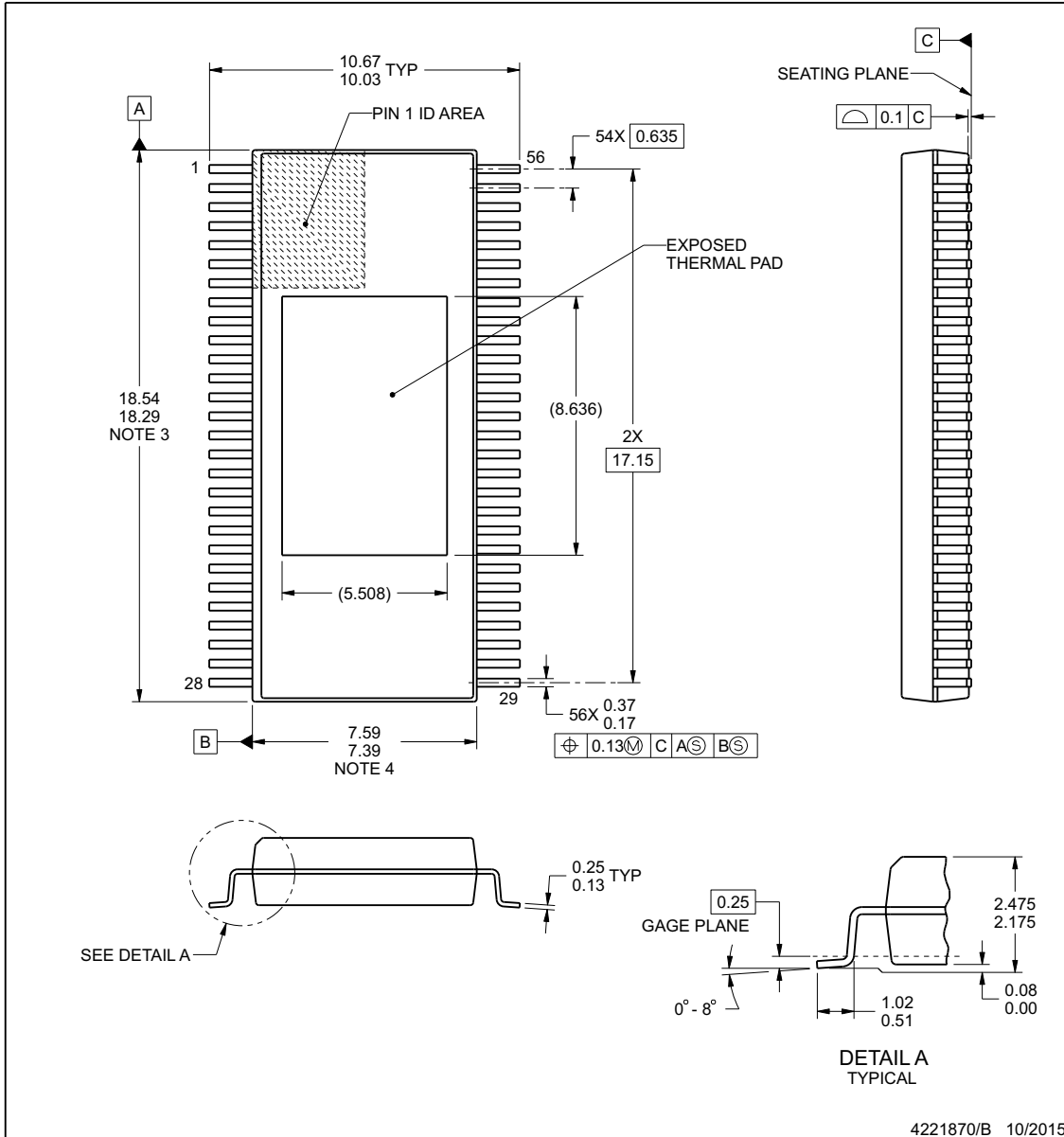


PACKAGE OUTLINE

DKQ0056A

PowerPAD™ SSOP - 2.475 mm max height

PLASTIC SMALL OUTLINE



4221870/B 10/2015

NOTES:

PowerPAD is a trademark of Texas Instruments.

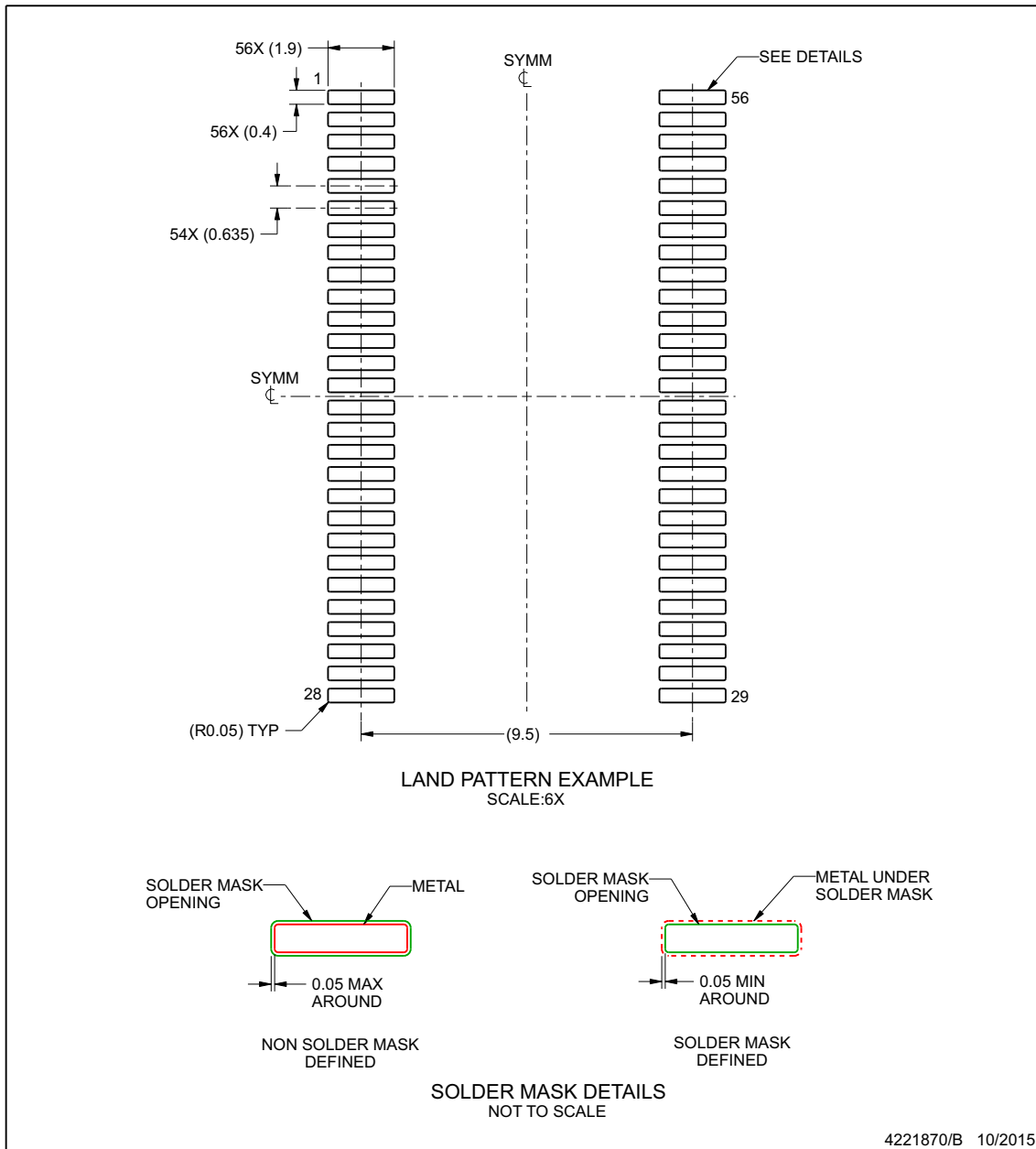
1. All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. This dimension does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed 0.15 mm per side.
4. This dimension does not include interlead flash. Interlead flash shall not exceed 0.25 mm per side.
5. The exposed thermal pad is designed to be attached to an external heatsink.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

DKQ0056A

PowerPAD™ SSOP - 2.475 mm max height

PLASTIC SMALL OUTLINE



NOTES: (continued)

- 6. Publication IPC-7351 may have alternate designs.
- 7. Solder mask tolerances between and around signal pads can vary based on board fabrication site.
- 8. Size of metal pad may vary due to creepage requirement.

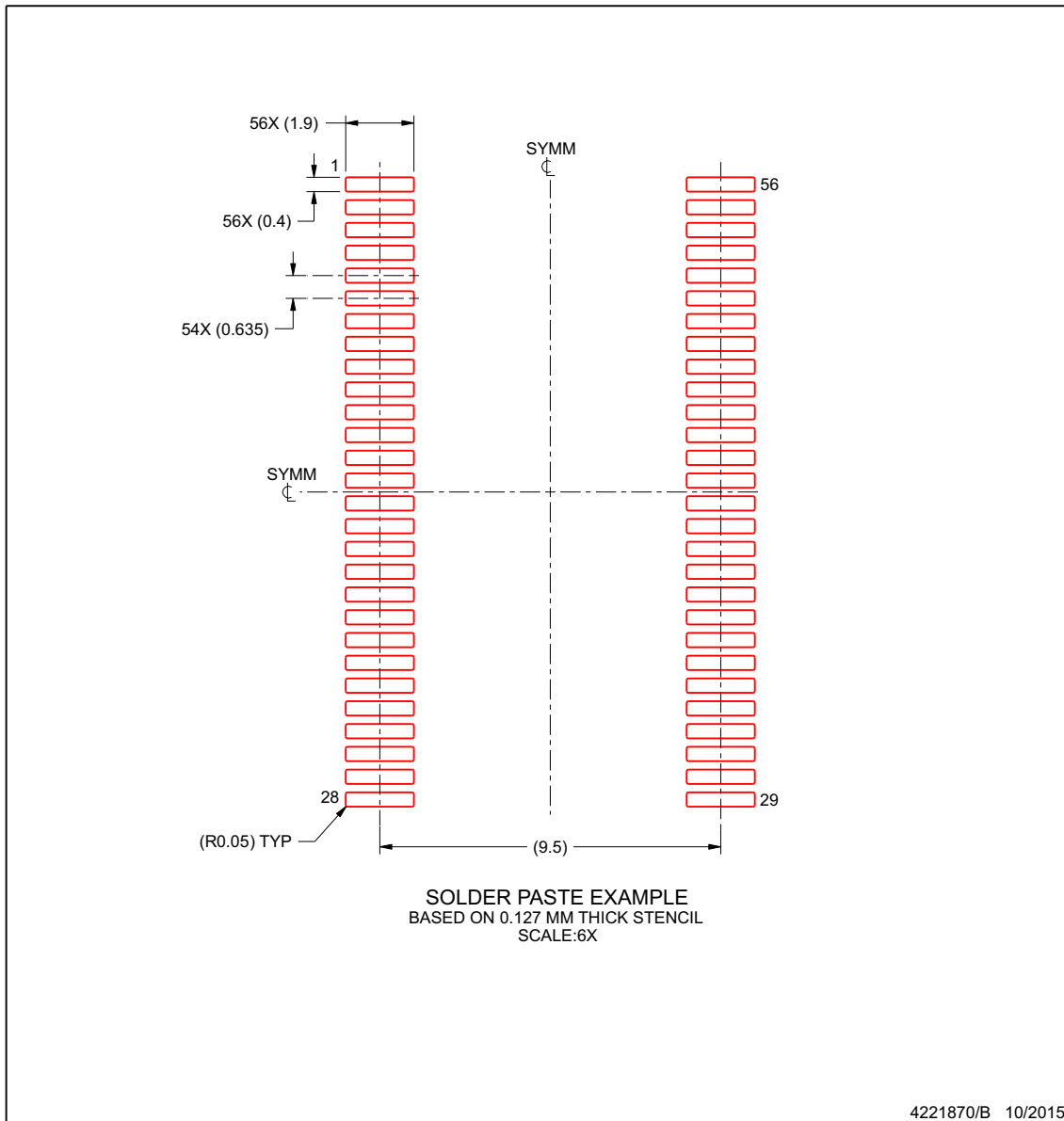
www.ti.com

EXAMPLE STENCIL DESIGN

DKQ0056A

PowerPAD™ SSOP - 2.475 mm max height

PLASTIC SMALL OUTLINE



NOTES: (continued)

9. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.
10. Board assembly site may have different recommendations for stencil design.

www.ti.com

PACKAGING INFORMATION

Orderable Device	Status (1)	Package Type	Package Drawing	Pins	Package Qty	Eco Plan (2)	Lead finish/ Ball material (6)	MSL Peak Temp (3)	Op Temp (°C)	Device Marking (4/5)	Samples
TPA6404QDKQRQ1	ACTIVE	HSSOP	DKQ	56	1000	RoHS & Green	NIPDAU	Level-3-260C-168 HR	-40 to 125	TPA6404	Samples

(1) The marketing status values are defined as follows:

ACTIVE: Product device recommended for new designs.

LIFEBUY: TI has announced that the device will be discontinued, and a lifetime-buy period is in effect.

NRND: Not recommended for new designs. Device is in production to support existing customers, but TI does not recommend using this part in a new design.

PREVIEW: Device has been announced but is not in production. Samples may or may not be available.

OBSOLETE: TI has discontinued the production of the device.

(2) **RoHS:** TI defines "RoHS" to mean semiconductor products that are compliant with the current EU RoHS requirements for all 10 RoHS substances, including the requirement that RoHS substance do not exceed 0.1% by weight in homogeneous materials. Where designed to be soldered at high temperatures, "RoHS" products are suitable for use in specified lead-free processes. TI may reference these types of products as "Pb-Free".

RoHS Exempt: TI defines "RoHS Exempt" to mean products that contain lead but are compliant with EU RoHS pursuant to a specific EU RoHS exemption.

Green: TI defines "Green" to mean the content of Chlorine (Cl) and Bromine (Br) based flame retardants meet JS709B low halogen requirements of <=1000ppm threshold. Antimony trioxide based flame retardants must also meet the <=1000ppm threshold requirement.

(3) MSL, Peak Temp. - The Moisture Sensitivity Level rating according to the JEDEC industry standard classifications, and peak solder temperature.

(4) There may be additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category on the device.

(5) Multiple Device Markings will be inside parentheses. Only one Device Marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a device. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire Device Marking for that device.

(6) Lead finish/Ball material - Orderable Devices may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

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