

实现面向头戴式耳机应用的差动放大器的稳定

作者: John Caldwell

模拟应用工程师

引言

近期, 高保真度头戴式耳机和无损型音频格式的日趋流行导致许多个人电子产品制造商在其设备上添加高品质音频输出。因此, 曾经为家用高保真度系统预留的 24 位 / 192 kHz 音频数模转换器 (DAC) 如今逐渐地被蜂窝电话、平板电脑和便携式音乐播放器等移动设备所采用。这些 DAC 可提供极低失真的信号, 但不能直接驱动头戴式耳机。为了充分地利用此类高性能器件, 还必需给系统增添设计完善的头戴式耳机放大器。

传统的头戴式耳机放大器电路

DAC 输出常常是一个差分信号, 必须利用头戴式耳机放大器电路将其转换为一个单端信号。如图 1 所示, 传统的差动放大器由一个运放放大器 (运放) 和四个匹配电阻器组成, 其负责放大互补 DAC 输出之间的电压差。另外, 该放大器还用于抑制两个输出共有的信号, 比如偶次失真。放大器不得给信号增加有害的噪声或失真, 或改变系统的整体频率响应。也许最重要的一点是, 放大器必须在头戴式耳机连接至输出时保持稳定。尽管这最后一点是根本性的, 但在头戴式耳机放大器的设计中却常常被忽视。

头戴式耳机阻抗特征

头戴式耳机并非一个简单的电阻性负载, 但恰恰相反, 其标称阻抗规范 (通常介于 $16\ \Omega$ 和 $600\ \Omega$ 之间) 似乎给人这样的暗示。图 2 示出了一个 $64\ \Omega$ (标称值) 头戴式耳机在 10 Hz 至 10 MHz 频率范围内的实测阻抗 (示出了一个通道)。红色曲线给出了阻抗模值, 而蓝色曲线则为相位角。

两个谐振尖峰在阻抗曲线图是显而易见的。100 Hz 处的低频谐振是由头戴式耳机中的驱动器的机械特性和电特

性产生的。高频谐振则是由电缆电容与电缆和驱动器音圈的电感的相互作用所产生。(接下页)

图 1: 传统的差动放大器负责将差分输出转换为一个单端信号

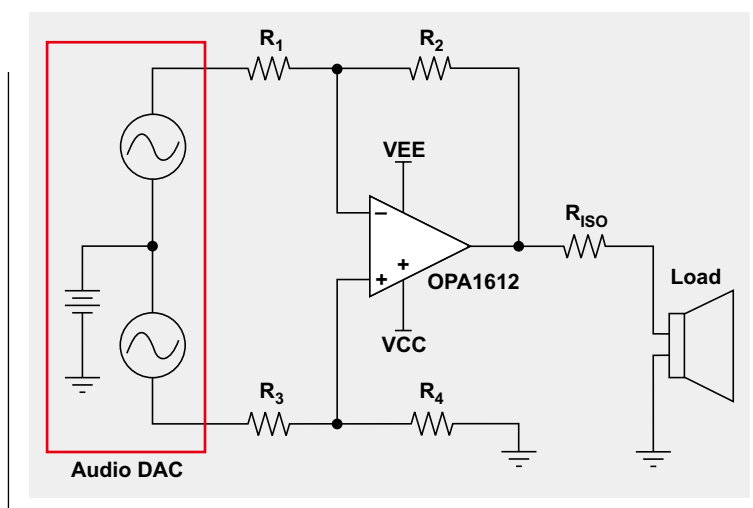
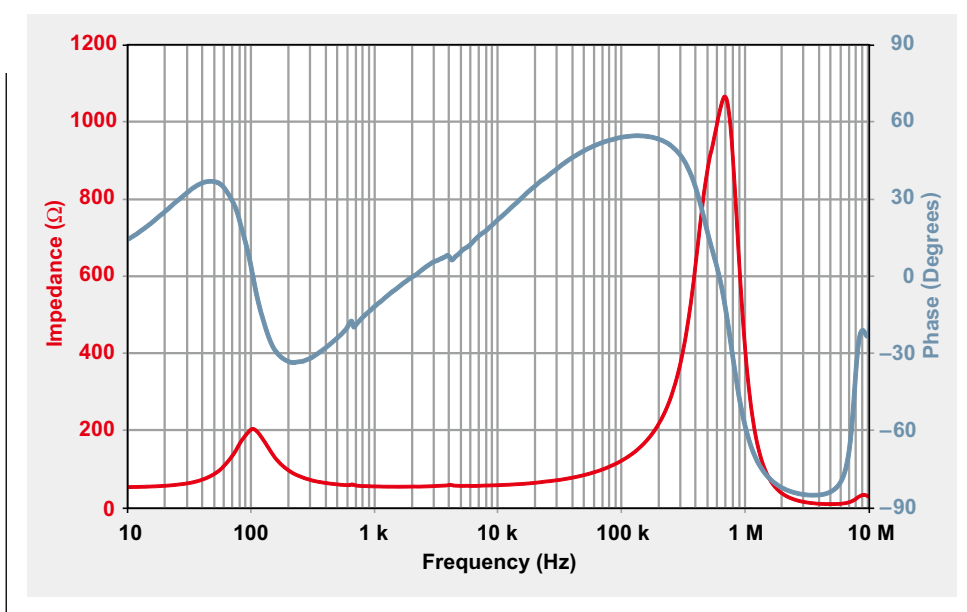


图 2: $64\ \Omega$ 头戴式耳机的实测阻抗



(续上页)从稳定性的角度来看,高频谐振有可能引起许多问题。在此谐振点以上,头戴式耳机是一个电容性负载,这一点从负的相位角可以清楚地看出来。电容性负载会把一个极点引入到放大器的开环增益曲线中,从而减小相位裕量并有可能引发振荡。

针对此问题最常用的解决方案是增设一个与放大器输出串联的电阻器(图 1 中的 R_{ISO}),以把负载电容与反馈环路隔离开来并保留相位裕量。虽然这种解决方案在维持稳定性方面很有效果,但是由于几种原因而降低了系统的音频性能。首先,放大器电路的输出电压不再独立于负载。应考虑到,放大器的输出阻抗与负载阻抗形成了一个分压器。如图 2 所示,由于负载不是电阻性的,因此头戴式耳机放大器上的电压随频率而变化。

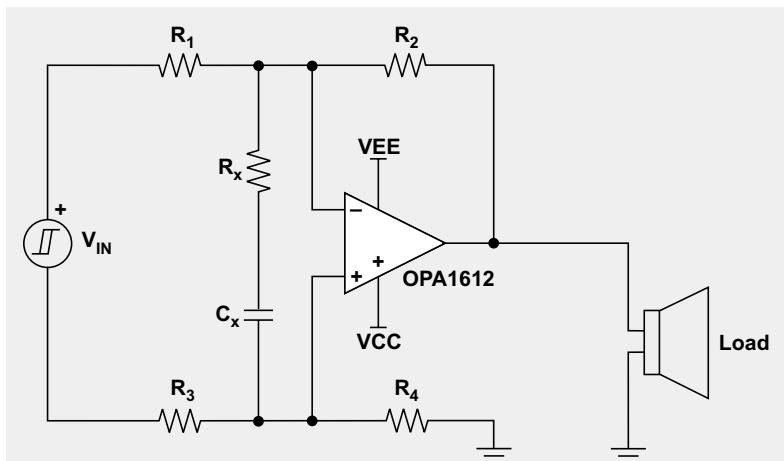
其次,头戴式耳机驱动器吸收的电流并非完全线性。部分原因是驱动器阻抗会发生变化,这种变化与纸盆和音圈组件在其活动范围中所处的位置之间具有某种函数关系。当纸盆在其活动范围内行进时,阻抗曲线有可能发生巨大的变化,因而使驱动器吸收的电流产生失真。如果放大器的输出阻抗不是零,那么这个失真的电流还将使放大器输出端上的电压信号失真,从而有可能降低音频质量^[1]。在头戴式耳机放大器电路中,低输出阻抗对于实现高性能是至关重要的。

增强型头戴式耳机放大器电路

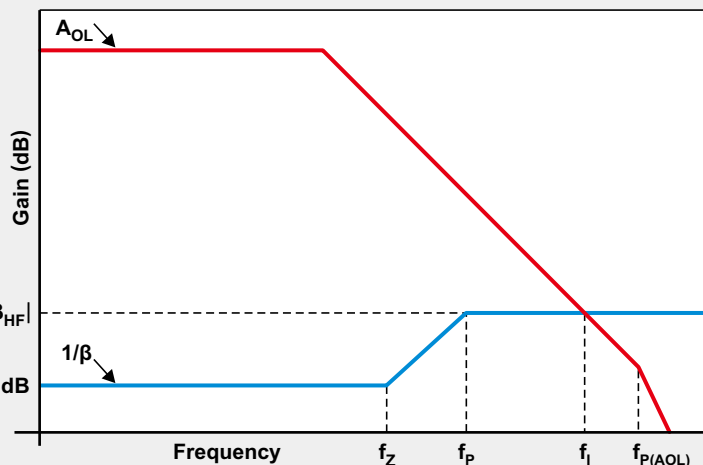
有一些放大器电路解决了在驱动大容量负载的同时保持低输出阻抗的问题,采取的方法是封闭放大器反馈环路内部的隔离电阻器并使用一种双重反馈拓扑^[2]。然而,在差动放大器电路中,封闭反馈环路中的隔离电阻器会损害电路的共模抑制比(CMRR),而该性能对于消除来自 DAC 输出信号的失真是极为关键的。

图 3a 示出了针对该问题的一种解决方案。图 3b 给出了开环增益 (A_{OL}) 和负反馈系数 ($1/\beta$) 的响应曲线。在该拓扑中,电阻器 R_x 和电容器 C_x 在 $1/\beta$ 曲线中引入了一个极点-零点对。通过增加 $1/\beta$ 在其与开环增益曲线相交之频率 (f_i) 上的幅值,系统能够实现合理的相位裕量,且不

图 3: 针对大容量负载的放大器解决方案



(a) 采用 RX/CX 网络的放大器电路



(b) 开环增益和负反馈系数

会增加音频频率下的输出阻抗或损害 CMRR 性能。此外,给电路增设 R_x 和 C_x 并不会影响电路的闭环转移函数。

为了使图 3a 中的电路保持稳定,交点频率 (f_i) 必须小于 A_{OL} 曲线中第二个极点的频率 ($f_{P(AOL)}$),但大于 $1/\beta$ 曲线中的极点频率 (f_p):

$$f_{P(AOL)} > f_i > f_p \tag{1}$$

另一方面,为了提供尽可能好的音频性能, f_z 和 f_p 高于音频带宽的幅度必须尽可能地大。以零点频率以上,电路的噪声和失真将由于环路增益的下降而增加。(接下页)

(续上页) 在设计过程中必需对稳定性和高性能要求进行权衡, 这是常有的事情。

为了说明这款电路的设计, 通过配置由一个 OPA1612 来驱动用于图 2 的头戴式耳机。图 4 示出了针对该设计过程的 TINA-TI™ 仿真电路原理图。为简单起见, 差动放大器的四个电阻器是匹配的 (R_1 、 R_2 、 R_3 、 $R_4 = R$)。

电感器 LT 用于断开放大器的反馈环路。电路的环路增益由标记为“AO LB”的电压探针来测量。反馈系数 β 由差分电压探针 B 直接在运放的输入端上测量。必须使用一个差分电压探针, 因为此方法运用了正反馈和负反馈。净反馈系数是个别负反馈系数与正反馈系数之差^[2]。TINA-TI 中的后置处理器可用于从这些电压探针生成其他的曲线。例如, 开环增益曲线就是用环路增益除以反馈系数生成的。 $1/\beta$ 曲线是通过取 β 探针的倒数产生的。

一个连接至输出的 400 pF 电容器 (CL) 代表头戴式耳机的高频阻抗。该数值是通过取相位最负时的头戴式耳机阻抗来确定的 (图 2), 它很好地代表了来自头戴式耳机的最坏情况电容性负载。在仿真中, 由该负载电容引起的 A_{OL} 曲线中的第二个极点会出现在 5.7 MHz (此时 A_{OL} 的大小约为 25 dB)。为了满足 (1) 式中的标准, 高频条件

下的负反馈系数大小 ($|1/\beta_{HF}|$) 必须大于 25 dB。这是采用下式来计算的:

$$\left| \frac{1}{\beta_{HF}} \right| = \frac{2R}{R_X} + 2 > 25 \text{ dB} \tag{2}$$

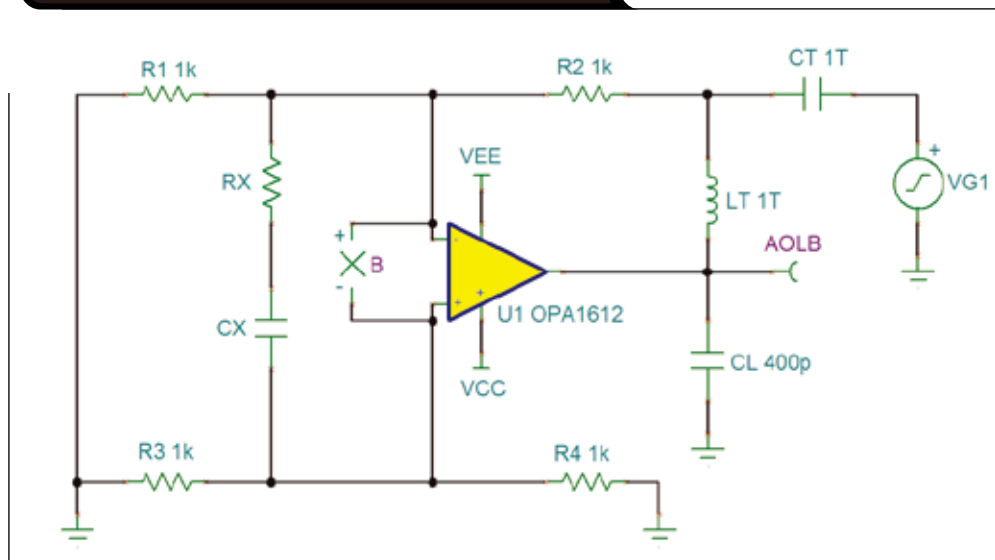
当所有差动放大器电阻均采用 1 k Ω 阻值时, 可计算 R_X 的阻值:

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{\beta_{HF}} \right| &> 10^{\left(\frac{25\text{dB}}{20}\right)} = 17.78 \\ &= \frac{2(1\text{k}\Omega)}{R_X} + 2 \rightarrow R_X < 126.7 \Omega \end{aligned} \tag{3}$$

118 Ω 的 R_X 阻值可确保实现稳定操作的充足噪声增益。接着, 选择合适的 C_X 以使极点频率远远低于 5.7 MHz。保守的设计规则是把极点置于交点频率的 1/10, 只要最终产生的零点不靠近音频带宽即可。在该例中, 把极点频率置于 570 kHz 将把零点定位在 57 kHz 附近, 这对于高性能音频系统来说有点太低了。作为一种折衷方案, 可将极点置于交点频率的 1/5 处:

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{5.7 \text{ MHz}}{5} = 1.14 \text{ MHz} \\ &= \frac{1}{2\pi C_X R_X} \rightarrow C_X = 1.183 \text{ nF} \end{aligned} \tag{4}$$

图 4: 用于确定环路稳定性的 TINA-TI™ 仿真电路原理图



1.2 nF 的数值非常接近 C_x 的计算值。最终产生的零点频率为：

$$f_z = \frac{1}{2\pi C_x (R_x + R)} = 118.6 \text{ kHz} \quad (5)$$

118.6 kHz 的零点频率高于音频带宽的幅度足够大，因而可避免损害电路的性能。

实施了一项 AC 传输特性仿真，仿真结果示于图 5。开环增益和 $1/\beta$ 曲线示于幅值曲线图（上部）。 $1/\beta$ 曲线在 5.4 MHz 处与 A_{OL} 曲线相交。在该点上，环路增益的相位 (A_{OLB} ，下部) 显示 47.35° 的相位裕量。去除 R_x 和

C_x 网络将造成 $1/\beta$ 曲线在低于电容性负载所产生的第二个极点的频率上与 A_{OL} 曲线相交。在该场合中，相交点处的相位变成 -52.37° ，这表示系统是不稳定的。

构建了一个采用先前计算的 R_x 和 C_x 值的差动放大器电路，并将其实测性能与采用一个 47.5Ω 隔离电阻器的传统差动放大器进行了比较。这些测试采用相同的 64Ω 头戴式耳机（图 2）作为负载。采用真实的头戴式耳机来测试头戴式耳机放大器电路是极其重要的，因为简单地使用一个电阻器将无法揭示输出阻抗的不利影响。

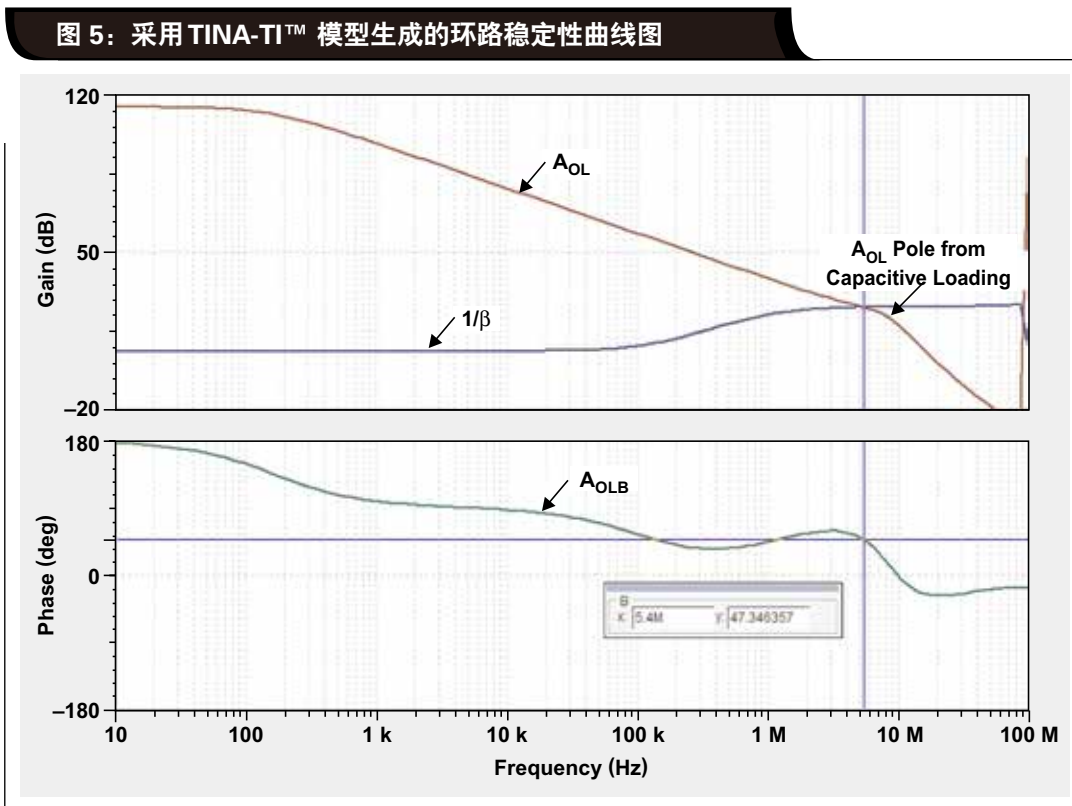


图 6 示出了两种电路的闭环增益。如前文提到的那样，用于实现稳定性的串联电阻器与头戴式耳机的阻抗形成了一个分压器。结果是：传统放大器电路的增益在整个测量带宽内变化了 4.13 dB。与此相反，采用 R_x / C_x 网络的电路则具有极低的输出阻抗，而且其增益基本上与负载阻抗无关。 R_x / C_x 电路在整个测量范围内的增益变化为 0.03 dB。

当驱动 64 Ω 头戴式耳机时，串联输出电阻器的影响在实测的总谐波失真 (THD) 中也是很明显的。图 7 示出了两种解决方案的“实测 THD 与频率的关系”曲线图（在输出电平为 300 mV_{RMS} 时）。由于从头戴式耳机吸收的非线性电流的缘故，增设一个串联电阻器将极大地降低 THD 性能。在低频条件下（此时头戴式耳机驱动器的纸盆偏移最高），采用串联输出电阻器的传统放大器的 THD 性能指标下降的幅度超过 55 dB。

结论

由于差动放大器电路拓扑以及要求低输出阻抗、低失真、低噪声和高 CMRR 的原因，实现头戴式耳机放大器的稳定是一项独特的挑战。本文提出的增强型放大器解决方案可在驱动电容性负载的情况下实现稳定的操作，并且不会增加低频条件下的输出阻抗或降低共模抑制性能。通过运用这种方法，可设计出能在驱动典型头戴式耳机负载时保持稳定，同时提供出色音频性能的头戴式耳机放大器电路。

参考文献

- 1、作者：John Siau，《低阻抗头戴式耳机放大器的声音优势》，2011 年。
- 2、作者：J. Graeme，《优化运算放大器性能》，纽约麦格劳希尔出版公司，1997 年。印刷版。

图 6：两种放大器的实测闭环增益

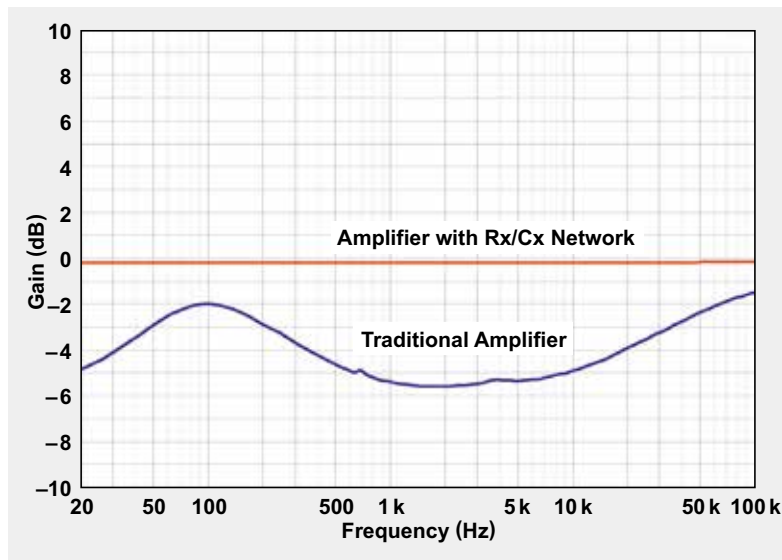
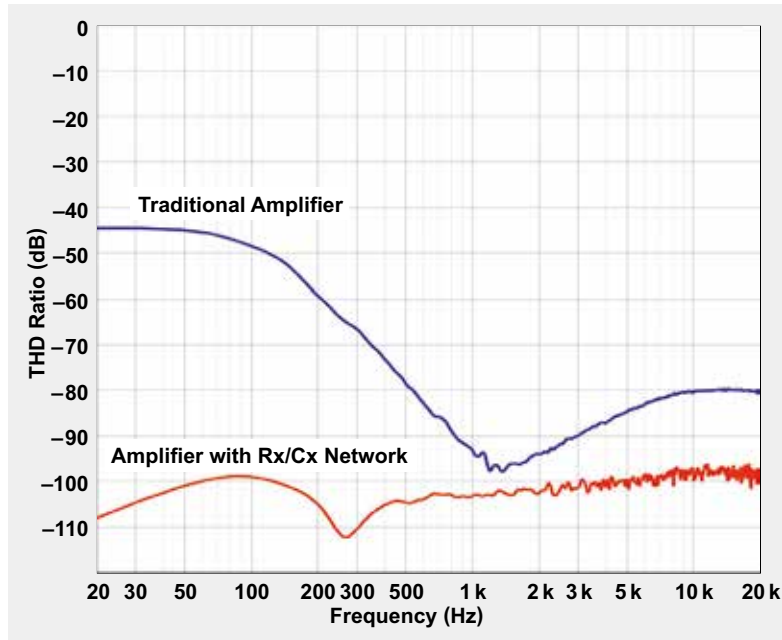


图 7：两种解决方案的实测 THD



相关网站

TINA-TI™ 仿真软件：

www.ti.com/tina-ti

产品信息：

www.ti.com/OPA1612

订阅 AAJ：

www.ti.com/subscribe-aaaj

TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 ti.com.cn/tidesigns 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。
电源在线培训课程

www.ti.com.cn/webench
www.ti.com.cn/powerlab
www.ti.com.cn/powertraining

WEBENCH® Designer My Designs

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流 交流

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

多负载 单输出

Power Architect **开始设计**

WEBENCH® Designer My Designs

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

SIMPLE SWITCHER®

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

www.deyisupport.com

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



weibo.com/tisemi

热门产品

DAC8760	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC
DAC7760	单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC
ADS1247	极低噪声、精密 24 位 模数转换器
ADS1120	具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC
ISO7242	四通道 2/2 25Mbps 数字隔离器
ISO7631FM	4kV _{PK} 低功耗三通道、150Mbps 数字隔离器
TPS54062	4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器
TLK105L	工业温度、单端口 10/100Mbps 以太网物理层
SN65HVD255	CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



重要声明

德州仪器及其下属子公司 (TI) 有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准终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, 并验证这些信息是最新且完整的。所有半导体产品 (本文也指“组件”) 的销售都遵循在确认订单时 TI 的销售条款与条件。

TI 确保其销售的组件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。TI 仅在认为有必要时才采用测试或其它质量控制技术。除非相关法律有强制规定, 否则 TI 没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 没有义务承担应用帮助或客户产品设计。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, 客户应提供充足的设计与操作安全保障措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或使用了 TI 组件或服务的任何产品组合、机器或流程相关的其他 TI 知识产权中授予的直接或隐含权限做出任何担保或解释。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、担保或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其他知识产权方面的许可, 或 TI 的专利权以及 TI 其他知识产权的许可。

如需复制 TI 产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 不得对内容进行任何篡改, 且须带有相关授权、条件、限制和声明。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遵从其他限制条件。

经销 TI 组件或服务时, 如果经销商对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数之间存在差异或存在虚假成分, 则相关 TI 组件或服务的所有明示或暗含的保修将作废, 且此行为被视为不正当的欺诈性商业行为。TI 不对任何此类虚假陈述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可能仍由 TI 提供, 但其将自行负责符合与其产品及在其应用中使用 TI 组件相关的所有法律、法规和安全方面的要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的所有专业技术和知识, 可预见故障的危险、监测故障及其后果、降低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攸关的应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些情况下, TI 可能进行特别促销推进安全应用的发展。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相关功能安全标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然受这些条款约束。

TI 组件未获得用于 FDA 三级 (或类似生命攸关的医疗设备) 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 组件才是专门设计用于军事/航空应用或环境的产品。客户认可并同意, 如将不带有该标识的 TI 组件用于军事或航空航天应用, 则风险由客户自行承担, 客户自行负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 特别标示了符合 ISO/TS16949 要求的特定组件, 这类组件主要用于汽车。在任何情况下, TI 均不因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 的要求而承担任何责任。

产品

音频	www.ti.com/audio
放大器	amplifier.ti.com
数据转换器	dataconverter.ti.com
DLP® 产品	www.dlp.com
DSP	dsp.ti.com
时钟与定时器	www.ti.com/clocks
接口	interface.ti.com
逻辑	logic.ti.com
电源管理	power.ti.com
微控制器	microcontroller.ti.com
RFID	www.ti-rfid.com
OMAP 应用处理器	www.ti.com/omap
无线连接	www.ti.com/wirelessconnectivity

应用

汽车与运输	www.ti.com/automotive
通信与电信	www.ti.com/communications
计算机及外设	www.ti.com/computers
消费电子	www.ti.com/consumer-apps
能源和照明	www.ti.com/energy
工业控制	www.ti.com/industrial
医疗	www.ti.com/medical
安防	www.ti.com/security
空间、航空和国防	www.ti.com/space-avionics-defense
视频和影像	www.ti.com/video
TI E2E 社区	e2e.ti.com

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

© 2014 年德州仪器公司版权所有

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

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated