

带阻滤波器和 Bainter 拓扑

作者: Bonnie C. Baker

高级应用工程师

诸如音调信号传输、音频信号、助听器反馈或电源抑制系统等众多应用均需要采用带阻（陷波）滤波器来消除不想要的信号。通过使用有源带阻模拟滤波器可以实现此类信号的衰减。

本文所涉及的带阻滤波器电路拓扑是 Sallen-Key、多重反馈和 Bainter。每种电路都形成了一个 2 阶带阻滤波器，并在转移函数中具有一个极点和一个零点。

设计工作的起点是定义带阻滤波器特性。在图 1 中，带阻滤波器拒绝某个特定带宽 (BW_p) 之内的信号，同时允许高于或低于被拒频率范围的频率通过。

这幅标准的常规示意图突出显示了带阻滤波器的主要参数，即：通带、阻带、 f_0 、 BW_p 、 A_0 、 A_{SB} 、 BW_s 和 R_p 。

三个滤波器响应区为低频通带、阻带和高温通带。在两个通带频域中，信号均可以从输入自由地传递至滤波器的输出。在阻带区中，频率信号按图 1 中的示意图所示被衰减。陷波滤波器的中心频率为 f_0 。

BW_p （通带带宽）规定了带阻滤波器内部的 -3 dB 带宽。另外，该带宽还确定了滤波器的品质因数（即 Q 值，见参考文献 1），这里的 $Q = (f_0 / BW_p)$ 。 BW_s 规定了阻带带宽。在 BW_s 点下方的区域里，带阻滤波器将产生一个凹口，降幅有时达 -100 dB 或更多。

阻带衰减范围从 A_0 至 A_{SB} （阻带幅值）。 A_0 （通带增益）和 A_{SB} 以及规定的阻带衰减决定了陷波滤波器衰减的速度。最后，对于切比雪夫逼近 (Chebyshev approximations)，纹波幅度的定义为 R_p 。

带通 / 陷波滤波器在转移函数中需要成对的极点和零点。极点和零点的拐角频率位于或者靠近 f_0 。

带通 / 陷波滤波器的转移函数为：

$$H(s) = \frac{H_0 (s^2 + \omega_z^2)}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (1)$$

为了进行比较，下面的讨论涉及采用 Sallen-Key、多重反馈和 Bainter 滤波器拓扑来实现带阻滤波器。

图 1：带阻滤波器的频率响应

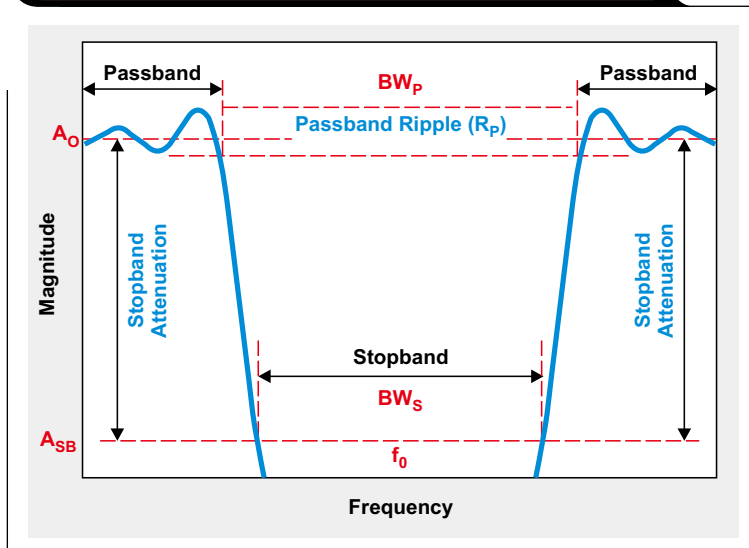
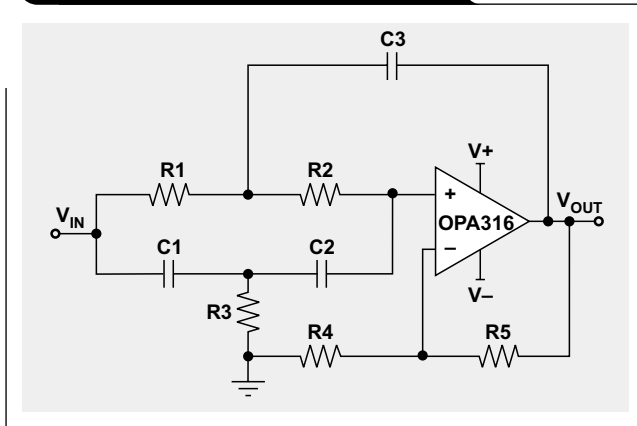


图 2：2 阶 Sallen-Key 带阻或陷波滤波器



Sallen-Key 电路拓扑

图 2 中的 Sallen-Key 拓扑实现了一个 2 阶带阻滤波器。这种特殊的电路因其简单性而受到重视，其具有一个放大器、五个电阻器和三个电容器。此电路的一项优势是：最大电阻与最小电阻之比很小，而且电容器的高值与低值之比也很小。这一点对于滤波器的可制造性是有利的。

虽然 Sallen-Key 滤波器广泛地应用于低通和高通滤波器，但其对于实现带阻滤波器来说却有着几个严重的缺点。由于组件值对中心频率 (f_0) 和 Q 值会有影响，因此 Sallen-Key 不容易调谐。（接下页）

(续上页) 而且, 当试图实现理想的陷波滤波器特性时, 开环输出电阻也会产生干扰 (图 3)。此外, 由于组件干扰的原因还导致 f_0 不容易调节。

通过以串联的方式级联三个 2 阶滤波器 (图 2) 可以实现一个 6 阶滤波器。图 3 示出了一款 Sallen-Key 电路的 6 阶、闭环响应。该图显示: 对于一个 0.5° 的近似型线性相位和 $f_0 = 1$ kHz 的情形, Sallen-Key 电路的闭环增益响应为 4.58 V/V。

该 6 阶滤波器的构建采用了理想电阻器 (15 个)、电容器 (9 个) 和放大器 (3 个)。在电路中使用了理想组件和器件的情况下, 闭环频率响应具有 3 个下落的毛刺, 并显示在凹口内只有大约 -15 dB 的衰减。

由于存在这些缺点, 因此 Sallen-Key 陷波滤波器不是构建带阻滤波器的推荐拓扑。

多重反馈电路拓扑

图 4 中的多重反馈 (MFB) 拓扑可实现 2 阶带阻。MTF 同样因为其简单性而受到人们的重视, 其在第一级电路中具有一个运放、三个电阻器和两个电容器。在末级电路中, 其具有一个运放和三个电阻器。该滤波器的第二级电路提供了一种求和功能, 用于在电路的末端将高通和低通响应相加。假如它是 6 阶滤波器, 那么该滤波器的末级就位于信号线的末端, 并有三个处于运行之中的第一级。

尽管 MFB 滤波器拓扑广泛地应用于低通、高通和带通滤波器, 但其对于实现带阻滤波器而言却存在着几个严重的不足。与 Sallen-Key 实现方案相比, 转移函数对运放参数的依存性更大。而且, 由于放大器在高频条件下的开环增益受限, 因此也难以生成高 Q 值的高频滤波器节。

图 5 示出了一 MFB 电路的 6 阶闭环响应。通过以串联的方式级联三个 2 阶滤波器 (图 4) 实现了一个 6 阶滤波器。在图 5 中, 对于一个 0.5° 的近似型线性相位和 $f_0 = 1$ kHz 的情形, MFB 电路的闭环增益为 4.58 V/V。

图 5 中的滤波器采用了理想电阻器 (12 个)、电容器 (6 个) 和放大器 (4 个)。在电路中使用了理想组件和器件的情况下, 闭环频率响应显示: 在凹口内的衰减大约为 -36.6 dB。然而, 在凹口的任一侧, 滤波器增益的增幅是不合需要的 (约 1.4 dB)。图中的两个隆起是由于难以使该系统中的高通和低通滤波器与末级求和功能相匹配的结果。

图 3: 6 阶 Sallen-Key 陷波滤波器的闭环频率响应

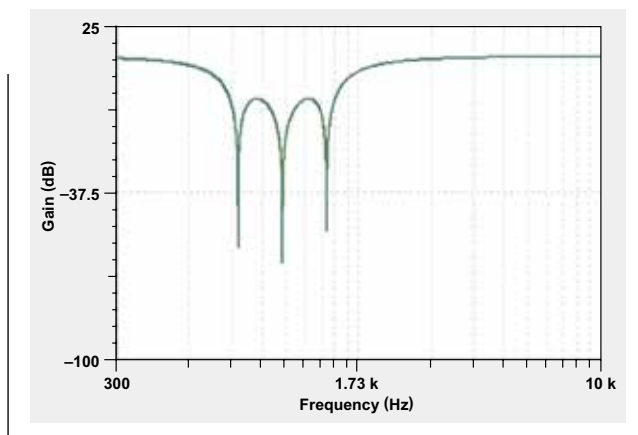


图 4: 一款二阶多路反馈带阻或陷波滤波器

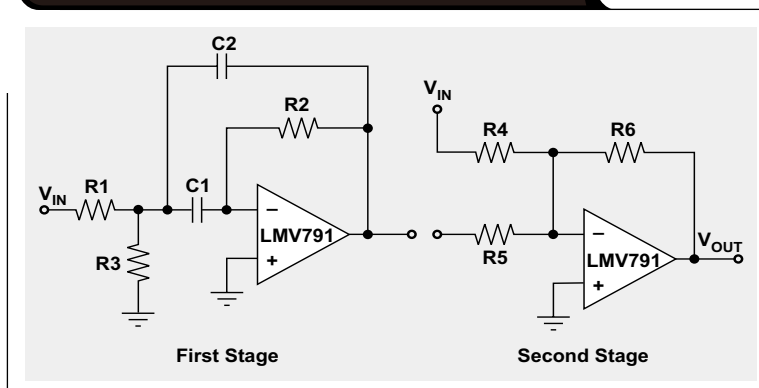
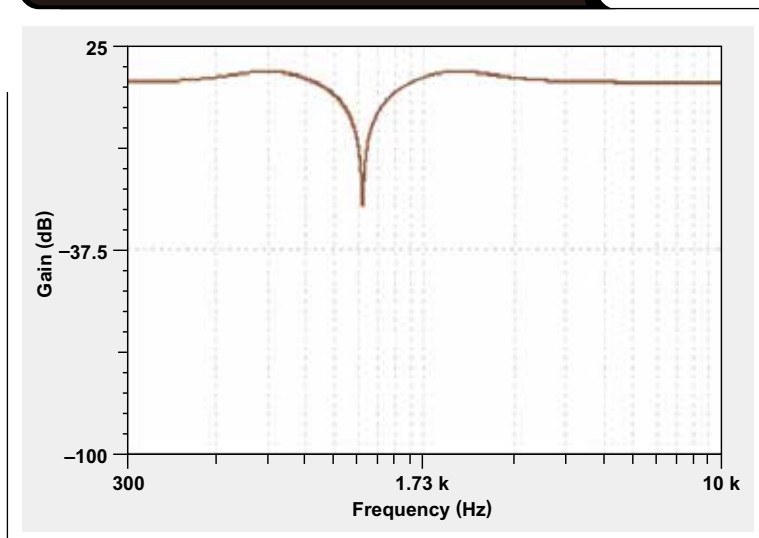


图 5: 6 阶 MFB 陷波滤波器的闭环频率响应



由于存在这些缺点，因此 MFB 陷波滤波器不是构建带阻滤波器的推荐拓扑。

Bainter 电路拓扑

如图 6 所示，Bainter 滤波器拓扑^[2]具有三个简单的放大器电路模块和两个反馈环路。在 A1 的输出端上提供频率响应的是一个高通滤波器，在 A2 的输出端上提供频率响应的是一个低通滤波器，而 A3 则通过在其输出端上提供完整的陷波函数起一个求和器的作用。

图 6 中的电路具有多项极具吸引力的特性。陷波滤波器的品质因数 Q 取决于放大器的增益，而不是组件匹配。因此，陷波深度不易受温度漂移或者老化的影响。尽管滤波器的频率 f_0 有可能发生偏移，但是陷波深度则保持相对恒定。此外，该滤波器的组件敏感性非常低，约为 0.5。

图 7 示出了 Bainter 电路的 6 阶闭环响应。通过以串联的方式将三个 2 阶滤波器级联起来（图 6）形成了一个 6 阶滤波器。在图 7 中，对于一个 0.5° 的近似型线性相位和 $f_0 = 1$ kHz 的情形，Bainter 电路的闭环增益为 4.58 V/V。

该滤波器的构建采用了理想电阻器（21 个）、电容器（6 个）和放大器（9 个）。在电路中使用了理想组件和器件的情况下，闭环频率响应的衰减小于 -100 dB。此外，其还是一种非常“干净”的陷波滤波器，这与 Sallen-Key 和 MFB 滤波器形成了鲜明的反差。

毫无疑问，Bainter 陷波滤波器是一种可用于构建带阻滤波器的推荐拓扑。

结论

当评估适用于带阻滤波器的正确拓扑时，仔细检查闭环频率响应是很重要的。业界的带阻滤波器实施方案有可能采用 Sallen-Key 或 MFB 电路。这两种电路拓扑在带阻区和通带区中皆存在问题，并且在通带区中具有不良的陷波特性和不必要的增益剧增。Bainter 滤波器可构建干净的陷波滤波器，其带阻性能远远优于上面所说的那两种滤波器。

WEBENCH[®] Filter Designer 是一款有效的在线设计工具，其可帮助您创建自己的滤波器。您将能够轻松地设计低通、高通、带通和带阻滤波器。该滤波器设计系统将帮助您设计滤波器、找到合适的放大器和组件、并为实施进一步的评估提供一种 SPICE 仿真平台。

图 6: 2 阶 Bainter 带阻或陷波滤波器

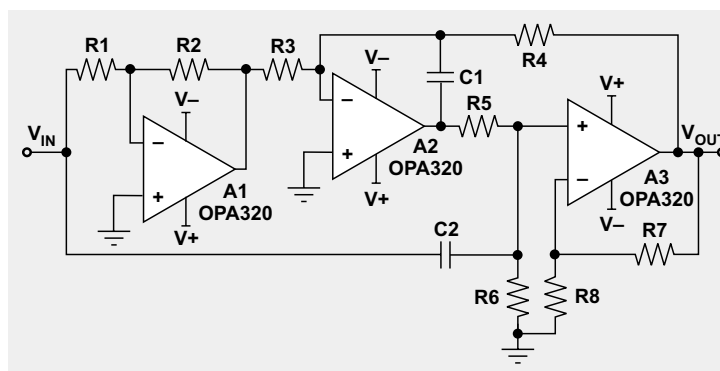
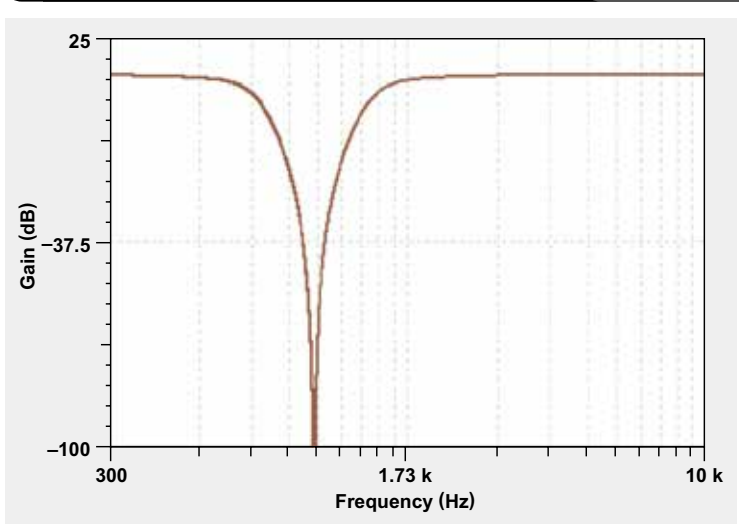


图 7: 6 阶 Bainter 陷波滤波器的闭环频率响应



参考文献

1. 作者: Baker, 《模拟滤波器和规格指标纵览: 选择合适的带宽》, On board with Bonnie, 2013 年 11 月 8 日。在线版地址: e2e.ti.com/blogs_/
2. 作者: Bainter, James, 《有源滤波器具有稳定的凹口, 而且响应可以调节》, Electronics, 1975 年 10 月 2 日。在线版地址: www.google.com/

相关网站:

WEBENCH[®] Filter Designer
www.ti.com/webenchfilters
www.ti.com/1q15-OPA316
www.ti.com/1q15-OPA320
www.ti.com/1q15-LMV791

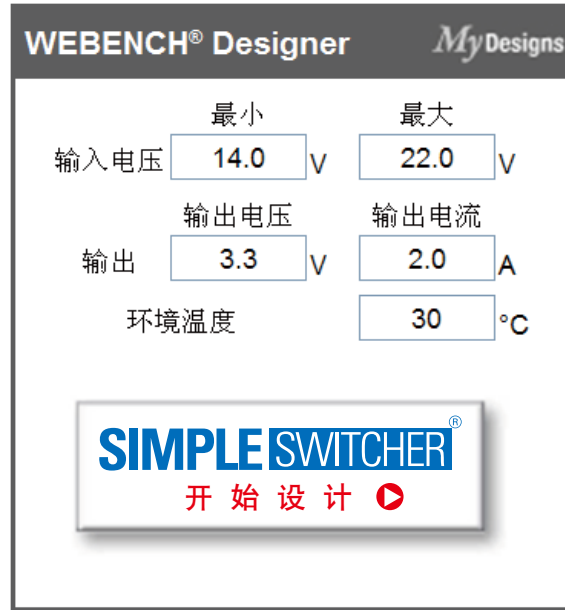
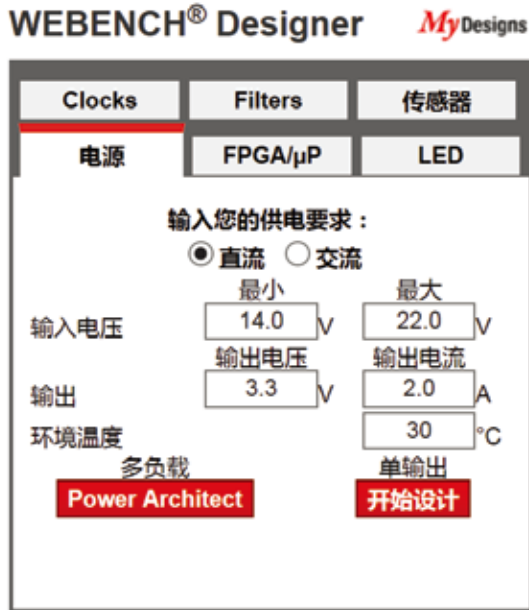
TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

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



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