

# 有源模拟滤波器的快速设计

作者: Bonnie Baker, 德州仪器 (TI) 高级WEBENCH®应用工程师

## 引言

几乎所有电子电路中都能看到有源模拟滤波器的身影。音频系统使用滤波器进行频带限制和平衡。通信系统设计师使用滤波器调谐特定频率并消除其它频率。为了使高频信号衰减,所有数据采集系统都在模数转换器(ADC)前面有一个抗锯齿(低通)滤波器,或者在数模转换器(DAC)后面有一个抗镜像(低通)滤波器。这种模拟滤波还可以在信号到达ADC之前或者离开DAC之后,消除叠加在信号上面的高频噪声。如果ADC的输入信号超出转换器采样频率的一半,则该信号的大小被可靠地转换;但是,在其变回数字输出时,频率也发生改变。

利用TI的WEBENCH®滤波器设计器软件,可以高效地设计出低通、高通、带通或者带阻滤波器。这种

应用程序替代了TI的FilterPro™和以前国家半导体的WEBENCH有源滤波器设计器软件。在生成有源滤波器时,它使用这些程序和公式。但是,它允许深度调节各种滤波器变量,优化滤波器,为滤波器电路寻找正确的TI运算放大器(op amp),并具有SPICE模拟功能,比上面两个程序更加强大。

## 低通模拟滤波器的重要设计参数

低通模拟滤波器的频域规范包括4个基础参数:

- $f_c$ , 即滤波器的-3-dB截止频率
- $A_o$ , 即滤波器的增益
- $A_{sb}$ , 即阻带衰减
- $f_s$ , 即阻带衰减的中断频率

图1所示WEBENCH滤波器设计器的滤波器类型窗口

图1 WEBENCH®滤波器设计器重要模拟滤波器参数

The screenshot shows the 'Filter Type' window in the WEBENCH design tool. It includes the following sections:

- Filter Type:** Radio buttons for Lowpass (selected), Highpass, Bandpass, and Bandstop. A 'Start Filter Design' button is present.
- Attenuation:** Input fields for Cutoff Frequency ( $f_c$ ) set to 1000 Hz, Gain ( $A_o$ ) set to 1 V/V, and 0.00 dB.
- Search Filter Response:** Radio buttons for 'Search Filter Response' (selected) and 'Pick Filter Response'.
- Stopband:** Input fields for Stopband Attenuation ( $A_{sb}$ ) set to -45 dB and Stopband Frequency ( $f_s$ ) set to 5000 Hz.
- Supply Voltage:** Radio buttons for Dual Supply (selected) and Single Supply. A dropdown menu shows '+/-5'.
- Advanced Options:** Three checkboxes for 'Enter Flatness Specs', 'Enter Group Delay Flatness Specs', and 'Enter Step Response Specs'.
- Graph:** A frequency response plot showing a low-pass filter curve. Key frequencies  $f_{1P}$ ,  $f_{2P}$ ,  $f_c$ , and  $f_z$  are marked on the x-axis. The plot shows a -3dB point at  $f_c$  and a stopband attenuation of  $A_{sb}$  at  $f_s$ . A peak-to-peak ripple of  $2\Delta A_{max}$  is also indicated.
- Buttons:** A second 'Start Filter Design' button is located at the bottom right of the graph area.

列出了这些参数。DC到截止频率（ $f_c$ ）的频率范围为带通区域。图1中 $A_o$ 为带通响应量级。使用巴特沃兹（Butterworth）或者贝塞尔（Bessel）滤波器时，带通响应可以为扁平，并且无纹波。相反，一直到截止频率，切比雪夫（Chebyshev）滤波器都有纹波。切比雪夫滤波器的纹波误差量级为 $2\Delta A_{MAX}$ 。

滤波器响应超出 $f_c$ 时，它会通过过渡带降至阻带区域。滤波器近似法（巴特沃兹、贝塞尔和切比雪夫等）决定过渡带的带宽和滤波器的阶数（ $M$ ）。传输函数的极点数决定滤波器阶数。例如，如果某个滤波器的传输函数内有3个极点，则其为一个三阶滤波器。

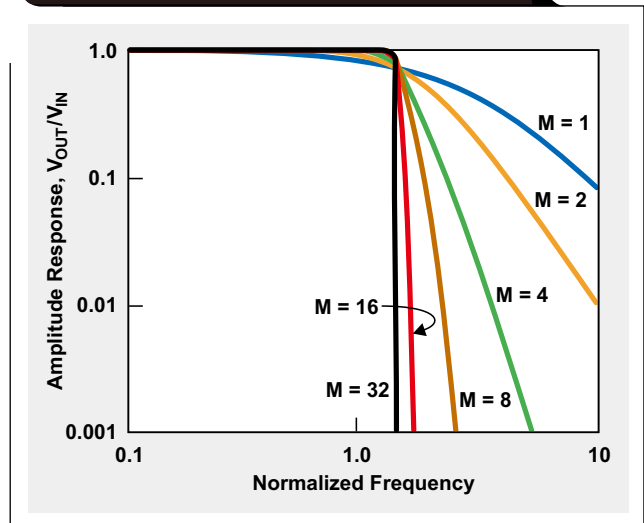
一般而言，当更多极点用于实现滤波器设计时过渡带变得更小，如图2巴特沃兹低通滤波器所示。理想情况下，低通、抗锯齿滤波器应有“砖墙”式响应，并且过渡带极小。实际而言，这并不是最好的抗锯齿方法。进行有源滤波器设计时，每两个极点就要求有一个运算放大器。例如，32阶滤波器要求16个运算放大器、32个电容器和多达48个电阻器。

### 模拟滤波器近似计算类型

图3显示了WEBENCH滤波器设计器观察屏幕的解决方案窗口中一些可用的低通滤波器类型。用户点击“开始滤波器设计”按钮（图1）以后，出现该屏幕。

巴特沃兹、贝塞尔和切比雪夫是一些比较流行的滤波

图2 上电以后的极性校正时序



器近似法类型。查看量级和频率域对比以及量级和时间域对比情况以后，可以知道滤波器类型。

### 巴特沃兹滤波器

巴特沃兹滤波器传输函数包括所有极点，并且没有零，其表达式如下：

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A_o}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} \dots a_{n-1} s^2 + a_n s + 1}$$

图3 WEBENCH®滤波器设计器的低通滤波器类型

Solutions										
Solutions: ( 7 found )										
Select	Filter Response	Color	Order	Max Q	Att (dB)	Passband Ripple (dB)	Group Delay (usec)	Group Delay Flatness (usec)	Settling Time (usec)	Step Response Overshoot (%)
Select	Transitional Gaussian to 6dB	Green	4	1.32	-47.59	0.380	367.676	9.147	1489.356	0.79
Select	Linear Phase 0.05°	Blue	4	1.07	-46.41	0.437	361.873	2.088	1490.866	1.06
Select	Butterworth	Black	4	1.31	-55.91	0.002	448.464	32.576	2717.626	10.82
Select	0.2dB Chebyshev	Yellow	4	2.435	-60.15	0.199	816.477	405.321	4215.482	15.20
Select	Linear Phase 0.5°	Magenta	4	1.34	-48.78	0.317	379.450	16.052	1529.731	1.78
Select	Bessel	Red	5	0.92	-49.26	0.446	385.154	1.83e-4	1169.675	0.77
Select	Transitional Gaussian to 12dB	Aqua	5	1.52	-52.56	0.562	400.004	13.012	1521.612	0.00

图4表明四阶、低通巴特沃兹滤波器的响应在带通部分为扁平。这种特性的技术术语称作“最大扁平”。之后，它会显示，过渡带的衰减速率不如切比雪夫滤波器。

图5表明，相同四阶巴特沃兹滤波器的阶跃响应在时域中有一些过冲和振铃。如果滤波器阶数更高，则这种过冲也会更高。如果这种滤波器用在多路器之后，则应考虑其稳定时间。

图4 四阶、低通巴特沃斯滤波器的频率响应

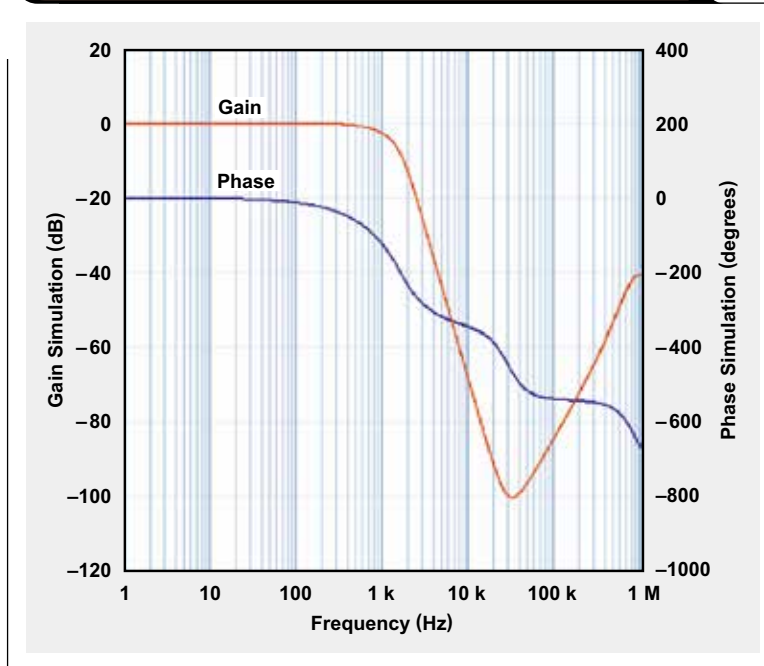
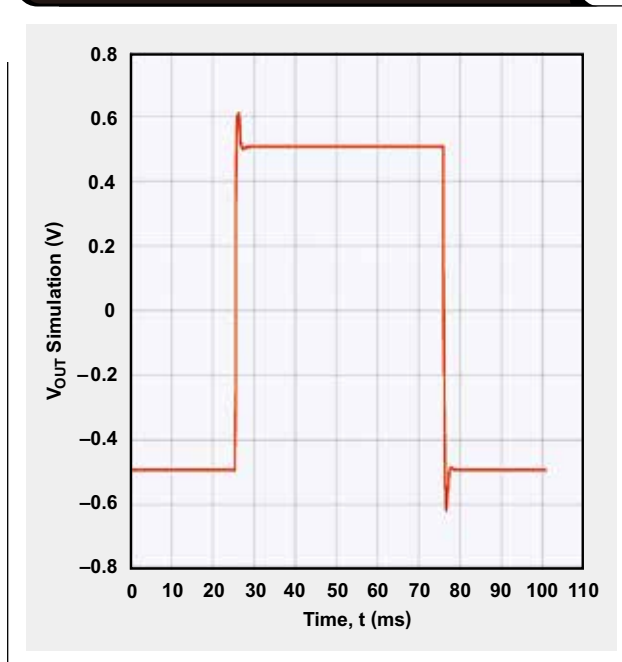


图5 四阶、低通巴特沃斯滤波器的阶跃响应



切比雪夫滤波器的传输函数与巴特沃兹滤波器类似，因为它具有所有极点，并且没有零：

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{A_0}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_{n-1}s^{n-1} + s^n}$$

图6表明，四阶、低通切比雪夫滤波器的频率响应在带通区域有0.2dB的纹波。电路设计的极点布局决定了这种纹波。总之，纹波量级的增加会降低过渡带的宽度。

理论上， $2\Delta A_{MAX}$ （图1）的纹波量级可以如我们预期的那样大或者小。高纹波量级一般会带来更多的带通区域误差，但却可以实现更快的过渡带衰减。

相比巴特沃兹滤波器，过渡带衰减速率变化更剧烈。例如，为了满足0.5dB纹波的三阶切比雪夫滤波器的过渡带宽要求，要求使用一个四阶巴特沃兹滤波器。尽管使用切比雪夫滤波器时在带通区域存在振铃，但阻带没有振铃。

0.2dB纹波的四阶、低通切比雪夫滤波器的阶跃响应，存在相当程度的过冲和振铃（图7）。

过冲和振铃现象是频域中相位响应的结果。我们都还记得，阶跃响应（或者方波）傅立叶分析表明，通过增加奇数谐波正弦信号可以建立方波。结果是，来自阶跃输入的高频在低频之前到达滤波器的输出端。它被称作“失真群延迟”。这种时长数秒的群延迟计算方法如下：

$$\frac{\text{Change in phase/Change in frequency}}{360}$$

图6 四阶低通切比雪夫 (Chebyshev) 滤波器的频率响应

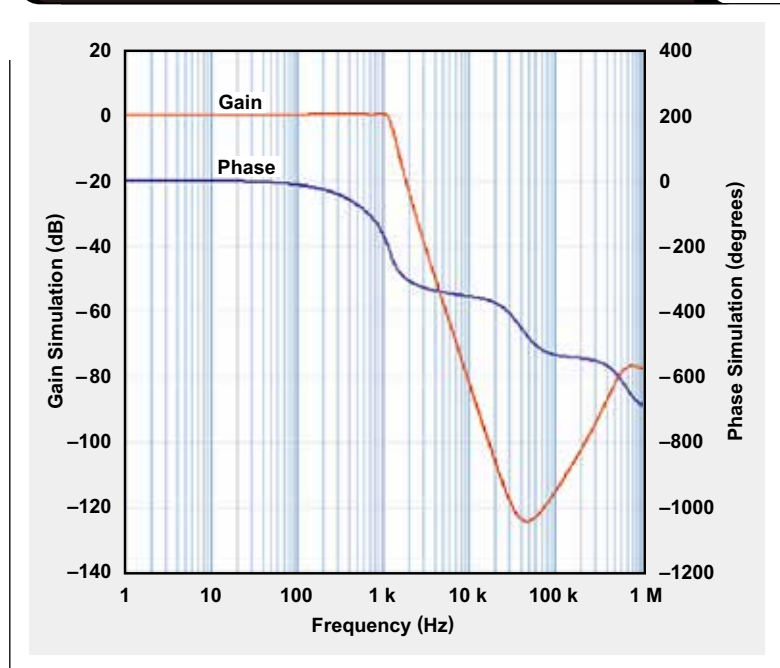
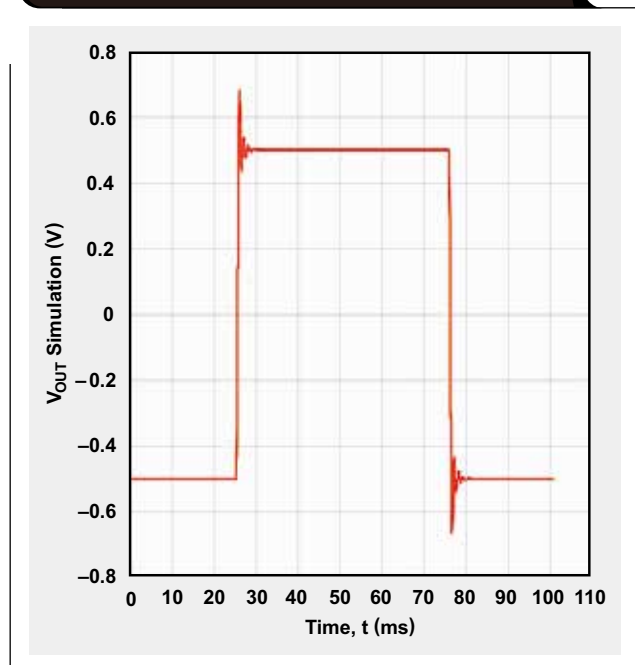


图7 四阶、低通切比雪夫滤波器的阶跃响应



### 滤波器近似法类型比较

对于低通滤波器来说，滤波器近似法类型影响滤波器截止频率之前和之后的频率响应。由于频率（单位赫兹）倒转为数秒时间，因此滤波器类型会对时域产生相反影响。表1对频域（带通和过渡区域）和时域（阶跃响应）中的低通巴特沃兹、贝塞尔和切比雪夫滤波器进行了比较。

**表1 滤波器近似法类型比较表**

滤波器类型	带通	过渡区域	阶跃响应
巴特沃兹滤波器	带通中最大的平坦幅度	比贝塞尔滤波器陡峭，但不如切比雪夫滤波器性能好	有一些过冲和振铃，但低于切比雪夫滤波器
切比雪夫滤波器	带通中的纹波	比巴特沃兹滤波器和贝塞尔滤波器陡峭	过冲和振铃合理
贝塞尔滤波器	带通中的平坦幅度响应	比巴特沃兹滤波器和切比雪夫滤波器慢	与巴特沃兹滤波器和切比雪夫滤波器相比，过冲或振铃非常小

### 使用WEBENCH滤波器设计器开始设计

利用滤波器设计器，工程师可在数分钟内完成对整套多级有源滤波器解决方案的设计、优化和模拟工作。通过TI厂商合作伙伴提供的TI运算放大器和无源组件，可创建出许多经过优化的滤波器设计。

滤波器设计器软件和快速上手指南下载网址为[www.ti.com/webenchfilters-aaj](http://www.ti.com/webenchfilters-aaj)。你可以从众多低通、高通、带通和带阻类型中选择一个滤波器。如果需要，可以规定衰减、群延迟和阶跃响应等性能规范，并且还有大量的滤波器响应可供选择，例如：巴特沃兹、贝塞尔、切比雪夫、线性相位和过渡高斯等。通过优化脉冲响应、稳定时间、最低成本、带通纹波和阻带衰减，可确定最为适合于具体设计的滤波器响应。

Sallen-Key或者多反馈拓扑结构是所有滤波器级的设计选项，并且通过评估增益带宽、电流、成本以及其它参数之间的关系，选择最适合于设计的最佳运算放大器。电阻器/电容器容差可规定为理想状况，即0.5、1、2、5、10或者20%。使用用户定义的电容器种子值进行实验，调节滤波器设计的电阻器值范围。另外，还可对滤波器拓扑结构进行优化，以实现灵敏度要求、最低成本和最小体积。

之后，使用闭环频率响应、阶跃响应或者正弦波响应选项运行SPICE电气模拟，以对设计进行分析。可对这些选项的输入条件进行调整，以对不同输出结果进行评估。

### 参考文献

- 1、《更接近现实世界的模拟滤波器》，作者：Bonnie Baker，2013年7月23日刊发于《EDN》（在线版），网址：[www.edn.com](http://www.edn.com)
- 2、《一个简单的可调节低通过滤波器》，作者：Bonnie Baker，2013年9月19日刊发于《EDN》（在线版），网址：[www.edn.com](http://www.edn.com)
- 3、《电子滤波器设计手册》，作者：Arthur B. Williams，1981年，纽约：McGraw-Hill公司。
- 4、《有源和无源模拟滤波器设计概述》，作者：Lawrence P. Huelsman，1993年，纽约：McGraw-Hill公司

### 相关网站

放大器：

[www.ti.com/amplifier-aaj](http://www.ti.com/amplifier-aaj)

[www.ti.com/webenchfilters-aaj](http://www.ti.com/webenchfilters-aaj)

《模拟应用期刊》订阅：

[www.ti.com/subscribe-aaj](http://www.ti.com/subscribe-aaj)



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](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

**WEBENCH® Designer**

Power | **FPGA/μP** | Sensors | LED

Enter your power supply requirements:

Min	Max
Vin 14.0 V	22.0 V
Vout 3.3 V	Iout 2.0 A
Ambient Temp 30 °C	

Multiple Loads **Power Architect** | Single Output **Start Design**

**WEBENCH® Designer** My Designs

输入电压	最小 14.0 V	最大 22.0 V
输出电压	3.3 V	输出电流 2.0 A
环境温度	30 °C	

**SIMPLE SWITCHER®**  
开始设计 ▶



从通讯、计算机、消费类电子到汽车、工业, 从能源、医疗到安防、航空航天, TI推出一系列创新、完整、独特的制胜解决方案, 给您带来前所未有的技术支持体验。 <http://www.ti.com.cn/www/more/>



德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[e.weibo.com/tisemi](http://e.weibo.com/tisemi)

热门产品

- |           |  |
|-----------|--|
| TPS92075  | 具有自适应基准的非隔离式、相位可调光、降压 PFC LED 驱动器              |
| BQ24195   | 具有 5.1V 1A/2.1A 同步升压运行的由 I2C 控制的 2.5A/4.5A 单电池 |
| LM3447    | 相位调光、初级侧电源调整的准谐振反激式控制器                         |
| LM34917   | 具有智能电流限制的超小型 33V、1.25A 恒准时降压开关稳压器              |
| ADS1298   | 具有集成 ECG 前端的 8 通道 24 位模数转换器                    |
| SN65HVD82 | 针对要求严格的工业类应用的稳健耐用的驱动器和发送器                      |
| LM22670   | 具有同步或可调节开关频率的 3A SIMPLE SWITCHER、降压电压稳压器       |
| ISO1050   | 电镀隔离的隔离式 CAN 收发器                               |

了解更多, 请搜索以下产品型号:

TPS92075



## 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隐含权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, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 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, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

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

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

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122  
Copyright © 2013 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司