

# 在频域中设计一款用于 ADC 的抗混叠滤波器

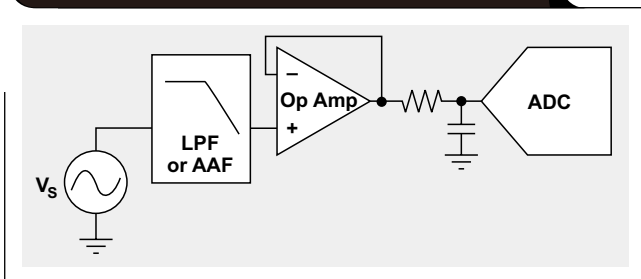
作者: Bonnie C. Baker  
高级应用工程师

## 引言

在有兴趣对某种实际信号进行数字化处理的众多应用中都可以看到数据采集 (DAQ) 系统的身影。此类应用涉及的范围很宽泛, 从测量温度到感测光线等都在其列。当开发 DAQ 系统时, 常常需要在模数转换器 (ADC) 之前布设一个抗混叠滤波器, 以除去模拟系统的高频噪声与信号。图 1 示出了这类应用的一般电路示意图。

DAQ 系统以一个信号 (比如: 来自某个传感器的波形  $V_s$ ) 作为开始。接下去是低通滤波器 (LPF) 或抗混叠滤

图 1: DAQ 电路的基本拓扑



波器 (AAF) 以及被配置为一个缓冲器的运算放大器 (运放)。在缓冲放大器的输出端上是一对电阻器 / 电容器, 其负责驱动 ADC 的输入。该 ADC 是一个逐次逼近型转换器 ADC (SAR ADC)。

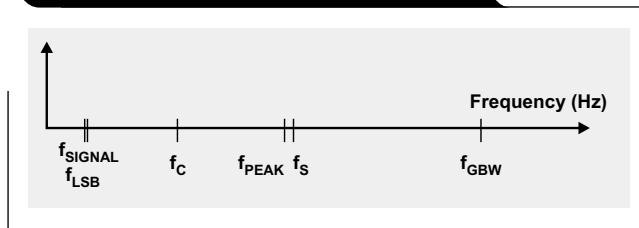
通常, 此类电路的评估包括了失调、增益、线性度和噪声。评估中的另一个角度则涉及频域中的事件布局。

有六个频率会影响该系统的设计:

1.  $f_{\text{SIGNAL}}$  — 输入信号带宽;
2.  $f_{\text{LSB}}$  — 具有容许的增益误差和一个期望的最低有效位 (LSB) 数量的滤波器频率。最好是让  $f_{\text{LSB}}$  等于  $f_{\text{SIGNAL}}$ ;
3.  $f_c$  — LPF 转角频率;
4.  $f_{\text{PEAK}}$  — 与放大器最大全标度输出相对的频率;
5.  $f_s$  — ADC 采样频率;
6.  $f_{\text{GBW}}$  — 放大器增益带宽频率。

图 2 示出了这些频率之间的一般关系。

图 2:  $f_s$ 、 $f_{\text{GBW}}$ 、 $f_{\text{PEAK}}$  和  $f_c$  之间的基本关系



对于下面的评估, 示例系统自始至终均采用了以下的配置:

- 1 kHz 的输入信号带宽 ( $f_{\text{SIGNAL}}$ )
- 10 kHz 的低通滤波器转角频率 ( $f_c$ )
- 100 kHz 的 SAR-ADC 采样频率 ( $f_s$ )
- 单电源双通道运算放大器, OPA2314

## 确定最大信号频率 ( $f_{\text{SIGNAL}}$ 、 $f_{\text{LSB}}$ ) 及可接受的增益误差

第一个动作是确定输入信号的带宽 ( $f_{\text{SIGNAL}}$ )。接着, 确定来自 LPF 或 AAF 的可接受增益误差的大小<sup>[1]</sup>。该增益误差并不会在选择测量的频率上瞬间出现。实际上, 在 DC 时该增益误差为零。LPF 增益误差随着频率逐步地变大。一个以 dB 为单位的 LSB 误差等于:

$$20 \times \log [(2^N - \text{err})/2^N],$$

式中的 N 为转换器比特数, 而整数 err 是可容许的位错误。该错误通过检查 SPICE 闭环增益曲线找出。

在该例中, 信号带宽为 1 kHz, 可接受的增益误差等于一个代码, 这相当于 1 LSB。对于一个 err 等于 1 且 N 等于 12 的 12 位 ADC 来说, 增益误差等于 -2.12 mdB。

采用一个 TINA-TI™ SPICE 模型来分析一款四阶、10 kHz 低通巴特沃斯 (Butterworth) 滤波器，闭环增益响应示于图 3 和图 4。在这两幅图中，“b”光标的位置均标示了增益误差为  $-2.12 \text{ m dB}$  的点 ( $f_{1\text{-LSB}} = 1.04 \text{ kHz}$ )。

在图 3 中，测量窗口显示：位于“b”处的标记对应的频率是  $1.04 \text{ kHz}$ 。另外，该窗口还显示：在 y 轴上，频率标记“a”和“b”之间的差异为  $-2 \text{ m dB}$  [2]。

图 4 在 y 轴上对巴特沃斯滤波器在通过其转角频率 ( $f_c$ ) 之前的动作进行了放大。对该响应的初步观察发现：增益曲线在其向下倾斜之前出现了一个轻微的跃升。这个向上的尖峰达到了一个大约为  $+38 \text{ m dB}$  的值。这是四阶巴特沃斯低通滤波器的一个基本特征。

如果可接受较高的增益误差，表 1 列出了  $f_{\text{LSB}}$  的变化与 LSB 值之间的关系。

表 1: LSB 误差与  $f_{\text{LSB}}$  的关系

LSB error (LSB)	LSB error (dB)	$f_{\text{LSB}}$
1	-0.002	1.04 kHz
2	-0.004	1.47 kHz
3	-0.006	1.82 kHz
4	-0.008	2.11 kHz

### 滤波器转角频率 ( $f_c$ )

请注意，低通滤波器的转角频率 ( $f_c$ ) 位于闭环频率响应的衰减为  $-3 \text{ dB}$  的频率上。如果选择了一个四阶 LPF，那么  $f_c$  大约比  $f_{1\text{-LSB}}$  高 10 倍。运用 WEBENCH® Filter Designer 的 SPICE 仿真可快速地确定该数值。当采用 Filter Designer 来设计单电源滤波器时，应选择多重反馈 (MFB) 拓扑，其利用一个位于中间电源的静态 DC 共模电压来运作放大器。图 5 示出了这款四阶、10 kHz 巴特沃斯 LPF 的电路示意图。

图 3: 一个四阶、10 kHz 巴特沃斯 LPF 在  $1.04 \text{ kHz}$  频率下的增益误差等于  $-2.12 \text{ m dB}$

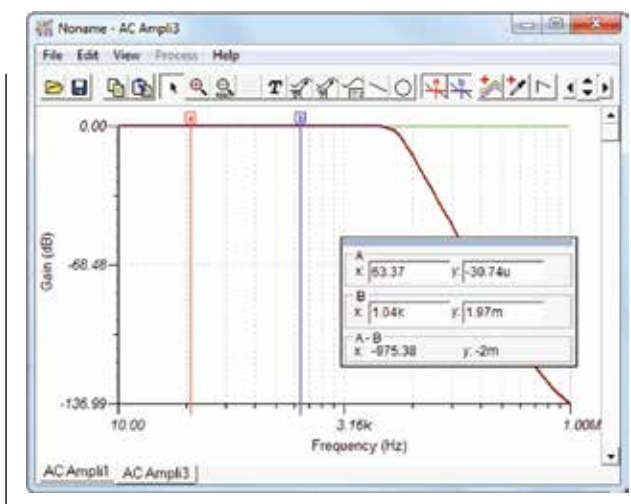


图 4: 一个四阶、10 kHz 巴特沃斯 LPF 的闭环增益响应

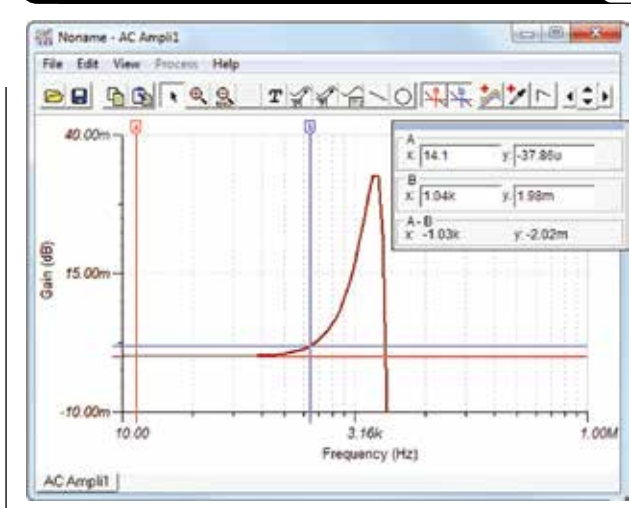
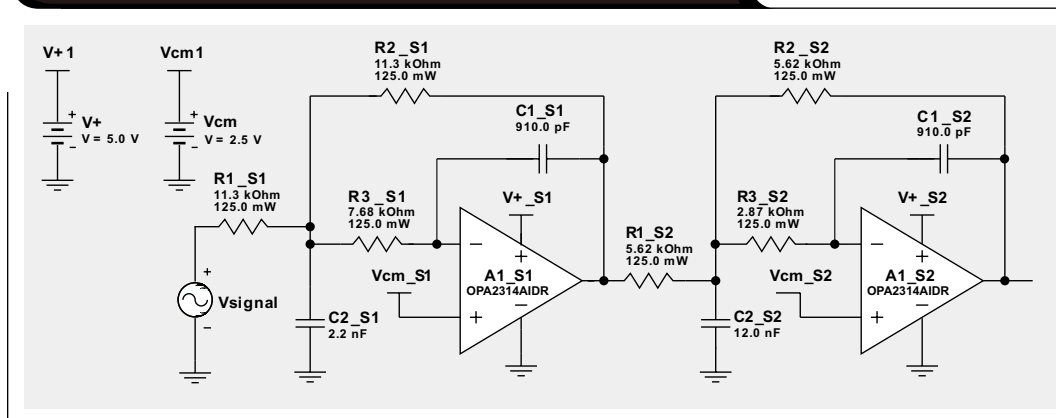


图 5: 具有  $f_c = 10 \text{ kHz}$  的四阶、巴特沃斯 LPF



## 规定放大器的增益带宽频率 ( $f_{GBW}$ )

低通滤波器的 Q 因数、增益 (G) 和转角频率 ( $f_c$ ) 决定了放大器的最小可容许增益带宽 ( $f_{GBW}$ )。当找出了 Q 因数时, 首先要做的就是确定滤波器近似的类型 (巴特沃斯、贝塞尔 [Bessel]、切比雪夫 [Chebyshev], 等等) 和滤波器阶数<sup>[2]</sup>。如先前规定的那样, 转角频率为 10 kHz。在该例中, 滤波器近似为巴特沃斯, 而增益为 1 V/V。最后, 这是一个四阶滤波器。确定放大器增益带宽的公式为:

$$f_{GBW} = 100 \times Q \times G \times f_c \quad (1)$$

在该系统中,  $f_{GBW}$  必须等于或大于 1.31 MHz (由 WEBENCH Filter Designer 进行验证)。OPA2314 双通道放大器的增益带宽为 2.7 MHz。

## 放大器的最大全标度输出

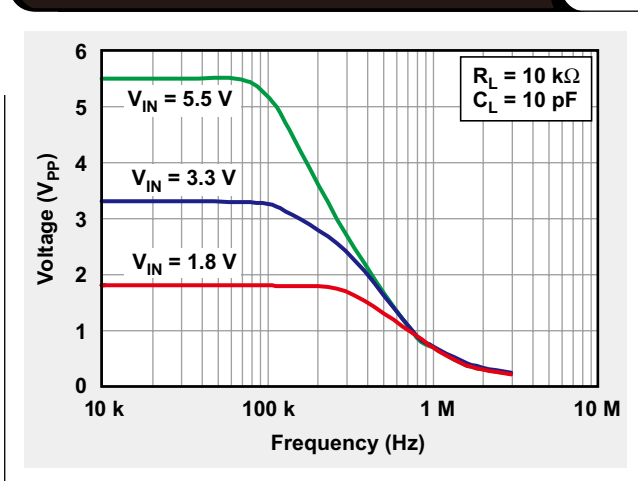
在大多数应用中, 放大器都必须能够提供其全标度输出。也许是这样, 也许不是。一种检查方法是通过放大器的转换速率规格来获得一个粗略的估计。

依据频率对放大器最大输出电压做出的保守定义大致等于  $f_{PEAK} = SR / (V_{PP} \times \pi)$ , 其中的 SR 为放大器数据表中给出的转换速率,  $V_{PP}$  是规定的峰至峰输出摆幅。需注意的是放大器的上升和下降时间也许并不完全相等。因此数据表中提供的转换速率规格是一个估计值。

OPA2314 放大器的数据表转换速率为 1.5 V/ $\mu$ s, 而且在 5.5 V 系统中  $V_{PP}$  等于 5.46 V。当放大器处在线性区时, 采用一个 5.5 V 电源时的轨至轨输出等于 5.46 V。图 6 示出了当输出范围超出了放大器的线性区时 OPA2314 的测试工作特性。

OPA2314 的最大输出电压计算值出现在约 87.5 kHz。然而在图 6 中, 采用基准数据时获得的最大值显示为 70

图 6: OPA2314 最大输出电压



kHz 左右。存在这一偏差的原因是放大器的上升时间和下降时间之间不匹配, 以及放大器在正弦输入电压摆动曲线的峰值和谷值处的响应性不同。

## SAR-ADC 采样频率

现在的难题是确定 SAR ADC 的采样频率。假设采用的是 1 kHz 的最大输入信号, 那么 SAR ADC 的信号采样速率必须高于每秒一个周期。实际上, 最好是每秒超过 10 次。这意味着 10 kHz 采样 ADC 将是胜任的。

此外, 在可能的情况下还应消除信号路径噪声, 这一点很重要。倘若 SAR ADC 以高于滤波器转角频率的频率执行转换操作, 则那部分噪声将不会折回到系统中。因此, 100 kHz 采样 SAR ADC 可满足要求。

如果采样频率为 100 kHz, 则奈奎斯特 (Nyquist) 频率为 50 kHz。在 50 kHz 频率下, 低通滤波器的频率响应下降大约 50 dB。这种衰减程度限制了对穿过系统的噪声的影响。

## 结论

在频域中进行 DAQ 的开发会带来有趣的挑战。由一个滤波器和一个 SAR ADC 构成的系统通常是利用 DC 和 AC 放大器以及转换器的性能指标来评估的。然而, 本文却从频率的角度评估了系统的信号路径。

重要的频率规格包括信号带宽、滤波器转角频率、放大器带宽和转换器采样速度。尽管信号带宽很小 (1 kHz), 但是所需的 AAF 转角频率应比信号带宽高 10 倍, 以求减少高频增益误差。此外, 转换器的采样频率也高于预期值, 旨在降低由噪声混叠引起的复杂性。

## 参考文献

- 1、作者: Bonnie Baker, 《模拟滤波器和规格指标纵览: 映射到您的 ADC》, On board with Bonnie, TI 博客, 2014 年 11 月 5 日。
- 2、作者: Bonnie Baker, 《模拟滤波器和规格指标纵览: 为您的滤波器选择合适的带宽》, On board with Bonnie, TI 博客, 2013 年 11 月 8 日。

## 相关网站:

TINA-TI™ WEBENCH® 工具:

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

产品信息:

[www.ti.com/OPA2314](http://www.ti.com/OPA2314)

订阅 AAJ:

[www.ti.com/subscribe-aaaj](http://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](http://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](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 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](http://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](http://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 <sub>PK</sub> 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	<a href="http://www.ti.com/audio">www.ti.com/audio</a>
放大器	<a href="http://amplifier.ti.com">amplifier.ti.com</a>
数据转换器	<a href="http://dataconverter.ti.com">dataconverter.ti.com</a>
DLP® 产品	<a href="http://www.dlp.com">www.dlp.com</a>
DSP	<a href="http://dsp.ti.com">dsp.ti.com</a>
时钟与定时器	<a href="http://www.ti.com/clocks">www.ti.com/clocks</a>
接口	<a href="http://interface.ti.com">interface.ti.com</a>
逻辑	<a href="http://logic.ti.com">logic.ti.com</a>
电源管理	<a href="http://power.ti.com">power.ti.com</a>
微控制器	<a href="http://microcontroller.ti.com">microcontroller.ti.com</a>
RFID	<a href="http://www.ti-rfid.com">www.ti-rfid.com</a>
OMAP 应用处理器	<a href="http://www.ti.com/omap">www.ti.com/omap</a>
无线连接	<a href="http://www.ti.com/wirelessconnectivity">www.ti.com/wirelessconnectivity</a>

### 应用

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

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	<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>

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