

JFET 输入运算放大器中的失真和源阻抗

作者: John Caldwell
模拟应用工程师

工业数据采集、地震测量和高保真度音频领域中的低失真模拟电路设计人员都明白，许多运算放大器（运放）在被配置为非反相放大器时会产生较大的失真。在非反相配置中，输入信号在两个输入端上均表现为一种共模信号。运放在两个输入端上执行的减法运算是有限的，并且呈现轻微的非线性，因而在运放输出端上产生了少量的额外失真。该效应通常被称为共模失真。^[1]

当输入信号源具有高输出阻抗时，有些运放会表现出更加严重的共模失真，这一点并没有被人们普遍认识到。我们使用 TL072（一款 JFET 输入通用型运放）来比较一下针对两种源阻抗的输出失真。图 1 示出了当源阻抗为 20 Ω 和 10k Ω 时 TL072 的输出失真。在源阻抗为 10k Ω 的场合中，总谐波失真与噪声之和 (THD + N) 大幅增加，有可能超过因附加源电阻器而产生的 THD + N。

这是 TL072 等老式 JFET 输入运放的典型运行方式，并限制了其在诸如 Sallen-Key 有源滤波器等众多电路中的可用性。^[2] 在那个时候，当用作运放的输入器件时，JFET 提供了一些胜过双极型晶体管的优势。例如，电流噪声的降低使得 JFET 输入运放能够在高阻抗应用中使用。此外，JFET 还可以采用现有的双极型半导体工艺来制造，从而令其拥有了一项超越 MOSFET 的重大优势。

图 2 示出了在结隔离工艺中于 p 型衬底上采用离子注入法制造的 p 沟道 JFET 的横截面。^[3] 沟道是通过把 p 型杂质植入一个 n 型区形成的。然后，在沟道的顶上植入一个 n 型区（n 型顶栅）并连接至位于沟道下方的区以形成栅极。

p 型衬底和 n 型栅极之间的结起一个反向偏置二极管的作用。这允许 JFET 具有极低的输入电流，同时在栅极与衬底之间产生一个寄生电容 (C_{GSS})。

在 p 型和 n 型半导体材料的交界面上出现了一种扩散过程，在该过程中电子和空穴穿越界面进行迁移，而把带电离子遗留在各自所在的那一侧。迁移的载荷子与来自对面对立的载荷子重新组合并被消除，从而产生了一个

图 1: TL072 运放的 THD + N 测量

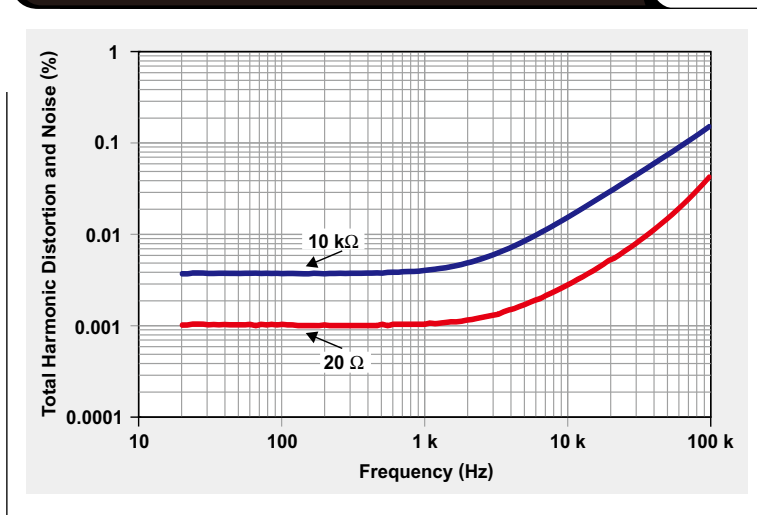
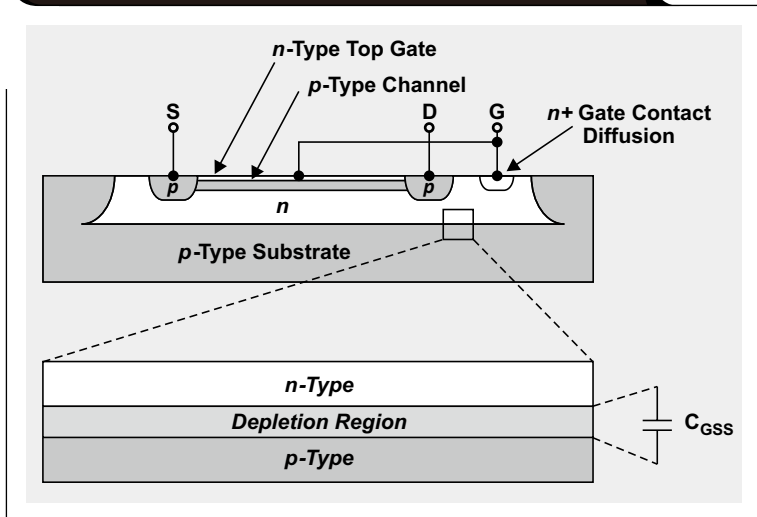


图 2: 离子注入型 p 沟道 JFET 结构



没有移动载荷子的区域。该区域被称为耗尽区，因为移动载荷子已被耗尽。在该区域中，半导体材料的作用相当于绝缘体。最终的结构类似于一个电容器，n 型区和 p 型区为导电电极，耗尽区充当电介质。由于栅极和衬底之间的接触面积很大，因此栅极至衬底电容 C_{GSS} 通常远远大于栅极至源极和栅极至漏极电容。^[3] 于是，输入 JFET 的 C_{GSS} 是此类运放之输入共模电容的主要来源。

和所有的电容器一样，p-n 结的电容取决于其电极的面积以及电极的相隔距离。虽然 p-n 结的面积是固定的，但耗尽区的宽度则并不固定。其取决于横跨耗尽区的电场的方向和强度。

在初始扩散期间，扩散载荷子所遗留的离子产生了一个阻碍进一步扩散的电场。这被称为 p-n 结的内置电压。给 p-n 结施加一个外部电压具有扩大或压缩耗尽区宽度以及改变 p-n 结电容的作用。JFET 的栅极至衬底电容的变化与栅极至衬底电压之间存在着函数关系，依据的公式如下：

$$C_{GSS} = \frac{C_{GSS0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{GSS}}{\psi_0}}} \quad (1)$$

在 (1) 式中， C_{GSS0} 为 0V 时的结电容， V_{GSS} 为栅极至衬底电压。另外， ψ_0 为 p-n 结的内置电压，通常为 0.7 V 左右。在大多数运放中，衬底保持在负电源电压 (V_{EE})。因此，当共模电压变化时，(1) 式中的 V_{GSS} 项改变，从而将增加或减小栅极至衬底电容 C_{GSS} 。

在图 3 中，增添了输入共模电容 C_{CM1} 和 C_{CM2} ，用以表示输入 JFET 的 C_{GSS} 。

非反相输入的输入共模电容 C_{CM1} 必须利用一个来自输入电压源 V_S 的小电流 I_S 进行充电和放电。如果输入电容并非一个常数，而是取决于输入电压，那么从电压源吸收的充电电流与输入电压信号的变化率之间不再成线性关系：

$$C_{CM1} \frac{dV_S}{dt} \rightarrow I_S = \frac{C_{GSS0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{IN} - V_{EE}}{\psi_0}}} \times \frac{dV_S}{dt} \quad (2)$$

该运行方式类似于分立陶瓷电容器的电压系数。^{[4] [5]} 电容随施加电压而发生的变化使电容器中的电流产生失真。从电压源吸收的该失真电流将由于 R_S 两端的电压降而在运放的输入端上产生一个失真信号。

$$V_{IN} = V_S - I_S R_S \quad (3)$$

可以通过在运放的反馈环路中布设一个与源阻抗相等的电阻来抵消该失真。这种做法在运放的反相输入端上产生一个相等的失真。由于该失真如今为两个输入端所共有，因此其可利用运放的共模抑制予以去除。不幸的是，反馈路径中的电阻将引起额外的噪声，而且当其非常大的时候还会引发稳定性问题。^[6]

图 3：JFET 输入运放的可变共模电容

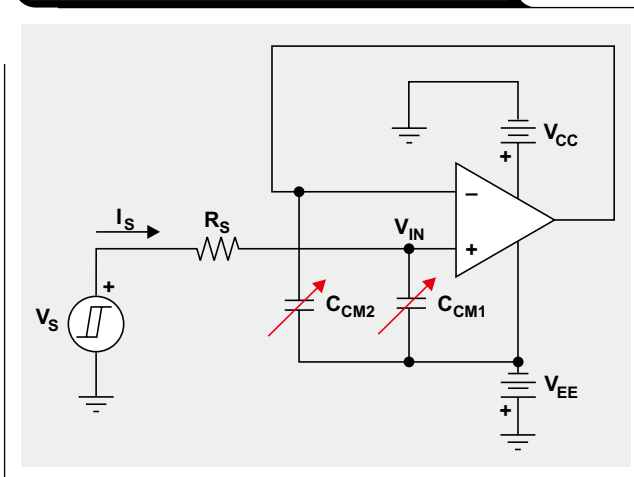
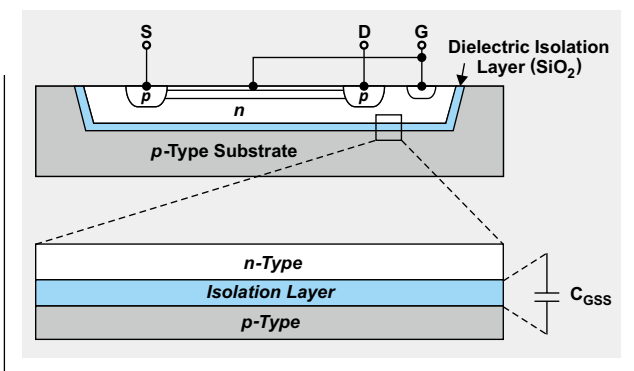


图 4：DI 工艺中的隔离层



理想的情况是，为了在高源阻抗条件下运作时保持低失真，必需把输入共模电容稳定至一个恒定值。一种实现方法是采用电介质隔离 (DI) 工艺来制造运放。如图 4 所示，DI 使用一层介电材料（比如：二氧化硅 [SiO_2]）将器件与衬底及其他相邻结构隔离开来。引入此类工艺的最初目的是通过减小片上晶体管集电极上的电容来改善其速度性能。^[3]电介质隔离的另一个好处是 JFET 的栅极至衬底电容不再随着输入共模电压而变化。栅极至衬底电容的数值由器件的尺寸和隔离层的宽度决定，其完全不受所施加的电场的影响。此外，该隔离层还可阻止载荷子穿越 p-n 界面进行扩散而形成耗尽区。虽然在隔离势垒的两端仍然存在一个电场，但是其对于硅材料中移动载荷子的作用并不足以影响总电容。

在图 5 中，利用网络分析仪对两款运放的共模电容进行了非常精确的测量。TL072 运放是采用标准的结隔离工艺制造的。在测量范围内，其输入共模电容从 +10 V 时的

4.87 pF 变为 -10 V 时的 7.10 pF，总的变化量为 2.23 pF。不出所料，由于栅极至衬底电压减小，因此输入共模电容随着负共模电压的增加而增大。

另一方面，OPA1642 是采用 DI 工艺制造的。其输入共模电容得到了极大的稳定，在整个测量范围内的变化幅度仅为 30 fF。

输入共模电容稳定性的改善在失真测量中立刻显现出来。图 6 示出了对于 $20\ \Omega$ 和 $10\text{ k}\ \Omega$ 的源阻抗，采用增益 = +1 配置的 OPA1642 的实测 THD + N。与 TL072 不同的是，源阻抗的增加并未影响 OPA1642 的失真。

对于 JFET 输入运放的需求如今仍然普遍存在，因为它将继续提供低噪声、低偏置电流和卓越 AC/DC 性能的独特组合。在其制造中引入 DI 工艺以及输入电容的最终稳定化使得新式 JFET 输入运放能够实现极低的失真，而丝毫不受源阻抗的影响。

参考文献

1. 作者：Self, D., 《小信号音频设计中的运放 - 第二部分：双极型和 JFET 输入运放中的失真》，EETimes, 2011 年 6 月 22 日。参见：www.eetimes.com
2. 作者：Caldwell, J., 《用于两路扬声器的模拟有源跨接电路》, TI Reference Design, 德州仪器, 2014 年。参见：www.ti.com/4q14-tipd134
3. 作者：Gray, P、Meyer, R., 《模拟集成电路的分析与设计》，纽约：约翰·威利父子出版公司, 1984 年, pp. 1~7, 123~126。
4. 作者：Caldwell, J., 《源自高 K 值陶瓷电容器的信号失真》，EDN, 2013 年 6 月 16 日。参见：www.edn.com
5. 作者：Caldwell, J., 《更多地了解高 K 值 MLCC 的失真机理》，EDN, 2013 年 12 月 22 日。参见：www.edn.com
6. 作者：Caldwell, J., 《缓冲器反馈中的电阻器：问问为什么！》，Precision Hub 博客, 德州仪器, 2014 年 6 月 15 日。参见：http://e2e.ti.com/blogs_/b/precisionhub/archive/2014/07/15/resistors-in-the-feedback-of-a-buffer-ask-why.aspx

图 5：两款 JFET 运放的共模电容

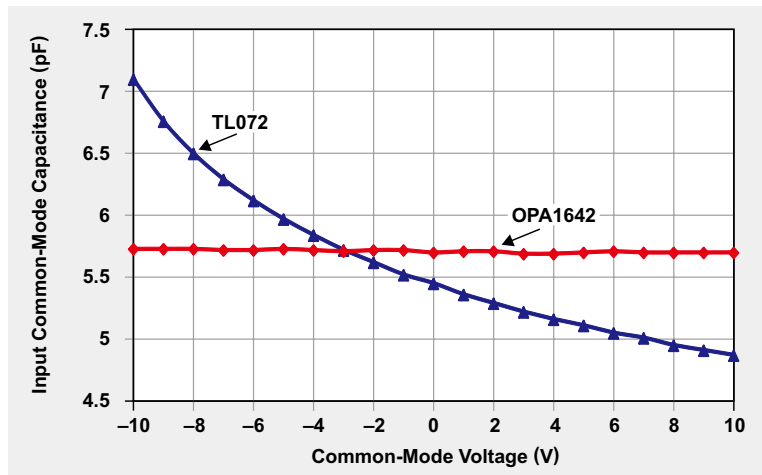
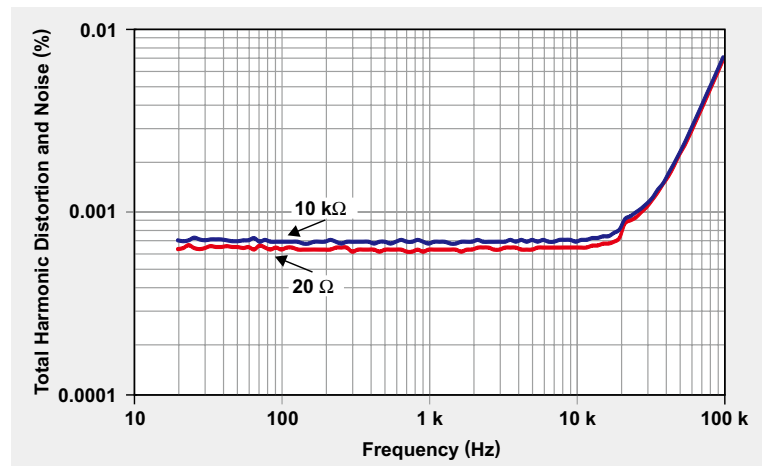


图 6：OPA1642 运放的 THD + N 测量结果



相关网址

www.ti.com/4q14-opa827
www.ti.com/4q14-opa1642
www.ti.com/4q14-opa141
www.ti.com/4q14-opa140

订阅 AAJ:

www.ti.com.cn/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
Design Center



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	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

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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司