

减少源自 CMOS 模拟开关的失真

作者: John Caldwell
模拟应用工程师

在许多电子系统的输入和输出端上，大量地使用了 CMOS 模拟开关。它们可以用来在数据采集系统的多个输入通道之间进行选择，或者在上电或断电过程中停用输出。事实上，由于模拟开关变得如此常用，因此其操作经常被认为是理所当然的。但是，模拟设计人员应当知道：相比于同类的机械开关，半导体开关所表现出的工作特性是迥然不同的。例如：处在闭合位置的 CMOS 开关的电阻（被称为“导通电阻”或“ R_{ON} ”）会因为输入电压的不同而改变。该特性通常是不合需要的，而且会在某些应用中使输入信号产生显著的失真。

为了弄清 CMOS 开关以这种方式运行的缘由，有必要了解其基本构造和工作原理。如图 1 所示，典型的固态模拟开关由两个沟道极性相反的 MOSFET 组成，并被配置为一个传输门。FET 栅极上的控制电压（C 和 \bar{C} ）是极性相反的直流（dc）电压。当 NMOS 晶体管的栅极为高电平且 PMOS 晶体管的栅极为低电平时，开关是闭合的。正输入电压把 PMOS 的 V_{GS} 驱动至更负，从而减小了 PMOS 导通电阻。于是，PMOS 是用于正电压的主要电流路径。相反，施加至输入端子上的负电压却将增加 NMOS FET 的栅极至源极电压 V_{GS} ，从而减小其导通电阻并允许电流流过 NMOS 路径。

基本的开关架构虽然允许传递正电压和负电压，但也会导致开关的总电阻随着输入信号而变化。图 2 给出了 TS12A12511 开关的导通电阻与信号电压范围的关系曲线图^[1]。在产品手册规格表中有可能提供了一个 R_{ON} “平坦度”参数，以量化整个信号范围内开关导通电阻的最大偏差。比如，TS12A12511 的 R_{ON} 平坦度指标为 1.6Ω （典型值）。

图 3 示出了一个内置 CMOS 开关的基本模拟输出电路。这里，开关用于将负载与一个运算放大器（运放）的输出断连。CMOS 开关的此类用途在音频应用中非常普遍，可用于抑制上述电路在上电或断电期间产生的“喀喇声”和“噼啪声”。开关导通电阻与负

图 1: 由 NMOS 和 PMOS 晶体管组成的 CMOS 传输门

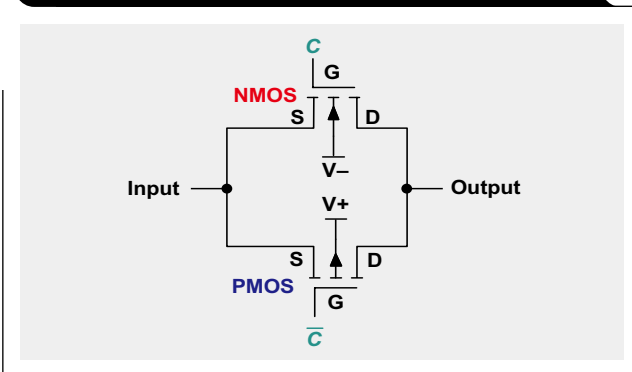


图 2: TS12A12511 的导通电阻变化及 R_{ON} 平坦度示例

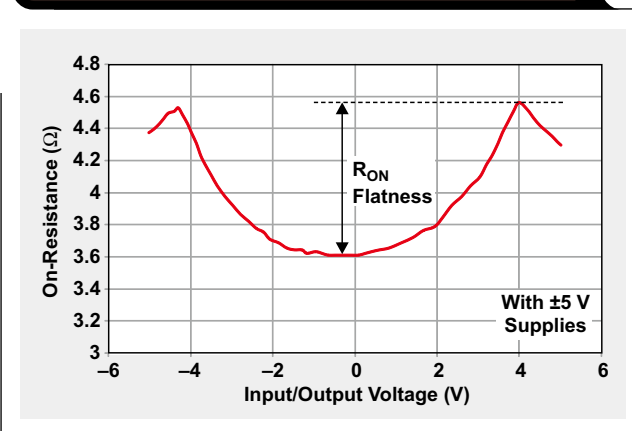
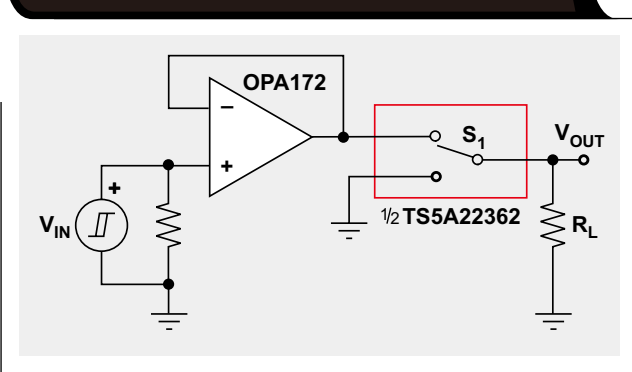


图 3: 典型 CMOS 开关应用中的信号失真



载电阻 R_L 形成了一个分压器，输出电压为：

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_L}{R_{ON(S1)} + R_L} = \frac{V_{IN}}{\frac{R_{ON(S1)}}{R_L} + 1} \quad (1)$$

在现实中， $R_{ON(S1)}$ 的值并不是一个常数，而是 V_{IN} 的一个函数。例如：假设 $R_{ON(S1)}$ 为输入电压的一个线性函数：

$$R_{ON(S1)}(V_{IN}) = \Delta R \times V_{IN} + R_0 \quad (2)$$

在 (2) 式中， ΔR 代表导通电阻随输入电压发生的变化，而 R_0 则是输入信号为 0 V 时的电阻。事实上， R_{ON} 与 V_{IN} 之间的关系更加复杂，但是假设一种线性关系不仅可以简化分析，同时仍然揭示了产生失真的机理。

把用于计算导通电阻的 (2) 式代回到用于计算输出电压的 (1) 式，可得出一个新的方程：

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{\frac{\Delta R}{R_L} V_{IN} + \frac{R_0}{R_L} + 1} \quad (3)$$

为简单起见，通过用常数 A 和 B 来替换上式中的各项，可以生成 (3) 式的一种通用形式：

$$\begin{aligned} \text{Let } x = V_{IN}, A = \frac{\Delta R}{R_L} \text{ and } B = \frac{R_0}{R_L} + 1, \\ \text{then } V_{OUT} = f(x) = \frac{x}{Ax + B} \end{aligned} \quad (4)$$

为了说明失真的产生，可以将这个更加通用的方程改写为其等效的麦克劳林级数（这里显示了 5 项）：

$$f(x) = \frac{1}{B}x - \frac{A}{B^2}x^2 + \frac{A^2}{B^3}x^3 - \frac{A^3}{B^4}x^4 + \frac{A^4}{B^5}x^5 \dots \quad (5)$$

现在，把一个正弦波作为具有 $x = \sin(2\pi ft)$ 的输入代入：

$$\begin{aligned} f[\sin(2\pi ft)] = \frac{\sin(2\pi ft)}{B} - \frac{A}{B^2}\sin(2\pi ft)^2 + \frac{A^2}{B^3}\sin(2\pi ft)^3 \\ - \frac{A^3}{B^4}\sin(2\pi ft)^4 + \frac{A^4}{B^5}\sin(2\pi ft)^5 \dots \end{aligned} \quad (6)$$

采用三角函数的降幂规则 (power reduction rules) 并简化该方程，可如表 1 所示将用于每个谐波的个别项进行分组。麦克劳林级数被缩短至 5 项，因此谐波的幅度是近似值。

虽然 CMOS 开关的导通电阻几乎从来不与输入电压呈线性关系，但是本例为减少源自模拟开关的失真提供了一些有用的规则。我们来看看用于个别谐波的方程，减少失真将要求 A 的数值必须非常小，或者 B 的数值必须非

表 1: 针对计算示例的基本谐波和失真谐波的近似幅度

基波	$\left(\frac{1}{B} + \frac{3A^2}{4B^3} + \frac{5A^4}{8B^5}\right)\sin(2\pi ft)$
二次谐波	$\left(\frac{A}{2B^2} + \frac{A^3}{2B^4}\right)\sin\left(4\pi f + \frac{\pi}{2}\right)$
三次谐波	$\left(\frac{A^2}{4B^3} + \frac{5A^4}{16B^5}\right)\sin(6\pi f + \pi)$
四次谐波	$\left(\frac{A^3}{8B^4}\right)\sin\left(8\pi f + \frac{3\pi}{2}\right)$
五次谐波	$\frac{A^4}{16B^5}\sin(10\pi f)$

常大。后一种选择在大多数应用中都是非常缺乏吸引力的。回想一下 B 的方程：

$$B = \frac{R_0}{R_L} + 1 \quad (7)$$

如欲获得很大的 B 值，则 R_0 必须远远大于 R_L 。现在，大部分的信号电压下降都出现在开关（而不是负载电阻器）的两端。最终的效果就是输出信号被衰减。

在大多数系统中，更实用的做法是减小 A 的值：

$$A = \frac{\Delta R}{R_L} \quad (8)$$

仔细查看一下 A 的方程，可见如果 $\Delta R = 0$ ，则谐波项将被消除。尽管在模拟开关中此项度量指标一直在不断地改善，但是导通电阻绝对不会完全不受输入电压的影响。一种更为常用的替代解决方案是选择一个比导通电阻的变化量大得多的负载电阻值。这种解决方案通常在模拟输入端上使用，其中 R_L 为数据采集电路的输入阻抗，而且往往是非常大的。

不幸的是，其他采用模拟开关的应用并不敢奢望能够规定负载阻抗。把输出切换到高保真度头戴式耳机便是一个例子。此外，哪怕是由微小的开关导通电阻变化所引起的失真其规模也是很惊人的。图 3 中所示电路的总谐波失真与噪声之和 (THD + N) 是在采用 $2 V_{PP}$ 信号以及 $100 k\Omega$ 和 600Ω 负载电阻的情况下测得的。根据 TS5A22362 模拟开关产品手册提供的数据，0 V（室温）条件下的导通电阻约为 0.37Ω 。导通电阻在 $2 V_{PP}$ 输入信号范围内的变化量将在 0.115Ω 左右。

图 4 示出了在两种负载阻抗条件下整个频率范围内的实测 THD + N。当负载阻抗为 100 kΩ 时，THD + N 极低。在该场合中，测量结果由仪器的噪声底层 (noise floor) 决定，大约为 0.0005%。然而，把负载阻抗减小至 600 Ω 将使失真增加一个数量级，达到 0.005%。这种失真水平在许多高精度模拟系统中都是不可接受的。

由于开关两端电压降在测量带宽内并未改变，因此由开关引起的失真在整个频率范围内是恒定的。

进入 600 Ω 负载的输出信号的 FFT (在 1 kHz 频率下，见图 5) 表明：二次谐波居主导地位，但是在噪声底层以上直至 5 次谐波都可以看到毛刺。谐波是由开关的 R_{ON} 变化引起的。

可以想象，把位于放大器的反馈环路中的开关封闭起来可以使更多的失真得到校正，但这并不像表面看上去那么简单。放大器的反馈环路在开关处于开路状态的时候必须依然是闭合的，否则放大器输出将饱和至其中的一个电源轨。在放大器输出处于饱和状态的情况下闭合开关有可能在负载上引发一个讨厌的瞬态电压。

图 6 示出了针对该问题的一款解决方案。在这种电路拓扑中，使用了两个开关。一个开关 S_1 是用于负载的信号路径。第二个开关 S_2 则允许运放反馈环路围绕第一个开关进行闭合。 S_2 在系统中增加的失真是微乎其微的，因为运放的反相输入是一个非常高的阻抗。

当两个开关均如图 6 所示进行配置时，电阻器 R_1 与穿过 S_1 和 S_2 的路径相并联。为了实现最小的失真，居主导地位的反馈路径应穿过开关而不是穿过 R_1 。因此，开关的导通电阻应远远小于 R_1 ：

$$R_1 \gg R_{ON(S1)} + R_{ON(S2)} \quad (9)$$

考虑到诸如 TS5A22362 等模拟开关的导通电阻为 0.37 Ω，因此上述要求可以很容易地得到满足。但是其他的开关部件（比如极为常用的 CD4066B）则具有大于 100 Ω 的典型导通电阻。

当开关切换至其另一个位置以使负载与放大器输出断开时， R_1 将运放的反馈环路闭合。当在运放的反馈路径中布设电阻器时必须始终考虑稳定性。反馈电阻器与输入电容之间存在相互影响，从而减少反馈环路相位余量。（接下页）

图 4：图 3 所示电路的 THD + N 测量结果

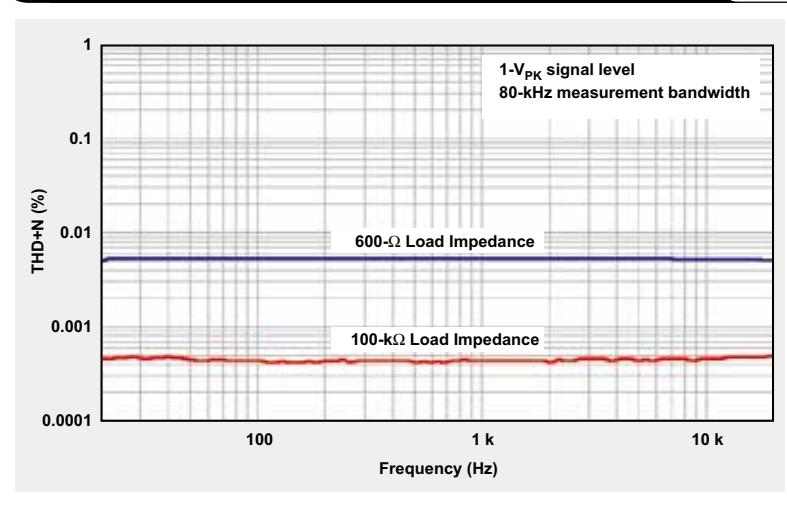


图 5：位于图 3 所示电路之输出端上的 1 V_{PK}、1 kHz 正弦波的频谱

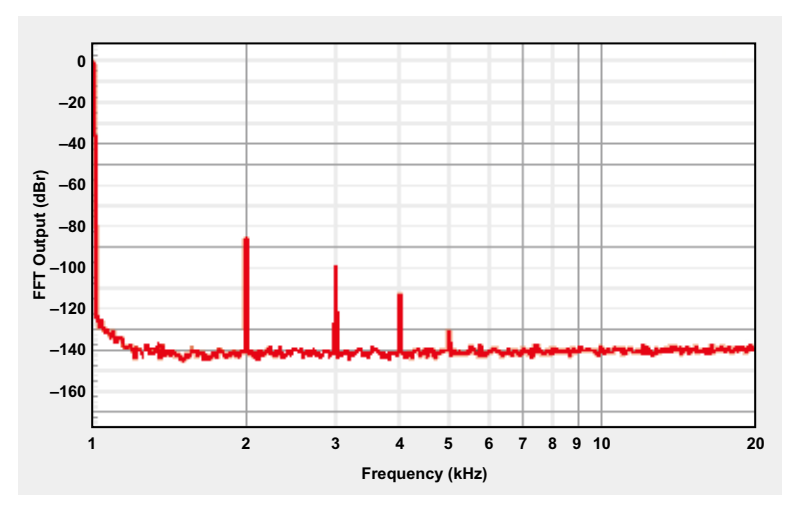
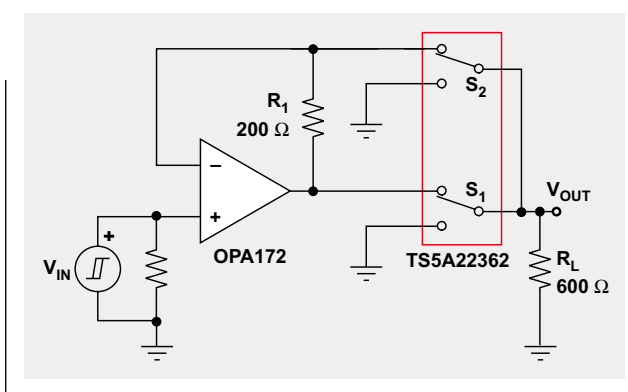


图 6：一款用于闭合放大器反馈环路的双开关解决方案



(续上页) (10) 式给出了一条保守的经验法则，其推导过程请见参考文献 2。

$$\frac{1}{20\pi f_{GBW}(C_{CM} \parallel C_{DM})} \geq R_1 \quad (10)$$

式中的 f_{GBW} 为运放的增益带宽乘积，而 C_{CM} 和 C_{DM} 则分别为运放的共模和差分输入电容。将一款高精度运放 OPA172 的合适数值代入，可得出 R_1 的最大值为 198.9 Ω 。200 Ω 的电阻器是一种接近于计算值的合理选择，其可避免发生稳定性问题。

$$\frac{1}{20\pi(10 \text{ MHz})(8 \text{ pF})} = 198.9 \geq R_1 \quad (11)$$

按前文描述的方式对图 6 中的电路进行测试，测试结果示于图 7 和图 8。通过封闭位于运放的反馈环路内部的开关，可有效地消除由 R_{ON} 变化所引起的额外失真。对于两种负载阻抗（600 Ω 和 100 k Ω ），整个频率范围内的 THD + N 测量是相同的，并且位于测量仪器的噪声底层。

通过检查输出信号的 FFT（图 8）我们发现：来自 TS5A22362 的额外谐波如今低于测量仪器的噪声底层。

对于那些必须最大限度地抑制谐波失真的高性能模拟系统而言，封闭位于运放的反馈环路内部的模拟开关能够极大地改善性能。图 6 所示的电路拓扑可减少源自开关的失真，而且还能实现放大器输出与负载的完全断接。运放的反馈环路的闭合与开关配置无关，从而可防止放大器输出发生饱和以及在开关闭合时引起不希望有的电压瞬变。此外，具有极低 R_{ON} 变化量的 CMOS 模拟开关也将不再那么至关重要，从而有望降低系统成本。

致谢

本文作者希望向 TI 模拟现场应用工程师 John Xu 致谢，他的想法是激发此项研究工作最初的灵感。

Figure 7: THD+N measurement of the circuit in Figure 6

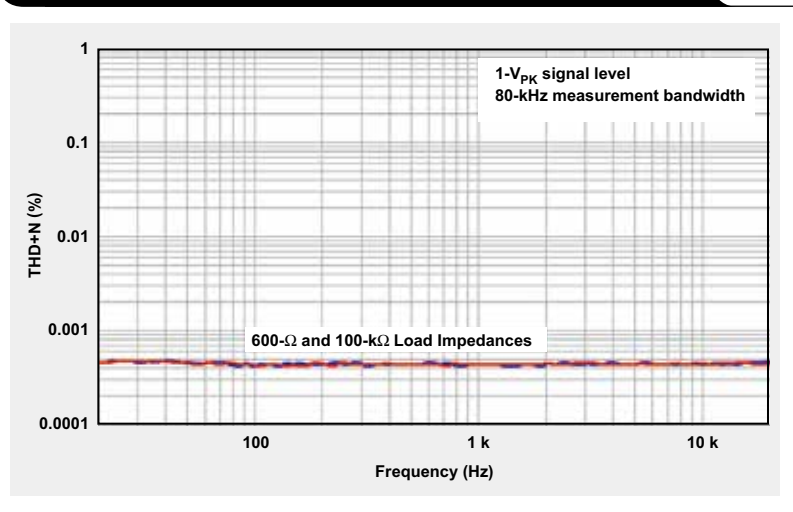
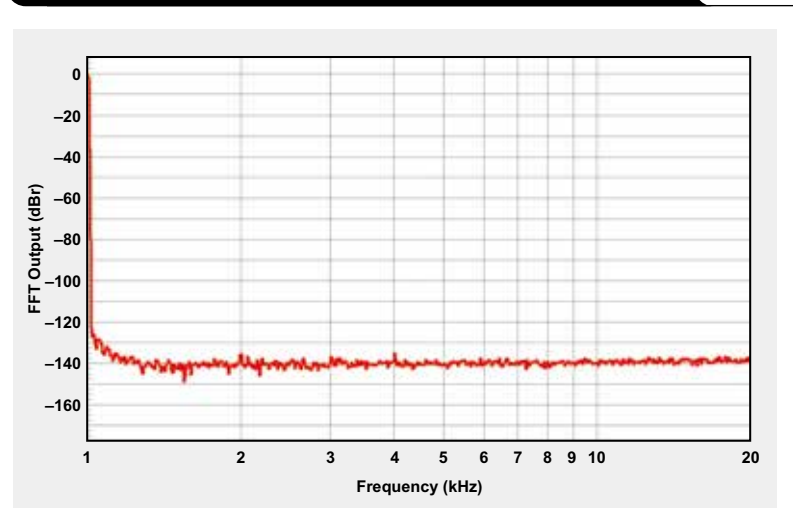


Figure 8: Spectrum of a 1-V_{PK}, 1-kHz sine wave at the output of the circuit in Figure 6



参考文献

1. TS12A12511 单刀双掷 (SPDT) 模拟开关产品手册，德州仪器，2015 年。在线版地址：
www.ti.com/1q15-TS12A12511

相关网站

- www.ti.com/1q15-TS5A22362
- www.ti.com/1q15-CD4066B
- www.ti.com/1q15-OPA172

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