

千兆位级系统中的高级线性均衡

作者: Lee Sledjeski

系统工程师

引言

尽管当今电子产品中对于信号均衡的广泛需求似乎是近来才有的现象,然而电信领域中的线性均衡事例却可以追踪到一个多世纪以前。事实上,连续时间线性均衡(CTLE)仅仅是信号调节生态系统的一个部分,此类系统专为在高速数字信号的传送和接收中提供帮助而设计。数字信号的这种补偿或调节常常被称为“加重”(在传输域中)和“均衡”(在接收域中)。

什么是线性均衡?为什么需要进行线性均衡?

均衡是一种用于在共同构成一个电信号的各种不同频率分量之间恢复平衡的过程或方法。有一个简单的类比,那就是音频均衡器,它常常被用来帮助提升那些扬声器难以再生或者我们上了年纪的耳朵不再能够有效听清的信号分量。把视线从音频扬声器转移到 PCB 上的信号或电缆中的信号,我们会遇到相似的问题。当高速信号穿过传输介质时,高频信号分量将由于导体和周围电介质的物理属性而快速衰减。

CTLE 性能

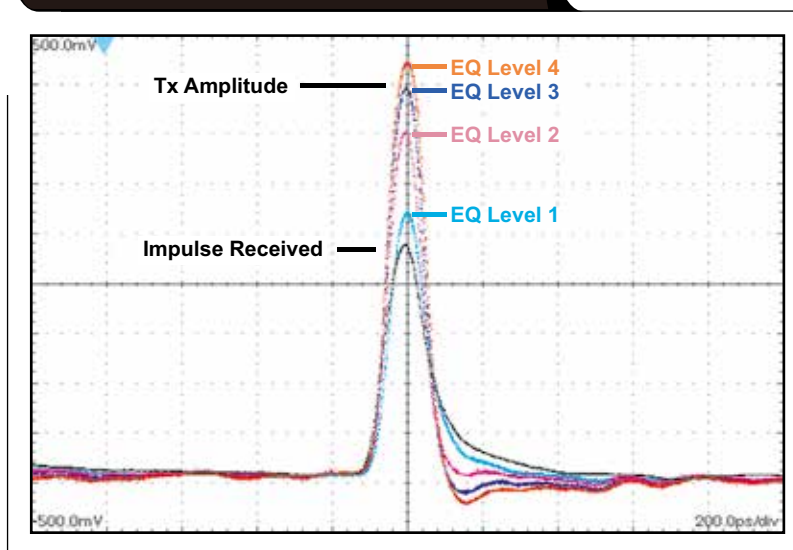
现代通信标准必须接纳和规定较快的数据速率,以帮助满足全球范围内对于即态访问信息不断增长的巨大需求量。这几乎肯定了在目前及未来开发的串行数据标准中将继续规定 CTLE。在概述的层面上,利用 CTLE 电路实现的线性增益或高通提升有助扩展信号包络。搭配诸如判决反馈均衡(DFE)等数字均衡方案,CTLE 能够跨多种介质实现稳健的信号接收,并具有仅靠 DFE 所无法获得的信号衰减水平。通过采用时域波形和频域曲线图来突出显示 CTLE 的一般特性及其对实际眼图的影响,可获得更加深入的信息。

在图 1 中,首先利用一个 800 mV_{pp} 的输出差分电压使接收到的时域脉冲进入一个 10 英寸长的 FR4 传输介质中。在穿过了 FR4 传输介质之后,接收脉冲的幅度减半,而且后沿能量的传播远远超过了原始位宽度或单位区间(UI)边界。在该例中,由德州仪器提供的一

个 DS125BR820 均衡器被连接在 10 英寸走线的远端,以演示 CTLE 的功能及其在抑制由于通道损耗所引起的抖动上的有效性。随着 CTLE 的水平逐渐增加至与通道损耗相匹配,它就能够在恢复脉冲幅度和相邻比特干扰。观察脉冲响应上的幅度与定时特性可深入了解针对伪随机二进制序列(PRBS)图形的系统响应。这种方法简单地把每个 PRBS 转换作为一个脉冲进行时移及求和操作。就严格的数学意义而言,图 1 中的脉冲不具有无限的幅度和零宽度,但它仍然是一种很好的研究 CTLE 性能的直观方式。

如果未采用 CTLE,那么即便是一个简单的数据模式也会在眼图的内部显现幅度减小和脉冲展宽对于单比特转换(single-bit transitions)的影响。采用了 CTLE 之后,其可均衡数据模式中所有转换的幅度并尽量地减小横跨位边界的脉冲展宽,从而抑制上述的影响。(接下页)

图 1: 10 英寸 FR4 之后的脉冲响应
(采用和未采用 CTLE 时)



(续上页) 通过消除位之间的相互影响, 最大限度地降低了符号间干扰 (ISI), 并改善了眼图开启度。这可以通过比较图 2 中的眼图看出来。

频域

考察 CTLE 的另一种方法是在频域中。可对在时域实验中所使用的 FR4 进行测量以确定其频域特性。相同的测量工具还可用于测量 CTLE 特性。通常, 在一个很宽的频率范围内, 当传输介质的衰减由 CTLE 增益匹配时 (一直到一个接近于奈奎斯特频率的频率), 可实现最佳的眼图结果。图 3 中的例子示出了与一个 12 Gbps 串行数据速率相关联的传输损耗及 CTLE 增益。对于一个 12 Gbps 信号, 101010 的二进制符号重复模式产生一个 6 GHz 的基频。这种组合实现了“介质 + CTLE”的总系统响应, 其在理想情况下为零 (即响应曲线是平坦的)。

如果把这种方法应用到极端的衰减和高频增益水平, 就会发现 CTLE 的一个局限。如频域曲线图所示, CTLE 电路能够为高频信号分量提供相当大的提升。在内部, CTLE 专为最大限度地减少添加到高速信号上的任何随机抖动 (RJ) 而设计。在外部, CTLE 增益无法区别信号和系统噪声。于是, 输入数据的所有方面都接收到了一个提升, 而且这种作用在较高的 CTLE 提升幅度下更加明显。

图 2: 未采用 CTLE (上部) 和采用 CTLE (下部) 时的眼图

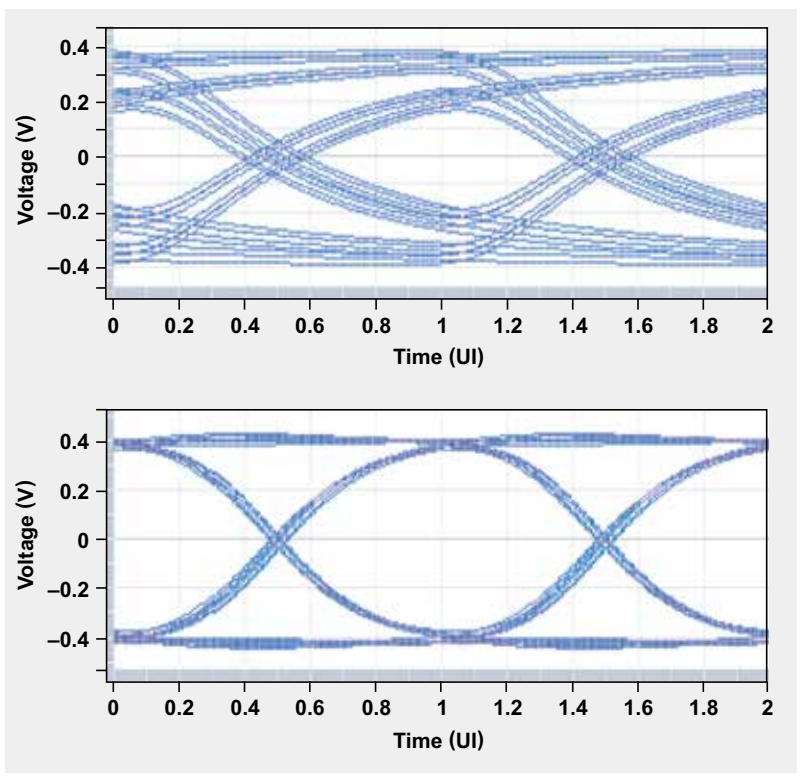


图 3: FR4 衰减和理想化的 CTLE 增益

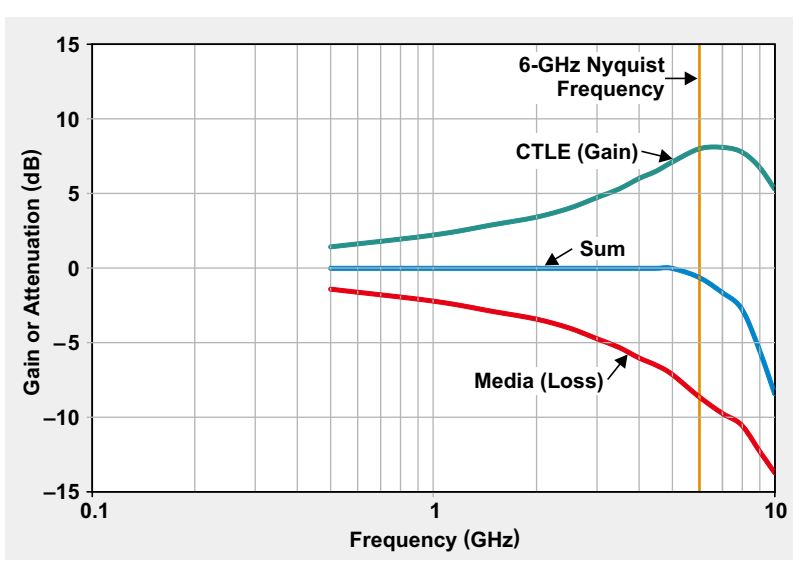
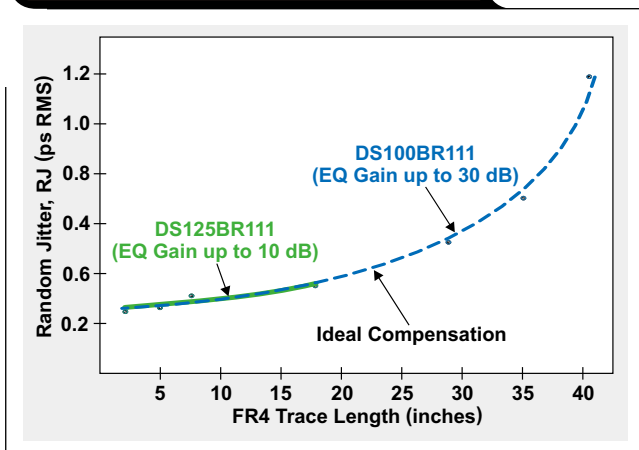


图 4: CTLE 增益与附加 RJ 的关系曲线



如图 4 所示，当需要较高的 CTLE 增益水平以补偿传输损耗时，抖动分解软件可察觉 RJ 程度的增加。较高程度的 RJ 会导致位错误。幸运的是，可使用中低水平的 CTLE。这样实测的 RJ 就没有显著的增加。事实上，在高于 25 Gbps 的数据速率下，介质补偿仍将继续指定和使用 CTLE 解决方案。目前，在整个接口市场上，25 Gbps 接口仅限于其中非常小的一部分。多数设计人员仍有机会接触诸如 PCI Express® (PCIe)、10 千兆位以太网 (10GbE) 和串行连接 SCSI (SAS) 等标准中规定的速度，其范围介于 8 Gbps 和 12 Gbps 之间。

链路培训

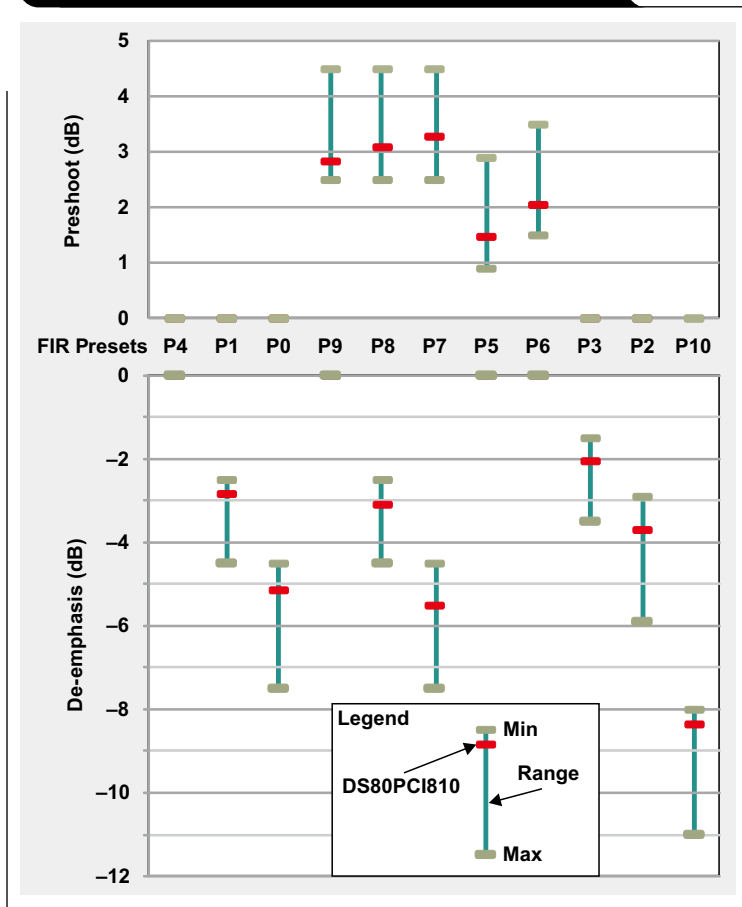
所有这些标准有一个共同点，那就是链路培训和自适应信号调节的概念。虽然规范和算法将有所不同，但是它们均运用了允许接收器 (Rx) 向发送 (Tx) 器件反馈或推荐有限脉冲响应 (FIR) 系数变化的方法。通过该过程可使 Rx/Tx 对形成一种用于信号补偿且无需外部干预的整体通道解决方案。被插入一个有损通道并专为使用链路培训而设计的线性均衡器必须保持和保存该通道的线性度，同时提供充足的增益，以有效地把一个长通道变为一个较短、损耗较小的通道。DS125BR820 具有足够的带宽与动态范围，可适应来自业界标准发送器的最大幅度信号。

在 PCIe 应用中，可以把一个线性均衡器安置在一个附加卡 (AIC) 连接器的近旁。采用基于标准的软件测试来操作主机发送器，使之在具有不同 FIR 能量值的整个 Tx 预设值范围内进行排序。表 1 和图 5 中的比较说明了均衡器是如何在允许的 PCIe 标准裕量之内保持前导波能量 (pre-cursor energy) 和后续波能量 (post-cursor energy) 的。

表 1: 理想和实测 PCIe 发送预设值

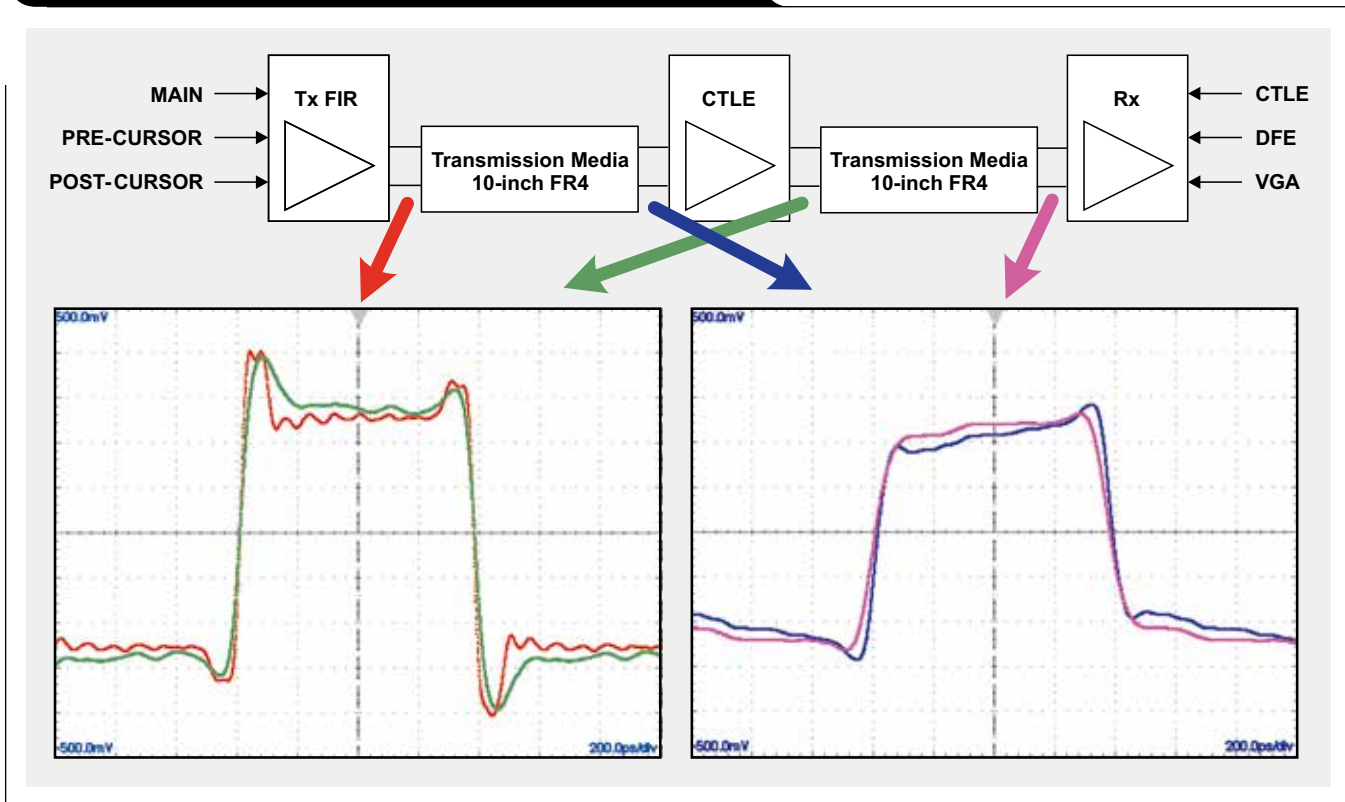
PCIe Tx Preset	Preset Binary Value	Ideal Vb	Measured Vb	Ideal		Measured	
				Post Cursor	Pre Cursor	Post Cursor	Pre Cursor
P4	0100'b	1000	1070	0	0	0	0
P1	0001'b	668	772	-3.5	0	-2.8	0
P0	0000'b	500	592	-6	0	-5.1	0
P9	1001'b	668	772	0	3.5	0	2.8
P8	1000'b	501	592	-3.5	3.5	-3.1	3.1
P7	0111'b	402	479	-6	3.5	-5.5	3.3
P5	0101'b	803	903	0	2	0	1.5
P6	0110'b	750	845	0	2.5	0	2.1
P3	0011'b	750	845	-2.5	0	-2.1	0
P2	0010'b	603	699	-4.5	0	-3.7	0
P10	1010'b	335	409	-9.5	0	-8.4	0

图 5: 实测 PCIe Tx 预设值的图解表示



线性均衡和输出驱动的组合创建了很高的 FIR 透明度。这使得均衡器能够再生并成功地在 AIC 连接器上传递所有的 PCIe 3.0 Tx 预设值。(接下页)

图 6: 采用线性均衡恢复的 TX FIR 能量



(续上页) 由德州仪器提供的 DS80PCI810 的 PCIe 3.0 性能已在近期举办的 PCI-SIG 相容性认证工作会上通过了验证。到本文发表时为止, 它是目前唯一一款上了 PCIe 3.0 集成商清单的线性均衡器。PCIe Tx 预置采用一种特定的相容性测试码型和示波器软件 (以提取和计算测量值) 来测试。该测试可帮助在符合 PCIe 标准的通道中确保稳健的运作。

虽然系统集成商会以一种非常挑剔的眼光来考察此类规范和实测数据, 但是利用在全比特率或全速条件下捕捉的波形可以较容易地对 CTLE 性能产生一种更加直观的感觉。在新式数字系统中, 应了解传输通道内部几个位置上的波形特征, 这一点很重要。图 6 中的波形序列示出了沿着通道的几个点上的 10GbE 波形 (使箭头颜色与波形颜色相匹配)。

采用 Tx 和 Rx 均衡的新式方法可容易地提供数据速率为 10 Gbps 的 20~30 英寸链路。在此距离上或许并不总是需要额外的线性均衡器, 但它却是一个可以说明线性均衡方案能有效地降低其他系统级组件之均衡要求的合适长度。如在图 6 中看到的那样, 线性均衡器能够恢复由于嵌入在波形转换中的高频分量而损失的幅度, 并同时保持低频幅度特性。通过把 CTLE 布设在 20 英寸通道的中间, 其允许将波形配对以显示 CTLE 输入和 Rx 输入端

上的相等波形。插入 CTLE 使有效通道长度缩减了 10 英寸 (几乎相当于 9 dB)。

结论

采用线性均衡只给串行链路增加了区区几 ps 的延迟和极小的附加抖动。这增加了用于高速信号的传输和接收的有效解决方案空间。显然, 数字信号处理和通信将继续主导新通信标准的基础架构。然而, 在模拟域中使用线性均衡在高速信号调节领域里仍然起着重要的支持作用, 借此可在采用广泛的串行协议时确保稳健的无差错操作, 包括 10GbE 以太网、PCIe 和 SAS。

相关网站

信号调节 — 中继器、重定时器和多路复用器-缓冲器 (Mux-Buffer): www.ti.com/sigcon

产品信息:

www.ti.com/DS80PCI810
www.ti.com/DS125BR111
www.ti.com/DS125BR820

订阅 AAJ:

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 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 V V

输出 输出电流

V A

环境温度 °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 V V

输出 输出电流

V A

环境温度 °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:



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其在其应用中使用 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, 但他们将独立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, 并且由客户独立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