

**Sam Sabapathy**  
C2000™ 设计下一代工业驱动和控制系统

## 简介

一套典型的工业系统需要具有控制、应用和连接功能。控制子系统直接管理电机运转和反馈，应用指挥全局运动，而连接子系统下载应用、控制数据并允许系统接受远程管理。

一般而言，构成其中每个子系统的基础核心技术已清晰明了。在高端方面，开发人员继续通过创新来改善总体性能和准确性。随着这些技术的成熟以及实施成本的下降，用于高端应用的这些解决方案逐步顺着价值链推进。

下一代系统的开发人员目前面临的挑战在于，如何高效实现渐进式创新来为他们的目标应用提供更高的性能，同时降低延迟并提高精度。为了扩大市场份额，他们需要提供更优秀的性能，例如新的反馈算法或新颖的途径，从而以更低的成本来提高位置精度和电流感应。

为此，需要一种能够提供更高性能和更高集成度的处理器；然而，这种方法会增加开发成本并加大系统复杂性，结果反而会延缓产品推向市场的速度，从而最终削弱推出下一代设计的竞争优势。实施一种新技术对于开发人员和最终用户都必须是无缝、简单和增值的。

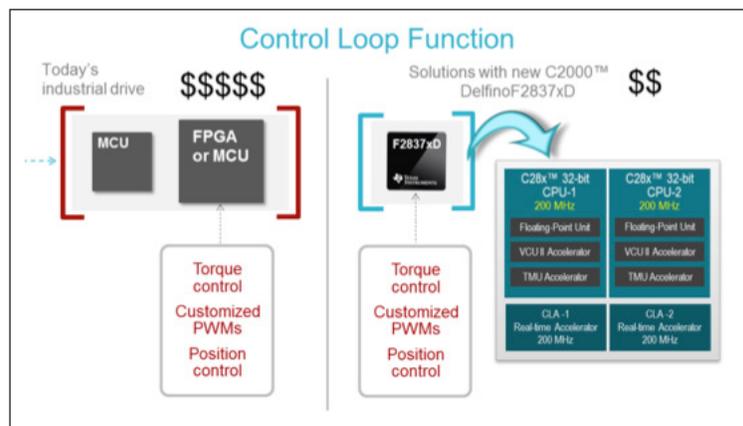
# 设计下一代工业驱动和控制系统

## 适用于下一代工业设计的新架构

一直以来，许多原始设备制造商 (OEM) 依赖于现场可编程门阵列 (FPGA) 技术来推动重要功能（如扭矩环路管理）的尖端性能。然而，FPGA 会增加系统成本，并且难以编程。此外，FPGA 提供相对固定的实现方式，缺乏在多个应用之间无需重新设计的灵活性。

来自德州仪器 (TI) 的双核 C2000™ Delfino™ F2837xD MCU 将方便实现各种数学变换和三角密集型计算，从而可在可编程处理器平台上进行高效的扭矩环路管理。双核 Delfino F2837xD 还可用于最大限度提高工业驱动和控制应用中的硬件和软件性能。例如，其快速的扭矩环路计算可达到低于 3  $\mu$ S，可与 FPGA 实现方式媲美。

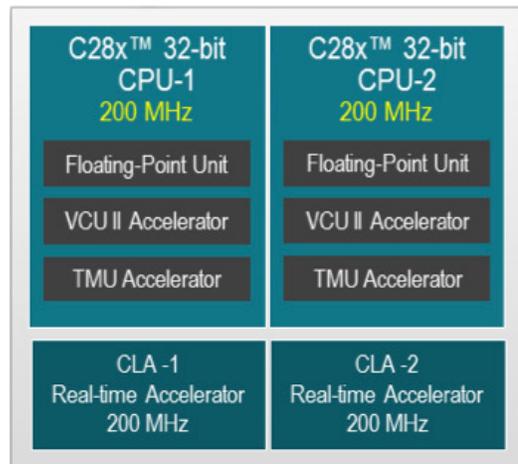
F2837xD MCU 通过紧密耦合的加速器进一步使 CPU 加速，从而提高控制环路性能。这种双核 MCU 基于 TI 经实践检验的 C28x CPU。每个 CPU 内核提供 200 MHz 条件下的 32 位浮点处理能力，以及各自同样运行于 200 MHz 下的双路实时控制加速器 (CLA)。每个 C28x CPU 以其自身的三角数学单元 (TMU) 加速器进行增强，这种加速器提供对控制类任务非常有用的基于硬件的加速。这四个强大的引擎可持续产生相当于 800 MIPS 或 1600 MFLOPS 的性能，在控制环路系统中实现多处理器架构的整合（图 1）。



▲ 图 1 - 在 C2000 Delfino F2837xD MCU 之前，工业驱动系统复杂而昂贵。

例如，在工业驱动应用中，可采用一个 CPU（带 TMU）+ CLA 实现控制端功能，即扭矩环路。可采用另一个 CPU（带 TMU）+ CLA 实现系统的应用端，即跟踪速度和位置、计算轨道、比较运动轨迹，等等。

这种在 CPU 之间将工业驱动系统分为控制和应用部分的做法为开发人员提供了明确的分割方法来简化设计。由于只有控制代码运行于其中一个 CPU 上，是与应用代码隔离开的，因此开发人员不需要投入宝贵的开发时间来减缓应用代码对实时任务响应能力和延迟的潜在影响（图 2）。



▲ 图 2 – 双 C28x 内核及附带加速器的细节。

The Delfino F2837xD MCUs 使开发人员可以将高端功能沿着价值链向下迁移到中低端应用。实现这一目标借助的是多种创新技术相结合，包括：

- 相对于当前解决方案，以更低的成本实现更强大的处理能力
- 简化、低延迟的架构，以确定性的方式提供更高的性能
- 基于硬件的高级引擎，加快常见但却是计算密集型的任务
- 将重要功能集成到处理器的架构中以降低外部组件 数量和成本
- 简化的新设计迁移以及重新使用 OEM 的现有代码成果

## 提升系统性能

F2837xD 是一种可以实现 800 MIPS 总系统性能的强大 MCU。这是通过双 C28x CPU 和双 CLA 提供的性能。两个 CPU 还集成硬件加速器，可以快速执行在编码通信应用中常见的基于三角函数的控制功能和复杂的数学运算。这些硬件加速器包括：

- 三角数学单元 (TMU)：TI 开发的 TMU 硬件加速器可协助主 C28x CPU 执行三角函数，如 SIN、COS、ATAN 和 1/X，这些三角函数在机器人运动（其中的铰接点需要从线性到角度的转换）之类的应用中经常用到。

这些复杂的函数均计算量巨大，通常即使采用具有传统浮点功能的 CPU 也需要 30 到 90 个周期才能完成。

可使用 TMU 作为强大的加速器来与 CPU 并行执行浮点单元计算。在使用 TMU 后，对于需要三角函数计算的数学变换，每个指令平均执行时间为五个周期，速度可实现 5 倍性能提升（图 3）。



▲ 图 3 – 采用 TMU 的 C28x 可解决 FPGA 扭矩环路延迟，针对不断变化的负载条件实现快速的系统响应。

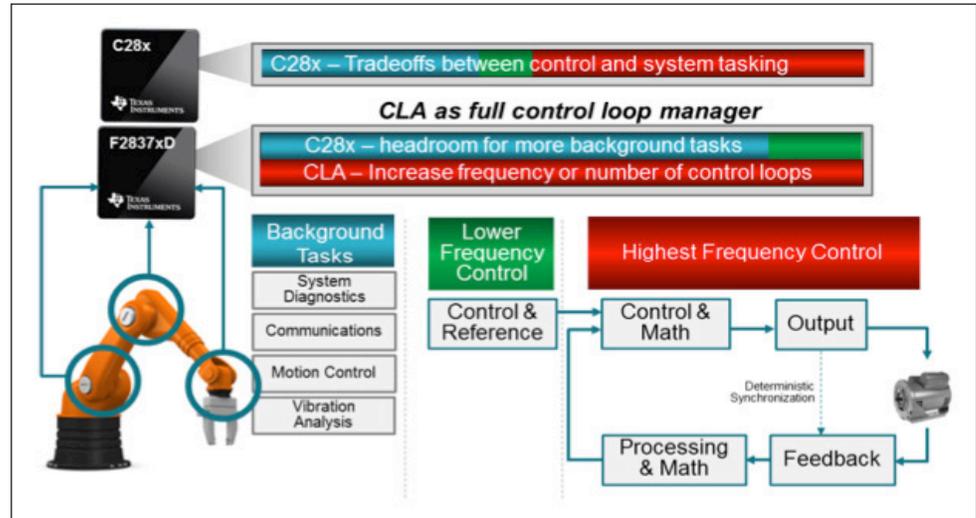
- **Viterbi 复杂单元 (VCU II):** 这种加速器可以高效处理复杂的数学函数（图 4）。VCU 使基于通信的算法的性能提升高达 10 倍并提供了余量，此外还为将来系统的成长和比特率的提高提供余量，或反过来使器件能够运行在较低的 MHz 以降低系统成本和功耗。具有加速功能的 VCU II 是智能电网应用中的电力线通信 (PLC) 算法（例如 OFDM 交错和解交错、Viterbi 解码、CRC 计算等）的理想选择。它提高了窄带 PLC 标准中的性能，并且支持智能电网高级仪表基础设施网络（PRIME、G3 和 IEEE-P1901.2）。工业驱动中的 VCU II 可更好地预测电机故障，其原理是对电机执行振动分析以增加工作效率并降低停机时间。

除了 TMU 和 VCU II 硬件加速器，F2837xD MCU 还包括两个实时 CLA，用于对驱动系统中的关键控制任务进行智能分割。

- **实时控制加速器 (CLA):** CLA 是与主 CPU 捆绑的独立浮点处理器。CLA 是专用的低延迟 CPU，类似于可直接访问控制外设的架构。它们是独立于主 CPU 而运行的纯数学引擎。可通过多种不同的方式使用 CLA，进而从 CPU 上完全解除密集型信号处理任务（图 4）。例如，CLA 可充当模数转换器 (ADC) 前端的一部分，并预处理传入信号以过滤噪声，然后将数据缓存在自己的随机存取存储器 (RAM) 中。采用这种方式，仅当拥有一个完整的预处理数据块可供 CPU 处理时，CPU 才会参与进来。使

用 CLA 的另一种方法是对传入的电流波形进行信号分析，CLA 随后可剖析电机的实时性能。此剖析结果可根据电机类型来与“黄金签名”进行持续比较。当剖析结果开始偏离预期签名时（表示有潜在故障），工业驱动系统可警告操作员采取预防措施来防止发生故障。CLA 可执行的其他任务包括反馈预处理、前馈控制和特殊信号分析或包处理。

这些仅仅是使用 CLA 可以实现的大量可能特性中的一小部分。



▲ **Figure 4-** 可增加频率或控制环路数量，减轻 C28x 的负担以执行更多后台控制和系统任务。

## 低延迟和确定性架构

虽然性能是工业驱动的必要条件，但总体的系统设计也需要简化。当增强性能增加设计复杂性时，这反过来也会增加开发时间。例如，确定性对于基于控制的应用至关重要。确定性表示如何对反馈信号进行采样、准确处理以及反馈信号如何及时到达以便使用脉宽调制 (PWM) 信号来驱动控制环路。使用基于高速缓存的处理器的高速缓存架构时，难以通过计算来确定最坏情况的响应能力（导致无法预测的缓存未命中）。通常情况下，设计人员必须依靠对系统的实时执行情况进行剖析来确认最坏情况。这就是说，修改系统代码可能需要对系统进行多次剖析，从而确保未超出系统限制。这种确定性还会延续到 Delfino F2837xD MCU 的外设。ADC 的延迟是指 CPU 需要更新 PWM 的时间。这将大大简化总体系统设计，因为没有必要猜测最坏情况执行路径是什么。

Delfino F2837xD MCU 架构基于其确定性基础，使开发人员可以在不增加系统复杂性的情况下确保可靠性。凭借其紧耦合的存储器架构，没必要再使用高速缓存，因此避免了因高速缓存未命中而导致的相关延迟。根据设计，所有面向静态随机存取存储器 (SRAM)、闪存和外设的存储器事务均适合于有限的总线结构和周期，因此可提供确定性的吞吐量。双路六通道直接存储器存取 (DMA) 外设将提高存储器管理效率，以确保数据始终可供 CPU 或加速器使用。

为了方便内核之间的高效通信，Delfino F2837xD 采用共享存储器，两个内核均对此存储器中的数据拥有完全读写权限。开发人员还对两个消息 RAM 拥有访问权限。每个内核对其中一个消息 RAM 拥有读取权限，而对另一个拥有只读权限。因此，一个内核上的代码无法意外破坏属于另一个内核的重要数据。这将显著简化消息传递，尤其方便了刚从事双核设计的开发人员。

Delfino F2837xD MCU 架构中的子系统之间散步了多个错误检查功能。非易失性存储器和 SRAM 提供 ECC 和奇偶校验功能。器件级诊断经核后可生成标志、中断和外部错误信号。系统级功能安全在工业驱动系统中变得越来越重要。这些内置的错误检查机制实现了加电和运行时的应用级诊断。这样将以低成本改进系统级完整性，并有助于部署多个功能安全拓扑。

### 通过控制和集成式模拟外设进行系统整合

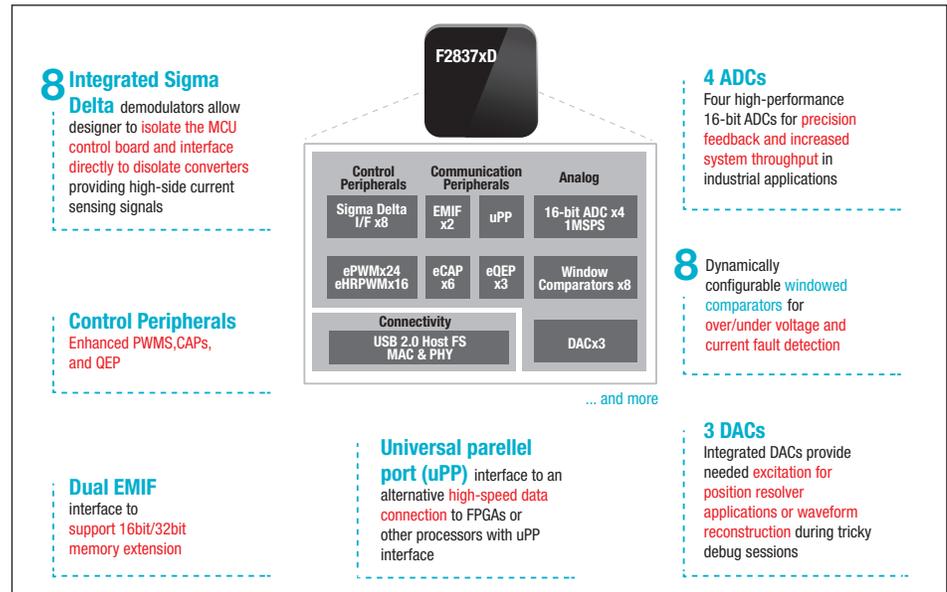
Delfino F2837xD 器件的特点是控制外设。这些外设包括功能强大的业界成熟的 PWM 计时器、32 位增强型捕捉单元 (ECAP) 和正交编码器脉冲 (QEP) 外设。每个 PWM 模块均通过增强后在 A 和 B 通道上支持高分辨率功能。这些高分辨率通道通过扩展 150ps PWM 步进分辨率来实施高频率 PWM 调制技术和高级控制拓扑。

性能受 PWM 控制反馈环路的精度的直接影响。相对于使用外部组件，集成模拟外设将降低延迟和成本。在伺服驱动之类的较高端控制应用中，需要使用高分辨率反馈来提供准确的相电流测量，以获得低矩纹波纹和精密定位；但是，对于某些测量，准确的采样率比高分辨率更重要，例如在进行高速的低侧分流电流测量的情况下。

为了支持不同的准确度要求，Delfino F2837xD MCU 架构提供可支持两种分辨率模式的灵活 ADC：16 位分辨率 (1.1 MSPS) 和 12 位分辨率 (3.5 MSPS)。F2837xD 拥有四个独立集成的 ADC 以用于提供同步转换，因此工业系统可以通过实时方式准确监控多个信号（图 5）。例如，在伺服驱动中，设计人员可监控三相电机的电压和电流，与此同时通过软件对来自分解器的高频率反馈进行同步解码。

Delfino F2837xD MCU 提供三个 12 位缓冲数模转换器 (DAC)，以便在系统级提供模拟驱动信号和跟踪工程参数。为了进一步增加的集成，可使用八个 sigma delta 解调器/滤波器。由于工业电机控制存在相关的高压，因此在测量反馈信号时需要进行绝缘。例如，开发人员可使用 TI 的 AMC120x delta sigma 转换器将模拟值转换为数字比特流，然后直接送入 Delfino F2837xD MCU 的 sigma delta 接口并由解调器进行重组。这会启用电机相位的热侧/高侧电流感应，从而提供在高性能工业驱动中至关重要的反馈保真。

Delfino F2837xD MCU 架构中集成了八个窗口比较器，提供“跳闸点”，这些窗口比较器独立于 CPU 运行，因此没有增加 CPU 负载。这些比较器还反应迅速并且独立于 CPU，可最大限度降低与跳闸信号之间的延迟，因此系统可以快速响应任何异常事件或超出上限/低于下限的情况。比较器跳闸事件经过配置后有助于在出现灾难性事件时提供完整的关断操作，使系统更能适应工业驱动和电源系统。



▲ **Figure 5**– 通过融入于芯片上的高完整性模拟和控制外设来启用系统集成。

## 无缝迁移和开发

多个处理单元和加速器可大幅改善系统性能。然而，许多 OEM 正在以现有设计为基础，并且已大量投入大量精力开发用于 Delfino 和其他 MCU 的代码库。TI 知道，开发人员需要能够通过简化的固件分割来无缝地利用架构改进。例如，TMU 的使用受 C 编译器的管理。当原生 TMU 函数可供使用时，该编译器将自动利用 TMU，而不再从数学库调用函数。因此，基于 C28x-CPU 的现有设计可立即利用 TMU 的 5 倍性能提升优势，无需重写任何代码。此外，TMU 还可以提升基于 MathLAB/Simulink 的应用代码的性能。这也提高了知识产权 (IP) 的可移植性，因为同样的代码可用于带有和不带 TMU 功能的 TI MCU。存储器子系统提供了非常灵活的代码保护机制来帮助供应商和开发者交换增值 IP。

为了加速开发，TI 及其合作伙伴提供种类繁多的软件库、工具、开发套件和技术支持，以作为其广泛的开发生态系统的一部分。例如，数学库可用于 CPU 和 CLA 以协助开发人员获取 Delfino F2837xD MCU 的最高性能。TI 还提供广泛的低级和特定于应用的库来加快控制应用的设计，还有开发板可方便开发人员轻松访问所有基于 Delfino F2837xD 控制的功能。

对于需要通信的应用，Delfino 37x MCU 提供若干串行端口，例如高速外设接口 (SPI)，这些端口将用于处理间连接和网络连接。其他串行端口包括 USB、CAN、UART 和 I<sup>2</sup>C。

对于需要以太网和实时以太网连接及协议的应用，TI 的 Sitara™ AM335x 处理器可供用作配套的通信处理器。Sitara AM335x 器件围绕 ARM® Cortex®-A8 内核进行构建，拥有与众不同的外设和经认证的工业通信堆栈/协议，如 Profinet、EtherCAT 等。这些器件均具有完整功能，可支持 ARM 生态系统以实现扩展应用处理（如果需要）。

Delfino F2837xD 双核器件还提供引脚/软件兼容型可扩展衍生功能，以满足不断变化的性能范围和价位。这种可扩展的平台使设计人员能够利用现有的软件和硬件开发成果，创造出从用于工厂自动化的高端伺服驱动到面向工业泵的交流逆变器的众多产品系列。

**结论** 凭借 Delfino F2837xD MCU，TI 实现了工业驱动设计的重新定义。Delfino F2837xD MCU 架构关注性能、集成、简易性和透明性，使开发人员能够实现具有下一代功能的可靠控制系统。其基于硬件的先进引擎和高集成度实现了以较低的价格和较小的系统尺寸提供较高的性能。开发人员还可以利用未来单核衍生产品，提供引脚/软件兼容型平台，实现不断变化的性能范围，从而加快产品上市速度。单核选项允许设计人员以优化的成本享用 F2837xD 平台的诸多功能。

使用 TI 提供的 F28377D 实验板套件 (TMDXDOCK28377D) 中的工具立即开始评估和开发。

此套件具有以下特性：

- 180 引脚 controlCARD 接口
- 所有关键信号均通过连接器接口传送
- 可通过 TMSADAP180TO100 适配器用于现有的 100 引脚 controlCARD EVM 中
- 内置隔离式 xds100v2 JTAG 仿真器
- 用于外部 JTAG 仿真器的选件
- 通过 USB 进行 UART 连接
- USB 主机/设备
- ADC 钳位



**Delfino F28377D controlCARD  
TMDXCNC28377D - \$159**



**F28377D controlCARD TMDXCNC28377D - \$159**

**Delfino F28377D Experimenter's Kit  
TMDXDOCK28377D - \$219**

**Important Notice:** The products and services of Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries described herein are sold subject to TI's standard terms and conditions of sale. Customers are advised to obtain the most current and complete information about TI products and services before placing orders. TI assumes no liability for applications assistance, customer's applications or product designs, software performance, or infringement of patents. The publication of information regarding any other company's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

**D012014**

The platform bar, C2000, Delfino and Sitara are trademarks of Texas Instruments.  
All other trademarks are the property of their respective owners.

## 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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司