

# 系统级 ESD 电路保护设计考虑因素

作者: Roger Liang,  
德州仪器 (TI) 系统工程师

## 引言

随着技术的发展,移动电子设备已成为我们生活和文化的的重要组成部分。平板电脑和智能手机触摸技术的应用,让我们能够与这些设备进行更多的互动。它构成了一个完整的静电放电 (ESD) 危险环境,即人体皮肤对设备产生的静电放电。例如,在使用消费类电子设备时,在用户手指和平板电脑 USB 或者 HDMI 接口之间会发生 ESD,从而对平板电脑产生不可逆的损坏,例如:峰值待机电流或者永久性系统失效。

本文将为您解释系统级 ESD 现象和器件级 ESD 现象之间的差异,并向您介绍一些提供 ESD 事件保护的系统级设计方法。

## 系统级ESD保护与器件级ESD保护的对比

IC 的 ESD 损坏可发生在任何时候,从装配到板级焊接,再到终端用户人机互动。ESD 相关损坏最早可追溯到半导体发展之初,但在 20 世纪 70 年代微芯片和薄栅氧化 FET 应用于高集成 IC 以后,它才成为一个普遍的问题。所有 IC 都有一些嵌入式器件级 ESD 结构,用于在制造阶段保护 IC 免受 ESD 事件的损坏。这些事件可由三个不同的器件级模型进行模拟:人体模型 (HBM)、机器模型 (MM) 和带电器件模型 (CDM)。HBM 用于模拟用户操作引起的 ESD 事件,MM 用于模拟自动操作引起的 ESD 事件,而 CDM 则模拟产品充电/放电所引起的 ESD 事件。这些模型都用于制造环境下的测试。在这种环境下,装配、最终测试和板级焊接工作均在受控 ESD 环境下完成,从而减小暴露器件所承受的 ESD 应力。在制造环境下,IC 一般仅能承受 2-kV HBM 的 ESD

电击,而最近出台的小型器件静电规定更是低至 500V。

尽管在厂房受控 ESD 环境下器件级模型通常已足够,但在系统级测试中它们却差得很远。在终端用户环境下,电压和电流的ESD电击强度要高得多。因此,工业环境使用另一种方法进行系统级 ESD 测试,其由 IEC 61000-4-2 标准定义。器件级 HBM、MM和CDM 测试的目的都是保证 IC 在制造过程中不受损坏;IEC 61000-4-2规定的系统级测试用于模拟现实世界中的终端用户ESD事件。

IEC 规定了两种系统级测试:接触放电和非接触放电。使用接触放电方法时,测试模拟器电极与受测器件 (DUT) 保持接触。非接触放电时,模拟器的带电电极靠近 DUT,同 DUT 之间产生的火花促使放电。

表 1 列出了 IEC 61000-4-2 标准规定的每种方法的测试级别范围。请注意,两种方法的每种测试级别的放电强度并不相同。我们通常在4级(每种方法的最高官方标称级别)以上对应力水平进行逐级测试,直到发生故障点为止。

表 1 接触放电和非接触放电方法的测试电平

接触式 放电电平	测试电压 (±kV)	非接触式 放电电平	测试电压 (±kV)
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15

表 2 器件级模型与 IEC 系统级模型比较

	HUMAN-BODY MODEL (HBM)	MACHINE MODEL (MM)	CHARGED-DEVICE MODEL (CDM)	IEC 61000-4-2 MODEL
Definition	Human body discharging accumulated static	Robotic arm discharging accumulated static	Charged device being grounded	Real-world ESD events
Test Levels (V)	500 to 2000	100 to 200	250 to 2000	2000 to 15000
Pulse Width (ns)	~150	~80	~1	~150
Peak Current at Applied 2 kV ( $A_{PK}$ )	1.33	—	~5	7.5
Rise Time	25 ns	—	< 400 ps	< 1 ns
Number of Voltage Strikes	2	2	2	20

器件级模型和系统级模型有一些明显的区别，表 2 列出了这些区别。表 2 中最后三个参数（电流、上升时间和电击次数）需特别注意：

- 电流差对于 ESD 敏感型器件是否能够承受一次 ESD 事件至关重要。由于强电流可引起结点损坏和栅氧化损坏，8-kV HBM 保护芯片（峰值电流 5.33A）可能会因 2-kV IEC 模型电击（峰值电流 7.5A）而损坏。因此，系统设计人员不能把 HBM 额定值同 IEC 模型额定值混淆，这一点极为重要。
- 另一个差异存在于电压尖峰上升时间。HBM 的规定上升时间为 25ns。IEC 模型脉冲上升时间小于 1ns，其在最初 3ns 消耗掉大部分能量。如果 HBM 额定的器件需 25ns 来做出响应，则在其保护电路激活以前器件就已被损坏。
- 两种模型在测试期间所用的电击次数不同。HBM 仅要求测试一次正电击和一次负电击，而 IEC 模型却要求 10 次正电击和 10 次负电击。可能出现的情况是，器件能够承受第一次电击，但由于初次电击带来的损坏仍然存在，其会在后续电击中失效。图 1 显示了 CDM、HBM 和 IEC 模型的 ESD 波形举例。很明显，相比所有器件级模型的脉冲，IEC 模型的脉冲携带了更多的能量。

图 1 器件级和 IEC 模型的 ESD 波形

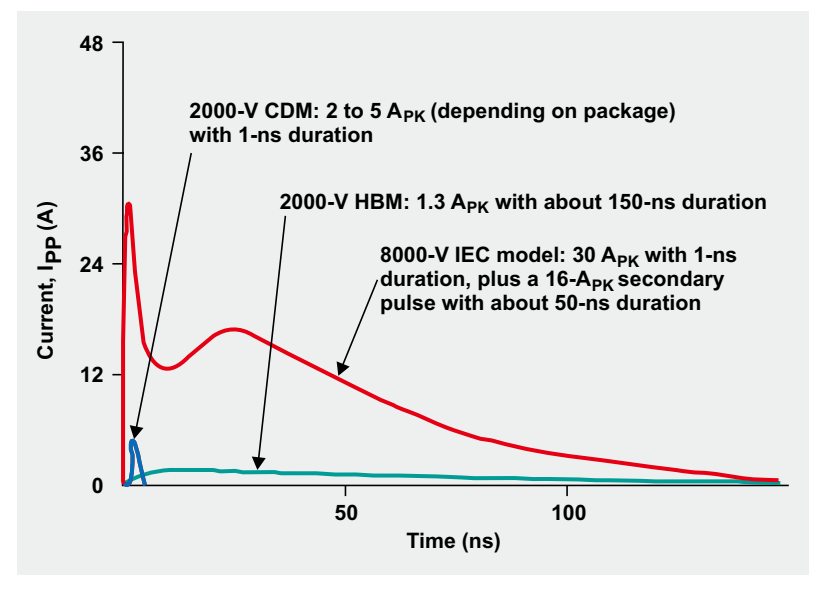
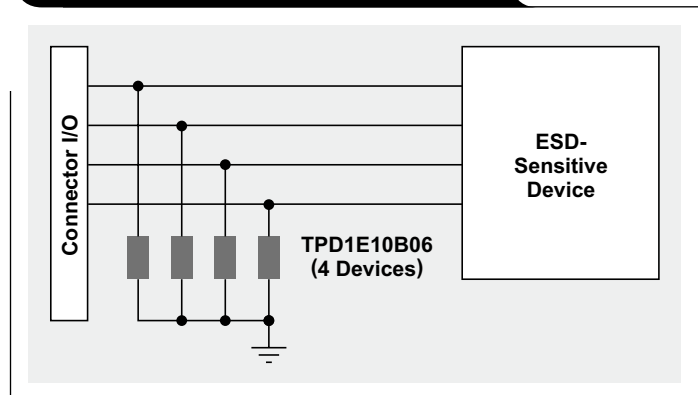


图 2 系统级 TVS 布局



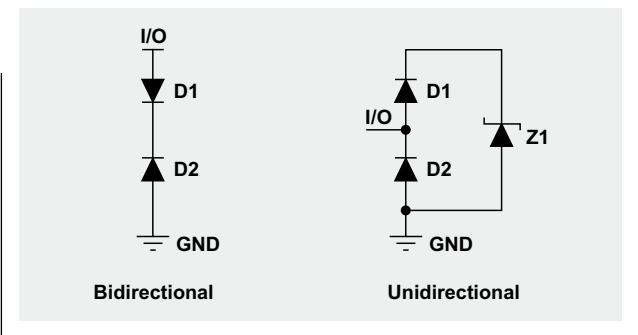
### TVS 如何保护系统免受 ESD 事件的损害

与 ESD 保护集成结构不同，IEC 61000-4-2 标准规定的模型通常会使用离散式独立瞬态电压抑制二极管，也即瞬态电压抑制器 (TVS)。相比电源管理或者微控制

器单元中集成的 ESD 保护结构，独立 TVS 成本更低，并且可以靠近系统 I/O 连接器放置，如图 2 所示。

立即沿这条通路接地。在单向 TVS 情况下，只要 D2 和 Z1 都不进入其击穿区域，则电压信号会在接地电压以上摆动。当正 ESD 电击击中 I/O 线路时，D1 变为正向偏置，而 Z1 先于 D2 进入其击穿区域；通过 D1 和 Z1 形成一条接地通路，从而让 ESD 能量得到耗散。当发生负 ESD 事件时，D2 变为正向偏置，ESD 能量通过 D2 接地通路得到耗散。由于 D1 和 D2 尺寸可以更小、寄生电容更少，单向二极管可用于许多高速应用；D1 和 D2 可以“隐藏”更大的齐纳二极管 Z1（大尺寸的原因是处理击穿区域更多的电流）。

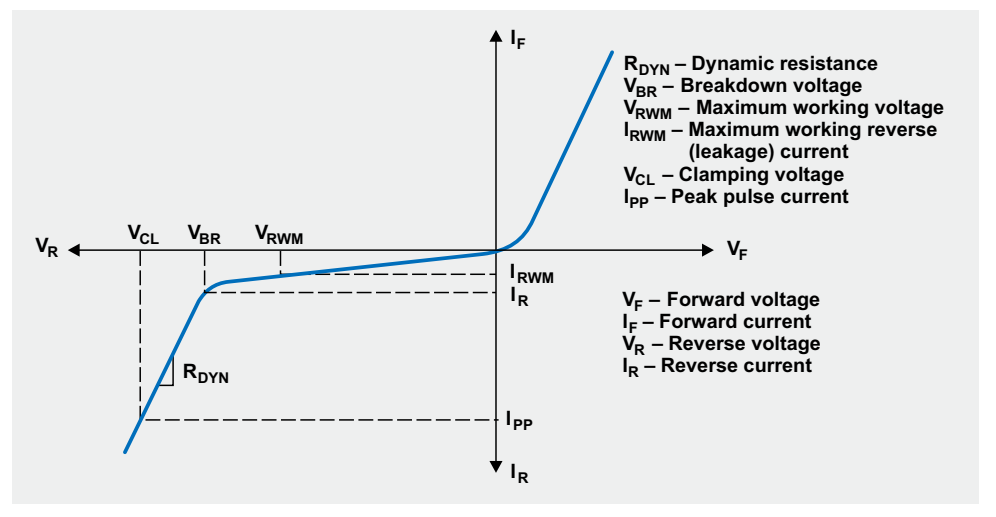
图 3 双向和单向 TVS



### 系统级 ESD 保护的关键器件参数

图 4 显示了 TVS 二极管电流与电压特性的对比情况。尽管 TVS 是一种简单的结构，但是在系统级 ESD 保护设计过程中仍然需要注意几个重要的参数。这些参数包括击穿电压  $V_{BR}$ 、动态电阻  $R_{DYN}$ 、钳位电压  $V_{CL}$  和电容。

图 4 TVS 二极管电流与电压的关系



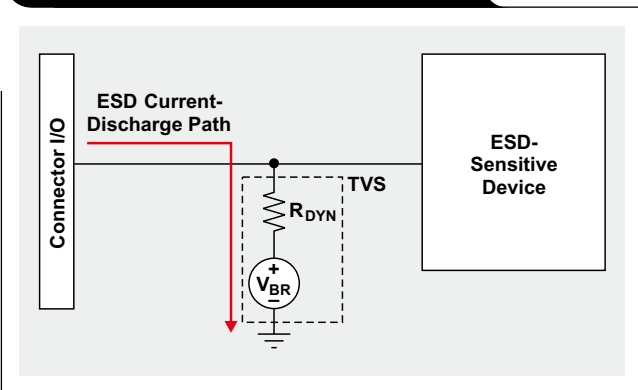
### 击穿电压

正确选择 TVS 的第一步是研究击穿电压 ( $V_{BR}$ )。例如，如果受保护 I/O 线路的最大工作电压  $V_{RWM}$  为 5V，则在达到该最大电压以前 TVS 不应进入其击穿区域。通常，TVS 产品说明书会包括具体漏电流的  $V_{RWM}$ ，它让我们能够更加容易地选择正确的 TVS。否则，我们可以选择一个  $V_{BR(min)}$  大于受保护 I/O 线路  $V_{RWM}$  几伏的 TVS。

### 动态电阻

ESD 是一种极速事件，也就是几纳秒的事情。在如此短的时间内，TVS 传导接地通路不会立即建立起来，并且在通路中存在一定的电阻。这种电阻被称作动态电阻 ( $R_{DYN}$ )，如图 5 所示。

图 5 ESD 电流放电通路



理想情况下,  $R_{DYN}$  应为零, 这样 I/O 线路电压才能尽可能地接近  $V_{BR}$ ; 但是, 这是不可能的事情。  $R_{DYN}$  的最新工业标准值为  $1\ \Omega$  或者  $1\ \Omega$  以下。利用传输线路脉冲测量技术可以得到  $R_{DYN}$ 。使用这种技术时, 通过 TVS 释放电压, 然后测量相应的电流。在得到不同电压的许多数据点以后, 便可以绘制出如图6一样的 IV 曲线, 而斜线便为  $R_{DYN}$ 。图 6 显示了 TPD1E10B06 的  $R_{DYN}$ , 其典型值为  $\sim 0.3\ \Omega$ 。

### 钳位电压

由于ESD是一种极速瞬态事件, I/O 线路的电压不能立即得到箝制。如图 7 所示, 根据 IEC 61000-4-2 标准, 数千伏电压被箝制为数十伏。如方程式 1 所示,  $R_{DYN}$  越小, 钳位性能也就越好: 其中,  $I_{PP}$  为 ESD 事件期间的峰值脉冲电流, 而  $I_{parasitic}$  为通过 TVS 接地来自连接器的线路寄生电感。

$$V_{CL} \approx V_{BR} + I_{PP} \times R_{DYN} + I_{Parasitic} \times \frac{dI_{PP}}{dt}, \quad (1)$$

把钳位电压波形下面的区域想像成能量。钳位性能越好, 受保护ESD敏感型器件在ESD事件中受到损坏的机率也就越小。由于钳位电压很小, 一些TVS可承受IEC模型的8kV接触式放电, 但是“受保护”器件却被损坏了。

### 电容

在正常工作状态下, TVS为一个开路, 并具有寄生电容分流接地。设计人员应在信号链带宽预算中考虑到这种电容。

### 结论

由于 IC 工艺技术节点变得越来越小, 它也越来越容易受到 ESD 损坏的影响, 不管是在制造过程还是在终端用户使用环境下。器件级 ESD 保护并不足以在系统层面为 IC 提供保护。我们应在系统级设计中使用独立 TVS。在选择某个 TVS 时, 设计人员应注意一些重要参数, 例如:  $V_{BR}$ 、 $R_{DYN}$ 、 $V_{CL}$  和电容等。

### 参考文献

如欲了解本文更多详情, 敬请访问 [www.ti.com/lit/litnumber](http://www.ti.com/lit/litnumber) (用下面列出的材料编号替换地址中的“litnumber”), 下载 Acrobat® Reader® 版文件。

文件名称

TI 文献编号

1、《系统级ESD/EMI保护设计指南》

SSZB130B

### 相关网站

[www.ti.com/esd](http://www.ti.com/esd)[www.ti.com.cn/product/cn/TPD1E10B06](http://www.ti.com.cn/product/cn/TPD1E10B06)

图 6 TPD1E10B06 的 IV 特性

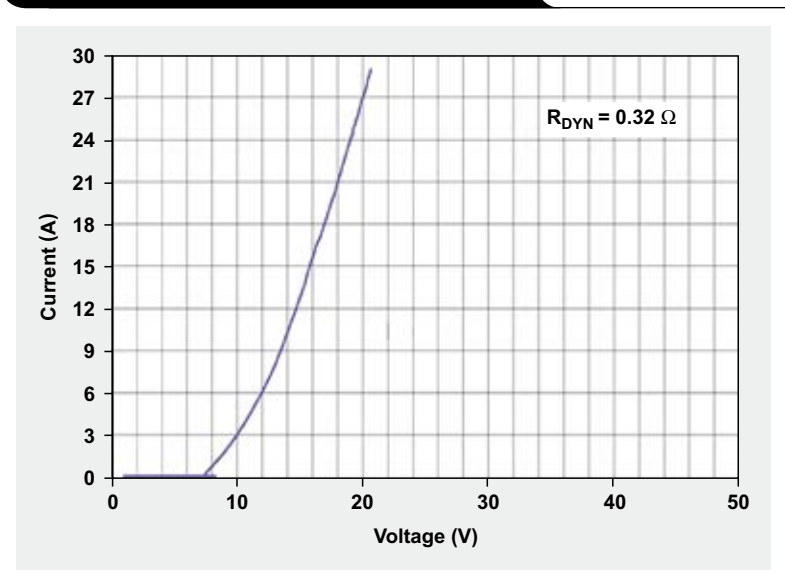
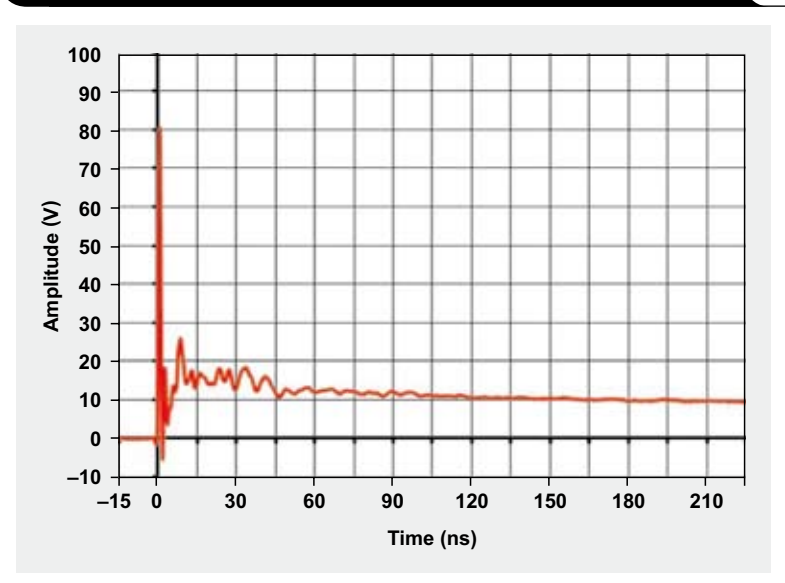


图 7 8kV 接触放电的 ESD 事件钳位



# TI Worldwide Technical Support

---

## Internet

### TI Semiconductor Product Information Center Home Page

support.ti.com

### TI E2E™ Community Home Page

e2e.ti.com

## Product Information Centers

<b>Americas</b>	Phone	+1(972) 644-5580
<b>Brazil</b>	Phone	0800-891-2616
<b>Mexico</b>	Phone	0800-670-7544
	Fax	+1(972) 927-6377
	Internet/Email	support.ti.com/sc/pic/americas.htm

### Europe, Middle East, and Africa

Phone	
European Free Call	00800-ASK-TEXAS (00800 275 83927)
International	+49 (0) 8161 80 2121
Russian Support	+7 (4) 95 98 10 701

**Note:** The European Free Call (Toll Free) number is not active in all countries. If you have technical difficulty calling the free call number, please use the international number above.

Fax	+ (49) (0) 8161 80 2045
Internet	www.ti.com/asktexas
Direct Email	asktexas@ti.com

### Japan

Phone	Domestic	0120-92-3326
Fax	International	+81-3-3344-5317
	Domestic	0120-81-0036
Internet/Email	International	support.ti.com/sc/pic/japan.htm
	Domestic	www.tij.co.jp/pic

### Asia

Phone	
International	+91-80-41381665
Domestic	<u>Toll-Free Number</u>
<b>Note:</b> Toll-free numbers do not support mobile and IP phones.	
Australia	1-800-999-084
China	800-820-8682
Hong Kong	800-96-5941
India	1-800-425-7888
Indonesia	001-803-8861-1006
Korea	080-551-2804
Malaysia	1-800-80-3973
New Zealand	0800-446-934
Philippines	1-800-765-7404
Singapore	800-886-1028
Taiwan	0800-006800
Thailand	001-800-886-0010
Fax	+8621-23073686
Email	tiasia@ti.com or ti-china@ti.com
Internet	support.ti.com/sc/pic/asia.htm

**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.

A011012

E2E is a trademark of Texas Instruments. Acrobat and Reader are registered trademarks of Adobe Systems Incorporated. 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 © 2012 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司