

如何为图腾柱 PFC 减少 AC 过零点上的电流尖峰

作者: Bosheng Sun

应用工程师, 精密型模拟产品

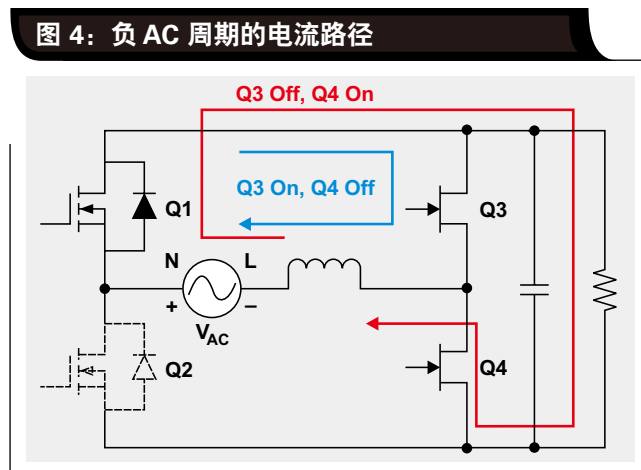
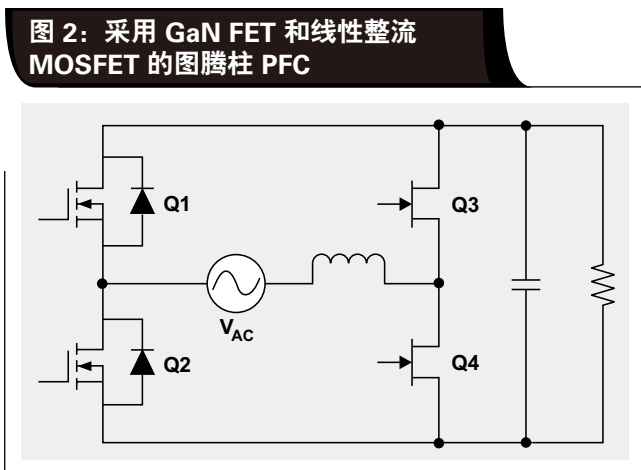
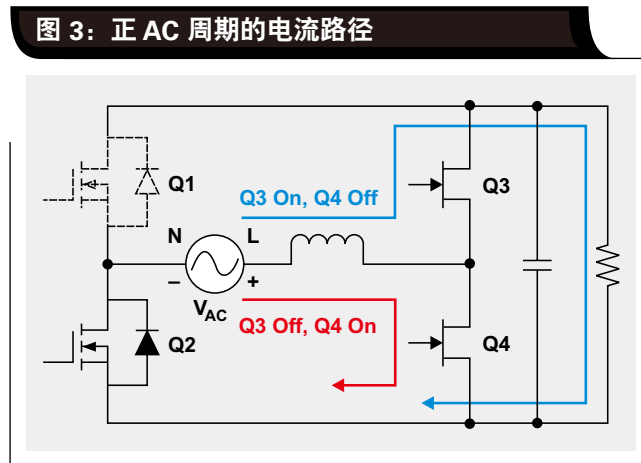
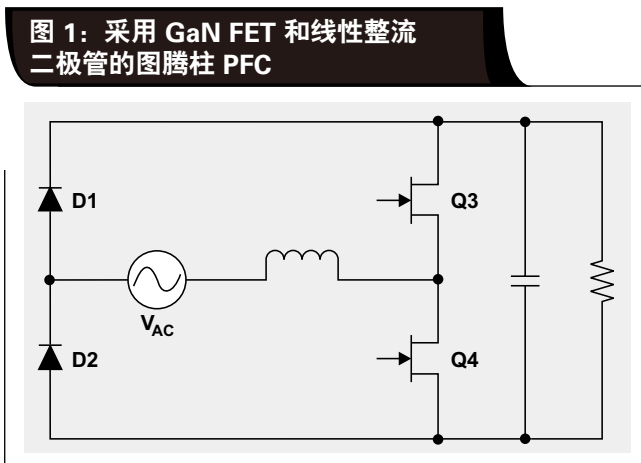
引言

功率因数校正 (PFC) 在具有 75 W 或更大输入功率的 AC/DC 电源中得到了广泛的使用。PFC 强制输入电流跟随输入电压, 以使任何电负载都看似一个电阻器。在所有不同的 PFC 拓扑中, 图腾柱 PFC^[1, 2] 最近受到了更多的关注, 因为其所用的组件数量最少, 具有最少的传导损耗, 而且拥有最高的效率。由于 MOSFET 的体二极管反向恢复缓慢, 因此图腾柱 PFC 通常不能工作于连续导通模式 (CCM)。然而, 随着氮化镓 (GaN) FET 的出现, 其无二极管的结构使得 CCM 图腾柱 PFC 成为可能。图 1 是一种图腾柱 PFC 结构。

在图 1 中, Q3 和 Q4 是 GaN FET。视 V_{AC} 极性的不同,

它们交替地起一个 PFC 有源开关或同步开关的作用。为了进一步改善效率, 用普通的 MOSFET 取代了 D1 和 D2, 因为 MOSFET 的传导损耗低于二极管。经过改进的结构示于图 2, 其中的 Q1 和 Q2 是普通的 MOSFET, 并以 AC 频率进行驱动。

图腾柱 PFC 的电流流动路径示于图 3 和图 4。在正 AC 周期中, Q4 是有源开关, 而 Q3 起一个同步 FET 的作用。用于 Q4 和 Q3 的驱动信号是互补的: Q4 由 D (控制环路的占空比) 控制, Q3 则由 $1 - D$ 控制。当 Q4 接通时, 电流通过 AC 线路、电感器、Q4、Q2、然后返回至 AC 中性线。当 Q4 关断时, Q3 接通, 电流穿过 AC 线路、电感器、Q3、负载、Q2、然后回到 AC 中性线。Q2 在整个正 AC 半周期中处于导通, 而 Q1 保持断开状态。



在负 AC 周期中，Q4 和 Q3 的功能交换：Q3 变成了有源开关，而 Q4 则充当一个同步 FET。用于 Q4 和 Q3 的驱动信号仍然是互补的，但是 Q3 现在由 D 控制，而 Q4 由 1 - D 控制。当 Q3 接通时，电流通过 AC 中性线、Q1、Q3、电感器、然后回到 AC 线路。当 Q3 关断时，Q4 接通，电流穿过 AC 中性线、Q1、负载、Q4、电感器、并随后返回 AC 线路。Q1 在整个负 AC 半周期中处于导通，而 Q2 则保持断开状态。

图腾柱 PFC 中的挑战之一是输入电流在 V_{AC} 过零点上具有大的尖峰。此问题是图腾柱 PFC 所固有的，而且非常复杂。事实上，这些尖峰包含了正尖峰和负尖峰，而且导致它们出现的原因不同。会引起电流尖峰的情形有几种。

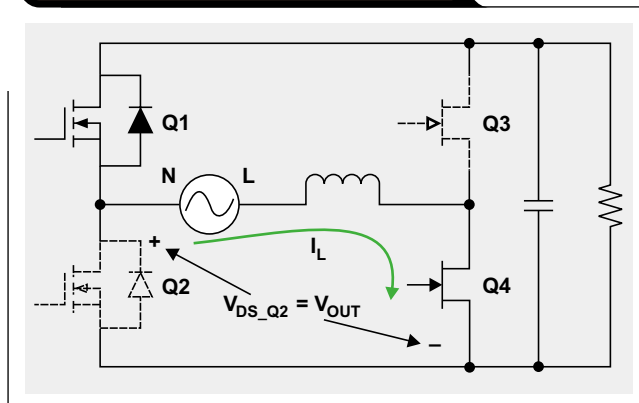
情形一

如图 5 中所示，当操作模式在 AC 过零点上从负周期变至正周期时，开关 Q3 的占空比突然从几乎 100% 变至 0。开关 Q4 的占空比则骤然从 0 变为几乎 100%。由于 Q1 体二极管的缓慢反向恢复和 Q2 的大 C_{OSS} ，因此 Q2 的 V_{DS} 电压仍然等于 V_{OUT} (400 V)。因为该高电压在 Q4 接通时被加至电感器，因此产生了一个正电流尖峰。参考文献 3 中对此情形进行了分析，并提出了一种旨在解决该问题的 Q4 软起动方法。

情形二

然而，即使利用了 Q4 的软接通，仍然存在过多的电流尖峰。这是因为 V_{AC} 在过零点之后是非常低的，故而并不足以让电感器电流积累起来。另一方面，当 Q3 利用 $1 - D$ 接通时，即使其占空比不高，施加至电感器的电压也是很高的 ($400 V + V_{OUT}$)。最终形成的流过电感器的高反向电流引起了一个负电流尖峰。

图 5: 由 Q4 的突然接通所引起的电流尖峰



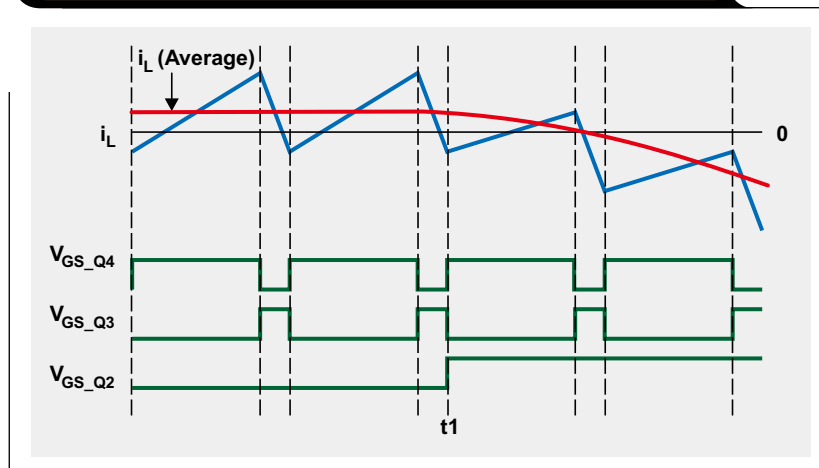
情形三

Q2 接通的定时也是至关重要的。如果 Q2 在 Q4 软起动之前接通以及假如 Q1 的体二极管的恢复不是足够快，就会发生贯通。

情形四

倘若 Q4 接通过迟，则可产生一个负电流尖峰（图 6）。当 Q3 导通而 Q2 断开时，高的 V_{BUS} 电压产生一个反向电感器电流。该反向电流首先关断 Q2 体二极管，然后开始对 Q2 的 C_{OSS} 进行充电，而且 Q2 的 V_{DS} 积累到一个高电压。接着，当 Q4 接通时，施加至电感器的高电压 ($V_{DS} + V_{IN}$) 在电感器中产生高的上升电流。因此，电感器的上升和下降电流都是大幅值的，这实现了一种把平均电流保持在一个小正值的平衡。现在，如果 Q2 在 t_1 时点突然接通，则 Q2 的 V_{DS} 将被箝位至零。当 Q4 接通时，仅 V_{IN} 被加至电感器。由于 V_{IN} 非常之小，不足以让电感器把电流积累至足够高的水平，所以电感器的上升电流变得非常小。由于下降电流仍然具有大的幅值，故而打破了平衡并产生一个大的负电流尖峰。

图 6: 由 Q2 接通过迟而引起的电流尖峰



减少 AC 过零点上的电流尖峰

本文提供了一种用于解决电流尖峰问题的新型控制方法。在此方法中，Q1、Q2、Q3 和 Q4 以一种特殊的顺序接通，且各执行一种软起动机理。图 7 示出了用于这种新方法的驱动信号。

在该解决方案中，当 V_{AC} 在 AC 过零点之后从一个负周期变至正周期时，Q4 首先以一个非常小的脉冲宽度接通。该脉冲宽度随后逐渐增加至 D （由控制环路产生的占空比）。通过在 Q4 上执行软起动，Q1 完全地反向恢复。现在，Q2 的电压 V_{DS} 逐渐降至地电位，从而消除了由情形一所引起的正尖峰。

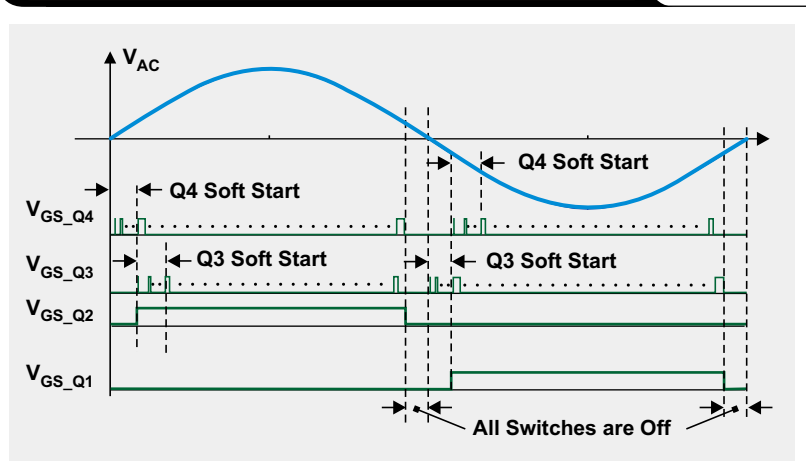
一旦 Q4 软起动完成，同步 FET Q3 以微小的脉冲宽度起动一个软接通并逐渐地增加，直到脉冲宽度达到 $1 - D$ 为止。这消除了由情形二所引起的负电流尖峰。

与此同时，当 Q4 软起动结束且 Q3 软起动开始时，低频开关 Q2 接通。由于 Q1 的体二极管已被恢复，因此不存在情形三中提到的那种贯通问题。

另外，由于 Q3 以非常小的脉冲宽度起动，因此不足以让电感器建立一个足够高的负电流尖峰，从而消除了情形四中引起的电流尖峰。

最后，过零点检测可能由于噪声而被误触发。为安全起见，所有的开关在一个正周期结束时都被断开。这留下了一个小的死区，以避免输入 AC 遭受短路的损坏。请注意，在该死区里应冻结控制环路。否则，当 PFC 重新

图 7：推荐方法的栅极信号定时



接通时，该环路中的积分器累积将产生一个大的 PWM 脉冲，这会起一个大的电流尖峰。

相同的工作原理适用于从一个正周期至一个负周期的 AC 转换。

实验结果

前面介绍的方法是在一个利用德州仪器的 UCD3138 数字控制器进行控制的 1 kW 图腾柱 PFC 上验证的。图 8 是采用传统控制方法时的电流波形，而图 9 则示出了运用推荐方法时的电流波形。两者是在相同的条件进行测试的。注意一下使用推荐方法如何使电流尖峰显著地减少，以及电流波形在 AC 过零点上变得平滑了许多。因此，总谐波失真 (THD) 从 8.1% 降至 3.7%。

图 8：采用传统控制方法时的电流波形

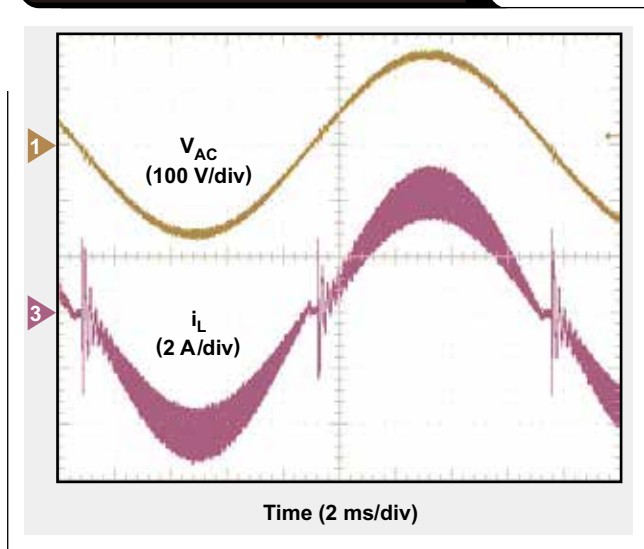
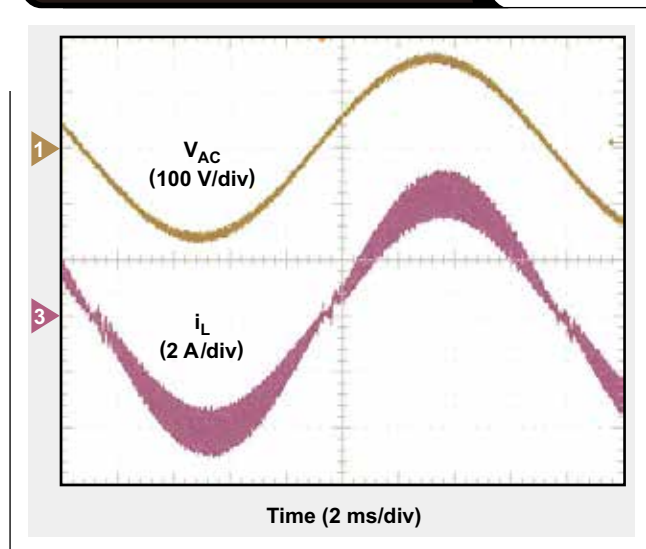


图 9：采用推荐控制方法时的电流波形



结论

虽然图腾柱 PFC 正吸引着人们越来越多的关注，但是一些设计难题却阻止了它的广泛应用普及。图腾柱 PFC 中的一个固有问题是在 AC 过零点上的电流尖峰。电流尖峰的诱因是很复杂的：接通顺序、MOSFET 体二极管的缓慢反向恢复、MOSFET 的大 C_{OSS} 、具有几乎 100% 占空比的有源 FET 的突然接通、同步 FET 的骤然接通，等等。所有这些情形都会导致尖峰。通过以一种特殊的顺序接通开关，并在主 FET 和同步 FET 上均执行一种软起动机理，就能够显著地减少电流尖峰并大幅度地改善 THD。

参考文献

1. 作者：J. C. Salmon，《用于依靠单相和三相 AC 电源运作并采用单个或分离型 DC 轨电压输出的 PWM 升压整流器的电路拓扑》，Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., 1995 年 3 月，pp. 473~479。
2. 作者：L. Huber、Y. Jang 和 M. Jovanovic，《无桥 PFC 升压整流器的性能评估》，IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 23, No. 3, 2008 年 5 月。
3. 作者：B. Su、J. Zhang 和 Z. Lu，《采用简单的零电流检测和工作于 DCM/CCM 之边界的全范围 ZVS 的图腾柱升压型无桥 PFC 整流器》，IEEE Trans. Power Electron., vol.26, no.2, 2011 年 2 月。
4. 作者：Z. Ye、A. Agular、Y. Bolurian 和 B. Daugherty，《基于 GaN FET 的 CCM 图腾柱无桥 PFC》，第 23 届 TI 电源设计研讨会，2014 年。

相关网站

产品信息：

UCD3138

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 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(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/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