

耦合电感 SEPIC 转换器的优势

作者: John Betten, TI 应用工程师

单端初级电感转换器 (SEPIC) 能够通过一个大于或者小于调节输出电压的输入电压工作。除能够起到一个降压及升压转换器的作用以外, SEPIC 还具有最少的有源组件、一个简易控制器和钳位开关波形, 从而提供低噪声运行。看是否使用两个磁绕组, 是我们识别 SEPIC 的一般方法。这些绕组可绕于共用铁芯上, 其与耦合双绕组电感的情况一样, 或者它们也可以是两个非耦合电感的单独绕组。设计人员通常不确定哪一种方法最佳, 以及两种方法之间是否存在实际差异。本文对每种方法进行研究, 并讨论每种方法对实际 SEPIC 设计产生的影响。

电路运行

图 1 显示了耦合电感的基本 SEPIC。当 FET (Q1) 开启时, 输入电压施加于初级绕组。由于绕组比为 1:1, 因此次级绕组也被施加了一个与输入电压相等的电压; 但是, 由于绕组的极性, 整流器 (D1) 的阳极被拉负, 并被反向偏置。整流器偏颇关闭, 要求输出电容在这种“导通”时间期间支持负载, 从而强迫 AC 电容 (C_{AC}) 充电至输入电压。Q1 开启时, 两个绕组的电流为 Q1 到接地, 而次级电流流经 AC 电容。“导通”时间期间总 FET 电流为输入电流和输出次级电流的和。

FET 关闭时, 绕组的电压反向极性, 以维持电流。整流器导电向输出端提供电流时, 次级绕组电压现在被钳位至输出电压。通过变压器作用, 它对初级绕组的输出电压进行钳位。FET 的漏极电压被钳位至输入电压加输出电压。FET“关闭”时间期间, 两个绕组的电流流经 D1 至输出端, 而初级电流则流经 AC 电容。

伏-微秒平衡

耦合电感由两个非耦合电感代替时, 电路运行情况类似。要让电路正确运行, 必须在每个磁芯之间维持伏-微秒平衡。也就是说, 对于两个非耦合电感而言, 在 FET“导通”和“关闭”时间期间, 每个电感电压和时间的积必须大小相等, 而极性相反。通过代数方法表明, 非耦合电感的 AC 电容电压也被充电至输入电压。详情, 请参见“附录”。在 FET“关闭”时间期间, 输出端电感被钳位至输出电压, 其与耦合电感的次级绕组一样。在 FET“导通”时间期间, AC 电容在电感施加一个与输入电压相等但极性相反的电势。每间隔时间, 对电感定义电压进行钳位, 这样伏-微秒平衡便决定了占空比 (D) 的大小。其在连续导通模式 (CCM) 运行时, 可简单表示为:

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{OUT} + V_{IN}}$$

FET 导通时, 施加于输入端电感的电压等于输入电压。FET 关闭时, 伏-微秒平衡通过钳位其 V_{OUT} 来维持。记住, FET 导通时, 输入电压施加于两个电感; FET 关闭时, 输出电压施加于两个电感。两个非耦合电感 SEPIC 的电压和电流波形, 与耦合电感版本的情况非常类似, 以至于很难分辨它们。

两个还是一个?

如果 SEPIC 类型之间确实存在少许的电路运行差异的话，那么我们应该使用哪一种呢？我们通常选择使用耦合电感，是因其更少的组件数目、更佳集成度以及相对于使用两个单电感而言更低的电感要求。然而，高功率现货耦合电感有限的选择范围，成为摆在广大电源设计人员面前的一个难题。如果他们选择设计其自己的电感，则必须规定所有相关电参数，并且必须面对更长的交货时间问题。耦合电感 SEPIC 可受益于漏电感，其可降低 AC 电流损耗。¹耦合电感必须具有 1:1 的匝数比，以实施伏-微秒平衡。选择使用两个单独的非耦合电感，一般可以更广泛地选择许多现货组件。由于并不要求每个电感的电流和电感完全相等，因此可以选择使用不同的组件尺寸，从而带来更大的灵活性。

方程式 1 到 3 表明了耦合电感和非耦合电感的电感计算过程。

$$L_{\text{Coupled}} = \frac{V_{\text{IN(max)}}^2 \times d_{\text{min}}^2}{2 \times f_s \times P_{\text{OUT(min)}} \times \left(1 + d_{\text{min}} \times \frac{1 - \eta}{\eta}\right)} \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{d_{\text{min}} \times V_{\text{IN(max)}}^2 \times \eta}{2 \times f_s \times P_{\text{OUT(min)}}} \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{(1 - d_{\text{min}}) \times V_{\text{OUT}}^2}{2 \times f_s \times P_{\text{OUT(min)}}} \quad (3)$$

方程式计算得到最大输入电压和最小负载时 CCM 运行所需的最小电感。50% 占空比运行 (V_{IN} 等于 V_{OUT} 时出现) 和统一效率条件下，比较这些方程式可知，方程式 1 中耦合电感的计算值是非耦合电感计算值的两倍。由于转换器肯定会有损耗，而大多数输入电压源均有很大不同，因此这种简化了的电感泛化一般为错误的；但它通常足以应付除极端情况以外的所有情况。它一般意味着，转换器会比预期稍快一点进入非连续导通模式 (DCM) 运行，其在大多数情况下仍然可以接受。如前所述，使用非耦合电感时，正如我们通常假设的那样，无需输出端电感的值与输入端电感一样；但是为了简单起见肯定会这样做。利用 $V_{\text{OUT}}/V_{\text{IN}}$ 调节输入端电感，便可确定输出端电感值。使用更小值输出端电感的好处是，它一般尺寸更小而且成本更低。

实例设计

“表 1”所示规范为设计比较的基础。第一个设计使用一个耦合电感，而第二个则使用两个非耦合电感。

使用一个耦合电感的设计是典型的 64W 输出功率车载输入电压范围。方程式 1 表明，耦合电感要求 12 μH 的电感，以及 13 A 的组合电流额定值（基于 $I_{\text{IN}} + I_{\text{OUT}}$ ）。这种设计特别具有挑战性，因为现货电感选择范围有限。因此，我们指定并设计了 Renco 自定义电感。该电感缠绕在一个分离式线轴上以产生漏电感，旨在最小化能够引起损耗的循环 AC 电流。产生这些损耗的因为，施加在漏电感的 AC 电容纹波电压。若想实施低功耗设计，Coilcraft (MSS1278 系列) 和 Coiltronics (DRQ74/127 系列) 的耦合电感均是较好的现货产品。

就非耦合电感设计而言，33- μH Coilcraft SER2918 用于 L1，而 22- μH Coiltronics HC9 则用于 L2。它们的选择均基于绕组电阻、额定电流和尺寸。选择电感时，设计人员必须注意还要考虑铁芯和 AC 绕组损耗。这些损耗可降低电感的有效 DC 电流，但并非所有厂商都提供计算所需的全部信息。错误的计算结果，会大大增加铁芯温度，使其超出典型的 40°C 温升。它还会降低效率，并且加速过早失效现象的出现。

表 1 原型 SEPIC 电气规范

参数	规范
输入电压	8 到 32V
输出电压	16V
最大输出电流	4A
纹波	1%
最小效率（最大负载）	91%

图 2 使用耦合电感的 SEPIC (4A 时 16V)

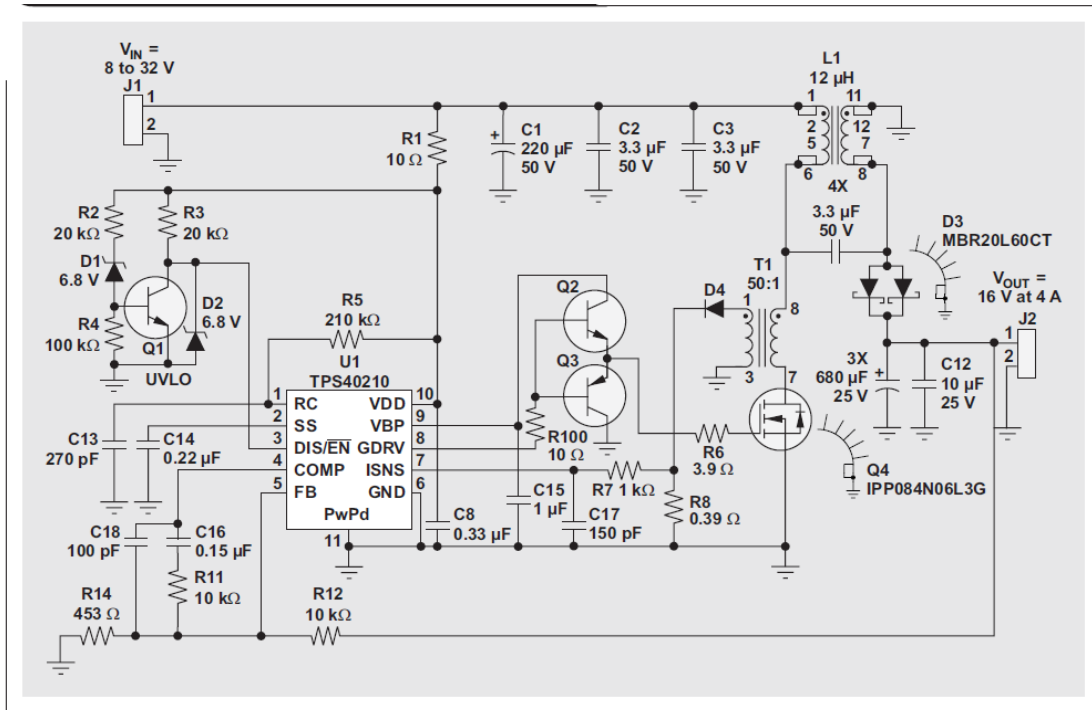
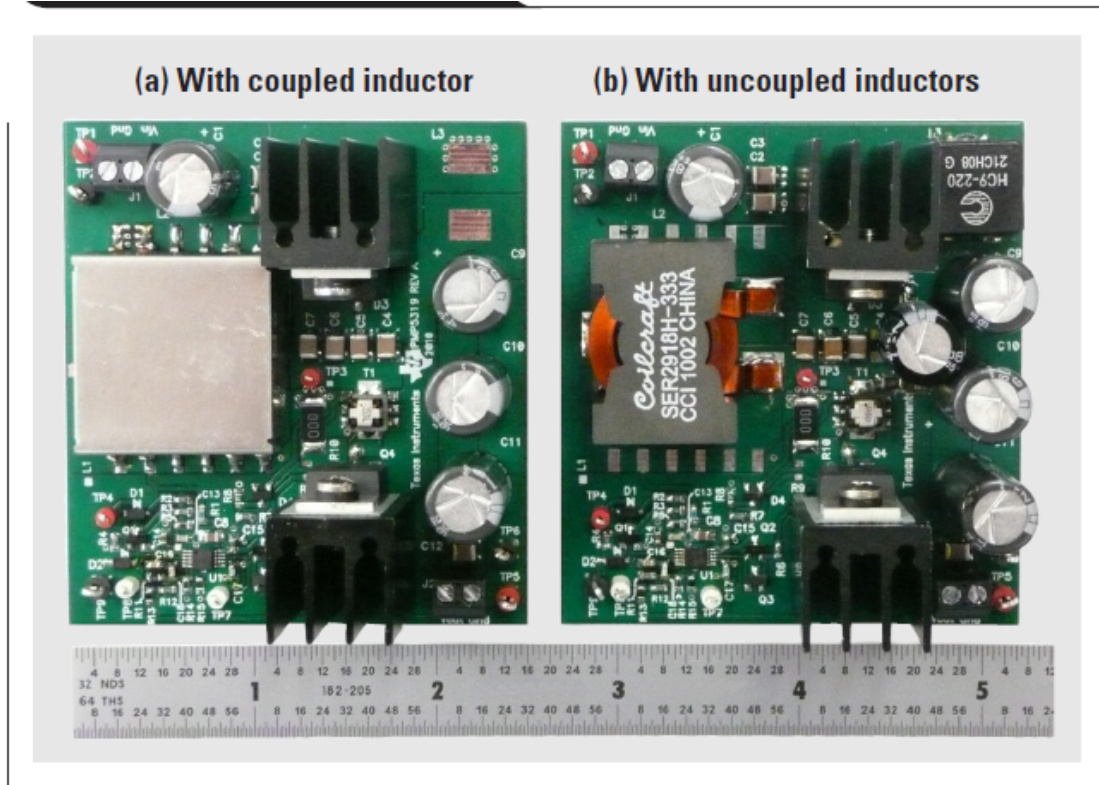


图 2 显示了使用一个耦合电感的原型 SEPIC 的示意图。若想在设计中实施非耦合电感，只需在相同 PWB 上用两个电感替换耦合电感便可。图 3 显示了两种原型电路。图 3b 中，L1 占用了耦合电感的空间，而 L2 则位于右上角。

正如预计的那样，两个电路以一种近乎完全一样的方式工作，且开关电压和电流波形实质相同。但在性能方面存在一些重要的差异。耦合电感设计的控制环路相当良性，而非耦合电感设计则在最初时候出现不稳定。环路增益测量表明，高 Q、低频谐振是罪魁祸首，其要求添加一个 R/C 阻尼滤波器与 AC 电容并联。极大简化时，谐振频率似乎约为：

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{C_{AC} \times (L1+L2)}}$$

图 3 SEPIC 原型



SEPIC 电路具有非常复杂的控制环路特性，同时由于分析结果的解释一般较为困难，因此必需使用一些数学工具来进行具体分析。添加这种 R/C 阻尼滤波器（ $220 \mu\text{F}/2\Omega$ ）会增加成本、电路面积和损耗。相比一个单耦合电感，使用两个非耦合电感会使面积增加 10%。

图 4 显示了两种电路的测量效率。我们可以看到，耦合电感设计的效率增加多达 0.5%。这可能是由于耦合电感设计的总铁芯损耗更低，因为其 DC 接线损耗实际高于使用非耦合电感的设计。L2 使用一种粉状铁芯材料，其往往具有比 L1 和自定义 Renco 耦合电感所用铁氧体材料更高的损耗。² 尽管使用了 L2 的铁氧体材料，但其会导致更大的面积。

结论

利用一个耦合电感或者两个非耦合电感，均能成功实施 SEPIC。更高的效率、更小的电路面积以及更良性的控制环路特性，这些都是使用正确缠绕的自定义耦合电感时原型硬件所带来的好处。自定义组件没有现货器件那么理想，而许多耦合电感随处可以购买到，且尺寸更小。如果产品上市时间至关重要，则非耦合电感可为设计人员带来更大的灵活性。

参考文献

1、“SEPIC 转换器受益于漏电感”，刊发时间 2010 年 5 月 27 日，作者: John Betten。
下载地址：PowerPulse.Net Design Features [Online]. Available:
[http://www.powerpulse.net/
techPaper.php?paperID=153](http://www.powerpulse.net/techPaper.php?paperID=153)

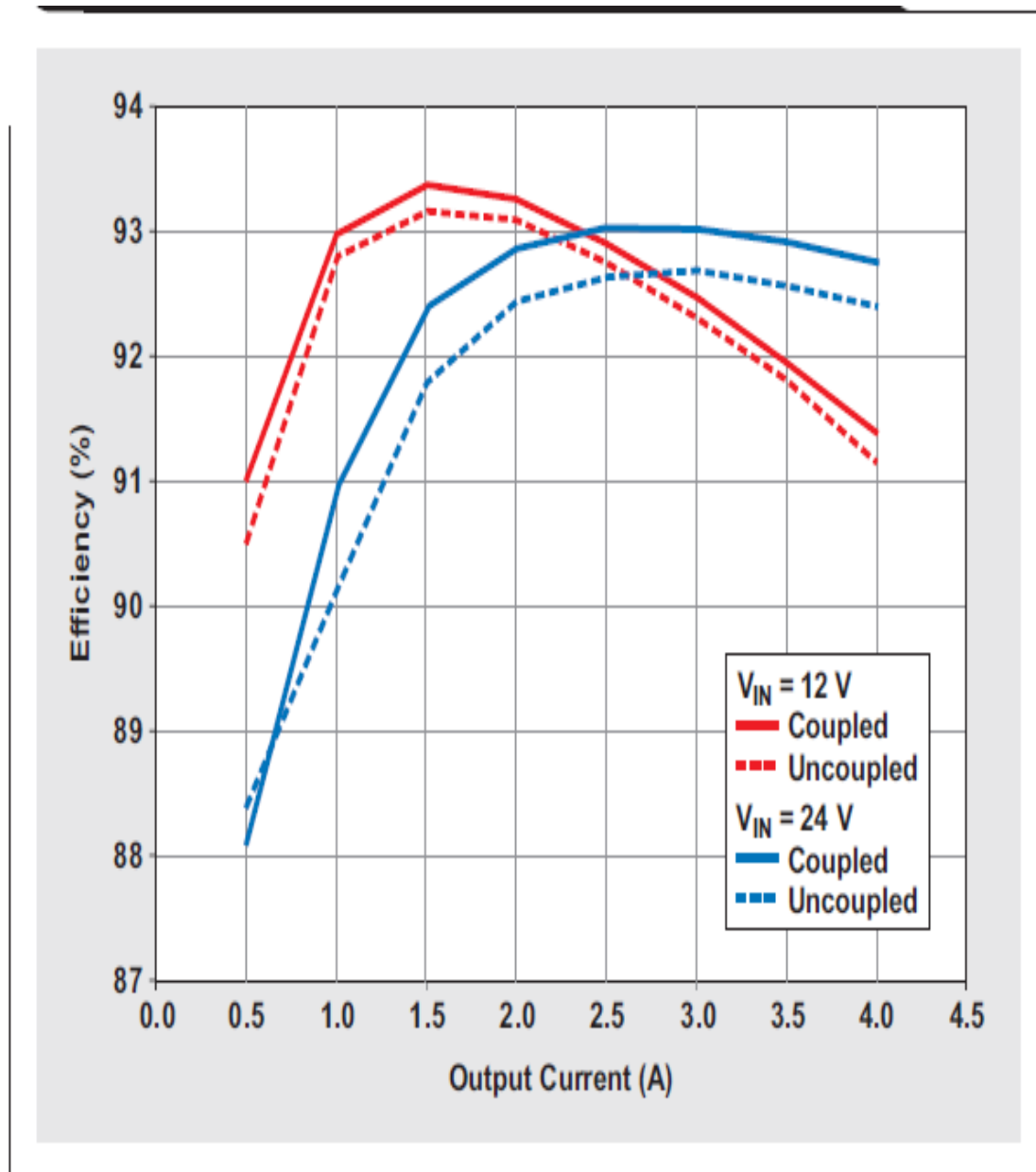
2、《电源设计小贴士：小心电感铁芯损耗起火》，刊发时间 2009 年 7 月 13 日，
作者: Robert Kollman。下载地址：EE Times Power Management DesignLine
[Online]. Available: [http://www.eetimes.com/design/power-management-design/
/4012507/Power-Tip-Don-t-get-burned-by-inductor-core-losses](http://www.eetimes.com/design/power-management-design/4012507/Power-Tip-Don-t-get-burned-by-inductor-core-losses)

相关网站:

power.ti.com

www.ti.com/sc/device/TPS40210

图 4 耦合和非耦合电感均获得了较好的效率



附录：非耦合电感 $V_{IN} = V_{Cap}$ 的代数证明过程

下列两个方程式用于平衡 L1 和 L2 的伏-微秒：

$$D \times V_{IN} = (1 - D)(V_{Cap} + V_{OUT} - V_{IN}) \quad (\text{for L1})$$

$$(1 - D) \times V_{OUT} = D \times V_{Cap} \quad (\text{for L2})$$

$$\text{or } V_{OUT} = \frac{V_{Cap} \times D}{1 - D}$$

下列数列将代入法和简化方法用于上述两个方程式，得到结果：

$$D \times V_{IN} = (1 - D) \times \left[V_{Cap} + \frac{V_{Cap} \times D}{1 - D} - V_{IN} \right]$$

$$D \times V_{IN} = (1 - D) \times V_{Cap} + V_{Cap} \times D - (1 - D) \times V_{IN}$$

$$D \times V_{IN} = (1 - D) \times V_{Cap} + V_{Cap} \times D - V_{IN} + D \times V_{IN}$$

$$V_{IN} = (1 - D) \times V_{Cap} + V_{Cap} \times D$$

$$V_{IN} = V_{Cap} - D \times V_{Cap} + V_{Cap} \times D$$

$$V_{IN} = V_{Cap}$$

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时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, 并有权随时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 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。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。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品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 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含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, 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。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 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在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

	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	http://www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	http://www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com/energy
DSP - 数字信号处理器	http://www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	http://www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	http://www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	http://www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	http://www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	http://www.ti.com.cn/microcontrollers	无线通信	www.ti.com.cn/wireless
RFID 系统	http://www.ti.com.cn/rfidsys		
RF/IF 和 ZigBee® 解决方案	www.ti.com.cn/radiofre		
	TI E2E 工程师社区		http://e2e.ti.com/cn/

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 © 2011 德州仪器 半导体技术(上海)有限公司