

# 超低 $I_O$ 器件的精确效率测量

作者: Chris Glaser, 德州仪器 (TI) 应用工程师

## 引言

尽管几乎每一名电源工程师都清楚地知道和理解效率测量的实验室装置,但在通过超低静态电流( $I_O$ )测量某个器件的效率时,还是有许多我们必须考虑到的重要细节。对于一个消耗电流小于 $1\mu A$ 的器件来说,电路的电流非常小,很难测量到。这些测量可能相当于计算得到的轻载效率,其远低于各种产品说明书的标称值,同时也低于在实际应用中所看到的情况。本文将回顾效率测量的基础,讨论超低 $I_O$ 器件轻负载效率测量过程中常见的一些错误,并说明如何克服这些错误,从而顺利地获得精确的效率测量结果。

## 效率测量基础

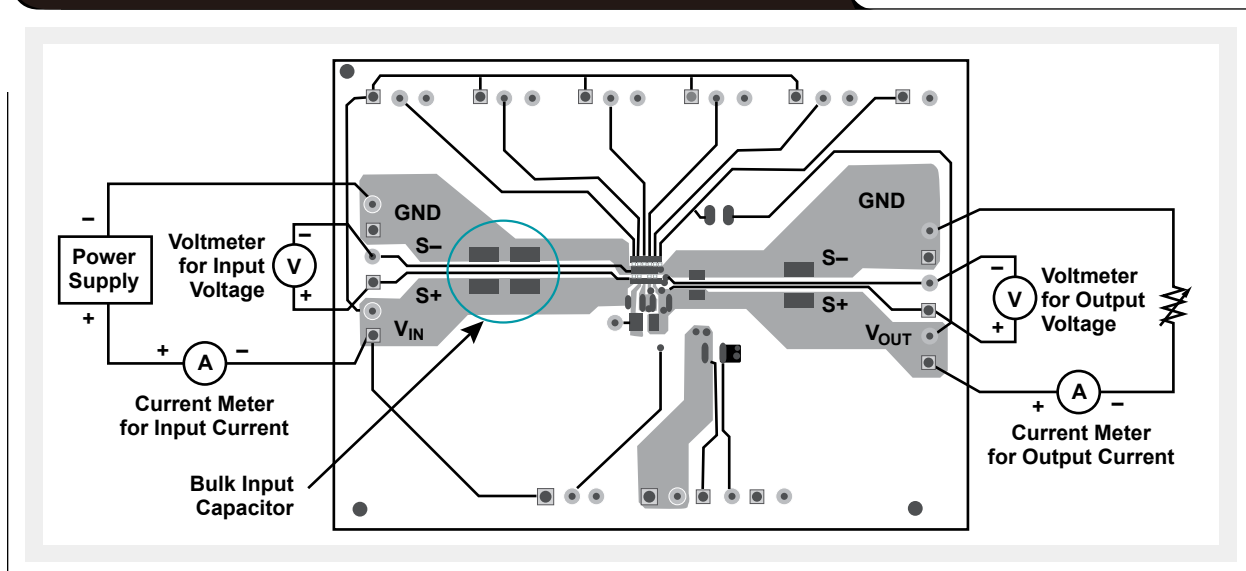
参考文献1详细说明了通过节能或者脉冲频率调制(PFM)模式精确测量某个器件的效率的最理想装置。该参考为本文涉及的话题提供了一个很好的基础,读者应首先阅读。一般而言,特别是在本文中,效率的定义如下:

$$\eta(\text{efficiency}) = \frac{\text{Power}_{\text{OUT}}}{\text{Power}_{\text{IN}}} = \frac{V_{\text{OUT}} \times I_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}} \times I_{\text{IN}}}$$

下面总结了参考文献1中的两个重点。第一点是,所有节能模式都会从输入电源吸取相对较大的电流脉冲。这些电流脉冲是来自输入的AC电流。始终工作在连续导电或者脉宽调制(PWM)模式下的器件从输入电源吸取DC电流。与PWM模式下吸取的DC电流不同,节能模式的电流脉冲在输入电流计中形成一个错误RMS电流读取值。因此,在节能模式下测量效率的正确测试装置包括输入电流计之后的充足输入电容,目的是消除PFM模式吸取的AC电流,最终给电流计呈现DC电流。

参考文献1中的第二个重点是,伏特计相对于电流计的放置问题。在效率计算过程中,严禁把电流计的压降包括在内,这一点在PFM和PWM模式下都至关重要。因此,每个伏特计都应连接至PCB的输入和输出电压(理想情况下,在大多数评估组件的S+/S-头上)。这样便可使输入电流计远离该电路,让输出电流计成为负载的一部分。图1显示了这种布局方法以及建议的测量装置,以对PFM模式效率进行最为精确的测量。

图 1 PFM模式效率测量的建议装置



## 超低 $I_Q$ 器件效率测量的装置问题

超低 $I_Q$ 器件应特别考虑其效率测量装置。为了简单起见，超低 $I_Q$ 可取近似值为约10  $\mu\text{A}$ 以下。低于这一水平时，一个或者两个伏特计吸取的输入电流以及附加输入电容的漏电流，会明显影响所测得的输入电流，从而影响计算得到的轻负载效率。请注意，如果使用更高漏电流的设备，则这些问题还会关系到更高 $I_Q$ 的器件。参考文献2详细说明了 $I_Q$ 。

### 输入伏特计的输入电阻

在图1所示测试装置中，两个伏特计都有一些有限输入电阻。例如，标准手持式电池供电型弗卢克 (Fluke) 数字万用表 (DMM) 具有约10M $\Omega$ 的输入电阻。尽管这看似非常大，并且似乎不可能影响效率测量，但在对一个非常常见的3.6V输入电压进行测量时计算它吸取的电流大小后，我们便可知道答案。在这种情况下，当对DMM终端（电阻）施加3.6V电压时，0.36 $\mu\text{A}$ 电流流入该表。它是360 nA的漏电流，其直接从运用于器件的输入电压吸取，并流经输入电流计。把输入伏特计连接该电路，可增加输入电流360nA。如果受测器件的 $I_Q$ 为20- $\mu\text{A}$ ，则这个360 nA小于2%输入电流，不是非常明显。但是，如果测试的是360-nA  $I_Q$ 降压转换器（例如：TI TPS62740等），则伏特计吸取的该额外电流会高达输入电流的一半。这会导致非常大的效率测量差异。

### 输出伏特计的额外负载电流

在输出端连接的伏特计具有相同的表现。它吸取一些未测作负载电流的额外（漏）电流。在效率计算过程中，该漏电流并未包括在分数分子中。输出伏特计构成一个额外负载，吸取额外（以及受测）输入电流。由于这种额外未测负载电流形成高输入电流，因此测得效率低于实际效率。

## 额外输入电容的高漏电流

最后，用于消除输入电流的附加输入电容，可能会有足够高的漏电流，从而从输入吸取大量的电流。例如，一些高电容电容的最大漏电流达到数百微安级别。这种漏电流可能随时间而变化，因此在进行任何效率测试以前都应对其进行检查。如果过高，这种额外电流肯定会干扰效率计算。

### 测量装置问题的解决方案

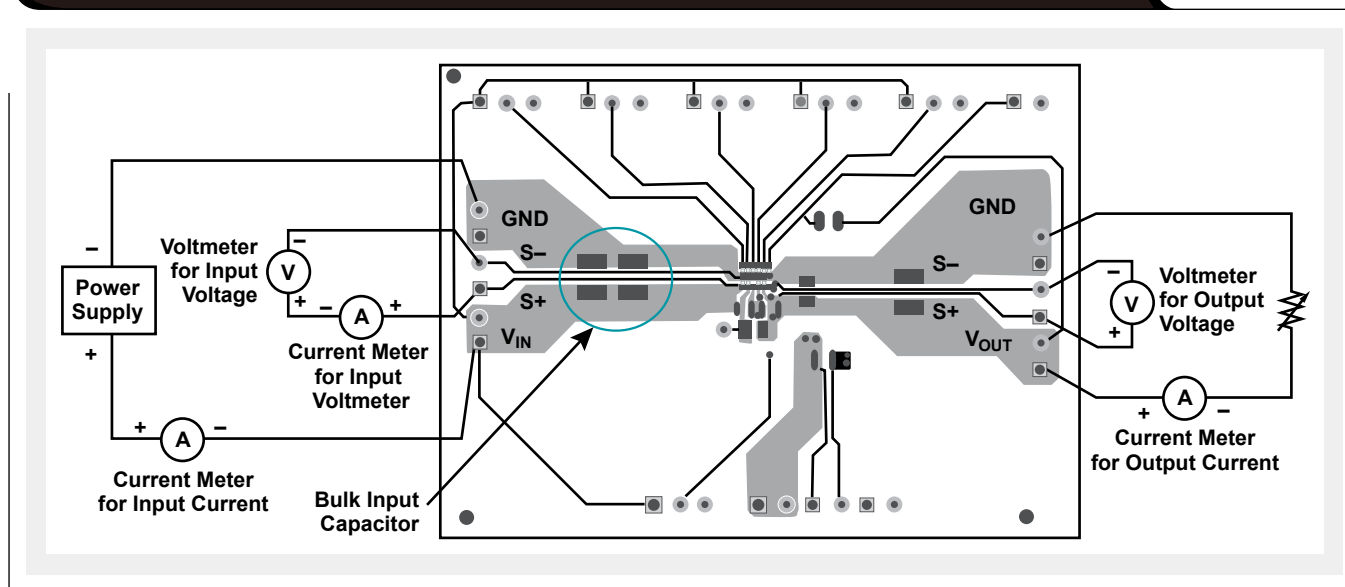
上述3个测量装置问题，都有一些简单的解决方案。但是，最重要的一点是，知道用于获得效率数据的装置反而会引起效率数据的不准确。在轻负载状态下更是如此，因为其电流非常小，很难测量。

### 克服输入伏特计输入电阻效应

处理输入伏特计电流泄露问题的方法有3种：（1）断开伏特计；（2）在不同位置连接它；（3）对流入它的电流进行补偿。第一种也是最简单的方法是，正常连接伏特计，并通过它记录下输入电压，然后在记录输入电流以前将其与输入端断开。这样，便可以在不增加输入电流的情况下，准确地测量输入电压。这种方法使用了最小测量误差。从输入电源显示器（通常未经校准）读取输入电压，然后把读取的值用于效率计算，这种方法并不可取。相反，我们应该使用一种高质量、高精度的伏特计来测量EVM的输入电压。这样做可以克服输入电源和EVM之间线路和连接的小压降。

解决漏电流问题的第二种方法是，在不同位置连接输入伏特计。特别是，伏特计的正极引线可连接至输入电流计的正极端，同时伏特计的接地引线仍然与之前一样连接至相同位置（EVM上的S-头）。使用这种方法，输入伏特计不吸取任何受测电流，因此也就不影响效率计算。这种方法的缺点是，没有考虑到输入

图 2 输入伏特计漏电流补偿的效率测量装置



电流计的压降。但是，在非常轻的负载状态下，这种压降通常并不明显。为了最小化更大负载下出现的这种误差，一旦受测输入电流是伏特计漏电流的约100倍时，我们便可以把输入伏特计移至其初始位置（在输入电流计之后）。这样便可实现一种简单的测量装置，在整个测试过程中，其输入伏特计保持连接，并且误差测量得到最小化。

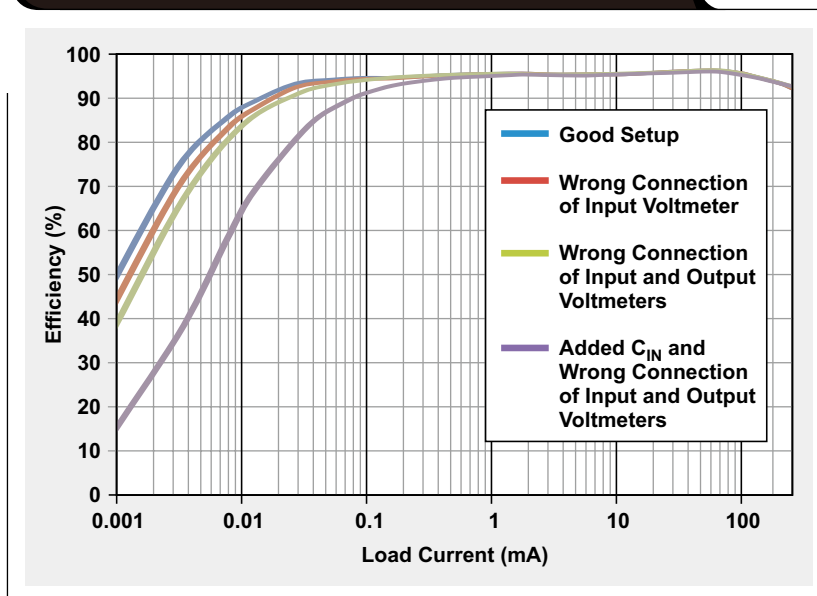
处理输入伏特计漏电流的第三种方法是，使用一个附加电流计测量流经它的电流（请参见图2）。用测得输入电流减去流经这个新加电流计的电流。所得结果用于计算效率。这是处理输入伏特计漏电流的最准确方法。计算得到的效率高度准确，因为输入伏特计仍然保持连接（应贯穿整个测试过程）。另外，假设在整个测试过程，输入电压未明显变化，则漏电流也保持非常恒定。这样，便可在给定输入电压情况下进行单次漏电流测量，并且该值可用于效率测试的所有数据点。换句话说，无需为所有测量点都记录该附加万用表的数据。

### 克服输出伏特计的额外负载电流

使用与输入伏特计相同的这三种方法，也可以处理输出伏特计的漏电流问题。第一种方法（断开输出伏特计）的使用完全相同——正常连接伏特计，读取输出电压，然后断开它，并读取输入电流。第二种方法（在不同位置连接伏特计）对于输出电压稍有不同。使用这种方法时，输出伏特计应在输出电流计之后连接，这样它的电流加上负载电流，便是总输出电流。一旦负载电流是输出伏特计漏电流的约100倍，则可将伏特计移回其位于S+/S-头的正常位置。第三种方法（对伏特计吸取电流进行补偿）的使用与输入伏特计相同。注意，使用这种方法时，用于绘制效率数据图的负载电流应为负载的电流与输出伏特计漏电流之和。如若不考虑这一点，负载电流轴上的效率曲线图可能会稍有偏差。

当然，消除伏特计漏电流所带来误差的最佳方法是使用漏电流极低的伏特计。例如，TPS62740产品说

图 3 不同测试装置的效率比较



说明书中的效率数据便是使用安捷伦公司 (Agilent) 34410A 万用表测量获得，其 10-G $\Omega$  输入电阻设置用于电压测量，它产生的漏电流可以忽略不计，不会影响效率计算。

### 额外输入电容漏电流的最小化

最后，通过选择正确的降压输入电容，输入电容的漏电流问题可得到最大的缓解。X5R 或者 X7R 介电陶瓷电容及其固有的低漏电流特性，适于测量超低功率效率，因为这些电容中使用的陶瓷技术带来最低的漏电流。如果电压对于陶瓷电容过高，则应使用低漏电流聚合物或者钽电容。查看所选电容的产品说明书，以确定其漏电流是否会引起测量误差，这一点很重要。另外，对效率测试中使用的实际电容的漏电流进行测量也很重要。

### 效率测量装置的测试结果

图 3 比较了使用 TPS62740EVM-186 评估模块的几种不同测试装置的测得效率。我们使用了一个 100- $\mu$ F 陶瓷降压输入电容的正确测试装置，并对进入输入和输出伏特计的漏电流进行补偿。该降压输入电容足以产生准确的结果，正如 DC 输入电流所证明的那样。如果使用阻抗更大、更长的输入电源连线，则输入电流形状

可能会变得更为正弦。这会产生不准确的输入电流读取值，显示需要更多大容量输入电容才能实现准确的测量。

图 3 还显示了三种错误测试装置的测试结果：未考虑输入伏特计漏电流；未考虑输出伏特计漏电流；使用约 5  $\mu$ A 漏电流的附加输入电容。就这三种错误测试装置而言，错误结构相互叠加，它们累加在一起。输入伏特计的错误连接使用正确的输入电容和正确的输出伏特计。输入和输出伏特计的错误连接使用正确的输入电容。使用大漏电流输入电容的装置还把错误的连接用于输入和输出伏特计。正如我们预计的那样，使用这些最为糟糕的测试装置，得到的效率测量结果肯定也不准确。

### 效率测量的其他考虑事项

理解测量装置对超低  $I_O$  器件效率测量产生的影响以后，最后还有两个方面需要考虑：输入电源的遥测线路；外部或者内部反馈电阻器的使用。尽管并不常见，但它们都会影响效率。

具有遥测功能的输入电源有时用于效率测量测试装置，目的是在输入电流计的负载和压降变化时，提供一个经过稳压的输入电压。但是，正如输入伏特计，

这些遥测线路会吸取电流。在许多情况下，这种电流相对较大—有时达到数百微安。无需赘言，测试装置吸取如此高的电流肯定会影响效率计算结果，从而得到错误的结果。因此，为了获得最佳结果，应在输入电流计“之前”（而非之后）连接输入电源的遥测线路。

在超低 $I_O$ 器件效率测量过程中，需要考虑的最后一点是，使用外部还是内部反馈电阻器来设置输出电压。大多数电源都在输出电压（FB引脚）和接地之间使用两个外部电阻器来设置输出电压。这样便赋予用户完全的灵活性，让其可以把输出电压设置在任何希望的点。但是，使用外部电阻器和高敏感外部FB引脚，让其更容易受到噪声的影响。FB引脚处的所有外部噪声都获得了增益，从而带来错误的输出电压。为了避免出现这种情况，一般应有1  $\mu$ A和10  $\mu$ A之间的电流流入这两个反馈电阻器，以保持它们对于外部噪声源的稳健性。由于该电流未流至负载，因此应把它看作是一种带来效率降低的损耗。

为了保持高效率，FB引脚和两个电阻器应位于电源内部，以让其远离变化、高噪声的外部环境。利用这种方法，一种电流最小的大电阻用于反馈电阻器，所以效率没有明显降低。尽管内部反馈电阻器设置电源内部的输出电压，并防止用户对所有输出电压进行设置，但是如TPS62740等降压转换器克服了这种局限性。它拥有四个数字输入引脚，让用户能够从最为常见的输出电压范围（1.8V到3.3V）进行选择。同样，许多其他TI TPS62xxx器件使用内部方式设置输出电压为完全固定（与TPS62091一样），或者可通过I<sup>2</sup>C稳压（与TPS62360一样）。这些低 $I_O$ 器件是首选，因为它们不使用外部电阻器，不会降低效率，但仍然允许充分的用户可结构性。

## 结论

准确测量超低 $I_O$ 器件的效率很难，因为电路的电流非常小。必须对基本效率测量测试装置进行稍微改动，以获得准确的测量结果，以便能够反映最终应用中真实电路的性能。考虑及（或）消除测量设备中的各种漏电流是实现准确测量的关键。

## 参考文献

- 1、《如何进行准确PFM模式效率测量》，作者：Jatan Naik，网址：[www.ti.com/slva236-aaj](http://www.ti.com/slva236-aaj)
- 2、《 $I_O$ ：什么是 $I_O$ ，什么不是 $I_O$ ，如何使用它》，作者：Chris Glaser，见《模拟应用期刊》（2011年第2季度），网址：[www.ti.com/slyt412-aaj](http://www.ti.com/slyt412-aaj)
- 3、《低功耗应用的360nA  $I_O$ 降压转换器》，见《TPS62740产品说明书》，网址：[www.ti.com/slvb02-aaj](http://www.ti.com/slvb02-aaj)
- 4、《TPS62740EVM-186评估模件》，见《用户指南》，网址：[www.ti.com/slvu949-aaj](http://www.ti.com/slvu949-aaj)

## 相关网站

电源管理：

[www.ti.com/power-aaj](http://www.ti.com/power-aaj)

[www.ti.com/tps62091-aaj](http://www.ti.com/tps62091-aaj)

[www.ti.com/tps62360-aaj](http://www.ti.com/tps62360-aaj)

[www.ti.com/tps62740-aaj](http://www.ti.com/tps62740-aaj)

[www.ti.com/tps62740evm-aaj](http://www.ti.com/tps62740evm-aaj)

[www.ti.com/dcs-control-aaj](http://www.ti.com/dcs-control-aaj)

订阅《模拟应用期刊》请访问：

[www.ti.com/subscribe-aaj](http://www.ti.com/subscribe-aaj)



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](http://www.ti.com.cn/webench)  
[www.ti.com.cn/powerlab](http://www.ti.com.cn/powerlab)  
[www.ti.com.cn/powertraining](http://www.ti.com.cn/powertraining)

**WEBENCH® Designer**

Power | **FPGA/μP** | Sensors | LED

Enter your power supply requirements:

Min	Max
Vin 14.0 V	22.0 V
Vout 3.3 V	Iout 2.0 A
Ambient Temp 30 °C	

Multiple Loads **Power Architect** | Single Output **Start Design**

**WEBENCH® Designer** My Designs

输入电压	最小 14.0 V	最大 22.0 V
输出电压	3.3 V	输出电流 2.0 A
环境温度	30 °C	

**SIMPLE SWITCHER®**  
开始设计 ▶



从通讯、计算机、消费类电子到汽车、工业, 从能源、医疗到安防、航空航天, TI推出一系列创新、完整、独特的制胜解决方案, 给您带来前所未有的技术支持体验。 <http://www.ti.com.cn/www/more/>



德州仪器在线技术支持社区

[www.deyisupport.com](http://www.deyisupport.com)

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



[e.weibo.com/tisemi](http://e.weibo.com/tisemi)

热门产品

- |           |  |
|-----------|--|
| TPS92075  | 具有自适应基准的非隔离式、相位可调光、降压 PFC LED 驱动器              |
| BQ24195   | 具有 5.1V 1A/2.1A 同步升压运行的由 I2C 控制的 2.5A/4.5A 单电池 |
| LM3447    | 相位调光、初级侧电源调整的准谐振反激式控制器                         |
| LM34917   | 具有智能电流限制的超小型 33V、1.25A 恒准时降压开关稳压器              |
| ADS1298   | 具有集成 ECG 前端的 8 通道 24 位模数转换器                    |
| SN65HVD82 | 针对要求严格的工业类应用的稳健耐用的驱动器和发送器                      |
| LM22670   | 具有同步或可调节开关频率的 3A SIMPLE SWITCHER、降压电压稳压器       |
| ISO1050   | 电镀隔离的隔离式 CAN 收发器                               |

了解更多, 请搜索以下产品型号:

TPS92075



## 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