

Brett Novak,
德州仪器 (TI) C2000™
微控制器和太阳能终端设备营销经理

在太阳能应用中实施电弧 检测: 实现与新 UL 1699B 标准的符合性

简介

随着对可再生能源的关注和需求与日俱增, 市场上涌现出了大量将阳光转化为电力的太阳能光伏系统部署。虽然可以寄希望于像微型逆变器这样的新技术创新来改变太阳能领域, 但现如今的大多数安装利用的都是长串的高电压直流电源, 这增加了与电弧有关的安全问题。因此起草了 UL 1699B 标准, 该标准要求对高电压系统使用电弧检测以提高人员安全性、保护设备并防止发生灾难性损坏。虽然本文着重介绍在太阳能应用中实施电弧检测, 但该技术也适用于涉及高电压的其他电气应用, 比如电动和混合动力汽车。

安全电弧检测: UL 1699B

由于光伏技术的成熟和制造商向新市场的扩张, 太阳能行业的标准不断修改。随着由大量太阳能板构成的大型“太阳能场”不断向越来越多的更小型住宅和商业安装的演变, 越来越需要实施安全措施以避免发生与高电压相关的灾难性事件, 比如有害电击或火灾。

这些事件是由电弧导致的, 当线路或电气接头出现故障时, 高电压直流线路可能会产生电弧。这些电弧可使装置带电, 导致支架系统也带电, 可能会使接触装置的任何人员触电。这些电弧还可导致火灾, 从而导致电气设备损坏, 或导致大范围财产损坏。例如, 住宅屋顶上的安装存在电弧引燃屋顶板的现实可能性。

为了解决这些重要的安全问题, 太阳能工业制定了 UL 1699B 光伏电弧故障电路保护标准。UL 1699B 是对 UL 1699 电弧故障中断规范的增补, 该规范是国家电气规范 (NEC) 第 690 章的一个子集。它规定了直流总线电压大于等于 80 V 但小于 1,000 V 的系统的要求。

UL 1699B 的制定经历了相当长的时间, 预期将于 2012 年的年末完成。在实施 UL 1699B 后, 预期欧洲将遵循其自己的类似标准。

在采用 UL 1699B 后, 为太阳能工业设计设备的任何公司如果设备上一串太阳能板上的电压高于 80 V, 则需要遵守该标准并实施电弧检测。该标准将影响住宅、商业和工业应用的太阳能逆变器、转换器和充电控制器以及独立直流电弧故障断路器的设计。

UL 1699B 标准的一部分要求电弧检测系统具有信号器以便在检测系统因电弧事件而跳闸时提供指示。此信号器可以采用多种不同形式, 从闪烁的 LED 到高声警报。根据安装情况, 系统支持远程指示器也很重要。例如, 太阳能阵列可以通知公共事业公司或阵列所有者, 系统已由于电弧而关闭。这可以通过使用有线或无线通信链路来实现。

UL 1699B 另外要求系统包含测试电路以验证电弧检测单元是否正常工作。此电路必须能够在单元的输入中模拟电弧事件并验证是否触发故障, 这与一个人在家自己测试 GFI 插座非常相似。如果自检失败, 系统必须自动关闭。

可以直接在单元上或通过远程接口用开关触发自检。鉴于许多人实际上不会始终定期执行自检, 目前也有人讨论让测试自动执行。

太阳能拓扑

UL 1699B 的一个值得注意的例外情况是用于住宅安装的微型转换器和微型逆变器。在传统太阳能阵列中，多个太阳能板“成串”串联并连接到集中型直流变交流逆变器（请参见图 1），这种方式称为中央式或串式拓扑，因为多个太阳能板串联绑到一起，就像是长长的一串。由于连接了如此多的光伏板，因此住宅系统中的每个逆变器通常会携带 200-600 V 电压。每个逆变器和与其相连的太阳能板串之间需要进行电弧检测。

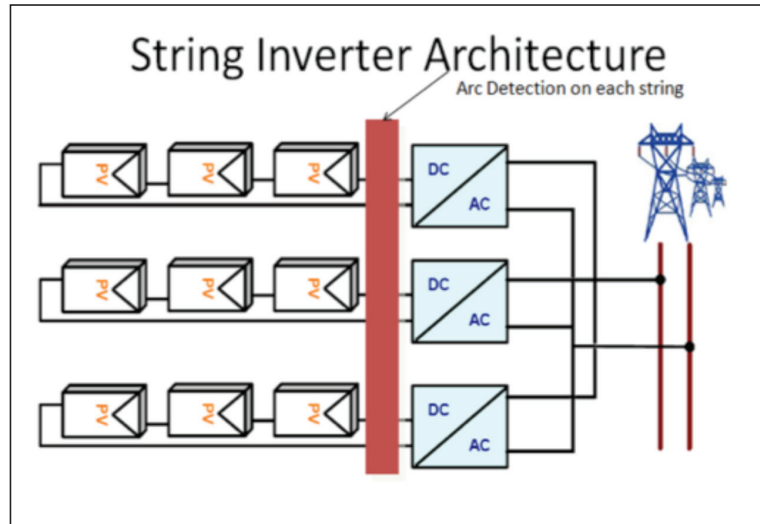


图 1：在中央式或串式拓扑中，光伏阵列串联连接到单个逆变器。在住宅系统中，每个逆变器通常携带 200-600 V 电压。每个逆变器和与其相连的太阳能板串之间需要进行电弧检测。

微型逆变器提供了一种替代拓扑，其中每个光伏板具有其自己的逆变器（请参见图 2）。与串式拓扑相比，微型逆变器具有更高的灵活性，并且其模块化结构便于安装。如果以后需要对安装进行扩展，它们也非常容易进行扩展。此外，每个微型逆变器的直流电压低于 80 V 并具有直接交流电压输出，因此可以安全地工作而无需电弧检测。

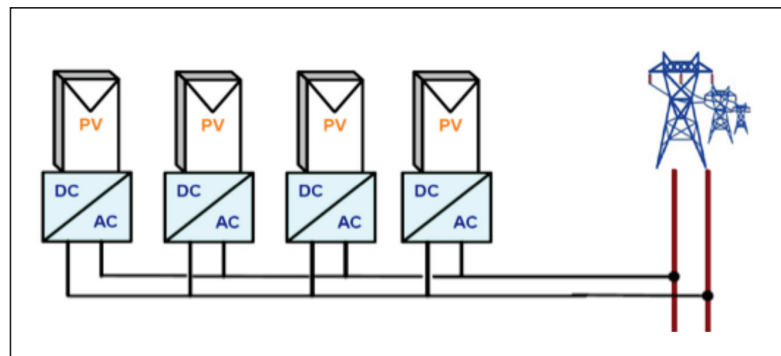


图 2：微型逆变器提供了一种替代拓扑，其中每个光伏板具有其自己的逆变器（请参见图 2）。与串式拓扑相比，其模块化结构和灵活性便于安装。由于每个微型逆变器的电压低于 80 V，因此不需要电弧检测。

虽然微型逆变器越来越受欢迎，但现实情况是，传统的串式太阳能安装仍主宰着市场，其市场份额占 99% 以上。作为一种新技术，微型逆变器目前的部署费用较为昂贵。此外，由于单独的太阳能板的每板功率尚不足以具有单板安装优势，因此串式拓扑仍具有出色的每瓦成本优势。

微型逆变器的价格需要大幅度降低，达到与串式逆变器相同的水平。考虑到与系统的总体成本相比，电弧检测仅使串式安装增加极少的价格成本，因此 UL1699B 实质上并不影响串式设备的成本优势。在可预见的未来，市场将继续由串式逆变器主宰。因此，UL1699B 会影响每个太阳能设备制造商。

电弧检测的挑战

UL1699B 的一个重要元素是系统跳闸后必须手动重置。这使得故障电弧检测的成本成为了主要设计顾虑，尤其是对于遥远位置的安装。具体来说，如果整个太阳能阵列因误报的电弧检测而关闭，这表示将会断电，直到将技术人员派遣到现场重置系统。这为开发人员提出了一个难题：未能检测到电弧所带来的成本可能会很高（例如身体伤害、设备损坏、灾难性火灾），而错误地检测到电弧的成本同样很高（即不必要但却成本昂贵的服务请求）。

要全面地了解整个问题，请考虑电弧的检测方式。直流电压转换为数字信号，然后对数字信号进行处理以确定标称功率中的频谱噪声。图 3 显示了串式逆变器标准操作期间发生电弧时的响应。可以看到，电弧事件会在特定的频带内改变标称功率，频带范围为 30-100 KHz。

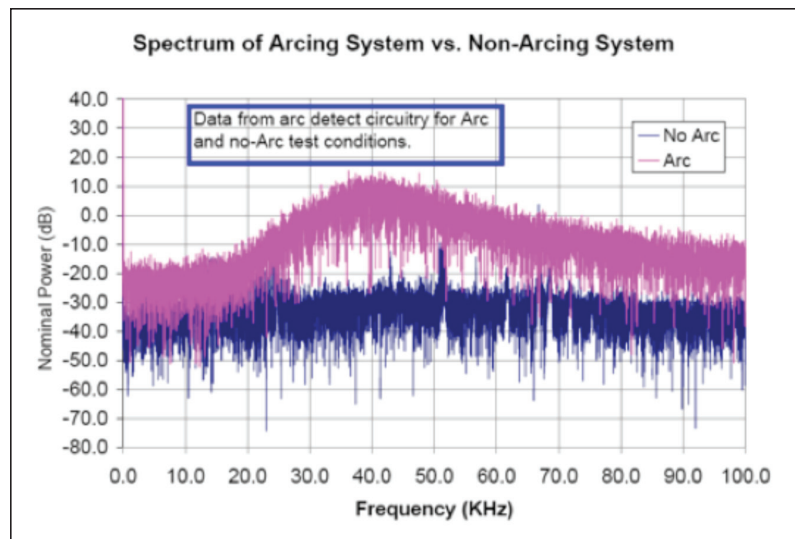


图 3. 与无电弧时相比，电弧事件会导致逆变器标称功率信号中出现频谱噪声。此噪声出现在 40-100 KHz 的特定频带内。

检测电弧的一种方法是将标称功率与基线测量进行比较并注意噪声等级突然增加的时刻。虽然可以用此方法来检测电弧，但只有当系统已经运行时才能这样做。将不会在确定基线的加电启动期间检测发生的电弧，因此不符合 UL 1699B 的要求。因此，检测系统需要使用一种可以精确执行而不进行基线测量的检测算法。

串式逆变器中通常使用的交流逆变器生成的噪声非常类似于电弧事件，这进一步加剧了这一难题。图 4 显示了串式逆变器的正常操作与正在运行并产生噪声时的交流逆变器的比较。可以看到，正常操作期间各点的噪声峰值高于产生电弧时的峰值。实际上，正常操作和电弧事件之间的差异非常小，因此很难区分这两种情况。

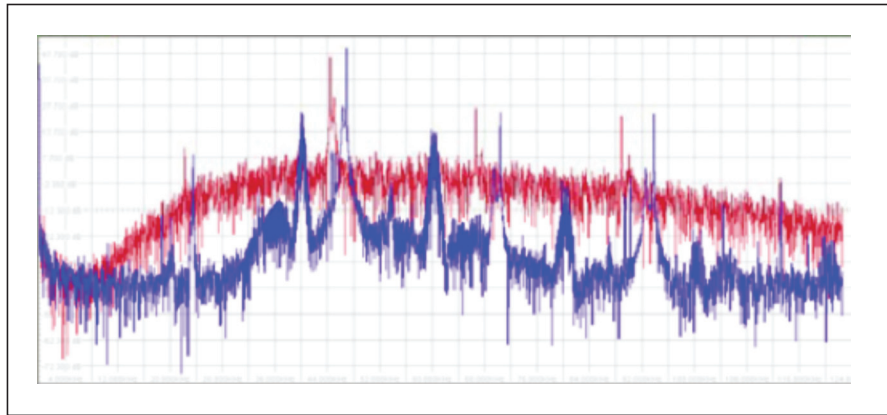


图 4：来自原始轮廓 串式逆变器中通常使用的交流逆变器生成的噪声非常类似于电弧事件，因此很难区分正常操作和电弧事件。

这不是个小问题。用于检测这些差异的算法相当复杂，并需要同时评估多个滤波器以避免错误检测。此外，这些算法的执行还必须尽可能快，从而在电弧损坏系统或引发火灾之前有足够时间断路。

设计电弧检测电路

图 5 显示了太阳能逆变器的电弧检测电路。它由模拟前端、5 ADC 和数字信号处理器 (DSP) 构成。模拟前端是电流互感器，用于测量太阳能板串上的电流。它在要观测的频段范围内充当带通滤波器，并在由 ADC 对信号进行取样并将信号传递给 DSP 进行进一步处理之前增加信号的增益。

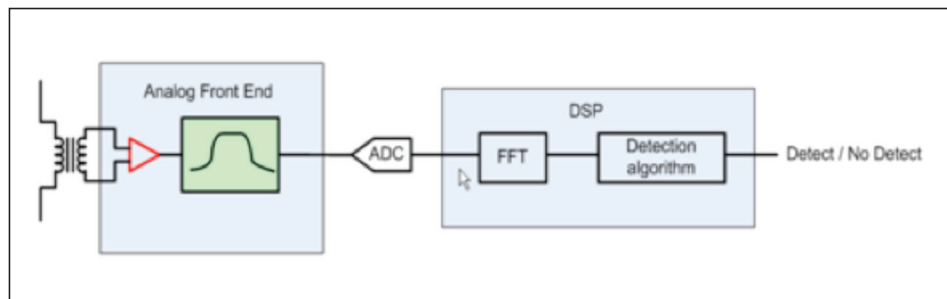


图 5：太阳能逆变器的简单电弧检测电路由模拟前端 (SM73307/73308)、ADC (SM73201) 和具有集成 CPU 或数字信号处理器的微控制器 (Piccolo F2803x 微控制器) 构成。

精确可靠地检测电弧需要使用快速、高分辨率 ADC。如果分辨率不够，检测电路可能无法区分电弧和非电弧事件。在这一过程中，速度也是至关重要的：UL 1699B 标准允许在电弧事件后两秒内打开开关并关闭系统。理想情况下，开发人员需要尽可能多地分配这两秒钟时间来打开机械性质的开关。例如，在 250 K samples 取样速度下进行取样的 16 位 ADC 会提供必需的分辨率和速度。

电压转换为数字信号后，需要在频域内对数字信号进行处理。进一步滤波隔离直流总线上的频谱噪声，然后将信号分叉到频带内并应用 FFT。

由于处理是在频域内使用复杂算法进行的，因此电弧检测需要具有实时功能的 DSP。使用 32 位架构可以最快、最有效地处理来自 ADC 的传入信号。多个基于 FFT 的滤波器检测直流总线上高频噪声的振幅（峰值）变化，然后单元评估是否正在发生电弧事件。

当检测到电弧事件时，单元需要关闭逆变器。可以利用由 PWM 驱动的模拟输出来关闭前端继电器以断开太阳能板串的连接并触发信号器（即声音或/和可视警报）。可以利用数字输出作为通信接口以将消息发送到远程控制器。也可以使用此通信接口来远程启动自检。

实施电弧检测

考虑到 UL 1699B 影响几乎所有现用的和在短期内部署的太阳能设备，因此必须了解其对设计和整个太阳能工业的影响方式。具体来说，电弧检测主要有两个市场：新安装和翻新单元。考虑到使用 80 V 以上直流线路的现有太阳能安装（几乎是全部）将需要添加电弧检测功能，翻新市场将极其重要。

翻新单元将是位于太阳能板串及其逆变器之间的独立器件。翻新单元可以非常简单，仅实施电弧检测子系统和断路器。具有高性能处理器（例如 Piccolo™ F2803x 和 F2806x 微控制器）的低成本器件。TI 的 C2000™ 微控制器平台极适合这种类型的应用。

在新安装中，可以将电弧检测直接集成到串式逆变器中。因此，系统成本可能受在同一处理器上将电弧检测与其他逆变器功能相结合的控制。对于这些类型的应用，TI 的 Piccolo™ F2803x 和 F2806x 微控制器是理想选择，因为这些高性能器件已经过额外的可靠性测试，非常适用于太阳能逆变器和转换器。这些高度集成的 Piccolo 器件以及全功能外设集非常适用于太阳能应用，可以使开发人员尽可能减少电弧检测和断路中使用的外部组件数。开发人员还可以从 TI 的广泛 C2000™ 微控制器产品组合中进行选择，以便使器件在性能、外设和内存之间针对其高电压应用实现最佳平衡。

以最低的成本提高系统效率

使用高性能处理器可以为执行其他任务提供足够的余量，从而以多种方式最大限度地提高系统效率。例如，具有足够处理能力的单个电弧检测单元可以同时分析多个传入串以便最大限度地减少组件数和设备成本(请参见图 6)。这种方法还可以简化安装并减少系统中故障点的数量。

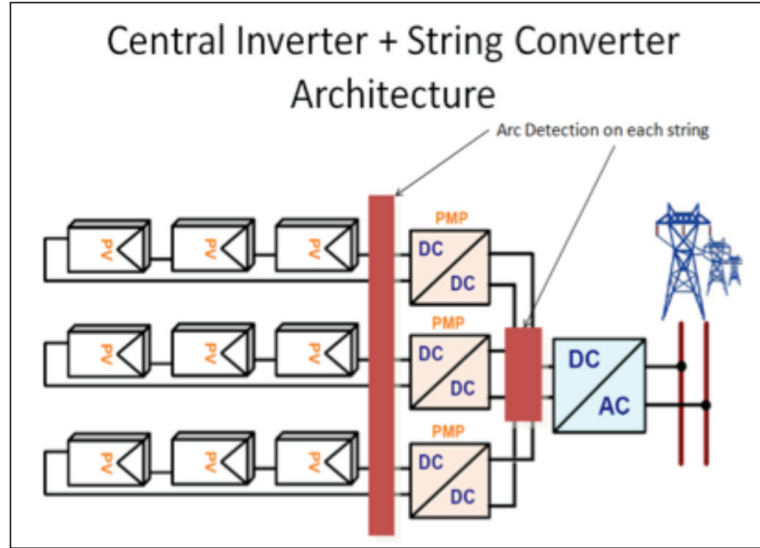


图 6: 使用高性能处理器可以使单个电弧检测单元同时分析多个传入串，因而最大限度地减少组件数、降低系统成本并减少系统中故障点的数量。

使用多核处理器可以使单个处理器同时管理电弧检测和太阳能应用所需的其他处理任务，从而实现进一步的系统成本节省。例如，TI 的 C2000 Piccolo 微控制器平台上的控制律加速器 (CLA) 为开发人员提供了用于处理最大功率点跟踪 (MPPT) 的第二个内核。

MPPT 是一种提高光伏板效率的技术，该技术通过动态调节太阳能板以获得最大曝光照射。由于 CLA 可以直接访问 C2000 Piccolo 微控制器 ADC 和 PWM 外设，因此它可以独立于处理电弧检测的 DSP 内核而运行。此外，两个内核共同位于同一个芯片上并通过内部寄存器连接，当检测到电弧时，可以使 MPPT 功率级立即离线。

MPPT 为太阳能应用带来了高价值，将 MPPT 与电弧检测一起整合到单个处理器上的能力也是如此。除了降低系统复杂性外，双核器件的额外处理能力可以使开发人员以最低的成本提高系统效率和可靠性。

以最低的成本提高系统效率

开发可靠的电弧检测子系统需要具有在受控环境下产生电弧的能力。但电弧生成设备并不是一种常见的实验室设备，因此，开发人员可能需要构建其自己的发生器。

图 7 显示了生成适当电弧的电路的基本架构。电弧检测系统需要一个代表单元所监视的太阳能板串的直流电源。系统中使用电阻镇流器来模拟实际系统可能具有的任何电阻负载并耗散所产生的电弧事件的能量。闸刀开关使开发人员能够在需要时触发电弧。

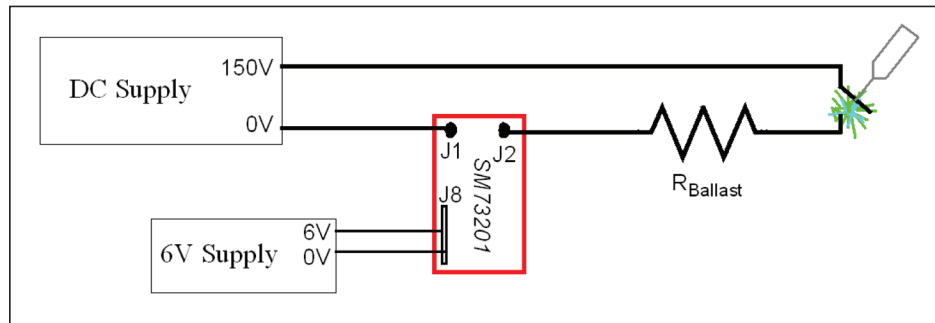


图 7: 此图显示了生成电弧以测试电弧检测能力的电路的基本架构。直流电源代表单元所监视的太阳能板串，闸刀开关使开发人员能够在需要时触发电弧。

要产生电弧，需要有危险电压，必须采取适当的防护措施以避免人员受伤或开发设备和原型受损：

- 使用带长操作柄的闸刀开关。操作柄应当用不导电并且阻燃的材料包裹。
- 在闸刀开关周围使用聚碳酸酯外壳。聚碳酸酯对电弧具有人身防护能力，并具有阻燃形式。它还可以阻止电弧产生的任何紫外线辐射。
- 镇流电阻必须能够承受 200 W 以上的功率。可以使用白炽灯泡作为此负载。
- 请注意，电压很高时，测试电流即使很低也能产生电弧。这进一步提高了产生电弧时的安全性。

检测算法将需要进行调优并对系统进行优化，以便识别电弧。务必要考虑可能会影响准确性和响应能力的任何环境因素，例如温度和湿度。TI 的电弧检测实施利用多频带动态滤波技术，该技术单独评估特定的频带，然后对结果进行聚合以产生电弧轮廓。除了其他特性外，开发人员可以通过选择要处理的频带、选择要使用的阈值、设置最低频率和确定每个滤波的权重来对滤波进行调优。

为了帮助开发人员开发可靠的电弧检测子系统，TI 提供了采用板载 C2000 Piccolo 微控制器的 SM73201-Arc-Eval 光伏电弧检测系统（请参见图 8）。这是一个包含硬件和软件的完整参考设计，其中包括 TI 的可直接用于生产的电弧检测算法，能够准确地识别电弧而不会产生错误检测。免费向客户提供检测软件。

此评估板演示了可靠的电弧事件检测而不产生不需要的假阳性检测。开发人员可以使用 200 V/2 A 的直流电源对系统进行评估。板本身可以用 6 V/150 mA 电源或 9V 电池供电。

TI 也是支持 MPPT 和相关光伏功能的处理器的世界领先供应商，市场份额几乎达到 80%，并为评估板的 MPPT 提供完整的开源库和可直接用于生产的参考设计。使用这些工具，开发人员还可以快速将 MPPT 的效率引入新设计以及现有系统中。

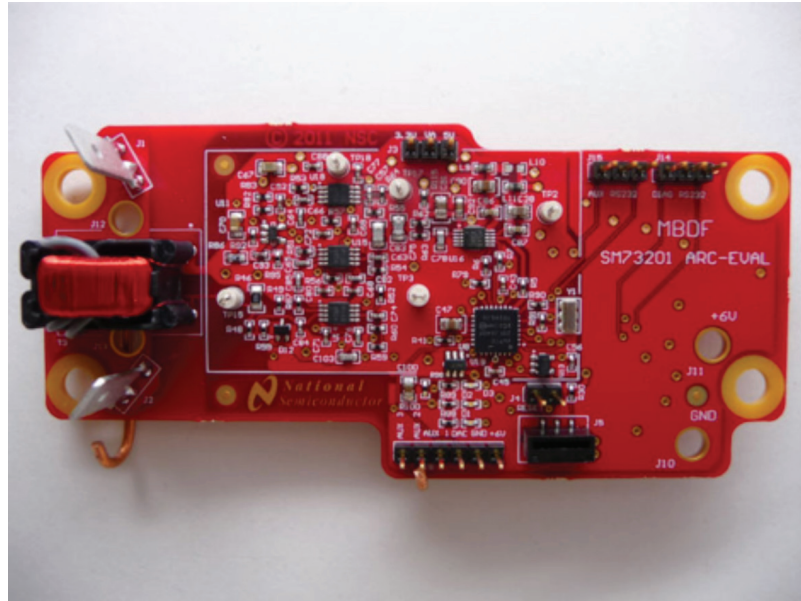


图 8: SM73201-Arc-Eval 光伏电弧检测系统包含 C2000 Piccolo 微控制器，为开发人员提供了包含硬件和软件的完整参考设计，其中包括 TI 的可直接用于生产的电弧检测算法，能够准确地识别电弧而不会产生错误检测。

太阳能之外

除了使用高电压直流电流的太阳能逆变器和转换器外，直流电弧检测还可用于许多应用。例如，市场上越来越受欢迎的混合动力和电动汽车需要更安全的技术。这些汽车利用 400-500 V 电池组并在整个汽车内遍布高电压直流电流。

具体来说，这些汽车中的主电池和逆变器功率级之间的高电压直流总线是导致灾难性汽车火灾的众所周知的潜在原因。有了内置的电弧检测功能（请参见图 9），可以减轻与高电压相关的风险，从而使汽车更加安全，并使市场上的混合动力汽车更受到认可。

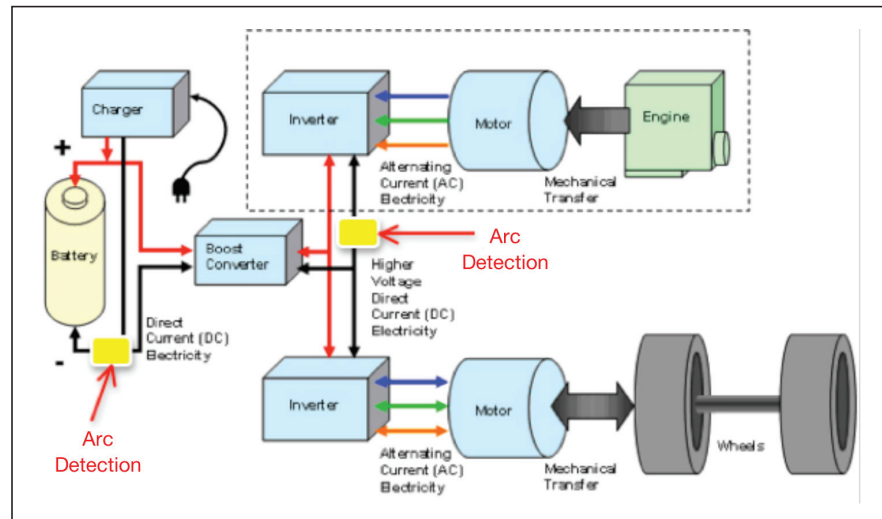


图 9：可以在各种高电压应用中加入电弧检测功能以减轻与高电压相关的风险。例如在电动汽车中，电弧检测功能可以监视主电池和逆变器功率级之间的高电压直流总线，这些总线是导致灾难性汽车火灾的众所周知的常见原因。

UL 1699B 规范标志着整个行业提高高电压应用安全性趋势的开始。低成本和高性能器件以及创新型检测算法的可用性使得开发人员可以实施可靠的安全机制而不出现错误检测。随着电弧检测技术在太阳能行业的普及，其他行业也将开始采用这一技术。

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.

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	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/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com/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 机动性处理器	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

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