

能量收集应用无处不在

从一开始就优先电源管理需求

作者：Tony Armstrong，电源产品部产品市场总监，凌力尔特公司

系统设计师和系统规划师必须从一开始就优先满足电源管理需求，以确保高效率的设计和成功的长期部署。幸运的是，领先的高性能模拟IC制造商现在提供越来越多的能量收集电源管理IC，从而极大地简化了此项任务。

能量收集的概念已经出现超过10年了，然而在现实环境中，由环境能源供电的系统一直很笨重、复杂和昂贵。不过，有些市场已经成功地采用了能量收集方法，如交通运输基础设施、无线医疗设备、轮胎压力检测和楼宇自动化市场。尤其是在楼宇自动化系统中，诸如占位传感器、自动调温器甚至光控开关等，以前安装时通常使用的电源或控制配线，现在已经不需要了，取而代之是，它们采用了局部能量收集系统。

能量收集系统的一个主要应用是楼宇自动化系统中的无线传感器。为方便说明，我们考虑一下美国能源使用的分布情况。建筑物每年都是能源生产的头号用户，约占总能耗的38%，紧随其后的是交通运输和工业领域，各占总能耗的28%。此外，建筑物可以进一步分成商用建筑和民用建筑，在这38%的能耗中，分别分得17%和21%。而民用建筑21%的能耗数字还可以进一步划分，其中取暖、通风和空调（HVAC）约占民用建筑总能耗的3/4。目前预计，从2003年

到2030年，能源使用量将翻一番，依此推算，采用楼宇自动化系统可以节省多达30%的能源（数据来源：“全球能源、科技和气候政策展望（WETO）”，由欧盟多个研究机构联合撰写）。

类似地，一个采用能量收集方法的无线网络可以将一栋大楼中任何数量的传感器连接起来，以在非主要区域的大楼或房间中没人时，调节该区域的温度或关掉该区域的照明灯，从而降低HVAC和电力费用。此外，能量收集电子线路的成本常常低于布设电源线的成本或更换电池所需的日常维护成本，因此用收集的能量供电方法，显然有经济收益。

不过，如果每个节点都需要自己的外部电源，那么很多无线传感器网络就失去了优势。尽管电源管理技术确实在持续发展，已经使电子电路能在给定电源情况下工作更长时间，但这是有限度的，而用收集的能量供电提供了一种补充方法。因此，能量收集通过将局部环境能源转换成可用的电能，成为一种给无线传感器节

点供电的方法。环境能源包括光、温差、振动波束、已发送RF信号或能通过换能器产生电荷的任何能源。这些能源在我们周围到处都是，利用合适的换能器，如面向温差的热电发生器（TEG）、面向振动的压电组件、面向太阳光（或室内照明光）的光伏电池等，可将这些能源转换成电能，甚至可以利用潮湿气体产生的电能。这些所谓的“免费”能源可来自自主地给电子组件和系统供电。

现在所有无线传感器节点都能以微瓦级平均功率工作，因此用非传统电源给它们供电是可行的。这导致了能量收集的出现，在使用电池不方便、不现实、昂贵或危险的系统中，可用能量收集提供的电力给电池充电、补充或代替电池。用收集的能量供电，还可以不再需要导线来供电或传送数据。此外，工业过程、太阳能电池板或内燃机产生的能量也可以收集起来使用，否则就浪费掉了。

能量收集应用的问题和特性

一个典型的能量收集配置或无线

传感器节点（WSN）由 4 个方框组成（参见图 1）。它们是：1）环境能源；2）换能器组件和给下游电子组件供电的电源转换电路；3）将该节点连接到现实世界的检测组件和计算组件（由微处理器或微控制器组成，处理测量数据并将数据储存在存储器中）；4）由短程无线单元组成的通信组件，实现与相邻节点及外部世界的无线通信。

环境能源的例子包括：连接到 HVAC 管道等发热源的热电发生器（TEG）或热电堆；或者连接到诸如窗玻璃等机械振动源的压电换能器。在热源情况下，一个紧凑型热电器件（常称为换能器）可将小的温差转换成电能。而在存在机械振动或压力的情况下，压电器件可用来将机械能转换成电能。

一旦电能产生出来，就可以由能量收集电路转换并调整为合适的形式，以给下游电子组件供电。因此，一个微处理器可以唤醒一个传感器，以获取读数或测量值，然后读数或测量值可由一个模数转换器进行处理，以通过一个超低功率无线收发器传送。

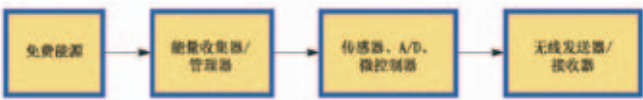


图 1：一个典型的能量收集系统或无线传感器节点的主要组成方框图。

有几种因素影响无线传感器节点能量收集系统的功耗特性。表 1 概述了这些因素。

表 1：影响无线传感器节点功耗的因素。

无线传感器节点中的组件	影响功耗的因素
电源（或电池）	放电速率
	电池尺寸
	电源电压
	所使用的电极材料
传感器	DC/DC 效率
	物理信号到电信号的转换
	支持组件的复杂性
	信号采样
ADC	信号调理
	采样速率
	混叠
	高频抖动
微处理器	内核工作频率
	工作电压
	功率与处理及计算负载成正比
	环境温度
	应用节点
无线单元	外部设备利用率
	调制方法
	数据速率
	传送范围
	工作占空比

当然，由能量收集源所提供的能量取决于它处于操作状态的时间。因此，比较能量收集电源的主要衡量标准是功率

密度，而不是能量密度。能量收集一般会遇到低的、可变的和不可预测的可用功率，因而通常采用了一种与能量收集器和一个辅助电能储存器相连的混合结构。收集器由于其无限的能量供应和功率不足而成为系统能源。辅助电能储存器（一个电池或一个电容器）可产生较高的功率，但储存的能量较少，它在需要的时候供电，其他情况下则定期从收集器接收电荷。所以，在没有可供收集功率的环境能量时，必须采用辅助电能储存器给 WSN 供电。当然，从系统设计人员的角度而言这将导致复杂程度的进一步增加，因为他们现在必须考虑这样一个问题“为了对缺乏环境能量源的情况下提供补偿，应在辅助储存器中存储多少能量？”究竟需要储存多少能量将取决于诸多因素，包括：

1. 缺乏环境能量源的时间长度
2. WSN 的占空比（即数据读取和传输操作必须具备的频率）
3. 辅助储存器（电容器、超级电容器或电池）的大小和类型
4. 是否可提供既能充当主能量源、同时又拥有充分剩余能量（用于当其在某些特定时段内不可用时为辅助电能储存器充电）的足够环境能量？

最先进和现有售的能量收集技术（例如振动能量收集和室内光伏技术）在典型工作条件下产生毫瓦量级的功率。尽管这么低的功率似乎用起来很受限，但是若干年来收集组件的工作可以说明，无论就能量供应还是就所提供的每能量单位的成本而言，这些技术大体上与长寿命的主电池类似。此外，采用能量收集的系统一般能在电能耗尽后再充电，而这一点主电池供电的系统是做不到的。

正如已经讨论的那样，环境能源包括光、温差、振动波束、已发送的 RF 信号，或者其他任何能通过换能器产生电荷的能源。下面的表 2 说明了从不同能源可产生多少能量。

要成功设计一款完全独立的无线传感器系统，需要现成的节电型微控制器和换能器，并要求这些器件消耗最小和来自低能量环境的电能。幸运的是，低成本和低功率传感器及微控制器已经上市两三年左右了，不过只是在最近，超低功率收发器才投入商用。然而，在这一系列环节中，处于落后的一直是能量收集器。现有的能量收集器模块实现方案（如

表 2：能源以及它们可产生多少能量。

能源	所产生的典型能量值	典型应用
小型太阳能电池板	数百 mW/cm ² （太阳光直接照射）	手持式电子设备
小型太阳能电池板	数百 μW/cm ² （太阳光间接照射）	远程无线传感器
Seebeck（席贝克）器件（将热能转换成电能）	数十 μW/cm ² （器件本身的热量）	远程无线传感器
仍然是席贝克器件	数十 mW/cm ² （炉子废气烟道）	远程无线传动器
压电器件（通过器件的挤压或扭曲产生能量）	数百 μW/cm ²	手持式电子设备或远程无线启动器
来自天线的 RF 能量	数百 pW/cm ²	远程无线传感器

图 1 所示）往往采用低性能和复杂的分立型结构，通常包括 30 个或更多的组件。此类设计转换效率低，静态电流高。这两个不足之处均导致最终系统的性能受损。低转换效率将增加系统上电所需的时间，反过来又延长了从获取一个传感器读数至传输该数据的时间间隔。高静态电流则对能量收集源的输出能达到的最低值有所限制，因为它必须首先提供自己工作所需的电流，多出来的功率才能提供给输出。正是在能量收集器这个领域，凌力尔特公司最近推出的产品 LTC3109、LTC3588-1 和 LTC3105 使性能和简单性上提升到一个新水平。这些能量收集 IC 所带来的新性能水平是采用分立式方案完全无法实现的。因此，它们由于能够收集非常低的环境能量而成为了推动能量收集系统制造商成长的“催化剂”。凭借这种性能水平，再加上换能器、微控制器、传感器和收发器经济合算的价位，使其市场接受度得以提升。这也是此类系统在全球范围的众多应用中受到大量关注的原因之一。

一个现实世界的例子：“飞机健康状况监视”

今天，大型机群的结构性疲劳是一个现实问题，因为如果忽视该问题，就可能导致灾难性后果。目前，飞机结构状况是通过多种检查方法来监视的，如通过改进的结构化分析和跟踪方法，通过采用评估结构完整性的创新理念，等等。这些方法有时又统称为“飞机健康状况监视”方法。在飞机健康状况监视过程中，采用了传感器、人工智能和先进的分析方法以实时进行连续的健康状况评估。

声发射检测是定位和监视金属结构中产生裂缝的领先方法。这种方法可以方便地用来诊断合成型飞机结构的损坏。一个显然的要求是，以简单的“通过”、“未通过”形式指示结构完整性，或者立即采取维修行动。这种检测方法使用由压电芯片构成的扁平检测传感器和光传感器，压电芯片由聚合物薄膜密封。传感器牢固地安装到结构体表面，通过三角定位能够定位装载了传感器的结构体的声活动。然后用仪器捕捉传感器数据，并以适合于窄带存储和传送的形式用参数表示这些数据。

因此，无线传感器模块常常嵌入到飞机的各种不同部分，例如机翼或机身，以进行结构分析，不过为这些传感器供电可能很复杂。因此，如果以无线方式供电或者甚至自助供电，那么这些传感器模块就可以更方便地使用，效率也更高。在飞机环境中，存在很多“免费”能源，可用来给这类传感器供电。两种显然和可以方便地利用的方法是热能收集和 / 或压电能收集。

在典型的飞机发动机情况下，其温度可能在几百℃到 1,000℃甚至 2,000℃的范围内变化。尽管这种能量大

多数都以机械能（燃烧和发动机推力）的形式损失了，但是仍然有一部分是纯粹以热量形式消耗的。既然席贝克效应是将热量转换成电功率的根本热力学现象，那么要考虑的主要方程是：

$$P = \eta Q$$

其中 P 是电功率，Q 是热量，η 是效率。

较大的热电发生器（TEG）使用更多热量（Q），产生更多功率（P）。类似地，使用数量为两倍的功率转换器自然产生两倍的功率，因为它们可以获取两倍的热量。较大的热电发生器通过串联更多的 P-N 节形成，不过，尽管这样可以在温度变化时产生更大的电压（mV/dT），但是也增大了热电发生器的串联电阻。这种串联电阻的增大限制了可提供给负载的功率。因此，视应用需求的不同而有所不同，有时使用较小的并联热电发生器而不是使用较大的热电发生器会更好。不管选择哪一种热电发生器，都有很多厂商提供商用热电发生器产品。

通过给一个组件施加压力，可以产生压电，而压电反过来又产生一个电位。压电效应是可逆的，展现正压电效应（当加上压力时，产生一个电位）的材料也展现反压电效应（当加上一个电场时，产生压力和 / 或应力）。

为了优化压电换能器，需要确定压电源的振动频率和位移特性。一旦确定了这些电平，压电元件制造商就能够设计一款压电元件，以机械的方式将其调谐至特定的振动频率，并确定其尺寸以提供所需的功率量。压电材料中的振动将触发正压电效应，从而导致电荷积聚在器件的输出电容上。积累的电荷通常相当少，因此 AC 开路电压很高，在很多情况下处于 200V 量级。既然每次挠曲产生的电荷量相对较少，那么有必要对这个 AC 信号进行全波整流，并在一个输入电容器上逐周期积累电荷。

就能源选择而言，在热源和压电源之间存在权衡问题。不过，不管选择哪一种方法，这两种方法都是可行和现实的解决方案，可以非常方便地与现有技术一起使用。下表总结了这两种方法的优缺点：

能量收集电源转换 IC

LTC3109 是一种高度集成的 DC-DC 转换器和电源管

	优点	缺点
热源	能够连续提供 DC 功率	在一个封闭环境中，温度差可能难以实现（注 1）
压电源	不需要手动地充电。飞机提供大量振动力。	每个组件都必须手动地调谐到飞机的振动频率上。

注 1：在飞机中获得温度差的最佳途径是，获取飞机机舱内“皮”温度与机舱内部温度之差。

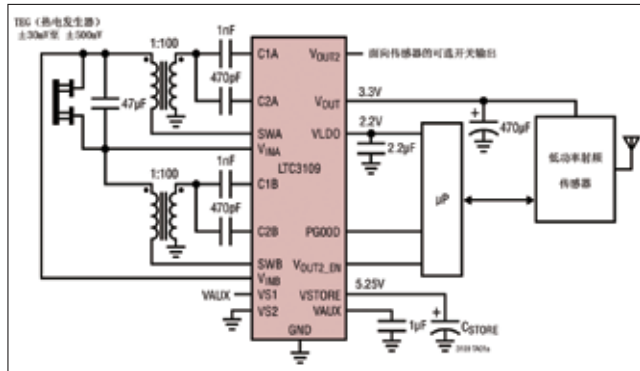


图 2：LTC3109 的典型应用原理图。

理器。它能从诸如 TEG（热电发生器）、热电堆甚至小型太阳能电池等极低的输入电压源收集和管理多余的能量。其独特的专有自动极性拓扑允许该器件用低至 30mV 的输入电源工作，而不管电源极性如何。

上面的电路用两个紧凑型升压变压器来提高 LTC3109 输入电压源的电压，然后该器件为无线检测和数据采集提供一个完整的电源管理解决方案。它能收集小的温度差，不用传统的电池电源，就能产生系统电源。

就低至 30mV 的输入电压而言，推荐使用主 - 副匝数比约为 1:100 的变压器。就更高的输入电压而言，可用更低的匝数比来获得更大的输出功率。这些变压器是标准、现成有售的组件，而且诸如 Coilcraft 等磁性元件供应商可稳定供货。

LTC3109 采用一种“系统级”方法来解决复杂问题。它转换低压源，并管理多个输出之间的能量。用 LTC3109 外部的充电泵电容器和内部的整流器对每个变压器副端绕组上产生的 AC 电压升压并整流。该整流器电路将电流馈送进 V_{AUX} 引脚，从而向外部 V_{AUX} 电容器、然后是其输出供电。

内部 2.2V LDO 可以支持低功率处理器或其他低功率 IC。该 LDO 由 V_{AUX} 和 V_{OUT} 二者之间较高的一个供电。这使它能在 V_{AUX} 一充电到 2.3V 就能有效运行, 同时 V_{OUT} 存储电容器仍然在充电。倘若 LDO 输出上有阶跃负载, 那么如果 V_{AUX} 降至低于 V_{OUT} , 电流就可能来自主 V_{OUT} 电容器。该 LDO 能提供 3mA 输出电流。

V_{STORE} 电容器也许值非常大(数千微法甚至数法拉), 以在输入电源可能掉电时保持供电。一旦加电完成, 那么主输出、备份输出和开关输出都可用。如果输入电源发生故障, 那么仍然可以利用 V_{STORE} 电容器的供电继续运行。

LTC3588-1 是一款完整的能量收集解决方案，为包括压电换能器在内的低能量电源而优化。压电器件通过

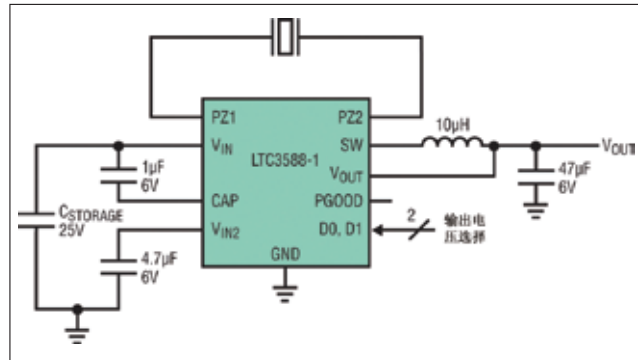


图 3：LTC3588 的典型应用原理图。

器件的挤压或挠曲产生能量。视尺寸和构造的不同而不同, 这些压电元件可以产生数百 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的能量。

应该提到的是，压电效应是可逆的，即展现直接压电效应（一加上压力就产生电位）的材料也展现反向压电效应（一加上电压就产生压力和 / 或应力，即挠曲）。

LTC3588-1 在 2.7V 至 20V 的输入电压范围内工作，从而非常适用于多种压电换能器以及其他高输出阻抗能源。其高效率降压型 DC/DC 转换器提供高达 100mA 的连续输出电流或者甚至更高的脉冲负载。其输出可以设定为 4 个固定电压（1.8V、2.5V、3.3V 或 3.6V）之一，以给无线发送器或传感器供电。输出处于稳定状态（无负载）时，静态电流仅为 950nA，从而最大限度地提高了总体效率。

LTC3588-1 用来直接与压电或可替代高阻抗 AC 电源连接、给电压波形整流以及在外部的存储电容器中储存收集到的能量，同时通过一个内部并联稳压器消耗过多的功率。具 1V 至 1.4V 迟滞窗口的超低静态电流 (450nA) 欠压闭锁 (ULVO) 模式使电荷能在存储电容器上积累，直到降压型转换器能高效率地将部分储存的电荷传送到输出为止。

LTC3105 是一款超低电压升压型转换器和 LDO，专门用来极大地简化从低压、高阻抗可替换电源收集和管理能量的任务，如光伏电池、热电发生器（TEG）、燃料电池等电源。其同步升压型设计以低至 250mV 的输入电压启动，从而使该器件非常适用于在不够理想的照明条件下，从甚至最小的光伏电池收集能量。其 0.2V 至 5V 的宽输入电压范围使该器件成为多种应用的理想选择。集成的最大功率点控制器（MPPT）使 LTC3105 能抽取电源能所提供的最大可用功率。如果没有 MPPT，电源能产生的功率仅为理论最大值的一小部分。峰值电流限制自动调节，以最大限度地提高电源转换效率，同时突发模式（Burst Mode®）工作将静态电流降至仅为

22 μ A，从而最大限度地降低了能量储存元件的漏电流。超低 I_QLDO 能直接给流行的低功率微控制器或传感器电路供电。如果没有 MPPC，电源转换器能产生的功率仅为理论最大值的一小部分。峰值电流限制自动调节，以最大限度地提高电源转换效率，同时突发模式（Burst Mode[®]）工作将静态电流减小至仅为 22 μ A，从而最大限度地降低了能量储存元件的漏电流。超低 I_QLDO 能直接给常用的低功率微控制器或传感器电路供电。

图 4 所示电路采用了 LTC3105, 用单节光伏电池给单节锂离子电池充电。在太阳能能源可用时, 该电路能使电池连续充电, 而当太阳能能源不再可用时, 电池能用储存的能量给应用供电。

LTC3105 能以低至 250mV 的电压启动。在启动时，AUX 输出最初在同步整流器禁止的情况下充电。一旦 VAUX 达到约 1.4V，该转换器就离开启动模式，进入正常工作状态。最大功率点控制在启动时不使能，不过，电流从内部限制到足够低的水平，以允许靠电流非常小的输入电源启动。尽管该转换器处于启动模式，但是 AUX 和 VOUT 之间的内部开关仍然保持禁止，而且 LDO 也是不采用。参见图 5 所示典型启动时序举例。

当 VIN 或 VAUX 高于 1.4V 时，转换器进入正常工作状态。转换器继续给 AUX 输出充电，直到 LDO 输出进入稳定状态为止。一旦 LDO 输出进入稳定状态，转换器就开始给 VOUT 引脚充电。VAUX 仍然保持足够高的值，以确保 LDO 处于稳定状态。如果 VAUX 高于保持 LDO 稳定所需的值，那么就从给 AUX 输出充电转变为给 VOUT 输出充电。如果 VAUX 下降太多，那么电流就重新流向 AUX 输出，而不是用来给 VOUT 输出充电。一旦 VOUT 上升到高于 VAUX，就启动一个内部开关，以将这两个输出连接到一起。

如果 VIN 高于被驱动的输出 (VOUT 或 VAUX) 上的电压, 或被驱动的输出低于 1.2V, 那么同步整流器就禁止, 并以关键的传导模式工作, 从而甚至在 VIN > VOUT 时, 仍能实现稳定状态。

如果输出电压高于输入电压并高于 1.2V 时，那么同步整流器就启动。在这种模式时，SW 和 GND 之间的 N 沟道 MOSFET 启动，直到电感器电流达到峰值电流限制为止。一旦达到电流限制，N 沟道 MOSFET 就关断，SW 和被驱动输出之间的 P 沟道 MOSFET 就启动。该开关一直保持接通，直到电感器电流降至低于谷值电流限制为止，然后重复该周期。当 VOUT 达到稳定点时，连接到 SW 引脚的 N 沟道和 P 沟道 MOSFET 都禁止，转换器进入休眠状态。

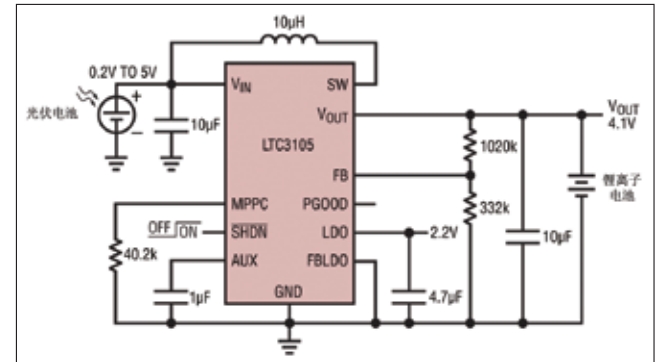


图 4：利用单节光伏电池的锂离子电池涓流充电器。

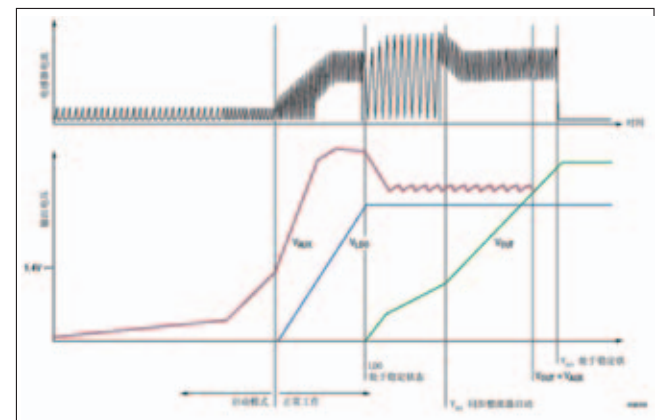


图 5：典型的 LTC3105 启动时序。

为了给微控制器和外部传感器供电，一个集成的 LDO 提供稳定的 6mA 轨。该 LDO 由 AUX 输出供电，从而允许该 LDO 在主输出仍然在充电时达到稳定状态。LDO 的输出电压可以是固定的 2.2V，或可通过电阻器分压器调节。

集成的最大功率点控制电路允许用户为给定电源设定最佳输入电压工作点，参见图 6。MPPC 电路动态调节电感器的平均电流，以防止输入电压降低至 MPPC 门限。当 V_{IN} 高于 MPPC 电压时，电感器电流增大，直到 V_{IN} 被拉低至 MPPC 设定点为止。如果 V_{IN} 低于 MPPC 电压，那么电感器电流就减小，直到 V_{IN} 升高到 MPPC 设定点为止。

LTC3105 纳入了在轻负载时最大限度地提高效率的功能，同时，通过将电感器峰值和谷值电流作为负载的函数加以调节，还在重负载时增强了提供功率的能力。在轻负载时，将电感器峰值电流降至 100mA，可降低传导损耗，从而优化了效率。随着负载增加，电感器峰值电流自动提高至 400mA（最大值）。当在中等负载时，电感器峰值电流可能在 100mA 至 400mA 之间变化。上述功能的优先级低于 MPCC 功能，并仅当电源提供的功

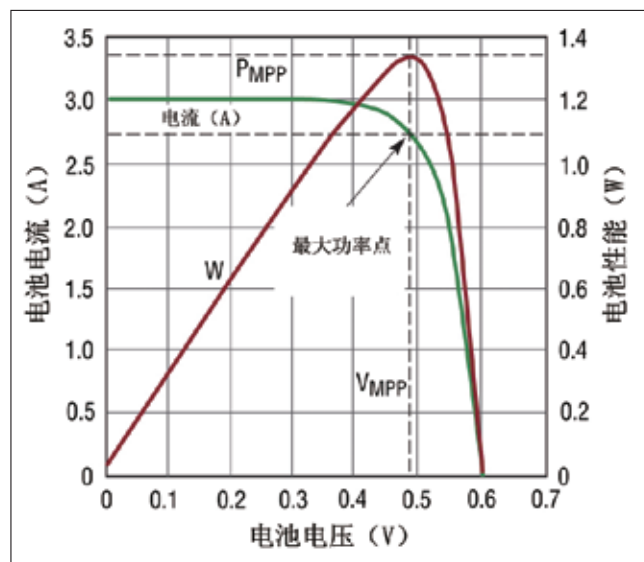


图6：面向单节光伏电池的典型最大功率点控制点。

率超过负载所需时才起作用。

在诸如光伏转换之类的应用中，输入电源也许长时间不存在。为了在这类情况下防止输出放电，LTC3105 纳入了欠压闭锁（UVLO）功能，如果输入电压降至低于 90mV（典型值），那么该功能就强制转换器进入停机模式。在停机模式，连接 AUX 和 VOUT 的开关启动，LDO 置于反向隔离模式，流进 VOUT 的电流降至 4μA（典型

值）。在停机模式，通过 LDO 的反向电流限于 1μA，以最大限度地减轻输出放电。

结论

由于拥有模拟开关模式电源设计专长的人员在全球范围内都处于短缺的局面，因此要设计出如图 1 所示的高效能量收集系统一直是很困难的事。面临的主要障碍是与远程无线感测相关联的电源管理。不过，随着 LTC3105、LTC3109 和 LTC3588-1 的推出，这种状况即将完全改变。这些器件能够从几乎所有的光源、热源或机械振动源提取能量。此外，凭借其全面的功能组合以及设计的简易性，它们还极大地简化了能量收集链中难以完成的功率转换设计。对于 WSN 设计师而言这是个好消息，因为其高集成度（包括电源管理控制和现成有售的外部组件）使之成为目前市面上最小、最简单和易于使用的解决方案。

因此，系统设计师和系统规划师必须从一开始就优先满足电源管理需求，以确保高效率的设计和成功的长期部署。幸运的是，领先的高性能模拟 IC 制造商现在提供越来越多的能量收集电源管理 IC，从而极大地简化了此项任务。

www.linear.com.cn