

飞机结构运用能量收集实现方案

Aircraft Structures Take Advantage of Energy Harvesting Implementations

■ 凌力尔特公司电源产品市场总监 Tony Armstrong

飞机状况监视

飞机老化是许多空难事故的主要原因，为了尽可能地避免灾难发生，所有飞机都须定期接受机身维护检查。

大型机群的结构疲劳曾经是一个需要解决的严重问题，幸运的是，这个问题已经解决了。通过进行更多的检查、改进的结构分析和跟踪方法以及采用新的、创新性理念评估结构的完整性，人们已经解决了这个问题。这有时被称为“飞机状况监视”。监视飞机状况的过程中采用了传感器、人工智能和先进的分析方法，以连续、实时地评估飞机状况。

声发射检测是定位和监视金属结构中产生裂缝的先进方法，它可以方便地诊断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，或者立即进行维修。这种检测方法使用由压电芯片构成的扁平外形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有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甚至实现自助供电，那么这些传感器模块可能更方便使用，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。两种显然的方法是热能收集和压电能收集。这两种方法各有优缺点，下面将进行更详细的讨论。

能量收集的基本原理

从温差（热电发生器或热电堆）、机械振动或压力（压电或机电器件）和光（光伏器件）等可方便得到的物理来源产生电的换能器，对于很多应用来说是可行的电源。众多无线传感器、远端监视器和其它低功率应用正在变成接近“零”电源的设备，它们仅使用收集的能源。

尽管能量收集的概念已经出现很多年了，但是在真实环境中实现的系统一直笨重、复杂并昂贵。不过，有些市场已经采用了能量收集方法，其中包括运输基础设施、无线医疗设备、轮胎压力检测和楼宇自动化。

典型的能量收集配置或系统（由图 1 所示的 4 个主要电路系统方框代表）通常含有一个免费能源。这类能源的例子包括附在飞机发动机等发热源上的热电发生器（TEG）或热电堆，或者附在飞机机架或机翼等机械振动源上的压电换能器。

在热源情况下，一个紧凑型热电器件可以将小的温差转换成电能。而在振动或压力可用的情况下，一个压电器件可以将小的振动或压力差转换成电能。在任何一种情况下，所产生的电能都可用一个能量收集电路（图 1 中的第二个方框）转换，并调整为可用形式，以给下游电路供电。这些下游电子组件通常由某种传感器、模数转换器和超低功率微控制器（图 1 中的第三个方框）组成。这些组件可以接受这种收集的能量，现在收集的能量以电流形式出现，并且唤醒一个传感器以获取读数或测量值，然后通过一个超低功率无线收发器传送这些数据，无线收发器由图 1 所示电路链的第四个方框代表。

这个链中的每一个电路系统方框

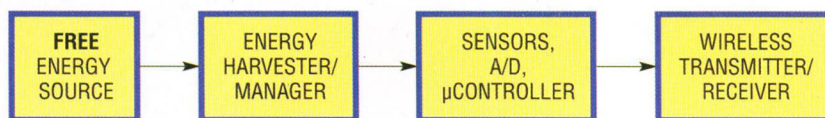


图1 一个典型能量收集系统的 4 个主要方框



都有自己独特的限制，能源本身可能例外，这些限制已经削弱了电路系统经济上的可行性，直到现在情况一直如此。低成本和低功率传感器及微控制器已经上市两三年了，不过最近超低功率收发器才提供商用产品。然而，在这个链中，最落后的一直是能量收集器。

能量收集器方框的已有方案一般采用低性能分立组件配置，通常由 30 个或更多组件组成。这种设计转换效率低，静态电流大，从而导致最终系统性能受损。低转换效率导致了系统加电所需时间延长，反过来又延长了获取传感器读数与发送数据之间的时间间隔。大静态电流限制了能量收集器的输出，因为能量收集器必须首先提供自身工作所需的电流，然后才能够向输出提供任何多余的功率。

能量收集换能器和 IC

一个热电器件的核心组件是热电偶，它由一个 n 型半导体和一个 p 型半导体组成，两个半导体靠一块金属板连接。p 型和 n 型材料另一端加上电气连接，以形成一个完整的电子电路。当热电偶经受热量变化时，就产生热电发生 (TEG) 现象，在这种情况下，热电发生器产生电压，并引起电流流动，从而按照称为席贝克效应 (Seebeck Effect) 的定律，将热量转换成电功率。然后，将大量热电偶串联连接，形成一个热电模块。如果热量在这个模块的上部和下部之间流动，那么就会产生电压和电流流动。

在典型的飞机引擎情况下，其温度可能在几百摄氏度到一千摄氏度甚至两千摄氏度的范围内变化。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，但仍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。

较大的热电发生器使用更多的热量 (Q)，产生更多的功率 (P)。类似地，使用数量为两倍的功率转换器可以获得两倍的热量，产生两倍的功率。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不同，有时使用较小的并联热电发生器，有时使用较大的热电发生器。不管选择哪一种热电发生器，都有很多厂商提供商用的产品，其中包括 Tellurex 公司。

通过给某个元件施加应力可产生压电性，这反过来将产生一个电势。压电效应是可逆的，因为呈现正压电

效应 (在施加应力时将产生一个电势) 的材料同时也表现出逆压电效应 (当施加一个电场时将产生应力/应变)。

为了优化压力换能器，需要确定源的振动频率和位移特性。一旦这些值确定了，那么压电换能器制造商就可以设计一个从机械上调谐到特定振动频率的压电换能器，并调整该压电换能器的大小，以提供必需的功率。压电材料的振动激活正压电效应，在该器件的输出电容上引起电荷积累。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。既然每次偏离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。仍然有很多厂商提供多种商用压电换能器，其中包括 AmbioSystems、MIDE Technology 公司和 Advanced Cerametrics 公司。

不过，迄今为止一直缺少的是，既能从热源又能从压电源收集和管理能量、高度集成、高效率的 DC/DC 转换器解决方案。凌力尔特公司革命性的 LTC3108 和 LTC3588-1 将极大地简化从各种来源收集剩余能量的任务。

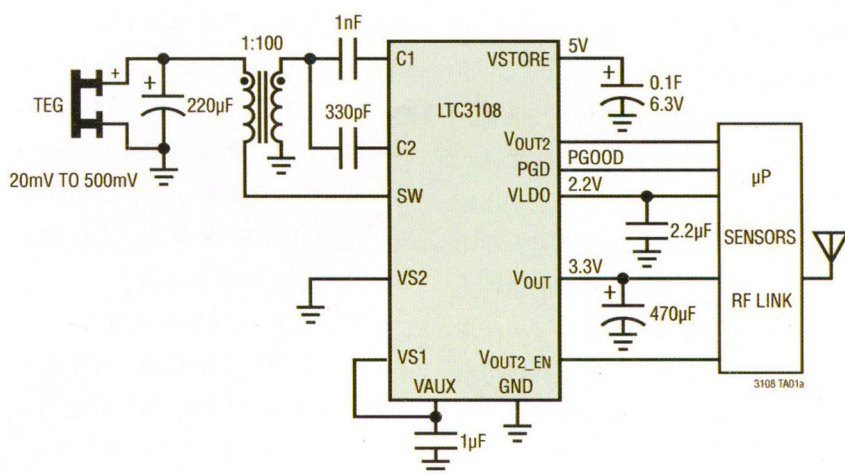
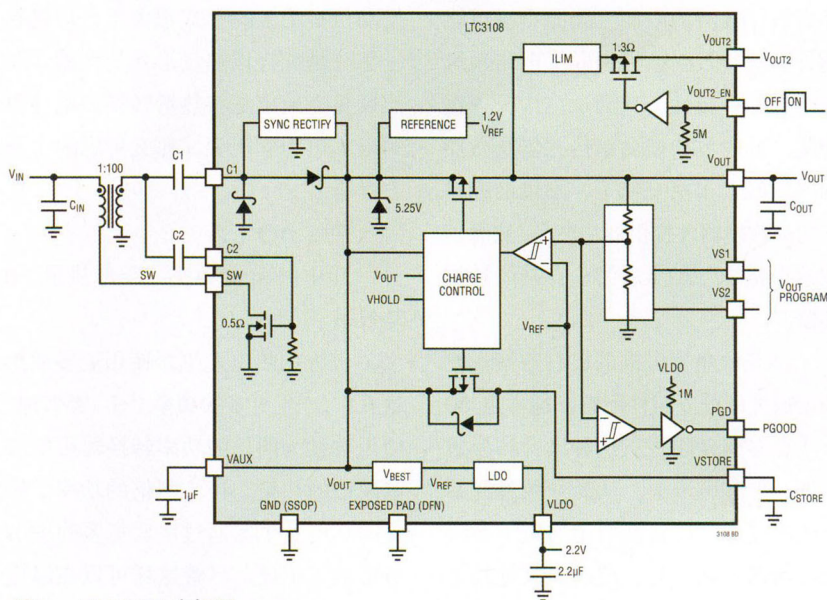


图2 LTC3108 用于无线远端传感器应用，该应用由热电发生器供电 (Peltier Cell)

如图 3 所示, LTC3108 采用一种“系统级”方法来解决一个复杂问题。



V_{OUT} 上的主输出电压靠 V_{AUX} 电源充电, 是用户可编程的, 可用电压选择引脚 $VS1$ 和 $VS2$ 编程设定为 4 个稳定电压之一。4 个固定输出电压是: 用于超级电容器的 2.35V、用于标准电容器和 RF 或传感器电路的 3.3V、

V_{STORE} 电容器的值也许非常大(数千微法甚至数法拉),以在失去输入电源时提供延迟。一旦加电完成,主、备份和开关输出就都可用了。如果输入电源出故障,那么仍可继续运行,这时靠 V_{STORE} 电容器运行。在

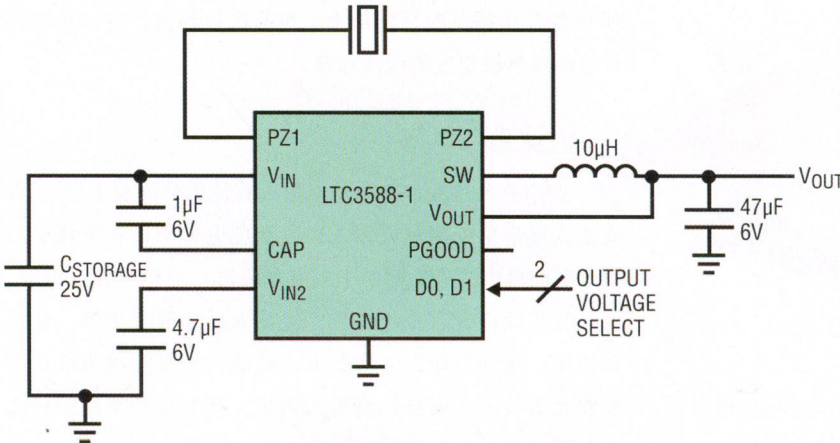
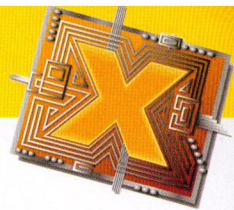


图4 将振动或压力源转换成电流的 LTC3588-1 的电路原理图

表1: 热源、电压源两种方法优缺点比较

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

注 1: 在飞机中获得温差的最佳时机存在于机舱内部上方的飞机“蒙皮”温度与内部机舱温度之差。

V_{OUT} 达到稳定状态以后, V_{STORE} 输出可以用来给一个大的存储电容器或可再充电电池充电。一旦 V_{OUT} 达到稳定状态, 那么就允许 V_{STORE} 输出充电至高达 V_{AUX} 电压, 该电压箝位在 5.3V。 V_{STORE} 上的存储组件不仅可在失去输入源时用来给系统供电, 而且还可在输入源能量不充足时用来补充 V_{OUT} 、 V_{OUT2} 和 LDO 输出需要的电流。

一个电源良好比较器监视 V_{OUT} 电压。一旦 V_{OUT} 充电至其稳定电压的 7% 范围内, $PGOOD$ 输出就会变高。如果 V_{OUT} 从其稳定电压下降超过 9%, $PGOOD$ 将会变低。 $PGOOD$ 输出设计成驱动一个微处理器或其它芯片 I/O, 而不驱动 LED 等较高电流的负载。

图 4 所示电路利用一个小的压电换能器将机械振动转换成一个 AC 电压源, 该电压源馈送进 LTC3588-1 的内部桥式整流器。它可以从小的振动

源收集能量, 并产生系统电源, 而无需使用传统的电池电源。

LTC3588-1 是一种超低静态电流电源, 专门为能量收集 / 低电流降压型应用而设计。它可以直接连接到一个压电或可供替代的 AC 电源, 对电压波形整流并在一个外部电容器中存储收集的能量, 通过一个内部并联稳压器泄放任何多余的功率, 并通过毫微功率高效率降压型稳压器保持稳定的输出电压。

LTC3588-1 的内部全波桥式整流器可通过两个差分输入 PZ1 和 PZ2 接入, 对 AC 输入整流。整流后的输出再存储到 V_{IN} 引脚处的电容器上, 并可用作降压型转换器的能量库。在典型的压电产生电流的情况下, 低通桥式整流器具有大约 400mV 的总压降, 压电产生的电流通常为 10μA 左右。这种桥能够携带高达 50mA 的电

流。一旦在 V_{IN} 上有充足的电压, 就启动降压型稳压器, 以产生一个稳定输出。

降压型稳压器采用迟滞电压算法, 以通过来自 V_{OUT} 检测引脚的内部反馈控制输出。降压型转换器通过电感器将一个输出电容器充电至略高于稳定点的值。它通过以下方法做到这一点: 通过一个内部 PMOS 开关使电感器电流斜坡上升至 260mA, 然后再通过一个内部 NMOS 开关使其斜坡下降至 0mA, 因此可高效率地向输出电容器提供能量。它提供稳定输出的迟滞方法降低了与 FET 切换有关的损耗, 并在轻负载时保持输出。降压型转换器在它切换时提供最小 100mA 的平均负载电流。

结论

就能源选择而言, 在热源和压电源之间存在权衡问题。表 1 总结了这两种方法的优缺点。

由于全世界都缺乏模拟开关模式电源设计专长, 设计一个有效的能量收集系统一直都很困难, 如图 1 所示。不过, 随着 LTC3108 和 LTC3588-1 的推出, 这种状况将为之改观。这些器件几乎可以从任何热源或机械振动源抽取能量, 而热源和机械振动源在飞机环境中是常见的。此外, 这些器件具有全面的功能并易于设计, 因此它们极大地简化了能量收集链中难以实现的电源转换设计。对于飞机状况监视系统设计师来说, 这是个好消息, 因为这些器件具有高集成度, 包括电源管理控制和现成有售的外部组件, 就形成完整能量收集链而言, 这使它们成为最小、最简单和最易于使用的可用解决方案。GEC