

图 2：具传感器 - 发送器负载时的充电。

的最大功率。在我们的实现方案中，PFCB-W14 提供了大约 2mW 的功率。

LTC4071 是一款具可编程浮置电压和温度补偿功能的并联电池充电器。浮置电压设定为 4.1V，其公差为 ±1%，因而产生了一个 4.14V 的最大值——安全地低于电池容许的最大浮置电压。另外，LTC4071 还能通过 NTC 信号检测电池的温度，并在电池温度很高的情况下降低浮置电压以最大限度地延长电池的工作寿命。

LTC4071 能够在内部提供 50mA 的并联电流。然而，当电池低于浮置电压时，LTC4071 将仅从电池吸收约 600nA 的电流。

GM BATTERY GMB301009 电池具有 8mAh 的容量和 10Ω 左右的内部串联电阻。

仿真传感器 - 发送器的建模采用了 Microchip PIC18LF14K22 和 MRF24J40MA 2.4GHz IEEE 802.15.4 射频收发器模块。该射频芯片在发送和接收模式中的吸收电流分别为 23mA 和 18mA。此模型将之表示为一个 12.4mA、0.9% 占空比 (2ms/204ms) 负载，并利用一个自计时数字定时

器和一个负责 267Ω 电阻器开关切换的 MOSFET 来设定。

### 操作模式

该系统具有两种操作模式：充电 - 发送和放电 - 发送。在充电 - 发送模式中，电池被充电而传感器 - 发送器提供一个 0.5% 占空比负载。在放电时，传感器 - 发

送器处于运作状态，但此时并没有从 PFCB-W14 收集能量。

### 充电 - 发送 (Charging-Sending)

当处于运行状态时，PFCB-W14 输送的平均功率约为  $9.2V \times 180\mu A \approx 1.7mW$ 。可用的电流必须对电池进行充电并负责运作用于驱动仿真传感器 - 发送器的降压型稳压器。运行中的传感器 - 发送器在大约 1% 的时间里吸取  $12.4mA \times 3.3V \approx 41mW$  的功率 (即 0.41mW 左右的平均功率)，因而留出了一些电流用于给电池充电。考虑到 LTC3588 降压型稳压器的效率为 85%，当平均  $V_{IN}$  为 9.2V (见图 2)、降压型稳压器静态电流为 8μA 时，在未对电池充电情况下系统所消耗的平均电流为：

$$I_{AVG} = \frac{I_{SENSOR}}{V_{IN(AVG)}} \cdot DUTYCYCLE + I_{O(BUCK)}$$

$$I_{AVG} = \frac{12.4mA}{9.2V} \cdot 0.0098 + 8\mu A \approx 60\mu A$$

收集的能量能够以 0.5% 的占

空比驱动传感器 - 发送器，而留出约 120μA 的电流供电池充电之用。GMB301009 电池的容量为 8mAh，因此它们可在 75 小时左右的时间里充满电。

### 放电 - 发送 (Discharging-Sending)

当 PFCB-W14 未输送功率时， $V_{IN}$  上的电压下降至大约：

$$\frac{8.4 + 6.6}{2} = 7.5V$$

于是，反射负载电流计算公式变为：

$$I_{AVG} = \frac{12.4mA}{7.5V} \cdot 0.0098 + 15\mu A \approx 78\mu A$$

$$\frac{78\mu A}{3.3V} \cdot 0.85$$

降压型稳压器的静态电流较高，这是因为它必须更加频繁地开关以从 7.5V 与 9.2V 进行调节。在 78μA 静态电流条件下，如果没有收集能量，则电池的放电时间大约为 115 小时。这表明电池的电荷存储容量 >8.95mAh。这些电池在全新时所存储的电荷可比额定值高出 12%。

一个更为严重的问题是：当电池完全放电时会发生什么？假如在电池的充电状态 (State of charge, SOC) 达到零之后继续从电池吸收电流且电池电压下降至 2.1V 以下，则电池将遭受永久性的损坏。所以，应用必须确保电池电压绝对不能降至该限值以下。为此，电池截止电压被设定为 2.7V 或 3.2V，以保证在断接电路投入使用之后电池中可保留一些能量。

仅仅停止发送器的运作或将负载断接将无法起到保护电池的作用，因为 LTC4071 吸收约 600nA 的静态电流。虽然这一静态电流非常之低，但包括 LTC3588-1 在内的总负载则接近 2μA。一个完全放电的电池在其电压下降至足以损坏电池之前将只能提供约 100μA 的电流。

需要一个断接电路，以确保电池在一段合理的时间里不至于发生放电。LTC4071 提供了一个内部低电池电量断接电路。经测量，在室温条件下，该断接电路在启动时将产生  $<2\text{nA}$  的电池负载。这一漏电流通常受 PCB 漏电流的支配。当电池漏电流仅为  $2\text{nA}$  时，在其受损之前，电池可在断接状态中工作 50,000 小时。

在图 3 中可见，由于  $2\mu\text{A}$  负载的原因，BAT2 在 BAT1 之后断接 50 小时。

### 测量结果

图 1 所示的系统在“放电 - 发送”（图 3）和“充电 - 发送”（图 4）这两种操作模式中均进行了测量。

### 放电 - 发送

在图 3 中，我们给出了当由电池来提供所有系统能量时（PFCB-W14 压电式传感器未提供任何能量）两个电池 BAT1、BAT2 的电压以及  $V_{\text{BUCK}}$  随时间变化的情况。

电池缓慢放电直到 BAT2 触发 LTC4071 的 LBO 门限为止，随后断接电路启动并使 BAT2 与所有的电路（ $U_5$  除外）断接。这将导致 LTC3588 的  $V_{\text{IN}}$  引脚电压降至稳压器的 UVLO 以下，而稳压器将关断。

BAT1 上的负载是 LTC4071 和 LTC3588 的  $2\mu\text{A}$  静态电流。这个小负载使 BAT1 缓慢地放电，直到 LTC4071 的低电池电量断接功能电路启动为止，BAT1 随即被断接。

### 充电 - 发送

当 PFCB-W14 再次开始向系统输送功率时， $V_{\text{IN}}$  将上升至  $7\text{V}$ ，从而给 LTC4071 中断接 FET 的体二极管施加正向偏置。这将对电池充电，直至达到重接门限为止，进而允许重新连接电池 BAT1 和 BAT2。观察图 4 可以发现，这将表现为  $V_{\text{IN}}$  上的电压迅速下

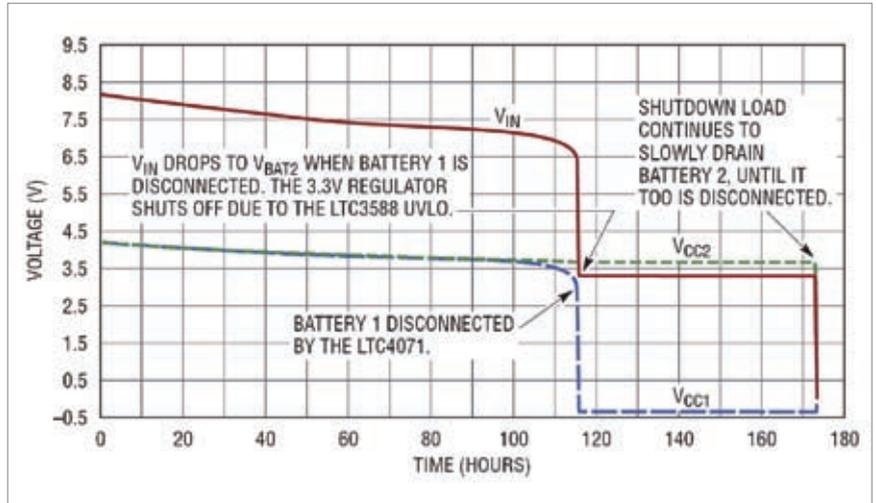


图 3：采用电池欠压断接时的放电情况。

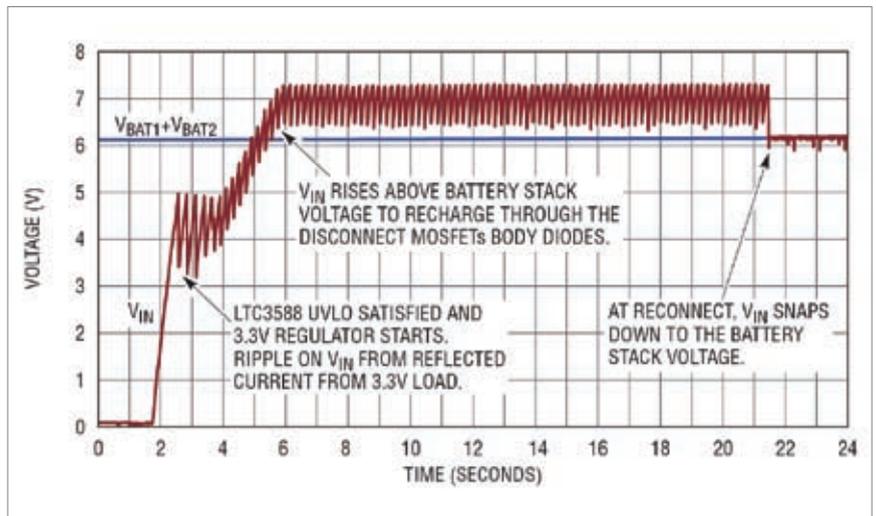


图 4：电池断接恢复充电。

降至电池组电压。

由于  $V_{\text{IN}}$  上的电压现为  $V_{\text{BAT1}}+V_{\text{BAT2}} + (180\mu\text{A} \times 15\text{k}) = 6.2\text{V}$ ，因此 LTC3588 上的降压型稳压器将重新启动，并可再次提供  $3.3\text{V}$  电压。

### 结论

只需借助少量易于使用的组件，即可构建一种适合无线传感器 - 发送器的完整和紧凑型能量收集电源子系统。在此特殊的系统中，由一个压电式传感器提供间歇式电源，而两个电池则负责存储能量以供传感器 - 发送

器之用。一个集成型断接开关用于保护电池免遭过度放电的损坏。

该系统能够在 75 小时内完成电池的满充电，即使以  $0.5\%$  的占空比运作传感器 - 发送器的情况下也不例外。

在 PFCB-W15 停止供电之后，电池将允许系统以  $0.5\%$  的占空比持续运作传感器 - 发送器达 115 小时。如果需要较长的电池工作时间，则可降低传感器 - 发送器占空比以满足这一要求。