



积少成多：如何设计智能燃气表和水表实现能源效率最大化

对于需要 RF 连接的嵌入式控制系统来说，电子水表和燃气表可以作为最具挑战性低功耗设计的典型代表。这些系统的特点是电池供电（例如：燃气表和水表安装点一般不提供墙电），并要求电池使用寿命为 20 年以上。公共事业供应商提出这个要求，是因为仅仅一次专家维护的成本通常就超过智能仪表的全部成本。由于有超长寿命的设计要求，几乎所有水表和燃气表都使用锂亚硫酰氯 (LiSOCl_2) 化学电池，因为其非常低的自放电特性，在仪表中的使用寿命可达 20 年以上。然而，这种电池价格昂贵（约 1.5 美元/安时），导致单个水表或燃气表中电池 BOM 成本高达 10-15 美元。

许多智能仪表供应商决定通过扩展产品的通信覆盖范围使其产品脱颖而出。在他们的系统网络拓扑结构中，一定数量的仪表通过 sub-GHz 网络发送使用和计费信息到安装在电线杆上的中继器，中继器收集汇总信息并通过蜂窝网络或其他回传通道发送到公共事业服务商。中继器可以支持大约 1000 个仪表节点。然而，中继器成本往往是单个仪表节点成本的 10-100 倍。仪表供应商通常要面对来自其客户的压力，要求降低网络中中继器的数量，解决这一问题最现实的方法是提高发射器 (TX) 链路的稳固性。

改进 TX 链路预算的方法有许多。一种最显而易见的解决方案是使用功率放大器 (PA) 增大发射器输出功率。然而就电池使用寿命而言，这种方法的成本也最高。另一种解决方案是增强协议，尽量减少信息错误和随之而来的重传次数。虽然这种技术比简单增加 PA 的方法更加节省功耗，但仍然比当前功率预算增加大约 40%。

假设重新设计的智能仪表有以下三个设计要求：

- 40% 以上的功率预算分配给 TX 功能，以增加覆盖范围
- 维持现有 LiSOCl_2 电池大小 (A) 和容量 (3650mA-hr)
- 维持现有的电池使用寿命 20 年

策略很明确，在 TX 预算范围内增加功耗，但不增加整体功耗预算，这就意味着必须降低其他功能区功耗，例如：RX、工作模式和休眠模式预算。图 1 显示原始功耗预算和重新设计后的目标预算。

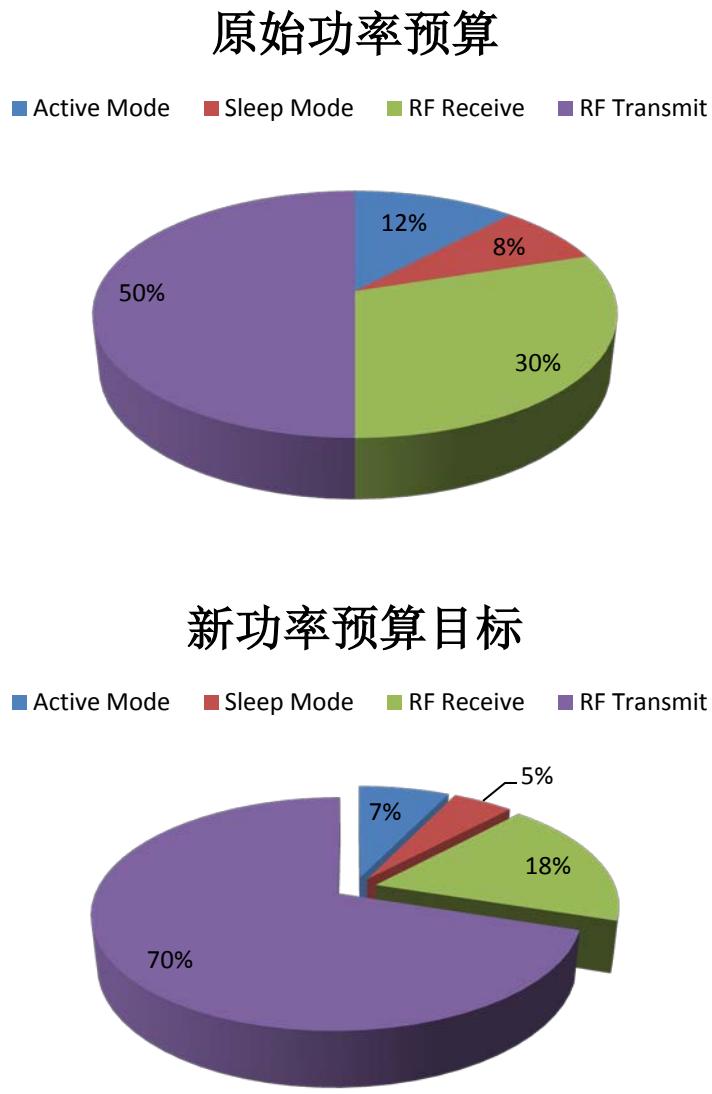


图 1：智能仪表应用功耗预算对比

更高电压转换效率

为了增加 CMOS 电路性能并降低其功耗，芯片设计人员通常采用最小尺寸并且实用的装置来构建集成电路。一般情况下，嵌入式处理器和 RF 收发器采用 $0.18\mu\text{m}$ 、 $0.13\mu\text{m}$ 甚至

90nm 工艺设计。降低装置功率消耗的一个关键指标是降低内部工作电压，从而降低 CVf 开关损耗。

$$i_{switching\ loss} = C_{gate} \times V_{gate} \times frequency$$

即使电池供电装置支持 3.6V 供电电压，装置通常也可以在很低的内部电压下工作。

市场上几乎所有装置内部都集成片上低压差线性稳压器（LDO），当输入电压为 3.6V 时，调节输出一个很低的片内电压，通常为 1.8V 或更低。换句话说，一个输入电压为 3.6V 的线性稳压器输出电压为 1.8V，将产生 50% 转换效率。显然，随着输出电压的下降，这种效率将变得更差。

更先进的嵌入式控制器，例如图 2 中 C8051F960 MCU，集成了比 LDO 控制器效率更高的开关型稳压器。大多数情况下，此装置开关效率可高达 85%，可以降低来自电池的总体电流并延长电池寿命。

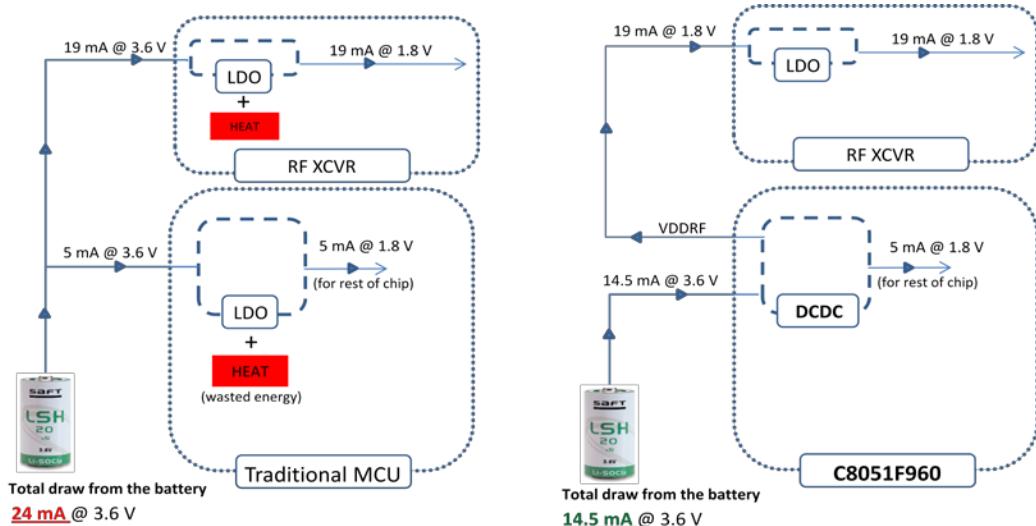


图 2：传统 MCU 和先进 MCU 的开关效率对比

采用这种方法，可以大大降低当前 RX 功率预算。

$$Idd(battery) = \frac{Idd(xcvr) \times 1.8V}{3.6V \times 85\% \text{ efficiency}} \rightarrow Idd(battery) = 62.5\% Idd(xcvr)$$

也就是说，无线电接收器所消耗的电池电流大约是使用 DC-DC 降压转换器（而不仅仅是 LDO）的 62.5%。采用这种方法的实际结果是降低了 RX 电流功耗预算。

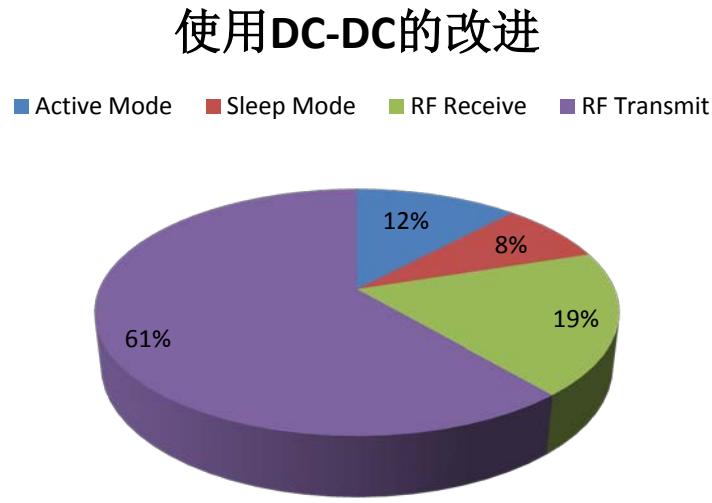


图 3：DC-DC 开关转换器改善 RX 功率预算

随着这一改变的实现，我们已经接近满足新 RX 功耗预算要求（例如图 3 所示：从 30% 降至 19%，尽管目标是降至 18%）。接下来，我们有必要继续优化系统中的其他运行模式。

更低休眠模式功耗

通常，电池供电之仪表 99.9% 的时间处于低功耗休眠模式。因此，尽可能降低休眠模式电路的功耗就变得非常关键。几年前，通过使用 32.768 kHz 的晶体在 3.6V 电压下驱动低功耗唤醒时钟，最佳装置可低至大约 $1\mu\text{A}$ 电流消耗。随着进一步优化和改进，如今在同样电压下装置在使用相同功能时仅需大约 700nA 。虽然净节约仅 300nA ，但实际上该节约完全有效，可以从功率预算中直接减去此数值。

休眠模式下的改进

■ Active Mode ■ Sleep Mode ■ RF Receive ■ RF Transmit

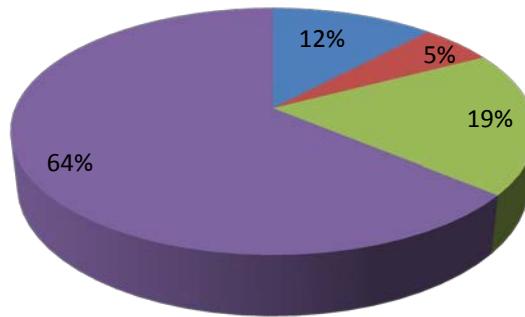


图 4：休眠模式改进对休眠模式功耗预算的影响

采用低功耗休眠模式装置，可以将休眠模式预算从之前的 8% 降低到 5%（如图 4 所示），即可达到设计目标。然而，这仅仅是达到目标，还没有超过目标，仍需要做进一步改善以实现整体设计目标。最后的一个重点是如何降低工作模式的功耗。

降低工作模式功耗

在仪表应用中区分主要的功耗任务很重要。在本文所列举的燃气表或水表例子中，有两个主要任务：

- 为了计算流量，需要每秒钟检查簧片开关状态 20 次。
- 每 15 秒钟创建一个无线数据包，并将这些数据传输到无线发射器进行广播。

在许多计量仪表应用中，都有一个被称作寄存器编码器的装置用于记录燃气或水的流量。在计量系统中，表现为一系列开关事件或脉冲。传统计量系统中，CPU 必须唤醒并对 I/O 引脚的开关状态进行采样。如果开关是物理簧片开关，需要额外 CPU 带宽来反跳开关并控制上拉电阻器，从而确保脉冲有效性并通过闭合开关来尽量降低漏电电流。软件中执行该功能，即使在最优化的系统中也需要消耗超过 $1\mu\text{A}$ 电能。

更好的办法是使用专用输入捕获定时器，这种定时器在装置处于休眠模式时也能自动运行，与基于软件的方法相比，这种技术有很多优点。首先，开关次数可以累计到硬件寄存器上，几乎不需要 CPU 干预。此外，诸如开关反跳、上拉电阻器管理和自动校准的功能，可以直接集成到硬件上。采用两个定时器输入，可以支持判断流量方向的正交解码功能，使系统具备回流检查能力和防篡改功能。在 3.6V 电压下，即使采样率高达 500 Hz，专用低功耗输入捕获定时器所消耗的电流也仅为 400nA，相对于采用软件执行该功能的方法来说是一个显著进步。

当 CPU 运行时，通常从非易失性存储器（例如 Flash 存储器）获取指令。40% 工作模式电流用于闪存读取操作是很常见的。因此，不论在何种情况下，使用专用硬件外设（而非 CPU）来移动数据都可以节省功耗。

当为 RF 传输准备信息包时，数据需要多次编辑。例如，假设需要从仪表传输 20 个字节信息载荷到集中器。最初，这 20 个字节驻留在 SRAM 中；然而，该数据有可能包含客户私有信息，必须对数据进行加密；随后，循环冗余码检验（CRC）计算并将其附在加密信息后面；最后，在通过串行外设接口（SPI）传送到无线收发器前，整个信息将进行编码（例如：Manchester、3:6 等），所有这些功能都可以通过 CPU 以软件方式实现。然而，采用专用硬件执行任务会使系统效率更高，例如图 5 所示专用数据包处理引擎（DPPE）。

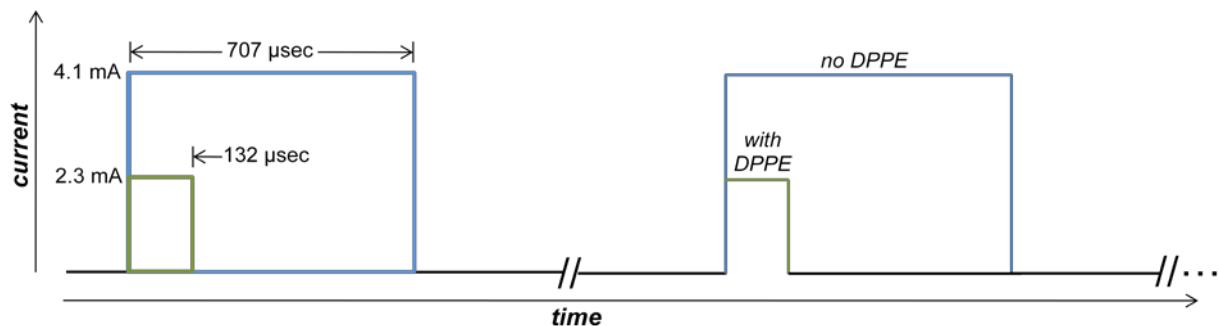


图 5：采用 DPPE 硬件模块的处理时间和功耗节省

使用 DPPE 不仅能减少执行功能所需的时间，还能够降低这段时间内所消耗的电流，因为 Flash 存储器不会被访问。这样工作模式下的功耗最终降幅可达 90%。当完成以上改进后，我们可以超额完成工作模式下的节能目标，所需功耗只占总体预算 6%，如图 6 所示。

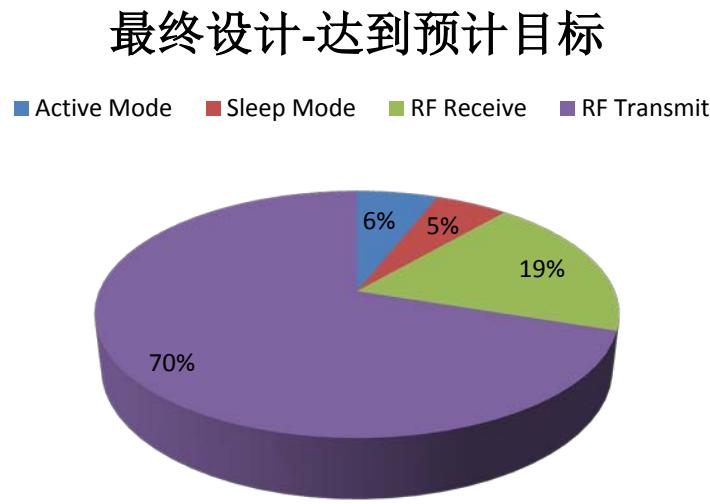


图 6：利用 DPPE 降低智能仪表功耗结果

采用上述三种技术后，我们能够成功将 TX 功耗预算的比重提高到 70%，这完全是从 RX 模式、休眠模式和工作模式中节约功率的结果。换句话说，我们可以达到增加 TX 可靠性的整体设计目标，而这并不需要采用更大电池容量或减少电池使用寿命。

本文所示的例子说明在智能仪表应用中如何通过重新分配整体预算实现节能要求。然而，节能也可通过许多其他方式体现其价值。一个显而易见的例子是能够使用更小、更低成本电池。另一个好处是可以在相同电池条件下延长电池寿命。还有一个潜在的好处是更大设计余量和减小保修负担。设想这样的场景：仪表制造商每年生产数百万台仪表，每台仪表保修服务期限为 20 年。如果仪表因为过度功耗导致在使用 15 年后失效，制造商可能要对数千万台仪表负担潜在的保修责任。因此，额外的设计余量让工程师和投资者都感到放心。

#