

睡眠、感知、连接：低功耗物联网设计

Alan Hendrickson

摘要：无线物联网“物体”可以睡眠、感知和连接。这些任务如何有效地影响能耗，这也涉及功能、尺寸和电池寿命之间的设计权衡。

简而言之，典型的物联网设备执行三个基本功能：睡眠、感知和连接。在许多情况下，物联网设备必须在由电池供电的同时，以无线方式执行这些功能，使其几乎可以放置在家庭或企业的任何地方——甚至是放养的牲畜。几种标准无线协议，如蓝牙低功耗 (BLE)、Wi-Fi、ZigBee 和 Thread，可用于连接，每种协议都有自己的性能权衡，许多制造商选择使用专有无线解决方案优化其设计。

以电池友好的方式运行可转化为低功率，并对平均和峰值功耗有影响。当电池很昂贵，难以触及或处于敏感系统（例如安全或健康监测）时，在充电或更换之间延长电池寿命尤为重要。

假如仓库中含一千个传感器的系统，如果需要每月更换一次电池，我们可以想象一下它的维护成本。让我们研究几个基本概念，以帮助您在您考虑实施新型无线物联网小工具时的关注点，例如电池供电的无线调光开关。



图 1 为在无线数据传输期间，不同操作阶段的电源电流与时间的关系。

当考虑电池供电的设备如何工作时，您需要了解电池本身的特性和限制。需要权衡因素通常包括成本、物理尺寸、容量和寿命。放电和再充电特性在选择中也起着关键作用，对短路行为和极端温度等过载的耐受性也很重要。

例如，熟悉的 1.5V AA 碱性电池的容量约为 2700 毫安时 (mAh)。较小尺寸的 3-V CR2032 锂纽扣电池通常额定电流约为 225 mAh，并且还具有一约 20 mA 最大放电的额外限制。这两种都是常见的解决方案，因为它们成本低、外形小。更高容量的锂 - 亚硫酸氧 (LTC) 电池可用于计量，其较长的寿命和较低的自泄漏抵消了其较高的成本。它们

通常具有 3.6V 标称输出，并且仅限于低输出电流。

不同的化学物质也具有不同的电压特性，因为电池在其整个寿命期间会不断放电或再充电。电池供电的物联网设备的集成电路通常在设计时考虑到这些特性，以提供低压操作、电池耗尽时的故障保护电路以及充电或初始安装期间的过电压保护。

电池组件的工作寿命可以通过电池组的容量除以从电池汲取的平均电流来粗略估算。物联网设备旨在最大限度地降低平均电流消耗，其完成方式在很大程度上取决于应用类型，这表明了在每个基本活动中所花费的时间和精力的比例。

能源消耗概况

在每个活动阶段花费的时间比例会强烈影响电池寿命优化最有效的部分。物联网传感器通常会将大部分时间都花在睡眠中，因此必须让设备闲置以获得低睡眠功率。

物联网半导体器件通常具有超低泄漏电流，保持状态下大概为几微安，这与电池的自放电率相当。这种残余泄漏电流为记住设备状态的电路（例如，其无线连接信息）提供了支持，以便在唤醒后快速恢复活动。同样重要的是，要了解退出睡眠模式需要多少额外功率才能再次完全运行，如果所需唤醒操作效率低下，那么睡眠模式的增益就会迅速消失。

根据应用的特定要求的不同，传感操作中的能量消耗也会有很大差异，但通常可以采用任务所需的处理器 MIPS（每秒数百万条指令）进行扩展。感测阶段的间接能耗发生在多个环节，包括：从睡眠恢复操作、操作传感器电路、执行微处理器指令，然后再次配置部件重新进入休眠状态。MCU 的功率效率通常在一个或多个时钟速率下，以 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 为单位的数据表来表示。由于静态间接电流消耗，较低时钟速率的效率通常较低。

能耗曲线也是所选 RF 通信链路的强大功能，选择最合适的无线协议需要牢固了解系统约束。除了整体能耗目

标,您还需要考虑所需的数据速率、RF 传输频段、信息传输可靠性和延迟、无线传输范围、抗干扰度、软件的复杂性、安全性、峰值功率限制和成本。

Wi-Fi 在单个 20-MHz 信道上的空中传输速度高达 72 Mb/s,但对于大多数电池供电的物联网应用而言,其功耗过高。BLE 的空中传输速度为 1 Mb/s,有效传输约为 250 kb/s,因此具有良好的功率效率,但其星形拓扑结构无法处理多个节点。ZigBee 和 Thread 提供网状网络的弹性和可扩展性,但有效的数据传输速率远低于 250 kb/s 的空中比特率。

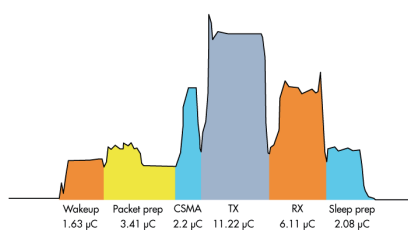


图 2 每相的能耗计算为曲线下面积

所有这些技术都在 2.4GHz ISM 频段中运行,其范围有限。对于 168 MHz 至 969 MHz 范围内的 RF 频段,802.15.4 标准提供了许多经过充分研究的调制方案,有望实现低功耗和高链路预算,这通常具有低数据速率和定制软件堆栈。虽然这些标准化协议可能提供生态系统优势和开发合作机会,但许多设计人员却还是选择完全定制的无线协议来满足其特定目标。

考虑到功率限制,频繁的高功率 RF 传输可能主导设备的能量消耗,并且它们可能违反电池峰值电流约束,或者需要大容量电容器来获取峰值电流。采用低功率窄带传输可以解决峰值功率问题,但不能解决整体功耗问题,因为发射器需要长时间工作。在接收方向上,嗅探 RF 频带或重新同步到网络所花费的长时段也是低效率的,这可能影响与晶体参考的价格和通过睡眠间隔维持粗略协议同步所需的能量相关的系统成本。

选择最佳协议肯定不是一个通用的考虑因素,这是确定所有这些相互关联的约束的关键。它可能会影响系统中关键项的成本,包括 RF 收发器、电源管理、时序参考,以及带有软件、存储器和外设集合的 MCU。

物联网设备的应用情况

让我们来看一个漂亮的物联网设备的例子:壁挂式、电池供电的 Thread 无线调光开关,配有触摸板,可以调

暗灯光或改变颜色。灯泡本身连接到电源,但墙壁开关是电池供电的。因此,您可以轻松地将其放置在房间的任何位置,在需要时重新定位,或者甚至将其放置在移动遥控器中。

在我们称之为同步方案的第一个方案中,我们有一个大部分时间都处于睡眠状态的设备,它的 MCU 被每秒短暂唤醒八次。每次唤醒时,它都会操作电容式感应电路,用于检测触摸板上手指的存在和位置。如果没有检测到手指,它会重新进入睡眠状态。如果检测到手指,则其在触摸板上随时间变化的位置,会通过微控制器中的手势识别算法来处理,从而会向左轻扫使灯变暗,同时向右滑动使其变亮。

当识别出有效手势时,设备通过 Thread 连接到 RF 网状网络,从而向灯泡发送控制消息。在路由器确认后,设备再次返回睡眠状态,直到下一次触摸板被激活。该器件采用 EM3587 ZigBee / Thread 片上系统 (SoC) 器件和 EFM8SB1 8 位 MCU (均由 Silicon Labs 提供) 构建。

在我们的第二个方案中,我们将其称为触摸唤醒方案,调光器采用 Silicon Labs 的 EFR32 无线 Gecko SoC 构建,配置为在检测到手指触摸时唤醒,而不是定期唤醒。手指触摸检测触发进一步的 MCU 驱动的手指手势评估。同样,有效的手势会使你 Thread 连接到灯泡,然后返回睡眠模式。在构建和测量第一个方案时,触摸唤醒方案是纸张设计。

睡眠

在这两种方案选项中,电池寿命的规划涉及考虑睡眠模式能耗、设备响应时间和 RF 通信链路的要求。

为了最大限度地降低物联网无线 MCU 中的睡眠模式能耗,设备中的大多数进程都会暂停,某些电路可能会断电。通常需要保持活动的电路包括控制睡眠和唤醒序列的电源管理电路、保持器件引脚状态的 I / O、提供时序参考的振荡器和唤醒定时器,以及保持状态用以最终唤醒和操作设备的内部逻辑和存储器。

在我们的同步方案中,我们选择了最小泄漏电流配置,消耗约 1.5µA,从而使 EM3587 中的低功耗 RC 振荡器和唤醒定时器能够每 125ms 唤醒调光器中的 MCU。选择 125 毫秒的数字延迟低于用户可察觉的延迟。我们的触摸唤醒方案在睡眠模式期间启用了额外的异步阈值检测电路,将泄漏电流增加到 6.7µA,但优化了手指触摸的响应时间,并且无需定期 MCU 唤醒来检查触摸板。

睡眠模式也受到 Thread 协议的限制,默认情况下,

该协议需要至少每 320 秒将设备连接到网络。为了安全边际，我们将设备配置为每两分钟连接一次。如果调光器开关未按时检入，则网络可以将设备报告为无序，例如当电池最终没电时。

传感

调光开关使用电容传感器，其包括一系列专用输出驱动器和连接到触摸板上的行和列的输入放大器，从而可以检测与手指在触摸板上的位置相关的电容变化。模拟信息由 ADC 捕获、过滤并存储在缓冲区中。缓冲器内容由软件处理，以确认手指在触摸板上的存在并识别手指位置的移动，称为手势。

触摸板检测确定同步和触摸唤醒方案的睡眠值和感应能量消耗。

用于手势识别的 SoC 的制备涉及将操作电源电平恢复到所需电路，打开和建立振荡器以用于定时参考，以及在微码中执行算法之前，继续将逻辑上下文恢复到微处理器数字内核。在感测并且可能 RF 连接完成之后，设备返回睡眠状态，从而反转事件的加电序列。

在我们的同步方案中，低功耗唤醒定时器定期触发并触发一系列微处理器指令，以检测手指的存在。在我们的触摸唤醒方案中，电容传感器自主操作，仅在检测到由于手指触摸引起的阈值交叉时才产生触发。这种自主操作需要额外的电流，但意味着微处理器仅在实际触摸键盘时才需要操作，这可能让整体功率得到节省。

表 1 显示了同步和触摸唤醒方案的睡眠和感应能耗的预期值。它揭示了睡眠电流的增加，周期性唤醒电流的减少以及触摸事件的相同值，因为手势识别功耗由驱动外部电容式触摸网络所需的电流支配。

TABLE 1: SLEEP AND ENERGY-CONSUMPTION VALUES DETERMINED BY TOUCHPAD DETECTION		
Parameter	Synchronous implementation	Wake-on-touch implementation
Sleep current	1.5 μA	6.7 μA
Periodic wakeup and sensing	0.86 μC per event	0
Lighting (touch) event	2152 μC per event	2152 μC per event

连接

调光器开关每两分钟与无线网状网络连接，并在称为

长轮询连接的操作中，检查来自互联网网关的消息。在无线查询连接期间，它还每 30 分钟检查一次网络是否有系统更新。

在我们的调光器开关中，我们使用 Thread 网状网络，它利用 2.4 GHz ISM 频段中的 802.15.4 DSSS-OQPSK 物理层。Thread 使物联网设备可以使用 IPv6 进行寻址，从而可以在边界路由器上轻松转换为互联网流量，因此几乎可以从世界上任何地方进行访问。这意味着您可以使用 iPhone 远程监控或调暗灯泡，您可以读取电池供电的墙壁开关是否在线或需要更换电池，甚至是上次有人使用它时的时间戳。

物联网设备能耗的很大一部分可能用于射频通信，因此必须仔细设计有功率消耗。图 1 显示了在数据轮询数据包连接期间捕获的 EFR32 SoC 的电流消耗曲线。

波形的开端对应的是设备的加电和唤醒，以及用于传输的无线电和分组信息的准备，在图上用标识符 1-4 标记（图 1）。在开始传输之前，设备检测是否有另一个发射器，这时标记为 5 的波形的 CSMA 部分就会发生。标记为 6 的发射部分是功耗最高的阶段。峰值持续电流约为 18.6 mA，短暂瞬态略高于 20 mA，这仅在单个纽扣电池的容许范围内。分组传输的后面是等待确认的接收模式。在接收和处理确认之后，设备返回睡眠状态。

整个连接处理时间为 3.3 ms，测量该间隔的积分电流为 26.5 μC （图 2）。图 3 描绘了无线连接的每个阶段中使用的能量，并且示出了发射（TX）部分支配功耗。使用 EM3587 SoC 的相同连接消耗 55 μC 。

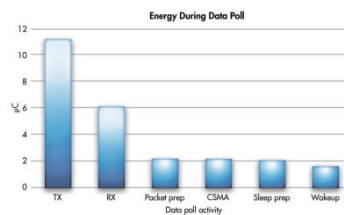


图 3 无线连接的分析可以识别候选者以进行优化

寿命

为每个实施方案添加总能量消耗的便捷方法是计算每个事件的电荷消耗（以 μC 为单位）乘以每天的事件数（表 2）。对于睡眠和电池自放电电流的贡献，将总泄漏电流（以 μA 为单位）乘以一天的长度（以秒为单位）。这些 $\mu\text{C}/\text{天}$ 电荷消耗值的总和，直接转换为每天电池消耗的 mAh。两种实施方案之间的数据轮询和 OTA 查询连接中的功耗差异

TABLE 2: CALCULATING ENERGY CONSUMPTION			
Parameter	Events per day	Synchronous implementation	Wake-on-touch implementation
Sleep current	86.4k	1.5 μ A	6.7 μ A
Periodic wake/sense	691k	0.86 μ C per event	N/A
Lighting touch event	Variable	2150 μ C per event	2150 μ C per event
Data poll transaction	720	57.1 μ C per event	26.5 μ C per event
OTA query transaction	48	906 μ C per event	424 μ C per event
Battery self-discharge	86.4k	1 μ A	1 μ A

的导致原因是 EFR32 SoC 器件中的能量效率改进。

能量消耗可以通过将每个事件的电荷消耗乘以每天的事件数来计算。

图 4 绘制了每个实施的调光器电池的预期寿命，作为触摸板的平均日常活动的函数，假设单个 CR2032 电池具有 200mAh 的可用容量。由于没有任何触摸板活动，我们可以预期同步解决方案的使用寿命约为 2.4 年，触摸式唤醒版本的使用寿命约为 2.9 年，这是由平均睡眠模式功耗和电池自放电所驱动的。

随着活动增加到每天 200 次触摸，同步解决方案的寿命减少到 1.5 年，相当于大约 110,000 个触摸板事件。对于触摸唤醒，同样的情况会导致大约 1.75 年或 128,000 个触摸板事件。将曲线向右延伸（图 4）显示出触摸式唤醒解决方案的优越性，即使每天超过 500 次触摸。

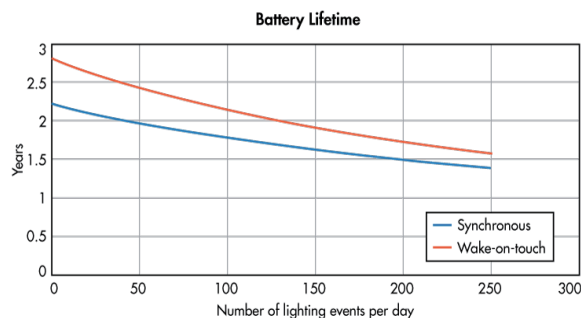


图 4 调光器电池的预期电池寿命是平均每日触摸板活动的函数

总能耗

为了优化电池寿命，比较每种操作模式下每天的能耗是很有用的。假设每天发生 30 次照明事件，设备每种状态下消耗的能量比例以及电池自放电的影响如图 5 中的饼图

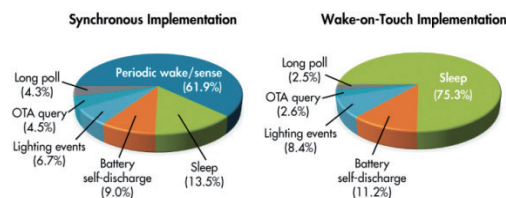


图 5 周期性唤醒 / 感知主导同步实施，而睡眠模式主导触摸唤醒实施。

所示。

在同步解决方案中，迄今为止最大的贡献者是周期性唤醒和感知操作，为 61.9%，其次是睡眠为 13.5%。通过增加唤醒事件之间的间隔来允许更大的检测延迟，可能会大大改善生命周期。在触摸唤醒方案中，75.3% 的电池寿命用于睡眠模式。睡眠模式电流的改善对电池寿命最有利。

考虑到触摸唤醒解决方案中，睡眠模式电流消耗增加的权衡，所以这些结果并不令人惊讶。同步解决方案的周期性唤醒 / 感测和睡眠数据共计为 75.4%，几乎与触摸唤醒睡眠模式百分比相同。

除了检查每个实施中每种模式所消耗的能量比例之外，比较绝对消耗量也很有帮助。图 6 证实了触摸唤醒功能的主要改进在于总周期性唤醒 / 感测和睡眠能量之间的权衡，而增量改进与无线 SoC RF 连接的功率效率有关。

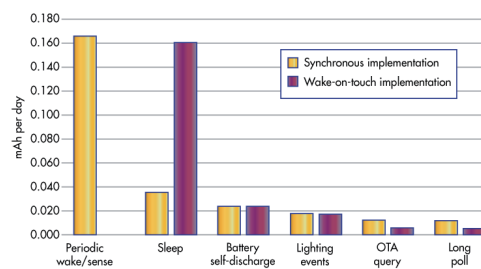


图 6 每日绝对能源消耗图表显示了实施中的权衡

成功设计无线物联网设备的关键包括设备睡眠、感知和连接间隔的表征，然后进一步分析每项任务中的能耗。通过了解每项能效贡献的权衡，物联网设备开发人员可以优化电池供电的无线节点设计，以增强功能和延长电池寿命。