

基于太阳能供电的远距离无线通信模块在智能电表中的低功耗设计

余三平

浙江瑞银电子有限公司 浙江 杭州 311100

【摘要】：在农业灌溉、野外监测以及偏远地区用电管理等没有市电接入的地方，智能电表远程无线通信模块完全依靠电池或者太阳能供电，在这些场景下的功耗是影响系统续航时间与可靠性的重要因素。针对无市电情况下智能电表无线通信供电困难的问题进行分析，提出太阳能供电方式可行性和低功耗的重要性。构建了由光伏板、电池组以及负荷消耗能量平衡方程，并比较 LoRa、NB-IoT 和 4G Cat.1 这三种远距离无线通讯方案的能耗特点及应用范围。在此基础上，提出面向太阳能供能系统的低功耗软硬件设计方法，即低功耗硬件平台配置及电源通路控制、通信模组间歇式激活及休眠控制、基于能量状况的上送时间间隔自动调节算法和太阳辐射预估及能量储备方案，并在现场试验中发现，此设计可以在平均每天有超过两个小时阳光的情况下进行全天候工作，在很大程度上减少了工作人员去现场维修的工作量，在没有电力供应的地方也能给智能电表提供一种合理的解决方案。

【关键词】：智能电表；太阳能供电；远距离无线通信；低功耗设计

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.059

一般而言，智能电表是整个电力物联网中的一个终端传感设备，并由市电为智能电表供电，所以对于电表内嵌的通信模组来说，不需要考虑电量的问题。但是，在一些特定的应用领域如农业灌溉机井、野外配电终端、山区偏远用户以及临时用电等没有市电接入的地方，这些区域安装的智能电表不能够直接从电网获取电能供应，只能依靠电池或者当地的可再生资源进行发电。而这些场景还往往伴随着通信条件差的问题——离基站远、信号衰减大，需要使用传输距离长的无线通信模块以较大的功率发射信号，又增加了耗电量。传统的纯电池供电难以支撑其续航能力增加，以大容量锂电池组为例，在每日一次上报、发射功率 20dBm 的典型工况下，续航时间通常仅为数月至一年，之后需要现场更换电池。对于分布分散、交通不便的偏远站点，电池更换的人力成本远超电池本身，甚至使得智能电表部署在经济上不可行。太阳能供电成为一种具有吸引力的替代方案——日照资源在大多数地区普遍可得，光伏发电可对储能单元持续补能。但太阳能供电的间歇性、波动性及有限功率特性，对无线通信模块的能耗提出了严苛约束。

1 远距离无线通信技术选型与功耗特性分析

1.1 LoRa、NB-IoT、4G Cat.1 等技术的覆盖距离与功耗对比

长距离无线通讯是解决无市电地区智能电表远程抄表的核心。现阶段主要应用的是 LoRa 技术、NB-IoT 技术以及 4G Cat.1 技术，这三种方式有着不同的传输半径、能耗和对网络的需求。LoRa 是一种采用扩频调制方式的低功耗长距离无线传输技术，在郊区空旷环境下的点到点传输距离为 5~15 km；

优点是功耗非常低：接收电流约为 5 mA，睡眠状态的电流可以小于 1 μ A，发射电流根据所选功率级别通常介于 20 mA 和 120 mA 之间；缺点是需要自己搭建网关或者使用第三方的网关。而且速率较低（一般为 300bps~5kbps），不适合大量信息传送。NB-IoT 是基于蜂窝物联网的窄带技术，利用运营商基站覆盖，不需要自建网关。一般 NB 覆盖距离在 1~3km，在室内的穿透能力以及地下场景较好。NB-IoT 模块的功率比 LoRa 大，但是比传统的 4G 小，接收电流大概是 20mA~40mA，睡眠电流可以达到最低 3 μ A~5 μ A，但每次入网和传输的协议消耗大。对于信号比较差的地方，最大发射功率可以达到 23dBm 的水平，耗电明显增大。

4G Cat.1 是为物联网应用而设计的 4G 标准，支持最大 10 Mbps 下行及 5 Mbps 上行速度，能同时传送语音以及相对较大的数据量。相比前面两个方案，Cat.1 的功耗较高——模块接收电流在 50 mA 左右至 80 mA，发射峰值达到 300 mA 以上，待机电流也有几毫安。不过 Cat.1 优势也很明显，网络成熟，时延较低，兼容性强。适用于需要经常通信或者较大数量的数据量的情况。

总体比较而言，LoRa 在超低功耗+远距离方面占优，适用于每天 1~2 次小流量上云；NB-IoT 是折中方案，在功耗和联网便捷程度间取舍，适用于有运营商覆盖、数据量不大的场景；Cat.1 只能作为最后手段，除非对实时性或者数据量要求很高。针对太阳能供电的智能电表来说，NB-IoT 是次优，LoRa 是最优，Cat.1 只是特殊情况下的补充。

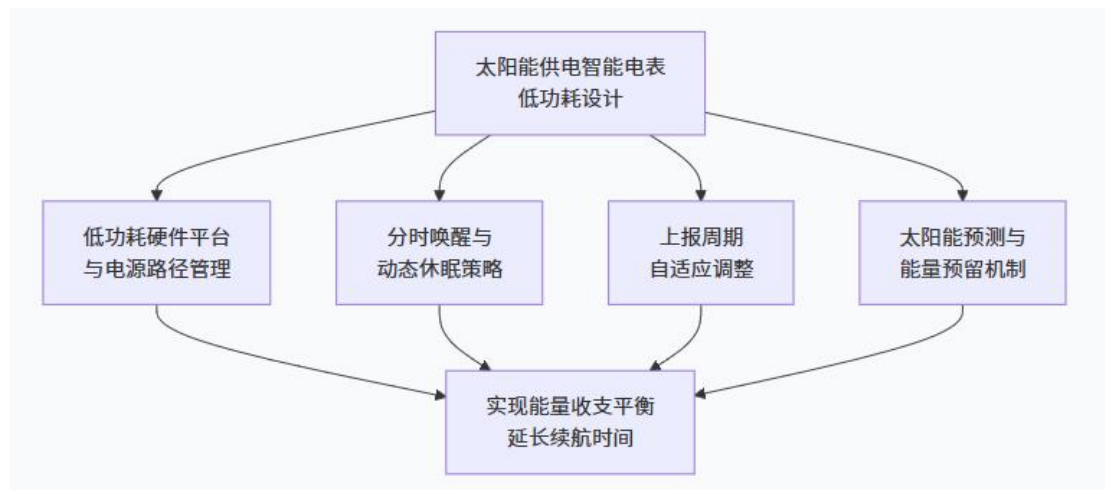
1.2 远距离通信模块的工作状态划分与功耗分布

远程通讯单元的功率不是固定不变的,会根据运行模式而发生变化。常见的运行模式有以下几种:休眠状态、低速运行状态、接收状态、联网状态、发送状态。

深度睡眠模式下,只保留唤醒定时器和少量寄存器,射频、时钟以及大多数外设关闭,功耗最小(LoRa 约 $1\ \mu\text{A}$, NB-IoT 约 $3\ \mu\text{A}$);轻度睡眠保持实时时钟运行和随机存取存储器保持,唤醒时间比较短,功耗稍大(几 μA 至几十 μA);接收保持状态开启接收通路,下行监听状态:功耗较高(LoRa 大

概为 5mA , NB-IoT 大概为 20mA);入网同步状态:包括基站搜寻、注册、附着过程,在此状态下有多个收发事件,瞬间功耗较大,但持续时间很短;数据发射状态:这是功耗最大的状态,发射功率每增大 3dB 功耗大概加倍,当发射功率为 20dBm 时功耗在 $80\text{mA}\sim 120\text{mA}$ 之间。

功耗分布分析表明,降低系统总能耗的关键不在于压低发射峰值(其持续时间短),而在于缩短高功耗状态的驻留时间,尤其是待机接收和入网同步时长。对于太阳能供电系统,应尽可能让模块长时间处于深度休眠,仅在必要时唤醒完成数据收发后立即返回休眠。



1.3 发射功率、数据速率与能耗之间的权衡关系

发射功率、数据速率与能耗具有复杂的折中关系。增大发射功率可以提高通信距离及链路余量,减少由于重发产生的额外能耗,但是直接增加了单次发送的瞬时功耗;减小数据速率可以提高接收灵敏度和覆盖距离,但是会增加空中传输时间,使得发射电路的工作时间增加,总体能耗反而会升高。比如 LoRa 中,扩频因子由 7 变为 12,速率由 5kbps 变为约 300bps ,接收灵敏度提高约 9dB ,但是传输时间变长了 16 倍,传输同样多的数据量的总能耗可能增加了几倍。

因此,低功耗设计要在链路预算和能耗上找出一个工作的最佳点。原则是在保证可以成功传输的情况下,使用最低可能的数据率来减小所需的发射功率,但又不能把数据率降得太过以至于会花费太多的时间去传输。实际上,在优化过程中可以根据信号强弱(接收信号强度指示)来对发射功率及扩频因子进行调整,采用动态调速法。对太阳能电池供电的系统,在能量充足时可以调高码率和发射功率来减少空中时间,而在能量不足时可以调低码率和功率来减少单次功耗——这似乎违反直觉,但需要结合具体器件的性能进行准确计算。

2 面向太阳能供电的低功耗软硬件协同设计

2.1 低功耗硬件平台选型与电源路径管理

太阳能供电智能电表以低功耗硬件平台为基础。主控芯片

宜采用 ARM Cortex-M0+/M4 内核低功耗 MCU,具有多模式休眠功能,深度休眠电流小于 $1\ \mu\text{A}$,唤醒时间低于 $1\ \mu\text{s}$;内置可配置时钟门控及电源门控技术,实现部分外围器件关断。根据上述分析,通信模块采用 LoRa 方案为优,并且该模块应该支持独立的休眠引脚控制及快启功能。

电源路径管理负责将光伏、电池和负载进行连接。最佳设计应该提供两个电源路径:一个是经过充电电路从光伏到电池;另一个是从电池经过低压差稳压器到达负载。在光伏功率充足的情况下,负载可以直接由光伏供电,并将多余的电力储存在电池中,在光伏功率不足的情况下,用电池补足差额;夜晚或者阴天情况下,全用电池供电。电源通路管理还需实现负载分级断电的功能——当电池电压降到一定数值的时候,先关掉一些非关键性的负载(例如频繁上报),剩下关键性的负载不被关闭(例如实时钟和低频心跳);再降下来后,则进行保护性掉电。

2.2 通信模块的分时唤醒与动态休眠策略

本文提出的分时唤醒机制是建立在大部分时间智能电表并不需要与主站保持在线的状态下的假设基础之上。对于无市电情况的用电信息采集来说,每天上报一次或者几条累计电量、状态和告警信息就可以满足业务的需求了。分时唤醒机制就是把时间分成若干个超帧,在每个周期只设置一个或者几个较短的唤醒窗进行通讯,其他时间模块进入深度睡眠状态。

唤醒窗应结合数据上送业务进行调度,常见做法为每天某一时刻唤醒,将前一日采集到的数据进行封装后上传服务器,并随即进入睡眠状态。若需要接收主站下发命令(例如远程跳闸),则在每日增加若干个较短的接收窗,处于该窗内时模块只收不发,低能耗待机。智能休眠机制依据历史发送消息的成功率以及节点当前的能量情况,决定开启多少个唤醒窗口及间隔时间:在有充足能量的情况下,尽可能多开唤醒窗口,减少通信延迟;而在能量不足时,则少开唤醒窗口,节省能量。

2.3 数据上报周期的自适应调整算法

固定周期的数据上报不能很好地应对太阳能供电的能量变化情况。自适应调整算法的主要思路为:基于储能单元的剩余能量以及未来的日照预测来动态地调整上报周期,使得能量收支达到平衡的状态。该算法的输入变量有:当前电池电压、过去24小时的光伏发电量、未来24小时的天气预报(可选)、单次上报能耗。下次上报间隔时间:输出为下次上报间隔的时间。

其基本思路是,若电池电压大于某个阈值(如90%电量),说明有充足的电能支持,可以降低上报频率或者增加上报信息量;若电池电压处于某两个阈值之间,则采用标称的上报频率;若电池电压小于另一个阈值(如20%电量),则进入节电模式,将上报频率大大延长(比如由每天上报一次变为三天上报一次),直到电量充足为止。为了避免周期过频变化的情况,算法中应该加入滞回区间以及状态保持的时间;针对一些实时性要求高的异常事件,比如电流超限报警、开盖检测报警,可以采用单独的高优先级通道进行上报,不受到周期变化的影响来保证安全监视的及时性。

2.4 太阳能预测与能量预留机制

太阳能预测及能量预留:为提高系统在连续阴雨天气下的生存能力,太阳能预测及能量预留是必不可少的技术手段。太阳能预测可以采用气象数据或者历史统计的方法来实现。最简单的是“昨天就是明天”——把昨天一天的光伏发电量作为今天一天发电量的估计值。更加精确地可以使用气象服务接口,获取短时气象信息如云量、降水量的概率等,并根据光伏组件的物理模型估计出力值。

参考文献:

- [1] 印正誉,姚春羽,蔡仲言.一种基于ESP32的智能电表无线通信模块设计[J].数字技术与应用,2021,39(07):16-18.
- [2] 于华东,欧清海,张喆,等.智能电表微功率无线通信模块天线方向性[J].应用科学学报,2017,35(01):11-20.

留量管理功能为储能装置设置一个“留量”,当储能装置剩余容量小于“留量”时才进行放电,同时“留量”容量不会被正常的留量管理功能或上报周期调整算法所使用。“留量”的作用主要是保证装置时钟正常走时、紧急报警能够发出,以及保证装置能在特殊情况下实现一次完整的“临终上注”功能(所谓“临终上注”即最后一条上注消息是上注当前装置状态信息,然后装置进入安全关闭)。应急备用库容按该地区连续最大阴雨天数确定,一般取总量的15%~25%。通过太阳能预测以及能量预留,可以做到在太阳变差之前主动降耗以增加续航能力,从而避免因为能量用尽而造成的丢数断联现象。

3 工程应用与性能验证

经过实际场景应用测试,在华北地区某灌溉区域,安装有LoRa模块的太阳能供电的智能电表每天平均日照时间为2.5小时,持续使用了9个月时间,没有发生由于电量不足而导致终端离线的情况;经统计,该智能电表的光伏板每日平均产生电量为4.2Wh左右,平均用电负荷为3.8Wh左右,剩余电量裕度约为10%,即使在连续5天的大雨情况下,该套设备利用动态延缓上报间隔时间(由1天1次变为2天1次)的方法坚持到有太阳的时间,最低电池电压没有达到下限;太阳能电源比电池电源能节约60%左右的成本(包含电池维护人员及车辆),以3年为一个使用周期计算。

4 结论

采用太阳能作为远程无线通讯模块的电源方案是解决无电源地区智能电表安装的一个有效途径。笔者首先对电源难题进行了阐述,并给出了由太阳能电池板、蓄电池和负载三部分组成的能量守恒方程,同时比较了几大主流无线通讯模组LoRa/NB-IoT/4G Cat.1的能耗情况及其使用条件限制。同时,给出了适用于太阳能供电环境下的低功耗软硬件设计策略,包括低功耗开发平台的选择、电源通道的设计、定时唤醒及睡眠、定时上报时间间隔的自动调节,以及基于太阳能预估的能量储备等功能。实测结果表明,在平均每天有超过2h有效日照的情况下可以稳定工作,大大节约运维费用。后续的研究可以考虑多种能源互补(光伏发电+微型风电)和利用机器学习进行精准化日照预报及低能耗的通讯协议栈开发等问题。