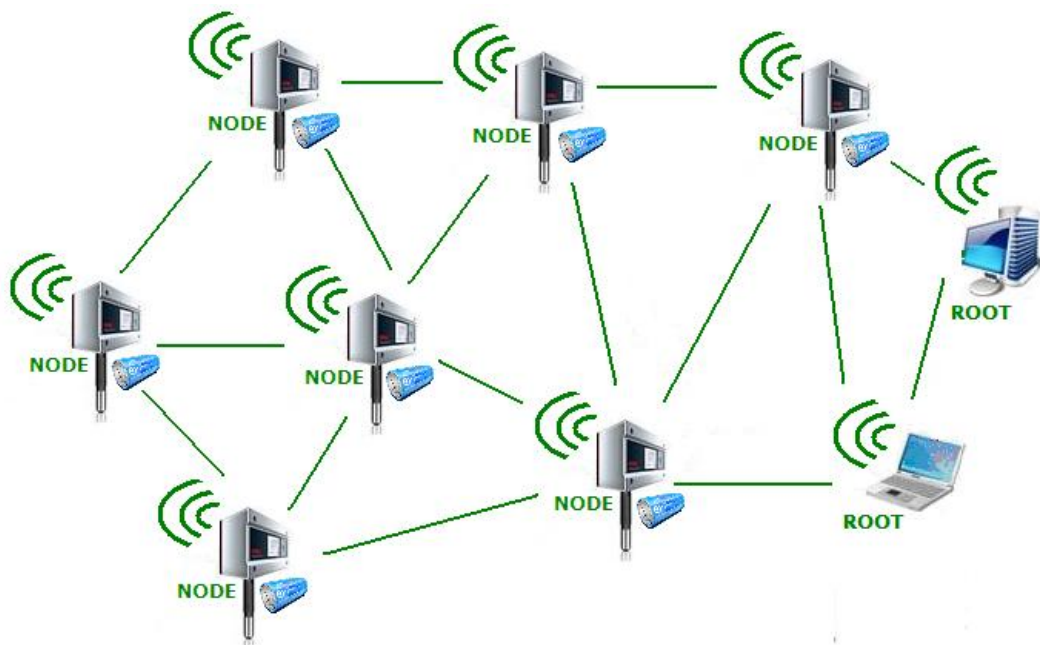


WAVE MESH

低功耗无线传感网络解决方案



目录

1. 简介	2
2. 概述	2
3. 外部传感器/仪表电源管理	5
3.1 IO 引脚唤醒	5
3.2 UART 唤醒	6
4. 同步休眠	6
5. 混合休眠	11
6. 功耗估算	13
6.1 异步唤醒过程功耗估算	14
6.2 等待外设响应过程功耗估算	14
6.3 数据传输过程功耗估算	15
6.4 空闲超时过程功耗估算	15
6.5 休眠报文下发过程功耗估算	16
7. 实际应用案例	18
7.1 协议配置	18
7.2 基本配置	19
7.3 功耗估算	20

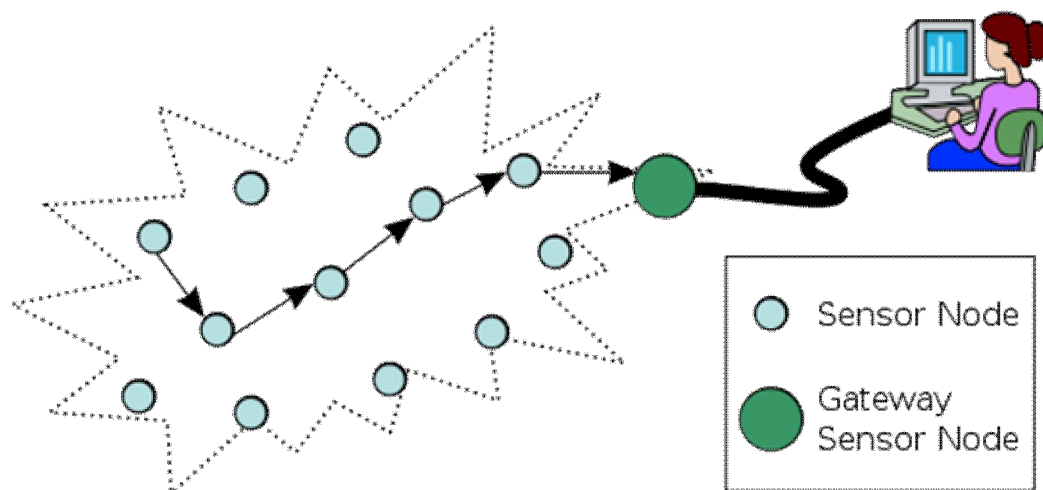
1. 简介

本文介绍了 WaveMesh 低功耗无线传感网络解决方案的应用场景和特点、同步休眠和混合休眠模式以及相关的配置参数。还涉及了功耗的估算、无线模块对传感器等外设的电源管理的内容。最后给出了某具体温湿度传感器型号实际应用的例子。

WaveMesh 无线自组网中定义了两种设备类型分别为 ROOT 和 NODE, 为了贴近无线传感网络的应用, 在本文中把 ROOT 类型设备称之为集中器/网关模块, NODE 类型设备称之为传感节点模块。

2. 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks)是由大量低成本、低功耗的具有传感、计算与通信能力的微小传感器节点构成的自治网络系统, 是能根据环境自主完成各种监测任务的智能系统, 其在军事、汽车电子、工业控制、环境监测、医疗卫生、智能家居等领域有很好的应用前景, 尤其在无人值守或恶劣环境下的事件监测和目标跟踪。典型的多跳无线传感网络的示意图如下所示:



多跳无线传感网络示意图

WaveMesh 无线传感网络解决方案定义的应用场景是需要周期性地读取网络中所有传感节点实时数据, 如温湿度、一氧化碳指标采集。这类应用的特点有:

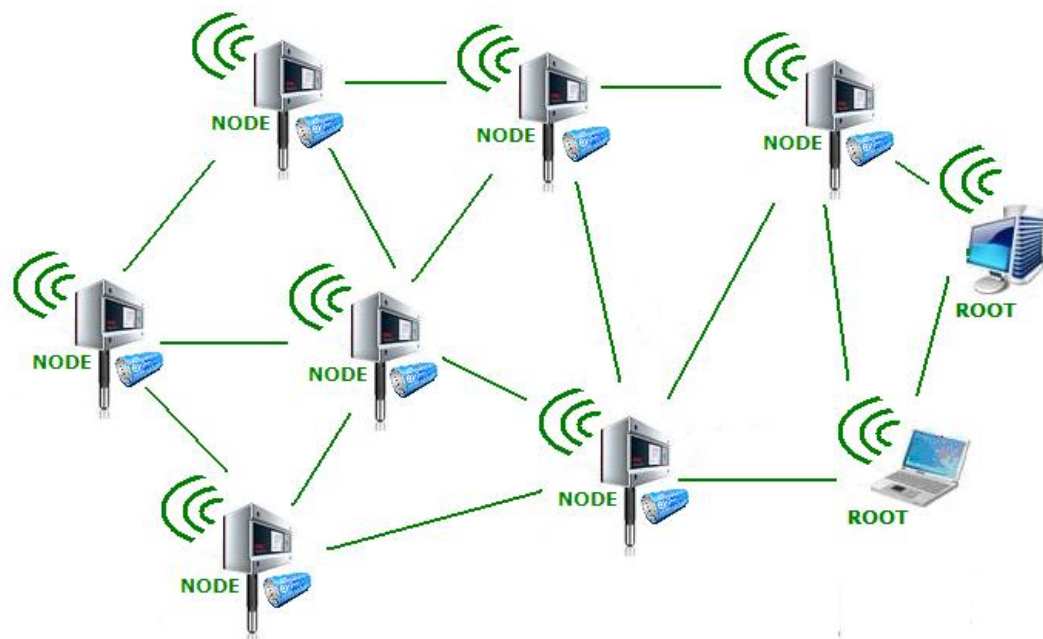
- 实时性要求较高, 需要在很短的时间内(数秒钟)完成全网所有节点数据的采集;
- 全网数据采集具有周期性, 而且时间间隔较短, 其周期一般为几分钟~几十分钟;
- 传感节点设备往往采用电池供电, 对功耗要求苛刻;
- 传感节点具有移动性, 网络拓扑结构会不断变化;

- 数据采集由集中器/网关模块发起，传感节点模块在收到读取数据命令后向外部传感器发出读取命令，再将传感器的数据上报给集中器/网关模块。

对于此类应用，仅仅需要对采用 WaveMesh AMR 协议的无线模块进行简单配置，就可以实现按照预设的时间间隔自动进行全部、部分和指定传感节点的数据采集。不需要用户对网络和模块做任何控制和维护，甚至传感器/仪表的读数据指令、数据采集的时间间隔等参数都可以固化在集中器/网关模块的片内非易失存储器里由模块自动发送，而不需要用户应用层进行控制。数据采集的时间间隔等参数也可以通过 AT 命令随时调整，AT 命令仅需要向网关/集中器模块下达即可。在预设了读数据指令和读取时间间隔后，整个网络在模块上电后可以立即开始工作，集中器/网关模块会自动按照指定的时间间隔读取全网所有传感节点的数据并进行上报，所有传感节点模块由集中器/网关模块控制进行休眠。网络中的路由会自动建立和维护，不需要用户的应用层面做任何网络维护工作。

采用 WaveMesh 同步休眠模式或者混合休眠模式就可以轻松实现低功耗的需要。网络中的所有传感节点、网关/集中器模块都可以休眠。同步休眠方式不需要休眠唤醒过程，最大程度节省电量的消耗；混合休眠模式可以提高网络的健壮性，在些节点在受到干扰情况下不能进行同步休眠时，会自动进入异步休眠模式，最大程度减小无畏的功耗消耗。WaveMesh AMR 采用多径路由协议，数据报文可以由多条路径、多信道并行发送，网络吞吐量极高，可以在数秒钟内完成成百上千点的数据采集。另外，可以采用多个网关/集中器模块进行组网，有效增加网络的出口带宽，缩短数据采集所用的时间，进一步降低网络节点功耗。

WaveMesh 低功耗无线传感网络如下所示，网络中仅需要传感节点单一类型设备，不需要不休眠的路由设备参与组网，该方案可以大大降低系统的设备、部署和维护成本。



WaveMesh 低功耗无线传感网络示意图

WaveMesh 低功耗传感网络解决方案的功能和特点有：

- 设备、维护和部署成本低，网络中的所有设备节点都可以休眠，仅需要无线传感节点单一设备可以实现中继和路由，不需要额外增加不能休眠的节点作为网络骨干路由节点；
- 应用层的数据帧结构可以灵活设定，支持任何可能的协议格式，用户不需要修改现有协议就可以与 WaveMesh 无线模块无缝对接；
- 仅需要对模块进行简单的配置，不需要任何二次开发工作，更不需要对无线自组网技术有任何的知识背景即可完成传感网络的部署，用户不需要对网络做任何的控制和维护工作；
- 传感器数据读取命令和数据采集时间间隔等参数可以通过配置工具或 AT 指令固化到网关/集中器模块存储器中，也可以通过 AT 指令动态设置，网关/集中器模块会自动按照指定的时间间隔采集全网传感节点的数据，并控制传感节点模块的休眠，不需要用户的干预；
- 网络的建立零开销，没有初始化过程，所有的传感节点设备上电立即能入网工作，而其它解决方案的网络的初始化过程需要几十分钟甚至几个小时，消耗大量功耗；
- 采用私有多径按需路由协议，支持 255 级路由、非常密集和节点数量众多的庞大无线网络，路由的计算根据电池的剩余电量、无线信号的质量综合考虑；
- 路由在每次数据采集时即时重新建立，非常健壮，适合拓扑结构快速变化的移动节点组网的应用，路由的建立和维护在数据传输中同步进行，路由协议不需要占用额外的开销；
- 数据报文可以在多信道、多路径、多网关并发进行传输，网络的吞吐量可以大于无线模块的物理带宽；
- 采用全网数据集抄方式，不需要逐点轮抄，可以在极短时间内完成成百上千传感节点的数据采集；
- 包括广播、多播和单播在内的所有的报文都采用 5 次握手方式进行可靠传输，网络设计兼顾低功耗和可靠传输的完美平衡；
- 多种休眠机制，可以采用同步休眠和混合休眠模式，同步休眠方式不需要异步休眠唤醒过程，最大程度节省电量的消耗；混合休眠模式可以提高网络的健壮性，在些节点在受到干扰情况下不能进行同步休眠时，会自动进入异步休眠模式，最大程度减小无畏的功耗消耗；
- 隐蔽、安静的网络，所有传感节点在数据采集间隔时间内可以完全休眠，不需要收发任何的网络维护报文，在降低功耗的同时也降低了网络对其它同频网络的干扰，也降低了受到其它同频网络的干扰的概率；

- 安全可靠的全网快速异步休眠唤醒，唤醒采用短报文的方式，其误唤醒的概率为零而唤醒成功率接近 100%，即使在有干扰的情况下也绝不会因为干扰信号造成功耗上升。

3. 外部传感器/仪表电源管理

传感器/仪表和无线模块之间可以进行双向唤醒和电源管理控制，以达到实际应用中的最低功耗的需要。

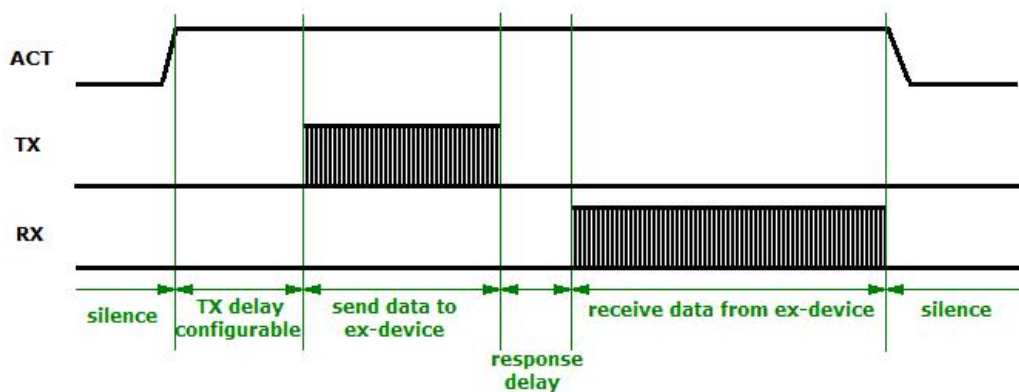
WaveMesh 传感网络采用无线模块主动的电源管理模式，在该模式下由无线模块控制外部传感器/仪表的休眠、唤醒，但并不需要传感器/仪表配合无线模块做特殊的电源管理设计。无线模块在需要读取传感器/仪表的数据时，将传感器/仪表唤醒或者供电，在完成读取传感器/仪表的数据后，无线模块通知传感器/仪表进行休眠或者对其断电。休眠唤醒的控制可以采用 IO 引脚和 UART 接口的方式。无线模块主动的电源管理模式可以确保传感器/仪表设备仅在最短的时间内才进行工作，之外的时间可以一直处理休眠或者断电状态。传感节点模块自身会自动进行休眠，而且休眠电流非常小，休眠可以来自集中器/网关模块的命令，也可以是自主异步休眠，可以确保达到最低功耗。

无线模块也可以采用被动电源管理方式，外部设备通过发送 AT 指令、控制无线模块的电源等方式强制无线模块进行休眠，在需要数据传输时可以通过给模块上电，或者通过 IO 引脚以及 UART 接口唤醒无线模块。被动电源管理模式给用户更大的主动性和灵活性，根据自己的实际需要进行设置，但该模式不是 WaveMesh 传感网络采用的方式，在本文中就不再做详细介绍。

3.1 IO 引脚唤醒

模块的 ACT 引脚可以作为外设休眠唤醒信号，电平极性可以设置，在使能该引脚的情况下的时序如下图所示。当无线模块需要读取外部传感器/仪表时，会先反转 ACT 引脚的电平对外部传感器/仪表进行唤醒或者供电。在等待“发送延时”（TX delay）时间后，通过 UART 向传感器/仪表发送读取数据指令。一般情况下传感器/仪表在被唤醒/上电后需要工作一段时间后才能得到有效的数据，“发送延时”可以根据需要进行设置以确保传感器/仪表返回的数据有效。得到传感器/仪表的响应后，无线模块会再次翻转 ACT 的电平，通知传感器/仪表可以开始休眠或者给传感器/仪表断电。

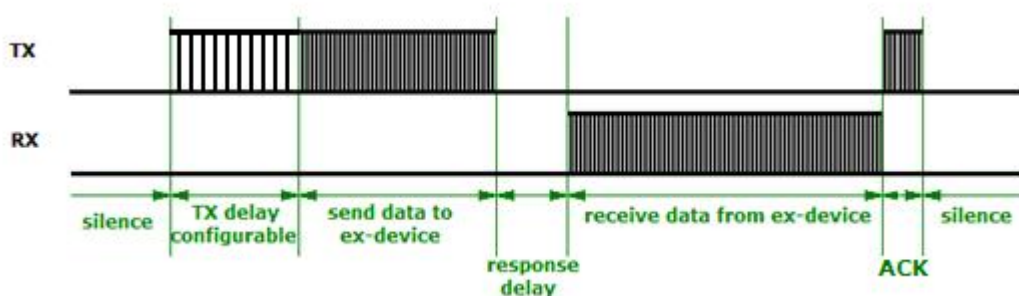
如果无线模块设置“ACK 报文”参数，当无线模块正确接收解析外部传感器/仪表发送的数据帧后，会向其发送“ACK 报文”进行握手确认。如果传感器/仪表在设定的超时时间内没有响应出现异常，无线模块在等待超时后会翻转 ACT 的电平，通知传感器/仪表进行休眠或者断电。



IO 引脚唤醒时序示意图

3.2 UART 唤醒

无线模块通过 UART 接口与外部传感器/仪表进行通信（定制模块除外），在不占用额外 IO 引脚情况下仅仅通过模块 UART 接口的 TX 引脚实现对外部传感器/仪表的唤醒。UART 唤醒时序如下图所示。当无线模块需要读取外部传感器/仪表数据时，先通过 UART 接口发送一定长度的重复字节作为唤醒序列，重复字节的长度可以进行设置；在唤醒序列发送完毕后再通过 UART 向外部传感器/仪表发送读取数据命令；然后等待外部传感器/仪表的响应；在得到传感器/仪表的响应后，如果设置了“ACK 报文”参数，无线节点模块会向外部传感器/仪表发送“ACK 报文”进行确认，外部传感器/仪表此时可以开始休眠。



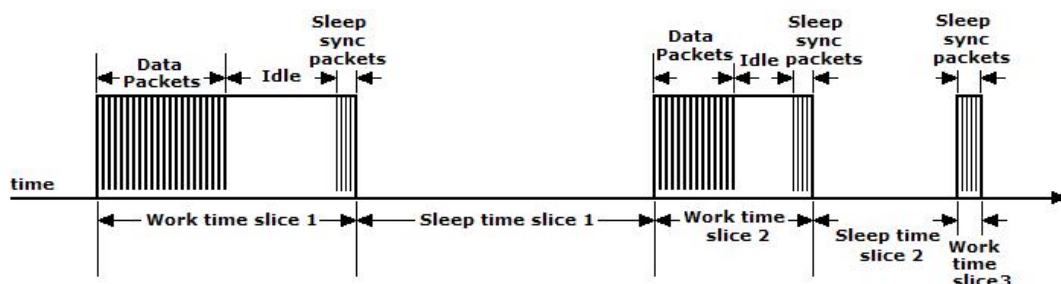
UART 唤醒时序示意图

IO 唤醒比 UART 唤醒更加灵活，但需要多占用一个 IO 引脚，如果在 IO 引脚允许、外部设备的情况下建议采用 IO 唤醒方式。

4. 同步休眠

同步模式下节点的休眠时间片和工作时间片由休眠广播报文实现时间片的同步，相邻节点之间的时间片误差小于 1ms。同步休眠广播报文由集中器/网关在每个“工作时间片”的结束时刻向全网逐级进行广播，该报文指定本次同步休眠时间片的长度。工作时间片的长度没有限制，可以根据数据传输需要自动动态调整，网络在没有数据传输时可以立即休眠而不需要等待某个预定的工作时间片结束，在有数据传输时会自动等待数据传输

结束再进行休眠。同步休眠模式下相邻节点间的时间片的误差很小，可以在工作时间片起始时刻立即进行数据传输，不需要进行无线唤醒或其它的同步操作。同步模式下的时间片的使用如下图所示：



同步休眠示意图

工作时间片（work time slice）和休眠时间片（sleep time slice）是根据需要由集中器/网关自动动态调整。上图中 work time slice 1、2、3 的时间长度是不同的，同样 sleep time slice 1 和 2 的时间长度也是不同的。其中在 work time slice 3 中没有进行数据传输，仅仅只传输同步休眠报文。在每个工作时间片开始时刻可以立即开始数据传输。对于传感网络来说数据传输也就是对传感节点的数据采集，整个工作时间片的工作过程大致描述如下：

- 1) 网关/集中器模块在工作时间片的开始时刻向网络中的传感节点发送读数据的指令，根据目的地址可以采用广播、多播和单播的方式；
- 2) 传感节点模块在收到读数据指令后，如果地址匹配会改变模块的 ACT 引脚电平或者通过 UART 接口对连接模块的传感器/外设进行唤醒（该过程可配置），同时还会向远处的传感节点中继转发收到的读数据命令，转发次数可以设置；
- 3) 为了保证传感器/外设数据的有效性，传感节点模块在唤醒传感器/外设后会等待一段时间（可以配置）才向传感器/外设发送读数据的指令，然后等待传感器/外设的响应；
- 4) 在收到传感器/外设的响应数据报文或者等待超时后，传感节点模块再次改变模块的 ACT 引脚电平通知传感器/外设进行休眠；
- 5) 如果传感节点模块正确得到传感器/外设的响应会将该数据报文向网关/集中器发送；
- 6) 传感节点模块在上行数据报文缓冲区空闲时可以向网关/集中器方向中继转发远处传感节点的数据；
- 7) 对与网关/集中器模块来说，在向网络中发送读数据指令后，就可以陆续接收到网络中传感节点的响应数据报文，可以对网络中所有、部分和指定传感节点进行数据采集；

- 8) 网关/集中器模块在一定时间内（可以设置）不再收到传感节点的数据，认为数据采集过程已经完成，会向网络中广播同步休眠报文，该报文指定当前休眠时间片的长度；
- 9) 传感节点模块接收到广播同步休眠报文后，会向网络中继广播发送同步休眠报文，为了提高该报文的接收成功率，会多次重复发送，其发送次数可以设置；
- 10) 传感节点模块完成同步休眠报文的发送次数后会进入休眠状态，直到休眠时间片结束为止；一次完成的同步数据采集过程自此结束。

同步休眠模式仅需要对无线模块进行简单设置即可完成，可以通过模块配置工具或者 AT 指令。与同步休眠模式相关的参数有“同步间隔”、“重复”、“休眠”和“预存广播报文”，其中“同步间隔”、“重复”和“休眠”参数仅需要对集中器/网关模块进行设置即可，在配置工具上的位置如下图所示：

- 同步间隔（单位：s）

如果该参数不为 0，则会自动开启同步休眠功能。该参数设定同步休眠模式下“休眠时间片”的上电时的初始值，单位为秒，“休眠时间片”的参数值也可以通过 AT 命令灵活修改。该参数仅对集中器/网关模块有效，如果该参数的所设置的值不为零，则集中器/网关模块会在上电后开启同步休眠。在某工作时间片内有数据传输时，集中器/网关模块会在数据传输结束后等到信道静默超时后自动向网络发送同步休眠广播报文；在某工作时间片内没有数据传输，集中器/网关模块会在在工作时间片的开始时刻立即向网络发送同步休眠广播报文。

- 重复

对于传感网络等需要进行周期性数据采集的应用来说，需要按照一定时间间隔重复地向网络发送相同的命令。最典型的应用就是周期性地对全网传感节点进行数据集抄。在激活这个“重复”选项后，集中器/网关模块就会按照“同步间隔”所设定的参数值作为“休眠时间片”自动周期性地向网络发送“预存广播命令”或者最近一次收到的命令。从用户的角度来说，使能这个选项后网络中节点的数据就会按照类似“冒泡”的方式自动上报。该参数可以用 AT 指令对进行动态设置，这里设置的是上电时的初始模式。该参数仅对集中器模块设置，对节点模块设置无效。

- 休眠

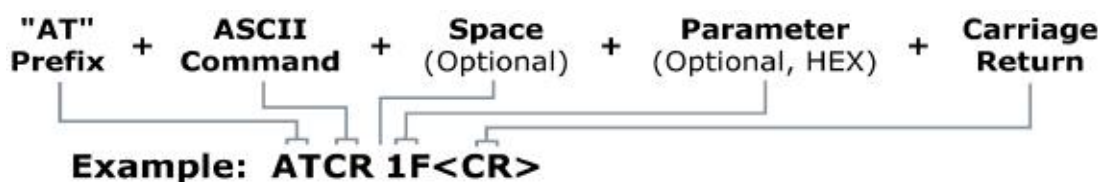
对于同步休眠模式来说，传感节点模块即使不激活该选项也会被强制进行同步休眠；而集中器/网关模块必须激活该选项才真正进行同步休眠。对于异步休眠和混合模式来说，传感节点模块和集中器/网关必须激活这个“休眠”选项才真正使能异步休眠。

- 预存广播命令

可以将传感器的数据读取指令设置为“预设广播命令”，当集中器/网关模块收到与预设的广播命令相同的命令报文时，就可以用简短的报文替代预设命令报文的内容，省去预设广播命令的广播过程，可以提高网络的响应速度、节省数据采集的时间和电源的消耗。由于预设广播命令被固化在模块的片内非易失存储器中，集中器/网关模块在上电后会如果检测到已经设置了预设广播命令，会立即按照预定的时间间隔自动全网数据采集并控制传感节点的休眠，不需要用户应用层面的干预。除此之外，预设广播命令用途还有：

- 1) 实现报文的转换 - 如果网络中有不同种类的传感器混合组网，并且不同传感器的数据读取命令是不同的。可以根据需要对不同的传感节点模块、集中器/网关模块设置不同的预设广播命令报文，就可以实现向集中器模块发送 A 报文，节点模块向传感器等外设下达 B、C、D...报文的的效果。
- 2) 按照广播的方式发送“非广播地址”的命令 - 预设报文不对目的地址是否为广播地址做检查，因此可以广播目的地址为非广播地址的报文，也可以广播没有地址字段的命令。

无线模块提供 AT 指令可以方便的随时修改同步休眠相关的参数，也可以通过 AT 指令直接修改无线模块的固化在存储器中的控制块的内容。AT 指令的格式如下图所示，由“AT”大写字符作为前缀，紧接着是 2 个以上 ASCII 字符的指令名称，对于有参数的指令参数采用 16 进制的 ASCII 字符表示，最后以回车符<CR>结束对应的 16 进制的值为 0x0D。指令名称、参数和最后的回车符之前可以用空格隔开。



AT 指令的格式

与同步休眠相关有以下 AT 指令：

- ATCR

ATCR [0 ~ FFFF] <CR>

该命令**使能**“重复”发送功能，参数为同步休眠时间片的长度，单位为秒。当参数不为 0 时，会使能同步休眠；当参数为 0 时，则会取消同步休眠。“重复”功能与配置参数“重复”意义相同。

该命令会修改无线模块内存中的同步休眠时间片参数值，但不会修改模块固化在非易失存储器中的同步时间片参数值。也就是说在无线模块重新上电后，该命令设置的同步休眠时间片参数会丢失。

参数说明：

参数值为 16 进制，范围 0 ~ FFFF，当没有参数时和参数为 0 的情况一样处理。

- ATCO

ATCO [0 ~ FFFF] <CR>

该命令**取消**“重复”发送功能，参数为同步休眠时间片的长度，单位为秒。当参数不为 0 时，会使能同步休眠；当参数为 0 时，则会取消同步休眠。“重复”功能与配置参数“重复”意义相同。和 ATCR 命令一样，该命令会修改无线模块内存中的同步休眠时间片参数值，但不会修改模块固化在永久存储器中的同步时间片参数值。

该命令的参数含义与 ATCR 一致，请参见 ATCR 命令。

- ATCS

ATCS [0 ~ FFFF] <CR>

全网所有节点立即同步休眠，参数为本次同步休眠时间片的长度，单位为秒，该命令**不会**修改“重复”参数的值。值得注意的是，与 ATCR 和 ATCO 命令不同该命令**不会**修改无线模块同步休眠时间间隔参数值，也就是说本次同步休眠结束之后，会重新按照之前设定的同步休眠时间间隔进行同步休眠。该参数的意义在于，在某些应用下可以取消集中器/网关模块自动同步休眠的控制，而用户应用层利用该命令拥有完全的网络休眠控制权，按照需要控制网络的休眠而不必担心集中器/网关模块会同时进行休眠控制。在另外一些应用下，在使能集中器/网关模块自动同步

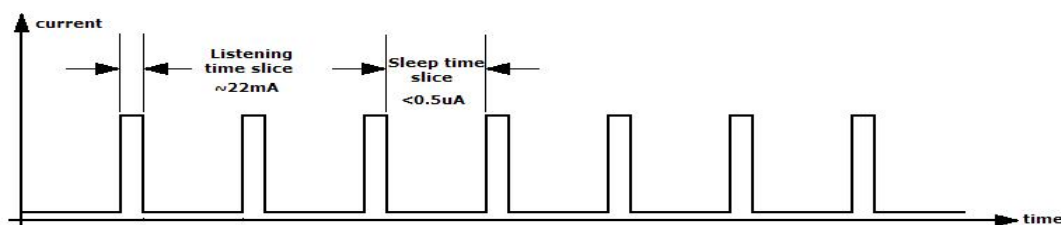
休眠的控制的同时，用户应用层也可以利用该命令配合集中器/网关模块实现网络更灵活的休眠控制。

该命令的参数含义与 ATCR 一致，请参见 ATCR 命令。

5. 混合休眠

采用同步休眠模式的低功耗无线传感网络，在同步休眠报文受到干扰或者集中器/网关节点掉电时，传感节点模块由于得不到正确的休眠命令，并不会主动进入休眠，会造成节点功耗的明显上升，从而减小电池的使用寿命。为了克服上述情况，增加网络的靠干扰能力，可以采用以同步休眠为主、异步休眠为辅的混合休眠模式。混合休眠模式下，没有收到同步休眠命令的节点可以自动进入异步休眠模式，以保持比较低的功耗。混合休眠模式可以看作在异步休眠方式的基础上叠加了同步休眠方式。

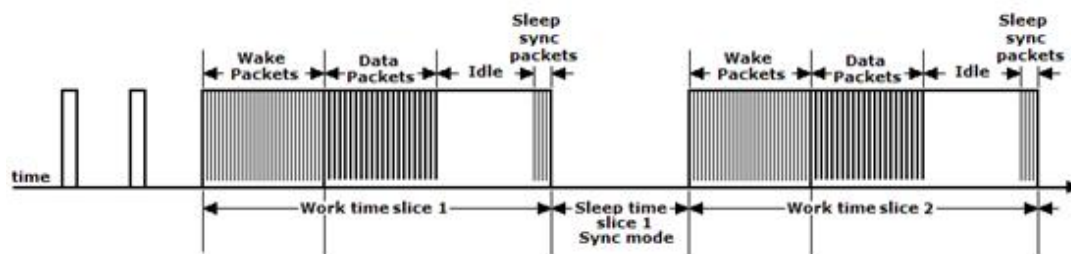
异步休眠模式下传感节点模块会在网络空闲后主动按照预设的“睡醒比”进行间歇式休眠，睡醒比是在“监听时间片”和“异步休眠时间片”长度的比值。“监听时间片”和 RF 的速率有关，一般只有毫秒级。如果传感节点在“监听时间片”内监听到网络中有数据需要收发就会自动进入正常工作模式。“睡醒比”可以灵活设置，该参数决定了传感节点待机电流的大小。假设传感节点模块的休眠电流为 $0.5\mu\text{A}$ ，接收电流为 22mA ，异步休眠模式电流如下所示：



异步休眠功耗示意图

WaveMesh 采用短报文的方式对异步休眠节点进行唤醒，可以迅速实现全网唤醒、多点和单点唤醒，该唤醒方式具有安全、可靠、耗时少等优点。相邻节点间的数据传输平均唤醒延时为异步休眠周期的二分之一；默认全网唤醒总延时大概是休眠周期的 $0.5\sim 1$ 倍，和网络节点数量、分布没有太大关系，网络节点密度越大，唤醒速度越快。

相对于同步休眠模式，混合休眠模式在工作时间片的一开始时间并不能立即进行数据传输，需要先进行全网或者路由节点的唤醒，在唤醒过程结束后，基本上可以保证所有相邻的节点都可以被可靠的唤醒。即使在唤醒阶段被遗漏的节点也会在后续的数据传输节点继续被唤醒，在没有外界干扰的情况下异步唤醒的成功率为 100% 。无线传感网络典型的混合休眠模式如下图所示：



混合休眠示意图

混合休眠模式相对于同步休眠模式在工作时间片内增加了全网唤醒的处理过程，导致每个工作时间的片时间变长，也就增加了传感节点模块的功耗。然而，对于传感器来说需要对模拟量进行 ADC 采样，而模拟电压、电流一般在上电后需要一段时间才能稳定；也就是在传感节点模块唤醒外部传感器后，都需要延时一段时间才能得到正确的数据。这段时间对于纯粹的同步休眠方式来说，无线模块的射频处于接收状态，并不进行任何数据的收发。而对于混合休眠模式，可以利用这段时间进行全网无线唤醒，整个工作时间片并不会真正的增加；并且在整个唤醒过程中，传感节点无线模块的射频绝大部分时间还是处于接收状态。因此，混合休眠模式相对纯粹同步休眠方式节点模块在单个工作时间片内消耗的电流只有很小的增加量却极大地提高网络的抗干扰能力。

混合休眠模式除了上一节介绍的同步休眠模式相关的参数之外，还需要对异步休眠相关的参数进行设置。异步休眠的相关参数需要对所有类型的模块包括集中器/网关模块和传感节点模块可以通过模块配置工具进行相同设置，以确保无线全网唤醒的成功率。与异步休眠模式相关的参数有“睡醒比”和“休眠”：



● 睡醒比

该参数设定异步休眠模式下“异步休眠时间片”和“监听时间片”的比值。该参数的取值范围为 0~2500。“睡醒比”越大，模块的待机功耗就越小但同样意味着异步唤醒休眠需要的时间更长、模块的响应速度越慢、每个报文的平均发送时间越长。因此“睡醒比”参数的设置需要综合考虑实际网络的工作情况，使得实际使用平均功耗最低。

对于混合休眠来说，会以同步休眠为主异步休眠为辅。异步唤醒时间大概为异步休眠周期的 0.5~1 倍，与网络中的节点密度有关，密度越大唤醒时间越短。对于无

线传感网络来说，为了不增加数据采集的时间，异步唤醒时间的经验值不应该大于外部传感器数据有效的延时时间。

对于部分不休眠节点和部分休眠节点混合组网的情况，对不休眠节点也要配置与休眠节点相同的“睡醒比”，以确保异步唤醒的成功率。

● 休眠

对于异步休眠、混合休眠模式来说，传感节点模块即使设置的“睡醒比”不为 0，也必须激活该“休眠”选项才能使能异步休眠。

异步休眠参数可以通过配置工具进行修改，相关参数值被固化在无线模块非易失存储器中。原则上，异步休眠参数在网络部署之前确定，在网络运行期间不建议进行参数值的修改。异步休眠参数值也可以通过 AT 指令修改无线模块的控制块来实现，控制块在配置模式和正常工作模式下都可以进行修改，具体请参见相关文档。

异步休眠周期需要根据所设定的“睡醒比”和其它相关参数的进行计算才能得到。在配置工具中设置好“默认 RF 速率”参数后，点击“应用”按钮后展开“高级配置”选项如下图所示。在高级配置中有两个参数决定了异步休眠“监听时间片”的长度，分别为“时钟 tick”和“自动醒来时隙”。这两个参数是根据“默认 RF 速率”自动设置的，用户也可以对这两个参数进行修改。将这两个参数相乘，便可以得出“监听时间片”长度单位了 us。以下图为例，时钟 tick 为 108us，醒来时隙为 15tick，则“监听时间片”为 $108 \times 15 = 1620us$ 。

高级配置		
时钟 tick(us) : 108	载波检测门限 (dBm) : -74	同步报文持续时间 (tick) : 25
下行超时 (ms) : 4000	自动醒来时隙 (tick) : 15	信标报文持续时间 (tick) : 750
上行超时 (ms) : 4000	自动休眠超时 (ms) : 2000	自动休眠补偿粒度 (tick) : 200

将“监听时间片”乘以“睡醒比”就可以得到“异步休眠时间片”的长度，假设“睡醒比”为 100，“监听时间片”1620us，则“异步休眠时间片”为 $100 \times 1620us = 162ms$ 。异步休眠周期为“异步休眠时间片”加上“监听时间片”，即 $162ms + 1620us = 163.62ms$ 。

6. 功耗估算

进行无线传感网络功耗需要知道的参数有：

- 网络中传感节点数量为 N；
- 集中器/网关的数量为 n；
- 每个传感节点每次上报的数据报文字节数为 L；
- 射频的波特率（不考虑自适应速率）为 B（kbps）；
- 外部传感器/仪表数据有效延时时间 Td（ms）；

- 异步休眠的睡醒周期为 T_s (ms)；
- 集中器/网关空闲等待超时时间为 T_o (ms)；
- 无线模块接收电流为 I_r (mA)，发射电流为 I_t (mA)，休眠电流为 I_s (mA)，PLL 校准电流为 I_c (mA)。典型值为 I_s : 0.5uA; I_c : 5mA; I_r : 20mA; I_t : 33~100mA。

对无线传感网络作以下假设：

- 集中器/网关模块 UART 速率大于射频频的波特率的一半即 $B/2$ ，这种情况下不需使能流控，网络的数据传输时间仅取决于射频频的速率；
- 每级路由都有 2 个以上的节点，当一个传感节点向上级节点转发数据报文的同时，另同级的感节节点可以接收下级节点的数据报文，这样集中器/网关模块会得到连续的数据流；
- 网络没有外来的无线干扰，节点之间无线信号稳定，并且没有孤立节点；
- 外部传感器/仪表的读取指令采用“预设报文”的方式，下行不需要真正的发送读数据的报文。

整个数据采集工作片过程分为几个主要过程，分别为唤醒过程、响应等待过程、数据传输过程、空闲超时过程和休眠报文下发过程，请参见“混合休眠示意图”。对于纯粹同步休眠模式没有唤醒过程，可以作为混合休眠模式的特例。接下来，我们需要分别计算每个过程消耗的时间和电流，最后再计算出整个数据采集过程的平均电流。

6.1 异步唤醒过程功耗估算

WaveMesh 协议的异步唤醒过程采用短报文的方式，其唤醒需要的时间与节点的相邻节点数有关，相邻节点数越多唤醒的时间越短，反之越长。另外，在唤醒过程中打开射频发送报文的概率跟相邻节点数也有关系，相邻节点数越多发送报文的概率越小。在配置工具的默认设置下，唤醒过程需要的时间为 0.5~1 倍的异步休眠周期。在这里我们根据功耗消耗最大情况进行估计，唤醒过程需要的时间 T_w 最大为 T_s ；唤醒过程射频最大可能会有一半时间处于发射状态，剩下一半时间处于接收状态，其电流的平均值为

$$(I_r + I_t)/2$$

6.2 等待外设响应过程功耗估算

对于传感器来说需要对模拟量进行 ADC 采样，而模拟电压、电流一般在上电后需要一段时间才能稳定；也就是在传感节点模块唤醒外部传感器后，都需要延时一段时间 T_d 才能得到正确的数据。如果第一阶段的唤醒过程所用的时间 T_w 小于 T_d ，则在唤醒过程结束后的 $T_d - T_w$ 时间内，无线模块会射频会处于接收状态，其电流为 I_r 。

6.3 数据传输过程功耗估算

WaveMesh 的数据报文传输采用 5 次握手的方式，前 2 次握手采用载波监听和碰撞避免回退机制，后 3 次握手报文只需要发送 1 次。在没有发生报文碰撞并且一次发送成功的情况下的 5 次握手需要的时间为：

$$\frac{88\text{bits}}{B} + \frac{96\text{bits}}{B} + \frac{112\text{bits}}{B} + \frac{224\text{bits} + (2 \times L)\text{bits}}{B} + \frac{224\text{bits}}{B} + \frac{20\text{bits}}{B} + 2\text{ms}$$

其中前 5 项分别为 5 次握手数据传输需要的时间；第 6 项为第 1 次握手和第 2 次握手的最小时间间隔；第 7 项为 PLL 校准的时间。经过合并简化可以得到进行一次有效数据传输的最短时间 T_{os} 为。对于发送节点来说，第 1、3、4 次握手为射频发送，2、5 次握手为射频接收，平均电流 I_{ns} 为

$$\frac{\left\{ \left[\frac{424\text{bits} + (2 \times L)\text{bits}}{B} \times I_t \right] + \left[\frac{340\text{bits}}{B} \times I_r \right] + [2\text{ms} \times I_c] \right\}}{T_{os}} ;$$

对于接收节点来说，第 1、3、4 次握手为射频接收，2、5 次握手为射频发送，平均电流 I_{nt} 为

$$\frac{\left\{ \left[\frac{444\text{bits} + (2 \times L)\text{bits}}{B} \times I_r \right] + \left[\frac{320\text{bits}}{B} \times I_t \right] + [2\text{ms} \times I_c] \right\}}{T_{os}}$$

在网络稳定、数据流连续的情况下，采集网络中所有传感节点的数据，理想的上行数据传输时间为 $\frac{N \times T_{os}}{n}$ ；考虑到无线数据报文的碰撞等因素的影响，实际传输效率为 η ，则修正后的上行数据的

传输时间 T_{up} 为 $\frac{N \times T_{os}}{n \times \eta}$ 。对于 WaveMesh 无线传感网络来说，实际传输效率为 η 和网络节点的分布有关系，经验取值范围为 75%~25%，典型值为 50%。

在这里我们对电流消耗最大的节点进行功耗估算，功耗最大的节点为最靠近集中器/网关的传感节点。由于这些节点需要中继转发的数据量最大，射频打开发送的时间最长，因此功耗也最大。在上行数据的传输时间 T_{up} 内，功耗最大的节点最大可能会有一半的时间射频处于发射状态，另外一半的时间射频处于接收状态，并且将 PLL 校准电流采用（实际要远小于）接收和发送电流的平均值。则功耗最大的节点在上行数据的传输时

$$(I_r + I_t)/2$$

间 T_{up} 内消耗的平均电流为：

6.4 空闲超时过程功耗估算

如果采用集中器/网关模块自主进行同步休眠控制，会采用空闲超时作为全网数据采集的结束的依据。该过程网络中没有任何数据进行发送，所有的节点处于接收状态，该过程消耗的平均电流为 I_r 。

如果用户采用主动的方式（发送 ATCS）进行同步休眠控制，可以将该过程的时间可以减小到最低，甚至到 0。

6.5 休眠报文下发过程功耗估算

同步休眠报文的下发过程时间是非常短的，该过程仅需要发送 1-5 次几个字节的握手短报文，发送次数与节点的相邻节点数有关，相邻节点数越多发送次数越少，反之越多。由于同步休眠报文的下发过程时间非常短，相对于整个数据采集工作过程，这个过程消耗的功耗可以忽略。

综上所述，数据采集工作时间片的主要过程的功耗最大情况估计如下表所示：

工作过程	时间	电流	说明
异步唤醒过程	T_s	$(I_r + I_t)/2$	可选
等待外设响应过程		I_r	可选
数据传输过程	$\frac{N \times T_{os}}{n \times \eta} ;$ $T_{os} = \left[\frac{764\text{bits}}{B} + \frac{(2 \times L)\text{bits}}{B} + 2\text{ms} \right]$	$(I_r + I_t)/2$	必选
空闲超时过程	T_o	I_r	可选

其中唤醒过程、等待外设响应过程和空闲超时过程在某些应用下可以将其消耗时间减小到 0，为可选过程；而数据传输过程为必要过程。在应用中需要有效缩短可选过程的时间，可以大幅降低传感节点的功耗。

举例说明工作时间片内各个过程的时间和电流的计算，具体参数如下：

- 网络中传感节点数量为 $N=100$ ；
- 集中器/网关的数量为 $n=1$ ；
- 每个传感节点每次上报的数据报文字节数为 $L=64$ ；
- 射频的波特率（不考虑自适应速率）为 250（kbps）；
- 外部传感器/仪表数据有效延时（响应）时间 200（ms）；
- 异步休眠的睡醒比为 100；
- 集中器/网关空闲等待超时时间为 $T_o=2000$ （ms）；
- 无线模块接收电流 $I_r=20$ （mA），发射电流 $I_t=33$ （mA），休眠电流 $I_s=0.5$ （uA）。

根据睡醒比和射频的波特率，配置工具给出的默认参数：时钟 tick 为 128us；自动醒来时隙为 18ticks。根据上一节“混合休眠”给出的公式，异步唤醒周期为 T_s 为 $128us \times 18ticks \times (\text{睡醒比} + 1) = 233ms$ 。

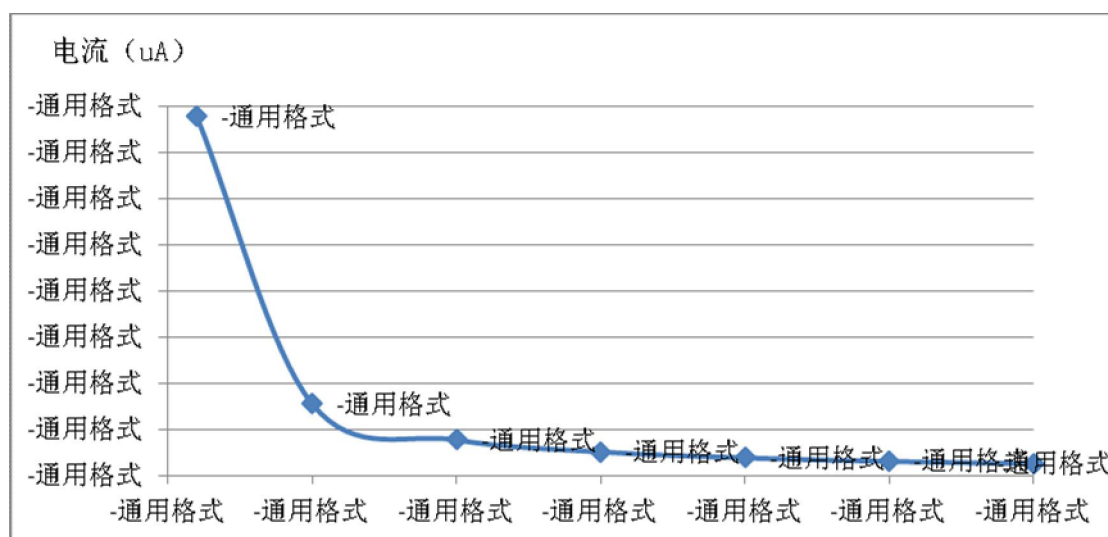
由于异步唤醒过程时间 233ms 大于外设响应的延时时间 200ms，因此等待外设响应过程并不存在。

根据一次有效数据传输时间 T_{os} 的计算公式，采用 250bps 速率发送 64 字节报文所需要的时间为

$T_{os} = \left[\frac{764bits}{250kbps} + \frac{(2 \times 64 \times 8)bits}{250kbps} + 2ms \right] = 9.152ms$ 。数据传输过程

总的时间为 $\frac{N \times T_{os}}{n \times \eta} = \frac{100 \times 9.152ms}{1 \times 50\%} = 1.83s$ (η 采用典型值 50%)。

综上，唤醒过程、等待外设响应过程、数据传输过程和空闲超时过程的时间分别为 0.23s、0s、1.83s 和 2s；整个工作时间片的总时间为 4.06s。根据无线模块接收电流和发射电流，容易计算出工作时间片的平均电流为 23mA。下图给出按照不同数据采集时间间隔（单位：分钟）的最坏情况平均工作电流（单位：微安）的曲线图：



不同采集时间间隔的电流曲线图

根据上述给出的参数，从图中可以看出如果采用 1Ah 的电池供电，对 100 个传感节点进行数据采集，根据估算出的电流理论值，按 5 分钟为间隔可以不间断工作 133 天；按 10 分钟为间隔可以不间断工作 267 天；按 15 分钟为间隔可以不间断工作 400 天。

说明：

- 例子中给出的空闲超时时间为 2s，几乎占用了工作时间片 1/2 的时间。用户可以通过其它更有效的方式判断数据采集的结束，使得空闲超时过程变短，可以较大程度缩短工作时间片的长度，显著降低传感节点的功耗。

2. 例子中集中器/网关的数量为 1，在实际应用中可以通过增加集中器/网关的数量达到提高网络出口带宽、减小数据传输过程的时间的目的，在数据传输过程功耗估算公式中给出的数据传输时间和集中器/网关的数量成反比。

7. 实际应用案例

以瑞士 ROTRONIC 公司的 HC2 系列温湿度传感器为例，介绍如何配置无线模块参数组建低功耗 HC2 传感网络。

HC2 系列传感器有着广泛的应用领域如 HVAC 暖通空调、食品存储、卫生健康、检验检疫、仓储区域、楼宇自动化系统、造纸、纺织、半导体、制药及气象行业等。不同型号 HC2 探头的测量精度可能有所不同，其相对湿度精度可达到 $\pm 0.5\%$ 范围 0%~100%；温度精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 范围 $-40\sim 100^\circ\text{C}$ 。HC2 有 1 路数字和 1 路模拟输出；数字输出采用 UART 接口（波特率 19200，无校验，无流控，8 位数据位和 1 位停止位），协议采用 RO-ASCII；供电电压范围 3.2v~5vDC（不同型号电压不同）；上电初始化的启动时间为 1.5s，电流为 8~5mA。HC2 探头自身没有休眠设计，为了满足低功耗的要求，由无线模块的 ACT 引脚控制 HC2 的供电，在休眠时直接切断 HC2 的电源。

7.1 协议配置

RO-ASCII 为 ROTRONIC 公司所有采用 AirChip 3000 芯片产品的默认通信协议，包括但不限于 HC2、HF3、HF4、HF6、HL20 和 HP21 系列产品。该协议的命令帧格式为：

- | '{' | ID | Address | Command | Data | Checksum | CR |
|-----|----|---------|---------|------|----------|----|
|-----|----|---------|---------|------|----------|----|
- { 帧起始字符
 - ID 设备类型，一个 ASCII 字符
 - Address RS485 地址（00-64），2 个字节，99 为广播地址
 - Command 3 个 ASCII 字符指令名称
 - Data 不定长 ASCII 字符
 - Checksum 校验和，可以被 '{' 字符代替
 - CR 帧结束字符，回车符

RDD 为读数据指令，读取任意地址传感器的指令为 “{F99RDD}\r”，例如：

无线模块发送：{F99RDD}\r

HC2 传感器响应：{F04rdd 001; 4.45;%RH;000;=; 20.07;°C;000;=;Fp;-19.94;°C;000;+;001;B2.8;0000000002;HyClp 2 ;006;J^M\r

由于每个传感器都有唯一的序列号，我们不需要为每个传感器设置 RS485 地址。对于 WaveMesh 无线传感网络，可以采用 RDD 读数据指令作为数据采集命令，无线模块

并不需要解析传感器的序列号。无线模块仅需要解析帧头字节 ‘{’ 和帧尾字节 ‘\r’ 就可以实现 RO-ASCII 帧的识别。无线模块数据帧解析的参数配置说明如下：

参数名称	值	说明
报文帧模式	“ASCII”	仅检测帧起始字符和结束字符
帧头尾检测	“头和尾”	帧头尾字符都进行检测
报文长度偏移量	任意值	不需要设置
报文长度修正值	任意值	不需要设置
帧起始同步字	123	字符 ‘{’
帧结束同步字	13	回车符 ‘\r’
下行报文地址偏移量	255	不检测下行报文目的地址
上行报文地址偏移量	255	不检测下行报文源地址
地址长度	6	无线模块 MAC 地址长度
广播地址通配符	任意值	不需要设置
多播地址通配符	任意值	不需要设置

再根据 HC2 UART 接口的参数设置 WaveMesh 无线模块，配置工具协议配置界面如下所示：

协议配置

UART波特率:	19200	HOST开机时间(ms):	1700	下行地址偏移量:	255	<input type="checkbox"/> 附加路由信息
UART起始位:	低	响应超时时间(ms):	100	上行地址偏移量:	255	<input type="checkbox"/> 多集中器协作
UART校验位:	没有	地址长度(字节):	6	报文长度偏移量:	0	
UART停止位:	1	广播地址通配符:	39	报文长度修正值:	0	
报文帧模式:	ASCII	多播地址通配符:	39	帧起始同步字:	123	
帧头尾检测:	头和尾	UART唤醒字节数:	0	帧结束同步字:	13	
确认ACK报文:						
读取HOST地址命令:						
预存广播命令1:	7B 46 39 39 52 44 44 7D 0D					
预存广播命令2:	7B 46 39 39 52 44 44 7D 0D					

说明：

1. 由于 HC2 探头上电初始化的启动时间 1.5s 后才能输出正确的温湿度信息，为了保证数据的有效性，“HOST 开机时间”参数设置为 1700ms 略大于 HC2 上电启动时间。
2. 预存广播命令 1 和 2 均被设置为传感器的数据读取指令 “{F99RDD}\r”，界面为其 ASCII 字符的十六进制显示。

7.2 基本配置

无线模块的基本配置包括射频信道、发射功率、无线波特率、同异步休眠唤醒、电源管理等参数：

基本配置			
网络ID:	0	设备数:	0
睡醒比:	500	默认RF速率:	500kbps
同步间隔 (s):	300	RF速率上限:	500kbps
起始频点 (MHz):	432.0000	RF速率下限:	500kbps
主信道号:	0	RF输出功率:	+10dBm
起始辅助信道号:	10	ACT引脚功能:	外设唤醒
辅助信道间隔:	10	<input checked="" type="checkbox"/> 休眠	<input type="checkbox"/> ACT电平反转
辅助信道个数:	8	<input type="checkbox"/> 流控	<input checked="" type="checkbox"/> 重复

说明:

1. 由于 HC2 探头数据报文较长，为了减小报文的传输时间，射频波特率采用 500kbps;
2. HC2 电源管理由无线模块的 ACT 进行控制，将 ACT 引脚的功能设置为“外设唤醒”;
3. HC2 探头启动时间为 1.5s 以上，允许有较长的异步唤醒时间，因此可以采用较大的“睡醒比”降低无线模块在受到干扰下的待机功率，这里设置的参数为 500;
4. 数据采集的时间间隔设置为 300s，这里设置的是上电的默认值，即 5 分钟采样一次全网所有传感器的数据;
5. 使能了“休眠”和“重复”，即使能模块自主异步休眠和集中器/网关自动参照时间间隔进行数据采集的功能。

7.3 功耗估算

对 100 个点的 HC2 传感节点进行数据采集，按照上述的配置参数总结如下:

- 网络中传感节点数量为 $N=100$;
- 集中器/网关的数量为 $n=1$;
- 每个传感节点每次上报的数据报文字节数为 $L=100$;
- 射频的波特率（不考虑自适应速率）为 500 (kbps) ;
- 外部传感器/仪表数据有效延时（响应）时间 1700 (ms) ;
- 异步休眠的睡醒比为 500;
- 集中器/网关空闲等待超时时间为 $T_o=2000$ (ms) ;
- 无线模块接收电流 $I_r=20$ (mA)，发射电流 $I_t=33$ (mA)，休眠电流 $I_s=0.5$ (uA)。

根据睡醒比和射频的波特率，按照配置工具给出的默认参数：时钟 tick 为 108us；自动醒来时隙为 15ticks。根据“混合休眠”异步唤醒周期公式 T_s 为 $108us \times 15ticks \times (\text{睡醒比} + 1) = 812ms$ 。

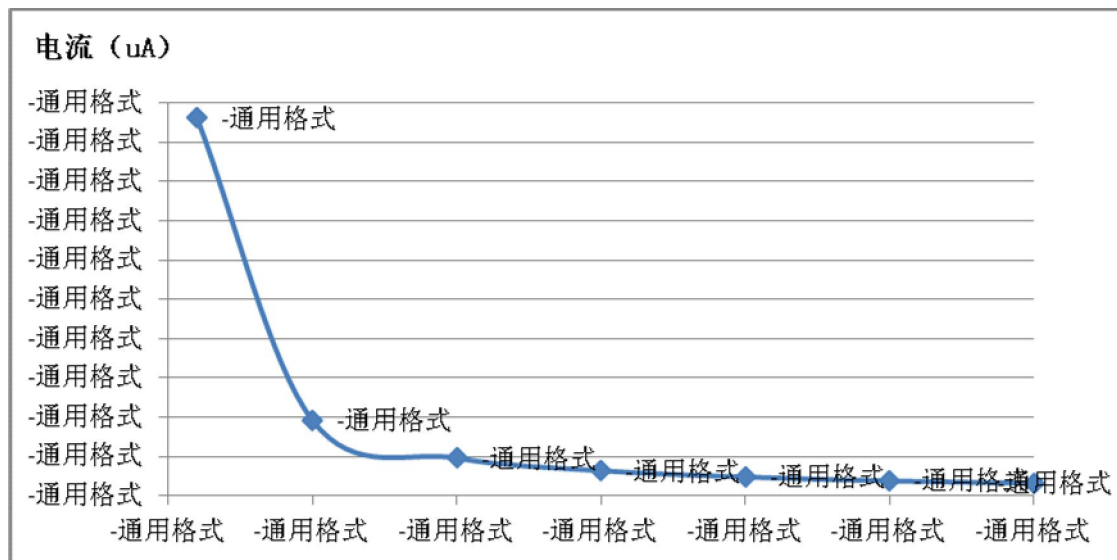
异步唤醒过程时间 T_w 即异步唤醒周期 812ms 小于外设响应的延时时间 1700ms ，因此等待外设响应过程时间为 $1700-812=888\text{ms}$ 。

根据一次有效数据传输时间 T_{os} 的计算公式，采用 500bps 速率发送 100 字节报文所需要的

时间为 $T_{os} = \left[\frac{764\text{bits}}{500\text{kbps}} + \frac{(2 \times 100 \times 8)\text{bits}}{500\text{kbps}} + 2\text{ms} \right] = 6.728\text{ms}$ 。数据传输过

程总的时间为 $\frac{N \times T_{os}}{n \times \eta} = \frac{100 \times 6.728\text{ms}}{1 \times 25\%} = 1.35\text{s}$ (η 采用典型值 50%)。

综上，唤醒过程、等待外设响应过程、数据传输过程和空闲超时过程的时间分别为 0.82s 、 0.89s 、 1.35s 和 2s ；整个工作片片的总时间为 5.06s 。根据无线模块接收电流和发射电流，容易计算出工作片片的平均电流为 22.8mA 。下图给出按照不同数据采集时间间隔（单位：分钟）的无线模块平均工作电流（单位：微安）的曲线图：



如果仅考虑无线模块的功耗（不考虑 HC2 传感器的功耗），按照上述配置参数，从图中可以看出如果采用 1Ah 的电池供电，对 100 个传感节点进行数据采集，根据估算出的电流理论值，按 5 分钟为间隔可以不间断工作 108 天；按 10 分钟为间隔可以不间断工作 215 天；按 15 分钟为间隔可以不间断工作 322 天。