

## 基于 ZigBee 的节能型水产养殖环境监测系统

杨旭辉<sup>1,2</sup>, 周庆国<sup>2\*</sup>, 韩根亮<sup>1</sup>, 郑 礴<sup>1</sup>, 张红霞<sup>1</sup>, 卜世杰<sup>1</sup>, 徐武德<sup>1</sup>

(1. 甘肃省科学院传感技术研究所 甘肃省传感器与传感技术重点实验室, 兰州 730000;

2. 兰州大学信息科学与工程学院, 兰州 730000)

**摘 要:** 该文基于 ZigBee 无线传感器网络技术, 设计了一种节能型水产养殖环境监测系统, 用于实时监测水的温度、pH 值、溶解氧浓度和浊度等参数。系统采用 CC2530 为核心处理器设计无线传感器节点; 运用开源的 Z-stack 协议栈开发了节点应用程序, 提高了系统的稳定性和可靠性; 使用 9 V 锂电池为无线传感器节点供电, 实现了系统的无线化; 采用 C/S 和 B/S 混合编程模式开发了简单直观的本地用户监测界面和远程监测网站, 实现了系统的本地监测和远程监测; 采用分时、分区供电的方式和数据融合技术延长了节点的生存时间。该文介绍了系统软硬件设计方法, 并重点阐述了软件和硬件的节能策略。实验室测试表明, 采用方案 4 (传感器不一直工作, 数据全部发送), 节点数据采集周期为 10 min, 节点能正常工作 94 d, 实际系统上线时, 节点数据采集周期为 30 min, 节点预计能正常工作 280 d 左右; 运用节能策略后, 节点寿命延长了 1 倍。在甘肃省某虹鳟鱼养殖基地进行了实地测试, 路由节点剩余能量约占总能量的 47%, 终端节点剩余能量约占总能量的 33%, 路由节点能量消耗较快, 距离汇聚节点最近的 16 号路由节点的寿命预估只有 134 d。结果表明该系统具有功耗低、运行稳定、网络寿命长等优点, 能实现水产养殖环境的实时监测, 具有很好的市场前景和推广价值。

**关键词:** 水产养殖; 无线传感器网络; 传感器; ZigBee; 节能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.024

中图分类号: S210;S969

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0183-08

杨旭辉, 周庆国, 韩根亮, 郑 礴, 张红霞, 卜世杰, 徐武德. 基于 ZigBee 的节能型水产养殖环境监测系统 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 183—190. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.024 <http://www.tcsae.org>

Yang Xuhui, Zhou Qingguo, Han Genliang, Zheng Bo, Zhang Hongxia, Bu Shijie, Xu Wude. Energy-efficient aquaculture environmental monitoring system based on ZigBee[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 183—190. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.024 <http://www.tcsae.org>

### 0 引 言

中国的水产养殖业近年来得到了迅猛发展, 产量已占到世界总产量的 70%。但多数水产养殖环境监测仍停留在传统的依靠人工经验的水平上, 成本高、效率低<sup>[1]</sup>, 已经无法满足当前水产养殖业发展需求。建立自动化的水产养殖环境监测系统, 对水体温度、pH 值、溶解氧浓度和浊度等参数进行长期的实时监测, 是提高现代水产养殖监管水平的一个重要措施<sup>[2]</sup>。

目前许多学者研究了多种水产养殖环境监测系统。黄建清等基于 MSP430F149 单片机研究了水体温度、pH 值和溶解氧浓度的监测系统<sup>[3]</sup>; 徐凯等运用 ZigBee 技术

设计了树形无线传感器网络用于监测水体温度、pH 值和溶解氧浓度<sup>[4]</sup>; 颜波等研究了基于物联网的智能化监控系统用于温室大棚工厂化养殖环境监测<sup>[5]</sup>。闫敏杰等研究了基于无线传感器网络的鱼塘监控系统用于监测鱼塘环境中的氧含量和水温<sup>[6]</sup>。上述几种系统都采用了无线传感器网络技术, 但是由于无线传感器节点往往采用电池来供电, 如果不考虑网络的节能效果, 那么整个网络的寿命则会大打折扣。近年来无线传感器网络节能技术已经得到了充分的研究, 理论成果比较丰富, 如低功耗硬件设计<sup>[7]</sup>、低功耗通信技术<sup>[8]</sup>、能量有效的路由协议<sup>[9]</sup>、拓扑管理与控制策略<sup>[10]</sup>、数据融合技术<sup>[11]</sup>等。但是针对电化学生感器在无线传感器网络应用中的节能技术研究工作却较少。

本文运用基于 ZigBee 的无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 技术, 设计了一种节能型水产养殖环境监测系统, 用于实时监测水的温度、pH 值、溶解氧浓度和浊度等水产养殖环境参数。系统运用电池为无线传感器节点供电, 以实现系统的无线化; 并分别从软件和硬件上设计了相应的节能策略来降低网络功耗, 提高网络寿命。该系统采用网状网络对水产养殖环境进行监测, 系统容量扩充方便, 能对大、中、小型养殖环境实时监测。

收稿日期: 2015-03-10 修订日期: 2015-07-26

基金项目: 甘肃省重点实验室专项项目(145RTSA009); 甘肃省科技支撑计划项目 (1204GKCA046); 兰州市科技发展计划项目 (2013-4-13); 甘肃省科学院青年科技创新基金项目 (2014QN-19); 甘肃省科学院青年科技创新基金项目 (2013QN-01)

作者简介: 杨旭辉, 工程师, 主要从事传感器应用与远程监控方面的研究工作。兰州 甘肃省科学院传感技术研究所, 730000。

Email: yangxh1-2@163.com

\*通信作者: 周庆国, 博士, 博士生导师, 主要从事计算机技术应用与无线传感器网络方面的研究工作。兰州 兰州大学信息科学与工程学院, 730000。

Email: zhouqg@lzu.edu.cn

## 1 系统架构设计

### 1.1 系统结构设计

ZigBee 是 802.15.4 标准, 工作在 2.4 GHz 频段, 是一种低速率、低功耗、安全性高、价格低廉的传输协议, 自组网能力强, 易于扩张, 适合在低功耗、节点多的无线传感器网络中使用。在综合评价了无线网络领域主要的几种传输协议<sup>[12-13]</sup>后, 选择了 ZigBee 协议作为本系统的网络传输协议。

整个系统分为养殖环境监测区、本地监测区和远程监测区 3 个区域。系统结构框图如图 1 所示。

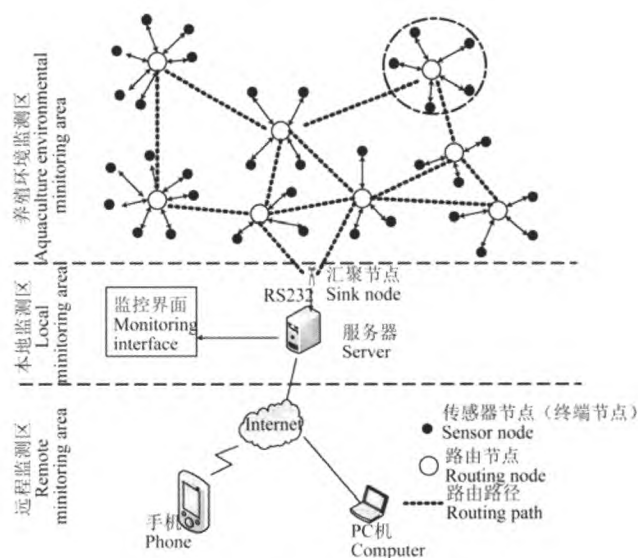


图 1 监测系统架构图

Fig.1 System structure of monitoring system

养殖环境监测区是由带有传感器的终端节点和路由节点组成的无线传感器网络, 整个网络使用 ZigBee 无线通讯技术, 以网状拓扑结构组成动态自组织网络。如图 1 虚线椭圆内所示, 一个路由节点周围有若干个与它直接相连的终端节点, 它们组成星型结构。这些终端节点和其他节点联系的唯一途径是这个路由节点。汇聚节点只有一个, 其网络地址为 0x0001; 所有路由节点和汇聚节点组成网状结构, 路由节点以多跳的方式将数据转发到汇聚节点<sup>[3-6]</sup>。

本地监测区由一个汇聚节点、一台服务器和显示屏组成。其中汇聚节点将数据通过 RS232 串口发送到服务器。安装在服务器上的监测软件接收到来自汇聚节点的数据, 进行数据解析后, 将解析结果存储到数据库中, 同时在显示屏上直观的显示出来。在服务器上还开发了用于远程监测的网站。

远程监测区是位于互联网远端的监测设备, 如可以联入 Internet 网络的手机、PC 机等。这些设备可以通过浏览器浏览位于本地监测区的监测网站来查看监测结果。

### 1.2 系统节能技术设计

无线传感器网络节点一般由电池驱动, 能量有限,

能量消耗大小决定着系统生命周期长短, 所以低功耗是无线传感器网络最重要的设计准则之一<sup>[14]</sup>。在设计水产养殖环境监测系统时, 一方面选择体积小, 容量大的电池作为电源, 另一方面设计合理的软硬件节能技术, 以延长节点的寿命。

假设一个节点的能量初始值为  $E$ , 节点在单位时间的能量消耗为  $E_0$ 。根据本文的节点硬件设计方案, 可以建模如下<sup>[15-16]</sup>:

$$T = \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

$$E_0 = E_{\text{Sensor}} + E_R + E_{\text{Send}} + E_{\text{CPU}} + \Delta E \quad (2)$$

式中:  $T$  为节点的生存时间;  $E_{\text{Sensor}}$  为传感器和信号调理电路消耗的能量;  $E_R$  为节点接收数据消耗的能量;  $E_{\text{Send}}$  为节点发送数据消耗的能量;  $E_{\text{CPU}}$  为 CPU 处理数据所消耗的能量;  $\Delta E$  为必须工作的电路消耗的能量以及未计算在内的能量损耗。

在本应用中, 终端节点接收的数据仅仅是路由节点或者汇聚节点定时发送的网络连接确认消息, 数据量恒定, 故节点的  $E_R$  值基本不变或者变化很小, 将其与  $\Delta E$  合并为  $\delta E$ , 则公式 (2) 可以简化为:

$$E_0 = E_{\text{Sensor}} + E_{\text{Send}} + E_{\text{CPU}} + \delta E \quad (3)$$

在水产养殖环境监测系统中, 各个节点并非一直处于监测状态, 而是大部分时间处于空闲状态。所以有必要对传感器和调理电路、RF 模块进行分时分段供电, 以减少各个部件工作的时间, 并将 CPU 实时的置于休眠模式。为了方便描述, 将温度、pH 值、溶解氧和浊度传感器及相应的调理电路分别标示为 1、2、3 和 4, 将 RF 模块标示为 5、CPU 标示为 6, 则可以将  $E_0$  修改为

$$E_0 = \sum_{i=1}^6 [\alpha_i P_i + (1 - \alpha_i) P_{si}] + \delta E \quad (4)$$

式中:  $\alpha_i$  为模块  $i$  工作的占空比;  $P_i$  为模块  $i$  开启状态的功耗;  $P_{si}$  为模块  $i$  关闭/休眠时的功耗;  $\delta E$  为无法进行能量管理的电路的功耗, 为定值。

由于节点硬件确定以后, 对于每一个模块  $i$ , 其  $P_i$  和  $P_{si}$  为定值, 且  $P_i \gg P_{si} \approx 0$ 。可以将  $E_0$  写成  $\alpha_i$  的函数:

$$E_0 = \sum_{i=1}^6 [(P_i + P_{si}) \alpha_i + P_{si}] + \delta E, \text{ 其中 } \alpha_i \in [0, 1] \quad (5)$$

则节点的生存时间  $T$  可以表示为:

$$T = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sum_{i=1}^6 [(P_i + P_{si}) \alpha_i + P_{si}] + \delta E} \quad (6)$$

其中  $\alpha_i \in [0, 1]$

在能量初始值  $E$  不变的情况下, 要使节点生存时间  $T$  增大, 需要减小单位时间的能量消耗  $E_0$  的值。从公式 (6) 中显然可以看出, 只能降低每一个  $\alpha_i$  的值, 即降低模块  $i$  工作的占空比<sup>[7]</sup>。

为了能够有效控制模块  $i$  工作的占空比, 需要根据各个模块能耗的大小, 在硬件和软件上都采取相应的措施

以降低能量损耗。在硬件上设法控制各个模块的电源供应；在软件上设法通过增加本地计算量来减少无线发送的数据量。

2 系统硬件设计

2.1 节点硬件设计

无线传感器网络节点有路由节点、终端节点和汇聚节点。在本系统的设计中，终端节点主要任务是数据采集；路由节点不仅承担了数据的转发任务，它自身也带有传感器进行环境的数据采集，所以路由节点和终端节点在硬件结构上是完全相同的。汇聚节点由于放置在本地监视区，主要任务是用无线方式收发数据，并通过 RS232 串口上传数据，不具有数据采集的功能。所以它除了没有传感器及相关外围电路以为，其余部分和路由节点是相同的。因此本文仅介绍无线传感器节点（终端节点和路由节点）的硬件设计。

无线传感器节点包括温度传感器、pH 值传感器、溶解氧传感器、浊度传感器及它们各自的信号调理电路、中央处理器、电源及无线通讯等模块，无线传感器节点的结构如图 2 所示<sup>[17]</sup>。其中温度传感器采用数字温度传感器 DS18B20；pH 传感器采用东莞豪森仪器有限公司生产的原电池型 pH 值传感器，型号为 H-101；溶解氧传感器采用上海仪电科学仪器股份有限公司生产的 DO-957 型极谱式溶解氧电极；浊度传感器采用 GE 公司生产的 TS 浊度传感器。信号调理电路中均使用了低功耗芯片设计放大电路，具体设计方法在多篇文献中已有详细论述<sup>[18-20]</sup>，本文不再赘述。

AD 转换采用了主控制器 CC2530 中内置的 AD 转换模块，该 AD 转换模块的分辨率可以设置为 7 位、9 位、10 位和 12 位，有 7 个单端电压输入通道。本文采用 12 位 AD 转换分辨率。

核心处理器采用德州仪器公司开发的 CC2530 芯片。该芯片使用 8051CPU 内核，具有高达 256KB 的可编程的非易失性程序存储器，内置了 RF 模块（支持 IEEE 802.15.4 标准协议），多通道的 AD 转换器，2 路 UART。另外德州仪器公司还为其开发了一套用于 ZigBee 兼容解决方案的 Z-Stack 软件，大大降低了软件开发难度。

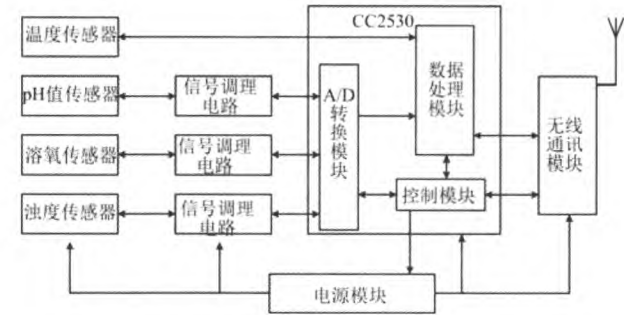


图 2 无线传感器节点结构框图  
Fig.2 Structure of wireless sensor node

2.2 硬件节能技术

在本系统中采用能量有限的 9V 锂电池供电，为了节省能量消耗，本系统在设计时选用了低功耗处理器、传感器和通信模块及放大器芯片。另外，在电源模块中将一个串行控制八通道模拟开关 ADG1414 放置在电源与传感器、调理电路之间，通过控制开关通断进行电源的动态管理，实现传感器、信号调理电路和无线发射模块的分时、分区供电。本文设计的电源模块框图如图 3 所示。

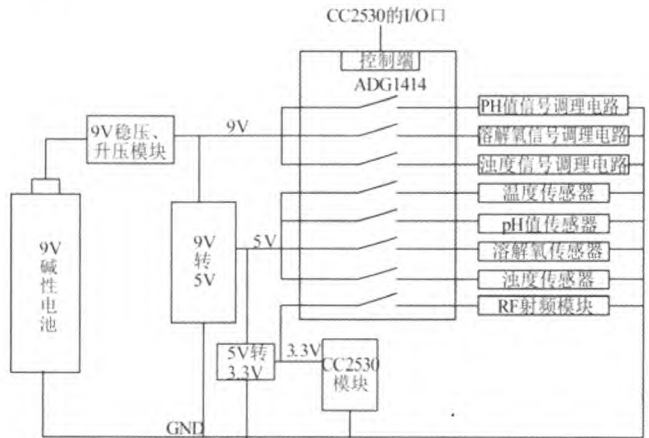


图 3 电源模块框图  
Fig.3 Power supply module block diagram

3 系统软件设计

3.1 系统软件设计

下位机软件在 IAR Embedded Workbench 7.51 集成开发环境下开发。下位机应用程序使用 TI 开发的 Z-Stack 协议栈为基础编写。

终端节点在加入网络成功之后，主要的工作是进行温度、pH 值、溶解氧、浊度的数据采集、数据融合以及异常数据的发送。路由节点除了数据采集外，还需要监听中断口，一旦收到数据，则立刻转发出去。

上位机的软件包括串口数据收发、本地监测界面、远程监测界面、数据处理、Web 服务和数据库服务等模块。上位机软件使用 Java 编程语言，采用 C/S (Client/Server) 和 B/S (Browser/Server) 的混合编程模式，既能在本地监测界面上实时查看监测结果，又能在远程通过浏览器查看监测结果。上位机软件系统结构如图 4 所示。

数据处理模块的一个任务是完成 RS232 串口数据的接收、按照数据帧格式进行数据解析、给数据库服务模块发送存储命令；另外一个任务是从数据库中取出所需的监测数据，形成本地监测界面的后台数据。

Web 服务模块提供远程浏览器访问本地服务器监测信息的浏览服务。以便远程的监测人员通过手机、个人 PC 机或者其他工具连接到本地服务器上查水产养殖环境监测情况。

数据库服务模块完成数据处理模块与数据库的交互



以及 Web 服务模块与数据库的交互工作。

数据库采用 SQLServer2000 设计。数据库系统中主要包含用户表及历史监测数据等表格。

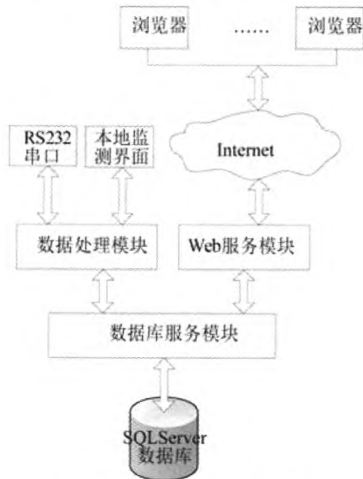


图 4 上位机软件系统框图

Fig.4 Software block diagram of upper computer

3.2 软件节能技术

研究表明无线传感器网络节点传输信息时要比执行计算时消耗更多电能，传输 1 bit 信息 100 m 距离需要的能量大约相当于执行 3 000 条计算指令消耗的能量<sup>[14]</sup>。所以提高数据质量，减少数据传输总量是减少节点能耗、延长网络工作寿命的重要方法。

在正常工作情况下，水产养殖环境各项参数指标都是符合要求的。如果将这些数据全部发送到汇聚节点，则会浪费很多的能量资源。因此，在传感器节点采集到数据后，利用节点的本地计算能力和存储能力，将采集的数据与设定的参数阈值进行比较，得出该组数据是否异常<sup>[21]</sup>。如果某个数据异常，则只将该数据放入数据帧发送给汇聚节点，如果多个数据异常，则将这些异常数据放入数据帧发送给汇聚节点；如果全部正常则无需进行数据发送。

采用这种方法，可以利用处理器的计算能力减少 RF 模块发送的数据量，从而降低 RF 模块的功耗。

4 系统实现与测试

4.1 节点能耗对比试验

项目组按照上述设计方案，设计了无线传感器节点样机，如图 5 所示。

在样机设计制作完成之后，项目组用 12 个传感器节点、一个路由器节点和一个汇聚节点做了节点的能耗对比试验。过程如下，如下图所示，节点 1 和节点 2 的传感器组放置在烧杯 1 中，……，节点 11 和节点 12 的传感器组放置在烧杯 6 中。所有节点只连接到路由节点 A。所有节点距离路由节点的距离都相同，为 1 m，以防止个别节点因为传输信号弱而引进误差。各个节点的电池均为全新的标称值为 2 200 mAh 的 9 V 锂电池，随机安装在各个节点上，路由节点不采用电池供电。为了能尽快

将所有电量全部耗光，系统各个节点每过 10 min 启动 1 次数据采集。

设计的测试方案如下：节点 1、3、5 不采用节能策略，即传感器一直处于工作状态，并且每次采集的数据都要发送给路由节点；节点 2、4、6 采用本文所设计的节能策略，所有传感器分时工作，节点数据异常时才发送给路由节点；节点 7、9、11 的传感器一直处于工作状态，但是仅在数据异常时才发送数据；节点 8、10、12 的传感器分时工作，但是只要收到数据就发送给路由节点。

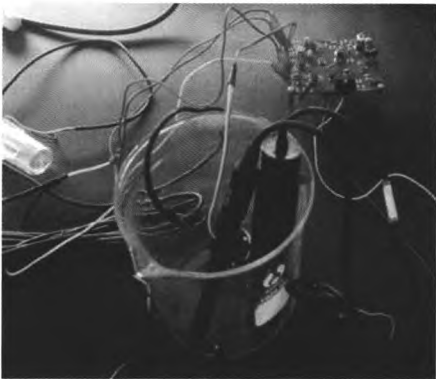


图 5 无线传感器节点样机

Fig.5 Prototype of wireless sensor node

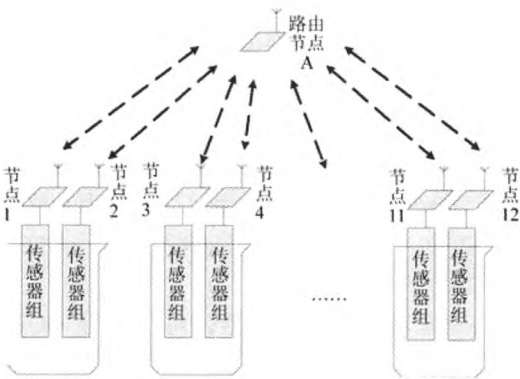


图 6 系统能耗对比实验示意图

Fig.6 Schematic of system energy consumption comparison experiment

测试结果如表 1 所示。从表中可以看出，在传感器工作状态相同的情况下，发送部分数据比发送全部数据时节点寿命延长了约 50 h。在实现分时分区供电以后，节点的寿命延长了将近 1 倍。从测试结果可知，系统所采用的电化学传感器和信号调理电路成为终端节点耗电的主导因素，而数据发送量已经成为终端节点耗电的次要因素，节能效果并不明显。为了不丢失有用信息，提高水产养殖参数测量的精准性，项目组决定采用表 1 中的方案 4 作为最终的节能方案。由于在测试时，节点数据采集周期为 10 min，采用节能策略后，节点能正常工作 94 d。而在实际系统上线后，节点数据采集周期为 30 min，采用节能策略后，节点预计能正常工作 280 d 左右。

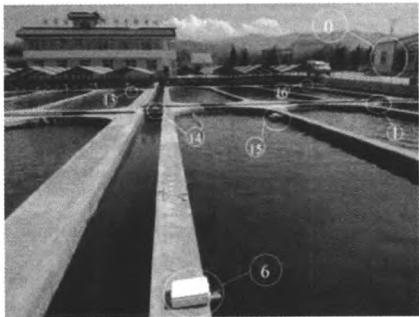
表 1 系统能耗对比试验结果表

Table 1 Results of system energy consumption comparison experiment

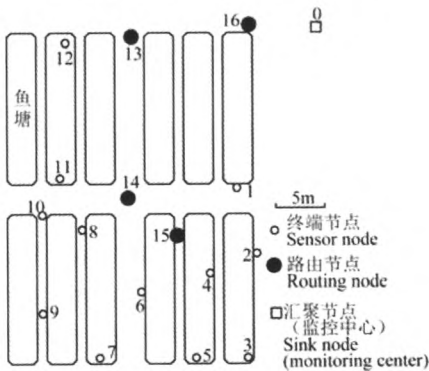
方案标号 Scheme number	方案 Scheme		节点标号 Node number	工作时间 Working time/h	均值 Average value/h	延长寿命 Extend lifetime/h
	传感器是否一直工作 Sensor in working	数据是否全部发送 All data is sent				
1	是	是	1	1195	1199.6	—
			3	1200		
			5	1204		
2	否	否	2	2300	2310	1110.4
			4	2314		
			6	2317		
3	是	否	7	1250	1251	51.4
			9	1257		
			11	1246		
4	否	是	8	2257	2265.3	1065.7
			10	2273		
			12	2266		

4.2 系统现场测试与结果

项目组在实验室测试合格之后，又在甘肃省某虹鳟鱼养殖基地进行了实地测试，如图 7 所示。



a. 现场测试节点分布照片  
a. Nodes distribution pictures of field test



b. 现场测试节点分布示意图  
b. Nodes distribution diagram of field test

注：由于场景较大，不能显示全部测试节点，且在该图中有些节点看起来特别小，故用椭圆圈了起来，并标了号。其中 13、14、15、16 为路由节点，1 和 6 为终端节点，0 为监控中心位置。  
Note: Because the scene is larger, it can't reveal all test nodes, and some nodes look very small in this map, so we ring round them using ellipses, and give them the number. In the map, the node 13, 14, 15, 16 are routing nodes, 1 and 6 are the sensor nodes, 0 is monitoring center.

图 7 现场测试节点分布图  
Fig.7 Node distribution map of field test

测试条件如下：所有电池均为全新的标称值为

2 200 mAh 的 9 V 锂电池，电池随机安装；节点正常通信距离 30 m(在开阔、无遮挡环境下测得丢包率低于 0.1%)；节点数据采集周期为 30 min，采用表 1 中的节能方案 4；网络为动态自组织的网状结构，其中终端节点 12 个，路由节点（具备数据采集功能）4 个，汇聚节点（采用有线电源供电）1 个，节点间距离约 20 m。为期 3 个月的测试结束时，所有节点工作均正常。项目组将所有节点的电池取回，进行了放电试验，以估算电池剩余能量，结果如图 8 所示，其中标号为 1~12 的 12 个节点为终端节点，标号为 13~16 的 4 个节点为路由节点。终端节点剩余的能量约占总能量的 66%；再根据实验室测试值可估算出现场条件下终端节点剩余的能量约占总能量的比值，计算方法如下：

$$D=1-\frac{E_1}{E}=1-\frac{T_d\times d_p\times P_2}{d\times P_1}\times 100\% \tag{7}$$

式中： $E_1$  为现场测试时间内消耗的总能量； $E$  为根据实验室测出的耗光电池能量所需的时间估算出的电池能量总值； $T_d$  为 1 d 的小时数，为常数 24 h； $d_p$  为预计测试的天数，为与现场测试相比对，该值为 90 d； $P_2$  为现场测试条件下单位时间消耗的能量； $d$  为实验室实际测试的时间，从表 1 方案 4 中可知，该值为 2 265.3 h； $P_1$  为实验室测试条件下单位时间消耗的能量。

单位时间消耗的能量  $P$  计算公式如下：

$$P=\frac{P_s\times t_s+P_w\times t_w}{t_s+t_w} \tag{8}$$

式中： $P_s$  为节点休眠时的平均单位能耗； $t_s$  为 1 个数据采集周期内的节点休眠时间； $P_w$  为节点工作时的平均单位能耗； $t_w$  为 1 个数据采集周期内的节点工作时间。

将  $P_1$ 、 $P_2$  分别用公式(8)表示出来为：

$$P_1=\frac{P_{1s}\times t_{1s}+P_{1w}\times t_{1w}}{t_{1s}+t_{1w}} \tag{9}$$

$$P_2=\frac{P_{2s}\times t_{2s}+P_{2w}\times t_{2w}}{t_{2s}+t_{2w}} \tag{10}$$

式中:  $P_{1s}$  为实验室测试条件下节点休眠时的单位能耗;  $t_{1s}$  为实验室测试条件下 1 个数据采集周期内的节点休眠时间;  $P_{1w}$  为实验室测试条件下节点工作时的单位能耗;  $t_{1w}$  为实验室测试条件下 1 个数据采集周期内的节点工作时间;  $P_{2s}$  为现场测试条件下节点休眠时的单位能耗;  $t_{2s}$  为现场测试条件下 1 个数据采集周期内的节点休眠时间;  $P_{2w}$  为现场测试条件下节点工作时的单位能耗;  $t_{2w}$  为现场测试条件下 1 个数据采集周期内的节点工作时间; 显然,  $P_{1s}=P_{2s}$ ,  $P_{1w}=P_{2w}$ ,  $t_{1w}=t_{2w}$ ,  $t_{1s}+t_{1w}=10\text{ min}$ ,  $t_{2s}+t_{2w}=30\text{ min}$ , 则:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{3} \times \frac{P_{1s} \times t_{1s} + P_{1s} \times (t_{2s} - t_{1s}) + P_{1w} \times t_{1w}}{P_{1s} \times t_{1s} + P_{1w} \times t_{1w}} = \frac{1}{3} \times (1 + \Delta p) \quad (11)$$

将公式 (11) 带入公式 (7), 代入已知数值, 可估算出的终端节点剩余能量比为:

$$D = 68.2\% - \frac{1}{3} \times \Delta p \quad (12)$$

式中:  $\Delta p$  是与节点休眠时间有关的量。从式 (12) 知, 测试结果与估算结果基本相符。

路由节点中 13、14、15 号节点剩余能量约占总能量的 47%, 是因为这些路由节点不仅担任着数据采集任务, 还要兼顾自己所连接的终端节点的数据转发任务, 所以增加了节点的能量消耗。16 号节点的剩余能量约占总能量的 33%, 是因为该节点不仅担任着数据采集任务和自己所连接的终端节点的数据转发任务, 还要转发其他路由节点的数据。综上所述, 实地测试数据基本与实验室测试数据相符。但是可以看出, 路由节点能量消耗较快, 距离汇聚节点最近的 16 号路由节点的寿命预估只有 134 d, 一旦该路由节点能量消耗完, 将会出现断网情况。为了解决该问题, 延长路由节点的寿命, 我们将在下一步的工作中去掉路由节点的数据采集功能, 并设计性能优良的路由算法, 让路由节点能够根据其能量大小进行自动轮换。

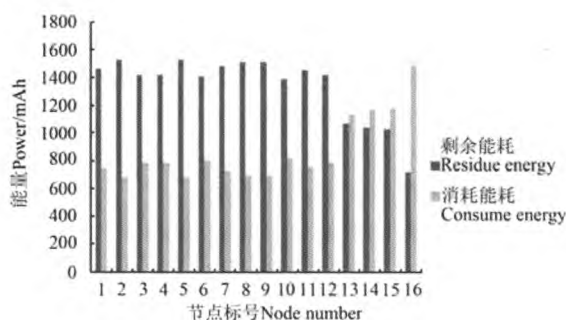


图 8 电池能耗测试结果

Fig.8 Battery energy consumption test results

## 5 结 论

随着水产养殖向精细化养殖的转变, 迫切需要建立无人值守的自动化监控系统。本文基于 ZigBee 设计开发了节能型水产养殖环境监测系统。系统采用了低功耗的节点设计方案和低功耗的软件设计方案, 降低了节点的

能耗, 延长了网络生存周期。运用开源的 Z-stack 协议栈开发了节点应用程序, 提高了系统的稳定性和可靠性; 还开发了简单直观的本地用户监测界面和远程监测网站, 实现了系统的本地监测和远程监测。本系统具有价格低廉、监测准确、用户界面良好、网络寿命长等优点, 提高了国内水产养殖自动化水平, 具有较高的应用前景和市场推广价值。

采用方案 4 (传感器不一直工作, 数据全部发送), 实验室测试时, 节点数据采集周期为 10 min, 节点能正常工作 94 d, 实际系统上线时, 节点数据采集周期为 30 min, 节点预计能正常工作 280 d 左右。在甘肃省某虹鳟鱼养殖基地进行了实地测试, 路由节点剩余能量约占总能量的 47%, 终端节点剩余能量约占总能量的 33%, 路由节点能量消耗较快, 距离汇聚节点最近的 16 号路由节点的寿命预估只有 134 d。

但是由于为了降低系统在开发时的复杂性, 在数据融合技术应用上, 本文仅仅采用了简单的数据级融合技术进行了降低网络能耗的试验, 虽然对延长网络寿命有作用, 但效果并不明显。在未来的工作中, 我们将利用数据融合技术对数据进行特征级融合和决策级融合, 进一步提高系统的智能化水平; 同时研究性能优良的路由算法, 实现路由节点的自动轮换, 以提高路由节点的生存时间。

## 【参 考 文 献】

- [1] 罗相忠, 邹桂伟, 潘光碧, 等. 我国淡水渔业现状与发展趋势[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2005, 2(5): 98—102. Luo Xiangzhong, Zou Guiwei, Pan Guangbi, et al. Current Status and Prospects of Freshwater Fishery in China[J]. Journal of Yangtze University: Nat Sci Edit, 2005, 2(5): 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [2] Moffitt C M, Cajas-Cano L. Blue Growth: The 2014 FAO State of World Fisheries and Aquaculture[J]. Fisheries, 2014, 39(11): 552—553.
- [3] 黄建清, 王卫星, 姜晟, 等. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 183—190. Huang Jianqing, Wang Weixing, Jiang Sheng, et al. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [4] 徐凯, 张秋菊, 李克修, 等. 基于 ZigBee 的水产养殖无线监控系统设计[J]. 电子技术应用, 2012, 38(4): 67—69. Xu Kai, Zhang Qiuju, Li Kexiu, et al. Design of monitoring and control system for aquaculture based on ZigBee technology[J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(4): 67—69. (in Chinese with English abstract)

- [5] 颜波, 石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 259–265.  
Yan Bo, Shi Ping. Intelligent monitoring system for aquiculture based on internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 259–265. (in Chinese with English abstract)
- [6] 闫敏杰, 夏宁, 侯春生, 等. 基于无线传感器网络的鱼塘监控系统[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 388–392.  
Yan Minjie, Xia Ning, Hou Chunsheng, et al. Design for fish pond monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16): 388–392. (in Chinese with English abstract)
- [7] 汪立林. 无线传感器网络节点超低功耗的系统级实现方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
Wang Lilin. Research of WSN Node Ultra-low Power Realization Method of System-level[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [8] Kannan R, Kalidindi R, Iyengar S S, et al. Energy and rate based MAC Protocol for wireless Sensor Networks[J]. SIGMOD Record, 2003, 32(4): 60–65.
- [9] Chakraborty A, Ganguly S, Naskar M K, et al. A Trust based congestion aware hybrid ant colony optimization algorithm for energy efficient routing in wireless sensor networks (TC-ACO)[C]// Advanced Computing (ICoAC), 2013 Fifth International Conference on. IEEE, 2013: 137–142.
- [10] Santi P. Topology control in wireless ad hoc and sensor networks[J]. Acm Computing Surveys Surveys Homepage, 2005, 37(2): 164–194.
- [11] Al-Karaki J N, Ul-Mustafa R, Kamal A E. Data aggregation and routing in wireless sensor networks: Optimal and heuristic algorithms[J]. Computer Networks, 2009, 53(7): 945–960.
- [12] Shahin Farahani. ZigBee Wireless Networks and Transceivers[M]. America: Newnes, 2008.
- [13] 刘钊汐. 蓝牙与 ZigBee 的简要比较及分析[J]. 河北理工大学学报: 社会科学版, 2007, 7(增刊 1): 146–148.  
Liu Yixi. Superficial comparison and analysis of ZigBee and bluetooth[J]. Journal of Hebei Polytechnic University: Social Science Edition, 2007, 7(Suppl.1): 146–148. (in Chinese with English abstract)
- [14] 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660–670.
- [16] 陈宏滨, 冯久超, 谢智刚. 传感器网络中的盲源分离与信号重构[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [17] 程元, 鄢楚平, 雷昕, 等. 基于低能耗的无线传感器节点硬件设计方法研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(24): 6221–6223.  
Cheng Yuan, Yan Chuping, Lei Xin, et al. Research of hardware design method based on low power wireless sensor[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(24): 6221–6223. (in Chinese with English abstract)
- [18] 董华. 基于 MSP430 单片机的 pH 计的研制[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.  
Dong Hua. The Design of pH Meter Based on MSP 430[D]. Jilin: Jilin University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱亚明. 水产养殖溶解氧监控系统的设计[D]. 南京农业大学, 2009.  
Zhu Yaming. Design of Monitoring and Control System of Dissolved Oxygen on Aquiculture[D]. Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [20] 姜德志, 姬光荣, 陈艳丽. TS 浊度传感器在洗衣机中的应用[J]. 国外电子器件, 2007(8): 68–72.  
Jiang Dezhi, Ji Guangrong, Chen Yanli. Application of TS turbidity sensor in washing machine[J]. Foreign Electronic Components, 2007(8): 68–72. (in Chinese with English abstract)
- [21] 姜延吉. 多传感器数据融合关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.  
Jiang Yanji. Research on Key Technologies of Multi-Sensor Data Fusion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. (in Chinese with English abstract)

## Energy-efficient aquaculture environmental monitoring system based on ZigBee

Yang Xuhui<sup>1,2</sup>, Zhou Qingguo<sup>2\*</sup>, Han Genliang<sup>1</sup>, Zheng Bo<sup>1</sup>, Zhang Hongxia<sup>1</sup>, Bu Shijie<sup>1</sup>, Xu Wude<sup>1</sup>

(1. Gansu Province Key Laboratory of Sensors and Sensing Technology, Institute of Sensor Technology, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. School of Information Science & Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** China's aquaculture industry develops rapidly in recent years, but most of the aquaculture environmental monitoring is still in the level of traditionally relying on artificial experience, and its cost is high and efficiency is low, and has been unable



to meet the demand of the current development of aquaculture. This paper, based on ZigBee wireless sensor network technology, designed a kind of energy-efficient aquaculture environmental monitoring system to monitor the water temperature, pH value, dissolved oxygen concentration and turbidity parameters. The paper designed the wireless sensor node using CC2530 as the core processor, designed the A/D conversion module and RF (radio frequency) module by using A/D conversion function and RF function of CC2530, and designed the signal conditioning circuit based on electrochemical sensor. The system supplied electricity for wireless sensor nodes using the 9 V lithium battery to realize the wireless system, developed the node application program using the open source protocol stack Z-stack to improve the system stability and reliability, developed the local user monitoring interface and remote monitoring site using the mixed programming mode of C/S and B/S, constructed the dynamic self-organizing network based on the mesh topology, prolonged the survival time of node using time-sharing and subarea power supply mode and data fusion technology. The paper established the mathematical model from the power of the node modules, and then put forward a kind of energy-saving technology from the 2 aspects of hardware and software. After the design of the node, the paper verified the theoretical calculation through laboratory experiment and field experiment. In laboratory, the comparison experiment of 4 types of schemes of the system energy consumption was carried out. Laboratory tests showed that it doubled the life of nodes when using the time-sharing and subarea power supply for each module of the node. It prolonged the life of node by about 50 h when reducing the amount of data transmission to sink node. The result showed that the electrochemical sensor and signal conditioning circuit used in the system have become the dominant factors of the sensor node power consumption, and the data transmission capacity has become the secondary factor. In order to improve the accuracy of the measurement of the aquaculture parameters, and not lose the useful information, after the analysis of laboratory test data, the best plan was chosen and the experiment was carried out in the field. In the field, system worked for 3 months. Then, the discharge test of the lithium battery of the nodes was carried out. The result showed that the remaining energy of the 12 sensor nodes was about 66% of the total energy, that of the 3 routing nodes was about 47% of the total energy and that of the 1 routing node was about 33% of the total energy. The results of the field test were consistent with the laboratory, and the energy-saving technology was practicable. Therefore, the system has the advantages of low power consumption, stable operation, long network lifetime, and so on. It can realize the real-time monitoring of aquaculture environment, and has the very good market prospect and promotion value.

**Key words:** aquaculture; wireless sensor networks; sensors; ZigBee; energy-efficient