

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.02.022

一种基于 ZigBee 技术的河工模型超声波水位计的设计

马娟¹, 张振², 严锡君², 徐立中²

(1. 安徽省茨淮新河工程管理局, 安徽 蚌埠 233010; 2. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210098)

摘要:设计了一种基于 ZigBee 技术的气介式超声波水位节点装置。节点以 CC2430 为核心, 实现了带有温度补偿的自发自收超声测距系统及削浪滤波算法。该系统具有组网灵活、精度高、成本低、功耗低、可靠性高等特点, 可以解决大尺度河工模型试验中现有仪器在断面多、参数多、试验运行时间长、测点同步性和实时性要求高等条件下的量测难问题。

关键词:河工模型; ZigBee 技术; 超声波水位节点; 温度补偿; 中值滤波

中图分类号:TV211.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2011)02-0089-06

Design of ZigBee-based ultrasonic water gauge for river model/MA Juan¹, ZHANG Zhen², YAN Xi-jun², XU Li-zhong²
(1. Engineering Management Office of Cihuai New River, Bengbu 233010, China; 2. Department of Computer & Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An air-coupled ultrasonic water gauge node based on ZigBee technology was designed. The self-transmitting-self-receiving ultrasonic ranging system with temperature compensation and wave-elimination filtering algorithm was realized by taking CC2430 as the core. The system was characterized by flexible networking, high precision, low cost, low power consumption and high reliability. It could be employed to solve problems in large-scale river model experiments such as multiple sections, multiple parameters, long running time, high requirements for synchronous and real-time measuring, which are difficult for the existing instruments.

Key words: river model; ZigBee technology; ultrasonic water gauge node; temperature compensation; median filter

河工模型试验是探讨河流工程问题的主要研究方法之一, 它的特点是尺度一般较大, 有的超过数千平方米, 并且模型试验历时较短, 需要实时测量整个流场的流态, 取得足够多的数据才能完全描述流体随时间变化的非定常流动^[1]。使用传统的单点测量仪器时需要做长距离移动, 不仅测量精度较低, 而且费时费力。对于一般的多路复用巡检仪, 传感器探头和计算机之间的距离受布线限制, 可扩展的测点数有限, 而且随着测点的增多, 空间中各测量点处的采样时刻难以同步, 采样间隔明显增大, 不能满足大尺度全场测流的需求。

ZigBee 是一种用于无线传感器网络(WSN)的新兴无线连接技术, 主要是面向近距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的设备联网应用。ZigBee 技术标准基于 IEEE 802.15.4 协议栈而建立, 其多跳能力和拓扑灵活性可有效避免各种建筑和设备对无线信号的衰减作用, 其网络的自组织、自适应性可大

幅度提高在线监测系统的可靠性^[2]。由于其每个节点都具有一定的计算、存储和无线通信能力, 使设备的部署更加自由、快捷, 每个监测点的数据可以同时采集并且实时传回监测中心, 因此可以为河工模型量测与控制系统的数据传输提供很好的解决方案。

河工模型中需要测量的参数通常包括水位、地形、流速、含沙量等, 相应的测量仪器有水位仪、地形仪、流速仪和测沙仪。这些常规仪器虽然在明渠和河道中得到了较好的推广, 但由于自身体积大、成本高、设计复杂、精度不高等问题并不能够直接应用于河工模型试验, 节点功耗更是制约无线传感器网络普及的主要因素, 因此有必要根据模型试验中测量精度的要求设计一种低功耗的传感器节点。笔者设计了一种基于 ZigBee 技术的无线传感器网络超声波水位计, 用以实现对大尺度河工模型试验中的水位进行分布式监测, 并提出采用中值滤波的方法减小水位波动带来的误差。

基金项目: 水利部“948”推广项目(201041)

作者简介: 马娟(1978—), 女, 安徽怀远人, 工程师, 从事水利工程管理工作。E-mail: shq_key@163.com

1 超声波水位计的原理与特点

气介式超声波水位计是一种采用脉冲测距法的非接触式水位测量设备,其结构如图1所示。其工作原理如下:首先由超声波传感器向空气中发射中心频率为换能器的工作频率的声脉冲,声波遇到水面后被反射回来,仪器测得以发射脉冲为起点至接收到回波脉冲为止的历时 t ,根据当时测点温度下的声速 v 计算距离 s ,再用传感器安装高程 h 减去其所测至水面距离即得水位 L ,即 $L = h - s = h - v(t/2)$

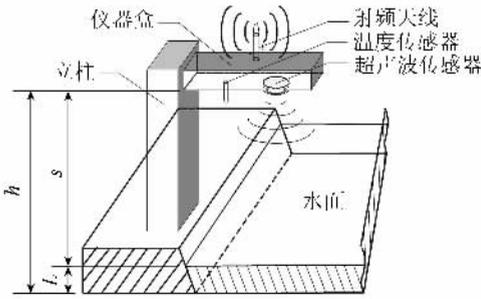


图1 超声波水位计节点结构

与传统的压力式和浮子式等接触式水位计相比,气介式超声波水位计具有以下优势:①无需建观测井,部署灵活。在测量过程中无需任何部件接触水面,不会干扰破坏流场,因而特别适用于窄小流场、易变流场和有害流场的测量。测量装置不受高速水流冲击和漂浮物缠绕堵塞等影响。②与机械的浮子式水位计相比,无运动部件,不因部件磨损锈蚀而产生故障,提高了无故障工作时间;与电子压力式水位计相比,它不利用 ADC 测量压电晶体输出的低电压,没有零漂误差,且测量精度对传感器电源的稳定性不敏感^[3]。

2 超声波水位计节点的硬件设计

超声波水位计在硬件上除了压电传感器外,其余元件均由电子器件组成,体积小、集成度高、易于程控及实现低功耗,这些特点都非常有利于 ZigBee 技术在超声波水位计上的应用。CC2430 片上系统 (SoC) 是一种高度集成的 ZigBee 技术解决方案,它整合了业界领先的 2.4GHz RF 收发机 CC2420 以及工业标准的增强型 8051MCU,并拥有 8 kB 的 SRAM 和 128 kB 的大容量闪存,仅需少量低成本的外置元件即可构建高速、廉价的传感器网络节点^[4]。因此,节点的硬件设计以 CC2430 为核心,利用气介式超声波换能器配合温度传感器实现了水位信息的采集,在监控中心汇聚节点的控制下定时向其发送监测数据,并具备路由节点的功能。图2说明了传感器节

点与汇聚节点内外的连接关系,左侧为传感器节点,通过2节1.5V的AA电池供电,右侧为汇聚节点通过串口与上位机通信。

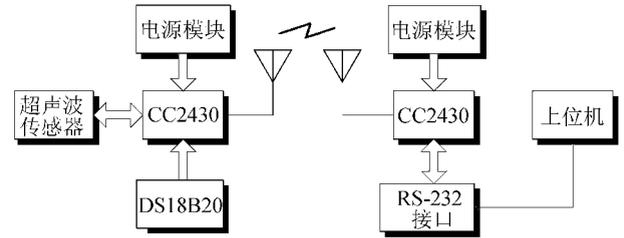


图2 系统连接示意图

本系统针对河工模型试验的应用需求而设计,与常规的超声波水位计相比具有以下特点^[5]:

a. 无线传输、组网灵活。河工模型试验场中各测点与上位机之间的距离可达数百米,但节点与节点之间的距离多在几米至几十米之间,ZigBee 技术的通信协议支持数据以接力的方式在多个测量节点之间相互协调完成通信,无需外加大功率的射频功率放大器。无线连接使设备间原本复杂的连线变得简洁,便于实验装置的维护,基建投资较少。

b. 低速率、低功耗。河工模型试验中水位值的采样频率较低,往往每秒数次甚至以分钟计,节点间数据通信量不大,250 kb/s 的传输速率足以满足需求。ZigBee 技术采用了多种节电的工作模式,设计时可以令大多数时间中处于非采集、处理状态下的传感器节点处于休眠状态,以此来有效地控制功耗,延长电池的使用寿命。

c. 低成本、低复杂度。本系统采用了廉价的 SoC 硬件平台,与 MCU + 射频收发器的方案相比有效地降低了产品成本和开发难度。免专利费的协议栈以及 2.4 GHz 开放频段实现了零使用成本。

d. 数据传输可靠。ZigBee 技术的通信协议在 PHY 层和 MAC 层设置了直序扩频、CSMA/CA 等通信机制,有效保证了数据传输的可靠性,即使在干扰较多的实验室环境下也能正确地传输数据。

e. 网络容量大。1 个 ZigBee 技术网络可以容纳最多 254 个传感器节点(从设备)和 1 个汇聚节点(主设备),而 1 个区域内可以同时存在 200 多个 ZigBee 技术网络,足以满足大尺度模型的布点需求。

f. 网络安装与维护简单。ZigBee 技术的通信协议支持 3 种拓扑结构(星形结构、网状结构和簇状结构),可以根据河流的走势和测点分布情况选择合适的网络。网状网络的 Ad-Hoc 路由算法具有自愈功能,当节点数量和位置发生变动或节点发生故障时,网络能够进行自我修复而无需人工干预,以确保整个系统正常工作。

2.1 发射信号驱动电路

超声波水位节点仅使用 1 个探头工作于自发自收的方式。探头选用直径为 22 mm 的防水型超声波传感器,中心频率为 40 kHz,驱动电压最高为 140 V_{pp},余振时间小于 1.2 ms,测量范围为 0.2 ~ 2 m。其驱动电路如图 3 所示。CC2430 的 P1.1 脚产生每周期 4 个脉冲的 40 kHz 方波,控制反相电子开关 Q1 的通断,由电源直接驱动中周 T1 的初级线圈。R2 为保护电阻并用于调节发射功率,EC1 和 C1 为发射电源的滤波电容。中周的匝数比为 1:10,次级线圈的电感量为 8.5 mH,和超声波换能器的阻抗匹配,以保证效率最佳。R3 为换能器两端的电压采样电阻,与换能器并联不仅抑制了加在换能器上的外来噪声,同时与换能器形成放电回路,加速了余振的衰减,可使盲区减小。

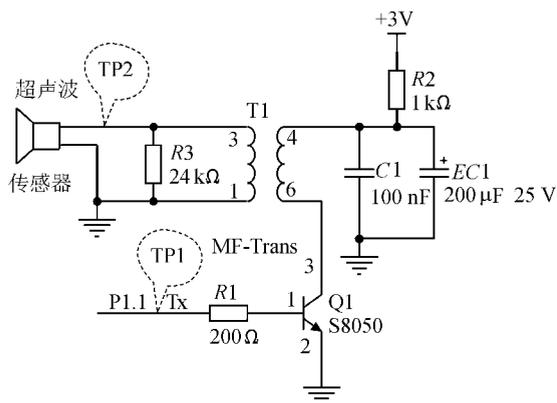


图 3 发射信号驱动电路

2.2 接收信号预处理电路

在接收到水面反射的回波后,换能器会产生压电效应,输出振幅微小的正弦信号。由于收发共用 1 个探头,发射和接收信号均从超声波传感器的 2 脚处获得(图 1),经图 4 中的 C2 耦合至预处理电路。发射信号经中周升压后的幅值在 30 V_{pp} 左右,远大于接收信号,若不进行限幅必然损坏后续电路,因此采用二极管 D1 和 D2 将电位上限钳制在 ±700 mV 左右。

防水型换能器的灵敏度与开放式探头的灵敏度相比要低许多,只能对有 -70dB 的回波产生感应。如此小的声压转换而来的电压也只有微伏级,MCU 的 IO 口是无法感知的,必须进行放大。本节点使用 3 级放大。第 1 级为晶体管反相预放,第 2 级和第 3 级为采用运算放大器的反相放大。图 4 中的 S9014 构成第 1 级预放,R5 为防止饱和失真用于调偏流。

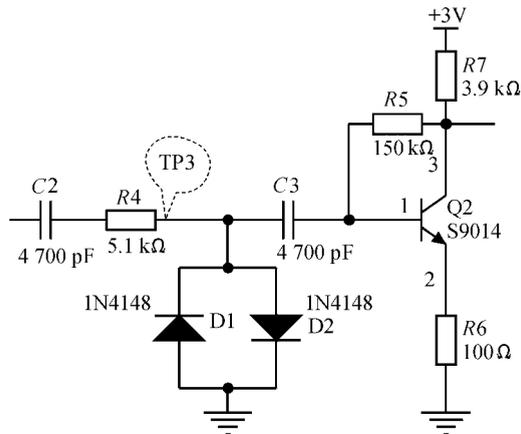


图 4 接收信号预处理电路

2.3 运放构成的 2 级放大电路

接收信号经过预放后仍然不能用示波器观测到,还需要由运算放大器完成 15 万倍左右的放大,如图 5 所示。这个放大倍数是相当可观的,不可能由一级完成,因为每种运算放大器的带宽增益积 (GBW) 是有限的,增益过高会引起自激振荡。且每经过一级放大电路,没有滤除或再次产生的直流成分都会被再次放大,因此每级都需要交流耦合电容,并用 R11 和 R16 调节直流偏置电压。EC3 和 C8 为 OP 的电源滤波电容,去耦电容在布线时要靠近电源

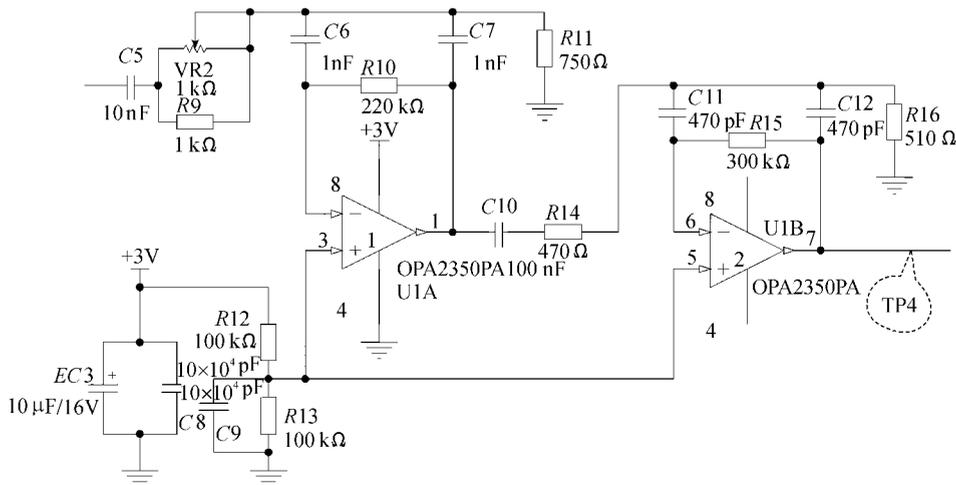


图 5 运算放大构成的两级放大电路

引脚。 R_{12} 和 R_{13} 的作用是获得 $V_{cc}/2$ 加到 OP 的同相输入端, 确定两级交流放大器的工作点。

改变运放的输入电阻与反馈电阻之比就能宽范围调整其增益, 与 R_9 并联的电位器 VR_2 用于调试。经实测得到图 5 所示的两级反相放大器参数: 第 1 级增益 $Gain_1$ 为 $240(R_{10}/R_9)$, 带宽增益积 GBW_1 为 9.6 MHz ; 第 2 级增益 $Gain_2$ 为 $638(R_{15}/R_{14})$, 带宽增益积 GBW_2 为 25.5 MHz 。通用运算放大器的增益通常较小, 因此需要选用宽带高增益运算放大器。

本电路采用的 OPA2350 是一款高速、轨对轨 (rail-to-rail) 输入、输出, 低噪声、小封装的 CMOS 双运算放大器。其带宽为 38 MHz , 噪声低, 为 $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}^{[6]}$ 。理论工作电压的下限为 2.5 V , 实测表明在 2 节 1.2 V 的 AA 充电电池串联供电下也可正常工作。

2.4 检波及整形电路

经过 3 级放大后, 已经可以用示波器观察到形似双边带调幅波的回波信号, 其幅值随距离的增加而衰减。由于脉冲计数测距法所需的参数是发射脉冲与接收脉冲之间的时间差, 在软件上, 当 4 个方波脉冲发射完成后开启定时器 T_1 , 并在完成一段略大于盲区的延时后开启 CC2430 的 PI_3 口的外部中断, 待接收到回波的低电平触发信号后停止 T_1 的计数, 计数值则为时间差。

产生低电平中断触发信号的方式有几种, 可以采用运放构成的过零检测器, 也可以直接采用阈值可调的电压比较器。本系统采用的是二极管包络检波的方法, 如图 6 所示。 $1N60$ 为检波二极管, 其结电容小, 从调幅信号中滤除了高频信号, 双边带的低频包络信号经二极管 D_4 后仅保留幅值为正的上边带, 并对电容 C_{14} 充电, 利用电容上的电平触发三极管 Q_3 的导通, 实现了模拟信号到数字开关信号的转换。由于干扰脉冲的能量小, 脉冲窄, 不足以形成触发信号, 因此采用该方法可以有效提高抗干扰能力。

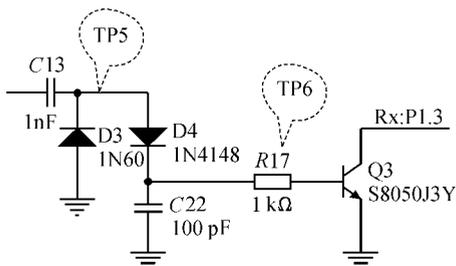


图 6 检波及整形电路

2.5 温度补偿电路

计数脉冲的频率低下以及量程内温度分布不均匀引起的声速不一致通常是脉冲计数超声测距法误差的主要来源。CC24390 内置了 8051 微控制器, 其

典型性能可达标准 8051 性能的 8 倍, 本系统利用 30 MHz 的时钟作为计数脉冲, 所测得的渡越时间的精度在 0.01 mm 以内。河工模型的水位变幅多在 2 m 之内, 短距离的温度变化不大, 可以认为所测的温度值代表了量程内的温度分布, 因此采用单点的温度补偿即可减小后者引入的误差。

超声波在空气中传播的速度 v 随环境温度 T 的升高而变快, 因此, 精确的测距需利用如下关系式进行补偿^[7]:

$$v = 331.5 + 0.607T \quad (1)$$

本系统采用防水封装的 DS18B20 数字式温度传感器进行温度测量。DS18B20 为单总线接口, 只需 1 根信号线与 MCU 连接, 并可由 2 节干电池供电, 工作流耗为 $1.5\text{ mA}^{[8]}$ 。节点设计时, 将 DS18B20 的 DQ 引脚与 CC2430 的 PO_4 相连, 软件配置其工作于 12 位分辨率模式, 输出精度可达 $0.0625\text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 节点的软件设计

3.1 ZigBee 技术协议栈

节点的软件基于 ZigBee 技术协议栈的分层架构编写。考虑到完整版 ZigBee 技术协议栈的复杂性, 这里以精简版的 msstatePAN 协议栈为蓝本。它以有限状态机 (FSM) 的方式追踪要执行的操作, 可实现网状路由及动态网络发现, 但需要静态分配 PAN ID 和通信信道。该协议栈支持 CC2430 开发平台, 源代码基于标准 C 语言编写并完全开放^[9]。节点在此基础上完成应用层的软件设计, 以验证硬件电路的有效性。应用层的状态机函数为 $apsFSM()$, 这个函数需要最早被调用以使协议栈运行。层内程序采用模块化设计, 由初始化、脉冲发射发射、定时器 T_1 溢出中断、 PI_{INT} 外部中断、温度采集、数值计算及显示等子程序组成。

3.2 水位测量的数据后处理

河工模型因水力、风力等因素的影响, 致使其水面波动不平。超声波水位节点的单次测量值为瞬时水位值, 在此条件下该测量值不能正确反映时段水位^[10]。为了提高测量精度, 在软件系统中采用了中值滤波算法实现自动削浪, 获得稳定、可靠的平均水位值。

中值滤波是基于排序统计理论的一种能有效抑制噪声的非线性信号处理技术, 它把数字序列中一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代替, 从而消除孤立的噪声点^[11]。为验证算法的有效性, 测试时人为地对水面加入了轻微的扰动, 数据滤波的实现步骤如下:

a. 从一定长度的水位采样窗口中选取奇数个

数据。这里选择1s内采样的9个瞬时水位数据(单位mm)在RAM中建立长度为9的数组,如:Water_Level[9]={998.13,100.17,100.24,100.21,100.07,100.17,999.31,100.03,100.14}。

b. 按从小到大的顺序对数组进行排序,得:Water_Level[9]={998.13,999.31,100.03,100.07,100.14,100.17,100.17,100.21,100.24}。

c. 用排序后的中值,即100.14mm作为有效的水位值即可。

试验表明,中值滤波是一种基于稳健技术的水位数字滤波方法,它在捕捉突变信号的同时可有效平滑尖峰噪声,但窗口大小和序列长度的设置与脉动波的波幅和周期有较大关联。

4 系统调试及性能评测

4.1 系统调试

节点的硬件调试按照图3~6的顺序逐级展开,采用RIGOL DS1102E双通道数字示波器观测各观测点(TP)的波形,如图7所示,调节电位器VR2使TP4出现的回波峰值最大。

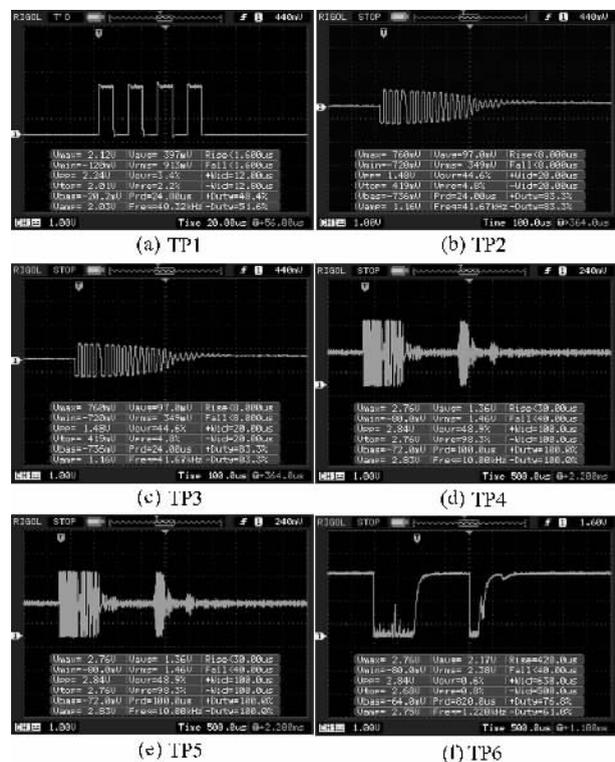


图7 测试点实测波形

4.2 测距精度评测

为标定节点的测距精度,采用500mm×300mm×3mm的硬质铝合金板作为反射物,节点置于塑料防水盒内并固定于滑块上,滑块可在带有标尺的导轨中沿垂直于反射板的方向移动。根据理论分析可知,在最小量程处TP5的回波电压为饱和的峰值电

压,量程仅由TP6中第1个低电平脉冲的宽度决定;最大量程处回波电压为三极管Q3发射极的导通门限0.7V。

减小盲区的有效措施是减小发射功率,通常可采用脉冲振幅调制(PAM)、脉冲频率调制(PFM)和脉冲占空调制(PDM)三种方式控制发射功率。本节点中,PAM对应于调节电阻R2的大小,PFM可用MCU产生非谐振频率的发射脉冲实现,而改变一个周期内发射脉冲的个数即为PDM。减小发射功率带来的弊端是量程的减小,表现为距离相等时TP6中回波窗口宽度的缩短,当发射功率过低时,回波窗口消失。实测表明,当换能器两端的峰值为30V时,每周期4个脉冲可在盲区和量程间取得较好的平衡,保证可靠测量范围在200~2000mm之间。

4.3 系统功耗评测

系统功耗是无线传感器网络节点的重要参数,CC2430接收机在工作时的电流损耗为27mA,而休眠模式下仅为0.9μA,在接收和发射模式下的电耗分别小于27mA和25mA。软件设计时由定时器控制MCU在1s内完成10次采集、计算和无线传输,其余时间处于休眠状态。采用数字万用表的两路通道分别测量电源输出端的电压和电流,对比2节1.2V镍氢充电电池供电时,选用不同运放设计方案的功耗,见表1。

表1 整机功耗测试结果

设计方案	核心板 功耗/ mA	超声模块 功耗/ mA	DC-DC 模块功耗/ mA	整机 功耗/ mW
OPA2350方案	8.59	9.59		43.63
NE5532方案	8.77	19.00	10.53	91.92

NE5532方案的最低工作电压为5V,需要搭配升压型DC-DC模块才能工作,两者功耗均大于OPA2350方案。节点休眠时,若采用可关断的运放(如MAX4249)可使节点流耗进一步降低至0.4mA以内。

5 结语

超声波水位计节点的设计及试验表明:基于ZigBee技术的传感器网络系统应用于大型河工模型试验具有明显的优势,解决了现有仪器在断面多、参数多、试验运行时间长、测点同步和实时性要求高等条件下的量测难题。河工模型量测与控制系统作为水信息学的一个分支,将随着电子技术和计算机应用技术的革新,继续向着网络化、自动化、非接触、高精度的方向不断发展和完善。

参考文献:

[1] 虞邦义,武锋,吕列民.河工模型量测与控制技术研究

进展 J]. 水动力学研究与进展 2001, 16(1): 84-91.

cc350.html.

- [2] 高守玮, 吴灿阳. ZigBee 技术实践教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [3] 王健, 王虹, 任裕民, 等. 河工模型实验中的快速水位波动测量技术及软件平台的搭建[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(1): 57-59.
- [4] Texas Instruments. CC2430 data sheet[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://focus.ti.com.cn/docs/prod/folders/print/cc2430.html>.
- [5] 张云凯, 凌志浩, 徐志远. 生物发酵过程 pH 值检测的无线变送器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2007, 12: 52-55.
- [6] Texas Instruments. OPA350 data sheet[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://focus.ti.com.cn/docs/prod/folders/print/>

- [7] 龚志勇, 程远, 勾勇华, 等. 采用 DS18B20 作温度补偿的超声波液位计[J]. 测控技术, 2004, 23(11): 6-10.
- [8] DALLAS Semiconductor. DS18B20 data sheet[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2812/t/al>.
- [9] ROBERT B R. A zigbee-subset/IEEE 802.15.4 multi-platform protocol stack[EB/OL]. [2010-06-01]. <http://www.ece.msstate.edu/~reese/msstatePAN/>.
- [10] 陈新益, 方德胜, 郑俊孝. CCS-II 型超声波长期自记水位仪的研制及应用[J]. 水文, 2002, 22(5): 56-58.
- [11] 赵军辉, 袁易全. 一种智能超声测距仪的研制[J]. 电子测量技术, 1997(2): 17-20.

(收稿日期 2010-06-08 编辑: 方宇彤)

(上接第 65 页)

试验表明, 沉沙槽式取水枢纽进行取水防沙的关键在于加大沉沙槽内水流的流速以及增强水流的扰动。潜没式束水墙可以有效地增加沉沙槽内水流的扰动, 明显改善冲沙效果, 对于其他类似的工程也有很好的借鉴意义。

在对沉沙槽进行清淤期间, 可以调整调度方案对束水墙造成一定的侧向来流, 以增加翻越束水墙的水流在沉沙槽内的扰动, 并且可以增加进入冲沙闸的流量从而达到改善冲沙效果的目的。

参考文献:

- [1] 宋祖诏, 李贵启. 沙质河床引水枢纽取水防沙经验[J]. 泥沙研究, 1983(1): 57-65.
- [2] 曹克明, 史绥京, 赵修忠. 云南几个水电站取水防沙防污的经验与教训[J]. 西北水电, 1983(51): 70-86.

- [3] 崔忠. 冲沙槽式渠首导水墙结构优化试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2008, 31(3): 86-90.
- [4] 阮璐, 田辉. 高桥水电站取水口防沙设计[J]. 水利水电技术, 2007, 38(12): 91-94.
- [5] 丘宜平, 朱爱林. 取水口流态及防沙措施研究[J]. 广东水利水电, 1999(6): 36-38.
- [6] 王均星, 白呈富, 李泽. 巴山水电站溢洪道导水墙体型优化试验研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(4): 5-8.
- [7] 何晓敏, 包中进, 屠兴刚, 等. 四川省仙女堡水利枢纽工程水工模型试验研究[J]. 浙江水利科技, 2006(2): 15-17.
- [8] 张光碧, 余挺, 贺昌林, 等. 低水头电站凸岸取水防沙工程措施研究[J]. 四川大学学报, 2006, 38(4): 29-33.
- [9] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983, 37, 115.

(收稿日期 2010-08-30 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

河海大学主持的“水文循环大气-陆面过程模拟及应用”项目研究成果通过专家鉴定

由河海大学主持的“水文循环大气-陆面过程模拟及应用”研究成果于 2011 年 2 月 26 日通过水利部国际合作与科技司组织的专家组鉴定。鉴定委员会专家们一致认为, 该项研究成果对于推动洪水预报技术进步具有开创性的作用, 总体达到国际领先水平。

“水文循环大气-陆面过程模拟及应用”项目是以河海大学陆桂华教授为主的学术团队联合水利部水利信息中心等单位紧密结合国家重大需求, 在国家科技攻关计划、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、水利部“948”计划等项目资助下完成的, 以延长流域洪水预报预见期为主要目标, 突破了以陆面过程为主的传统水文预报方法, 创建了基于水文循环大气-陆面过程全要素耦合模拟的实时洪水预报理论、方法与技术体系, 为增长洪水预报预见期提出了新的途径。研究成果已在淮河流域防汛实践中应用, 洪水预报预见期在原有基础上增加了 72 h 以上, 并达到水文预报精度要求, 具有显著的经济效益、社会效益和推广价值。

(本刊编辑部供稿)