

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.026

# 冷链运输监测中无线传感器节点设计\*

贾科进<sup>1</sup> 钱春阳<sup>2</sup> 韩瑜<sup>2</sup> 杜太行<sup>2</sup> 王刚<sup>3</sup> 张子汉<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学信息工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300130;

3. 天津天测包装设计有限公司, 天津 300162)

**摘要:** 针对当前冷链运输监控系统中存在无线传感器节点功耗大、使用时信道易冲突且协议复杂的问题,设计了一种基于无线传感器网络的冷链运输远程监控系统中的无线采集节点。选择以 MSP430F149 为核心的处理器,采用 SHT11 与 PT1000 双传感器测量温、湿度,完成对不同精度温区的温、湿度数据采集;采用 SX1212 无线芯片实现无线传输。另外,自主设计了星型自组无线传感器网络协议,针对冷链运输特点设计了物理层,并采用二叉树与动态帧时隙 ALOHA 的融合算法以避免碰撞。测试结果表明,通过硬件设计及使用自主协议,系统具有功耗低、组网迅速等优点,能较好地满足无线传感器节点在冷链运输环境中的应用。

**关键词:** 冷链运输 无线传感器 超低功耗 节点

中图分类号: U492.3+36.4; TN919.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0136-06

## Design of Wireless Sensor Node in Cold Chain Transportation Monitoring

Jia Kejin<sup>1</sup> Qian Chunyang<sup>2</sup> Han Yu<sup>2</sup> Du Taihang<sup>2</sup> Wang Gang<sup>3</sup> Zhang Zihan<sup>3</sup>

(1. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

2. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

3. Tianjin Tiance Packaging Design Co., Ltd., Tianjin 300162, China)

**Abstract:** The design of wireless sensor node in cold chain logistics was introduced, which solved the problem as high power consumption, channel collision and network complexity in cold chain logistics monitoring applications. Choosing MSP430F149 as the core processor and SHT11, PT1000 as temperature and humidity sensors, it can precisely collect data of temperature and humidity in different accuracy requirement. The wireless transmission was realized by SX1212. A kind of self-organized wireless protocol of star-shape was designed, in which physical layer was designed to fit the characteristics of cold chain logistics and the fusion of synergetic integration of binary tree and dynamic framed slotted ALOHA algorithm was used to avoid collision. Tests showed that the node had the advantage on ultra low power consumption and the rapid organizing of networks and it works well in cold chain logistic. The wireless sensor node can meet the requirement of cold chain logistics.

**Key words:** Cold chain transportation Wireless sensor Low power consumption Node

### 引言

基于无线组网技术的冷链运输远程监控系统是指采用无线组网技术,针对冷链物流过程中用户关心的影响因素(温度、湿度、车辆位置等)通过无线网络及时传达给用户,以保证温、湿度敏感性产品

(蔬菜、乳制品、疫苗等)在运输过程中的品质<sup>[1-2]</sup>。

在冷链运输应用中的无线传感器网络规模相对较小,通信不需十分频繁,但需要随时接收信息、更改设置,需要极低功耗才能满足冷链运输的特点。而较为人熟知的无线传感器网络如 ZigBee 等协议是基于复杂网络的设计,性能虽好,但低功耗及信道

收稿日期: 2012-08-20 修回日期: 2012-09-26

\* 2010 年包装行业高新技术研发资助项目(2150899)

作者简介: 贾科进, 博士生, 主要从事通信与网络研究, E-mail: jwuser@126.com

特性不适用于冷链运输行业中。

针对当前无线传感器网络应用于冷链运输中的不足,自主开发一款无线传感器网络协议,物理信道采用较低的 433 MHz 频段,可有效减少冷链货物带来的损耗。无线传感器网络使用简单的星形结构,可组网 255 个无线传感器节点,组网及网络响应速度快、功耗低。

## 1 无线传感器网络组网

我国冷链运输行业目前尚无无线通信标准,各冷链企业在应用中采用的无线通信频率、组网方式都不统一。现有星形网络,如 SimpliCI、ANT 协议特性,不太适合多组星形网络并存的冷链运输环境,且功耗较高<sup>[3]</sup>。这 2 个协议使用 2.4 G 的物理层,在潮湿环境中已实践证明严重影响通信质量,且高频下无线通信绕射能力较差,遮挡对其信号的损耗增大。而冷链运输的货物主体是农、牧、渔产品,这些产品水分含量占产品质量的比例大,将严重影响通信质量。

为此,设计采用自主开发的网络自组协议,以实现通信设计简单、方便,组网灵活、快捷,降低组网及传输过程中的功耗。协议只涉及到协调器与终端设备,不涉及路由的功能。协调器与无线传感器节点使用较低频段通信信道,组成星型网络结构,由作为集中器的协调器控制每个无线传感器节点的收发。

### 1.1 网络实现

#### (1) 物理层

采用 430.00 ~ 437.00 MHz 频段,频道内共设 64 个信道,每个信道带宽为 100 kHz。由于使用较低频率进行通信,信号衰减小并具有较强的绕射能力,可以在较低发射功率下保证信号传输距离。同时,自主设定的多个信道可使传感器节点组网后转为专用信道,以避免不同企业同一地点同时操作时出现模块绑定错误,使无线信号在 2 辆冷链车之间发生碰撞的概率大大降低。采用了 FSK 调制方式以及循环交织纠错编码,其编码增益高达 3 dBm,大大提高了强干扰情况下的可靠性。即便冷链车辆处于强干扰的工业环境中,也能达到较好的传输效果。

#### (2) 数据链路层

数据链路层中,协调器和无线传感器节点间采用数据帧进行数据传输。数据帧由前导码、同步码、数据长度、帧选项、消息数据及校验码组成。

设计采用定时唤醒机制,采用“1010”交替码组成的前导码,其目的是使接收机与发射机同步,如工作在省电模式时序下还有唤醒接收机的功能,此时

发射机必须发送较长的前导码将省电模式下的接收机唤醒进入正常的工作状态。接收机在一个唤醒周期后打开并搜索信道中是否有前导码,如没有则立刻进入休眠状态等待下一个唤醒周期再被唤醒,如有前导码则继续处于接收状态并监控前导码并等待同步码到来后,将数据接收下来。

无线传感器节点的状态分为侦听、就绪、工作和休眠 4 个状态。工作状态可进一步分为仲裁、同步、会话和安全会话 4 个子状态。根据不同的数据帧,自组网实现的状态转移如图 1 所示。

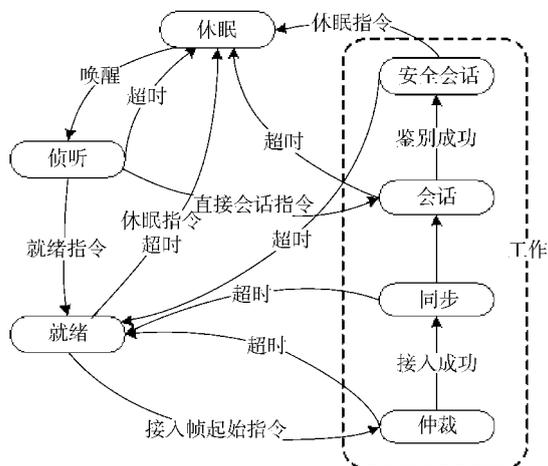


图 1 自动组网状态转移图

Fig. 1 Transition figure of wireless sensor node state

在分布式网络中,每个节点都有其本地时钟,系统启动后网络为所有节点的本地时钟提供共同的时间戳,在适当的时间休眠或被唤醒。这种时间同步为整个网络大大节省了开销,降低了能耗。

#### (3) 防碰撞管理方法

设计采用二叉树与动态帧时隙 ALOHA 的融合算法以避免碰撞。设计目标最大组网数量为 255 个,考虑到在实际使用中,分配到冷链单位的模块数量有限,编号一般连续,设计采用二叉树算法区分模块所在区间(模块编号的低 8 位),采用动态帧时隙 ALOHA 算法在该区间内避免碰撞。由于组网的模块一般分配在 1 ~ 2 个区间,在通信速度为 10 kb/s 速率下,可以在很短的时间内完成组网。

为保证模块的全部唤醒、正确接收,在实际传输中,指令间加有较长的延时。但在模块的使用中,均能够在 10 s 内完成自动组网,能够满足实际使用的需求。

### 1.2 软件设计及实现

系统使用 IAR 软件和 C 语言进行开发。IAR 软件集成环境包含了 C/C++ 语言编译器,具有使用简单、用户界面直观等特点,便于程序开发。

节点工作关键过程伪代码

```

#define g_channel0 0x069F00 //公共信道 0 ~ 31
:
#define g_channel31 0x06AA54
#define s_channel32 0x069000 //私有信道 32 ~ 63
:
#define s_channel63 0x069B54
#define DEVICE_ADDRESS 0x0C0A0A02
//无线传感器模块 32 位物理地址
#define USART_RX_BUF 200 //接收数据存储区大小
void ChannelChange(unsigned char flag_u); //信道转换
unsigned char ALOHA(unsigned char * RSSI_1, unsigned char * RSSI_2); //二叉树 ALOHA 防碰撞函数
BSP_Init(); //初始化 BSP, 如 AD、TimerA、SHT11 等
COM_Init(); //初始化串口
CHANNEL_Init(); //确定该节点工作的信道
:
/* 定时唤醒, 检测是否有前导码 */
void main(void)
{
SCH_RUN_Tasks();
__bis_SR_register(LPM1_bits GIE);
}
/* 接收协调器发送的数据帧, 分析接收到的数据帧 */
#pragma vector = UART0RX_VECTOR
__interrupt void usart0_rx (void)
{
uchar res;
res = RXBUF0;
if((USART_RX_STA & 0x80) == 0)
{
USART_RX_BUF[USART_RX_STA] = res;
USART_START(); //检测包头解析函数
USART_END(); //检测包尾解析函数
}
}

完整接收由协调器传来的数据帧后 received 值为 2 时连接成功, 分析帧选项, 而后对消息数据进行处理, 进而完成相应数据帧对应的功能
EP_Rev (unsigned char comm, unsigned int * received);
}
if(received == 2)

```

```

}
USART_RX_STA = 0;
switch(comm) //判断帧选项
{
case 0x01; //执行帧选项为 0x01 的消息数据
case 0x02; //执行帧选项为 0x02 的消息数据
:
}
}
}

```

## 2 无线传感器节点设计

### 2.1 总体设计

传感器节点是冷链运输监控系统的基本组成单元,需要具备环境因子采集、数据处理、无线通信等功能,并具有功耗低、组网灵活、快捷的特点<sup>[4~8]</sup>。

硬件结构框图如图 2 所示,在冷链运输监控系统的应用背景下,采用 TI 公司 MSP430F149 型超低功耗单片机作为无线传感器节点的处理单元,并利用其集成的 12 位模数转换器采集铂电阻 PT1000 的温度信息及电池的电量信息;电源部分采用一节可充电磷酸铁锂电池(3.6 V, 1 200 mA·h);传感器单元采用 PT1000 与 SHT11 数字型温湿度传感器相结合的方式,用以满足不同测量精度要求的农产品、疫苗等的温湿度测量及低功耗的要求;无线传输单元采用 SEMTECH 推出的 SX1212 超低功耗的单芯片无线芯片,并加以自主开发的网络通信协议,以满足冷链环境下的组网功能。

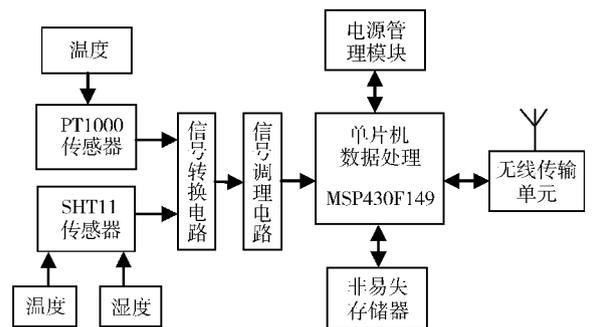


图 2 温、湿度无线传感器节点构成

Fig.2 Acquisition module nodes

### 2.2 无线传感器节点硬件设计

#### 2.2.1 处理器单元

微处理器单元连接无线传输单元、传感器单元等,负责数据处理及转换,处于系统核心地位。TI 公司的 MSP430F149 型超低功耗系列处理器,工作电压为 1.8 ~ 3.6 V;在时钟频率 1 MHz 时,工作电流为 0.1 ~ 400  $\mu\text{A}$ ,待机模式时为 1.6  $\mu\text{A}$ ,RAM 保持的节点模式为 0.1  $\mu\text{A}$ <sup>[9~10]</sup>。满足冷链运输车辆

较长时间跨度运输过程中的能量消耗。

### 2.2.2 无线传输单元

SX1212 超低功耗单芯片无线芯片,频率范围为 300 ~ 510 MHz;芯片经过优化具有非常低的接收功耗,典型接收电流为 2.6 mA,远小于同类收发器的接收电流;工作电压为 2.1 ~ 3.6 V,最大发射功率 12.5 dBm。具有 4 种电源管理模式,通过单片机 2 个 I/O 口的高低电平变换,可灵活配置系统工作模式以降低系统功耗。无线芯片与单片机之间通过 SPI 方式进行数据传输。无线通信模块电路如图 3 所示。

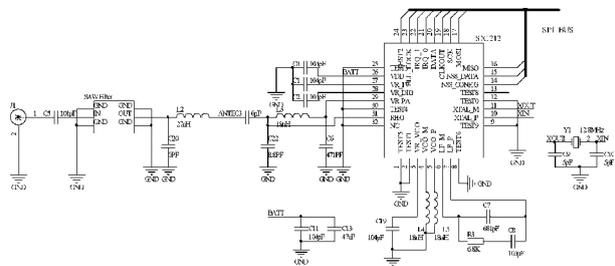


图 3 无线通信模块电路

Fig.3 Wireless communication module circuit

### 2.2.3 温湿度传感器单元

设计采用 2 种不同精度传感器对温度进行采集,PT1000 采集温度由模拟电路实现,其运行过程中能量消耗较大,不易实现系统低功耗的设计要求,但其测量精度较高,可以满足运输过程中温度敏感性货物的温度监控要求(2 种传感器精度及在一个设定工作周期内的平均工作电流如表 1 所示)。通过综合考虑两方面的特点及冷链运输相关要求,选用 PT1000 测量 0 ~ 15℃ 温度敏感区,SHT11 测量其他范围温度及所有范围内的湿度。在系统运行过程中,首先通过 SHT11 判断采集温度范围,若温度为 0 ~ 15℃ 时,通过开启一个 MOS 管,启动 PT1000 模拟电路进行高精度测量,保存数据并上传至协调器,否则不再开启 PT1000 模拟电路,这样既满足了采集湿度因子,又大大降低了模拟电路部分对能量的消耗。

表 1 PT1000 与 SHT11 性能比较

Tab.1 Performance comparison of PT1000 and SHT11

器件	测温精度/℃	平均消耗电流/mA
PT1000	±0.1	2.030
SHT11	±0.4	0.028

#### (1)PT1000 铂电阻测温电路设计

采用 PT1000 铂电阻测量 0 ~ 15℃ 的敏感区域,测量精度可达 0.1℃,电阻变化率为 3.851 Ω/℃。外围电路包括高精密串联基准电压源 REF3220,其精度能够达到 0.01%;超低功耗高精密运算放大器

OPA333,失调电压小于 10 μV,零漂移,噪声小于 0.1 μV。这个电压将送到差分放大器 INA333 的一端,两端的差将放大至适当值,送至单片机的 A/D 采样引脚。PT1000 测温电路如图 4 所示。

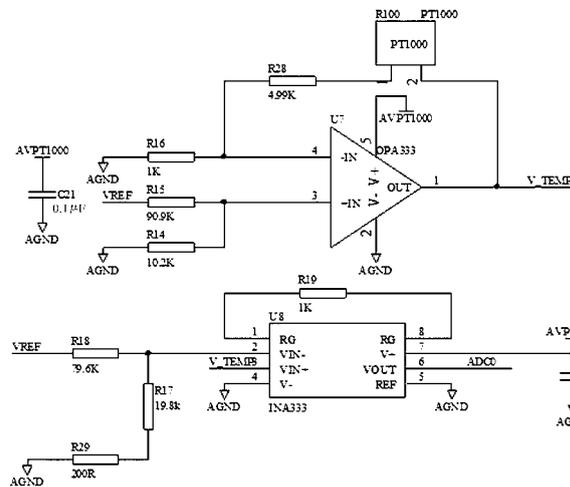


图 4 PT1000 铂电阻测温电路

Fig.4 Temperature measurement circuit of PT1000

#### (2)SHT11 传感器电路设计

采用 SHT11 数字型温湿度传感器测量温度敏感区以外的温度及湿度,测量精度分别为 ±0.4℃ 和 ±3% R. H.,工作电流为 550 μA,待机时仅 0.3 μA;SHT11 型单芯片传感器采用两线制串行接口和内部基准电压。传感器包括一个电容式聚合体测湿元件和一个能隙式测温元件,并与一个 14 位的 A/D 转换器以及串行接口电路在同一芯片上实现无缝连接。连接电路如图 5 所示。

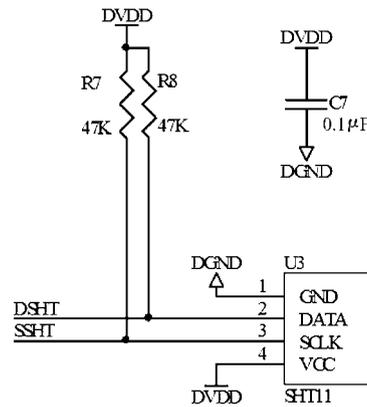


图 5 SHT11 与单片机连接

Fig.5 Connection of SHT11 and MCU

### 2.2.4 电源管理电路

设计采用 3.6 V、1 200 mA·h 的磷酸铁锂电池,直接供无线传感器节点使用。电池使用效率可达 93.8%,自放电率低;节点通过迷你 USB 接口对电池进行充电,采用一种可为单节磷酸铁锂电池进行恒流/恒压充电的芯片 CN3058,耐过充性能优良。

### 3 系统测试

与硬件系统相应,项目还设计了一款管理软件,由中心服务器运行 Windows Server 2003 及数据库 SQL Server 2000,实现冷链运输车辆各种信息的收集及在线模式下的系统管理,具有友好的人机界面和丰富的数据显示及处理功能。

#### (1)测试部署方案

通过服务器数据管理界面(图6)新增发车,如发车编号为131,在车辆信息一栏中分别选择相应信息,包括车型、第一司机、第二司机、出发地、目的地、出发日期。选择组网的协调器 Etest,后将信息栏右侧的模块配置信息进行设置,设置温、湿度上限为 15.0℃、下限为 0℃;相对湿度上限为 50%、下限为 0%;上报周期为 60 s 一次,一次上报 2 组数据。设置完毕后将硬件编号为 TW001、TW002、…、TW010 的 10 个无线传感器节点装入冷链运输车车厢内(图7a),协调器放置冷链车驾驶室内(图7b),点击自动组网按钮后,系统开始进行组网。

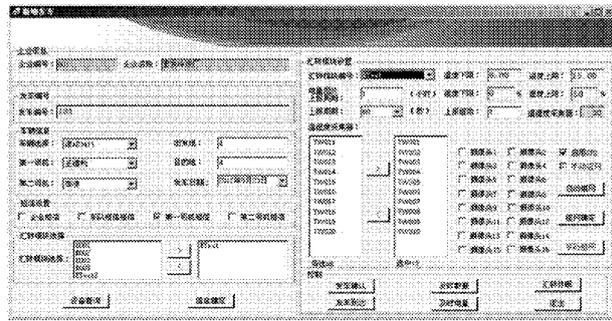


图6 数据管理界面

Fig.6 Data management interface

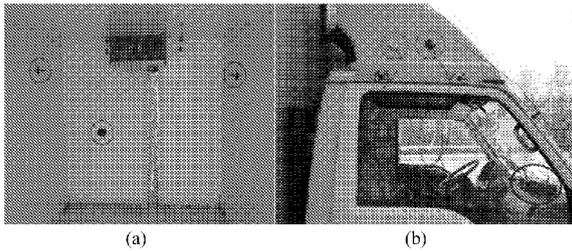


图7 测试现场

Fig.7 Test site

(a) 无线传感器节点布局 (b) 协调器布局

#### (2)测试结果

节点随机的被放置在冷链车的车厢内,协调器与无线传感节点之间通信通过冷链车车厢的屏蔽层,将使无线电信号有所衰减,但试验验证在此情况下仍能保证协调器与冷链车厢内 50 m 的无线传感器节点正常通信。系统完成绑定后生成绑定列表如图8所示。当达到采样周期后,上传相应组数的温、湿度数据。在系统网络管理平台可以实现节点的管理和数据

的存储、查询等工作。当采集数据超过设定阈值时,可在 1 min 之内通过 GSM 短信发送到司机手机上。

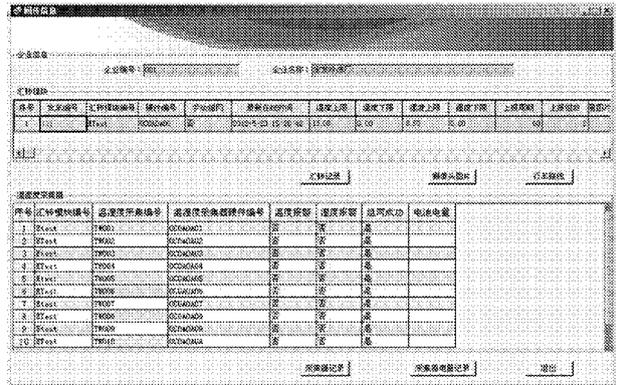


图8 绑定成功列表界面

Fig.8 Binding list

图9为节点在温湿度采集周期为 5 s 情况下的电流消耗情况。图9a是高精度测温区同时使用 PT1000 与 SHT11 的电流消耗情况,图9b为一般精度温度采集下的电流消耗情况。节点首先通过 SHT11 判断温度范围( $I_A = 0.096 \text{ mA}$ ),若温度范围在 0~15℃ 范围内,则启动高精度 PT1000 进行温度采集,为保证测量的准确性,在 A/D 采样前 0.5 s 打开 MOS 管(BC 段),DE、EF 两段分别为无线传感器节点接收协调器命令以及无线传感器节点发送的温湿度指令所消耗的电流;SHT11 电流测量曲线中峰值电流  $I_{\max} = 14.426 \text{ mA}$ ,小于 PT1000 电路的电流值,采用 SHT11 配合 PT1000 模拟电路测量温湿度可以大大降低功耗。并且节点在一个周期中绝大部分时间都处于休眠状态(FG 段) $I_E = 0.068 \text{ mA}$ ,全部待机电流小于 0.1 mA,也大大节省了能耗。

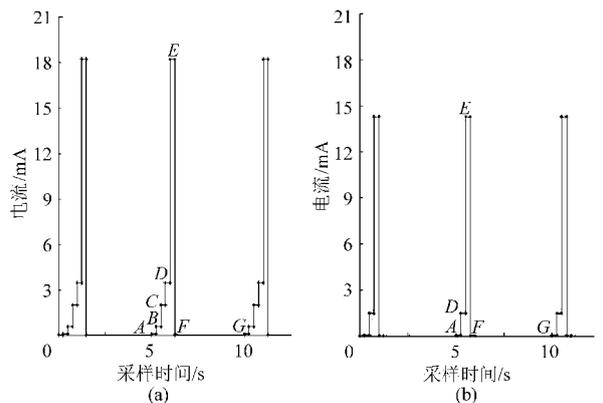


图9 无线传感器节点在一个采集周期内的电流消耗曲线

Fig.9 Current consumption of wireless sensor nodes in a cycle curve

(a) 高精度 (b) 一般精度

### 4 结论

(1)易于使用。当用户打开温湿度采集模块电源及数据汇转模块电源后,监控人员只需点击管理

软件中的自动组网图标,就可实现自动组网并装载相应的配置,实现数据通信功能。

(2)无线信号覆盖范围广。由于采用了适于冷链环境的通信频率,并选择了业界最低功耗的无线收发芯片,系统可以在极低功耗下,实现较远的无线传输,保障了车厢内充满货物状态下的无线收发。

(3)防冲突能力强。冷链运输中的自组网络与

其他应用的自组网络应用环境有较大区别,本设计的自组网络采用了64个信道,信道数量远远大于其他自组网络,大大降低了移动中的聚集车辆多个自组网络间通信的互相干扰。

(4)温湿度采集模块功耗超低。1 min采集周期下,高精度温湿度测量模块功耗在200  $\mu\text{A}$ 左右;一般精度下,功耗小于100  $\mu\text{A}$ 。

### 参 考 文 献

- 何明珂. 冷链系统基础结构评价指标体系研究[J]. 北京商学院学报, 2001, 16(2): 46~50.  
He Mingke. Evaluation index system of cold chain system infrastructure institutions [J]. Journal of Beijing Institute of Business, 2001, 16(2): 46~50. (in Chinese)
- 史良. 基于GPS/RFID的冷链运输车辆监控系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Shi Liang. Design of cold chain vehicle monitor system based on GPS/RFID [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- 季力. 基于SimpliciTI协议的无线传感器网络设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(1): 26~30.  
Ji Li. Design of wireless sensor network based on simpliciTI protocol [J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(1): 26~30. (in Chinese)
- 张彪, 胡慧, 孙程光. 基于MSP430F2274的无线数据采集节点的设计[J]. 传感器世界, 2009, 15(1): 28~33.  
Zhang Biao, Hu Hui, Sun Chengguang. Design of wireless sensor networks based on MSP430F2274 [J]. Sensor World Magazine, 2009, 15(1): 28~33. (in Chinese)
- 王风云, 赵一民, 张晓艳, 等. 基于分段控制策略的温室智能测控系统设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 178~181.  
Wang Fengyun, Zhao Yimin, Zhang Xiaoyan, et al. Intelligent measure-control system design based on sectional-control strategy in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 178~181. (in Chinese)
- 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息检测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181~185.  
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181~185. (in Chinese)
- 武永胜, 王伟, 沈昱明. 基于ZigBee技术的无线传感器网络组网设计[J]. 电子测量技术, 2009, 32(11): 121~124.  
Wu Yongsheng, Wang Wei, Shen Yuming. Design of wireless sensor networks based on ZigBee [J]. Journal of Electronic Measurement Technology, 2009, 32(11): 121~124. (in Chinese)
- 张新荣, 徐保国. 基于CC2430的水产养殖环境信息检测系统设计[J]. 渔业现代化, 2011, 38(2): 17~20, 26.  
Zhang Xinrong, Xu Baoguo. Based on the CC2430 the aquaculture environmental information detection system design [J]. Fishery Modernization, 2011, 38(2): 17~20, 26. (in Chinese)
- 吕芮栋, 张志文. 以MSP430F149为核心的温度检测仪的硬件模块和软件设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(1): 199~201.  
Lü Ruidong, Zhang Zhiwen. Hardware module and software design of temperature measuring instrument based on MSP430F149 [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(1): 199~201. (in Chinese)
- 唐宏, 谢静. 无线传感器网络原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- 张杰, 涂巧玲, 杨文刚. 传感器网络节点通信模块的低功耗研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 28~33.  
Zhang Jie, Tu Qiaoling, Yang Wengang. Research on low power consuming communication modules of sensor networks nodes [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 28~33. (in Chinese)
- 李莉, 张彦娥, 汪懋华, 等. 现代通信技术在温室中的应用[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 195~200.  
Li Li, Zhang Yan'e, Wang Maohua, et al. Communication technology for sustainable greenhouse production [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 195~200. (in Chinese)

(上接第108页)

- 贾夏, 周春娟, 董岁明.  $\text{Pb}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$  处理对冬小麦幼苗根际微生物种群数量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(4): 443~448.  
Jia Xia, Zhou Chunjuan, Dong Suiming. Effects of  $\text{Pb}^{2+}/\text{Cd}^{2+}$  on the number of microorganisms in the rhizosphere of winter wheat seedlings [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(4): 443~448. (in Chinese)
- Malkowski E, Kita A, Galas W, et al. Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium [J]. Plant Growth Regulation, 2002, 37(1): 69~76.
- 杜文勇, 何雄奎, 胡振方, 等. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 170~174.  
Du Wen Yong, He Xiongkui, Hu Zhenfang, et al. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170~174. (in Chinese)