

引用格式: 梁志勋, 易云飞, 莫燕斌, 等. 一种自供电多传感器无线环境质量监测系统的设计 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版) 2019, 37(1): 86-92. [LIANG Z X, YI Y F, MO Y B, et al. Design of a self-power wireless environmental quality monitoring system with multi-sensor [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences) 2019, 37(1): 86-92.]

一种自供电多传感器无线环境质量监测系统的设计

梁志勋^{1,6}, 易云飞¹, 莫燕斌², 闭吕庆^{2,3*}, 胡波^{3,4}, 代亮^{3,5}

(1. 河池学院 智能计算与模式识别重点实验室 广西 宜州 546300; 2. 玉林师范学院 电子与通信工程学院, 复杂系统优化与大数据处理广西高校重点实验室 广西 玉林 537000; 3. 厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005; 4. 贵州师范大学 机械与电气工程学院 贵州 贵阳 550025; 5. 贵州师范大学 大数据与计算机科学学院 贵州 贵阳 550025; 6. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院 广西 桂林 541004)

摘要: 为了实时精确监测既定区域的环境质量状况, 解决传统无线传感网因电池不耐用又不能及时更新而导致网络中断的问题, 研究设计了一种自供电多传感器的无线环境质量监测系统。所研究设计的无线传感网节点利用太阳能光伏电池板发电完成自供电, 并对最大功率点跟踪控制算法进行了优化改进, 解决了因电池不能及时充电而导致的传感器节点工作异常的问题, 实现了环境质量状况无人值守实时监测。利用数据融合算法, 将多节点传感器采集到的数据进行数据融合, 通过实验测试表明, 所设计系统的测试数据和当地当天中国环境监测总站发布的环境质量状况数据基本吻合。

关键词: 多传感器; 无线传感网; 环境质量监测; 自供电; 最大功率点跟踪; 数据融合

中图分类号: TN99 文献标识码: A 文章编号: 1004—5570(2019)01—0086—07

DOI: 10.16614/j.gznunj.zrb.2019.01.015

Design of a self-power wireless environmental quality monitoring system with multi-sensor

LIANG Zhixun^{1,6}, YI Yunfei¹, MO Yanbin², BI Lvqing^{2,3*}, HU Bo^{3,4}, DAI Liang^{3,5}

(1. Intelligent Computing and Pattern Recognition of Hechi University, Yizhou, Guangxi 5463000, China; 2. School of Electronics and Communication Engineering, Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Complex System Optimization and Big Data Processing, Yulin Normal University, Yulin, Guangxi 537000, China; 3. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 5. School of Big Date and Computer Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 6. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: In order to accurately and real-time monitor the environmental quality for the specific area, solve the problem of interruption of traditional wireless sensor network because the battery is not dura-

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 复杂系统优化与大数据处理广西高校重点实验室科研课题资助(No. 2017CSOBDP0103); 广西高校科学与技术研究项目(201012MS185); 贵州省科学与技术基金(LKS[2012]34)

* 通讯作者: 闭吕庆(1981-) 男, 博士, 讲师, 研究方向: 太赫兹科学与技术 E-mail: bilvqing@stu.xmu.edu.cn.

ble and can not be updated in time , we designed a wireless environment quality monitoring system with self-powered multi-sensor. In this system , the network node was powered by solar photovoltaic panels , and the maximum power point tracking control algorithm was optimized and improved. It solved the problem of abnormal work of sensor nodes caused by not charging the battery in time , and realized the unattended real time monitoring of the environmental quality. Besides , the data fusion of the multi-node sensor was performed by using the data fusion algorithm. The experimental results demonstrated that the test data of our designed systemd agree well with the environmental quality data released by the China Environmental Monitoring Station.

Key words: multi-sensor; wireless sensor network; environment quality monitoring; self-powered; maximum power point tracking; data fusion

0 引言

近年来,随着我国工农业经济规模的不断扩大,以及城市化进程的加快,工业排放、农业燃烧排放,生活能源消耗排放、汽车尾气排放等污染排放规模也随之急剧扩大,不仅影响了人们的日常生活与健康,还对我国的环境质量控制提出了严峻的挑战。因此,及时准确地监测环境质量指标,不仅有助于掌握环境质量的变化趋势,还能及时发现局部污染事件的发生,并控制之,为人们的生活出行、工作提供及时准确的环境指导^[1]。

无线传感网是一种多节点的分布式自组网络,能够实时监测各个节点所处环境的被测参量(如光强、温度、湿度、环境噪声、有毒气体浓度等),并经节点进行信息预处理后以无线方式上传至服务器^[2-3]。因其灵活布局、低功耗、低成本、自组织的特点,而被广泛用于军事、救灾、环境、工业等领域。例如,郭文川等^[4]设计了基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统。该系统采用基于 WinCE 5.0 嵌入式操作系统和 ARM 9 处理器的硬件平台构建网关节点,实现了节点环境监测、环境数据管理和污染预警等功能。而文献[5]所述系统则是基于 IPv6 低功耗无线个域网(6LoWPAN)的环境监测网络。它工作时,把节点采集的数据通过网关上次到 Web 服务器,并在 Web 服务器上完成数据的管理、分析,最终实现环境监测服务。以上所述的两种监测系统均是利用蓄电池作为系统的电源。但当无线传感节点工作时,大量的无线数据收发使得节点系统所需的瞬时功率较大^[6],并有可能超过该时刻蓄电池的最大输出功率而导致系统通信失败。因此,研究可自供电,最大限度保持蓄电池高容量的无线传感网已成为当前物联网工程

的重点课题之一^[7]。本文所设计系统把太阳能供电技术与无线传感网相结合,有效地解决了节点在无外部市电供电场所的供电问题,提高了无线传感网络的环境适应能力。此外,系统还将采集的环境数据实时地更新到服务器,使得人们可通过 Web 或者移动 APP 及时地获取到当前各节点的环境质量数据,并依据该数据指导生活与工作。具体设计如下。

1 系统总设计思路

自供电多传感器无线环境质量检测系统主要由太阳能无线传感节点、Sink 节点、远端 MESH 网络节点、近端 MESH 网络节点以及中心服务器构成,如图 1 所示。其中,太阳能无线传感节点是系统的数据源,其利用相关传感器采集环境的光照、温度、CO、CO₂、SO₂、PM2.5 等参数。无线传感节点与 Sink 节点通过 Zibee 无线通信协议组成自组网。传感节点采集环境数据后,由 Sink 节点通过有线通信将其发送至远端 MESH 网络节点,再由远端 MESH 网络节点通过无线通信将数据送至近端 MESH 网络节点;之后,由近端 MESH 网络节点通过 TCP/IP 协议将数据包发送至服务器端,供应用层进行分析和应用。

2 硬件系统及关键模块设计

2.1 自供电无线传感网节点模块设计

自供电无线传感节点是无线传感网的数据源,也是决定系统性能的最关键部件。该模块主要由太阳能光伏电池板、可控 DC-DC 转换器、锂电池、MSP430 单片机模块、无线收发模块、环境质量数据采集传感器及其信号调理电路等构成,如图 2 所示。

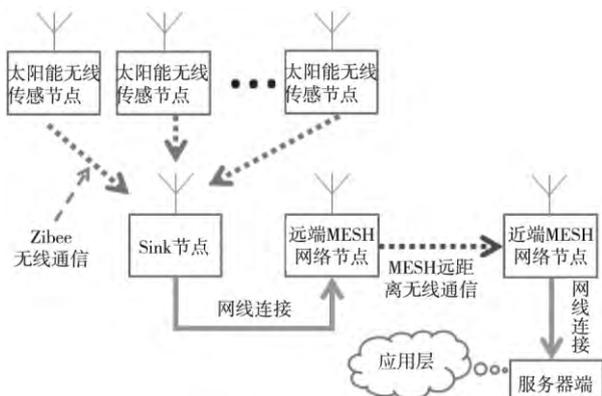


图 1 环境质量监测系统图

Fig. 1 Environmental quality monitoring system diagram

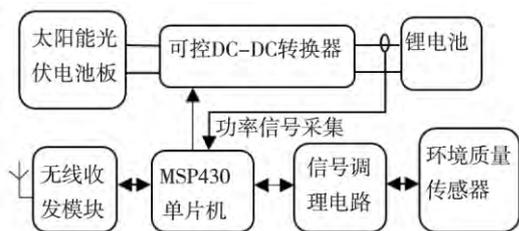


图 2 无线传感节点模块框图

Fig. 2 Diagram of node module in wireless sensor network

图 2 所示的节点模块框图中,环境质量传感器模块将环境中的光照、温度、CO、CO₂、SO₂、PM_{2.5} 等物理量转化成微弱的电信号,再由信号调理电路对传感器输出的微弱信号进行放大。而低功耗的 MSP430 单片机是无线传感节点的核心,负责环境质量传感数据的处理和收发,并通过对可控 DC-DC 转换器的控制,利用脉宽调制控制算法实现太阳能光伏电池板最大功率点的跟踪。该脉宽调制控制算法可大大地提高太阳能光伏电池板光电转换功率的利用,并提高 DC-DC 转换器向锂电池充电的效率。

2.2 传感器电路设计

二氧化碳检测电路采用 FIGARO 公司的 TGS4160 作为前端采集器件,可测量范围为 300 ~ 5000 ppm 的环境二氧化碳浓度,如图 3 所示。图中, U₂ 为高输入阻抗的电压跟随器, U₄ 为电压放大器。传感器输出信号经 U₂ 输入和 U₄ 放大后,再由 U₅ 进行二级放大至适合 MSP430 单片机内置 16 位高精度 A/D 转换的电压范围。

2.3 基于优化改进算法的太阳能能量管理设计

太阳能光伏电池板是一种非线性功率器件,其输出功率随着输出电压的升高先升后降,如图 4 所示为一典型的太阳能电池板电流、电压与功率输出

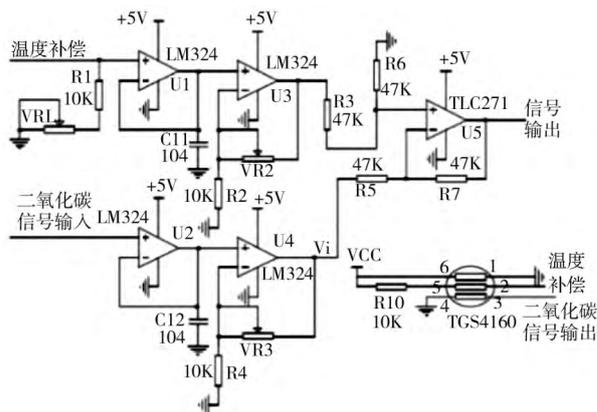


图 3 二氧化碳传感器电路

Fig. 3 Carbon dioxide sensor circuit

关系曲线图。从图中可知,最大输出功率点对应的输出电压约为 33.5 V,它是位于输出电压范围的某一动态点上^[8]。因为太阳能光伏发电是无线传感器节点的唯一能量源,因此,如何提高太阳能光伏发电的利用效率,是整个无线传感器节点系统的关键技术之一。太阳能光伏电池板的输出功率是光照强度、器件结温度的非线性函数^[9]。即使在光照强度等外部条件稳定的情况下,太阳能光伏电池板的输出功率也会随着外部负载的变化而变化。只有当外部负载与太阳能光伏电池板的阻抗匹配时,太阳能光伏电池板才能输出最大的功率,此时的工作点称为太阳能光伏电池板的最大功率点。

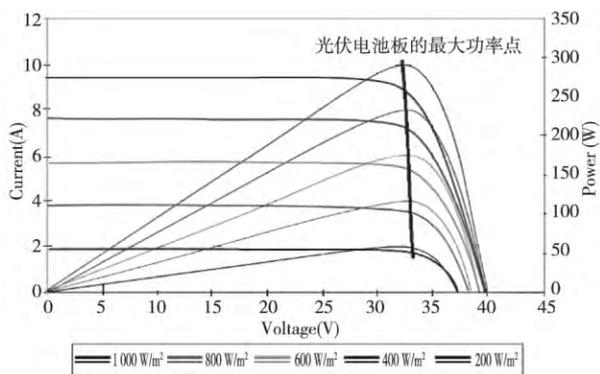


图 4 太阳能电池板电流电压功率输出关系曲线图

Fig. 4 Relationship curves of current, voltage and power output of solar photovoltaic panels

最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, 简称 MPPT) 是太阳能能量高效采集的关键技术之一,其常用的实现方法有以下 3 种:电导增量法、恒压法、扰动观察法^[10]。采用自适应 BP 神经网络遗传算法来追踪最大功率点,将温度和光强作

为神经网络的输入变量,通过理论样本的训练,最后达到误差收敛,获得期望的最大功率点,但神经网络遗传算法求解过程复杂,对于数据处理能力较弱的单片机处理器而言,此算法实现难度大^[11];文献[10]中研究提出使用扫描法追踪最大功率点,其核心算法是从 20% 调制脉宽以 5% 的步进开始扫描,将其最大功率点锁定在一定范围后,又以 1% 步进进行细调,最后将调制脉宽恒定在某个点上,也就将电压恒定在某个点上,这种控制方法属于扰动观察法加恒压法;而文献[11]中所采用的分区遗传 MPPT 算法,其核心算法是将普通遗传算法和分区法结合在一起,首先以当前电压为基准点,以较大的电压间隔用比较法锁定最大功率点所在区域;接着用遗传算法在锁定区域内精确定位最大功率点,属于扰动观察法的改进算法。本文根据太阳能光伏电池输出功率随着输出电压的升高先升后降的特点,采用扰动观察法配合恒压法追踪最大功率点,并对传统的扰动法进行算法改进,利用查找问题中的减治法来追踪最大功率点,具体算法设计如下:

1) 开始 BEGIN

2) 将脉宽调制 D 分别设置为 $D(n)$ 、 $D(n-1)$ 、 $D(n+1)$;

3) 将 $D(n-1)$ 、 $D(n)$ 、 $D(n+1)$ 初始化为 40%、50%、60%,分别测量出 $P(n-1)$ 、 $P(n)$ 、 $P(n+1)$;

4) 比较 $P(n-1)$ 、 $P(n)$ 、 $P(n+1)$ 的关系:

a) 若 $P(n-1) < P(n) < P(n+1)$,则最大功率点仍在 60% 以上,将 $P(n+1)$ 递增 10%,测量出 $P(n+1)$;重复步骤 4,直至符合 $P(n-1) > P(n+1) > P(n)$ 或者 $P(n+1) > P(n-1) > P(n)$ 的关系,将 $P(n)$ 存入 P_{10dc} ;

b) 若 $P(n-1) > P(n) > P(n+1)$,则最大功率点仍在 40% 以下,将 $P(n-1)$ 递增 10%,测量出 $P(n-1)$ 重复步骤 4,直至符合 $P(n-1) > P(n+1) > P(n)$ 或者 $P(n+1) > P(n-1) > P(n)$ 的关系,将 $P(n)$ 存入 P_{10dc} ;

c) 若 $P(n-1) > P(n+1) > P(n)$ 或者 $P(n+1) > P(n-1) > P(n)$,则最大功率点在 50% 左右,第一轮查找结束,将 $P(n)$ 存入 P_{10dc} ;

5) 以 P_{10dc} 为中心,步长值设置为 5%,按照步骤 3) 的方法,找出 $P(n)$ 存入 P_{5dc} ;

6) 以 P_{5dc} 为中心,步长值设置为 1%,按照

步骤 3) 的方法,找出 $P(n)$ 存入 P_{1dc} ;

7) 最后以 P_{1dc} 的脉宽 D 输出,稳定在该值等在下次跟踪命令到来重复,将当前的 P_{1dc} 作为中间值,并重复步骤 1;

8) 结束 END

在实践中发现,太阳光照强度的变化是缓慢改变的,因此只需要在固定时间间隔后,周期性启动 MPPT 跟踪即可有效跟踪,避免了由于频繁调整脉宽而导致的电路震荡。此外,在本文设计的算法中,采取了半经验法的策略,把查找功率点的起始脉宽设为 40%,因此避免了传统方法中在整个脉宽调制范围内进行顺序扫描查找最大值的策略所造成的过多时间消耗,能够更快地实现最大功率点的追踪。

3 节点软件设计和数据融合算法

3.1 自供电无线传感网节点软件设计

自供电无线传感节点的主要任务是实现对环境质量参数的采集,并兼顾 Zigbee 无线模块的初始化、数据收发、太阳能电池板的最大功率点跟踪等相关操作,其软件工作流程图如图 5 所示。节点上电工作后,首先利用单片机对系统进行初始化,同时启动数据采集和太阳能电池板最大功率点跟踪控制算法任务。并在采集完成后按照规定的格式将其通过无线模块发射出去。之后,启动采样间隔定时器,等待固定的时间间隔后进行新的采集。在完成太阳能电池板最大功率点跟踪控制算法任务后,启动 MPPT 间隔定时器,等待固定的时间间隔后重新进行最大功率点跟踪和控制。当在此过程中,节点还需监听本节点系统的外部通信。当节点天线接收到外部通信数据包后,首先利用无线数据包处理子程序读取该数据包的 ID 号,并利用该 ID 号判断数据包的目标节点。如果 ID 号指向当前节点,则接受数据,并对数据进行进一步的处理,否则转发。

3.2 数据融合算法设计

无线传感节点的测量数据是整个监测系统的数据源。因此,它的测量精度决定着整个监测系统的精度。对每个节点的传感器数据进行分批估计与数据融合是处理节点数据的一种有效方法^[12]。具体实现如下:

把每个节点的数据分成如下 2 组: x_{11} 、 x_{12} 、 x_{13} ,

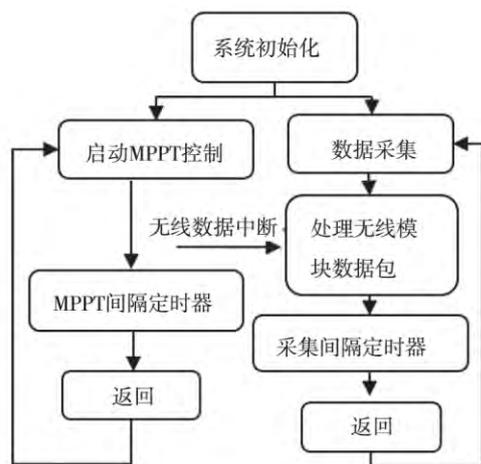


图 5 无线传感网节点软件流程图

Fig.5 Software flow chart of wireless sensor network node

... x_{1n} 和 $x_{21} x_{22} x_{23} \dots x_{2m}$ 。每组数据的平均值 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 和方差 σ_1 σ_2 分别可用下面的公式进行计算:

$$\bar{x}_1 = \sum_{i=1}^n x_{1i} \quad \bar{x}_2 = \sum_{i=1}^m x_{2i} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{1i} - \bar{x}_1)^2}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{2i} - \bar{x}_2)^2} \quad (2)$$

而数据分批估计与数据融合的结果和方差分别为^[13]:

$$\hat{x} = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1 + \sigma_2} [1 \quad 1] \begin{pmatrix} \alpha_1^{-2} & 0 \\ 0 & \sigma_2^{-2} \end{pmatrix} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \bar{x}_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \bar{x}_2 \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \left([1 \quad 1] \begin{pmatrix} \alpha_1^{-2} & 0 \\ 0 & \sigma_2^{-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right)^{-1} = \frac{\sigma_1^2 \sigma_2^2}{\sigma_1 + \sigma_2} \quad (4)$$

利用以上公式计算出每个节点的数据融合结果与方差值后,即可计算节点间的置信值 d_{ij} (表示 i - j 节点间的置信值) 如下式(5)所示:

$$d_{ij} = \int_{x_i}^{x_j} p(x | \hat{x}_i) dx \quad (5)$$

$$\text{其中 } p(x | \hat{x}_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_1}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \hat{x}_i}{\hat{\sigma}_1} \right)^2 \right] \quad (6)$$

所以

$$d_{ij} = \int_{x_i}^{x_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_1}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \hat{x}_i}{\hat{\sigma}_1} \right)^2 \right] dx \quad (7)$$

根据文献[14]可以把上式简化为:

$$d_{ij} = 2 \int_0^{\frac{x_j - \hat{x}_i}{\hat{\sigma}_1}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx = 2\Phi \left(\frac{x_j - \hat{x}_i}{\hat{\sigma}_1} \right) - 1 \quad (8)$$

假设有 m 个无线传感网节点监测同一参数,那么他们的置信距离测度 d_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, \dots, m$) 矩阵可以表示为

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(8)可知 $0 < d_{ij} < 1$, 而且 d_{ij} 越小, 对应的第 i 节点得到第 j 节点支持的程度越高。依据模糊理论中的相关性函数定义, 令

$$f(\hat{x}_i | \hat{x}_j) = 1 - d_{ij} \quad (10)$$

上式中 \hat{x}_i, \hat{x}_j 分别表示第 i 节点和第 j 节点分批估计融合后的局部决策值。而相关性函数 $f(\hat{x}_i | \hat{x}_j)$ 则表示节点 i 被节点 j 支持的程度, 并可表示为:

$$f(\hat{x}_i | \hat{x}_j) = f_{\bar{x}_j}(\hat{x}_i) / \max [f_{\bar{x}_i}(\hat{x}_j), f_{\bar{x}_j}(\hat{x}_i)] \quad (11)$$

假设构造的 $f(\hat{x}_i | \hat{x}_j)$ 矩阵为方阵且秩为 n , 记为 C 。为了确定各个无线传感网节点被其它节点支持的程度, 令

$$c'_i = \min f(\hat{x}_i | \hat{X}) \quad \text{其中 } i = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (12)$$

式中 $\hat{X} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$, c'_i 为第 i 个节点被其它节点支持的程度。计算出 c'_i 之后, 就可以剔除掉那些被其它无线传感网节点支持度非常低的节点, 以提高整个系统的测量精度, 也可以提高数据融合的效率。

本文利用自适应加权平均法进行数据融合, 设最终的融合值为 \hat{x} , 则

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^n \hat{x}_i W_i = \hat{X} W \quad (13)$$

式中 n 为传感节点数, \hat{x}_i, \hat{w}_i 分别为第 i 个无线传感网节点的局部测量值和加权因子且满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; $\hat{X} = [\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_n]$; $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。

4 数据测试分析

如图 6 所示, 为无线传感网节点安装实验布置实景图。系统安装布置完成后, 运行各无线传感节点, 并上传数据至服务器, 数据内容如表 1 所示。

而表 2 分别为各个节点数据融合的结果和方差。



图 6 无线传感网节点安装布置实景图

Fig. 6 Wireless sensor network node installation layout real map

表 1 无线传感网节点测量 CO₂ 值

Tab. 1 CO₂ values of Wireless sensor networks nodes

次数	各个节点测量得的二氧化碳的值(ppm)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	552	416	438	459	447	434	462
2	600	455	416	452	459	448	441
3	419	441	463	438	452	479	434
4	447	462	441	416	438	459	479
5	479	434	462	463	416	440	448
6	459	479	434	462	463	452	452
7	452	459	479	441	441	416	440
8	438	452	447	434	462	463	416
9	463	441	452	434	448	479	459
10	452	463	441	434	479	440	432

表 2 单个无线传感网节点分批估计融合结果

Tab. 2 A single wireless sensor network node estimates the fusion results in batches

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7
\hat{x}_i	453.54	452.33	447.70	442.32	451.47	451.29	445.92
$\hat{\sigma}_i$	0.1249	0.4844	0.4964	0.4526	0.4964	0.4792	0.4991

利用以上数据,根据公式(8)~(12),可计算 $c'_i = [0 \ 0.122 \ 0.358 \ 0.752 \ 0.234 \ 0.768 \ 0.984]$ 。以上为各节点所测得的数据被其它节点的支持度,而其第一个支持度最小,因此应该将该节点的数据剔除掉,利用公式(13)可计算出最后的数据融合结果为 447 ppm。

下列各图中,图 7 为无线传感自组网的网络关系示意图;图 8 为 24 h 期间采集到的环境质量监测数据,并用曲线图表示;而图 9 为当天中国环境监测总站所发布的当地环境质量状况数据,经过对比,本系统所采集的数据和其发布的数据基本一致。

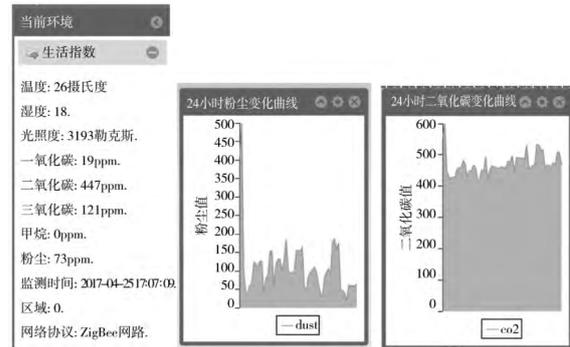


图 8 24 h 的环境质量监测数据曲线图

Fig. 8 24 hour environmental quality monitoring data curve

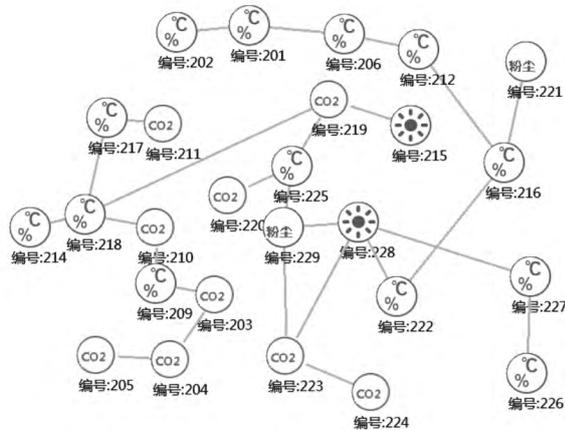


图 7 无线传感网节点自组网的网络关系示意图

Fig. 7 network relation diagram of wireless sensor network node self organizing network

5 结束语

本设计实现了自供电多传感器无线环境质量监测系统的设计与实验,并利用改进的 MPPT 控制算法追踪太阳能光电转换板的最大功率点,提高了太阳能光电转换功率的利用效率。而无线传感节点的软件设计与数据融合算法不仅提高了数据结果的精度,还提高了系统的运行速率。经实验测试数据分析对比,所设计的系统测得室外温度为 26 °C,CO 为 19 ppm,CO₂ 为 444 ppm,PM2.5 为 73 ppm 和中国环境监测总站发布的环境质量数据基本吻合。经长时间的运行测试表明,以太阳能作为

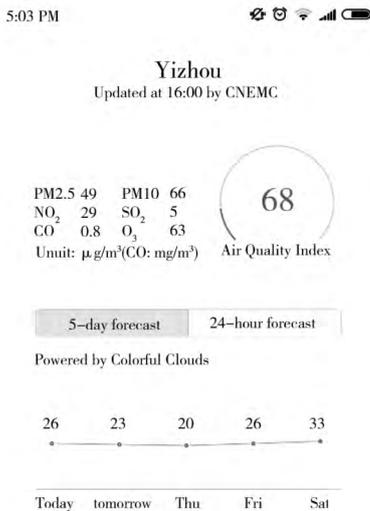


图 9 中国环境监测总站发布当地的环境质量状况数据

Fig. 9 China Environmental Monitoring Station

issued the local environmental quality data

系统供电的方式能够充分保证无线传感网节点模块长时间的存活,并能够使系统长时间正常运行。

参考文献:

[1] 索云天. 基于无线传感器网络的环境质量监测系统的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
 [2] 蔺莉, 张莉华. 无线传感器网络中能量高效的自适应分簇算法[J]. 仪表技术与传感器, 2017(3): 121-126.
 [3] 尚兴宏, 钱焕延. 无线传感器网络的系统节能研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2012, 30(6): 83-88, 99.

[4] 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监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181-185.
 [5] 李亚明, 刘陈, 刘致尧, 等. 基于 6LoWPAN 无线传感技术的环境监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2016(9): 50-54.
 [6] 赵晓艳, 熊晓燕, 丁丽芳. 针对机械振动监测的无线传感器节点电源电路[J]. 仪表技术与传感器, 2013(10): 73-75.
 [7] 魏东, 全元, 王辰星, 等. 国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例[J]. 生态学报, 2014(11): 2821-2829.
 [8] HASSAN Fathabadi. Novel fast dynamic MPPT (maximum power point tracking) technique with the capability of very high accurate power tracking[J]. Energy, 2016, 94: 466-475.
 [9] 李双双, 曾野, 陆寅. 基于 ATmega88 的光伏发电控制与计量[J]. 仪表技术与传感器, 2014(4): 69-70, 110.
 [10] 吴寅. 采用环境能量的自供电无线传感器网络关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
 [11] 王欢. 物联网架构的太阳能光伏自跟踪发电监控系统关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
 [12] 张军, 杨子晨. 多传感器数据采集系统中的数据融合研究[J]. 传感器与微系统, 2014(3): 52-54, 57.
 [13] 熊常伟, 张德然, 张怡. Q 对称熵损失下几何分布的参数估计[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2007, 25(3): 69-71.
 [14] 陈燕俐, 张乾, 许建, 等. 无线传感器网络多应用场景下的安全数据融合方案[J]. 计算机科学, 2017, 44(9): 162-167.

责任编辑: 高荣海