

基于 WiFi 的室温氢气检测系统的设计与研究

张文滔, 王 钊, 黄 锐, 卢 仕, 胡永明

(湖北大学 物理与电子科学学院 铁电压电材料与器件湖北省重点实验室, 武汉 430062)

摘要: 为了提高氢能源及相关领域中对氢气泄漏的在线监控水平, 采用基于 MoO₃ 纳米线的室温高性能半导体氢敏元件作为传感探头, 以基于 Cortex-M3 内核的 32 位低功耗微控制器 STM32F103VCT6 为主控芯片, 采用 WiFi 终端为客户端, 利用路由器组网并以上位机做服务器, 通过 AT 指令和 TCP/IP 网络传输协议等技术, 结合 Labview 软件平台开发可视化控制和测量结果显示界面, 组建了一套包含数据采集、泄漏报警、氢气浓度显示等多功能的氢气泄漏无线监测系统; 该系统可通过采集环境中的温、湿度信号对传感探头检测结果进行校正, 从而实现大气条件下对待测环境中氢气含量的准确监测, 具有低成本、低功耗、响应速度快、监控距离远、组网简单等优点, 其无线传感模式可解决产氢、用氢领域传感系统布线困难的问题, 还可根据实际需要改变传感器节点的数量和客户端用户界面, 具有较强的扩展性。

关键词: 无线传感网络; 氢气传感器; 在线监控; 氢能源

Design and Research of Room Temperature Hydrogen Detection System Based on WiFi

Zhang Wentao, Wang Zhao, Huang Rui, Lu Shi, Hu Yongming

(Hubei Key Laboratory of Ferro & Piezoelectric Materials and Devices, Faculty of Physics & Electronic Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to improve the online monitoring technique of hydrogen leakage in hydrogen energy and related areas, the high-performance room-temperature hydrogen sensors based on MoO₃ nanowires were employed as sensor probes for building the online hydrogen leakage monitoring systems. The system was consisted of a master chip based on the Cortex-M3 core 32-bit low-power microcontrollers STM32F103VCT6, the WiFi terminals as the clients and the router network with an above machine as the server. Through the AT command and TCP/IP network transmission protocol technology, as well as the Labview software platform, the visual control and measurement results display interface were developed. The system was set up to a multi-functional system together with the data acquisition, leakage alarm and hydrogen concentration display. It can correct the detection result of the sensor probe by collecting the temperature and humidity signals in the environment, so as to realize the accurate monitoring of the hydrogen content in the environment under the atmospheric condition. With low cost, low power consumption, fast response, monitoring distance, simple network and so on, its wireless sensor mode can solve the problem of wiring difficulty in hydrogen production and related areas. One can also change the number of sensor nodes and client user interface according to the actual needs. The system also possesses high extensibility.

Keywords: wireless sensor networks; hydrogen sensor; online monitoring; hydrogen energy

0 引言

氢气是一种燃烧效率高、产物无污染的清洁能源, 在化工、航天以及军事等众多领域得到广泛的应用。氢气分子较小, 扩散性极强, 比其他液体燃料和气体更易渗透, 从设备中泄露出来。由于氢气燃烧范围宽、着火点低, 当氧气中含氢 5%~95% 或空气中含氢 4.1%~74.2% 时, 遇明火会发生爆炸。因此, 氢气的泄露直接威胁着我们的人身安全, 在产氢、储氢和用氢等相关领域中, 应特别注意氢气的防火防爆^[1]。

氢气本身无色无味, 泄漏时人的视觉和嗅觉无法分辨出

来, 使用过程中必须利用氢气传感器对环境中的氢气的含量进行监测。然而, 目前大多数氢气检测装置仍在用高价格的进口电化学传感器作为探头。这类传感器使用寿命短, 成本高且易损耗, 不利于进行低成本传感网络的构建和系统的运行维护, 极大的制约了氢气传感网络技术的发展。

半导体氢气传感器具有灵敏度高、成本低廉且使用寿命长等系列优点, 是最具发展潜力的一类氢气传感器件。然而, 传统半导体氢气传感器需在较高温度下 (200~300℃) 工作, 器件功耗较高。利用高比表面积的低温半导体纳米材料, 如纳米线、纳米带等, 取代传统的块体材料, 组建室温工作的高性能半导体传感器, 能够有效降低传感节点的功耗, 促进传感网络技术的发展。

在即将到来的人工智能时代, 基于物联网进行信息交换和通信的物物相连模式已成为一种必然趋势。近年来, 物联网的火热带动了无线传感网络的高速发展, 促使多跳式网络通信系统更为普及, 其将引起信息采集和环境感知的一场革命^[2]。在众多的物联网通信技术中, 与其他无线通信技术相比, WiFi 在传输速率和传输距离上存在明显优势, 其传输速率高达

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2017-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金(11474088, 11504099); 湖北省技术创新重大专项(2016AAA002)。

作者简介: 张文滔(1991-), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统方向的研究。

通讯作者: 王 钊(1985-), 男, 山东青岛人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事微纳传感材料与器件方向的研究。

54Mb/S, 传输距离在 0—100 m, 且稳定性能更好。因此, 本文在组建半导体纳米线基室温氢气传感器的基础上, 基于 WiFi 技术设计并制作了基于半导体氢气传感器的传感网络, 并基于 Labview 软件平台构建了一套以高校用氢实验室为使用环境的无线氢气浓度监测系统。

1 系统的设计

1.1 系统整体结构及工作原理

该系统的整体结构分为三个部分: 9 个传感器节点、路由器和上位机。以 9 个节点来采集和感知环境中信息如氢气浓度、温湿度, 路由器组网搭建无线传感网络, 上位机对数据信息处理分析和监控。

系统的工作原理是: 以路由器为 AP 接入点创建一个局域网, 局域网内的这 9 个节点和上位机分别连接上路由器的 WiFi, 路由器会给每个节点和上位机分配一个 IP 地址, 以传感器节点为客户端上位机为服务器, 令这 9 个节点与上位机的 IP 地址相连, 先将节点采集到的氢气浓度和温湿度汇总到路由器端, 然后发送到上位机上, 这样在无人值守状态下, 可通过上位机远程在线监控。节点上的显示屏实时读取测量到的数据, 使得信息的获取更为直观化, 并在氢气浓度超过设定阈值后触发节点上的报警系统发生声光报警, 以便实验室管理人员及时得知并处理, 消除实验室安全隐患。该系统组网模式也可以通过 WiFi 自组网, 将路由器替换掉, 如 Zigbee 自组网模式一样。其方法为设置 WiFi 模块为 AP 模式, 作为一个 AP 接入点, 覆盖整个局域网, 让节点和上位机来连接, 但这加大了组网的复杂度, 增加了传感网络网关建设的成本, 也容易造成路由瘫痪的现象, 而且相对于 Zigbee 不需要协调器进行数据解析, 这种多跳式非自组网模式更为简单^[3]。

1.2 系统硬件电路设计

1.2.1 传感器节点设计

传感器节点主要由氢气传感器、主控制器、温湿度传感器、OLED 液晶、报警系统、WiFi 模块及电源等部分组成, 其结构如图 1 所示。

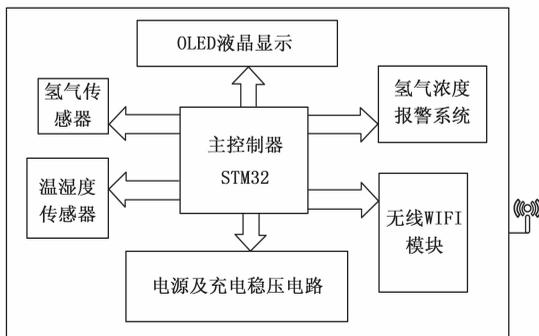


图 1 节点探测器结构图

传感节点的主控制器采用的是意法半导体公司生产的 STM32F103VCT6, STM32F103 基于 ARM 公司 Cortex—M3 内核, Cortex—M3 旨在设计体积小、低成本、低功耗、高性能等严格要求的嵌入式处理器。采用 Cortex—M3 内核的 32 位精简指令集 RISC 处理器, 较之 8 位和 16 位的处理器具有更强的专用性, 提供了更高的代码效率, 最高可达 72 MHz 的工作频率。STM32 体积小, 片内资源丰富, 16 K 到 512 K 的

Flash 容量, 最大 64 K 字节的 SRAM, 有睡眠、停机和待机等低功耗模式。

本文氢气传感器采用的是课题组研制的一种基于 MoO₃ 纳米带/石墨烯复合材料的室温氢气敏感元件^[4]。该敏感元件所制成的氢气传感器在室温下具有快速响应和高灵敏度的优异特性, 在低浓度 1000 ppm 氢气浓度的大气环境中其响应时间仅为 10.6 s, 灵敏度达 95%。以这种室温半导体氢气敏感元件所制成的传感器探头, 具有低功耗、体积小和使用寿命长等优点, 能有效降低传感器节点功耗和减少氢气检测系统的开发成本^[5]。

氢气传感器的模数转换基于 STM32 内置的 12 位 ADC 采样, 转换速率达 1 MHz 不需要外置 A/D 转换器, 简化了电路的复杂度。AD 转换电路电路中给传感器串联一个匹配电阻 R_L (这个电阻是可选的, 根据传感器响应特性选一个最佳的), 组成一条回路, 给回路加上总电压 VCC_{3.3} 再根据采集到的传感器电压 V 换算得到其电阻和对应氢气浓度。传感器电阻 (R_s) 的计算公式为:

$$R_s = \frac{V}{VCC_{3.3} - V} \times R_L \quad (1)$$

氢气传感器响应特性受环境温度的影响, 温度的变化会影响传感器电阻值的大小, 使得在不同温度下的传感器对氢气浓度的检测与实际值存在误差。在以往的研究中, 有的在电路回路中加上热敏元件来抵消温度带来的影响以达到温度平衡条件, 也有的是通过传感器内部加热电阻来控制温度等一些, 但这些方法都存在电路复杂, 精度低, 稳定性差等原因^[6]。本文中采用温湿度传感器采集周围环境温湿度, 并结合氢气浓度与温度响应关系对所测氢气浓度值进行软件滤波算法校准得到的氢气浓度值。传感器所处的实验室室温基本在区间 0—40℃ 之间而且其浮动不大, 采集取区间内不同温度系数氢气浓度值样本数据, 结合实际值进行建模得到对应关系。

为进一步降低传感器节点功耗采用 OLED 显示屏, OLED 利用有机电致发光二极管制成, 不同于 LCD 与 LED 液晶屏其不需要背光源, 具有自发光的特点, 不管是在色彩度、亮度、响应速度还是功耗等方面都要优于 LCD 和 LED, 被认为是下一代的平面显示器新兴应用技术。各节点 OLED 实时显示所测得氢气浓度。氢气浓度报警模块用于氢气浓度的阈值报警, 当节点周围的氢气浓度超过所设定的阈值的时候, 主控制器启动声光报警。

供电单元最终采用 3.7 V 锂离子电池, ADC 采样回路两端总电压与控制单元相同都为 3.3 V, 直接将 3.7 V 电压来加给回路会导致随着电池电量消耗电压减小, 影响最终测得氢气浓度值, 在电路中增加 AMS1117 稳压电路, 利用输出 3.3 V 电压 AD 采样, 以达到稳压滤波的作用。

1.2.2 无线 WIFI 模块

为降低成本采用 WiFi 的组网方式, 且 WiFi 传输速率快, 传输有效距离长, 抗干扰能力强。以无线终端与无线接入点的模式设计传感网络系统, 在 AP 无线接入点覆盖的区域内所有终端使用相同的频率互联互通^[7]。WIFI 模块采用的基于 ESP8266 芯片的 ESP—07, ESP8266 是一款工作在 2.4 G 频段的超低功耗 UART—WIFI 透传模块, 其专为移动设备和物联网应用设计, 支持 802.11 b/g/n 标准协议, 支持 STA、AP 及 STA+AP 三种工作模式, 内置 TCP/IP 协议栈, 丰富的 Sock-

et AT 指令缩短了开发周期。在众多的无线通信模块中具有成本低, 封装尺寸小等特性, 将用户物理设备连接到 WIFI 网络上后可进行互联网或局域网通信。

传感器节点 ESP8266 设置工作模式为 Station 模式, 该模式下既可配置节点为客户端也能作为服务器, 由于是实现数据从节点到上位机的传递, 基于这样 TCP/IP 网络传输协议, 配置节点为客户端, PC 机为服务器。节点与上位机连接同一个路由器即处于同一个局域网内, 通过节点连接上位机 IP, 实现数据从客户端到服务器的传输。用串口透传进行数据传输, 传输的可靠性好, 最大的传输率为 460800bps。节点外接 IPX 接口的天线, 增强多节点共联下信号抗干扰能力。实际应用中, 由于节点无需长时间工作, 可通设置闲时休眠的工作模式, 最大化延长电池的续航能力。本文中 ESP8266 的 Deep-sleep 模式应用于低功耗的氢气传感器。在软件中设置让传感器节点每隔段时间从 Deep-sleep 状态醒来测量数据并发送出去, 间隔时间之后节点继续进入 Deep-sleep。在 Deep-sleep 睡眠模式下模块电流仅 10uA, 唤醒时间不超过 3 ms。

1.3 系统软件设计

1.3.1 节点程序设计

节点程序设计主要包括氢气传感器与温湿度传感器的数据采集与发送、OLED 显示屏实时显示、氢气浓度声光报警、探测节点与上位机的数据通信。为使各模块工作, 首先编写 WiFi 模块等驱动程序, 可以连接 ESP8266 与 PC 机, 利用串口助手工具进行 AT 指令学习, 如图 2。

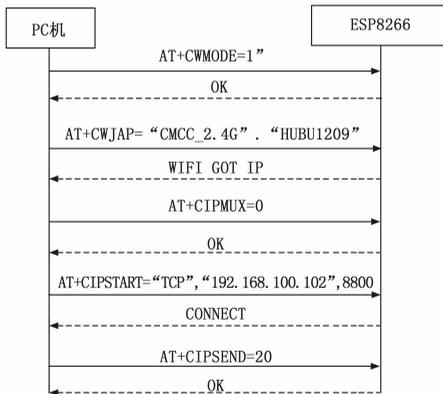


图 2 AT 指令调试

WiFi 模块调试涉及无线通信, 调试前关闭防火墙, 串口助手输入指令 AT+CWMODE=1 配置 ESP8266 为 STA 模式, 返回 OK 表示配置成功, 输入 AT+CWJAP 加入路由器, 连接路由器 WiFi 账号密码, 返回 WIFI GOT IP 说明路由器给模块分配了一个地址, 设置单连接 AT+CIPMUX=0 为透传模式, 连接服务器地址 AT+CIPSTART, 发送字节命令 AT+CIPSEND, 然后发送数据。按该调试流程来设计整个驱动程序。

将编写好的驱动程序 API 接口调用给上层应用程序, 系统上电后传感器节点初始化, 包括 AD 模数转换、温湿度传感器、WiFi 模块等初始化, 然后各节点连接路由器, 当没有接收到返回 OK 指令, 程序返回重新连接, 如果 20 s 后 OLED 屏不亮说明程序瘫痪, 可能硬件出现问题, 检查硬件; 当接收到返回指令, 程序向下执行, 接着连接上位机 IP 地址, 9 个

节点对应连接 9 个不同的端口, 同上, 当没有接收到返回 OK 指令, 程序返回重新连接, 同样如果 20 s 后 OLED 屏不亮说明程序瘫痪, 检查硬件问题。等待网络的连接后进行数据的采集并发送, 整个连接到第一次采样过程耗时 30 s 左右, 设置其采样率 1 s 采两个点, 其主程序流程图如图 3 所示。

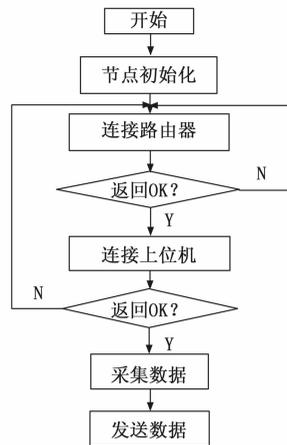


图 3 探测节点程序流程图

1.3.2 上位机端 LabView 设计

LabView 是 NI 公司开发的一种应用软件开发平台, 在国际上被广泛应用于仪器控制和数据采集。与其他计算机编程语言不同, LabView 使用的是图形化编程语言 G 编写程序而非文本语言, 产生的程序是框图的形式, 这对于非专业的程序员非常方便^[8]。LabView 开发环境集成了构建应用的各种模块工具, 模块化方式大大缩短了软件开发周期, 使得整个系统的开发更为简便快速。基于 LabView 平台上设计了本系统的上位机端的前面板, 其结构模拟实验室氢气管道分布情况, 分别在三个气瓶、气腔和转接口安置探测节点, 节点既不能分布太密集也不能太稀疏, 以保证对这些容易泄露的点进行及时的采集, 接收到的数据显示在对应的节点框图里, 通过节点旁边指示灯和框图数值可直观判断是否发生氢气泄露。

后面板设计工作主要是基于 TCP/IP 通讯的端口侦听、读取字符串、解析字符串数据, 每个节点对应不同的端口, 其部分程序如图 4 所示。

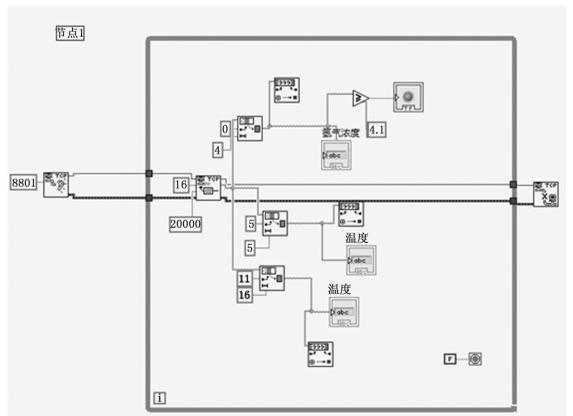


图 4 后面板部分程序设计

2 系统测试结果

为了验证所得系统的运行状态, 在湖北大学物理与电子科

学学院氢气传感器性能测试间中进行应用测试。首先, 将各传感器节点分别安装于气瓶、实验气腔和管道口等位置, 用于检测环境中氢气的含量。氢气传感器封装两边各 4 个针脚, 对应节点板上两排插座, 灵活插拔, 使传感器的日常更换更为简便, 如图 5。



图 5 节点实物图

实验过程中, 实验室温度和湿度保持在 30°C 和 $67\% \text{RH}$ 左右范围, 打开氢气瓶总阀与减压阀后, 为了模拟环境中氢气泄露的情况, 在保持无明火安全条件下拧松各管道结构, 使氢气发生缓慢泄露。其中, 所用氢气为含氢量为 4% 体积比的氩气-氢气混合气。结果表明, 当氢气开始泄露时, 所有节点均实现了氢气浓度的连续检测。所检测的浓度发生变化, 浓度变化响应迅速, 通气达到一定浓度蜂鸣器尖叫, 红灯闪烁。

从上位机的前面板观察到实验室中各个节点氢气浓度和温湿度情况, 由后面板可知所设阈值浓度是 4.1 , 当氢气浓度小于这个值, 说明是安全的, 指示灯处于熄灭状态, 当浓度超过这个值指示灯会亮起, 即该节点处发生了泄露。其测试结果如图 6。

3 结论

本文结合 WiFi 物联网技术和 LabView 可视化开发平台并融合了环境因素以达到更精准的氢气浓度测量而组建的氢气检测系统具有实时检测与报警和远程监控的功能, 较之传统的有线系统, 该系统免去冗繁的布线麻烦, 无线网络组网简便, 抗干扰性能强, 监控距离远, 无论是在体积、成本还是功耗都做

(上接第 31 页)

以及车身的点头作为监测部位。失效故障 P 指标变化大于弹性部件性能衰退故障的 P 指标变化, 而同比例的弹性部件和阻尼部件性能衰退时, 弹性部件故障后 P 指标变化较大。同时仿真实验中发现轨道情况影响 P 指标的变化趋势也可作为故障诊断算法的参数输入提高故障诊断算法精确性。

参考文献:

- [1] 李 熙. 城市轨道交通车辆走行部安全评估方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [2] 黄采伦, 樊晓平, 陈特放, 等. 铁路机车实时安全状态监测及故障预警系统 [J]. 机车电传动, 2007 (4): 62.
- [3] 张 兵. 列车关键部件安全检测理论与分析研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [4] 金子博, 方 宇, 陆远航, 等. 基于多体动力学仿真的城市轨道交通车辆二系悬挂故障特征分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2016 (7): 97-101.

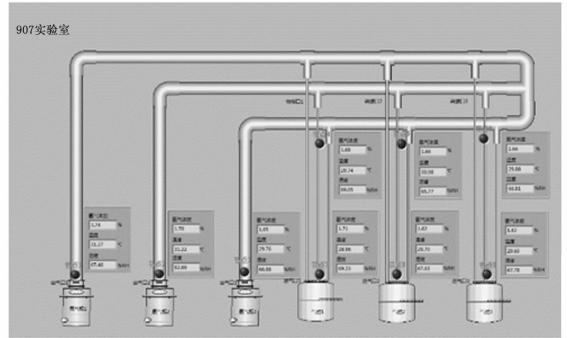


图 6 上位机测试结果

了严格要求的软硬件裁剪。在实验室氢气浓度的实际测试中, 该系统最终实现了氢气浓度、温湿度的实时检测与远距离监控, 系统性能稳定, 能够保证实验室氢气气敏特性研究实验的顺利进行。

参考文献:

- [1] 张 伟, 刘义军, 张 涛. 潜在燃料电池氢泄露分析及检测技术 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36 (1): 95-99.
- [2] 商冰洋. 基于无线传感器网络的多点温度检测系统的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [3] 郝树开, 黄 春, 吴艳敏, 等. 基于 ZigBee 的氢冷发电机系统无线检测网络的设计 [J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2010, 25 (5): 7-10.
- [4] 顾豪豪. 一种氧化钼/石墨复合材料及其在制备氢气敏感元件方面的应用 [P]. 中国, 201510162163.4. 2015-07-15.
- [5] Yang S, Wang Z, Zou Y, et al. Remarkably accelerated room-temperature hydrogen sensing of MoO_3 nanoribbon/graphene composites by suppressing the nanojunction effects [J]. Sens Actuat B, 2017, 248: 160-168.
- [6] 罗艳龙. 基于多传感器的氢气泄露检测技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [7] 曾 磊, 张海峰, 候维岩. 基于 WiFi 的无线测控系统设计与实现 [J]. 电测与仪表, 2011, 48 (7): 81-83, 96.
- [8] 杨忠仁, 饶 程, 邹 建, 等. 基于 LabVIEW 数据采集系统 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27 (2): 32-35.
- [9] 吴 误, 沈 刚. 轨道车辆走行部机械故障预警方案研究 [J]. 华东交通大学学报, 2013, 30 (1): 32-35.
- [10] 刘应吉. 车辆故障状态监测与故障诊断新方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [11] Firlik B, Sowinski B. Condition monitoring algorithms for light rail vehicle suspension [A]. Proceedings of the First International Conference on Railway Technology [C]. 2012: 112-125.
- [12] 叶哲君. 轨道车辆走行部安全监测预警算法理论研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2016.
- [13] 沈 刚. 轨道车辆系统动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [14] 严隽毫, 傅茂海, 等. 车辆工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
- [15] 陆冠东. 车辆系统动力学计算方法研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [16] 郭淑萍. 城轨列车悬挂系统故障诊断研究及其工程实现. [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.