

面向异构网络的区域雾霾预警系统^①

李志华, 高 鹏, 王 巍, 于 杨, 张见雨

(河北工程大学 信息与电气工程学院, 邯郸 056038)

通讯作者: 高 鹏, E-mail: 517098477@qq.com



摘 要: 为了有效地对雾霾进行预警与防范, 设计了面向异构网络的区域雾霾预警系统. 该系统由采集模组, 协调器, 网关, 服务器, 显示终端组成, 通过部署 LoRa、NB-IoT、ZigBee 3 种异构网络全面采集传感器数据, 设计网关实现数据的上传, 服务器作为预警系统的大脑, 提供对环境信息的分析与处理, 触发相应的机制响应并采取相应措施, 实现分级预警. 介绍了系统的总体设计方案以及分级预警的工作机制, 并利用遗传算法优化后的支持向量回归模型完善分级预警机制, 最后通过案例分析论证了该系统能够稳定、有效地对雾霾进行预警.

关键词: 异构网络; 通信协议; 雾霾; 分级预警

引用格式: 李志华, 高鹏, 王巍, 于杨, 张见雨. 面向异构网络的区域雾霾预警系统. 计算机系统应用, 2019, 28(12): 93-98. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7188.html>

Regional Haze Warning System for Heterogeneous Networks

LI Zhi-Hua, GAO Peng, WANG Wei, YU Yang, ZHANG Jian-Yu

(School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to warn and prevent haze effectively, an regional haze warning system for heterogeneous networks is designed in this study. The system consists of collection module, coordinator, gateway, server, and display terminal. It collects sensor data by deploying three kinds of heterogeneous networks, i.e., LoRa, NB-IoT, and ZigBee. The gateway is designed to achieve data uploading. As the brain of the whole system, the server achieves the classification pre-warning by providing analysis and processing of the environmental information, triggers the corresponding mechanism response, and takes corresponding measures. Firstly, this paper introduces the overall design of the system and the working mechanism of the classification pre-warning. Then, the classification pre-warning mechanism is improved by the support vector regression model which is optimized by genetic algorithm. Finally, the system is proved to forecast haze stably and effectively by analysis of the case.

Key words: heterogeneous network; communication protocol; haze; classification pre-warning

雾霾是发生在大气近地面层中的一种灾害天气, 给人们生产生活造成了严重影响, 雾霾现象已经成为我国重要的环境公害^[1]. 雾霾的形成通常与气象条件和主要污染物有关, 雾霾的出现给城市交通和人们的身体健康带来了很大影响^[2-4]. 准确地预测雾霾程度, 提

前做好防护措施, 对提高人们生产生活有着极为重要的意义.

为此, 国内外众多学者基于物联网和无线传感网络设计了多种环境监测系统实现对环境信息的实时监测. 文献[5]将无线传感网络与 WiFi 结合, 实现了

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61802107); 河北省物联网数据采集与处理工程技术研究中心开放课题 (2016-2)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61802107); Open Fund of IoT Data Acquisition and Processing Engineering Technology Research Center of Hebei Province (2016-2)

收稿时间: 2019-05-10; 修改时间: 2019-05-30; 采用时间: 2019-06-06; csa 在线出版时间: 2019-12-10

PM_{2.5} 等环境信息的本地与远程监测,并增加了自动重连功能.文献[6]设计了 ZigBee 无线传感器网络,对室内多个点实时采集,完成对室内甲醛浓度的远程监测.文献[7]基于 6LoWPAN 技术和 Contiki 操作系统设计嵌入式网关,实现了 ZigBee 与 IPV6 网络的互联互通.上述研究虽然实现了环境信息的监测,但容易受通信距离、通信质量以及应用场景的限制,对于覆盖范围较广的应用场景不能实现长距离、低功耗的通信.此外,许多学者提出了间接检测雾霾的方法,如文献[8]利用现有视频系统,研究了视频能见度与 PM_{2.5} 之间的内在关系,通过对能见度检测分级,实现雾霾的监测预警,对雾霾多发地段的行车安全起了重要作用.

鉴于此,本文设计了 LoRa、NB-IoT、ZigBee 3 种传感网络来全面感知监测区域的环境信息.在近地面通信时,优先采用 ZigBee 传感网络来减少成本^[9],而长距离通信时,考虑到障碍物会影响通信质量,所以采用长距离、穿透力强、服务质量(QoS)好的 NB-IoT 网络进行通信;在远地面通信时,由于高空中障碍物较少且 LoRa 成本较 NB-IoT 更低,所以采用 LoRa 网络进行通信.此外,引入分级预警机制,使得对环境信息的预知更加准确,从而提供可靠的预警信息.

1 系统方案

系统拓扑图如图 1 所示,该系统由采集模组、协调器、网关、服务器、显示终端五部分组成.采集模组由 LoRa、NB-IoT、ZigBee 3 种采集节点组成,通过节点上搭载的 PM_{2.5}、SO₂、风速等传感器对环境信息进行周期性采集,其中 LoRa 和 ZigBee 节点通过各自的协议与协调器建立传输网络,而 NB-IoT 节点直接通过蜂窝网络将数据上传至云平台.网关负责汇集各个网络的数据并通过 WiFi 将数据上传至嵌入式服务器.服务器作为系统的大脑,对网关上传的环境信息进行解析、存储与处理,并判断当前触发的预警等级,根据预警等级通过搭载的 GSM 模块向手机等移动设备发送信息,提醒用户或相关部门采取相应的措施.显示终端通过 PC、显示屏等展示设备实现数据的可视化.

2 异构网络搭建

2.1 采集模组设计

采集模组由 LoRa、NB-IoT、ZigBee 3 种采集节点组成.其中 LoRa 采集节点由 SX1278 发射模块、

STM32F407ZET6 控制模块、电源模块组成;NB-IoT 采集节点由 BC35-G IoT 模块、STM32L431RCT6 控制模块、电源模块组成;ZigBee 采集节点由 CC2530 发射模块、STM32F103ZET6 控制模块、电源模块组成.通过在采集节点上搭载 PM_{2.5}、SO₂、风速等传感器,实现环境数据的周期性采集.采集中断子程序流程图如图 2 所示.

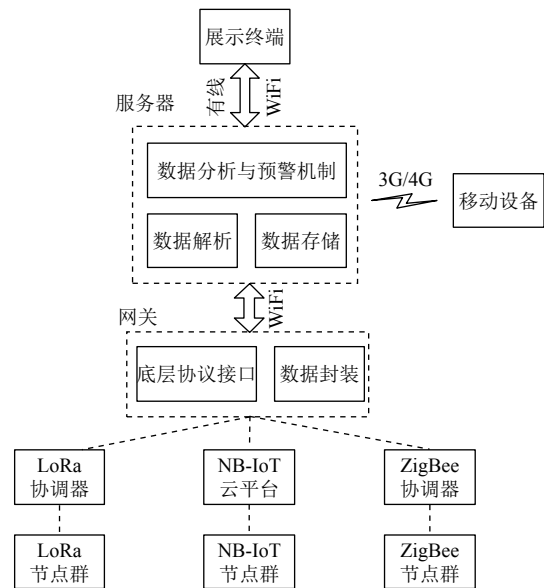


图 1 系统拓扑图

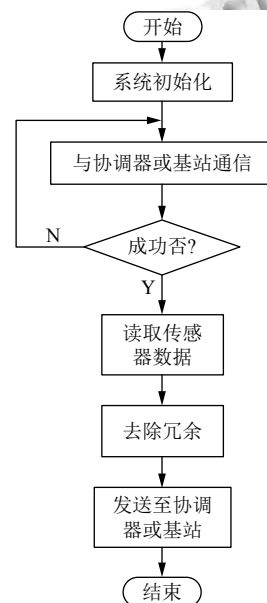


图 2 数据采集中断子程序流程图

由于 3 种传感器网络之间的硬件结构、协议等各不相同,不利于数据的交互与存储,所以分别定义了各

个子网络采集的数据流格式. 通过对异构网络所采集的数据流(包括网络标识号、采集单元标识号、数据流、含义等)的定义,使得系统能够根据定义好的数据流格式进行数据的封装与解析. 本系统定义 LoRa 网络的标识号为 12; NB-IoT 网络的标识号为 13; ZigBee 网络的标识号为 11,并对字节数、进制、偏移量、转换倍数等进行了定义,方便后续的数据封装与解析.

2.2 网关设计

网关负责数据的汇集,协议转换及与服务器的通信. 本网关采用 Linux 操作系统,以 BCM2837B0 为处理器,集成了 ARM Cortex-A53 内核,扩展了以太网、USART、I²C 等多种接口,并可额外通过 HAT 以太网(Poe)供电. 处理器通过 I²C、SPI 总线分别与 LoRa、ZigBee 协调器通信;通过 WiFi 依托云平台提供的 API 接口获取 NB-IoT 节点上传的数据.

为了实现数据的结构化描述,在数据格式方面,选择 JSON (Java Script Object Notation) 轻量级数据格式. JSON 采用键值对结构的文本格式,便于人们阅读和编写,同时易于机器解析和生成,是理想的数据交换语言^[10]. 网关通过 USART, I²C, SPI 通信接口与协调器进行交互,借助 Linux 中的 JSON 编程接口,实现 LoRa 和 ZigBee 网络数据的协议封装;通过云平台获取 NB-IoT 数据进行 JSON 协议封装.

网关根据各个网络定义好的数据流格式,对不同的协议进行封装,实现协议封装的原理为:首先,创建 JSON 配置文件的 Document 对象,创建根元素和子元素. 然后以字节段描述结束为条件,循环地封装监测数值 ID、含义、偏移量等信息,实现 JSON 结构化描述,进行协议封装,最终以 UTF-8 编码格式写入 JSON 配置文件库,流程如图 3 所示.

3 服务器的搭建

本文利用 NVIDIA Jetson TX2 平台搭建嵌入式服务器,实现对数据的解析、存储与处理. 通过 WiFi 与网关通信,将网关上传的数据解析后存储至 MySQL 数据库中;对数据进行分析与处理,触发相应的预警等级并通过串口控制的 SIM800 模块向用户发送短信,提醒用户采取相应措施,实现系统的分级预警功能;展示终端采用 B/S 架构,方便用户访问.

3.1 基于 JSON 格式的数据解析

服务器的具体解析过程如图 4 所示,服务器实时对网络进行监听,当产生中断时,对比协议标识,判断

网络类型并运行各自的线程. 线程中,根据系统提供的 JSON 接口,按照预先定义好的数据流格式逐字节进行查找,然后判断数值 ID 并根据偏移量和转换倍数转换为实际采集的数值,从而得到数据流中的传感器数据. 解析结束后即调用数据库接口,以监测数值 ID 为主键,将对应的数值存储到 MySQL 数据库中并提供调用接口供上层应用.

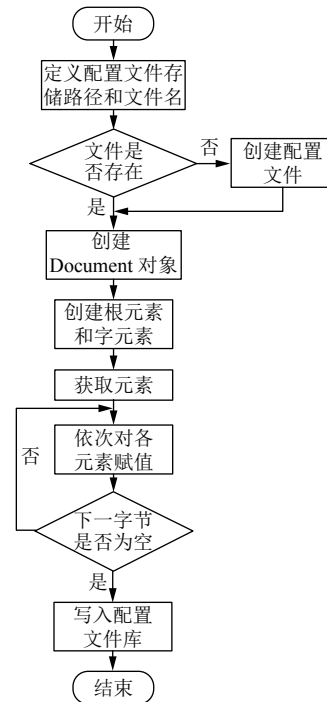


图 3 网关协议封装中断子程序流程图

3.2 分级预警机制的工作流程

在进行分级预警之前,服务器需对数据库中的传感器数据进行预处理. 服务器对每种传感器每天所采集的数据按式(1)进行取平均值处理,得出一组传感器平均值数据. 平均值公式如下:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

式中, A 为取平均值后某一种传感器的数据, A_i 表示 3 种不同的采集节点每天所采集的某一种传感器数据, n 为每种传感器每天所采集的次数.

分级预警机制流程如图 5 所示,服务器进行数据处理与分析后,结合中国气象局发布的雾霾等级标准划分预警等级,当 $PM_{2.5}$ 浓度小于等于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时为一级预警,并继续监测;当 $PM_{2.5}$ 浓度大于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 且小于等于 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,为二级预警,并发送信息至

用户并给出合理建议;当PM_{2.5}浓度大于250 μg/m³时为三级预警,将发送信息至用户并通知环保部门启动喷雾降尘车等操作。

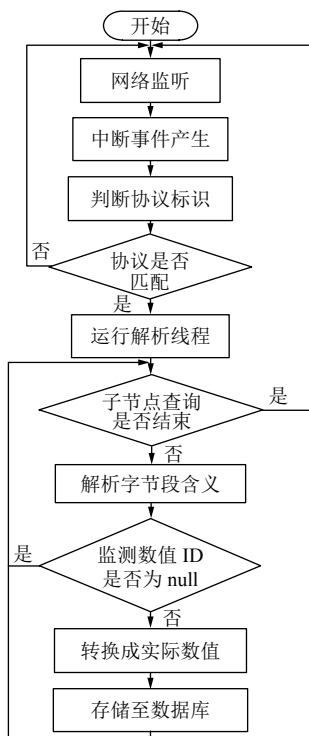


图4 服务器解析流程图

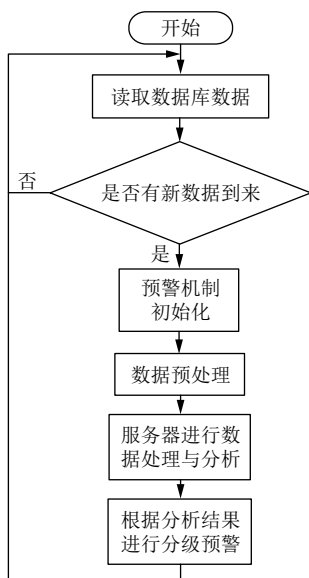


图5 分级预警机制流程图

3.3 分级预警机制的优化

将支持向量回归模型用于分级预警机制中,使得服务器能够根据数据库中的历史数据来预测未来的空

气质量.由于雾霾预测属于非线性问题,而支持向量回归机(Support Vector Regression, SVR)在解决小样本、非线性问题中表现出独特优势,支持向量机的关键在于核函数,不同的核函数会导致SVR推广性不同,一般使用RBF^[11].在以RBF为核函数的SVR中,惩罚参数C和RBF核参数g是影响模型性能的重要参数^[12].

为了提高SVR预测的精度,本系统使用遗传算法对惩罚参数C和RBF核参数g进行参数寻优,提高预测的准确性.其中适应度函数是遗传算法用于支持向量机参数寻优的接口,用于衡量个体的优劣,其对遗传算法的选择、交叉和变异操作具有重要影响,从而也会影响参数寻优的优化时间和优化效率^[13].

本文采用SVR均方根误差作为适应度函数,即:

$$fit_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, y_i 为训练样本真实值, f_i 为支持向量机预测值, n 为样本的个数, fit 为适应度函数。

将优化后的参数代入SVR模型中,实现对SVR的优化,再将优化后的SVR应用于分级预警机制中,使得系统更加准确、合理地划分预警等级。

4 案例分析

依托本校已部署的异构网络,全面获得校园雾霾环境信息.根据3种传感网络不同的传输特性,在校园实验室、教学楼顶部、操场分别布置 ZigBee、LoRa、NB-IoT 3种采集节点.进行了为期90天的数据采集和测试工作,采集周期为10分钟;使用基于树莓派设计的网关完成数据的汇集与封装;使用 NVIDIA Jetson TX2 搭建的嵌入式服务器实现数据解析、存储与分析。

4.1 实验数据的获取

由中国气象局发布的雾霾等级标准划分可知,PM_{2.5}的含量决定了雾霾的危险等级,而湿度、风力、SO₂、CO、NO₂、O₃与PM_{2.5}含量相关度较大^[14,15],所以在3种采集节点上分别搭载温湿度、SO₂、风速、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5}7种传感器.以LoRa采集单元为例,其采集数据流如表1所示。

4.2 异构数据封装与解析

网关汇集3种传感节点采集的数据后,根据图3所示的封装流程对监测数值ID、含义、偏移量等信息

循环封装为 JSON 文件, 而后通过 WiFi 发送到服务器. 部分 JSON 文件如图 6 所示.

表 1 LoRa 采集单元的传感器采集数据流

| 数据类型 | Byte0 | Byte1 | Byte2 | Byte 3~4 | Byte 5~6 | Byte 7~8 | Byte 9~10 |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|
| 温湿度/ NO ₂ | 11 | B0 | 01 | 空气 温度 | 空气 湿度 | NO ₂ | 校验和 |
| PM _{2.5} /风 速 | 11 | B1 | 风速 | PM _{2.5} | 校验和 | 无 | 无 |
| CO/O ₃ / SO ₂ | 11 | B2 | 02 | CO 浓度 | O ₃ 浓度 | SO ₂ 浓度 | 校验和 |

注: 字节0为LoRa网络, 为十六进制数据, 字节1为采集单元标识号(B为LoRa节点标识), 空气温度(转换倍数: 0.1, 偏移量: -400, 单位: °C), 空气湿度(转换倍数: 0.1, 偏移量: 0, 单位: %), NO₂浓度(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: ppm), CO浓度(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: ppm), SO₂浓度(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: ppm), O₃浓度(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: ppm), 风速(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: m/s), PM_{2.5}(转换倍数: 1, 偏移量: 0, 单位: ug/m³).

```
{
  "LoRa_Node": {
    "rec_datastream": {
      "describe": {
        "BT": "2",
        "jianceID": "B21",
        "means": "CO",
        "JinZhi": "10",
        "pianyi": "0",
        "zhuanhuanbeishu": "1",
        "danwei": "ppm"
      }
    },
    ...
  },
  "node_id": "B2",
  "channel": "11",
  "node_name": "LoRa采集单元",
  "position": "教学楼(顶部)"
}
```

图 6 基于 JSON 格式的数据描述实例

服务器接收到网关上传的数据后, 按照图 6 所示流程进行解析. 以 16 进制数据流 12B20209BA0640006B779E 为例, 服务器根据 12 判断为 LoRa 采集单元, 然后定位到单元标识根节点“LoRa_Node”, 查询到“node_id”为 B2, 再根据“describe”中的字节段含义读出对应的 CO/O₃/SO₂ 数据依次为 09BA、0640、006B, 经过十进制转换, 减去偏移量, 乘以转换倍数, 最终解析为 2490、1600、107, 然后将监测 ID 和对应的实际数值存储到 MySQL 数据库中.

解析后的部分实验数据如表 2 所示.

表 2 解析后部分实验数据

| 日期 | 温度 (°C) | 湿度 (%) | 风速 (m/s) | NO ₂ (ppm) | CO (ppm) | SO ₂ (ppm) | O ₃ (ppm) | PM _{2.5} (ug/m ³) |
|------|---------|--------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------------------|----------------------------------------|
| 1.20 | 0 | 36 | 0.77 | 54 | 2 | 39 | 24 | 72 |
| 1.21 | 0 | 35 | 0.35 | 55 | 2 | 37 | 23 | 78 |
| 1.22 | 9 | 17 | 0.92 | 53 | 2 | 34 | 25 | 91 |
| 1.23 | 2 | 33 | 0.13 | 71 | 3 | 51 | 21 | 115 |
| 1.24 | 2 | 40 | 0.54 | 86 | 3 | 55 | 14 | 165 |
| 1.25 | 2 | 46 | 3.11 | 40 | 1 | 22 | 39 | 64 |
| 1.26 | 0 | 33 | 1.37 | 43 | 1 | 26 | 39 | 68 |
| 1.27 | 1 | 42 | 1.24 | 51 | 1 | 21 | 20 | 84 |
| 1.28 | 2 | 37 | 0.95 | 61 | 2 | 41 | 24 | 121 |
| 1.29 | 3 | 43 | 1.46 | 62 | 2 | 35 | 28 | 172 |
| 1.30 | 2 | 59 | 1.48 | 45 | 1 | 21 | 27 | 167 |

4.3 分级预警机制的优化与实现

由于影响因子的物理意义不同, 因此, 在应用于分级预警前需要对影响因子数据进行归一化处理^[16]. 使得采集的传感器数据介于 0~1 范围之内, 有助于网络快速收敛. 归一化公式如下:

$$X = (X_i - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (3)$$

式中, X 为经过归一化处理后的数据, X_i 为影响因子实际数据, X_{max} 和 X_{min} 分别为影响因子数据中的最大值和最小值^[17].

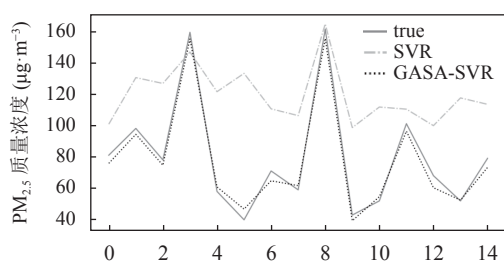
本系统使用 Python 语言来编写 SVR 雾霾预测模型, 实现分级预警机制的优化. 输入处理好的实验数据后, 利用 sklearn 库中的 iloc() 函数进行时间序列划分, 按照五比一的比例划分训练数据和测试数据, 将湿度、风力、SO₂、CO、NO₂、O₃ 作为输入向量, PM_{2.5} 作为目标向量. 其中, 种群范围为 20, 惩罚系数 C 的取值为 (0, 200), RBF 核函数 g 的取值为 (0.1, 10), 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.01, 进化代数为 200; 进行交叉、变异、遗传后得到 C 和 g 的最优值分别为 17.02 和 0.35^[18].

模型检验结果及误差见表 3.

表 3 预测模型检验结果

| Model | 误差率 | R ² 系数 | 均方根误差 |
|----------|--------|-------------------|---------|
| SVR | 0.8656 | 0.5587 | 45.6448 |
| GASA-SVR | 0.0962 | 0.9314 | 7.8897 |

由模型检验结果可知, 采用优化后的 SVR 模型预测 PM_{2.5} 的值, 其误差率在 10% 以下, 这说明优化后的预测模型准确度较高, 能够稳定、有效地预测未来的 PM_{2.5} 的含量. 利用训练好的 SVR 预测模型对校园未来 15 天 (2019.2.1-2019.2.15) 的 PM_{2.5} 含量进行检验, 预测结果如图 7 所示.

图7 未来15天PM_{2.5}预测结果

由预测结果可知,未来第3天和第8天PM_{2.5}指数分别为159 µg/m³和161 µg/m³,大于150 µg/m³且小于250 µg/m³,服务器判定为二级预警,并发送信息至用户给出合理建议;其余各天PM_{2.5}均小于150 µg/m³,服务器判定为一级预警,不采取措施并继续监测。

5 总结

本文实现了一套面向异构网络的区域雾霾预警系统.完成了异构网络中传感器数据的采集及存储;引入分级预警机制,触发相应的机制响应并采取相应措施;将支持向量回归模型用于分级预警中,使其更加准确、合理地划分危险等级.最后通过校园应用案例验证了该系统能够稳定、有效地对雾霾进行预警。

参考文献

- 杨准. 雾霾现象成因初步探讨. 科技创新导报, 2014, 11(34): 21. [doi: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2014.34.031]
- Hu JL, Wang YG, Zhang HL. Characterizing multi-pollutant air pollution in China: Comparison of three air quality indices. *Environment International*, 2015, 84: 17–25. [doi: 10.1016/j.envint.2015.06.014]
- McLaren J, Williams ID. The impact of communicating information about air pollution events on public health. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 478–491. [doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.149]
- 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估. *环境科学*, 2014, 35(1): 1–8. [doi: 10.13227/j.hjkk.2014.01.057]
- 陈镜, 王绍源, 陈清华. 基于无线传感网络的实时环境监测系统的设计与实现. *仪表技术与传感器*, 2018, (9): 79–83. [doi: 10.3969/j.issn.1002-1841.2018.09.019]
- 邵士博, 许家辉, 汪朝晖, 等. 基于 ZigBee 网络的室内甲醛浓度远程实时监测系统设计. *电子测量技术*, 2019, 42(3): 116–122. [doi: 10.19651/j.cnki.emt.1802118]
- 何相甫, 范志辉, 王辉, 等. IPv6 与 ZigBee 互联网关的设计与实现. *计算机工程*, 2019, 45(7): 154–158. [doi: 10.19678/j.issn.1000-3428.0051254]
- 阮雅端, 陈湘军, 郁建桥, 等. 雾霾分布视觉传感联动联控系统技术实现. *南京大学学报(自然科学版)*, 2015, 51(2): 234–242. [doi: 10.13232/j.cnki.jnju.2015.02.004]
- 庞泳, 李光明. 基于 ZigBee 的智能家居系统改进研究. *计算机工程与设计*, 2014, 35(5): 1547–1550, 1582. [doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2014.05.064]
- 张玉杰, 刘强, 张婷婷. 物联网系统异构数据的过滤及存储模型研究. *电子器件*, 2018, 41(3): 703–707. [doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2018.03.030]
- 左姣姣, 倪志伟, 朱旭辉, 等. 融合协同进化人工鱼群算法和 SVM 的雾霾预测方法. *模式识别与人工智能*, 2018, 31(8): 725–739. [doi: 10.16451/j.cnki.issn1003-6059.201808005]
- 朱旭辉, 倪志伟, 倪丽萍, 等. 基于相异度的 SVM 选择性集成雾霾天气预测方法. *系统科学与数学*, 2017, 37(6): 1480–1493.
- 李翠平, 郑瑶瑕, 张佳, 等. 基于遗传算法优化的支持向量机品位插值模型. *北京科技大学学报*, 2013, 35(7): 837–843. [doi: 10.13374/j.issn1001-053x.2013.07.006]
- 付倩倩. 基于多元线性回归的雾霾预测方法研究. *计算机科学*, 2016, 43(6A): 526–528. [doi: 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.6A.125]
- 白盛楠, 申晓留. 基于 LSTM 循环神经网络的 PM_{2.5} 预测. *计算机应用与软件*, 2019, 36(1): 67–70, 104. [doi: 10.3969/j.issn.1000-386x.2019.01.012]
- 刘洪通, 冯百明, 温向慧, 等. 基于 Storm 的 AQI 实时预测模型. *计算机工程与设计*, 2019, 40(1): 296–301. [doi: 10.16208/j.issn1000-7024.2019.01.050]
- 王娟娟. 基于改进支持向量机模型的开都河年径流量预测. *西北水电*, 2015, (4): 1–5. [doi: 10.3969/j.issn.1006-2610.2015.04.001]
- 宗晓萍, 武子瀚, 刘言. 基于遗传算法寻优的 SVR 雾霾预测模型. *河北大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(3): 307–311. [doi: 10.3969/j.issn.1000-1565.2016.03.014]