

李春明, 张会, 陈丁楷. 室内空气质量在线检测系统的研制[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(5): 141-144. Li Chunming, Zhang Hui, Chen Dingkai. Development of online detecting system for indoor air quality[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(5): 141-144.

室内空气质量在线检测系统的研制

李春明¹, 张会^{1,2}, 陈丁楷¹

(1.中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对目前中国室内空气污染普遍、在线检测速度慢等现状, 综合用传感器技术、嵌入式技术和无线传感器网络技术, 研制了一套室内空气质量在线检测系统, 系统由传感器阵列单元、信号调理单元、数据采集单元、数据显示单元、通讯单元、供电单元和嵌入式应用程序构成, 实现了甲醛、总挥发性有机物、一氧化碳、二氧化碳、温湿度检测的快速化、自动化和网络化。并通过精度校准平台对该系统在不同气体浓度下进行了实验, 甲醛、总挥发性有机物、一氧化碳、二氧化碳相关系数 R^2 /响应时间 T_{90} 分别为0.996 4/22 s, 0.995 3/10 s, 0.999 8/36 s, 0.999/53 s。结果表明, 系统检测精度高, 相关性好, 响应时间快, 能准确、方便的检测室内污染物。同时检测系统借助自带的无线传感器模块能够方便的扩展到诸如车内、矿井、化工厂等密闭环境中进行组网监测。

关键词: 室内; 空气污染; 环境监测; 无线传感器网络

中图分类号: X851 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2017.05.024 文章编号: 1003-6504(2017)05-0141-04

Development of Online Detecting System for Indoor Air Quality

LI Chunming¹, ZHANG Hui^{1,2}, CHEN Dingkai¹

(1.Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the problem such as general indoor air pollution and slow online detecting in China, with the help of sensing technology, embedded technology and wireless sensor network technology, an online detecting system for indoor air quality was developed, which consists of sensor array unit, signal conditioning unit, data acquisition unit, data display unit, communication unit, power supply unit and embed application program. The system can rapidly and automatically detect CH_2O , TVOCs, CO, CO_2 , temperature and humidity. A precision calibration platform was utilized to test the detecting system at different air pollution concentrations, with the correlation (R^2) and respond time (T_{90}) of CH_2O , TVOCs, CO and CO_2 as 0.996 4/22 s, 0.995 3/10 s, 0.999 8/36 s, and 0.999/53 s, respectively. The results show that, the detecting system has high precision, fast response time and good correlation with different pollution concentrations, can accurately and conveniently detect indoor air pollution. Moreover, the detecting system can be deployed in closed space, such as car, mines and chemical factory to form a detecting network by its wireless sensor network module.

Key words: indoor; air pollution; environmental monitoring; wireless sensor network

室内是人们接触最为密切的环境, 随着各种装修材料在室内的广泛使用, 室内的污染物逐渐增多, 污染物长期在人体内富集, 会对人体产生致癌、致畸、致突变的作用^[1]。根据国内学者研究结果显示, 我国城市住宅室内空气中挥发性有机物污染整体呈现种类多、浓度范围广、平均浓度高、污染控制技术难度大的态势^[2],

甲醛是首要污染物^[3-6]。而随着我国城市化率的不断提高的, 将会有更多的人聚集在城市中, 新建建筑也将逐渐增多, 加上人们对环境质量要求的不断提高, 以及合理有效的改善室内环境质量, 对室内环境污染快速、准确的检测显得日益重要。

为了适应室内污染物快速、方便检测的需要, 一

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://tjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjksyjs@vip.126.com

收稿日期: 2016-08-21; 修回日期: 2016-10-03

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(YZ201304); 中国科学院城市环境研究所青年人才领域前沿项目(IUEQN201303); 国家自然科学基金项目(41301577)

作者简介: 李春明(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事研究方向环境信息与环境管理 (电话) 0592-6190678 (电子信箱) cmli@iue.ac.cn。

些学者通过将国标推荐的检测方法进行自动化升级,来研发室内污染物的自动检测设备。如冒冉通过将酚试剂分光光度法检测过程中溶液吸光度检测环境和数据处理部分进行自动化,开发了便携式甲醛溶液浓度检测仪[7]。杜娟在酚试剂分光光度检测甲醛原理基础上,通过采用定波长发光二极管以及相应的光电检测电路代替实验室复杂光学系统,将恒流气体采样模块与分析模块融合为一体,实现了甲醛的现场在线检测[8]。在对传统检测方法进行自动化升级研究中,在很大程度上降低了操作人员的工作流程,特别是提高数据的记录、分析和整理的效率,但这些设备常需要在一定的化学试剂的配合下才能使用,提高了设备的使用门槛,同时也存在检测参数单一的问题。

而随着传感器技术的发展,一些专门应用于室内环境污染检测传感器被开发出来,为室内环境污染的快速检测提供了机遇。如 AHMT 甲醛传感器,检测下限 0.04×10^{-6} 、纳米 $V_2Ti_4O_{13}$ 催化发光甲醛气体传感器,检测范围 $0.1 \sim 40 \text{ mg/m}^3$,检测下限 0.06 mg/m^3 [10]、表面波 VOCs 传感器[11]、催化发光 VOCs 传感器[12]、光离子化 VOCs 传感器等等。一些传感器厂商也推出了商业化的传感器,如 Figaro 推出的 AMS2600 室内空气质量传感器、TGS2600 VOCs 传感器、DART 推出的甲醛传感器、Alphasense 推出的 VOCs 传感器等等。

本文通过综合运用传感器技术、嵌入式技术和无线传感器网络技术,研制携带方便、操作简单、便于部署、能够实时检测室内甲醛、挥发性有机物、一氧化碳、二氧化碳以及温湿度的室内环境质量的在线检测系统,为室内空气质量的在线检测、以及优化对策的选取提供技术支持。

1 系统设计

1.1 系统整体构成

检测系统主要由传感器阵列单元、信号调理单元、数据采集单元、数据显示单元、通讯单元和供电单元构成,各个单元通过总线进行连接(图 1)。各个单元采用模块化设计,既可以独立使用,也可以配合使用,方便以后更换和升级。检测系统通信单元采用无线传感器网络技术,便于组成实时感知网络,对于难以布线

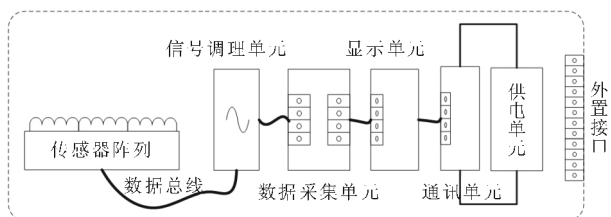


图1 室内空气质量在线检测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of indoor air quality detecting system

的密闭空间,例如矿井等具有很强的实用性。

1.2 系统硬件设计

传感器阵列主要有 CH_2O 传感器($CH_2O/S-10$)、VOCs 传感器(piDTech)、CO 传感器(CO-B4)、 CO_2 传感器(Airsense S8)和温湿度传感器(SHT10)。由于室内环境污染浓度低,在进行传感器选择时,传感器的灵敏度和检测范围是选择传感器的关键参考指标。VOCs 采用光离子化检测技术进行检测,电离势 10.6 eV ,波长 117 nm ,该传感器能够电离大部分 VOCs,但 N_2 、 O_2 、 H_2O 、 CO_2 不能被电离。 CH_2O 和 CO 采用电化学原理进行检测,分辨率分别为 0.01×10^{-6} 和 1×10^{-6} 。 CO_2 采用非分散红外技术线进行检测,分辨率 50×10^{-6} 。

信号调理单元的主要作用是负责将传感器感知的微弱信号进行放大,以便能够进行采集。信号调理模块根据传感器信号的特点进行设计。其中 CH_2O 和 CO 电化学传感器信号调理电路通过恒势电路和二级放大电路来实现(图 2)。

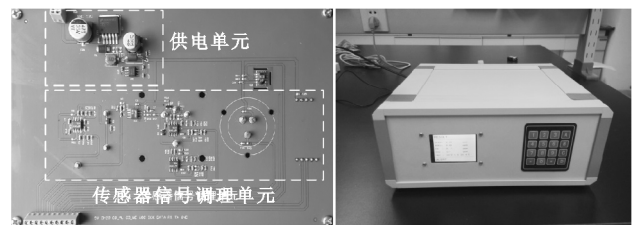


图2 检测系统供电和信号调理单元及原型

Fig.2 The detecting system's power supplying unit, sensor signal conditioning unit and its prototype

数据采集单元负责采集经调理电路处理后的信号,采用 STM32 系列处理器,该处理器具有性能高、成本的、低功耗的特点。数据采集单元对传感器输入的电信号进行 AD 转换,同时借助内置的传感器校准算法对采样数据进行线性插值和温度补偿,得出污染物浓度。并将检测数据实时显示在液晶屏幕上。

通讯单元负责与外置主机或者协调设备进行通讯,采用 2.4 G 无线频段进行组网通讯,方便各个终端模块之间形成自组网络。

供电单元负责为检测设备提供电源。选择 LM2596S 高效率开关电源芯片进行设计,降低电源纹波造成的信号干扰。经示波器(WaveRunner640Zi)测试,供电单元 5 V 输出纹波 2.2 mV , 5 V 精度达 99.96% 。

1.3 系统软件设计

下位机软件为嵌入式程序,存储在数据采集单元内部,主要负责检测平台硬件系统信号的自动化处理。程序中通讯、采集、分析、报警、中断等功能分别进行模块化设计,方便程序的维护。下位机软件程序的程

序流程图如图3所示。

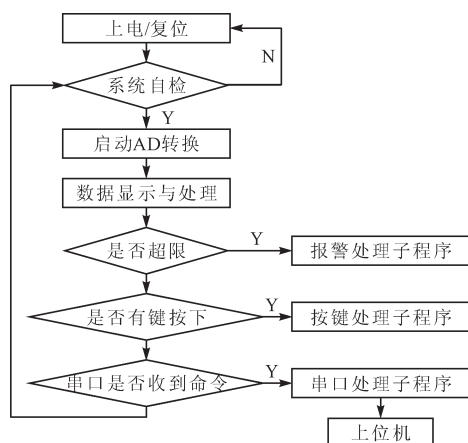


图3 下位机软件流程图
Fig.3 Flow chart of slave computer software

检测设备上电或复位后,设备首先调用自检模块对系统进行自检,自检通过后,启动AD转换,对传感器电信号进行模数转换并进行采集,同时进行数据的处理包括,检测值是否超限、是否有按键按下、串口是否收到上位机发来的命令、数据存储等,如果有相应的事件发生,则调用相应的处理子程序进行处理。

2 系统精度测试

在完成系统软硬件研制后,搭建了精度校准平台对检测系统在不同浓度下的相关性、响应时间 T_{90} 和零点噪声进行分析测试。响应时间是 T_{90} 是指通入标准气体后达到其90%浓度值时所需的时间。零点噪声是传感器在通入零气(高纯氮气)时的信号值,通过其标准偏差来衡量^[13]。

校准平台主要由样品稀释单元(99.999%高纯氮气,多参数动态校准仪(Teledyne API T700))、样品检测单元(传感器、气室)和数据分析单元(美国国家仪器PXI)构成(图4),气室和气管的材料均采用聚四氟乙烯材料,以减少对气体的干扰。多参数动态校准仪内部装有0~100 mL和0~10 L不同量程的高精度质量流量计,流量准确度 $\pm 1\%$ F.S,质量流量控制重复性 $\pm 0.2\%$ F.S,流量计线性 $\pm 0.5\%$ F.S。已知浓度的标准气在多参数动态校准仪和载气的配合下能产生出不同浓度梯度的标准气样品供传感器测试。数据采集平台通过搭载的NI PXIe-4113可编程电源模块、NI PXIe 6366高速数据采集卡以及LabView软件系统来进行数据的采集和分析。可编程电源模板能够为传感器提供精密电源,减少电源纹波造成的干扰,采集模块的采集速度高达1 kHz,能再现传感器输出的信号。

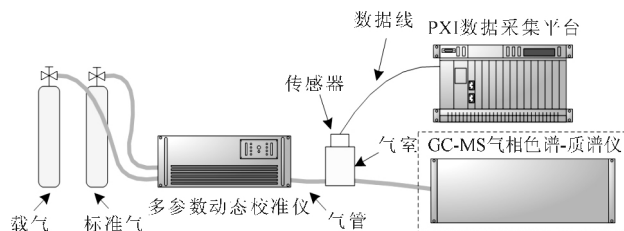


图4 精度校准平台示意图
Fig.4 Schematic diagram of precision calibration platform

为了保障精度校准和分析平台样品稀释单元的准确性,需要对其稀释范围内的样品进行GC-MS检测,通过通入 1×10^{-6} 浓度的异丁烯(C_4H_8)标准气分别稀释成 10×10^{-9} 、 20×10^{-9} 、 40×10^{-9} 、 60×10^{-9} 、 80×10^{-9} 浓度的样品,稀释后的浓度系列基本覆盖了 1×10^{-6} 的 C_4H_8 标准气在样品稀释单元的所能稀释范围(1×10^{-9} ~ 90×10^{-9})的80%。检测结果见图5。

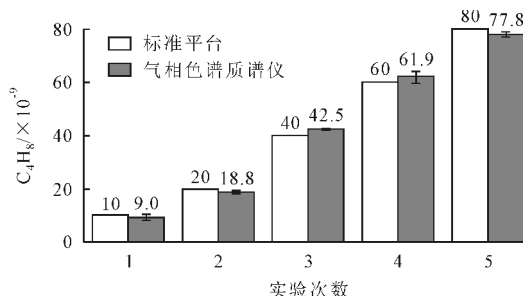


图5 精度校准平台与GC-MS对比测试结果
Fig.5 Comparison test between precision calibration platform and GC-MS

3 实验结果

3.1 校准平台精度测试结果

从图5中可以看出样品稀释单元所产生的样品气体与GC-MS检测结果具有很好的一致性, 10×10^{-9} 和 60×10^{-9} 的因其稀释浓度接近样品稀释单元稀释范围的边缘,故其精确度(标准差)相对其他浓度有所降低,但整体结果能够满足检测系统的精度测试。

3.2 检测系统在不同浓度下的相关性分析结果

CH_2O 、VOCs、CO传感器为模拟信号输出,分别测试了三者电信号在不同浓度样品之间的相关性和零点噪声, CO_2 传感器为数字信号输出,直接测试其读数和不同浓度样品直接的相关性。由于VOCs种类繁多,在此选用VOCs标定常用的气体异丁烯(C_4H_8)进行测试。根据测试结果得到了传感器的响应曲线(图6)、响应时间和零点噪声(表1)。

从图6中可以看出检测系统内各传感器的电信号与不同浓度气体相关性高,能够有效的对不同浓度的气体进行区分,同时从表1中也可看出传感器响应时间短,零点噪声低,能够快速的对污染物进行响应。

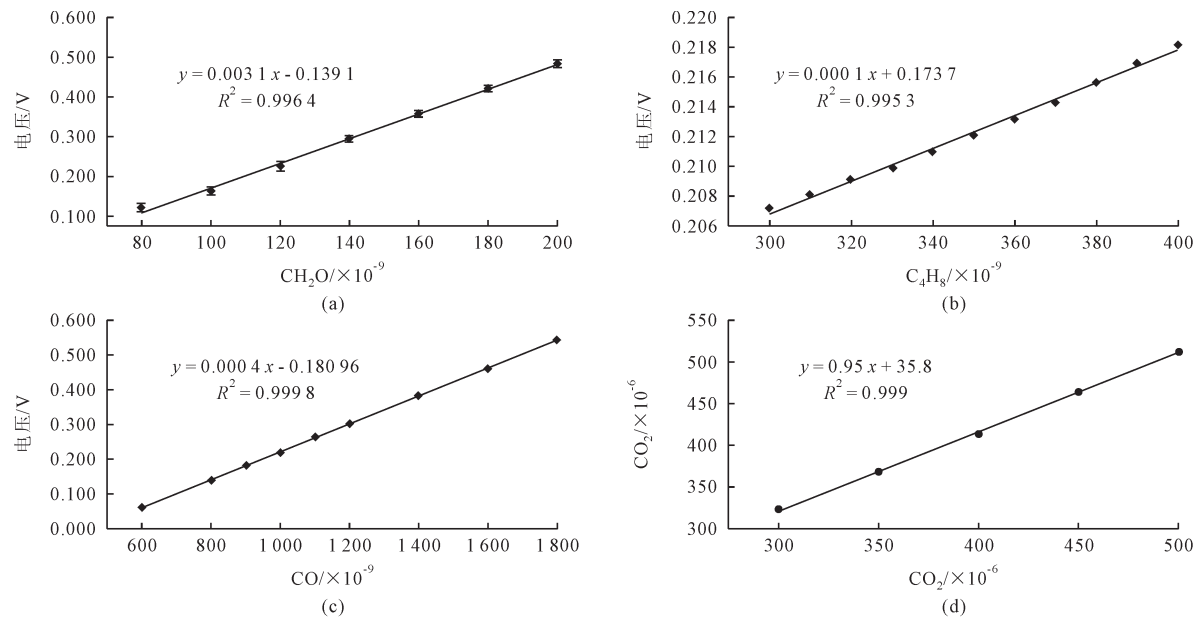


图6 检测系统检测值与不同样品测试结果
Fig.6 The correlation between the detecting system's results and samples

表 1 不同传感器响应时间和零点噪声
Table 1 The response time and zero noise of different sensors

	CH ₂ O	VOCs	CO	CO ₂
响应时间 T_{90}/s	22	10	36	53
零点噪声/ $\times 10^{-9}$	1.1	4.6	1.1	291.9

4 结论

传感器技术的发展使得一些成本低, 选择性强的传感器逐渐被研制出来, 本文通过能够对甲醛、总挥发性有机物、一氧化碳、二氧化碳传感器进行集成研制, 实现了室内污染物的快速、准确的检测, 同时该检测系统通过预置的无线传感器模块, 能够将其应用范围扩展到诸如车内、矿井、化工厂等环境中进行组网监测, 具有较强的实用性。

[参考文献]

[1] 曹勤, 刘砚华, 魏复盛. 我国室内空气污染状况及防止建议[J]. 中国环境监测, 2003, 19(5): 67-72.
Cao Qin, Liu Yanhua, Wei Fusheng. Indoor air pollution and the prevention recommendations in China[J]. Environmental Monitoring in China, 2003, 19(5): 67-72.(in Chinese)

[2] 曹媛媛, 郭婷, 耿春梅, 等. 室内空气污染新状况及污染控制技术[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S2): 229-231.
Cao Yuanyuan, Guo Ting, Geng Chunmei, et al. New problems about indoor air pollution and the air purification technology of indoors air[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(S2): 229-231.(in Chinese)

[3] 刘晓途, 闫美霖, 段恒轶, 等. 我国城市住宅室内空气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2012, 25(10): 1077-1084.

Liu Xiaotu, Yan Meilin, Duan Hengyi, et al. Characteristics of indoor volatile organic compounds in urban residential microenvironments in China[J]. Research of Environmental Science, 2012, 25(10): 1077-1084.(in Chinese)

[4] 李晓曼, 张自全, 余世东. 新装修室内空气中甲醛与苯系物污染调查及分析——以四川省南充市为例[J]. 四川环境, 2015, 34(6): 70-74.
Li Xiaoman, Zhang Ziquan, Yu Shidong. Investigation and analysis of indoor formaldehyde and benzene series pollution in newly decorated room—a case of Nanchong in Sichuan Province[J]. Sichuan Environment, 2015, 34(6): 70-74.(in Chinese)

[5] 吴新颖. 装修后不同时期居民住宅室内空气污染状况调查[J]. 工业卫生与职业病, 2016, 42(1): 50-52.
Wu Xinying. Survey on indoor air pollution of residents in different periods after decoration[J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2016, 42(1): 50-52.(in Chinese)

[6] 李思, 黄国君, 高艾春. 装修住宅室内空气中甲醛和 TVOC 污染现状及分析[J]. 建材发展导向, 2016, 14(12): 62-65.
Li Si, Huang Guojun, Gao Aichun. Status and analysis of formaldehyde and TVOC pollution in indoor air of decorated houses[J]. Development Guide to Building Materials, 2016, 14(12): 62-65.(in Chinese)

[7] 冒冉. 基于 MSP430 单片机的便携式甲醛溶液浓度检测仪[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
Mao Ran. Portable Formaldehyde Detector Based on MSP430 Microprocessor[D]. Changchun: Jilin University, 2009.(in Chinese)

[8] 杜娟. 便携式现场甲醛检测仪的设计[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

(下转第 152 页)

- [34] Chen J , Zheng P , Yu Y , et al. Enrichment of high activity nitrifiers to enhance partial nitrification process [J]. Biore-source Technology , 2010 ,101(19) :7293-7298.
- [35] Holman J B , Wareham D G. COD , ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/denitri-fication process[J]. Biochemical Engineering Journal , 2005 , 22(2) :125-133.
- [36] 罗家海. 珠江广州河段局部水体溶解氧低的主要原因分析 [J]. 环境科学研究 , 2002 ,15(2) 3-11.
Luo Jiahai. The analysis of the primary cause of low dis-solved oxygen of partial water body in Guangzhou reach of the Pearl River[J]. Research of Environmental Science , 2002 ,15(2) 3-11.(in Chinese)
- [37] 高伟 , 陈岩 , 徐敏 , 等. 抚仙湖水质变化(1980-2011 年)趋势与驱动力分析[J]. 湖泊科学 , 2013 , 25(5) 635-642.
Gao Wei , Chen Yan , Xu Min. Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian(1980-2011)[J]. Journal of Lake Science , 2013 , 25(5) 635-642.(in Chinese)
- [38] 江素玫. 左江、右江及邕江的水质趋势分析[J]. 广西水利水电 , 2000(2) 36-39 43.
Jiang Sumei. Water quality tendency analysis of Zuojiang - Youjiang-Yongjiang River[J]. Guangxi Water Resource & Hydropower Engineering , 2000(2) 36-39 43.(in Chinese)
- [39] 黄辉金. 左江、右江及邕江水污染事故分析与对策[J]. 水资源保护 , 2004 , 20(4) 48-51.
Huang Huijin. Water pollution accidents in Zuojiang River , Youjiang River and Yongjiang River and some countermea-sures[J]. Water Resources Protection , 2004 , 20(4) 48-51. (in Chinese)
- [40] 刘潇 , 薛莹 , 纪毓鹏 , 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. 中国环境科学 , 2015 , 35(10) 3187-3192.
Liu Xiao , Xue Ying , Ji Yupeng , et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. China En-vironmental Science , 2015 , 35(10) 3187-3192.(in Chin-ese)
- [41] 罗贵文 , 滕燕媚. 百色市农业面源污染现状及防治对策[J]. 广西农学报 , 2013 , 28(1) 31-83.
Luo Guiwen , Teng Yanmei. The state and preventive mea-sures on agricultural non-point source pollution in Baise City [J]. Journal of Guangxi Agriculture , 2013 , 28(1) 31-83.(in Chinese)

(上接第 144 页)

- Du Juan. Design of Field Portable Formaldehyde Detector [D]. Zhengzhou Zhengzhou University , 2010.(in Chinese)
- [9] Kawamura K , Kerman K , Fujihara M , et al. Development of a novel hand-held formaldehyde gas sensor for the rapid de-tection of sick building syndrome[J]. Sensors and Actuators B :Chemical , 2005 ,105(2) 495-501.
- [10] Zhou K , Ji X , Zhang N , et al. On -line monitoring of formaldehyde in air by cataluminescence- based gas sensor [J]. Sensors and Actuators B :Chemical , 2006 ,119(2) 392-397.
- [11] Ho C , Lindgren E , Rawlinson K , et al. Development of a sur-face acoustic wave sensor for *in-situ* monitoring of volatile organic compounds[J]. Sensors , 2003 , 3(7) 236-247.
- [12] 张立春 , 罗兰 , 吕弋. 基于催化发光的挥发性有机物气体传-感器研究进展[J]. 中国科技论文在线 , 2010 , 5(9) :736-742.
- [13] HJ 193-2013 , 环境空气气态污染物 (SO₂ , NO₂ , O₃ , CO)连-续自动监测系统安装验收技术规范[S].
HJ 193-2013 , Technical Specifications for Installation and Acceptance of Ambient Air Quality Continuous Automated Monitoring System for SO₂ , NO₂ , O₃ and CO[S].(in Chinese)