

基于聚偏氟乙烯的柔性呼吸传感器研制和性能研究

薛 君¹ 辛 毅²

(1.山西工程职业学院自动化工程系,太原 030009;

2.吉林大学仪器科学与电气工程学院,长春 130061)

摘 要 鉴于睡眠呼吸暂停综合症实时监测的必要性,设计了一种基于聚偏氟乙烯(PVDF)的便携式柔性呼吸传感器。采用环膜结构作为整体结构,以亲肤凝胶为基底,粘贴在人体腹部。利用 ANSYS Workbench 18.0 的 ACT-PiezoAndMEMS-v180.1 压电分析模块对 PVDF 环膜结构进行应力变形分析,找出能够产生最大变形效应的拱高作为最佳设计结构,旨在采集最强呼吸信号。另外通过信号调理电路放大采集信号,输出标准的呼吸电压信号。经过人体佩戴测试,得出正常呼吸波形图和呼吸暂停波形图。测试波形数据结果显示:该传感器测量准确,可实现家庭就地实时监控,为后续该结构在家庭监护方向的推广提供了依据,也为与之配套的监控系统开发奠定了基础。

关键词 压电分析,柔性呼吸传感器,ANSYS,环膜结构,聚偏氟乙烯

Development and property of flexible respiratory sensor based on PVDF

Xue Jun¹ Xin Yi²

(1.Department of Automation Engineering,Shanxi Engineering Vocational College,Taiyuan 030009;

2.College of Instrumentation and Electrical Engineering,Jilin University,Changchun 130061)

Abstract In view of the necessity of real-time monitoring of sleep apnea syndrome, a portable flexible respiratory sensor based on PVDF was designed. The annular membrane structure was used as the whole structure, and the skin gel was used as the substrate, which was pasted on the abdomen of the human body. The act-piezoandmems-v180.1 piezoelectric analysis module of ANSYS workbench 18.0 was used to analyze the deformation of the PVDF ring membrane structure, and the arch height which can produce the largest deformation effect was found as the best design structure. The purpose of this analysis was to collect the strongest respiratory signals. In addition, signal conditioning circuit amplified the acquisition signal and outputed the standard respiratory voltage signal. The normal respiratory waveform and apnea waveform were obtained by human body wear test. The test results shown that the sensor was accurate in measurement, which provided a basis for the further promotion of the structure in the direction of family monitoring, and also layed a foundation for the development of the corresponding monitoring system.

Key words piezoelectric analysis, flexible respiratory sensor, ANSYS, ring membrane structure, PVDF

睡眠呼吸暂停综合症至今无法确定其发病的根本原因,但其危害极大,会引起高血压等并发症,甚有发生夜间猝死的风险。因此,夜间实时监控患者的睡眠情况尤为重要,但传统的多导睡眠图检测方法要求患者全身佩戴多根导线,而且必须在医院进行住院监测,给患者造成了极大的经济和精神负担。本实验旨在研究一种便携式的呼吸检测传感器,使患者可在家进行实时监控^[1-7]。

本研究创新地提出了一种可以粘贴在人体的柔性呼吸信号采集装置,该采集装置采用聚偏氟乙

烯薄膜为主要采集介质,设计了拱形环膜结构。借助 ANSYS Workbench 18.0 的 ACT-PiezoAndMEMS-v180.1 压电分析模块对不同拱形结构进行了应力变形 Total Deformation 分析,旨在寻找测量呼吸信号的最佳拱形结构。

1 柔性呼吸传感器信号采集器的设计

1.1 材料的选用

因聚氯乙烯(PVDF)压电薄膜是一种新型高分子压电换能材料^[8-16],具有独特的介电效应、压电效

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(51303062);山西省重点研发计划项目(201703D121002);山西省面上青年基金(201701D221104);山西省软科学研究一般项目(2017041014-2);山西省教育科学规划课题(GH-18141、GH-18142)

作者简介:薛君(1983-),女,硕士,讲师,主要从事智能传感器监控方面的研究。

应和热释电效应,采用 PVDF 压电薄膜制成的采集器对呼吸信号进行采集。PVDF 压电材料($20\mu\text{m}$, 锦州科信电子材料有限公司)的性能指标见表 1。

表 1 PVDF 压电膜的性能指标

性能	参数
压电应变常数/ $(\text{PC}\cdot\text{N}^{-1})$	$d_{31}=17$
	$d_{32}=5$
	$d_{33}=21$
压电电压常数/ $(\text{V}_\text{m}\cdot\text{N}^{-1})$	200×10^{-3}
相对介电常数(1kHz)	9
声速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2000
声阻抗	$2.5\sim 3$
机电耦合系数/%	$10\%\sim 1\%$
体积电阻率/ $(\Omega\cdot\text{cm})$	10^3
热释电系数/ $(\text{c}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	40
断裂伸长/%	$20\sim 50$
杨氏模量/GPa	2.5
屈服强度/MPa	$45\sim 55$
断裂拉伸强度/MPa	$45\sim 50$
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.78×10^3
泊松比	0.3
使用温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-40\sim 80$

PVDF 压电薄膜因为是高分子材料,在使用时不能焊接,因此本实验采用粘接方式进行设计。因不宜直接用手接触 PVDF 薄膜,在设计过程中,全程需佩戴手套进行操作。

1.2 结构设计

PVDF 薄膜具有质轻、柔软和高韧度的特点,能够很好地与被测物体相适应,其声阻抗与人体声阻

抗相近,特别适合做医疗器件的传感器元件。本实验采用 PVDF 压电薄膜制成呼吸传感器信号采集器。整体设计采用“环膜结构”,选用一种亲肤凝胶材质作为传感器基底,整体结构和实物图见图 1。

PVDF 压电薄膜采用环膜结构,跨度 50mm ,宽度 30mm 。采用恢复弹性较好的塑胶材料做支撑。选用亲肤凝胶材料做基底,该亲肤凝胶材质可以很好地贴合在人体表面,无刺激,没有过敏反应,适合于整夜佩戴。同时,由于粘贴在人体上,牢固性好,当患者身体翻动时也不至于脱落,并且佩戴后无任何感觉,也不会造成患者佩戴的不适感和过重的心理负担。考虑到人体佩戴的舒适性,基底尺寸为长 100mm ,宽 50mm 。

1.3 佩戴位置确定

找出产生较强呼吸信号的位置,就找出了产生呼吸应力最强的位置,PVDF 柔性传感器就能测得最强的信号。由此,了解呼吸运动的机理非常重要。呼吸运动是指胸腔有节律的扩张和缩小,它引起人体起伏较大的部位有助间、膈肌和腹部 3 个位置。因腹部比较平坦,容易进行固定测试,并且考虑到测试的舒适性和人性化,本实验选择“腹部”作为佩戴位置进行测量。

2 测量原理及性能指标

PVDF 薄膜是一种绝缘体,上、下表面用导电材料覆盖,在电学上可认其为电容。当作用在 PVDF 压电薄膜上的被测量应力发生变化时,会在其两侧出现异性电荷^[17-21],因而可以将 PVDF 压电薄膜视为一个电荷源。把 PVDF 薄膜看成一个六面体,它在空间 X、Y、Z 这 3 个方向的正应力 σ 和剪应力 τ 分布情况见图 2。

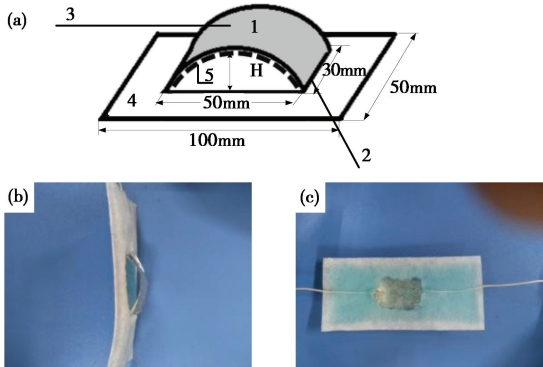


图 1 PVDF 柔性传感器信号采集器结构和实物图
[(a)PVDF 传感器信号采集器整体结构(1:PVDF 压电薄膜, 2、3:信号线,4:恢复弹性较好的塑胶材料,5:亲肤凝胶材料); (b)实物图的侧视图;(c)实物图的俯视图]

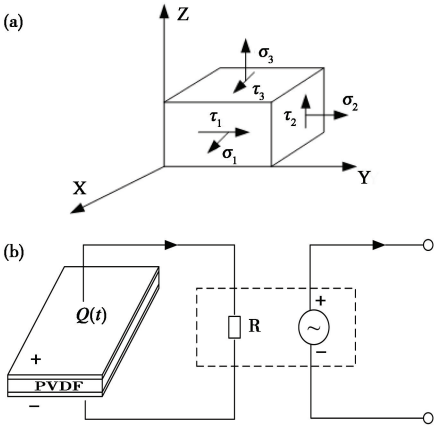


图 2 PVDF 微单元与换能模型图
[(a)PVDF 微单元受力情况;(b)PVDF 换能模型]

对 3 个方向的面产生的电荷进行分析,对应力矢量矩阵 $F = \{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \tau_1 \tau_2 \tau_3\}$, PVDF 的压电系数矩阵见式(1)。

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,压电常数 d_{ij} 中 i 表示产生电荷的面, j 表示受力方向。式(1)表明, PVDF 薄膜与其他压电材料不同,其仅在受到几个特定的方向力时方能产生压电效应,并且有 $d_{15} = d_{24}$,其值与 d_{31} 、 d_{33} 相差接近两个数量级,因此实际运用中 $d_{15} = d_{24} \approx 0$ 。

假设 PVDF 微单元的上下两端面镀有电极,成为一个换能电容,如图 2(b)所示,当作用在微单元上的应力变化时,将在电容两极生成电荷,见式(2)。

$$\Delta q = \sum_{i=1}^3 d_{3i} \Delta \sigma_i \quad (2)$$

式中, Δq 为单位面积上产生的电荷, C; $\Delta \sigma$ 为各向应力的变化量, N; d_{3i} 为各向压电常数。

对于任一特定的 PVDF, 它的 d_{3i} 是固定不变的, Δq 大小取决于 $\Delta \sigma$ 。

从图 1 可知, PVDF 环膜结构的跨度和宽度已经确定, 佩戴位置也已经确定, 即应力的大小已经确定。在特定的环膜结构中, 要产生最大的变化量 $\Delta \sigma$, 唯有改变环膜结构的拱高, 从而寻找产生最大应力变化量的拱高作为设计最佳尺寸, 获得较大的 Δq , 提高 PVDF 呼吸传感器型号采集的灵敏度。

3 PVDF 柔性传感器信号采集器拱高的确定和性能仿真

本实验选择了仿真功能强大的 ANSYS Workbench 18.0 并配以压电分析插件 ACT-PiezoAnd-MEMS-v180.1 对环膜结构在不同拱高下的应变大小进行仿真。步骤具体如下:

模型中定义了“pvdmaterial”材料, 设置了如表 1 给出的 PVDF 材料属性参数, 包括密度、压电矩阵、介电常数和柔度矩阵、杨氏模量、泊松比等。运用 ANSYS Workbench 18.0 自带的 SCDM 软件绘制仿真模型。采用软件自带的网格划分功能进行网格的划分。固定环膜结构面, 边界添加垂直于环膜面力荷载 1N, 模拟呼吸时腹部传递给传感器的压力。在仿真过程中, 最重要的是借助 AYSYS Workbench 压电分析的特定模块 ACT-PiezoAnd-MEMS-v180.1, 增加了荷载面的压电结构 (piezoelectric body) 的结构属性。结构属性的设定和力荷

载的添加如图 3 所示。

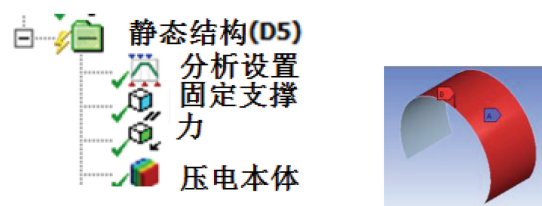


图 3 静态结构属性设置和荷载的添加示意图

最后进行应力变形 Total Deformation 的求解, 求解结果见图 4。

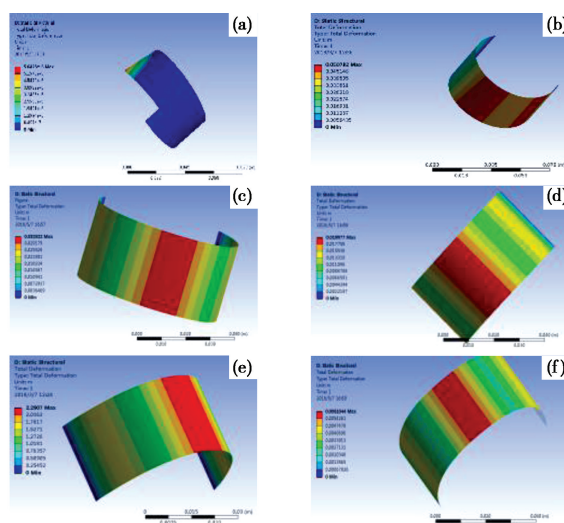


图 4 典型拱高的变形仿真结果

[(a)拱高 50mm; (b)拱高 45mm; (c)拱高 40mm; (d)拱高 35mm; (e)拱高 30mm; (f)拱高 20mm]

从图 4 的仿真结果提取变形大小数据, 结果见表 2。

表 2 PVDF 压电薄膜不同拱高时的变形大小一览表

序号	拱高/mm	最大变形/mm
1	50	5.8473×10^{-3}
2	45	0.25396
3	40	32.822
4	35	19.977
5	30	11.454
6	20	6.1044

由表 2 可见, 当环膜圆弧顶端到基底的高度——拱高为 40mm 时, 环膜结构的变形最大, 故本实验采用拱高为 40mm 的环膜结构进行设计。

4 PVDF 传感器信号采集器测试与信号调理

4.1 信号采集器测试

图 5 显示了被测试者在腹部佩戴该呼吸传感器

信号采集元器,采取仰卧姿势,呼吸率为 19 次/min (为人体正常范围)时的测试情况。



图 5 人体模拟测试图

采用该元件测得正常呼吸信号电压波形见图 6。

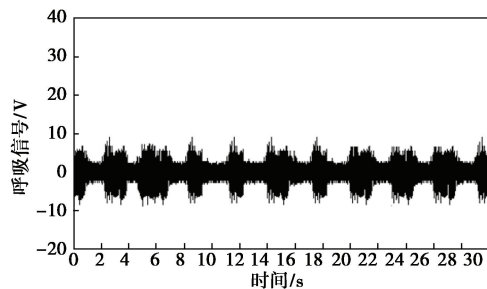


图 6 正常呼吸信号检测波形图

采用该元件测得有呼吸暂停的呼吸信号电压波形见图 7。

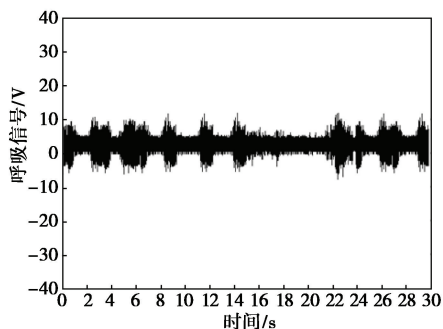


图 7 呼吸暂停患者波形图

由图 6 和图 7 可知,该信号中有许多其他的杂波需要进行处理,因此需要加二次信号处理单元,即信号调理电路。

4.2 信号调理

PVDF 压电薄膜在人体呼吸时,腹部对其产生压力后产生压电效应形成电荷累加,从而在 PVDF 上下表面形成电压信号,经过对电压信号的放大、滤波环节,为信号输出端提供通用的 $\pm 5\text{V}$ 电压信号。

信号采集电路见图 8。

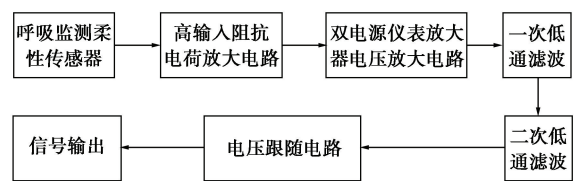


图 8 信号调理电路图

采用该调理电路处理图 6 中的腹部呼吸信号波形,结果见图 9。由图可见,呼吸电压信号范围在 $-5\text{V}\sim 5\text{V}$ 之间,电压峰值大于 4.5V 。呼吸间隔大约是 $3\text{s}/\text{次}$ 。

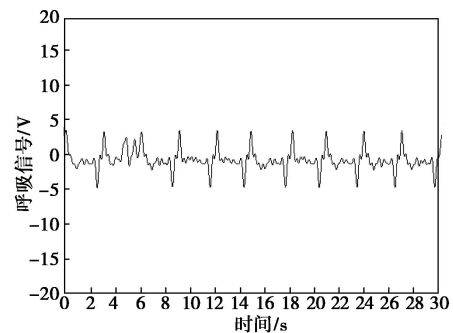


图 9 滤波后的呼吸信号变化情况图

另外,对图 7 进行滤波,得到呼吸暂停信号波形,见图 10。

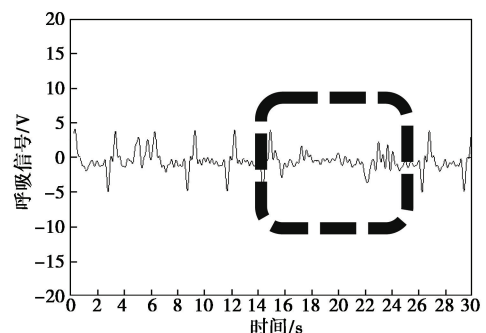


图 10 呼吸暂停信号处理后的波形图

由图可见,在 $14\sim 24\text{s}$ 的 10s 中,只出现了 1 个峰值(大于 4.5V),只有一次有效呼吸,说明在此期间出现了呼吸暂停现象,暂停曲线已在图中用黑色虚线标示。

图 9 和图 10 的信号均符合工业用标准,适合作为进一步监控系统开发使用。

5 结论

本研究创新地设计了一种基于 PVDF 压电薄膜的柔性传感器用以监测睡眠呼吸暂停患者的呼吸信号,采用环膜结构,选用恢复性好的弹性塑胶作为恢复介质。亲肤凝胶材质设计制成的基底可以很好

地粘合在人体的腹部。利用 ANSYS Workbench 18.0 对该柔性传感器不同拱高下的应力变形仿真,得出拱高为 40mm 时信号输出最佳的结论。检测信号通过信号调理电路的信号处理,滤波,产生 $\pm 5V$ 的标准工业用电压信号,为后续监控系统的开发奠定了基础。在人体系统模拟测试中,呼吸信号曲线真实地反映了被测试者的呼吸状态,测试准确,可作为临床患者呼吸实施监控的重要手段。

参考文献

- [1] 马春燕,陈志军.呼吸睡眠暂停综合征病情严重程度的影响因素及护理[J].当代护士,2016(2):22-23.
- [2] 李惠.医务人员对于睡眠呼吸暂停低通气综合征的认知[D].广州:南方医科大学,2016.
- [3] 孙薇.睡眠呼吸暂停综合征的监测与治疗关键算法研究[D].广州:南方医科大学,2014.
- [4] Giannelis P, Bullett A, Capiner L. Multifunctional piezopolymer film transducer for structural health monitoring applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2017(99):1.
- [5] 白凤仙.非接触 PVDF 压电悬臂梁风能收集系统特性研究[J].压电与声光,2019,41(1):124-126.
- [6] 程文才,张庆印.聚偏氟乙烯膜的应用研究进展[J].化工新型材料,2018,46(3):1-4.
- [7] 肖占胜.基于 PVDF 压电薄膜的新型电子皮肤研究[J].化工新型材料,2018,46(5):48-50.
- [8] 赵世怀.PVDF-PVA 复合膜的制备与性能研究[J].化工新型材料,2018,46(5):60-63.
- [9] 张宇.浅谈聚偏氟乙烯压电薄膜的制备方法[J].化工新型材料,2018,46(10):227-231.
- [10] 郭超.基于压电薄膜传感器的可穿戴睡眠监测系统[D].长春:吉林大学,2017.
- [11] 千承辉,李芮林,李冰洋,等.基于多传感器数据融合的仿生机械手研究[J].压电与声光,2017,39(4):490-493.
- [12] 辛毅,田红英,蒋琪,等.基于 Labview 的 PVDF 压电薄膜触觉识别系统[J].压电与声光,2015,37(5):793-801.
- [13] 时璐.弧形 PVDF 传感器的灵敏度研究与制作[D].大连:大连理工大学,2016.
- [14] 谢娜.基于 PVDF 的三维触觉-热觉传感器的设计与仿真[D].重庆:重庆大学,2014.
- [15] 唐高峰.有机压电材料的多物理场耦合特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [16] Assefa S Z, Diaz-Abad M, Korotinsky A, et al. Comparison of a simple obstructive sleep apnea screening device with standard in-laboratory polysomnography[J]. Sleep & Breathing, 2016,20(2):1-5.
- [17] 罗大星.集中荷载下预应力环形薄膜的变形问题研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [18] 王南飞,李强,谷宇.基于 ANSYS 的新型聚合物石英压电传感器振动性能分析[J].工程科学学报,2017,39(2):301-308.
- [19] 崔宜梁,王海峰,段爱等.基于 ANSYS WORKBECH 的柔性压电发电装置的仿真分析[J].青岛大学学报,2016,29(4):58-63.
- [20] 石鑫.基于 PLC 的病房呼叫系统[J].电子器件,2016,40(6):1593-1598.
- [21] 薛君.新型柔性呼吸传感器的设计与性能研究[J].机械工程与自动化,2018(6):21-22.
- 收稿日期:2019-02-26
修稿日期:2019-08-12
- *****
- (上接第 103 页)
- [8] Bai G M, Dai H X, Deng J, et al. Porous NiO nanoflowers and nanourchins: highly active catalysts for toluene combustion[J]. Catalysis Communications, 2012,27(19):148-153.
- [9] Gao Q, Zeng W, Miao R. Synthesis of multifarious hierarchical flower-like NiO and their gas-sensing properties[J]. Journal of Materials Science Materials in Electronics, 2016,27(9):9410-9416.
- [10] Yang F C, Guo Z G. Engineering NiO sensitive materials and its ultra-selective detection of benzaldehyde[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2016,467:192-202.
- [11] Miao R, Zeng W, Gao Q. SDS-assisted hydrothermal synthesis of NiO flake-flower architectures with enhanced gas-sensing properties[J]. Applied Surface Science, 2016,384:304-310.
- [12] Feng C, Kou X, Chen B, et al. One-pot synthesis of In doped NiO nanofibers and their gas sensing properties[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2017,253:584-591.
- [13] Lu Y, Ma Y H, Ma S Y, et al. Curly porous NiO nanosheets with enhanced gas-sensing properties[J]. Materials Letters, 2017,190:252-255.
- [14] Deng X, Zhang L, Guo J, et al. ZnO enhanced NiO-based gas sensors towards ethanol[J]. Materials Research Bulletin, 2017,90:170-174.
- [15] Wang X F, Ma W, Jiang F, et al. Prussian blue analogue derived porous NiFe_2O_4 , nanocubes for low-concentration acetone sensing at low working temperature[J]. Chemical Engineering Journal, 2018,338:504-512.
- [16] 王金兴,于连香,王浩铭,等. Ce 掺杂 InO 纳米纤维的制备及其三乙胺气敏性能[J]. 物理化学学报, 2010,26(11):3101-3105.
- [17] Wang C, Cheng X Y, Zhou X, et al. Hierarchical- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{NiO}$ composites with a hollow structure for a gas sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014,6:12031-12037.
- [18] Balamurugan C, Maheswari A R, Lee D W. Structural optical, and selective ethanol sensing properties of p-type semiconducting CoNb_2O_6 nanopowder[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2014,205:289-297.
- [19] Tan W H, Tan J F, Fan L R, et al. Fe_2O_3 -loaded NiO nanosheets for fast response/recovery and high response gas sensor[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2017,256:282-293.
- [20] 曾文,林志东,高俊杰.金属离子掺杂纳米 SnO_2 材料的气敏性能及掺杂机理[J].纳米技术与精密工程,2008,6(3):174-179.
- [21] Khorshidi G, Behzad M, Jahromi H S, et al. Influence of metal (W, Pd)-doping on gas sensing properties of the NiO flower-like thin films for o-xylene detection[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018,737:122-129.
- 收稿日期:2018-07-13
修稿日期:2019-08-23