

文章编号:1002-2082(2018)04-0545-06

便携式非分光红外 SF₆ 气体检测方法研究

沈 婉¹, 常建华^{1,2}, 赵勇毅¹, 赵正杰¹, 裴 昱¹

(1. 南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要:为了满足电力系统中对 SF₆ 气体精确测量的需求, 基于非分光红外差分检测原理, 设计了一种便携式的 SF₆ 气体传感器。系统采用单光束双波长结构, 对直射式和梯形反射式气室进行光学仿真, 最终确定了气室类型, 提高了系统的紧凑性和灵敏度。在电路方面设计了一种小信号放大滤波电路, 有效地将有用信号从噪声中提取出来; 传感器采用高精度高性能模数转换器将模拟电信号转换为数字信号送入单片机处理, 大大提高了检测精度。实验结果表明, 该传感器能够准确检测体积分数为 $0 \sim 2 \times 10^{-3}$ 范围内的 SF₆ 气体, 满量程精度可达 4.2%。

关键词: SF₆ 气体; 气室仿真; 放大滤波; AD 转换

中图分类号: TN219; TP219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO201839.0403005

Research on method of portable NDIR SF₆ gas detection

Shen Wan¹, Chang Jianhua^{1,2,3}, Zhao Yongyi¹, Zhao Zhengjie¹, Pei Yu¹

(1. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to satisfy the actual need of accurate measurement of SF₆ gas concentration in the electrical system, a portable SF₆ gas sensor was designed based on non-dispersive infrared (NDIR) differential detection principle, which adopted the single-beam and dual-wavelength optical structure. In order to improve the compactness and sensitivity of the system, the optical simulations of the straight and trapezoidal reflective gas chambers were carried out, and the gas chamber type was finally determined. As for designing hardware circuit, a small signal amplification filter circuit was designed to effectively extract the useful signal from the noise. The sensor uses the high precision and performance analog-to-digital converters to convert analog electrical signals into digital signals into single chip processor, which greatly improves the detection accuracy. The experimental results show the sensor can accurately measure the SF₆ concentration in a range of $0 \sim 2 \times 10^{-3}$, with the full range accuracy up to 4.2%.

Key words: SF₆ gas; gas chamber simulation; amplification and filtering; AD conversion

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11374161); 江苏省重点研发计划(BE2016756); 江苏高校优势学科 II 期建设工程; 江苏省高校品牌专业建设工程资助项目; 国家级大学生实践创新训练计划项目(201610300030, 201710300015)

作者简介: 沈婉(1993—), 女, 江苏南京人, 硕士, 主要从事光电传感技术研究。E-mail: 243805426@qq.com

导师简介: 常建华(1976—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事光子学与光器件、光电传感与应用技术研究。

E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

引言

六氟化硫(SF₆)因具有良好的电气绝缘性能及优异的灭弧性能,广泛用于电力系统中,但 SF₆ 气体在配电设备运行过程中容易泄漏,不仅会影响设备的绝缘强度,还会对环境产生较强的温室效应,同时也将危害人身安全,因此对配电设备中的 SF₆ 气体进行精确检测至关重要。传统的用于 SF₆ 气体浓度(体积分数)的检测技术主要是对电力设备进行真空监视和压力检查,通过皂水查漏法进行气体泄漏检测。随着带电检漏仪器的逐渐发展,气体泄漏的检测水平得到了大幅度提高,但在实际使用中仍存在不足,如易受环境等因素影响导致检测精度不高、使用寿命较短等。随着人们对 SF₆ 气体光学性质的深入研究,新的检测技术得到不断发展,如光声光谱技术和红外吸收技术等。相比于光声光谱技术,红外吸收技术稳定性更高、响应时间更短、成本更低,因此在气体检测领域得到广泛应用。

红外吸收技术的理论依据是不同的气体分子对红外光有着不同的特征吸收峰,所以能够准确的测量出 SF₆ 气体的浓度。本文基于红外光谱的特征吸收原理,设计了一种便携式的非分光 SF₆ 气体检测装置。该系统利用单光束双波长的光学结构,辅以合理的气室结构设计,将有用信号经过放大滤波处理后,再经过高精度的 AD 转换器转换成数字信号传输至单片机进行数据处理,有效地提高了传感器的检测精度、稳定性和使用寿命^[1]。

1 非分光红外差分检测原理

本设计 SF₆ 气体传感器是基于红外光谱吸收原理设计而成。根据红外光谱吸收理论,当一束红外光照射气体分子时,若某频率的红外光与气体分子中某基团的振动频率相同,则该频率的红外光被气体分子吸收,其吸收强度与该气体浓度有关。SF₆ 气体在中红外区有一个比较明显的吸收峰,其中心波长位于 10.55 μm 处,其红外强度是以指数关系递减的,此光强吸收关系称为朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律:

$$I = I_0 e^{-kIx} \quad (1)$$

式中: I 表示衰减后的出射光强度; I_0 表示入射光强度; x 表示气体浓度; l 为光源与探测器间的等效光学路径长度; k 为待测气体对入射红外光强度的

吸收系数^[2]。

本设计通过热释电探测器检测红外光能量的变化,并将其转换成电压信号来确定待测气体浓度。其原理是利用热释电效应,即在钽酸锂一类晶体的上下表面设置电极,当红外线间歇地照射时,其表面温度上升,自发极化强度发生改变,在上下电极之间产生电压。仅仅依靠 I 和 I_0 的差值来检测气体浓度是不够的,因为这种单光束单波长的技术,会受到光源波动,红外探测器转换效率及电路元器件漂移等问题的干扰,导致检测精度不高^[3]。

为了抑制上述随机因素造成的干扰,在气体传感器的设计上采用单光束双波长的差分吸收检测技术。如图 1 所示,将红外光束分成两路:一路是中心波长与 SF₆ 气体红外吸收峰波长重叠的测量通道;一路是任何气体对其几乎都没有吸收的参比通道。使用参比通道可消除光源辐射衰减或气室环境波动引起的测量误差,提高传感器的灵敏度及可靠性^[4]。

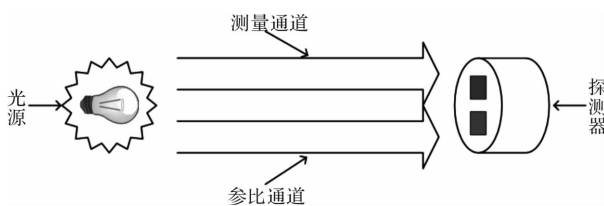


图 1 单光束双波长示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-beam dual-wavelength

结合理论分析与实际应用,为消除干扰因素影响,提出了基于非分光红外差分检测原理的设计方案^[5]。本设计主要是由光路系统和电路系统组成的,采用 2 Hz 脉冲方波对红外光源进行电调制,摒弃了传统的分光系统,采用在探测器上集成滤光片的方式,使得测量通道和参比通道的电信号能够提取出来,并通过小信号放大滤波电路,放大至适合 AD 转换器处理的量级电压,最终送入单片机处理。

2 光路系统设计

本设计针对两种不同类型的采样气室进行光路仿真分析,一种是直射式气室,另一种是梯形反射式气室。在直射式气室中,进气口与出气口设置在采样气室的上方,光源与探测器分别位于采样气室的两端且三者位于同一光学中心轴上,可

使探测器较为均匀地接收红外辐射^[6-7]。通过对直射式气室光线追迹仿真可知,红外光源发出的光线经过抛物面反光杯反射后,大部分光线垂直射入探测器,如图 2 所示。

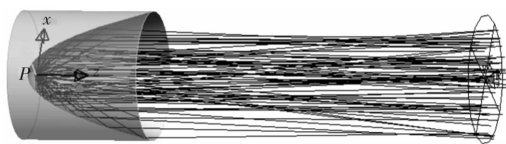


图 2 直射式气室光线追迹图

Fig. 2 Ray tracing of straight gas chamber

通过图 3 的光线散射体表图可知,光线经过反光杯反射后,探测器接收到的红外光强呈现均匀集中的状态,且辐射范围较大。红外光线能完全覆盖在测量通道和参比通道的滤光片上,测量结果较为准确。

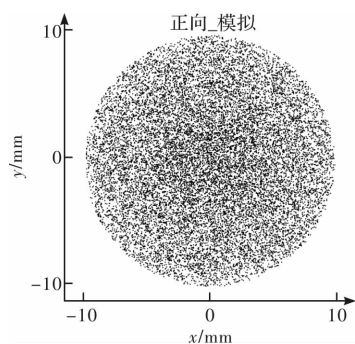


图 3 直射式气室的散射体表图

Fig. 3 Scattering body diagram of straight gas chamber

在梯形反射式气室的设计中,红外光源与探测器分别垂直放置在梯形气室的两腰斜面上,光线经过光源外层的反光杯反射后,投射到气室顶端的反光镜上,再反射到探测器中心的滤光片上。如图 4 所示,为梯形反射式气室的红外光线追迹图。

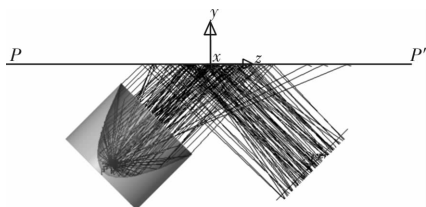


图 4 梯形反射式气室光线追迹图

Fig. 4 Ray tracing of trapezoidal reflective gas chamber

在 LightTools 仿真软件中,通过 1:1 放置光源和探测器以及设定光线数量和光照强度,可直观看探测器接收到的表面光强分布情况。图 5

为梯形反射式气室的散射体表图。结果显示,探测器表面接收到的光强主要集中在中心处,也就是滤光片上,这样有利于分离特定波长的红外光,提高检测灵敏度。

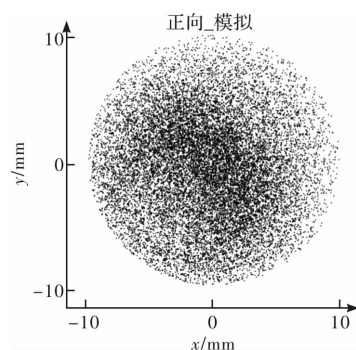


图 5 梯形反射式气室的散射体表图

Fig. 5 Scattering body diagram of trapezoidal reflective gas chamber

从上述两种气室的光路仿真结果分析可知,梯形反射式气室相比于直射式气室而言,红外光线能够更加集中地照射到探测器的表面,并且梯形反射式气室长度更短,有利于小型化、便携式设计。在梯形气室内壁表面镀膜以增强红外光线的反射,同时减少外部环境的干扰。

3 电路系统设计

3.1 信号调理电路设计

热释电探测器的输出信号非常微弱,约有几百微伏,很容易淹没在电路噪声中,所以电路设计既要将有用信号放大到采样电路能够采样的量级,也要将其从强背景噪声中提取出来^[8]。为了将微伏级的信号放大至伏级的量级,采取两级放大的方式。如图 6 所示,为信号调理电路图,考虑到本电路设计中的运算放大器需要具备高增益和极低的失调电压与漂移^[9],因此采用性能良好的运放芯片可以提高放大电路的性能。

在信号放大电路的第一级中,探测器信号输出端连接运算放大器的同向输入端,电阻 R_5 和 R_8 组成第一级的反馈网络,同时为了增强抗干扰能力,在反馈电阻两端并联电容来抑制高频噪声;在第二级放大电路中, R_1 和 R_2 同样组成电压串联负反馈网络,只需要调节电阻值大小即可改变增益。电路的增益计算为

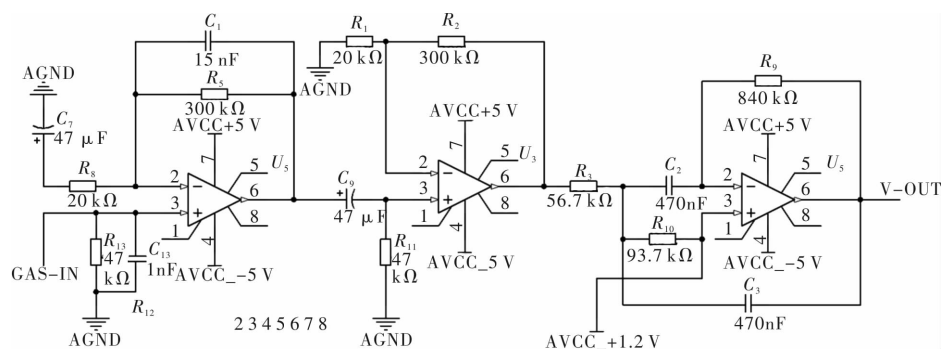


图6 信号调理电路图

Fig. 6 Signal conditioning circuit diagram

$$A_1 = 1 + \frac{R_5}{R_8} \quad (2)$$

$$A_2 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

探测器信号经过两级放大后进行滤波处理,采用的是无限增益多路反馈有源滤波器。图6中 R_9 和 C_3 构成了2个反馈支路,反馈强弱与信号频率有关。本电路中根据所需的滤波器中心频率和品质因素来设定各个参数的值,该滤波器的中心频率为

$$f_0 = \sqrt{(R_3 + R_{10}) / (R_3 R_9 R_{10})} / (C_2 + C_3) \pi \quad (4)$$

本设计采用2 Hz频率调制,因此根据公式各参数取值如下:

$$R_3 = 56.7 \text{ k}\Omega; R_9 = 840 \text{ k}\Omega; R_{10} = 93.7 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

$$C_2 = C_3 = 470 \text{ nF} \quad (6)$$

其中心频率对应的放大倍数为

$$H(jf_0) = -R_9 / ((1 + C_2/C_3)R_3) \quad (7)$$

电路的幅频特性实测波形如图7所示,①是两级放大后的波形,②是经过滤波后的波形图,观察可知,两级放大后的波形经过中心频率为2 Hz的带通滤波器后,噪声衰减明显,滤波效果好,抗干扰能力强。

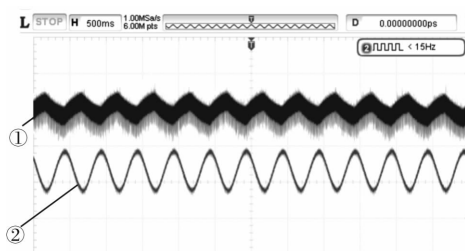


图7 电路的幅频特性实测波形

Fig. 7 Measured waveform of amplitude-frequency characteristics of circuit

3.2 AD转换电路设计

探测器将两路光信号转换成电信号后,经过放大滤波产生两路模拟信号:测量电信号和参比电信号。为满足高精度检测 SF₆ 气体浓度的要求,本设计采用 ADS1256 芯片将模拟信号转换成数字信号送入单片机中进行数据处理。ADS1256 是 TI 公司推出的 8 通道 24 位高精度的高性能模数转换器。本设计使用模拟多路开关寄存器将其配置为两路单级输入的模式,将测量电信号和参比电信号分别输入到两路通道中进行模数转换。ADS1256 采用四线制 SPI 通信方式将转换后的数字信号传输至单片机中进行数据处理和浓度计算。

3.3 光源驱动电路设计

热释电探测器是利用热释电效应探测辐射能量的器件,当红外光辐射强度变化导致热释电晶体表面温度变化时,引起其表面极化电荷的变化,从而产生电势差,输出电信号。由于只有不断变化的红外光照射,热释电探测器才有电信号输出,所以本设计通过单片机内部的定时器产生 2 Hz 频率的方波脉冲调制红外光源,使得探测器接收到变化的红外光强^[10]。由于红外光源工作时功率较大,而单片机端口输出的电流很小,不足以驱动红外光源工作,所以传感器设计有光源驱动电路,其电路图如图8所示,PA1 连接单片机调制信号输出端口,QD1 连接红外光源供电正极端,通过方波脉冲的高低电平来驱动红外光源工作于 2 Hz 频率变化的状态。在系统电源供电设计中,红外光源单独供电,不与系统中其他器件共用电源,以免光源调制造成的电压回落影响其他器件正常工作。

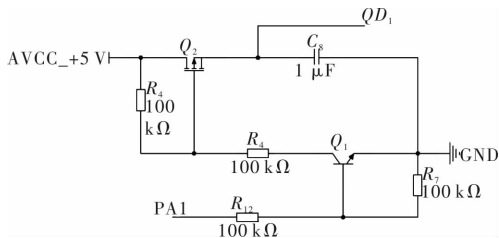


图 8 光源驱动电路

Fig. 8 Light source drive circuit

4 实验结果与讨论

理论上,红外光强衰减程度与 SF₆ 气体浓度

(体积分数)遵循朗伯-比尔定律,但是实际应用中,受光散射、入射角度以及环境等因素影响,通过朗伯-比尔定律公式不能准确计算出气体浓度。本设计采用标准浓度的 SF₆ 气体标定的方法^[11],建立 SF₆ 气体浓度与两路输出电压的关系,并拟合二者的函数曲线,确定浓度计算关系式。

浓度标定实验在标准大气压强和室温 25℃ 的环境条件下进行,通过对不同浓度的标准 SF₆ 气体下的测量通道和参比通道输出的电压比值进行分析,得到 SF₆ 气体吸收实验数据如表 1 所示。

表 1 SF₆ 气体浓度标定实验数据

Table 1 Experimental data of SF₆ gas concentration calibration

SF ₆ 浓度/ $\times 10^{-6}$	测量电压/V	参比电压/V	SF ₆ 浓度/ $\times 10^{-6}$	测量电压/V	参比电压/V
0	2.295 14	2.159 44	1 250	1.943 87	2.164 94
355	2.139 03	2.163 33	1 350	1.934 46	2.160 86
500	2.054 87	2.162 83	1 565	1.918 22	2.160 41
590	2.049 22	2.165 75	1 670	1.907 52	2.160 18
865	2.000 32	2.165 75	1 785	1.902 12	2.164 52
890	1.983 51	2.163 14	1 995	1.882 46	2.161 57
1 000	1.966 49	2.160 75	2 080	1.875 19	2.165 33

表 1 中读取到的电压值是 AD 转换后经单片机中防脉冲干扰平均滤波算法处理过所得到的数据。防脉冲干扰平均滤波算法相当于中位值滤波法加上算术平均滤波法,融合了两种滤波算法的优点,可消除脉冲性干扰所引起的采样值偏差。观察表 1 中数据可知,随着标准 SF₆ 气体浓度的增加,测量通道输出的电压值逐渐减小,而参比通道输出电压值基本不变。采用多项式拟合可得到测量电压和参比电压的比值与气体浓度间的函数曲线,如图 9 所示。

将拟合得到的函数关系式写入单片机中,实时采集的数据经单片机处理计算出当前环境中 SF₆ 气体浓度值,通入标准气体,得到实际测量浓度值如表 2 所示。

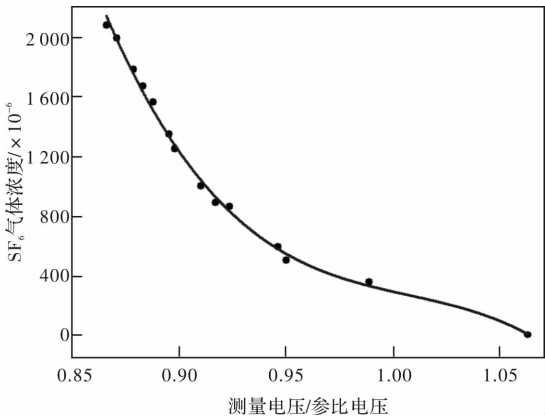


图 9 SF₆ 浓度与电压比值拟合曲线图

Fig. 9 Fitting curve of SF₆ concentration and voltage ratio

表 2 SF₆ 气体浓度实测数据

Table 2 Measured data of SF₆ gas concentration

标准气体浓度/ $\times 10^{-6}$	0	300	500	800	1 000	1 200	1 500	1 800
实测气体浓度/ $\times 10^{-6}$	21	375	564	884	1 064	1 235	1 540	1 823
绝对误差	21	75	64	84	64	35	40	23
满量程误差(FS)	1.05%	3.75%	3.2%	4.2%	3.2%	1.75%	2%	1.15%

由表 2 可知,当测量气体浓度为 8×10^{-4} 时,满量程误差(FS)最大为 4.2%,而随着 SF₆ 气体浓

度的升高,满量程误差呈现逐渐减小的趋势,因此检测高浓度气体时结果较为准确。

5 结论

本文设计了一种基于非分光红外差分检测原理的 SF₆ 气体传感器。本设计采用单光束双波长的检测技术,有效地消除了光源老化和光路不稳定等因素的影响。在光路上采用高性能的红外光源和热释电探测器,设计了梯形反射式气室并对其进行了光学分析,有效地提高了系统的稳定性,简化了系统结构。电路上设计了一种小信号放大滤波电路,可有效消除信号中混入的噪声;采用高精度高性能模数转换器,辅以防脉冲干扰平均滤波算法,可消除由于脉冲性干扰所引起的采样值偏差。在标定实验中,通过合理地函数拟合建立 SF₆ 气体浓度与电压比值的关系。实验结果表明,本文设计的 SF₆ 气体传感器体积分数检测范围在 $0 \sim 2 \times 10^{-3}$,分辨率为 1×10^{-6} ,检测精度为 4.2%,具有量程宽、精度高、稳定性好、寿命长和小型化等特点。可广泛应用于电力系统中各种 SF₆ 气体浓度检测场合。

参考文献:

- [1] LI Y C, LIANG Y Z, MA X S, et al. Experimental study of methane sensor based on the principle of infrared detection[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 590:651-655.
- [2] DING Lei, LIU Wenqing, ZHANG Yujun, et al. Investigation on remote measurement of automobile infrared absorption method[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(4):459-464.
丁蕾, 刘文清, 张玉钧, 等. 机动车尾气 CO 和 CO₂ 非分光红外遥测技术研究[J]. 量子电子学报, 2003, 20(4):459-464.
- [3] SUN Youwen, LIU Wenqing, WANG Shimei, et al. Influence of nonlinear absorption on simultaneous multi-gas analysis and Its modification method[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9):295-302.
孙友文, 刘文清, 汪世美, 等. 非线性吸收对多组分气体分析的影响及其修正方法[J]. 光学学报, 2012, 32(9):295-302.
- [4] LIU Yongping, WANG Xia, LI Shuaishuai, et al. Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1):189-195.
刘永平, 王霞, 李帅帅, 等. 基于红外技术的气体浓度检测方法研究[J]. 光子学报, 2015, 44(1):189-195.
- [5] BUDIMAN F, RIVAI M, PAMBAYUN J P F. Non-dispersive infrared (NDIR) sensor design and its application on alcohol detection; International seminar on intelligent technology & applications [C]. US: IEEE, 2016.
- [6] TAN Q, TANG L, YANG M, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74:103-108.
- [7] HODGKINSON J, SMITH R, HO W O, et al. Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2013, 186:580-588.
- [8] FRODL R, TILLE T. A high-precision NDIR gas sensor for automotive applications[J]. Sensors Journal IEEE, 2006, 6(6):1697-1705.
- [9] LIANG X F, LIU L H. Design on the amplifier circuit of metal-oxide semiconductor gas-sensitive sensor [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220-223(8):1939-1942.
- [10] SHEN C H, LI S T. Analysis of ultra-short pulse modulation for NDIR; International conference on circuits, devices and systems[C]. US: IEEE, 2017.
- [11] SUN Youwen, LIU Wenqing, WANG Shimei, et al. Measurement of a gas using none dispersive infrared technique with two analysis channels[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14):105-113.
孙友文, 刘文清, 汪世美, 等. 单组分双分析通道红外气体检测方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(14):105-113.